

赞皇杂岩瓮城地区长城系常州沟组砂岩碎屑 锆石 U-Pb-Hf 同位素研究

王乐乐^{1,2}, 刘平华², 周万蓬¹, 杜利林², 杨崇辉², 张 文², 曹秋香¹, 陈丽梅^{2,3}

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 常州沟组是华北克拉通太古宙-古元古代变质基底上最早的沉积盖层之一,其碎屑锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征分析对探讨长城系形成时代、源区特征以及基底演化均具有重要的研究意义。本文对华北克拉通中部赞皇杂岩瓮城地区长城系常州沟组底部砂岩样品进行了 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年和 LA-MC-ICP-MS 碎屑锆石 Lu-Hf 同位素分析。砂岩样品中碎屑锆石主要年龄峰值约为 2 500 Ma,推断其碎屑物质主要来自于华北克拉通新太古代晚期变质基底,而最年轻的碎屑锆石年龄为 1 822 Ma,结合赞皇杂岩变质基底普遍经历了 1 850~1 800 Ma 变质作用以及区域上上覆大红峪组火山岩中 1 635 Ma 结晶锆石年龄,限定瓮城地区长城系常州沟组沉积时代为 1 800~1 635 Ma。砂岩样品中碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-6.8~+5.2 之间,相应的两阶段模式年龄峰值约为 2 820 Ma,结合赞皇杂岩已发表的 2 900~2 700 Ma 岩浆锆石和碎屑锆石 Hf 同位素结果,进一步表明 2 900~2 700 Ma 为赞皇杂岩地壳生长最主要的时期。综合太行山中南部地区已发表的长城系常州沟组的沉积学与新的年代学数据,推测赞皇杂岩瓮城地区长城系常州沟组沉积于陆内裂谷盆地。

关键词: 华北克拉通; 赞皇杂岩; 常州沟组; 碎屑锆石; U-Pb-Hf 同位素

中图分类号: P588.2; P588.3; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0737-39

Detrital zircon U-Pb-Hf isotopic studies on sandstones in the Changzhougou Formation of the Changcheng System in Wengcheng area, Zanhuan Complex

WANG Le-le^{1,2}, LIU Ping-hua², ZHOU Wan-peng¹, DU Li-lin², YANG Chong-hui², ZHANG Wen²,
CAO Qiu-xiang¹ and CHEN Li-mei^{2,3}

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Changzhougou Formation is one of the oldest sedimentary cover on the Archean-Paleoproterozoic metamorphic basement of the North China Craton. The analysis for the U-Pb geochronology and Hf isotopes of the detrital zircons from the Changzhougou Formation is of great significance for exploring the formation age and source characteristics of the Changcheng System as well as the basement evolution. In this study, LA-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) and LA-MC-ICP-MS (laser ablation multiple inductively coupled plasma mass spectrometry) were employed to analyze detrital zircon U-Pb ages and rare earth element composi-

收稿日期: 2023-11-02; 接受日期: 2024-02-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20242923, DD20231649); 国家自然科学基金项目 (42372235, 42372237, 42272232, 41972205, 41672191); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费 (J2303)

作者简介: 王乐乐(1998-), 女, 硕士研究生, 地理学专业, E-mail: zhanghui01077@126.com; 通讯作者: 刘平华(1981-), 男, 研究员, 主要从事前寒武纪变质岩石学研究, E-mail: lph1213@126.com。

tions and Lu-Hf isotopic compositions of samples from the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area, Zhanhuang Complex, respectively. The main peak ages of detrital zircons in two sandstone samples is 2 500 Ma, and the detrital material of the quartz sandstones is mainly derived from the late Neoproterozoic metamorphic basement in the North China Craton, and the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of youngest detrital zircon is 1 822 Ma, combining with the 1 850 ~ 1 800 Ma metamorphic ages which was recorded by the Zhanhuang metamorphic basement and the 1 635 Ma age of magmatic zircon from the volcanic rocks in the upper Dahongyu Formation, further define that the initial depositional timing of Changzhougou Formation of Changcheng System in the Zhanhuang Complex is later than 1 800 ~ 1 635 Ma. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the detrital zircon from one quartz sandstone sample vary from -6.8 to +5.2, and the corresponding two-stage model peak age is 2 820 Ma. Combined with the published Hf isotope results of 2 900 ~ 2 700 Ma magmatic zircons and detrital zircons from the Zhanhuang Complex, it is further indicated that 2 900 ~ 2 700 Ma is the most important period of crustal growth in the Zhanhuang Complex. Integrating with the published sedimentary and new geochronological data of the Changzhougou Formation of the central and southern parts of the Taihangshan area, it is speculated that the Changzhougou Formation in Wengcheng area was deposited in the continental rift basin.

Key words: North China Craton; Zhanhuang Complex; Changzhougou Formation; detrital zircon; U-Pb-Hf isotopes

Fund support: Geological Investigation Project of the China Geological Survey (DD20242923, DD20231649); National Natural Science Foundation of China (42372235, 42372237, 42272232, 41972205, 41672191); Basic Research Foundation of Chinese Academy of Geological Sciences (J2303)

华北克拉通地壳具有基底与盖层组成的典型双层结构,其早前寒武纪变质基底经历了多期多阶段的构造演化,经吕梁运动形成了一个规模较大的结晶基底(伍家善等, 1998; Zhai and Santosh, 2011; Zhao and Zhai, 2013)。1 800 Ma 之后,华北克拉通进入相对稳定的沉积盖层发展阶段,从碰撞造山转变为长期的伸展过程(Wan *et al.*, 2011; 翟明国等, 2014),相应地发育了多个中新元古代伸展盆地,包括中北部的燕辽盆地、西北部的渣尔泰-白云鄂博-化德盆地和南部的熊耳盆地等(图 1a),这与全球哥伦比亚超大陆裂解过程相对应。其中,燕辽地区中新元古代地层被认为是发育最完整的,由下至上被划分为长城系、蓟县系、待建系和青白口系(陈晋镛, 1980, 1999; Wan *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013; 赵太平等, 2019; 李怀坤等, 2020)。新的研究表明,燕辽地区长城系底界年龄被限定在 1.67~1.65 Ga 左右(王松山等, 1995; 万渝生等, 2003; 李怀坤等, 2011; Peng *et al.*, 2012; 和政军等, 2011; 周红英等, 2020)。与其相比,华北克拉通南缘熊耳裂谷盆地内熊耳群早期火山-沉积岩系形成时代被限定在 1.78~1.75 Ga 之间(Peng *et al.*, 2008; Meng *et al.*, 2018; 赵太平等, 2019),明显早于北部燕辽裂谷带内长城系常州沟组的沉积时限,因而熊耳地区中元

古代早期火山-沉积建造被认为是华北克拉通吕梁运动后华北克拉通最初开始裂解的产物(苏文博, 2012; 赵太平等, 2019)。

已有研究表明,位于熊耳和燕辽裂谷盆地之间的太行山中南部同样发育中元古代早期沉积地层,是研究两个裂谷盆地中元古代早期沉积大地构造格架的重要视窗。绝大部分研究者将太行山中南部出露的中元古代早期地层归为燕辽裂谷带(盆地)向南延伸的分支(王鸿祯, 1985; 和政军, 1990; 侯贵廷等, 1998)。然而,太行山中南段长城系常州沟组之下还发育大河组和赵家庄组,说明其沉积早于北部的燕辽地区。因而有研究者提出,太行山中南段长城系与熊耳地区更具有可比性(赵太平等, 2015; 白国典等, 2019)。近期,Deng 等(2021)通过熊耳、燕辽和太行山地区长城系沉积地层的对比与岩性变化特征构建了华北克拉通中元古代早期沉积演化模型,并提出了两个裂谷在 1.67~1.64 Ga 阶段有过短暂的相连(Deng *et al.*, 2021)。鉴于此,本文在野外地质调查基础上,对采自太行山中南部赞皇地区长城系底部常州沟组碎屑沉积岩开展锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析,查明该区中元古代早期地层的沉积时代及碎屑物质来源,进而探讨其沉积大地构造环境与源区早期地壳演化历史。

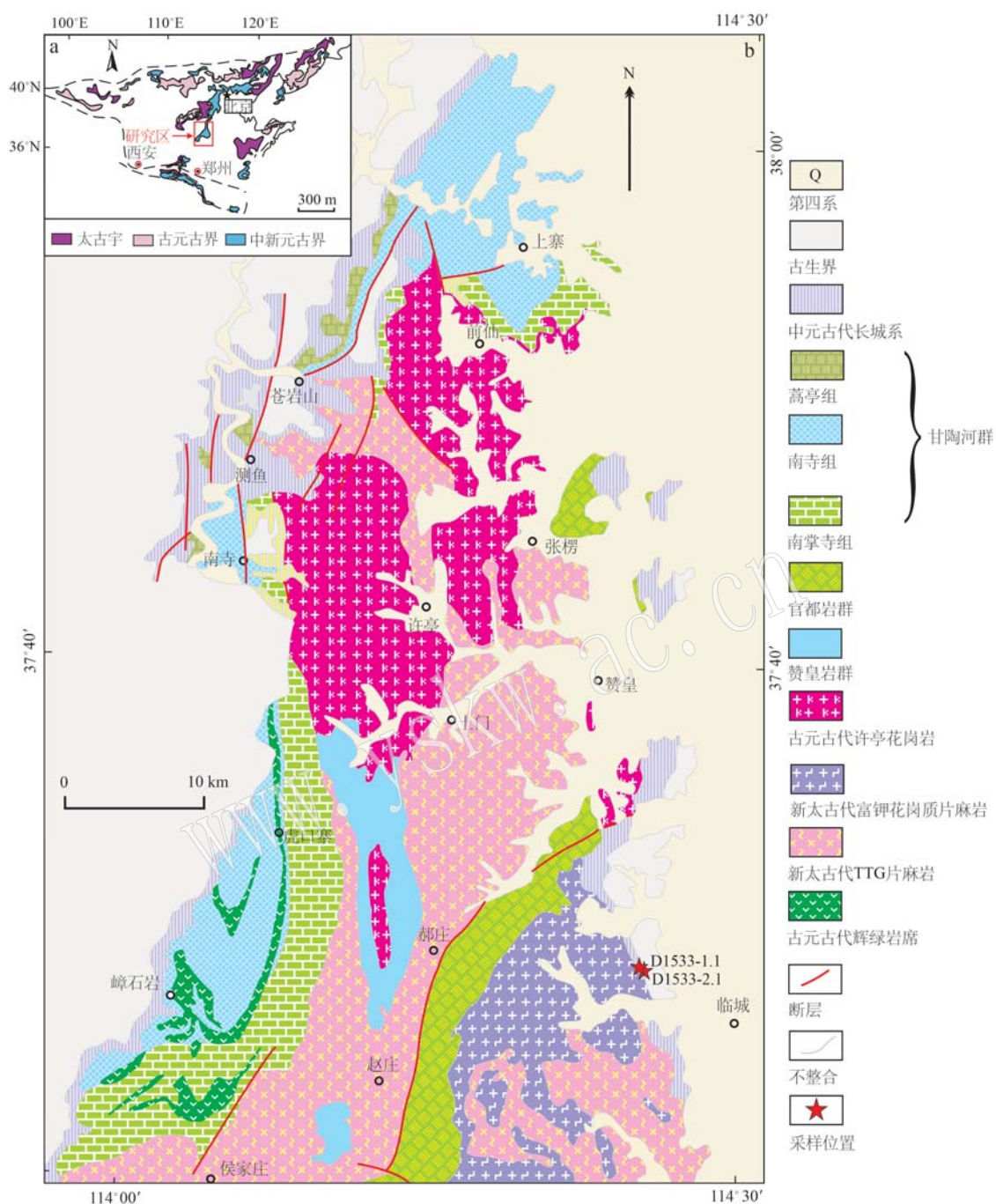


图1 华北克拉通中新元古代地层地质简图(a, 据 Peng *et al.*, 2012 修改)与赞皇杂岩地质简图(b, 据 Du *et al.*, 2016a 修改)

Fig. 1 Geologic schematic maps of the Meso-Neoproterozoic strata in the North China Craton (a, modified by Peng *et al.*, 2012) and the Zhanhuang Complex (b, modified by Du *et al.*, 2016a)

1 地质背景

赞皇杂岩出露于太行山中南段,其大地构造位置为华北克拉通中部造山带中段东侧(Zhao *et al.*, 2005; 图1),总体呈中部宽、两端收拢的“纺锤形”。

其早前寒武纪变质基底主要包括新太古代早期和新太古代晚期 TTG 质片麻岩、新太古代晚期富钾花岗质片麻岩、新太古代晚期赞皇岩群、新太古代晚期-古元古代官都岩群、古元古代甘陶河群和新太古代晚期-古元古代变基性岩与古元古代许亭花岗岩(杨崇辉等, 2011a, 2011b; Yang *et al.*, 2013; Du

et al. , 2016a, 2016b)。

除了上述早前寒武纪变质基底之外,中元古代长城系沉积地层在赞皇杂岩也有一定规模的出露,主要包括赵家庄组、常州沟组、串岭沟组和团山子组(河北省地质矿产局, 1989; Deng *et al.* , 2021)。在赞皇杂岩东部分布的长城系主要为常州沟组,呈角

度不整合于新太古代富钾花岗质片麻岩之上;而西部太行山主峰长城系主要出露其底部的赵家庄组和常州沟组(图 1b; 杜汝霖, 1984),呈角度不整合于新太古代 TTG 质片麻岩与古元古代甘陶河群或许亭花岗岩之上(图 2)。赵家庄组主要分布在赞皇杂岩西部的测鱼-嶂石岩一带,在赞皇县赵家庄村南也有



图 2 赞皇杂岩长城系常州沟组综合岩性柱状图与样品位置[据周杰(2016)修改]

Fig. 2 Comprehensive and lithological columns and sampling location in the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Zanzhuang Complex (Modified after Zhou Jie, 2016)

分布,厚度一般为 50 m 左右,不同层位岩性差异较大,下部为砂岩、砂砾岩和砾岩,砾石多为硅质砾石,磨圆度较好,为冲积扇相(贺萍等, 2020);中部为紫红色砂质页岩夹白云岩透镜体,发育平行层理、羽状交错层理、泥裂、波痕、叠层砂质 MISS 构造等沉积构造,形成于潮坪环境(贺萍等, 2020);上部为紫红色砂岩页岩,局部夹薄层细砂岩,页岩层位稳定,可作为区别于常州沟组的标志(杜汝霖, 1984; 王青春等, 2017; 贺萍等, 2020)。

常州沟组主要出露于赞皇杂岩天台山、瓮城、嶂石岩和苍岩山等地区,被划分为 3 个岩性段(河北省地质矿产局, 1989; 周杰, 2016): 第 1 岩性段下部以含砾石英砂岩为主,向上逐渐变为薄层状石英砂岩与页岩互层,上部主要以中层状的灰白色、浅紫红色夹薄层含砾砂岩的中细粒石英砂岩为主;第 2 岩性段下部主要为薄层紫红色石英砂岩夹海绿石石英砂岩为主,上部以灰白色复成分细砾岩为主;第 3 岩性段主要以石英砂岩为主,韵律结构明显。沉积构造研究表明,赞皇地区常州沟组陆源碎屑岩发育多种类型的沉积层理和构造,主要包括平行层理、板状交错层理(常州沟组第 2 与第 3 岩性段)、楔状斜层理(常州沟组第 1 岩性段)、槽状斜层理(常州沟组第 1 岩性段)、羽状交错层理(常州沟组第 2 与第 3 岩性段)、低角度斜层理(常州沟组第 2 岩性段)、波痕(如双脊波痕)、冲刷面构造与泥裂、泥砾和铁质结核(周杰, 2016)。

2 样品采集及岩相学特征

本文在临城地区开展 1:5 万变质岩专题填图的基础上,对赞皇杂岩东部瓮城地区不整合于新太古代晚期富钾花岗质片麻岩之上的长城系常州沟组开展了野外调查与室内研究。瓮城地区常州沟组底部以(含砾)石英砂岩为主,其中砾石为磨圆度较好的石英岩(图 3);向上以灰白色石英砂岩夹紫红色石英砂岩组合为特征,发育平行层理、斜层理和交错层理(图 3),局部可见波痕(图 3)。

本次研究所采集的样品为灰白色石英砂岩(D1533-1.1)和紫红色石英砂岩(D1533-2.1),二者呈互层状产出,与新太古代晚期富钾花岗质片麻岩呈角度不整合接触关系,采样位置如图 1 所示,对应的坐标:东经 114°25′12.32″,北纬 37°29′16.66″。在露头上,灰白色石英砂岩(D1533-1)呈薄层状,主要

由石英和少量长石组成(图 4),颗粒支撑,石英颗粒含量 90%~95%,粒径为 0.2~0.8 mm,磨圆度较好,多呈圆状-次圆状;部分颗粒形态不规则,长石呈次圆状-不规则状,含量约 1%~2%(图 4)。紫红色石英砂岩(D1533-1)在露头上呈厚层状,碎屑组分主要为圆状、次圆状的石英颗粒(约 90%),粒径为 0.2~0.9 mm,并有少量的长石(图 4)。

3 锆石分选与分析方法

样品中锆石分选工作在河北省廊坊市地智科技有限公司实验室完成。选择 2~3 kg 新鲜的砂岩样品,经过破碎、淘洗和重液分离,之后通过电磁分离,最后对锆石进行手工挑纯。根据锆石颗粒大小,在双目镜下将不同样品分别粘贴在环氧树脂台上,打磨抛光,去掉约锆石颗粒一半的厚度,获得尽可能大的锆石颗粒横切面中心,制成样品靶(宋彪等, 2002)。在光学显微镜下对锆石颗粒进行透射光和反射光照片拍摄,之后将锆石靶镀金后进行阴极发光照相,以便了解锆石颗粒形态、包裹体、表面裂纹发育以及锆石内部结构特征。锆石阴极发光图像(CL)拍摄在南京宏创地质勘察技术服务有限公司的场发射扫描电镜 MIRA3 TESCAN 上完成。

TIMA(TESCAN Integrated Mineral Analyzer)测试在南京宏创地质勘察技术服务有限公司采用配有 4 个能谱探头(EDAX Element 30)的 Mira-3 扫描电镜完成。锆石靶样品在实验前进行喷碳。实验中加速电压为 25 kV,电流为 9 nA,工作距离为 15 mm,电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准,EDS 信号使用 Mn 标样校准。测试中使用解离模式,同时获取 BSE 图和 EDS 数据,每个点的 X 射线计数为 1 000,像素大小为 3 μm ,能谱步长为 9 μm 。

锆石 U-Pb 定年在南京宏创地质勘察技术服务有限公司微区分析实验室的激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。激光剥蚀平台采用 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Applied Spectra,美国),配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent,美国)。详细的调谐参数见 Thompson 等(2018),采用束斑直径 50 μm 、剥蚀频率 10 Hz、能量密度 3.5 J/cm²、扫描速度 3 $\mu\text{m/s}$ 的激光参数剥蚀 NIST 612,调节气流以获得高的信号强度(²³⁸U $\approx 6 \times 10^5$ cps)、低的氧化物产率(ThO/Th < 0.2%)。

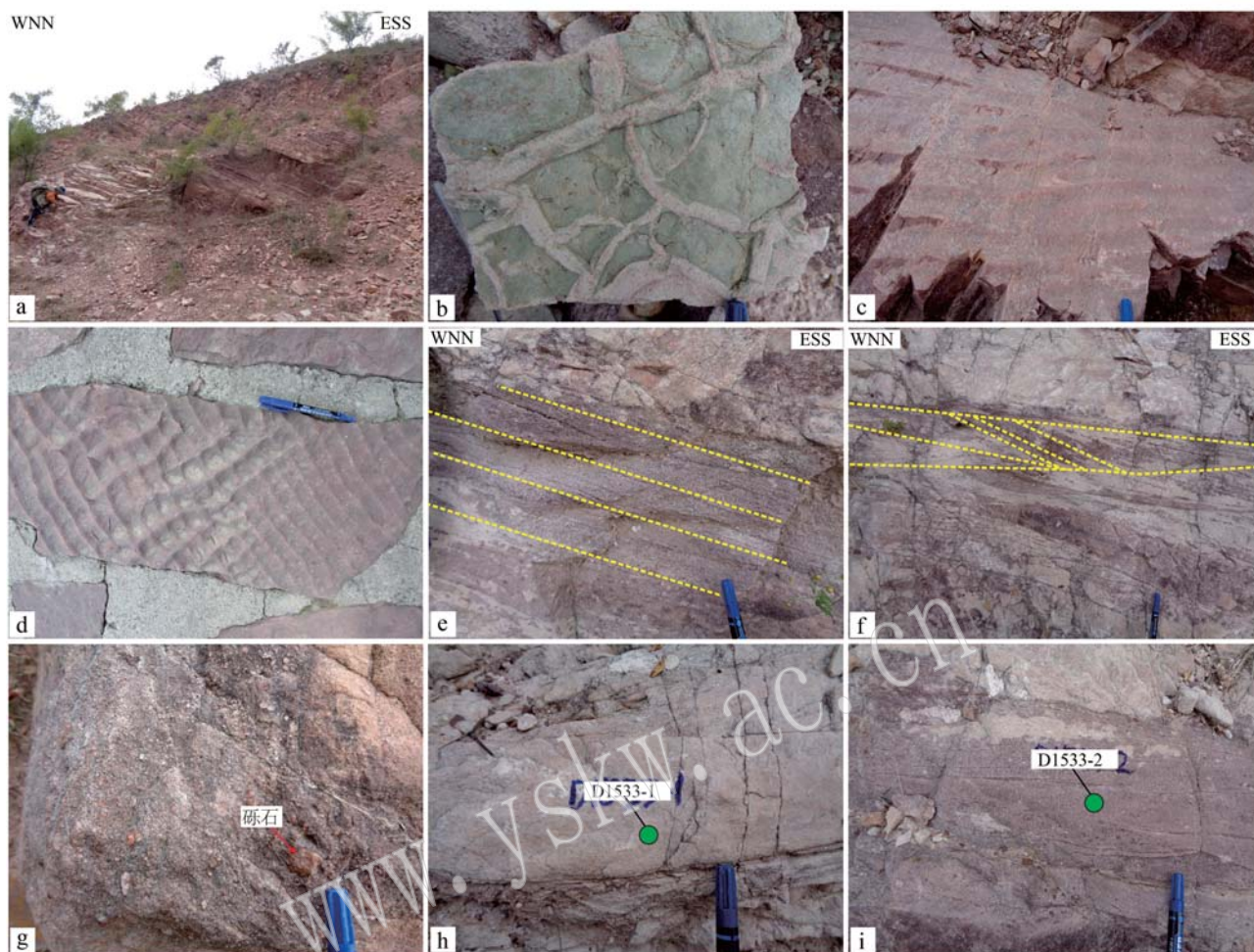


图3 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组野外照片

Fig. 3 Field photographs showing lithological associations and sedimentary structures of the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanhuan Complex

a—紫红色石英砂岩宏观野外照片; b—紫红色石英砂岩泥裂; c、d—紫红色石英砂岩波痕; e—平行层理; f—交错层理;
g—底部含砾砂岩中砾石; h、i—灰白色与紫红色石英砂岩取样位置

a—geological feature of the purple quartz sandstones; b—mud crack of the purple quartz sandstones; c, d—ripple marks of the purple quartz sandstone;
e—parallel; f—cross beddings; g—pebbly in the sandstones; h, i—sampling location of the greyish and purple quartz sandstone

选用100 μm 束斑线扫 NIST 610 对待测元素进行 P/A 调谐。测量质量数³¹P、⁴⁵Sc、⁴⁹Ti、⁵⁶Fe、⁸⁹Y、⁹¹Zr、⁹³Nb、¹³⁹La、¹⁴⁰Ce、¹⁴¹Pr、¹⁴⁶Nd、¹⁴⁷Sm、¹⁵¹Eu、¹⁵⁷Gd、¹⁵⁹Tb、¹⁶³Dy、¹⁶⁵Ho、¹⁶⁶Er、¹⁶⁹Tm、¹⁷³Yb、¹⁷⁵Lu、¹⁷⁸Hf、¹⁸¹Ta、²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁵U、²³⁸U,总的扫描时间约为0.23 s。锆石样品固定在环氧树脂靶上,抛光后在超纯水中超声清洗,分析前用分析级甲醇擦拭样品表面。采用5个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约为0.3 μm),以去除样品表面可能的污染。在束斑直径30 μm 、剥蚀频率5 Hz、能量密度2 J/cm²的激光条件下分析样品。数据处理采用

Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010),以锆石 91500 作为外标校正激光分馏效应,GJ-1 作为监测标样,每隔10~12个样品点分析2个91500标样及1个GJ-1标样。通常采集20 s的气体空白,35~40 s的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正(Paton *et al.*, 2010)。以NIST 610作为外标,⁹¹Zr作为内标计算微量元素含量。本次实验过程中测定的91500($1\,061.5 \pm 3.2\text{ Ma}$, 2σ)、GJ-1($604 \pm 6\text{ Ma}$, 2σ)年龄结果与推荐值在误差范围内一致。

样品的LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素测试在南京聚谱检测科技有限公司完成。分析过程中,先

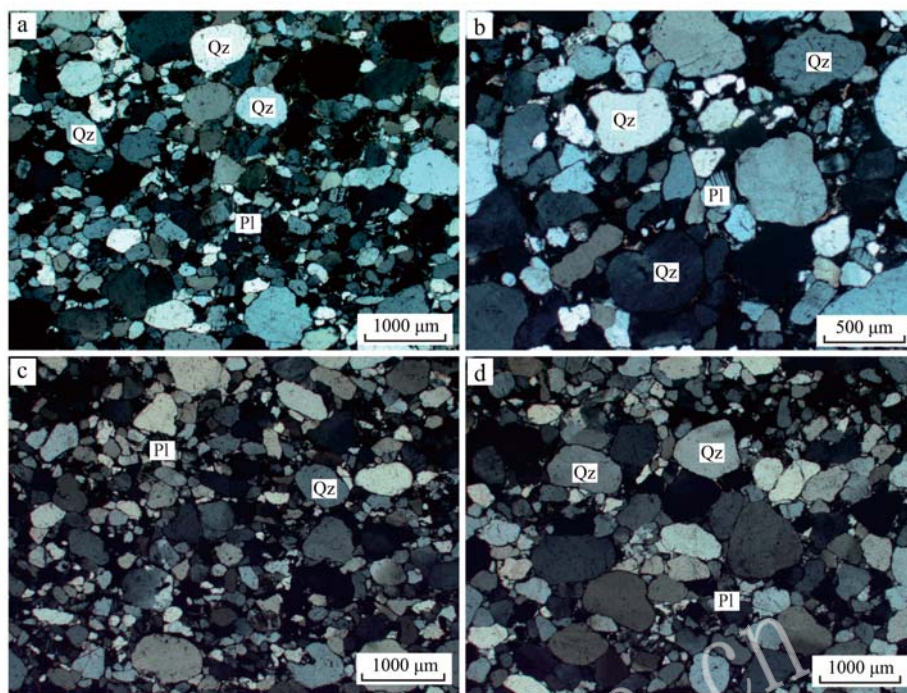


图4 赞皇杂岩翁城地区常州沟组石英砂岩代表性显微照片(正交偏光;矿物缩写据沈其韩,2009)

Fig. 4 Representative photomicrographs of quartz sandstones from the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanhuan Complex (cross-polarized light; mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

a, b—灰白色石英砂岩样品(D1533-1.1)主要矿物:石英(Qz)+斜长石(Pl); c, d—紫红色石英砂岩样品(D1533-2.1)主要矿物:石英(Qz)+斜长石(Pl)

a, b—main mineral assemblage of the gray quartz sandstone sample (D1533-1.1) is consist of quartz (Qz)+plagioclase (Pl); c, d—main mineral assemblage in the purple quartz sandstone sample (D1533-2.1) is consist of quartz (Qz) + plagioclase (Pl)

收集 20 s 气体本底,随后以 44 μm 束斑、9 Hz 频率剥蚀 40 s,气溶胶由氦气送出剥蚀池,与氦气混合后进入 MC-ICP-MS。MC-ICP-MS 单次积分时间为 0.3 s,40 s 内剥蚀时间内约有 133 组数据。测试过程中每隔 15 颗样品锆石,交替测试 3 颗标物锆石(包括 GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank),以检验锆石 Hf 同位素比值的数据质量,其中利用 Plešovice 进行外标校正以进一步优化分析测试结果,91500 和 GJ-1 作为第 2 标样监控数据校正质量。Hf 同位素数据处理过程详见 Fisher 等(2014)的详细描述。

4 分析结果

4.1 锆石阴极发光图像特征

灰白色砂岩样品(D1533-1.1)锆石透射光下,多为长粒状或圆粒状,粒径大小 150 ~ 400 μm ,大部分锆石具有不同程度的磨圆,表明其经历一定距离的搬运。在阴极发光图像(CL)中(图 5a~5i),多数锆

石发育较好的岩浆振荡环带,一些锆石可见较宽缓的板状环带(图 5a),而个别锆石颗粒无内部结构,极少量颗粒可见有残留/继承的岩浆核与变质重结晶边。从锆石外部形态和内部结构特征来看,样品 D1533-1.1 中多数碎屑锆石为岩浆成因(图 5a~5h),少数可能为变质成因(图 5i)。

紫红色砂岩样品(D1533-2.1)中的锆石多呈圆粒状,个别颗粒呈柱状,粒径大小 150~300 μm ,表明锆石多经历了不同程度的磨蚀。在阴极发光图像(CL)中(图 6a~6i),部分锆石发育较好的岩浆震荡环带(图 6d),部分锆石可见板状环带(图 6a,6i),少数锆石具有核-边结构,核部具有较清晰的岩浆震荡环带,而边部无明显环带,且明显穿切核部环带,推测边部为变质重结晶作用形成的。

4.2 锆石 U-Pb 年龄结果

本文对样品 D1533-1.1 中的 129 颗锆石进行 U-Pb 测年,其结果见表 1 与图 7。其中,122 颗岩浆来源的碎屑锆石 Th、U 含量与 Th/U 值分别为 13.3 $\times$

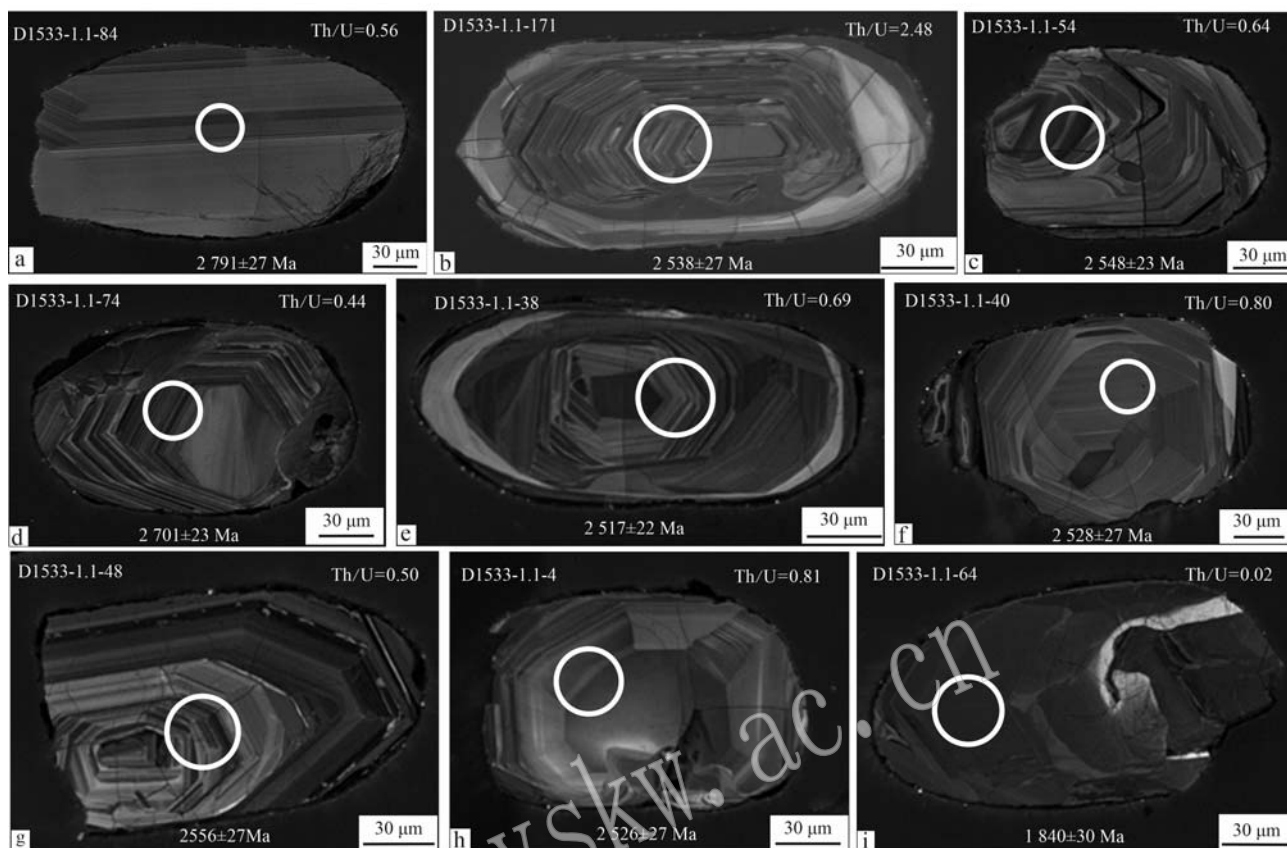


图 5 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩(D1533-1.1)中碎屑锆石的阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of detrital zircons from the quartz sandstones (D1533-1.1) of the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanzhuang Complex

$10^{-6} \sim 1.078 \times 10^{-6}$ 、 $14.1 \times 10^{-6} \sim 459 \times 10^{-6}$ 与 $0.18 \sim 4.48$ 。此类碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围较大,为 $2.826 \sim 2.072$ Ma(表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,大多数分析点位于谐和线上或附近,其中部分分析点具有较明显的 Pb 丢失而偏离谐和线(图 7a)。由于明显偏离谐和线的锆石年龄结果可能是由于后期地质事件引起的 Pb 丢失而使年龄偏低,所以本文选择岩浆来源的碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和度大于等于 90% 的结果进行讨论。在岩浆来源的碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄直方图中(图 7b),主要年龄峰值为 2.508 Ma,次要年龄峰值为 2.416 Ma 和 2.604 Ma(图 7b)。7 颗变质来源的碎屑锆石 Th、U 含量与 Th/U 值分别为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$ 、 $162.8 \times 10^{-6} \sim 298.1 \times 10^{-6}$ 与 $0.01 \sim 1.14$ (表 1), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1.923 \sim 1.822$ Ma。

对样品 D1533-2.1 中 135 粒岩浆来源的碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素测点分析(表 1)。所有分析结果中,Th 含量为 $12.1 \times 10^{-6} \sim 1.433 \times 10^{-6}$,U 含量为

$14.2 \times 10^{-6} \sim 229.3 \times 10^{-6}$,Th/U 为 $0.21 \sim 10.06$ (表 1)。这些碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围较大,介于 3.252 Ma~ 1.925 Ma 之间(表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,所有的锆石 U-Pb 年龄结果都位于谐和线上或附近,年龄谐和度大于 90%(图 7c、表 1)。在锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄直方图中,最为明显的年龄峰值为 2.513 Ma(图 7d)。除主体约 2.500 Ma 的峰值年龄外,6 粒中太古代碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3.252 Ma~ 2.828 Ma;8 粒新太古代早期碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 2.729 Ma~ 2.654 Ma 之间;同时,58 粒古元古代年龄中 45 个测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2.498 Ma~ 2.306 Ma,11 个分析测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结果为 $2.175 \sim 2.014$ Ma,2 个最年轻的岩浆来源的碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结果分别为 1.984 Ma 与 1.925 Ma(表 1)。

4.3 锆石的稀土元素组成

Belousova 等(2002)对大量岩浆锆石进行了微量元素分析,结果表明不同类型的岩浆锆石可以通

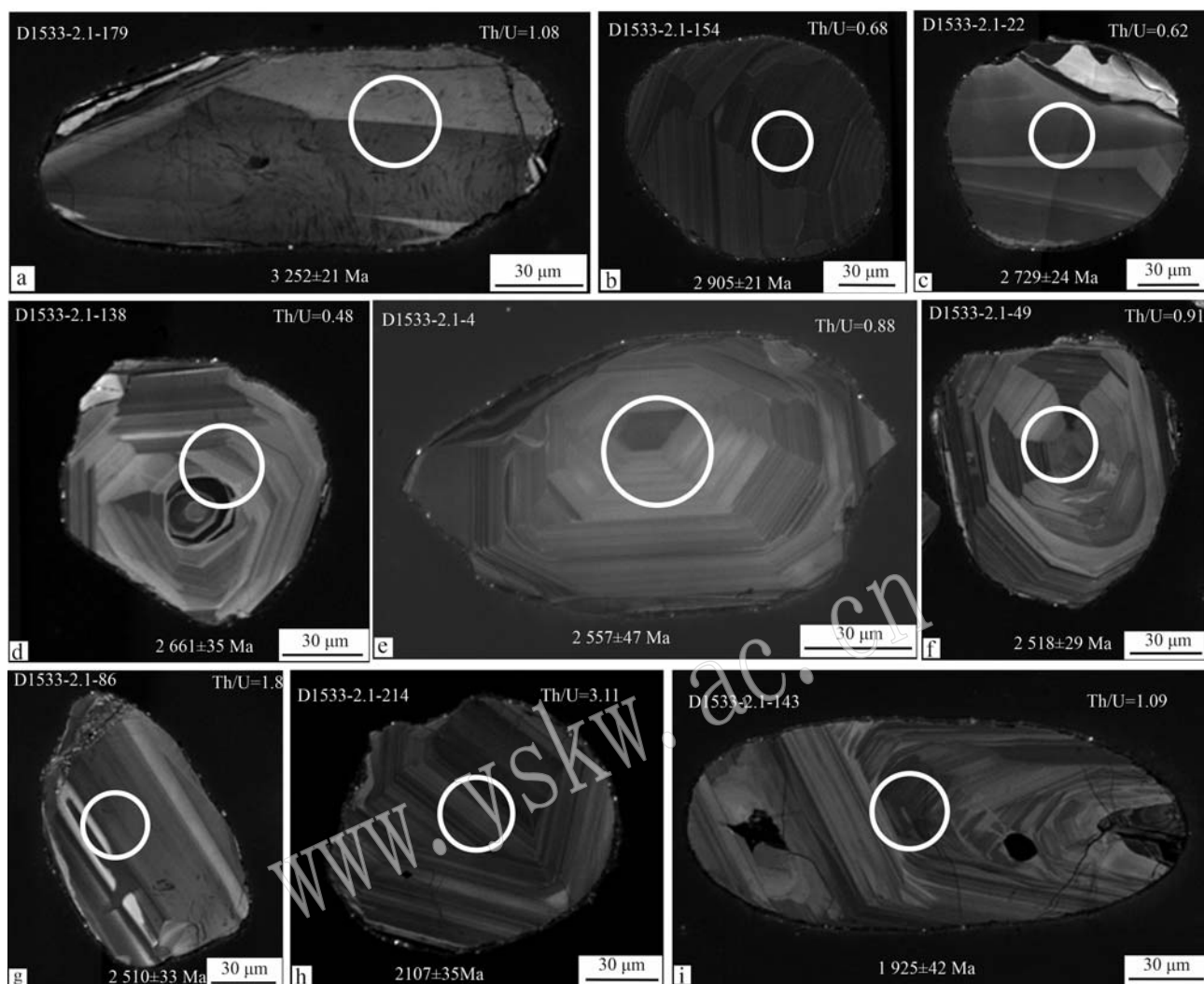


图6 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩(D1533-2.1)中碎屑锆石的阴极发光图像

Fig. 6 Cathodoluminescence images of detrital zircons from the quartz sandstones (D1533-2.1) of the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanhuan Complex

过其微量元素对变化图解和微量元素含量统计分析。Whitehouse 与 Platt (2003) 对于变质锆石微量元素特征的研究表明,变质锆石微量元素可以更好地判断锆石的形成条件,为锆石 U-Pb 年龄的解释提供更加有效的制约。

本次研究对长城系常州沟组的 2 件石英砂岩样品碎屑锆石微区进行了稀土元素化学分析测试,分析结果见表 2,稀土元素配分曲线如图 8 所示。在样品 D1533-1.1 中,122 个岩浆成因的碎屑锆石稀土元素含量变化较大,变化范围为 $154 \times 10^{-6} \sim 3\,494 \times 10^{-6}$ (表 2)。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中,除少数测点可能位于磷灰石等富含轻稀土元素的包裹体外,绝大多数碎屑锆石测点具有轻稀土元素相

对亏损而重稀土元素相对富集的特征,显示重稀土元素部分明显上翘(图 8a),对应的 $(\text{Lu}/\text{Sm})_N$ 值为 $0.95 \sim 435$;122 个岩浆成因的碎屑锆石测点大多具有强烈的 Ce 正异常,而个别分析点 Ce 正异常较低 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 2.68 \sim 243$),所有分析点具有强烈的 Eu 负异常,少数为弱 Eu 正异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.07 \sim 1.02$)。结合锆石 CL 图像特征,上述特征进一步表明这些碎屑锆石具有典型岩浆结晶锆石的特点。7 个变质成因的碎屑锆石稀土元素含量变化较大,变化范围为 $85 \times 10^{-6} \sim 2\,487 \times 10^{-6}$;从球粒陨石标准化稀土元素配分曲线特征可以明显看出,绝大多数变质成因的碎屑锆石测点具有轻稀土元素相对亏损、而重稀土元素相对富集的特征,在稀土元素配分模

表 1 赞皇杂岩带地区中元古长城系石英砂岩的碎屑锆石 LA-CP-MS U-Pb 分析结果

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%						
		Total Pb	^{232}Th		^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	ρ_{Ho}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		
样品 D1533-1.1																			
D1533-1.1-91	MA	40.80	32.60	58.60	0.56	15.230 0	0.270 0	0.547 8	0.007 0	0.447 9	0.202 0	0.003 4	2.826	18	2.814	29	2.834	28	100
D1533-1.1-84	MA	49.40	40.00	71.20	0.56	14.890 0	0.230 0	0.552 0	0.006 9	0.325 8	0.196 8	0.003 2	2.805	14	2.832	29	2.791	27	99
D1533-1.1-74	MA	54.70	38.10	86.40	0.44	13.4900	0.190 0	0.530 0	0.006 0	0.422 9	0.185 3	0.002 4	2.712	13	2.740	25	2.701	23	99
D1533-1.1-120	MA	23.90	22.80	35.90	0.63	13.450 0	0.280 0	0.527 5	0.007 1	0.314 2	0.185 1	0.003 7	2.706	20	2.733	29	2.696	34	99
D1533-1.1-34	MA	120.00	147.90	187.40	0.79	13.200 0	0.170 0	0.533 0	0.006 4	0.539 6	0.180 6	0.002 1	2.692	12	2.752	27	2.657	19	98
D1533-1.1-94	MA	57.70	66.40	89.80	0.74	12.190 0	0.190 0	0.501 8	0.005 9	0.376 4	0.176 6	0.002 6	2.616	15	2.620	25	2.614	24	100
D1533-1.1-43	MA	77.90	149.20	121.60	1.23	11.740 0	0.180 0	0.486 4	0.005 7	0.460 2	0.176 2	0.002 5	2.581	14	2.553	25	2.611	24	99
D1533-1.1-165	MA	62.10	154.90	110.10	1.41	11.130 0	0.190 0	0.462 5	0.0055	0.493 5	0.175 3	0.002 7	2.535	16	2.449	24	2.601	25	97
D1533-1.1-47	MA	38.60	34.20	63.50	0.54	11.840 0	0.230 0	0.495 0	0.005 9	0.359 9	0.174 5	0.003 3	2.587	18	2.591	25	2.591	31	100
D1533-1.1-52	MA	91.10	152.70	137.60	1.11	11.740 0	0.160 0	0.496 0	0.005 8	0.526 2	0.172 8	0.002 1	2.582	13	2.595	25	2.583	20	99
D1533-1.1-173	MA	106.00	168.20	150.10	1.12	12.340 0	0.180 0	0.519 9	0.005 4	0.487 7	0.172 5	0.002 3	2.628	13	2.698	23	2.576	23	97
D1533-1.1-152	MA	43.90	73.80	65.30	1.13	11.550 0	0.210 0	0.488 3	0.006 1	0.523 2	0.172 3	0.002 8	2.567	17	2.562	26	2.572	27	100
D1533-1.1-58	MA	54.60	123.70	89.60	1.38	10.930 0	0.170 0	0.465 9	0.004 9	0.429 9	0.171 6	0.002 6	2.514	14	2.464	22	2.566	25	98
D1533-1.1-3	MA	43.70	35.50	73.10	0.49	11.530 0	0.170 0	0.478 6	0.005 7	0.332 3	0.171 7	0.002 7	2.564	14	2.520	25	2.566	26	98
D1533-1.1-92	MA	31.70	82.30	43.70	1.88	10.970 0	0.250 0	0.462 6	0.005 9	0.334 2	0.172 2	0.003 9	2.517	21	2.450	26	2.563	38	97
D1533-1.1-48	MA	51.90	44.10	88.90	0.50	11.520 0	0.200 0	0.494 3	0.005 9	0.435 8	0.170 7	0.002 9	2.567	17	2.588	25	2.556	27	99
D1533-1.1-100	MA	12.00	18.10	19.30	0.94	11.070 0	0.340 0	0.463 8	0.008 1	0.280 9	0.172 9	0.005 4	2.517	29	2.453	35	2.556	54	97
D1533-1.1-118	MA	19.00	36.60	28.70	1.28	11.290 0	0.300 0	0.478 1	0.007 4	0.139 5	0.172 0	0.005 0	2.539	25	2.517	32	2.552	49	99
D1533-1.1-156	MA	28.10	16.50	49.10	0.34	11.480 0	0.260 0	0.489 0	0.006 2	0.426 2	0.170 5	0.003 6	2.557	22	2.565	27	2.549	36	100
D1533-1.1-54	MA	68.10	70.30	109.60	0.64	11.480 0	0.180 0	0.494 9	0.005 3	0.495 4	0.169 4	0.002 3	2.562	15	2.591	23	2.548	23	99
D1533-1.1-147	MA	57.80	77.80	92.40	0.84	11.430 0	0.200 0	0.490 5	0.005 3	0.394 0	0.169 5	0.002 7	2.556	16	2.572	23	2.548	27	99
D1533-1.1-50	MA	63.20	88.70	97.80	0.91	11.340 0	0.160 0	0.489 0	0.005 0	0.328 0	0.169 5	0.002 5	2.549	13	2.565	22	2.546	24	99
D1533-1.1-112	MA	21.10	26.70	34.30	0.78	11.070 0	0.280 0	0.472 9	0.007 6	0.397 9	0.169 4	0.003 9	2.521	24	2.494	33	2.540	40	99
D1533-1.1-144	MA	30.90	43.80	48.90	0.89	11.110 0	0.230 0	0.479 5	0.006 5	0.447 6	0.169 3	0.003 4	2.527	19	2.523	28	2.538	33	100
D1533-1.1-171	MA	116.10	525.00	211.40	2.48	9.570 0	0.190 0	0.416 2	0.006 5	0.597 1	0.168 6	0.002 7	2.391	18	2.242	30	2.538	27	94
D1533-1.1-90	MA	32.00	74.30	45.30	1.64	10.920 0	0.260 0	0.468 1	0.006 5	0.285 6	0.169 7	0.004 0	2.509	22	2.473	29	2.537	40	99
D1533-1.1-149	MA	81.80	105.50	128.70	0.82	11.440 0	0.160 0	0.494 6	0.005 6	0.489 9	0.168 4	0.002 2	2.557	13	2.589	24	2.537	22	99
D1533-1.1-63	MA	93.80	119.10	148.00	0.80	11.310 0	0.170 0	0.492 0	0.005 8	0.471 9	0.168 4	0.002 4	2.548	15	2.578	25	2.536	23	99
D1533-1.1-125	MA	62.40	112.40	92.10	1.22	11.240 0	0.170 0	0.485 9	0.004 6	0.373 2	0.168 5	0.002 5	2.542	14	2.555	21	2.536	25	99
D1533-1.1-170	MA	92.80	175.40	134.90	1.30	11.260 0	0.150 0	0.487 3	0.004 9	0.469 9	0.167 5	0.002 1	2.543	13	2.558	21	2.531	20	99
D1533-1.1-67	MA	9.00	13.30	14.10	0.94	11.140 0	0.370 0	0.484 6	0.009 4	0.254 6	0.169 8	0.006 0	2.529	31	2.543	41	2.529	57	99
D1533-1.1-40	MA	40.80	52.10	65.50	0.80	11.030 0	0.200 0	0.481 9	0.006 0	0.504 9	0.167 4	0.002 8	2.522	17	2.534	26	2.528	27	100
D1533-1.1-69	MA	71.00	135.60	108.60	1.25	11.210 0	0.180 0	0.489 4	0.006 0	0.469 6	0.167 7	0.002 6	2.538	15	2.567	26	2.527	26	99
D1533-1.1-4	MA	32.90	41.00	50.80	0.81	11.190 0	0.180 0	0.476 9	0.005 9	0.404 3	0.167 6	0.002 7	2.538	15	2.512	26	2.526	27	99

续表 1-1
Continued Table 1-1

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%		
		Total Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	ρ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ
DI533-1.1-57	MA	136.20	687.00	249.30	2.76	8.010 0	0.120 0	0.350 9	0.004 2	0.616 5	0.167 2	0.002 1	2.232	14	1 938	20	2 525	21	86
DI533-1.1-5	MA	46.40	76.60	68.10	1.13	11.230 0	0.200 0	0.479 7	0.005 9	0.415 9	0.167 6	0.002 9	2.543	17	2 524	26	2 524	29	99
DI533-1.1-68	MA	91.10	154.10	138.80	1.11	10.910 0	0.160 0	0.479 4	0.005 0	0.419 5	0.166 8	0.002 3	2.512	14	2 524	22	2 523	22	100
DI533-1.1-132	MA	20.50	16.50	35.40	0.47	11.030 0	0.260 0	0.481 4	0.007 4	0.380 7	0.167 4	0.003 7	2.522	21	2 531	32	2 523	36	100
DI533-1.1-62	MA	103.80	239.60	180.10	1.33	10.340 0	0.150 0	0.453 7	0.005 0	0.492 5	0.167 0	0.002 1	2.465	14	2 411	22	2 522	22	98
DI533-1.1-70	MA	15.00	29.50	22.50	1.31	10.860 0	0.310 0	0.473 2	0.008 7	0.309 5	0.168 9	0.004 9	2.505	26	2 494	38	2 521	50	100
DI533-1.1-85	MA	34.40	61.50	52.00	1.18	10.920 0	0.230 0	0.474 5	0.006 0	0.383 7	0.167 6	0.003 4	2.514	19	2 502	26	2 521	33	100
DI533-1.1-61	MA	57.00	114.30	77.00	1.48	11.330 0	0.190 0	0.496 1	0.006 2	0.368 0	0.167 0	0.002 6	2.547	15	2 595	27	2 520	27	98
DI533-1.1-73	MA	111.40	116.30	180.60	0.64	11.320 0	0.130 0	0.495 7	0.004 9	0.381 9	0.166 7	0.002 0	2.548	11	2 597	22	2 520	20	98
DI533-1.1-109	MA	20.50	36.60	31.40	1.17	10.930 0	0.250 0	0.473 3	0.006 4	0.169 0	0.166 9	0.004 3	2.514	22	2 496	28	2 520	44	99
DI533-1.1-38	MA	87.00	97.70	142.00	0.69	11.100 0	0.160 0	0.486 1	0.005 2	0.503 1	0.166 5	0.002 1	2.530	14	2 553	23	2 517	22	99
DI533-1.1-55	MA	53.20	117.80	73.20	1.61	11.030 0	0.170 0	0.485 4	0.005 0	0.378 9	0.166 3	0.002 5	2.527	15	2 550	22	2 516	27	99
DI533-1.1-105	MA	103.70	657.00	216.50	3.03	7.890 0	0.160 0	0.343 3	0.006 3	0.710 5	0.166 4	0.002 2	2.217	18	1 900	30	2 516	22	85
DI533-1.1-26	MA	43.80	40.70	73.70	0.55	11.060 0	0.170 0	0.483 0	0.006 0	0.333 8	0.166 6	0.002 7	2.525	15	2 539	26	2 515	28	99
DI533-1.1-124	MA	56.10	77.00	87.00	0.89	11.220 0	0.170 0	0.492 5	0.006 3	0.484 7	0.166 3	0.002 5	2.538	15	2 580	27	2 514	25	98
DI533-1.1-135	MA	27.10	44.20	41.80	1.06	11.050 0	0.290 0	0.485 0	0.007 3	0.443 1	0.166 8	0.004 1	2.521	26	2 547	32	2 513	40	99
DI533-1.1-77	MA	31.90	54.00	49.90	1.08	10.680 0	0.210 0	0.471 3	0.006 1	0.344 3	0.166 6	0.003 4	2.496	18	2 488	27	2 511	34	100
DI533-1.1-153	MA	131.20	161.00	242.30	0.66	10.830 0	0.140 0	0.474 4	0.005 2	0.565 7	0.165 8	0.001 8	2.507	12	2 502	23	2 511	19	100
DI533-1.1-89	MA	58.10	242.30	125.10	1.94	8.630 0	0.220 0	0.372 6	0.006 2	0.658 0	0.166 0	0.003 6	2.296	23	2 041	30	2 510	37	88
DI533-1.1-95	MA	36.70	45.30	60.00	0.75	10.890 0	0.200 0	0.475 5	0.005 5	0.322 5	0.166 3	0.003 1	2.510	17	2 506	24	2 510	31	100
DI533-1.1-164	MA	68.60	118.50	108.30	1.09	11.050 0	0.180 0	0.484 1	0.006 1	0.364 3	0.166 1	0.002 7	2.524	15	2 543	26	2 510	27	99
DI533-1.1-167	MA	35.00	43.60	55.20	0.79	11.320 0	0.230 0	0.494 7	0.006 6	0.344 3	0.166 5	0.003 3	2.545	19	2 589	28	2 510	34	98
DI533-1.1-65	MA	14.80	18.40	24.40	0.76	10.880 0	0.320 0	0.476 9	0.007 4	0.239 4	0.168 1	0.005 2	2.505	28	2 511	32	2 510	53	100
DI533-1.1-18	MA	132.30	152.00	214.30	0.71	11.030 0	0.120 0	0.481 6	0.004 6	0.483 8	0.165 6	0.001 8	2.526	11	2 533	20	2 509	18	100
DI533-1.1-104	MA	146.30	1 078.00	459.00	2.35	5.640 0	0.120 0	0.247 7	0.004 1	0.636 4	0.165 8	0.002 8	1.918	18	1 429	22	2 508	28	71
DI533-1.1-117	MA	25.40	32.10	41.10	0.78	10.930 0	0.210 0	0.480 1	0.006 0	0.412 2	0.165 5	0.003 0	2.513	18	2 526	26	2 506	32	99
DI533-1.1-148	MA	22.60	32.90	36.10	0.91	10.990 0	0.220 0	0.483 7	0.006 3	0.365 7	0.165 7	0.003 6	2.517	19	2 542	27	2 506	35	99
DI533-1.1-35	MA	84.30	187.00	130.30	1.44	10.560 0	0.170 0	0.464 7	0.005 8	0.562 2	0.165 4	0.002 3	2.482	15	2 459	25	2 505	24	99
DI533-1.1-44	MA	80.40	114.70	123.40	0.93	11.190 0	0.180 0	0.493 2	0.006 3	0.430 6	0.165 7	0.002 8	2.538	16	2 583	27	2 505	28	98
DI533-1.1-130	MA	44.20	45.80	73.00	0.63	11.110 0	0.210 0	0.487 4	0.004 7	0.375 2	0.165 6	0.002 7	2.528	17	2 558	21	2 505	28	99
DI533-1.1-150	MA	98.10	159.70	156.00	1.02	10.930 0	0.150 0	0.480 5	0.004 5	0.452 9	0.165 3	0.001 9	2.515	13	2 529	20	2 505	20	99
DI533-1.1-127	MA	97.20	43.40	173.40	0.25	11.180 0	0.160 0	0.491 5	0.005 3	0.414 3	0.165 4	0.002 3	2.535	14	2 579	23	2 505	23	98
DI533-1.1-49	MA	29.60	49.40	45.80	1.08	10.730 0	0.210 0	0.473 2	0.005 8	0.069 6	0.166 1	0.003 7	2.495	18	2 496	25	2 504	38	100
DI533-1.1-116	MA	63.20	74.80	115.80	0.65	10.740 0	0.180 0	0.471 7	0.006 0	0.456 1	0.165 4	0.002 6	2.497	16	2 490	26	2 504	26	100
DI533-1.1-12	MA	87.60	243.40	107.70	2.26	10.960 0	0.180 0	0.477 1	0.005 9	0.417 5	0.165 0	0.002 7	2.516	15	2 513	26	2 503	28	100

续表 1-2
Continued Table 1-2

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%			
		Total Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	ρ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		2σ		
D1533-1.1-21	MA	89.90	108.90	146.20	0.74	10.930 0	0.160 0	0.479 3	0.004 3	0.550 3	0.1651	0.002 0	2.515	14	2.524	19	2.503	20	100
D1533-1.1-23	MA	32.30	49.80	50.10	0.99	10.850 0	0.250 0	0.473 9	0.005 4	0.424 0	0.165 8	0.003 5	2.504	21	2.503	24	2.502	36	100
D1533-1.1-2	MA	29.60	42.40	46.50	0.91	10.850 0	0.220 0	0.466 4	0.005 7	0.281 2	0.165 6	0.003 4	2.505	19	2.466	25	2.501	35	98
D1533-1.1-22	MA	56.80	70.30	90.40	0.78	11.010 0	0.160 0	0.484 7	0.005 6	0.403 0	0.165 0	0.002 5	2.521	14	2.546	24	2.501	25	99
D1533-1.1-110	MA	46.00	143.10	66.50	2.15	10.880 0	0.280 0	0.473 3	0.007 9	0.4701	0.165 3	0.003 8	2.508	24	2.497	34	2.501	39	100
D1533-1.1-174	MA	59.00	119.30	85.20	1.40	11.020 0	0.210 0	0.483 8	0.006 0	0.430 7	0.164 8	0.002 8	2.521	18	2.542	26	2.501	30	99
D1533-1.1-81	MA	27.30	44.60	41.70	1.07	11.000 0	0.240 0	0.483 9	0.006 6	0.307 2	0.165 8	0.003 7	2.517	20	2.542	29	2.500	37	99
D1533-1.1-136	MA	61.70	66.50	103.70	0.64	10.850 0	0.170 0	0.478 6	0.004 8	0.346 8	0.165 0	0.002 6	2.507	15	2.520	21	2.499	26	99
D1533-1.1-13	MA	111.50	127.90	185.90	0.69	10.770 0	0.150 0	0.470 4	0.004 5	0.585 1	0.164 5	0.001 9	2.501	13	2.484	20	2.498	20	99
D1533-1.1-138	MA	41.60	79.90	59.10	1.35	11.290 0	0.260 0	0.498 7	0.006 3	0.387 6	0.165 5	0.003 6	2.543	22	2.606	27	2.498	37	98
D1533-1.1-163	MA	104.70	290.40	133.80	2.17	10.810 0	0.150 0	0.478 4	0.005 1	0.326 5	0.164 5	0.002 3	2.505	13	2.519	22	2.496	23	99
D1533-1.1-168	MA	90.20	232.80	137.00	1.70	10.430 0	0.190 0	0.460 1	0.005 6	0.559 1	0.164 5	0.002 4	2.469	17	2.439	25	2.496	25	99
D1533-1.1-75	MA	33.20	47.30	51.90	0.91	11.040 0	0.230 0	0.490 8	0.006 4	0.313 8	0.165 0	0.003 4	2.521	19	2.572	28	2.494	35	98
D1533-1.1-122	MA	15.10	20.70	25.90	0.80	10.680 0	0.240 0	0.471 5	0.006 4	0.336 0	0.164 5	0.003 6	2.489	21	2.488	28	2.492	38	100
D1533-1.1-28	MA	35.00	57.00	53.00	1.08	10.870 0	0.220 0	0.479 4	0.006 4	0.431 7	0.164 6	0.003 2	2.506	19	2.527	28	2.492	33	99
D1533-1.1-1	MA	91.70	126.30	137.90	0.92	11.000 0	0.230 0	0.480 0	0.006 7	0.445 8	0.164 1	0.003 1	2.520	19	2.526	29	2.491	32	100
D1533-1.1-31	MA	53.50	17.60	98.00	0.18	10.780 0	0.190 0	0.480 3	0.006 3	0.466 5	0.163 9	0.002 8	2.502	17	2.527	27	2.491	27	99
D1533-1.1-60	MA	142.20	297.50	250.90	1.19	10.680 0	0.170 0	0.477 4	0.006 0	0.622 1	0.163 6	0.001 9	2.493	14	2.514	26	2.491	21	99
D1533-1.1-29	MA	39.00	156.80	71.10	2.20	9.320 0	0.170 0	0.413 8	0.005 3	0.095 2	0.164 4	0.003 6	2.367	17	2.235	23	2.490	37	94
D1533-1.1-88	MA	39.40	61.30	63.30	0.97	10.990 0	0.270 0	0.486 3	0.007 5	0.376 6	0.163 9	0.003 8	2.517	23	2.553	33	2.490	40	99
D1533-1.1-76	MA	59.50	136.70	92.60	1.48	10.530 0	0.180 0	0.468 5	0.005 7	0.496 8	0.163 9	0.002 4	2.479	16	2.476	25	2.489	25	100
D1533-1.1-42	MA	75.50	79.60	125.30	0.64	10.900 0	0.180 0	0.484 3	0.005 2	0.401 2	0.163 8	0.002 4	2.514	15	2.545	22	2.488	25	99
D1533-1.1-172	MA	80.40	217.40	144.50	1.50	9.890 0	0.190 0	0.437 9	0.005 3	0.574 0	0.163 4	0.002 5	2.420	17	2.343	24	2.487	25	97
D1533-1.1-159	MA	98.60	79.70	170.00	0.47	10.980 0	0.160 0	0.488 1	0.006 0	0.567 0	0.163 5	0.002 2	2.519	14	2.561	26	2.486	23	98
D1533-1.1-102	MA	106.30	447.40	277.00	1.62	6.760 0	0.200 0	0.299 2	0.008 1	0.833 2	0.163 3	0.002 7	2.071	26	1.684	40	2.485	29	79
D1533-1.1-160	MA	16.30	26.70	25.30	1.06	10.840 0	0.330 0	0.478 5	0.008 0	0.305 0	0.165 1	0.004 9	2.498	29	2.518	35	2.482	51	99
D1533-1.1-30	MA	18.80	29.40	30.20	0.97	10.370 0	0.260 0	0.461 6	0.006 5	0.254 9	0.164 4	0.004 3	2.467	23	2.445	28	2.481	44	99
D1533-1.1-108	MA	123.10	177.30	222.50	0.80	10.080 0	0.150 0	0.446 8	0.005 7	0.546 7	0.163 0	0.002 2	2.439	14	2.383	24	2.481	23	98
D1533-1.1-126	MA	82.40	267.90	128.90	2.08	9.710 0	0.180 0	0.433 2	0.005 8	0.617 1	0.162 8	0.002 4	2.404	17	2.319	26	2.478	25	96
D1533-1.1-107	MA	17.40	41.80	29.90	1.40	10.270 0	0.270 0	0.454 6	0.007 9	0.229 8	0.163 0	0.004 4	2.451	25	2.418	36	2.478	46	99
D1533-1.1-41	MA	24.10	28.40	39.30	0.72	10.700 0	0.260 0	0.479 2	0.007 0	0.404 9	0.163 1	0.003 8	2.493	22	2.522	31	2.477	38	99
D1533-1.1-45	MA	154.70	486.00	205.50	2.36	10.650 0	0.200 0	0.476 0	0.008 2	0.726 9	0.162 3	0.002 4	2.493	19	2.508	36	2.475	24	99
D1533-1.1-11	MA	80.60	149.30	156.70	0.95	9.690 0	0.190 0	0.435 5	0.007 4	0.273 8	0.161 5	0.003 5	2.407	20	2.329	33	2.472	39	97
D1533-1.1-97	MA	16.50	24.20	25.50	0.95	10.730 0	0.340 0	0.478 3	0.007 7	0.332 4	0.162 6	0.004 9	2.492	29	2.517	34	2.471	48	99
D1533-1.1-14	MA	88.80	296.00	169.70	1.74	9.010 0	0.2700	0.400 9	0.009 0	0.578 8	0.162 3	0.004 3	2.334	27	2.172	41	2.470	45	93

续表 1-3
Continued Table 1-3

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%			
		Total Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$				
						2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ		2σ	2σ	
D1533-1, 1-121	MA	22.90	44.70	33.50	1.34	10.720 0	0.240 0	0.480 3	0.007 3	0.371 2	0.162 2	0.003 6	2.493	21	2 526	32	2 468	38	99
D1533-1, 1-99	MA	86.50	169.60	137.80	1.23	10.450 0	0.160 0	0.466 7	0.005 3	0.424 3	0.161 8	0.002 4	2.472	14	2 468	23	2 467	25	100
D1533-1, 1-7	MA	29.90	63.70	42.10	1.51	10.790 0	0.250 0	0.475 9	0.006 1	0.125 3	0.162 4	0.004 1	2.498	22	2 508	27	2 460	44	100
D1533-1, 1-143	MA	85.90	244.50	109.90	2.22	10.090 0	0.190 0	0.456 8	0.007 2	0.488 5	0.161 3	0.002 9	2.439	18	2 423	32	2 459	31	99
D1533-1, 1-140	MA	68.00	593.00	169.10	3.51	7.220 0	0.180 0	0.324 3	0.005 4	0.393 0	0.161 1	0.003 8	2.135	22	1 810	27	2 456	40	84
D1533-1, 1-142	MA	101.40	694.00	267.50	2.59	6.060 0	0.150 0	0.278 7	0.005 2	0.510 2	0.160 6	0.003 8	1.981	22	1 584	26	2 453	38	78
D1533-1, 1-8	MA	55.30	75.00	89.40	0.84	10.460 0	0.170 0	0.466 4	0.005 6	0.408 1	0.160 4	0.002 6	2.473	15	2 466	24	2 452	27	100
D1533-1, 1-119	MA	107.20	136.70	189.80	0.72	10.380 0	0.160 0	0.467 0	0.005 6	0.333 5	0.160 1	0.002 5	2.467	14	2 469	25	2 451	27	100
D1533-1, 1-133	MA	134.20	687.00	312.20	2.20	6.990 0	0.110 0	0.319 4	0.004 4	0.493 3	0.159 5	0.002 5	2.108	14	1 786	21	2 443	27	83
D1533-1, 1-161	MA	23.90	45.20	38.80	1.16	9.850 0	0.250 0	0.449 6	0.006 7	0.239 0	0.158 7	0.004 0	2.416	22	2 391	30	2 428	45	99
D1533-1, 1-129	MA	46.20	99.40	78.30	1.27	9.550 0	0.220 0	0.441 3	0.007 1	0.663 0	0.157 7	0.002 8	2.386	21	2 354	32	2 421	30	99
D1533-1, 1-27	MA	16.20	193.60	43.20	4.48	5.810 0	0.270 0	0.265 1	0.005 8	0.232 2	0.157 7	0.007 1	1.936	41	1 515	29	2 418	73	76
D1533-1, 1-96	MA	47.30	85.20	81.40	1.05	9.380 0	0.190 0	0.435 4	0.005 8	0.439 5	0.156 6	0.003 1	2.374	19	2 328	26	2 412	33	98
D1533-1, 1-51	MA	95.20	684.00	220.20	3.11	5.520 0	0.150 0	0.283 3	0.005 7	0.495 2	0.154 0	0.003 6	1.897	23	1 607	28	2 383	41	83
D1533-1, 1-39	MA	14.10	24.90	26.10	0.95	8.200 0	0.280 0	0.396 9	0.007 7	0.294 9	0.151 0	0.005 1	2.244	30	2 157	36	2 331	57	96
D1533-1, 1-36	MA	48.00	108.70	85.80	1.27	8.100 0	0.170 0	0.404 2	0.006 0	0.502 4	0.146 3	0.002 8	2.237	19	2 186	28	2 296	32	98
D1533-1, 1-86	MA	41.90	75.20	74.60	1.01	7.770 0	0.250 0	0.400 0	0.007 2	0.460 4	0.141 9	0.004 2	2.197	29	2 168	33	2 235	52	99
D1533-1, 1-16	MA	57.50	53.30	134.10	0.40	6.710 0	0.120 0	0.366 1	0.004 0	0.352 5	0.131 1	0.002 3	2.072	16	2 010	19	2 105	31	97
D1533-1, 1-87	ME	93.40	287.00	298.10	0.96	4.620 0	0.100 0	0.281 7	0.004 7	0.528 2	0.118 4	0.002 4	1.750	19	1 599	24	1 923	36	91
D1533-1, 1-115	ME	84.50	73.80	207.40	0.36	5.827 0	0.093 0	0.358 0	0.004 0	0.240 9	0.118 5	0.002 1	1.948	14	1 972	19	1 923	31	99
D1533-1, 1-175	ME	82.00	245.00	215.40	1.14	5.380 0	0.110 0	0.338 3	0.003 7	0.530 0	0.115 2	0.002 1	1.877	17	1 878	18	1 876	33	100
D1533-1, 1-103	ME	57.80	1.70	162.80	0.01	5.364 0	0.088 0	0.339 8	0.003 8	0.485 5	0.113 9	0.001 7	1.876	14	1 887	18	1 859	27	99
D1533-1, 1-66	ME	79.90	62.10	213.00	0.29	5.240 0	0.079 0	0.338 9	0.003 0	0.514 1	0.113 0	0.001 5	1.857	13	1 881	15	1 841	23	99
D1533-1, 1-64	ME	72.50	3.30	206.40	0.02	5.228 0	0.093 0	0.338 2	0.003 5	0.355 2	0.112 8	0.001 8	1.854	15	1 877	17	1 840	30	99
D1533-1, 1-37	ME	60.20	16.80	166.40	0.10	5.176 0	0.084 0	0.338 8	0.003 6	0.360 6	0.112 0	0.001 9	1.850	15	1 880	17	1 822	30	98
样品 D1533-2, 1																			
D1533-2, 1-179	MA	59.80	69.10	64.10	1.08	23.640 0	0.360 0	0.654 4	0.008 0	0.520 1	0.261 3	0.003 4	3.252	15	3 243	31	3 252	21	100
D1533-2, 1-154	MA	96.60	88.60	129.50	0.68	16.750 0	0.240 0	0.576 3	0.006 4	0.497 2	0.210 6	0.002 8	2.918	14	2 932	26	2 905	21	100
D1533-2, 1-205	MA	161.80	404.00	198.90	2.03	16.720 0	0.250 0	0.575 8	0.009 0	0.457 9	0.207 9	0.003 1	2.917	14	2 930	37	2 891	26	100
D1533-2, 1-38	MA	25.00	14.00	36.20	0.39	15.500 0	0.290 0	0.557 5	0.006 8	0.268 3	0.201 1	0.003 8	2.842	18	2 854	28	2 828	32	100
D1533-2, 1-22	MA	48.70	43.50	70.40	0.62	13.960 0	0.240 0	0.535 4	0.006 5	0.512 7	0.188 9	0.002 9	2.745	16	2 766	28	2 729	24	99
D1533-2, 1-37	MA	107.40	185.40	138.50	1.34	13.790 0	0.200 0	0.532 5	0.006 0	0.581 0	0.187 2	0.002 2	2.735	13	2 750	25	2 713	20	99
D1533-2, 1-105	MA	14.20	12.10	21.30	0.57	13.480 0	0.390 0	0.527 4	0.009 2	0.384 4	0.185 6	0.005 1	2.707	27	2 727	39	2 687	46	99
D1533-2, 1-138	MA	28.40	21.50	44.50	0.48	13.190 0	0.310 0	0.522 0	0.007 5	0.504 2	0.182 3	0.003 8	2.687	22	2 706	32	2 661	35	99
D1533-2, 1-14	MA	82.20	150.00	126.00	1.19	12.910 0	0.200 0	0.514 5	0.004 9	0.533 3	0.181 3	0.002 4	2.670	14	2 675	21	2 659	22	100

续表 1-4
Continued Table 1-4

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%			
		Total Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	ρ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ
D1533-2, 1-46	MA	21.80	19.40	34.10	0.57	12.780 0	0.320 0	0.509 4	0.008 4	0.285 9	0.182 2	0.004 7	2.655	24	2.651	36	2.654	43	100
D1533-2, 1-84	MA	48.70	37.70	80.40	0.47	11.940 0	0.190 0	0.497 7	0.005 8	0.317 6	0.174 4	0.003 0	2.601	15	2.602	25	2.591	28	100
D1533-2, 1-23	MA	62.10	577.40	86.30	6.69	11.860 0	0.240 0	0.494 1	0.006 4	0.553 9	0.174 0	0.003 0	2.591	19	2.591	28	2.587	29	100
D1533-2, 1-81	MA	132.80	479.00	192.20	2.49	11.720 0	0.230 0	0.494 9	0.007 5	0.586 6	0.171 7	0.002 5	2.579	18	2.590	33	2.570	25	100
D1533-2, 1-95	MA	33.50	36.70	54.00	0.68	11.540 0	0.240 0	0.488 7	0.006 0	0.465 2	0.170 6	0.003 0	2.566	18	2.563	26	2.558	31	100
D1533-2, 1-4	MA	34.20	45.40	51.70	0.88	11.220 0	0.320 0	0.479 8	0.008 1	0.354 9	0.171 1	0.004 7	2.537	27	2.525	35	2.557	47	100
D1533-2, 1-159	MA	35.00	55.60	54.10	1.03	11.220 0	0.220 0	0.480 2	0.006 0	0.263 8	0.169 6	0.003 4	2.537	19	2.527	26	2.546	33	100
D1533-2, 1-156	MA	57.50	72.10	94.30	0.76	11.180 0	0.180 0	0.479 3	0.005 4	0.295 9	0.169 2	0.002 8	2.535	15	2.523	23	2.545	27	100
D1533-2, 1-26	MA	69.90	77.40	108.80	0.71	11.030 0	0.340 0	0.477 1	0.006 8	0.189 7	0.169 7	0.005 3	2.521	28	2.514	30	2.542	52	100
D1533-2, 1-118	MA	65.00	43.80	111.50	0.39	11.680 0	0.270 0	0.496 7	0.008 1	0.442 5	0.169 0	0.003 6	2.576	21	2.598	35	2.541	36	99
D1533-2, 1-6	MA	110.10	302.80	143.30	2.11	11.450 0	0.160 0	0.491 0	0.005 8	0.408 8	0.168 8	0.002 5	2.562	14	2.574	25	2.541	25	100
D1533-2, 1-32	MA	54.90	101.60	84.70	1.20	11.300 0	0.220 0	0.480 1	0.006 6	0.398 7	0.168 9	0.003 2	2.545	18	2.527	29	2.540	32	99
D1533-2, 1-125	MA	71.70	61.30	121.10	0.51	11.570 0	0.190 0	0.492 3	0.005 7	0.464 1	0.168 2	0.002 7	2.567	15	2.579	25	2.538	26	100
D1533-2, 1-163	MA	66.60	87.90	109.60	0.80	11.230 0	0.180 0	0.484 9	0.006 3	0.481 6	0.168 0	0.002 5	2.541	15	2.547	27	2.534	25	100
D1533-2, 1-58	MA	93.70	155.00	153.80	1.01	11.320 0	0.170 0	0.486 1	0.005 8	0.516 4	0.168 0	0.002 2	2.548	14	2.553	25	2.533	22	100
D1533-2, 1-87	MA	42.00	62.00	64.80	0.96	11.310 0	0.210 0	0.486 2	0.005 5	0.393 3	0.168 5	0.003 0	2.544	18	2.553	24	2.533	31	100
D1533-2, 1-59	MA	56.50	99.70	83.60	1.19	11.350 0	0.200 0	0.488 3	0.005 1	0.366 0	0.168 3	0.002 8	2.548	17	2.562	22	2.532	28	99
D1533-2, 1-25	MA	88.80	1022.00	129.00	7.92	11.120 0	0.2700	0.478 9	0.008 8	0.692 6	0.167 4	0.003 0	2.530	23	2.521	38	2.526	30	100
D1533-2, 1-43	MA	66.80	187.00	105.90	1.77	11.010 0	0.160 0	0.478 6	0.005 2	0.384 6	0.166 7	0.002 3	2.521	14	2.520	23	2.526	22	100
D1533-2, 1-20	MA	37.50	55.40	53.90	1.03	11.230 0	0.310 0	0.489 7	0.008 7	0.204 6	0.168 0	0.004 9	2.543	24	2.568	37	2.525	50	99
D1533-2, 1-100	MA	42.80	50.70	69.40	0.73	11.300 0	0.190 0	0.488 0	0.005 5	0.287 0	0.167 1	0.002 9	2.547	16	2.561	24	2.525	28	99
D1533-2, 1-199	MA	111.80	184.40	171.00	1.08	11.210 0	0.150 0	0.484 1	0.005 0	0.462 8	0.167 3	0.002 1	2.538	13	2.544	22	2.525	21	100
D1533-2, 1-145	MA	146.70	917.00	184.30	4.98	10.470 0	0.290 0	0.462 0	0.008 6	0.430 1	0.1678	0.004 8	2.473	25	2.447	38	2.524	46	99
D1533-2, 1-80	MA	60.70	78.30	97.10	0.81	11.100 0	0.190 0	0.481 7	0.006 2	0.541 9	0.166 5	0.002 3	2.527	16	2.533	27	2.523	24	100
D1533-2, 1-61	MA	134.00	304.20	195.00	1.56	11.090 0	0.190 0	0.479 7	0.005 8	0.445 7	0.167 0	0.002 7	2.528	16	2.525	25	2.521	27	100
D1533-2, 1-65	MA	31.40	49.50	48.60	1.02	11.070 0	0.220 0	0.479 1	0.006 0	0.245 8	0.167 5	0.003 4	2.524	19	2.522	26	2.520	35	100
D1533-2, 1-187	MA	90.60	142.00	156.70	0.91	11.330 0	0.200 0	0.490 0	0.006 5	0.453 6	0.166 8	0.002 7	2.547	16	2.569	28	2.519	27	99
D1533-2, 1-49	MA	48.40	68.60	75.00	0.91	11.190 0	0.200 0	0.486 1	0.006 3	0.364 3	0.167 0	0.002 9	2.535	17	2.552	27	2.518	29	99
D1533-2, 1-50	MA	30.50	229.30	40.00	5.74	11.490 0	0.290 0	0.495 0	0.009 9	0.323 8	0.167 6	0.004 5	2.558	23	2.589	42	2.518	45	99
D1533-2, 1-103	MA	22.00	21.10	36.60	0.58	11.040 0	0.260 0	0.480 3	0.006 1	0.110 5	0.165 9	0.004 0	2.523	23	2.535	27	2.517	43	100
D1533-2, 1-60	MA	22.20	32.00	35.30	0.90	10.850 0	0.270 0	0.471 9	0.006 8	0.401 3	0.167 0	0.004 0	2.509	25	2.490	30	2.515	42	99
D1533-2, 1-110	MA	22.60	28.00	36.70	0.76	10.890 0	0.230 0	0.472 9	0.006 5	0.101 7	0.167 5	0.004 0	2.508	20	2.494	29	2.514	42	99
D1533-2, 1-126	MA	17.50	35.10	25.90	1.35	10.820 0	0.250 0	0.471 8	0.008 1	0.325 8	0.167 6	0.004 3	2.501	22	2.488	35	2.514	43	99
D1533-2, 1-147	MA	48.60	57.60	81.30	0.71	10.850 0	0.210 0	0.473 4	0.005 9	0.358 6	0.166 3	0.003 1	2.506	18	2.497	26	2.514	30	100
D1533-2, 1-9	MA	39.10	60.20	58.20	1.03	11.160 0	0.220 0	0.484 4	0.005 9	0.342 3	0.166 7	0.003 2	2.532	19	2.545	25	2.513	33	99

续表 1-5
Continued Table 1-5

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%			
		Total Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	rho	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ
D1533-2, 1-111	MA	85.30	115.10	136.70	0.84	11.050 0	0.160 0	0.484 1	0.006 0	0.513 4	0.166 1	0.002 0	2.525	14	2.543	26	2.513	21	99
D1533-2, 1-165	MA	45.10	64.90	72.90	0.89	10.830 0	0.200 0	0.471 5	0.005 6	0.331 4	0.166 5	0.003 0	2.504	17	2.489	25	2.513	30	99
D1533-2, 1-212	MA	83.30	168.00	137.60	1.22	10.970 0	0.160 0	0.479 3	0.005 1	0.440 1	0.165 8	0.002 2	2.518	13	2.523	22	2.513	22	100
D1533-2, 1-98	MA	19.30	32.30	29.20	1.11	11.040 0	0.290 0	0.479 1	0.006 2	0.269 4	0.166 7	0.004 3	2.522	23	2.522	27	2.512	42	100
D1533-2, 1-196	MA	33.10	58.50	51.10	1.14	10.860 0	0.210 0	0.475 0	0.005 9	0.224 9	0.166 4	0.003 4	2.506	18	2.504	26	2.512	33	100
D1533-2, 1-211	MA	80.00	244.00	142.50	1.71	10.750 0	0.180 0	0.471 4	0.006 6	0.548 6	0.166 1	0.002 5	2.499	16	2.488	29	2.512	25	100
D1533-2, 1-15	MA	25.50	28.40	41.40	0.69	10.850 0	0.230 0	0.472 2	0.006 0	0.318 7	0.166 9	0.003 5	2.504	20	2.491	26	2.511	36	99
D1533-2, 1-79	MA	46.20	18.10	86.00	0.21	10.800 0	0.180 0	0.471 5	0.005 1	0.426 0	0.166 2	0.002 5	2.502	16	2.489	22	2.511	25	99
D1533-2, 1-72	MA	73.20	152.30	115.80	1.32	10.860 0	0.160 0	0.473 9	0.004 5	0.386 8	0.165 8	0.002 3	2.508	13	2.500	20	2.510	23	100
D1533-2, 1-91	MA	86.10	167.30	130.60	1.28	10.840 0	0.160 0	0.473 6	0.005 0	0.574 9	0.165 8	0.002 0	2.507	14	2.501	21	2.510	20	100
D1533-2, 1-86	MA	44.90	109.80	60.70	1.81	10.930 0	0.230 0	0.476 5	0.006 3	0.478 3	0.166 4	0.003 2	2.514	20	2.514	28	2.510	32	100
D1533-2, 1-41	MA	28.30	35.40	44.50	0.80	11.050 0	0.340 0	0.485 1	0.007 9	0.414 4	0.165 7	0.004 7	2.520	30	2.548	34	2.509	46	99
D1533-2, 1-68	MA	111.40	213.80	168.40	1.27	10.680 0	0.210 0	0.469 2	0.006 8	0.547 6	0.165 8	0.002 7	2.493	18	2.479	30	2.509	28	99
D1533-2, 1-112	MA	76.10	131.80	113.20	1.16	10.930 0	0.180 0	0.477 1	0.005 1	0.300 7	0.166 0	0.002 8	2.516	15	2.513	22	2.509	28	100
D1533-2, 1-183	MA	52.20	166.90	79.40	2.10	11.310 0	0.230 0	0.490 5	0.007 0	0.556 0	0.165 5	0.003 1	2.545	19	2.571	30	2.509	30	99
D1533-2, 1-167	MA	94.30	101.10	158.90	0.64	10.990 0	0.150 0	0.480 0	0.005 2	0.498 6	0.165 4	0.002 0	2.520	13	2.529	23	2.509	21	100
D1533-2, 1-36	MA	53.70	64.00	86.80	0.74	11.050 0	0.160 0	0.482 0	0.005 3	0.277 8	0.165 9	0.002 7	2.527	14	2.535	23	2.508	28	100
D1533-2, 1-53	MA	33.00	46.30	51.80	0.89	10.930 0	0.230 0	0.477 0	0.005 8	0.287 2	0.166 3	0.003 4	2.514	19	2.516	26	2.507	35	100
D1533-2, 1-117	MA	52.20	68.00	81.90	0.83	11.090 0	0.240 0	0.483 1	0.006 0	0.595 4	0.165 9	0.002 8	2.525	20	2.539	26	2.507	29	99
D1533-2, 1-33	MA	15.40	27.90	22.70	1.23	11.040 0	0.310 0	0.479 3	0.007 5	0.230 2	0.167 3	0.004 7	2.517	26	2.522	32	2.506	49	100
D1533-2, 1-101	MA	26.50	46.30	39.40	1.18	11.060 0	0.270 0	0.481 8	0.006 9	0.417 5	0.166 4	0.003 8	2.521	23	2.533	30	2.506	38	100
D1533-2, 1-130	MA	49.70	59.10	80.80	0.73	11.020 0	0.170 0	0.481 7	0.005 4	0.407 6	0.165 4	0.002 4	2.524	14	2.533	23	2.505	25	100
D1533-2, 1-161	MA	33.90	56.00	54.80	1.02	11.070 0	0.240 0	0.483 2	0.006 5	0.383 4	0.165 6	0.003 4	2.526	20	2.539	28	2.505	36	99
D1533-2, 1-83	MA	42.10	63.80	65.70	0.97	11.010 0	0.210 0	0.482 5	0.005 7	0.384 8	0.164 9	0.002 9	2.522	17	2.537	25	2.505	29	99
D1533-2, 1-10	MA	87.80	127.00	146.20	0.87	11.270 0	0.220 0	0.489 8	0.008 9	0.496 9	0.165 4	0.003 3	2.547	20	2.568	39	2.505	35	99
D1533-2, 1-64	MA	13.00	21.20	20.00	1.06	11.130 0	0.350 0	0.482 2	0.008 7	0.186 0	0.166 3	0.005 2	2.521	30	2.534	38	2.504	56	99
D1533-2, 1-8	MA	67.10	310.00	91.40	3.39	10.980 0	0.150 0	0.481 9	0.005 2	0.333 6	0.165 2	0.002 3	2.520	13	2.534	23	2.503	24	99
D1533-2, 1-121	MA	81.20	147.70	129.20	1.14	10.950 0	0.160 0	0.480 8	0.005 8	0.469 0	0.165 2	0.002 3	2.516	13	2.529	25	2.503	23	99
D1533-2, 1-47	MA	52.10	58.20	85.60	0.68	11.020 0	0.200 0	0.482 3	0.005 6	0.406 1	0.165 3	0.002 8	2.521	17	2.536	25	2.502	29	99
D1533-2, 1-67	MA	21.30	23.00	35.60	0.65	10.920 0	0.260 0	0.478 9	0.007 0	0.439 7	0.165 3	0.003 6	2.512	22	2.520	31	2.501	37	100
D1533-2, 1-102	MA	15.90	24.40	24.90	0.98	10.890 0	0.280 0	0.475 5	0.007 5	0.307 3	0.166 3	0.004 2	2.506	24	2.505	33	2.501	43	100
D1533-2, 1-169	MA	24.90	43.20	37.90	1.14	11.060 0	0.260 0	0.483 3	0.007 3	0.368 8	0.165 8	0.003 7	2.521	22	2.539	32	2.500	38	99
D1533-2, 1-194	MA	67.00	100.40	108.30	0.93	11.020 0	0.190 0	0.481 8	0.005 6	0.476 3	0.164 8	0.002 5	2.523	16	2.534	24	2.500	26	100
D1533-2, 1-192	MA	42.80	40.50	75.60	0.54	10.700 0	0.190 0	0.469 4	0.005 7	0.259 4	0.165 2	0.003 2	2.494	17	2.483	26	2.498	33	100
D1533-2, 1-116	MA	53.20	445.00	86.80	5.13	10.490 0	0.200 0	0.464 6	0.006 7	0.400 4	0.164 5	0.003 0	2.475	17	2.458	30	2.498	30	99

续表 1-6
Continued Table 1-6

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值					年龄/Ma					谐和度/%				
		Total Pb	^{232}Th		^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	rho	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ
D1533-2, 1-149	MA	53.90	86.70	82.90	1.05	10.990 0	0.200 0	0.481 8	0.005 5	0.203 0	0.164 2	0.003 0	2 518	17	2 534	24	2 498	33	99
D1533-2, 1-30	MA	24.30	49.20	36.90	1.33	10.620 0	0.350 0	0.466 0	0.012 0	0.366 2	0.164 3	0.005 4	2 484	31	2 464	53	2 497	53	99
D1533-2, 1-44	MA	105.10	609.00	181.50	3.36	10.640 0	0.170 0	0.467 5	0.006 2	0.426 4	0.164 3	0.002 6	2 490	15	2 472	27	2 495	27	99
D1533-2, 1-55	MA	42.20	70.60	67.90	1.04	10.900 0	0.320 0	0.473 4	0.008 5	0.385 4	0.164 0	0.004 3	2 509	27	2 497	37	2 495	47	100
D1533-2, 1-153	MA	74.80	135.40	113.10	1.20	10.780 0	0.150 0	0.478 3	0.005 7	0.382 6	0.164 2	0.002 3	2 506	13	2 518	25	2 493	24	100
D1533-2, 1-134	MA	9.20	15.10	14.20	1.06	10.890 0	0.380 0	0.476 0	0.010 0	0.325 1	0.166 3	0.005 7	2 504	33	2 512	46	2 492	60	100
D1533-2, 1-56	MA	85.70	508.00	120.40	4.22	11.000 0	0.270 0	0.480 9	0.008 6	0.580 5	0.163 8	0.003 4	2 520	23	2 530	37	2 490	35	100
D1533-2, 1-151	MA	39.00	116.40	48.60	2.40	10.650 0	0.240 0	0.470 4	0.007 0	0.247 2	0.165 1	0.004 1	2 489	22	2 483	30	2 490	41	100
D1533-2, 1-62	MA	97.80	193.30	150.20	1.29	10.830 0	0.160 0	0.478 3	0.005 6	0.567 8	0.163 4	0.002 1	2 506	14	2 519	24	2 489	23	99
D1533-2, 1-42	MA	49.40	60.50	81.40	0.74	10.140 0	0.300 0	0.453 6	0.008 2	0.183 1	0.164 3	0.005 2	2 444	27	2 410	36	2 489	53	99
D1533-2, 1-166	MA	47.50	101.90	68.50	1.49	10.810 0	0.180 0	0.479 4	0.005 9	0.423 0	0.163 6	0.002 7	2 505	16	2 523	25	2 488	28	99
D1533-2, 1-171	MA	124.40	118.50	218.90	0.54	10.970 0	0.180 0	0.482 2	0.007 8	0.588 3	0.162 9	0.002 3	2 519	15	2 536	34	2 488	22	99
D1533-2, 1-18	MA	44.40	70.30	73.60	0.95	10.530 0	0.160 0	0.466 1	0.005 2	0.282 6	0.163 8	0.002 8	2 482	15	2 468	23	2 486	29	99
D1533-2, 1-19	MA	82.70	99.00	133.70	0.74	10.870 0	0.160 0	0.480 1	0.005 7	0.455 8	0.163 0	0.002 3	2 509	14	2 527	25	2 486	25	99
D1533-2, 1-74	MA	94.90	433.00	164.50	2.63	10.860 0	0.200 0	0.479 2	0.006 4	0.642 3	0.163 4	0.002 3	2 508	17	2 527	27	2 485	24	99
D1533-2, 1-90	MA	41.60	45.70	69.10	0.66	10.840 0	0.220 0	0.479 1	0.005 8	0.376 1	0.164 0	0.003 2	2 504	19	2 522	25	2 485	34	99
D1533-2, 1-51	MA	11.70	17.70	18.10	0.98	11.150 0	0.480 0	0.489 0	0.010 0	0.288 5	0.165 5	0.007 0	2 532	38	2 562	44	2 484	70	99
D1533-2, 1-157	MA	55.70	83.50	91.90	0.91	10.710 0	0.210 0	0.472 6	0.005 2	0.438 8	0.163 4	0.002 9	2 494	18	2 494	23	2 483	30	100
D1533-2, 1-5	MA	90.50	1433.00	142.40	10.06	9.960 0	0.200 0	0.445 6	0.005 6	0.366 4	0.163 3	0.003 1	2 432	17	2 375	25	2 482	33	98
D1533-2, 1-120	MA	22.40	62.20	28.60	2.17	10.830 0	0.320 0	0.479 1	0.008 3	0.489 7	0.162 3	0.004 0	2 503	27	2 521	36	2 475	43	99
D1533-2, 1-198	MA	30.80	53.90	47.80	1.13	10.650 0	0.230 0	0.475 5	0.006 5	0.386 0	0.162 6	0.003 3	2 488	20	2 506	28	2 474	34	99
D1533-2, 1-13	MA	110.60	190.40	178.70	1.07	10.410 0	0.130 0	0.466 4	0.003 9	0.437 0	0.161 5	0.001 8	2 470	12	2 467	17	2 469	20	100
D1533-2, 1-48	MA	26.40	37.30	42.30	0.88	10.720 0	0.240 0	0.477 9	0.007 1	0.400 6	0.162 5	0.003 5	2 497	22	2 516	31	2 469	36	99
D1533-2, 1-206	MA	37.20	60.10	59.50	1.01	10.520 0	0.210 0	0.469 5	0.006 3	0.291 6	0.162 4	0.003 4	2 476	19	2 480	28	2 467	35	100
D1533-2, 1-69	MA	24.50	31.00	41.10	0.75	10.530 0	0.240 0	0.469 6	0.005 9	0.414 4	0.162 4	0.003 4	2 476	21	2 480	26	2 467	36	100
D1533-2, 1-193	MA	40.00	58.70	64.80	0.91	10.620 0	0.210 0	0.474 6	0.005 6	0.338 1	0.162 3	0.003 2	2 488	18	2 502	24	2 467	34	99
D1533-2, 1-202	MA	109.80	1081.00	178.20	6.07	10.220 0	0.200 0	0.460 1	0.006 9	0.541 1	0.161 3	0.002 8	2 451	19	2 438	30	2 461	30	99
D1533-2, 1-124	MA	85.50	929.00	146.00	6.36	10.460 0	0.220 0	0.469 8	0.008 3	0.6421	0.160 5	0.002 8	2 477	21	2 481	37	2 455	30	100
D1533-2, 1-200	MA	66.80	139.40	103.50	1.35	10.170 0	0.160 0	0.459 6	0.005 1	0.405 1	0.160 3	0.002 4	2 449	15	2 437	22	2 455	26	100
D1533-2, 1-94	MA	27.30	54.50	41.70	1.31	10.480 0	0.260 0	0.471 5	0.007 8	0.356 2	0.160 3	0.003 8	2 472	23	2 488	34	2 452	40	99

续表 1-7
Continued Table 1-7

样品分析点	类型	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%				
		Total Pb	^{232}Th		^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	rho	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ
DI1533-2, 1-184	MA	18.00	43.40	26.40	1.64	10.170 0	0.270 0	0.457 8	0.008 3	0.372 4	0.161 7	0.004 4	2.444	26	2.427	37	2.451	47	99
DI1533-2, 1-122	MA	29.10	46.70	46.10	1.01	10.230 0	0.250 0	0.463 8	0.006 5	0.323 4	0.159 8	0.003 7	2.449	22	2.454	29	2.442	38	100
DI1533-2, 1-170	MA	58.30	531.00	83.30	6.37	10.100 0	0.200 0	0.458 3	0.006 2	0.356 8	0.159 2	0.003 0	2.439	18	2.434	28	2.440	34	100
DI1533-2, 1-54	MA	23.60	36.60	37.20	0.98	10.380 0	0.270 0	0.470 5	0.007 0	0.239 3	0.160 3	0.004 2	2.461	24	2.484	31	2.437	45	99
DI1533-2, 1-210	MA	60.60	313.00	83.80	3.74	10.110 0	0.230 0	0.460 9	0.006 2	0.538 5	0.158 9	0.003 0	2.442	20	2.442	27	2.433	32	100
DI1533-2, 1-139	MA	24.20	44.50	38.20	1.16	9.910 0	0.250 0	0.452 6	0.006 2	0.277 1	0.159 2	0.004 0	2.418	24	2.409	28	2.427	44	100
DI1533-2, 1-109	MA	48.30	74.20	77.10	0.96	10.290 0	0.260 0	0.469 9	0.007 8	0.414 9	0.157 3	0.003 6	2.457	23	2.482	34	2.425	40	99
DI1533-2, 1-162	MA	63.60	83.80	110.00	0.76	9.790 0	0.150 0	0.452 2	0.005 4	0.470 4	0.157 6	0.002 2	2.412	14	2.404	24	2.424	24	100
DI1533-2, 1-195	MA	33.20	457.00	57.80	7.91	9.360 0	0.370 0	0.436 0	0.011 0	0.283 6	0.158 3	0.006 3	2.367	36	2.329	51	2.419	69	98
DI1533-2, 1-66	MA	66.90	169.00	114.70	1.47	9.710 0	0.150 0	0.450 7	0.005 5	0.474 6	0.155 9	0.002 2	2.405	14	2.397	25	2.404	25	100
DI1533-2, 1-31	MA	90.60	164.10	146.10	1.12	9.220 0	0.160 0	0.440 4	0.005 8	0.491 3	0.152 4	0.002 3	2.357	16	2.351	26	2.371	27	100
DI1533-2, 1-115	MA	23.00	142.50	40.90	3.49	9.010 0	0.240 0	0.435 4	0.006 9	0.266 7	0.150 1	0.003 9	2.330	25	2.328	31	2.338	46	100
DI1533-2, 1-209	MA	27.10	63.80	45.70	1.40	8.900 0	0.280 0	0.431 6	0.007 5	0.071 5	0.147 4	0.004 7	2.321	28	2.312	34	2.306	59	100
DI1533-2, 1-45	MA	114.00	228.00	229.30	0.99	7.650 0	0.120 0	0.406 6	0.004 5	0.582 7	0.136 2	0.001 6	2.188	14	2.198	21	2.175	21	100
DI1533-2, 1-181	MA	36.20	57.40	71.10	0.81	7.610 0	0.160 0	0.404 9	0.004 9	0.353 8	0.136 8	0.002 7	2.186	19	2.191	23	2.175	34	100
DI1533-2, 1-189	MA	41.10	34.40	88.50	0.39	7.710 0	0.180 0	0.410 6	0.005 5	0.468 4	0.135 5	0.002 8	2.193	21	2.216	25	2.166	35	99
DI1533-2, 1-137	MA	28.20	55.20	52.40	1.05	7.480 0	0.190 0	0.397 1	0.006 3	0.371 9	0.136 6	0.003 3	2.162	23	2.154	29	2.165	44	100
DI1533-2, 1-92	MA	37.10	545.00	68.90	7.91	7.470 0	0.270 0	0.396 5	0.006 3	0.474 5	0.136 0	0.004 4	2.164	33	2.152	29	2.164	57	99
DI1533-2, 1-16	MA	25.50	32.80	53.40	0.61	7.320 0	0.210 0	0.394 8	0.006 9	0.291 0	0.135 9	0.004 1	2.149	27	2.149	33	2.155	54	100
DI1533-2, 1-214	MA	71.50	516.00	165.80	3.11	6.980 0	0.140 0	0.382 6	0.004 9	0.368 1	0.131 3	0.002 5	2.105	18	2.088	23	2.107	35	99
DI1533-2, 1-52	MA	40.00	57.20	86.60	0.66	6.540 0	0.160 0	0.372 5	0.005 0	0.417 7	0.126 6	0.002 8	2.046	21	2.040	24	2.039	39	100
DI1533-2, 1-93	MA	36.50	155.40	54.10	2.87	6.510 0	0.170 0	0.370 4	0.004 7	0.222 5	0.127 2	0.003 3	2.040	23	2.033	23	2.038	46	100
DI1533-2, 1-160	MA	76.40	152.00	167.10	0.91	6.436 0	0.096 0	0.373 0	0.004 7	0.382 0	0.124 9	0.001 8	2.035	13	2.042	22	2.024	26	100
DI1533-2, 1-73	MA	67.50	262.90	104.70	2.51	6.750 0	0.160 0	0.386 0	0.006 1	0.186 5	0.124 7	0.002 9	2.076	21	2.103	29	2.014	42	99
DI1533-2, 1-203	MA	56.30	138.90	114.70	1.21	6.200 0	0.120 0	0.366 3	0.003 9	0.426 7	0.122 7	0.002 2	2.001	17	2.011	18	1.984	32	100
DI1533-2, 1-143	MA	41.80	105.10	96.70	1.09	5.830 0	0.130 0	0.354 0	0.004 0	0.167 6	0.118 7	0.002 6	1.946	19	1.953	19	1.925	42	100

注: MA—岩浆成因的碎屑锆石; ME—变质成因的碎屑锆石,下同。

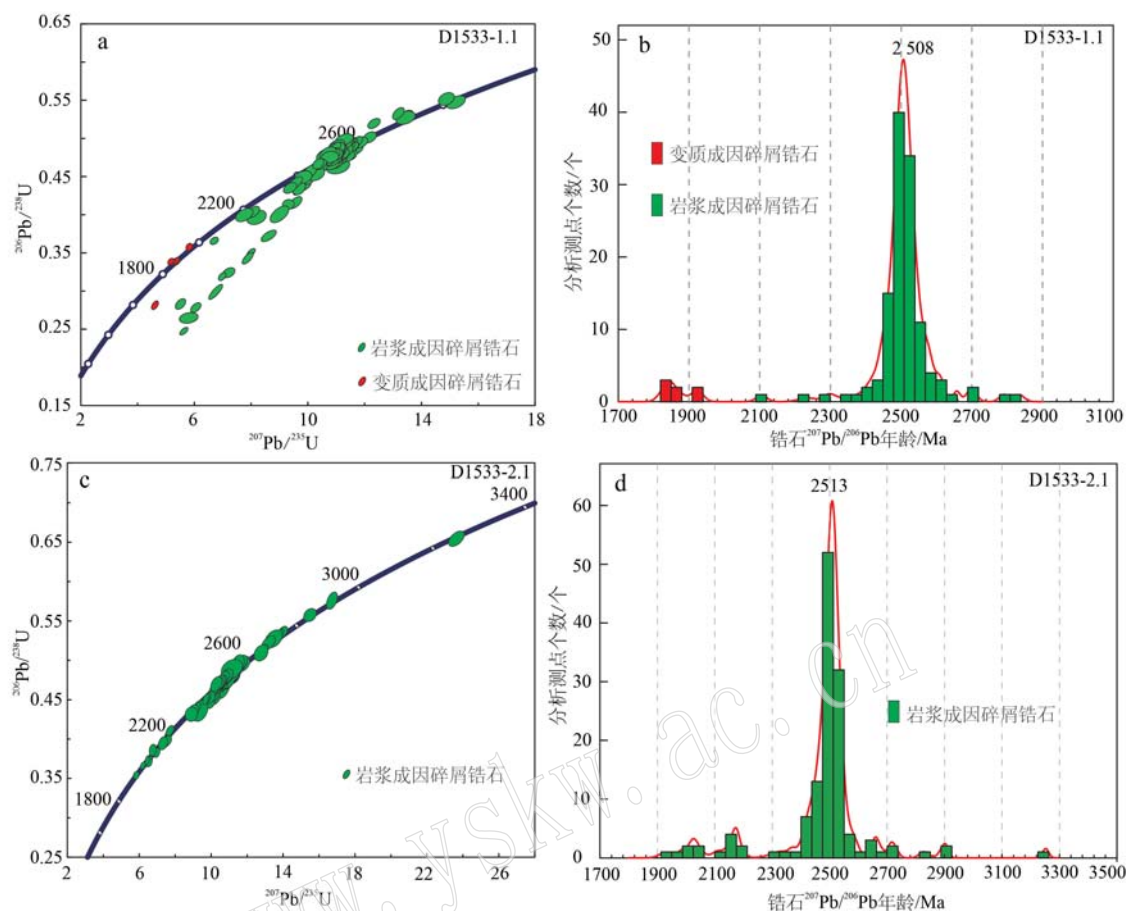


图7 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、c)与年龄频率直方图(b、d)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c) and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age histograms (b, d) of detrital zircons from quartz sandstones in the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanzhuang Complex

式图上显示其重稀土元素部分曲线明显上翘(图8a),对应的 $(\text{Lu}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为5.95~2.682,但测点D1533-1.1-37在稀土元素配分模式图上显示其重稀土元素部分平坦,对应的 $(\text{Lu}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为17.46。7个变质成因的碎屑锆石测点具有强烈的Ce正异常与Eu负异常, Ce/Ce^* 值与 Eu/Eu^* 值分别介于1.87~59与0.11~0.96之间。结合锆石CL结构特征,进一步表明这些碎屑锆石具有典型变质锆石的特点。

在样品D1533-2.1中,135个岩浆成因的碎屑锆石稀土元素含量变化较大,变化范围为 $24.8 \times 10^{-6} \sim 1469 \times 10^{-6}$;在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中,除少数测点可能剥蚀至磷灰石等富含轻稀土元素的包裹体外以及变质重结晶作用之外,绝大多数碎屑锆石测点具有轻稀土元素相对亏损而重稀土元素相对富集的特征,显示重稀土元素部分明显上翘

(图8b),对应的 $(\text{Lu}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为1.98~964;135个岩浆成因的碎屑锆石测点具有强烈的Ce正异常与Eu负异常, Ce/Ce^* 值与 Eu/Eu^* 值分别介于0.66~233与0.07~0.97之间;结合锆石CL图像特征,上述特征进一步证明这些碎屑锆石具有典型岩浆结晶锆石的特点。

4.4 锆石 Lu-Hf 同位素

本次研究选择50个碎屑锆石U-Pb年龄相对谐和的颗粒完成了Lu-Hf同位素分析,分析点位置与U-Pb同位素位置相同或尽可能在相同结构域内。Lu-Hf同位素分析数据见表3。锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为0.000145~0.001307和0.281094~0.281389。利用锆石单点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结算获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为0.281034~0.281333和-3.28~+6.32;单阶段和两阶段模式年龄分别为3018~2612 Ma和3253~

表 2 赞皇杂岩瓮城地区中元古代长城系石英砂岩的碎屑锆石微量元素分析结果
Table 2 Trace element composition of zircons from quartz sandstone of the Mesoproterozoic Changcheng System from the Zanhuang Complex in the Wengcheng area

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(La/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	$\epsilon_{\text{Hf}}/10^{-6}$
样品 D1533-1-1																						
D1533-1-1-91	MA	9.40	0.01	7.32	0.04	1.26	2.67	0.51	16.25	5.32	64.40	23.83	111.80	22.83	202.10	38.77	497.11	0.18	48.97	87.47	0.011	736
D1533-1-1-84	MA	4.51	0.01	7.90	0.04	0.71	1.46	0.37	8.80	3.09	39.00	15.43	79.90	18.62	180.80	38.29	394.41	0.24	63.20	157.98	0.006	676
D1533-1-1-74	MA	3.18	0.01	6.07	0.04	0.92	2.30	0.86	16.41	5.69	78.60	31.90	162.70	35.01	341.00	70.90	752.40	0.31	44.23	185.68	0.005	649
D1533-1-1-120	MA	11.90	0.01	12.36	0.03	0.59	1.36	0.36	7.76	2.53	29.69	11.00	53.40	11.34	104.10	20.41	254.93	0.27	137.02	90.40	0.011	756
D1533-1-1-34	MA	6.70	0.01	9.33	0.20	3.41	8.12	2.54	33.20	10.34	130.20	53.81	281.00	60.90	574.90	119.20	1 287.16	0.41	14.47	88.43	0.011	707
D1533-1-1-94	MA	7.30	0.01	13.76	0.04	0.99	2.17	0.49	14.38	4.92	65.00	25.83	128.60	26.90	247.50	48.99	579.59	0.20	89.73	135.99	0.007	714
D1533-1-1-43	MA	10.60	0.02	21.16	0.34	5.85	10.22	2.66	36.50	9.85	105.80	37.12	169.40	33.47	292.80	57.40	782.59	0.38	18.70	33.83	0.030	746
D1533-1-1-165	MA	5.70	0.02	5.74	0.37	5.36	11.76	4.29	38.40	10.16	112.90	39.72	182.40	36.93	321.10	61.92	831.07	0.56	4.76	31.72	0.032	694
D1533-1-1-47	MA	3.78	0.03	8.06	0.07	1.44	3.88	0.41	20.78	6.65	79.80	29.04	134.00	26.42	233.80	43.29	587.67	0.11	30.00	67.21	0.015	662
D1533-1-1-52	MA	15.60	0.11	23.12	0.88	12.07	15.62	3.60	51.60	12.62	127.80	41.90	176.80	34.21	278.40	52.74	831.47	0.35	7.79	20.34	0.049	782
D1533-1-1-173	MA	7.50	0.02	56.90	0.48	6.99	10.27	3.28	43.10	11.31	117.60	40.17	184.90	37.21	340.90	67.90	921.02	0.41	36.72	39.83	0.025	716
D1533-1-1-152	MA	20.10	0.003	11.82	0.14	2.22	4.10	0.88	19.24	5.34	58.90	20.35	93.70	19.53	173.80	32.93	442.95	0.25	26.75	48.38	0.021	806
D1533-1-1-58	MA	8.20	0.01	22.65	0.22	3.84	7.47	2.38	24.80	6.41	68.10	23.98	113.50	24.46	226.10	46.75	570.67	0.48	31.03	37.70	0.027	724
D1533-1-1-3	MA	3.68	0.01	9.81	0.03	0.84	1.88	0.16	14.29	4.76	57.20	20.89	95.60	19.40	168.20	31.76	424.83	0.07	94.56	101.76	0.010	660
D1533-1-1-92	MA	6.80	0.03	41.04	0.43	6.83	11.06	3.03	44.60	12.01	129.50	43.81	192.00	38.88	342.60	64.33	930.14	0.36	29.29	35.04	0.029	708
D1533-1-1-48	MA	3.00	0.02	9.26	0.04	0.71	1.78	0.75	7.52	1.96	23.16	9.23	48.10	11.32	117.50	26.89	258.23	0.54	68.43	91.00	0.011	645
D1533-1-1-100	MA	9.90	0.01	24.69	0.07	1.11	2.69	0.65	12.61	3.77	44.00	15.84	73.20	15.26	139.70	27.89	361.49	0.28	99.80	62.45	0.016	740
D1533-1-1-118	MA	8.80	2.40	17.10	1.02	7.70	8.20	1.25	37.70	11.24	120.50	41.30	187.40	35.50	297.00	51.20	819.51	0.18	2.68	37.61	0.027	730
D1533-1-1-156	MA	2.06	0.01	7.60	0.04	0.16	0.90	0.20	2.88	0.95	12.24	5.00	27.60	6.72	72.30	17.04	153.64	0.35	57.25	114.68	0.009	619
D1533-1-1-54	MA	6.30	0.01	19.63	0.03	0.62	1.14	0.50	7.67	2.61	33.29	13.60	72.70	17.10	177.70	38.65	385.24	0.38	205.84	204.22	0.005	702
D1533-1-1-147	MA	9.50	0.01	21.75	0.09	2.07	3.90	0.95	16.46	4.78	51.10	18.07	89.50	19.41	189.80	40.07	457.95	0.31	75.53	61.89	0.016	736
D1533-1-1-50	MA	3.14	0.00	26.10	0.24	3.79	6.01	2.21	27.90	8.22	92.50	33.08	156.90	33.25	309.60	60.90	760.70	0.44	33.68	61.04	0.016	648
D1533-1-1-112	MA	13.10	0.01	12.93	0.04	0.92	2.02	0.42	9.33	2.75	32.13	11.59	55.30	12.34	109.70	22.10	271.58	0.25	91.21	65.90	0.015	765
D1533-1-1-144	MA	14.80	0.01	38.07	0.10	1.92	3.78	0.98	17.33	4.93	58.80	20.33	95.50	19.80	178.30	34.69	474.54	0.31	115.64	55.28	0.018	777
D1533-1-1-171	MA	32.00	0.12	38.50	1.63	25.20	70.70	31.80	160.20	22.80	138.50	33.10	121.30	22.72	201.80	39.30	907.67	0.88	7.13	3.35	0.299	855
D1533-1-1-90	MA	10.50	0.03	67.40	0.78	13.16	17.97	3.20	59.80	14.85	154.20	49.11	209.10	40.97	354.80	67.50	1 052.88	0.27	26.25	22.63	0.044	745
D1533-1-1-149	MA	13.90	0.03	15.48	0.08	1.52	2.87	0.58	12.74	3.67	43.90	16.47	81.60	18.40	172.20	35.41	404.94	0.25	55.23	74.32	0.013	771
D1533-1-1-63	MA	12.70	0.02	26.53	0.10	1.45	3.00	0.81	15.41	4.62	53.40	19.33	91.50	18.97	173.10	34.27	442.51	0.30	79.03	68.81	0.015	762
D1533-1-1-125	MA	14.20	0.00	25.05	0.23	4.20	6.61	1.41	25.82	7.17	77.50	25.92	115.50	22.89	205.60	39.19	557.09	0.29	33.90	35.71	0.028	773
D1533-1-1-170	MA	10.60	0.08	27.14	0.59	7.69	9.64	3.14	34.70	10.11	121.80	45.92	226.00	48.38	450.90	90.70	1 076.79	0.47	13.51	56.67	0.018	746
D1533-1-1-67	MA	23.80	0.10	14.07	0.03	0.55	1.32	0.47	6.05	1.78	20.58	7.42	35.17	7.51	68.30	14.53	177.87	0.43	68.81	66.31	0.015	823
D1533-1-1-40	MA	11.10	0.01	15.68	0.10	1.06	2.22	0.46	10.24	3.12	36.70	13.17	64.90	14.19	134.00	27.20	323.05	0.25	48.29	73.80	0.014	750
D1533-1-1-69	MA	10.60	0.01	40.70	0.17	3.17	6.36	1.79	22.00	6.10	64.20	21.84	102.50	21.63	198.10	38.84	527.41	0.42	74.06	36.79	0.027	746
D1533-1-1-4	MA	11.40	0.02	22.88	0.13	2.31	3.40	1.22	17.90	5.21	59.30	20.87	101.00	21.00	198.30	41.40	494.94	0.38	52.46	73.35	0.014	753
D1533-1-1-57	MA	61.70	0.41	128.90	2.42	39.10	180.60	96.60	512.00	83.60	555.00	132.00	475.00	82.80	668.00	114.80	3 071.23	0.91	15.48	3.83	0.261	931
D1533-1-1-5	MA	19.30	0.05	28.18	0.34	5.68	9.86	1.70	37.40	8.93	84.70	25.44	106.40	20.25	172.30	32.61	533.83	0.24	24.57	19.92	0.050	802
D1533-1-1-68	MA	5.05	0.05	23.78	0.61	8.63	10.53	1.41	36.60	9.71	104.80	35.04	159.50	32.73	282.50	54.20	760.10	0.20	11.63	31.00	0.032	684
D1533-1-1-132	MA	7.60	0.02	20.90	0.07	1.19	2.03	0.70	8.76	2.51	29.10	10.27	48.10	10.53	100.40	20.20	254.78	0.43	80.69	59.94	0.017	717
D1533-1-1-62	MA	13.90	0.01	17.14	0.28	5.15	12.89	4.43	32.40	6.64	63.70	20.68	94.20	20.00	180.60	35.99	494.11	0.63	18.90	16.82	0.059	771
D1533-1-1-70	MA	25.10	0.04	32.10	0.19	3.45	5.27	1.49	22.11	5.85	65.80	21.88	98.90	20.38	179.10	34.22	490.78	0.36	49.28	39.11	0.026	829
D1533-1-1-85	MA	15.60	0.04	55.20	0.54	7.94	10.92	2.38	42.90	11.10	119.90	39.38	168.30	32.89	282.10	52.66	826.25	0.29	30.91	29.05	0.034	782
D1533-1-1-61	MA	12.30	0.01	97.70	0.29	5.22	9.09	0.72	39.70	11.34	124.50	42.40	185.60	36.39	313.60	59.70	926.26	0.10	102.40	39.56	0.025	760
D1533-1-1-73	MA	6.97	0.02	16.97	0.06	1.33	2.91	0.73	11.79	3.42	39.38	14.07	68.30	14.66	134.60	26.41	334.65	0.33	79.57	54.67	0.018	710

续表 2-1
Continued Table 2-1

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(La/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	ϵ^{147}
DI533-1, 1-109	MA	24.70	0.02	28.63	0.15	2.68	4.67	1.25	20.16	5.57	59.50	20.13	89.80	17.95	160.90	30.61	442.02	0.34	56.25	39.48	0.025	827
DI533-1, 1-38	MA	6.80	0.02	54.13	0.13	1.98	3.88	0.72	18.83	6.00	73.20	27.27	136.70	30.40	288.50	58.32	700.08	0.21	123.01	90.54	0.011	708
DI533-1, 1-55	MA	14.90	0.19	48.97	1.29	15.95	17.45	4.82	57.80	14.57	143.00	42.78	177.90	33.77	286.30	51.31	896.10	0.42	11.16	17.71	0.056	777
DI533-1, 1-105	MA	32.90	0.03	45.10	1.94	26.50	50.90	18.10	107.50	17.10	133.60	38.90	169.70	31.70	281.00	56.80	978.87	0.73	7.18	6.72	0.149	858
DI533-1, 1-26	MA	14.20	0.05	27.86	0.17	3.00	4.36	1.07	17.70	5.08	57.10	19.80	94.40	19.86	183.20	36.28	469.93	0.32	45.18	50.12	0.020	773
DI533-1, 1-124	MA	22.90	0.09	14.39	0.06	1.29	2.15	0.44	9.83	2.83	31.85	10.88	50.50	10.94	98.10	19.51	252.86	0.25	46.50	54.66	0.018	819
DI533-1, 1-135	MA	22.50	0.04	29.58	0.15	2.14	3.84	1.23	15.04	4.09	43.30	14.23	63.60	12.56	114.70	21.67	326.17	0.43	55.24	33.99	0.029	818
DI533-1, 1-77	MA	15.90	0.03	45.80	0.60	9.60	12.88	2.70	47.50	12.57	131.20	43.10	187.20	37.36	324.20	59.40	914.14	0.30	23.21	27.78	0.036	783
DI533-1, 1-153	MA	7.60	0.03	11.01	0.28	3.92	9.88	3.70	17.44	2.95	23.24	7.15	34.19	8.35	89.80	20.35	232.29	0.85	11.86	12.41	0.081	717
DI533-1, 1-89	MA	9.70	0.03	25.08	1.03	12.40	19.40	7.14	41.50	7.41	66.00	21.59	99.40	22.19	191.50	45.10	587.77	0.75	7.48	14.00	0.071	738
DI533-1, 1-95	MA	4.15	0.02	28.71	0.04	0.85	1.92	0.43	10.44	3.58	47.10	18.67	94.00	20.79	194.90	38.43	459.87	0.23	196.27	120.57	0.008	669
DI533-1, 1-164	MA	19.50	0.03	16.75	0.22	3.15	4.46	1.00	14.19	3.52	37.20	12.27	55.90	11.51	103.70	20.04	283.93	0.35	22.71	27.07	0.037	803
DI533-1, 1-167	MA	16.30	0.02	41.77	0.12	2.60	4.20	1.13	19.86	6.03	67.90	23.49	111.60	23.04	210.70	39.64	552.10	0.31	98.68	56.85	0.018	786
DI533-1, 1-65	MA	25.10	0.03	26.30	0.13	1.95	3.43	1.13	16.37	4.68	54.70	18.58	88.30	18.20	164.80	32.72	431.32	0.38	56.85	57.46	0.017	829
DI533-1, 1-18	MA	10.50	0.03	24.39	0.04	0.79	2.07	0.33	10.41	3.20	36.04	12.98	63.10	13.51	129.00	25.92	321.80	0.18	153.83	75.43	0.013	745
DI533-1, 1-104	MA	149.10	0.52	52.60	3.00	46.50	435.00	232.50	1027.00	127.50	629.00	112.30	317.10	51.20	391.00	68.40	3493.62	1.02	5.09	0.95	1.056	1051
DI533-1, 1-117	MA	17.20	0.10	26.76	0.22	3.14	4.71	1.20	19.99	6.02	66.80	23.69	114.90	24.53	223.40	44.10	559.55	0.32	32.57	56.40	0.018	791
DI533-1, 1-148	MA	24.10	0.09	29.81	0.07	1.80	3.06	0.94	14.10	4.02	45.60	15.43	70.20	14.55	127.10	25.36	352.12	0.36	86.92	49.92	0.020	825
DI533-1, 1-35	MA	23.70	0.11	26.97	0.77	9.82	12.83	4.30	43.10	12.48	137.10	48.50	221.70	45.20	413.00	79.50	1055.38	0.51	10.31	37.32	0.027	823
DI533-1, 1-44	MA	3.60	0.06	31.24	0.03	0.74	1.91	0.57	8.71	2.84	34.69	13.68	71.50	16.60	167.00	34.43	384.01	0.36	163.68	108.58	0.009	658
DI533-1, 1-130	MA	7.80	0.07	15.85	0.04	0.84	1.66	0.54	11.28	3.78	47.40	18.67	93.20	19.85	184.80	36.83	434.81	0.29	79.30	133.64	0.007	720
DI533-1, 1-150	MA	4.53	0.06	19.46	0.36	6.18	7.74	1.10	32.50	9.61	110.70	38.90	180.10	38.10	338.60	65.30	848.71	0.18	15.87	50.82	0.020	676
DI533-1, 1-127	MA	3.22	0.04	6.89	0.03	0.41	1.79	1.03	5.32	1.02	10.27	3.63	19.03	4.48	48.60	13.05	115.59	0.94	50.89	43.92	0.023	650
DI533-1, 1-49	MA	7.90	0.03	36.79	0.13	2.74	5.38	1.45	25.20	7.64	85.70	29.93	137.00	28.07	253.40	49.51	662.97	0.32	82.16	55.43	0.018	721
DI533-1, 1-116	MA	4.36	0.03	27.71	0.05	1.11	3.00	1.10	8.69	2.26	24.48	8.91	46.40	10.87	112.50	24.08	271.18	0.61	150.34	48.35	0.021	673
DI533-1, 1-12	MA	2.75	0.03	23.06	0.02	0.60	2.04	0.38	11.38	3.95	53.50	20.81	114.70	28.38	297.90	63.80	620.54	0.19	243.33	188.39	0.005	639
DI533-1, 1-21	MA	9.00	0.02	14.25	0.12	1.91	3.44	0.65	14.97	4.08	46.60	16.33	80.80	17.17	159.00	32.87	392.21	0.24	34.67	57.56	0.017	732
DI533-1, 1-23	MA	13.70	0.03	37.89	0.10	2.16	3.57	0.84	16.88	5.07	59.70	21.44	99.80	20.72	188.80	37.17	494.17	0.27	105.20	62.72	0.016	769
DI533-1, 1-2	MA	13.10	0.02	54.00	0.19	3.13	5.85	1.27	28.20	8.09	91.80	32.09	143.80	29.06	253.60	48.68	699.77	0.25	85.97	50.12	0.020	765
DI533-1, 1-22	MA	3.43	0.02	29.26	0.04	0.73	1.85	0.29	10.07	3.27	42.40	16.22	83.30	18.83	182.00	36.75	425.02	0.16	209.24	119.66	0.008	655
DI533-1, 1-110	MA	3.70	0.03	46.10	0.36	5.38	9.00	3.07	33.50	8.54	85.60	28.00	116.40	24.10	202.80	37.20	600.07	0.48	39.02	24.90	0.040	661
DI533-1, 1-174	MA	10.70	0.03	33.00	0.56	7.34	10.36	2.74	35.50	9.73	103.70	34.70	152.90	30.60	266.00	50.40	737.56	0.39	18.03	29.30	0.034	747
DI533-1, 1-81	MA	17.60	0.02	25.44	0.18	3.36	5.01	0.97	20.42	5.43	58.70	20.40	90.40	18.40	166.50	32.71	447.93	0.25	42.92	39.33	0.025	793
DI533-1, 1-136	MA	9.00	0.01	44.07	0.08	1.31	2.86	0.49	13.60	4.19	52.00	19.00	95.60	21.01	200.00	40.16	494.38	0.20	159.81	84.58	0.012	732
DI533-1, 1-13	MA	2.64	0.02	27.83	0.05	0.69	2.08	0.36	9.63	2.96	35.90	14.02	74.30	17.37	172.70	35.48	393.39	0.21	165.47	102.75	0.010	636
DI533-1, 1-138	MA	11.80	0.02	35.83	0.13	2.23	4.22	1.06	19.20	5.65	62.10	21.79	101.40	21.22	192.70	37.20	504.75	0.30	82.63	53.10	0.019	756
DI533-1, 1-163	MA	2.68	0.16	44.45	0.91	10.57	13.50	3.56	58.10	18.90	234.20	87.90	408.20	83.40	703.00	136.40	1803.25	0.33	14.18	60.86	0.016	637
DI533-1, 1-168	MA	52.10	0.11	53.80	0.93	12.88	20.70	5.72	76.60	20.57	222.50	73.80	325.00	63.80	547.00	102.10	1525.52	0.39	17.10	29.71	0.034	910
DI533-1, 1-75	MA	13.70	0.03	37.53	0.16	2.54	3.94	1.07	18.27	5.24	59.40	21.08	97.80	20.06	181.00	35.84	483.96	0.32	66.49	54.79	0.018	769
DI533-1, 1-122	MA	9.10	0.02	21.98	0.07	1.28	3.00	1.07	11.10	3.89	43.60	14.70	76.70	16.60	168.00	32.80	394.44	0.33	89.77	65.86	0.015	733
DI533-1, 1-28	MA	17.30	0.02	32.61	0.20	3.72	7.09	1.72	30.80	8.48	89.60	29.93	132.30	26.41	227.70	43.12	633.69	0.30	50.26	36.63	0.027	792
DI533-1, 1-1	MA	21.10	0.02	19.38	0.11	2.15	3.49	0.53	12.74	3.55	37.60	13.06	59.90	12.43	109.60	22.15	296.72	0.22	49.39	38.23	0.026	811
DI533-1, 1-31	MA	2.40	0.02	6.57	0.46	0.06	0.32	0.15	1.62	0.57	8.05	3.93	25.94	7.10	88.60	23.13	166.51	0.50	4.40	435.39	0.002	629
DI533-1, 1-60	MA	16.50	0.04	32.80	0.66	9.90	22.00	7.35	42.20	7.47	61.60	18.37	81.30	17.21	157.90	32.48	491.28	0.73	15.12	8.89	0.112	787

续表 2-2
Continued Table 2-2

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(Lu/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	$\epsilon_{\text{f}}/\epsilon_{\text{f}}$
DI533-1, 1-29	MA	10.90	0.84	33.00	0.59	5.68	10.35	4.00	26.20	5.49	50.40	15.84	70.90	14.30	130.30	25.28	393.17	0.71	11.01	14.71	0.068	749
DI533-1, 1-88	MA	5.90	0.09	39.50	0.16	2.99	5.19	1.16	16.90	4.74	51.20	17.08	84.60	17.46	162.10	33.30	436.46	0.34	64.72	38.65	0.026	697
DI533-1, 1-76	MA	15.50	0.16	40.95	1.11	13.13	16.16	3.73	57.90	15.97	174.40	60.60	271.60	53.40	456.80	86.80	1 252.70	0.33	10.86	32.35	0.031	781
DI533-1, 1-42	MA	11.10	0.05	55.40	0.48	1.40	3.11	0.64	14.76	4.83	59.10	21.23	108.30	23.80	230.60	45.78	569.08	0.24	178.34	88.67	0.011	750
DI533-1, 1-172	MA	14.90	0.04	18.64	0.44	6.44	29.70	13.94	67.90	10.50	73.10	19.63	82.50	16.72	154.50	30.52	524.56	0.92	12.86	6.19	0.162	777
DI533-1, 1-159	MA	3.08	0.01	28.16	0.04	0.75	1.86	0.43	7.20	2.26	26.77	10.00	51.10	12.22	116.50	24.42	281.71	0.31	236.26	79.08	0.013	647
DI533-1, 1-102	MA	43.00	0.12	18.91	2.10	26.00	74.50	34.50	159.90	21.40	123.20	26.66	94.40	16.65	143.00	27.68	769.02	0.94	2.73	2.24	0.447	888
DI533-1, 1-160	MA	9.40	0.00	32.56	0.05	1.23	2.91	0.67	14.45	4.24	51.40	18.69	89.10	18.17	166.40	32.99	432.85	0.26	213.26	68.29	0.015	736
DI533-1, 1-30	MA	9.50	0.01	30.32	0.19	3.54	6.52	1.74	27.97	7.84	85.60	29.24	130.50	26.13	230.50	43.95	624.05	0.34	47.64	40.60	0.025	736
DI533-1, 1-108	MA	6.60	0.43	38.30	0.97	10.41	25.60	10.53	53.00	8.51	79.00	26.60	131.00	30.34	296.40	64.10	775.19	0.85	10.41	15.08	0.066	706
DI533-1, 1-126	MA	20.90	0.15	46.00	1.33	19.10	26.60	8.63	76.20	18.17	174.70	53.50	223.50	44.30	367.80	66.80	1 126.78	0.55	10.27	15.13	0.066	810
DI533-1, 1-107	MA	4.50	0.07	26.26	0.10	2.37	4.80	1.41	19.70	5.51	61.90	20.74	97.90	20.20	184.60	35.50	481.06	0.38	64.68	44.55	0.022	675
DI533-1, 1-41	MA	15.30	0.07	34.58	0.12	1.75	3.14	0.86	15.43	4.59	51.60	18.11	84.00	17.17	158.90	31.27	421.59	0.31	71.45	59.99	0.017	780
DI533-1, 1-45	MA	9.20	0.27	61.10	1.61	18.80	30.80	12.42	112.80	29.29	305.80	98.20	418.10	82.70	712.00	129.20	2 013.09	0.57	11.04	25.27	0.040	734
DI533-1, 1-11	MA	4.00	0.09	3.53	0.20	2.37	7.00	2.67	15.20	2.17	16.30	4.58	21.10	4.55	53.40	14.01	147.17	0.77	4.69	12.06	0.083	666
DI533-1, 1-97	MA	11.80	0.00	25.09	0.26	4.08	6.24	1.58	25.20	7.12	80.60	27.40	127.30	26.30	236.80	46.00	613.98	0.33	29.66	44.40	0.023	756
DI533-1, 1-14	MA	15.40	0.06	23.00	0.64	10.76	23.80	8.93	52.50	9.65	88.80	28.90	131.30	27.70	267.30	57.40	730.74	0.75	10.78	14.53	0.069	780
DI533-1, 1-121	MA	10.00	0.02	25.84	0.32	5.15	6.63	2.04	25.80	7.04	77.30	25.43	113.00	22.28	194.30	36.87	542.02	0.42	24.79	33.50	0.030	741
DI533-1, 1-99	MA	22.90	0.09	24.28	0.96	14.22	17.04	3.07	50.80	11.37	108.60	35.00	148.40	28.12	233.90	44.08	719.93	0.30	7.56	15.58	0.064	819
DI533-1, 1-7	MA	12.20	0.11	41.18	1.06	13.12	13.75	3.25	39.70	10.18	101.80	32.95	144.20	28.43	250.00	47.49	727.22	0.40	11.61	20.80	0.048	759
DI533-1, 1-143	MA	4.40	0.21	48.10	1.09	13.07	21.00	7.35	113.60	31.43	327.50	105.00	454.80	84.40	704.00	130.20	2 041.75	0.37	12.73	37.35	0.027	674
DI533-1, 1-140	MA	31.60	0.10	22.90	2.25	28.10	55.80	21.29	101.70	15.87	121.50	32.40	127.10	26.34	249.10	49.50	853.95	0.85	3.11	5.34	0.187	853
DI533-1, 1-142	MA	62.70	0.23	51.40	3.92	48.20	137.80	59.10	284.00	39.40	243.00	52.90	188.90	34.60	299.80	60.60	1 503.85	0.89	3.98	2.65	0.378	933
DI533-1, 1-8	MA	4.82	0.01	39.90	0.32	5.40	9.19	2.43	38.50	11.43	129.50	43.96	203.10	41.60	375.50	71.10	971.94	0.34	37.90	46.60	0.021	681
DI533-1, 1-119	MA	1.69	0.02	5.87	0.04	0.88	3.04	0.63	16.64	5.86	82.20	34.25	181.60	43.52	439.50	93.70	907.75	0.22	40.85	185.66	0.005	606
DI533-1, 1-133	MA	67.10	0.49	45.80	3.63	39.00	184.00	97.10	445.00	58.50	329.30	69.30	245.10	46.30	411.90	82.50	2 057.92	0.99	3.72	2.70	0.370	941
DI533-1, 1-161	MA	13.70	0.03	17.83	0.48	7.10	9.23	3.57	28.10	6.80	66.60	20.26	82.50	15.81	138.30	26.40	423.01	0.62	11.19	17.23	0.058	769
DI533-1, 1-129	MA	3.29	0.02	17.89	0.04	0.69	1.84	0.66	6.15	1.64	19.75	7.38	38.78	9.25	92.70	20.37	217.16	0.54	115.19	66.69	0.015	652
DI533-1, 1-27	MA	22.50	0.01	26.06	0.56	8.27	21.60	7.68	40.80	7.50	65.50	20.67	90.60	19.62	190.80	36.60	536.27	0.78	14.32	10.21	0.098	818
DI533-1, 1-96	MA	4.33	0.03	22.35	0.24	3.65	8.47	1.88	32.20	8.44	89.30	29.56	132.40	26.03	232.10	44.41	631.06	0.31	27.53	31.58	0.032	672
DI533-1, 1-51	MA	58.20	0.62	59.40	2.44	31.00	99.90	43.70	235.00	37.00	241.00	58.90	218.20	41.70	353.00	67.60	1 489.46	0.84	6.86	4.08	0.245	924
DI533-1, 1-39	MA	3.80	1.93	32.30	1.31	11.20	11.10	3.06	41.40	11.11	117.50	39.70	172.80	35.40	298.00	54.90	831.71	0.39	4.81	29.79	0.034	663
DI533-1, 1-36	MA	3.24	0.05	43.60	0.43	7.24	12.68	3.42	46.40	13.12	143.10	48.40	221.20	45.20	392.00	74.20	1 051.05	0.38	29.73	35.25	0.028	651
DI533-1, 1-86	MA	2.52	0.07	37.20	0.54	8.41	11.61	4.25	45.10	11.51	120.00	37.00	158.60	31.60	269.00	50.60	785.48	0.50	20.57	26.25	0.038	633
DI533-1, 1-16	MA	1.76	0.04	9.02	0.21	2.64	4.64	2.30	17.42	4.25	44.90	15.60	75.30	16.75	165.80	34.65	393.52	0.69	12.48	44.98	0.022	608
DI533-1, 1-87	ME	59.10	0.11	5.90	0.94	17.80	131.60	70.40	341.00	52.40	378.00	105.10	434.00	84.70	735.00	129.90	2 486.85	0.96	1.87	5.95	0.168	926
DI533-1, 1-115	ME	7.50	0.02	1.70	0.06	0.83	1.94	0.19	9.72	2.84	33.09	11.76	54.00	11.06	99.60	19.67	246.47	0.11	8.48	61.07	0.016	716
DI533-1, 1-175	ME	19.50	0.02	4.63	0.38	6.49	17.60	5.38	44.40	10.02	105.30	36.46	167.20	34.70	301.60	57.40	791.58	0.56	3.73	19.65	0.051	803
DI533-1, 1-103	ME	1.29	0.02	0.50	0.06	0.88	0.10	0.15	2.03	1.05	17.21	8.47	53.50	15.16	183.00	45.41	327.52	0.48	2.43	2 681.69	0.0004	588
DI533-1, 1-66	ME	1.62	0.01	9.78	0.05	0.61	2.62	0.86	12.05	4.07	52.20	21.77	117.30	28.27	297.50	65.90	612.99	0.39	58.83	151.51	0.007	603
DI533-1, 1-64	ME	1.33	0.01	0.37	0.04	0.56	0.18	0.29	3.39	1.68	31.73	15.24	98.60	27.86	321.30	77.60	578.85	0.56	2.43	2 671.05	0.0004	590
DI533-1, 1-37	ME	3.99	0.01	5.54	0.04	0.45	1.28	0.56	7.76	2.05	17.64	4.55	16.43	2.86	22.31	3.71	85.18	0.42	43.87	17.46	0.057	666
样品 DI533-2, 1																						
DI533-2, 1-179	MA	3.08	0.02	53.23	0.34	6.44	10.93	1.96	47.10	12.36	134.90	45.07	209.00	42.64	381.20	72.20	1 017.39	0.22	47.90	39.79	0.030	647

续表 2-3
Continued Table 2-3

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(Lu/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	t/°C
DI533-2, 1-154	MA	7.90	0.05	22.40	0.03	0.49	1.28	0.16	7.07	2.27	28.62	11.01	54.90	11.51	108.30	21.75	269.84	0.13	147.84	102.35	0.01	721
DI533-2, 1-205	MA	19.30	0.07	13.87	0.25	3.06	4.42	0.75	15.39	4.28	46.10	15.44	69.60	14.37	128.00	24.16	339.76	0.25	15.54	32.93	0.03	802
DI533-2, 1-38	MA	26.60	0.07	24.05	0.77	10.24	13.94	1.76	54.60	15.50	165.20	53.47	213.20	37.40	289.80	49.11	929.11	0.17	9.38	21.22	0.05	835
DI533-2, 1-22	MA	3.56	0.05	19.17	0.31	5.17	8.00	1.36	33.70	9.55	105.70	36.90	172.60	34.60	303.00	59.60	789.71	0.22	18.29	44.88	0.02	658
DI533-2, 1-37	MA	15.80	0.00	6.99	0.05	1.18	2.09	0.16	10.38	3.82	47.10	17.05	81.20	16.25	141.70	25.52	353.50	0.09	42.88	73.55	0.01	783
DI533-2, 1-105	MA	7.60	0.02	4.88	0.02	0.36	1.03	0.42	4.71	1.41	14.79	5.06	21.81	4.21	39.20	7.45	105.37	0.48	48.22	43.57	0.02	717
DI533-2, 1-138	MA	3.47	0.02	29.65	0.28	5.04	7.75	2.13	29.50	7.92	89.30	30.74	141.10	28.60	256.10	50.30	678.44	0.38	31.44	39.10	0.03	656
DI533-2, 1-14	MA	5.25	0.02	7.25	0.14	1.78	4.61	1.71	20.27	6.55	87.00	34.67	179.60	39.14	370.20	76.00	828.94	0.46	15.39	99.30	0.01	687
DI533-2, 1-46	MA	9.80	0.01	9.10	0.16	2.69	6.30	1.78	17.90	5.10	59.70	22.46	112.10	24.73	230.30	44.15	536.48	0.48	17.70	42.21	0.02	739
DI533-2, 1-84	MA	6.50	0.00	30.50	0.09	1.98	4.31	1.10	18.00	5.25	59.90	21.00	100.80	21.00	189.10	36.60	489.64	0.33	99.46	51.15	0.02	704
DI533-2, 1-23	MA	17.80	0.02	3.21	0.23	3.18	5.84	1.46	36.70	11.78	44.40	52.50	240.50	46.00	390.00	72.70	1008.52	0.23	4.15	74.99	0.01	794
DI533-2, 1-81	MA	8.80	0.02	23.75	0.07	1.56	2.84	0.51	13.19	3.99	43.40	15.27	69.90	14.47	131.40	25.73	346.10	0.21	93.32	54.57	0.02	730
DI533-2, 1-95	MA	12.30	0.01	45.70	0.34	6.55	9.96	2.27	40.20	11.56	124.90	42.80	196.70	38.60	347.00	64.00	930.60	0.30	40.86	38.71	0.03	760
DI533-2, 1-4	MA	10.60	0.03	36.15	0.29	4.91	7.39	1.77	31.70	9.35	103.80	36.06	167.20	34.85	301.10	60.70	795.30	0.30	36.82	49.48	0.02	746
DI533-2, 1-159	MA	8.90	0.02	13.96	0.05	0.99	2.08	0.43	11.50	3.64	44.60	15.88	75.70	15.06	133.00	24.35	341.26	0.21	70.57	70.52	0.01	731
DI533-2, 1-156	MA	2.81	0.03	24.06	0.03	0.47	1.09	0.26	5.05	1.57	18.56	7.44	40.11	9.69	98.90	21.77	229.02	0.28	205.09	120.31	0.01	640
DI533-2, 1-26	MA	15.60	6.17	47.50	3.46	23.50	31.50	11.12	68.00	13.38	122.70	40.10	174.70	34.40	308.00	57.80	942.33	0.71	2.49	11.05	0.09	782
DI533-2, 1-118	MA	5.26	0.05	41.25	0.25	3.77	6.14	0.96	26.00	7.69	86.70	30.43	137.90	28.57	254.90	51.00	675.61	0.20	47.35	50.03	0.02	687
DI533-2, 1-6	MA	6.30	0.18	71.60	1.23	15.42	21.90	6.14	74.40	18.74	202.50	64.60	281.80	55.10	473.30	85.70	1372.61	0.42	17.07	23.57	0.04	702
DI533-2, 1-32	MA	2.61	0.02	29.84	0.09	2.06	4.51	0.53	20.40	5.72	63.90	22.51	102.20	20.42	184.80	35.55	492.55	0.14	97.30	47.48	0.02	635
DI533-2, 1-125	MA	14.60	0.20	15.66	0.94	10.91	28.40	11.05	42.50	6.57	42.80	10.68	47.70	11.26	116.20	25.31	370.18	0.97	4.77	5.37	0.19	775
DI533-2, 1-163	MA	4.35	0.09	13.05	0.08	0.78	1.93	0.85	10.31	3.04	38.10	14.05	69.20	15.05	143.70	29.74	339.97	0.47	34.72	92.82	0.01	673
DI533-2, 1-58	MA	8.50	0.07	16.97	0.04	0.56	1.10	0.20	6.26	1.99	24.18	8.95	43.85	9.94	96.90	19.48	230.48	0.18	81.99	106.67	0.01	727
DI533-2, 1-87	MA	19.00	0.15	34.29	0.94	11.09	13.61	4.36	50.70	13.56	139.60	44.56	193.00	37.42	327.00	61.50	931.77	0.45	10.70	27.22	0.04	801
DI533-2, 1-59	MA	5.80	0.02	25.63	0.06	1.46	3.38	0.99	14.05	3.76	41.60	14.88	69.50	15.19	144.50	28.55	363.57	0.38	117.68	50.88	0.02	695
DI533-2, 1-25	MA	10.70	0.01	30.17	0.09	1.23	8.50	4.61	30.00	5.64	41.90	11.86	33.00	10.85	100.00	19.09	316.95	0.79	99.22	13.53	0.07	747
DI533-2, 1-43	MA	3.30	2.44	24.60	0.95	4.99	3.86	1.00	15.80	4.79	61.50	24.35	116.90	26.13	251.60	53.50	592.41	0.34	3.96	83.49	0.01	652
DI533-2, 1-20	MA	17.30	0.03	29.83	0.35	6.61	10.67	2.54	40.20	10.31	111.70	35.68	153.90	28.91	243.80	46.20	720.73	0.33	25.75	26.08	0.04	792
DI533-2, 1-100	MA	2.68	0.02	29.41	0.05	0.89	1.57	0.46	8.59	2.68	33.01	12.90	69.10	15.87	163.00	35.34	372.89	0.31	162.41	135.59	0.01	637
DI533-2, 1-199	MA	10.10	0.14	30.91	0.92	12.09	12.90	3.13	40.60	10.42	103.60	32.95	139.00	28.08	240.90	45.07	700.71	0.38	9.86	21.05	0.05	742
DI533-2, 1-145	MA	13.60	0.02	31.29	0.29	5.18	8.66	1.98	32.50	8.55	91.20	29.40	131.60	25.53	222.90	41.49	630.59	0.32	32.66	28.86	0.03	769
DI533-2, 1-80	MA	1.95	0.05	7.46	0.11	0.05	0.14	0.11	1.52	0.50	7.40	3.28	20.81	5.80	70.70	19.79	137.71	0.44	18.76	845.44	0.001	615
DI533-2, 1-61	MA	15.20	0.06	36.93	0.10	2.03	3.54	1.26	18.44	5.43	61.60	21.15	95.70	20.26	183.50	35.11	485.11	0.38	92.13	59.74	0.02	779
DI533-2, 1-65	MA	15.50	0.04	41.15	0.12	2.27	3.59	0.79	15.58	4.07	44.30	15.89	70.40	14.56	132.20	26.82	371.79	0.28	92.02	45.00	0.02	781
DI533-2, 1-187	MA	6.08	0.06	52.47	0.37	4.60	11.90	3.57	28.23	6.21	62.00	20.60	99.20	23.48	228.40	46.33	587.42	0.57	41.63	23.45	0.04	699
DI533-2, 1-49	MA	18.20	0.04	31.10	0.18	2.99	4.92	1.18	20.07	5.87	67.20	22.88	108.60	23.34	209.20	41.94	539.51	0.31	48.76	51.35	0.02	796
DI533-2, 1-50	MA	14.60	0.02	41.98	0.26	4.51	6.75	1.19	27.70	7.52	86.30	29.54	136.40	28.04	249.30	48.94	668.45	0.23	48.05	43.67	0.02	775
DI533-2, 1-103	MA	3.94	0.05	10.13	0.10	1.86	4.46	1.05	21.38	6.22	70.90	24.67	111.70	21.55	187.50	36.22	497.78	0.27	27.01	48.92	0.02	665
DI533-2, 1-60	MA	11.20	0.04	32.96	0.13	2.12	4.39	0.78	19.00	5.57	57.80	20.60	92.10	19.38	176.10	33.75	464.72	0.22	69.41	46.31	0.02	751
DI533-2, 1-110	MA	6.10	17.30	120.20	10.40	45.80	11.20	1.80	23.60	6.01	69.40	24.15	114.80	23.69	217.20	43.50	729.05	0.33	2.15	23.40	0.04	699
DI533-2, 1-126	MA	6.60	0.05	7.75	0.04	0.77	1.72	0.60	9.30	3.11	41.90	17.18	90.50	20.86	209.10	45.45	448.32	0.37	44.36	159.17	0.01	706
DI533-2, 1-147	MA	23.90	0.06	29.87	0.43	5.92	7.90	1.96	30.90	8.44	93.90	30.63	139.40	27.42	244.40	45.66	666.88	0.33	20.74	34.82	0.03	824
DI533-2, 1-9	MA	9.30	0.04	21.10	0.42	6.44	8.01	3.13	24.70	4.72	36.40	7.25	20.39	2.68	17.25	2.63	155.16	0.63	15.02	1.98	0.51	735
DI533-2, 1-111	MA	28.30	0.04	34.30	0.08	1.83	3.19	0.81	14.80	4.55	50.90	18.40	86.00	17.98	162.60	32.18	427.66	0.30	110.88	60.76	0.02	841

续表 2-4
Continued Table 2-4

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(Lu/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	ϵ /‰
DI533-2, 1-165	MA	21.50	0.03	35.28	0.46	7.21	9.52	2.86	38.40	10.41	110.10	36.30	160.30	32.39	285.80	53.70	782.76	0.40	23.21	33.98	0.03	813
DI533-2, 1-212	MA	3.17	0.01	18.55	0.15	2.63	5.69	1.58	24.00	6.24	72.30	26.50	127.80	27.20	253.00	50.10	615.75	0.35	37.49	53.04	0.02	649
DI533-2, 1-98	MA	22.70	0.14	35.80	1.06	11.35	12.07	3.27	47.30	13.46	152.40	53.46	245.90	48.46	426.80	81.90	1133.37	0.36	10.00	40.87	0.02	819
DI533-2, 1-196	MA	9.10	0.04	22.10	0.51	4.46	13.00	4.92	22.30	3.94	29.30	7.94	33.60	6.26	56.10	11.56	216.03	0.88	13.05	5.36	0.19	733
DI533-2, 1-211	MA	8.10	0.02	15.11	0.37	5.72	14.20	6.09	28.40	5.37	46.50	14.78	69.80	15.63	149.90	32.54	404.43	0.91	12.34	13.80	0.07	723
DI533-2, 1-15	MA	6.85	0.03	14.43	0.14	2.39	3.94	0.34	16.50	4.34	47.20	16.10	72.50	14.66	128.80	25.95	347.32	0.11	29.01	39.67	0.03	709
DI533-2, 1-79	MA	4.85	0.04	17.70	0.07	1.08	2.34	0.56	11.54	3.55	42.90	16.68	83.60	17.69	167.20	33.87	398.81	0.27	68.49	87.19	0.01	681
DI533-2, 1-72	MA	21.20	0.09	35.80	0.17	3.37	5.02	1.37	22.87	6.37	68.00	23.28	102.90	21.06	186.00	35.59	511.88	0.33	55.00	42.71	0.02	812
DI533-2, 1-91	MA	14.10	0.07	41.58	0.09	1.10	2.55	0.60	13.09	4.14	49.30	18.41	88.70	19.19	181.50	35.60	455.92	0.26	110.09	84.09	0.01	772
DI533-2, 1-86	MA	20.10	0.13	26.80	0.90	10.31	12.06	3.38	39.40	11.11	121.90	42.76	196.90	38.40	326.50	63.30	893.85	0.43	8.73	31.62	0.03	806
DI533-2, 1-41	MA	22.80	0.04	11.49	0.05	0.98	1.67	0.31	7.00	1.98	22.72	7.95	37.60	7.87	74.90	14.80	189.36	0.24	52.44	53.38	0.02	819
DI533-2, 1-68	MA	15.10	0.03	28.90	0.14	1.86	3.13	0.82	12.69	3.66	43.50	15.79	72.00	15.12	142.40	28.10	368.15	0.34	57.21	54.08	0.02	779
DI533-2, 1-112	MA	9.80	0.02	24.22	0.13	1.96	3.97	1.68	13.81	3.49	38.90	14.32	73.80	16.65	172.40	38.69	404.04	0.62	54.96	58.70	0.02	739
DI533-2, 1-183	MA	3.11	0.01	18.65	0.02	0.54	1.06	0.30	5.44	1.61	19.47	7.80	41.40	10.08	109.00	26.04	241.42	0.31	233.37	147.98	0.01	648
DI533-2, 1-167	MA	9.30	0.06	33.90	0.45	6.22	8.74	2.72	38.00	11.11	129.10	44.60	208.50	44.30	413.00	81.40	1022.10	0.39	22.11	56.10	0.02	735
DI533-2, 1-36	MA	2.48	0.04	27.54	0.08	1.37	2.28	0.79	10.02	3.11	36.10	13.31	68.80	16.45	168.30	37.50	385.68	0.43	93.51	99.07	0.01	632
DI533-2, 1-53	MA	3.08	0.03	26.69	0.23	3.31	5.22	1.29	21.30	6.03	69.50	25.47	121.10	26.93	255.40	51.70	614.20	0.32	34.38	59.66	0.02	647
DI533-2, 1-117	MA	13.00	0.06	31.19	0.47	6.79	13.72	4.75	36.90	8.73	88.00	29.29	136.90	27.98	255.60	50.90	691.28	0.61	19.47	22.35	0.04	765
DI533-2, 1-33	MA	14.30	0.06	35.95	0.28	3.96	6.06	1.41	23.90	6.87	75.70	25.73	122.30	25.37	233.50	45.07	606.16	0.31	36.78	44.80	0.02	773
DI533-2, 1-101	MA	6.70	0.05	15.74	0.09	1.17	2.64	0.65	12.50	3.80	44.90	16.91	83.80	18.34	175.90	36.41	412.89	0.29	46.79	83.08	0.01	707
DI533-2, 1-130	MA	2.76	0.05	11.56	0.10	0.24	0.37	0.13	2.64	0.82	11.99	4.92	27.78	7.20	78.90	18.58	165.17	0.29	31.14	304.13	0.003	639
DI533-2, 1-161	MA	2.98	0.04	21.61	0.10	1.69	4.20	1.36	14.40	4.21	49.60	17.83	90.60	19.82	185.90	37.90	449.26	0.48	56.84	54.36	0.02	645
DI533-2, 1-83	MA	11.00	0.06	15.37	0.06	0.89	2.60	1.15	14.25	4.59	53.70	19.30	88.50	17.24	153.40	30.22	401.32	0.46	60.83	70.01	0.01	749
DI533-2, 1-10	MA	4.00	0.06	30.90	0.42	6.88	11.87	4.53	49.80	13.07	138.50	47.20	216.20	42.30	386.00	74.40	1022.13	0.49	21.53	37.76	0.03	666
DI533-2, 1-64	MA	2.79	0.08	7.36	0.03	0.82	3.79	1.73	14.00	3.34	37.40	14.16	72.60	17.43	179.80	39.15	391.69	0.64	39.22	62.22	0.02	640
DI533-2, 1-8	MA	10.80	0.08	51.48	0.57	7.55	12.61	3.25	42.70	11.22	119.80	39.02	176.90	34.13	298.40	55.56	853.28	0.39	26.43	26.54	0.04	748
DI533-2, 1-121	MA	8.00	0.08	36.75	0.18	3.06	6.67	1.53	27.20	7.87	85.10	28.89	130.00	25.66	229.50	43.16	625.66	0.30	52.71	38.98	0.03	722
DI533-2, 1-47	MA	2.52	0.08	7.64	0.02	0.45	1.12	0.36	5.38	1.60	20.41	7.57	38.42	8.74	90.20	19.38	201.37	0.37	43.39	104.23	0.01	633
DI533-2, 1-67	MA	4.90	0.08	18.10	0.15	1.84	4.94	1.61	17.80	5.24	67.00	25.60	133.20	31.00	305.00	67.30	678.86	0.47	31.17	82.06	0.01	682
DI533-2, 1-102	MA	5.31	0.05	25.59	0.18	2.97	5.21	1.56	22.10	6.22	67.50	22.34	99.60	19.41	171.80	32.32	476.85	0.38	40.28	37.37	0.03	688
DI533-2, 1-169	MA	15.10	0.03	35.99	0.41	5.68	7.79	2.13	32.00	8.57	94.50	32.66	143.80	30.26	275.40	53.90	723.12	0.36	26.69	41.68	0.02	779
DI533-2, 1-194	MA	6.10	0.07	25.28	0.09	1.66	3.22	1.02	15.27	4.85	58.20	21.54	103.20	23.16	217.20	43.10	517.85	0.37	68.81	80.63	0.01	699
DI533-2, 1-192	MA	1.66	0.06	6.85	0.10	0.98	0.12	0.08	0.84	0.32	4.82	2.61	17.42	5.46	71.70	19.53	130.88	0.54	17.98	964.27	0.00	604
DI533-2, 1-116	MA	4.72	0.10	12.95	0.10	0.95	2.58	1.22	8.92	2.20	22.67	7.34	35.80	7.58	74.30	15.80	192.51	0.70	29.24	36.89	0.03	679
DI533-2, 1-149	MA	11.30	0.07	12.98	0.05	0.80	2.29	0.43	10.42	3.06	35.69	12.82	61.90	13.62	127.60	25.02	306.75	0.23	52.84	65.81	0.02	752
DI533-2, 1-30	MA	17.80	0.07	11.32	0.37	5.31	6.09	2.91	25.10	6.22	61.40	18.90	81.60	15.59	136.00	25.92	396.80	0.62	8.82	25.64	0.04	794
DI533-2, 1-44	MA	11.00	0.04	81.40	0.39	6.61	11.39	2.75	44.00	12.00	132.80	46.60	209.80	42.70	373.00	72.70	1036.17	0.33	63.17	38.45	0.03	749
DI533-2, 1-55	MA	10.60	0.02	42.82	0.26	4.43	6.72	1.32	28.70	8.56	94.90	34.02	153.40	32.96	297.70	57.48	763.29	0.25	49.42	51.52	0.02	746
DI533-2, 1-153	MA	11.30	0.002	24.27	0.20	3.33	9.49	3.34	19.00	3.91	37.80	12.80	60.00	12.10	114.40	22.95	323.60	0.75	36.97	14.57	0.07	752
DI533-2, 1-134	MA	15.20	0.03	40.82	0.36	5.56	7.22	1.60	27.80	6.88	74.80	24.71	110.40	21.90	189.90	37.31	549.28	0.30	34.34	31.13	0.03	779
DI533-2, 1-56	MA	12.90	0.08	43.60	0.91	11.22	14.07	3.87	48.70	12.66	126.40	40.50	170.20	33.79	290.90	53.70	850.60	0.41	14.38	22.99	0.04	764
DI533-2, 1-151	MA	2.80	0.09	15.49	0.25	0.24	0.53	0.23	3.71	0.89	13.14	5.02	26.60	6.34	65.90	14.38	152.81	0.37	17.07	163.43	0.01	640
DI533-2, 1-62	MA	7.20	0.74	40.30	2.19	20.00	36.50	19.68	98.60	22.62	203.50	62.60	262.90	55.40	506.00	98.90	1429.93	0.94	5.03	16.32	0.06	713
DI533-2, 1-42	MA	12.20	0.06	24.42	0.11	2.43	4.62	1.36	23.40	6.95	77.40	26.32	116.20	22.83	206.80	38.80	551.69	0.33	58.12	50.59	0.02	759

续表 2-5
Continued Table 2-5

分析点	类型	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(Lu/Sm) _N	(Sm/Lu) _N	t/°C
DI533-2, 1-166	MA	5.14	0.02	21.89	0.16	2.48	3.81	1.20	16.85	4.35	47.70	16.55	77.80	16.59	154.70	31.22	395.32	0.39	39.79	49.36	0.02	686
DI533-2, 1-171	MA	9.90	0.12	59.80	0.96	13.67	25.00	8.65	76.20	19.10	197.20	65.70	289.80	60.80	549.00	103.30	1 469.30	0.56	18.43	24.89	0.04	740
DI533-2, 1-18	MA	16.40	0.06	40.54	0.12	1.71	4.15	1.28	14.15	4.17	47.50	17.30	88.40	18.63	173.80	34.01	445.82	0.46	88.48	49.36	0.02	786
DI533-2, 1-19	MA	9.90	0.05	15.31	0.13	2.25	4.33	0.48	17.43	4.82	53.30	18.47	88.50	18.49	170.50	34.39	428.45	0.15	31.51	47.84	0.02	740
DI533-2, 1-74	MA	7.90	0.05	25.67	0.12	2.18	5.57	0.36	26.30	6.84	71.20	22.96	99.60	20.90	180.10	34.06	495.90	0.07	58.41	36.83	0.03	721
DI533-2, 1-90	MA	19.50	0.09	10.18	0.04	0.74	1.35	0.17	6.53	1.99	23.48	8.73	41.38	8.62	82.10	16.22	201.62	0.14	41.76	72.37	0.01	803
DI533-2, 1-51	MA	6.32	0.11	29.05	0.56	6.99	10.64	3.93	36.00	9.30	93.40	29.10	122.90	25.13	220.30	39.95	627.36	0.55	14.86	22.62	0.04	702
DI533-2, 1-157	MA	13.10	0.05	32.26	0.08	1.84	3.62	0.91	18.25	5.02	60.90	21.18	95.90	19.48	174.50	33.37	467.36	0.28	101.95	55.53	0.02	765
DI533-2, 1-5	MA	15.40	0.39	31.98	1.24	13.18	37.90	16.01	70.10	11.86	89.10	24.65	109.10	23.56	218.70	46.80	694.57	0.94	7.11	7.44	0.13	780
DI533-2, 1-120	MA	5.50	0.05	21.18	0.21	2.73	5.25	2.10	17.95	4.67	50.50	17.17	79.10	16.64	151.30	29.50	398.35	0.60	28.34	33.85	0.03	691
DI533-2, 1-198	MA	13.00	0.06	21.11	0.16	1.81	4.23	0.87	18.50	5.79	67.70	25.27	117.40	24.99	226.30	44.50	558.68	0.25	36.93	63.37	0.02	765
DI533-2, 1-13	MA	5.15	0.09	29.95	0.10	2.14	4.66	1.13	16.51	4.42	50.40	17.58	87.20	18.82	179.70	36.68	449.38	0.35	67.54	47.41	0.02	686
DI533-2, 1-48	MA	7.60	0.08	50.62	0.09	1.72	3.31	0.79	17.18	5.29	63.70	23.44	108.90	23.95	223.60	44.54	567.21	0.26	128.11	81.06	0.01	717
DI533-2, 1-206	MA	8.60	0.21	36.45	1.26	15.50	20.80	4.83	56.60	12.77	120.20	35.95	148.20	28.07	240.50	41.30	762.64	0.40	8.41	11.96	0.08	728
DI533-2, 1-69	MA	53.00	0.09	67.60	0.65	9.48	15.80	6.76	45.90	10.79	103.30	35.20	150.50	30.08	269.80	53.90	799.85	0.71	30.81	20.55	0.05	912
DI533-2, 1-193	MA	14.20	0.03	16.65	0.15	2.46	3.75	1.19	14.80	4.30	48.40	16.75	80.30	18.23	181.20	38.12	426.33	0.43	31.67	61.23	0.02	773
DI533-2, 1-202	MA	3.76	0.02	25.10	0.04	0.47	1.02	0.27	6.00	1.97	24.65	10.01	54.10	13.04	136.70	30.20	303.58	0.25	170.83	178.35	0.01	662
DI533-2, 1-124	MA	8.50	0.04	20.75	0.03	0.62	1.37	0.20	7.75	2.47	29.78	11.26	55.55	12.12	110.90	22.18	275.02	0.15	135.82	97.52	0.01	727
DI533-2, 1-200	MA	6.45	0.05	34.09	0.08	1.30	2.76	0.48	14.00	4.55	52.10	19.45	94.10	20.83	199.60	39.50	482.89	0.19	104.54	86.21	0.01	704
DI533-2, 1-94	MA	8.80	0.04	21.96	0.06	1.12	2.35	0.17	11.79	4.24	49.90	16.58	67.70	11.49	87.70	15.59	290.68	0.08	98.76	39.96	0.03	730
DI533-2, 1-184	MA	28.80	0.02	14.45	0.19	3.16	5.30	1.36	16.87	4.19	42.40	13.46	58.80	12.78	111.90	20.80	305.68	0.40	22.79	23.64	0.04	843
DI533-2, 1-122	MA	5.61	0.03	23.69	0.23	3.12	7.03	1.90	29.10	8.13	92.70	33.05	161.00	33.74	98.20	59.90	762.58	0.35	30.46	51.33	0.02	693
DI533-2, 1-170	MA	14.00	0.00	55.17	0.15	2.64	4.27	1.14	16.21	3.83	40.10	13.81	56.20	11.20	99.40	19.28	322.65	0.37	111.80	27.20	0.04	771
DI533-2, 1-54	MA	4.18	0.09	61.20	0.13	3.36	7.13	0.87	37.30	11.07	126.10	43.66	194.00	38.78	331.90	61.80	917.39	0.13	115.52	52.21	0.02	670
DI533-2, 1-210	MA	5.40	0.11	34.81	0.85	10.18	16.54	5.40	60.10	15.53	162.30	54.30	240.00	48.39	436.00	83.10	1 167.60	0.46	12.16	30.26	0.03	690
DI533-2, 1-139	MA	5.40	0.08	7.15	0.05	0.76	2.11	0.74	13.78	4.79	62.30	23.32	117.40	24.77	230.90	47.40	535.55	0.31	25.44	135.32	0.01	690
DI533-2, 1-109	MA	9.70	0.09	43.04	0.07	1.27	2.73	0.72	14.65	4.21	50.70	18.82	91.20	18.87	172.80	34.03	453.19	0.28	126.69	75.09	0.01	738
DI533-2, 1-162	MA	12.60	3.92	47.00	2.46	14.30	6.81	1.49	18.83	5.06	52.80	18.16	80.20	16.63	146.50	28.89	443.05	0.38	3.62	25.55	0.04	762
DI533-2, 1-195	MA	11.60	0.08	15.53	0.09	1.54	3.50	0.56	13.02	3.84	39.20	13.49	61.00	13.22	119.30	23.27	307.64	0.22	39.43	40.05	0.02	754
DI533-2, 1-66	MA	11.50	0.07	25.48	0.07	1.34	2.56	0.91	12.65	3.83	42.99	15.45	71.60	14.83	134.20	26.27	352.25	0.40	83.92	61.81	0.02	753
DI533-2, 1-31	MA	20.30	0.08	40.00	0.54	6.70	10.12	2.24	40.40	11.36	120.40	40.86	186.50	37.33	333.20	63.30	893.03	0.29	21.56	37.68	0.03	807
DI533-2, 1-115	MA	2.15	0.10	0.33	0.03	0.88	0.11	0.12	0.96	0.30	3.66	1.28	5.35	1.02	9.10	1.57	24.80	0.75	1.57	83.42	0.01	622
DI533-2, 1-209	MA	19.90	0.18	30.57	1.11	14.21	13.82	3.74	44.10	10.34	100.80	31.02	132.20	24.89	212.60	40.13	659.71	0.42	8.01	17.49	0.06	805
DI533-2, 1-45	MA	9.00	0.14	23.23	0.50	7.20	15.10	6.57	32.50	6.34	57.50	18.40	82.30	17.56	172.20	35.27	474.81	0.88	12.90	14.07	0.07	732
DI533-2, 1-181	MA	10.30	1.37	21.80	0.82	4.90	4.56	1.33	10.95	3.06	34.20	12.57	62.60	14.52	143.80	29.19	345.67	0.55	4.94	38.56	0.03	744
DI533-2, 1-189	MA	4.24	0.08	21.53	0.03	0.47	1.47	0.21	9.12	3.11	40.50	15.92	79.50	17.91	164.60	33.09	387.53	0.13	117.14	135.59	0.01	671
DI533-2, 1-137	MA	3.50	0.07	14.85	0.11	1.81	4.43	1.23	25.80	8.93	116.70	47.30	230.70	47.60	434.00	86.00	1 019.53	0.27	33.15	116.94	0.01	656
DI533-2, 1-92	MA	9.80	0.07	43.07	0.65	9.57	12.86	4.14	55.40	15.76	171.00	57.40	260.20	52.40	475.70	90.10	1 248.32	0.40	19.66	42.20	0.02	739
DI533-2, 1-16	MA	654.00	0.24	14.98	0.14	0.76	0.64	0.37	3.67	1.33	18.60	7.69	45.10	11.36	122.90	27.86	255.65	0.58	19.35	262.22	0.004	1 317
DI533-2, 1-214	MA	13.80	0.36	2.63	1.10	8.20	21.50	7.30	48.60	10.55	102.50	33.60	151.90	30.79	275.60	54.60	749.23	0.67	0.66	15.30	0.07	770
DI533-2, 1-52	MA	7.30	0.13	19.63	0.11	1.70	2.45	0.86	8.88	2.48	25.50	8.53	37.70	7.84	72.20	14.06	202.07	0.50	37.36	34.57	0.03	714
DI533-2, 1-93	MA	13.60	0.16	10.25	0.62	8.50	19.00	7.99	49.10	10.90	104.40	33.68	148.10	28.94	255.10	49.70	726.44	0.76	4.67	15.76	0.06	769
DI533-2, 1-160	MA	16.20	0.17	30.66	0.20	2.80	4.54	1.14	20.30	5.70	61.90	21.20	95.00	19.28	173.70	33.69	470.28	0.31	35.74	44.70	0.02	785
DI533-2, 1-73	MA	4.90	1.44	34.10	0.68	5.27	6.35	1.30	20.30	5.54	61.20	21.48	99.40	21.82	202.50	40.02	521.40	0.32	8.42	37.96	0.03	682
DI533-2, 1-203	MA	15.70	0.30	40.10	0.87	10.70	31.30	11.90	53.70	9.50	82.10	27.03	131.40	29.92	305.40	68.10	802.32	0.88	12.60	13.11	0.08	782
DI533-2, 1-143	MA	3.98	0.15	37.07	0.08	1.51	4.55	1.79	14.20	3.93	45.10	16.81	85.10	19.94	198.30	40.13	468.66	0.62	80.98	53.13	0.02	666

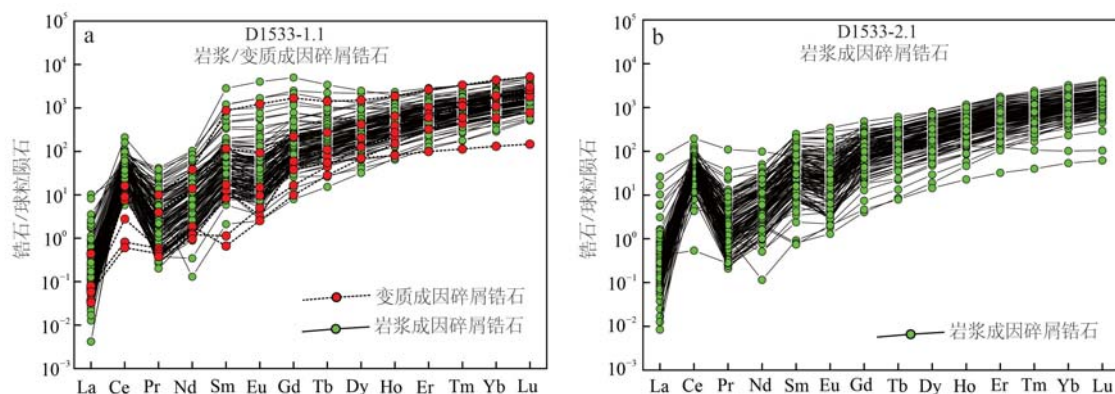


图8 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩碎屑锆石稀土元素配分模式图(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 CI-normalized rare earth element pattern of detrital zircons from the quartz sandstones in the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zanhuan Complex (chondrite data after Sun and McDonough, 1989)

2 656 Ma(表3)。在锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 关系图中,2粒锆石分析结果位于球粒陨石演化线之下,3个分析结果位于球粒陨石演化线和亏损地幔

演化线之间,而其余45粒锆石分析结果位于亏损地幔演化线和球粒陨石演化线之间(图9)。

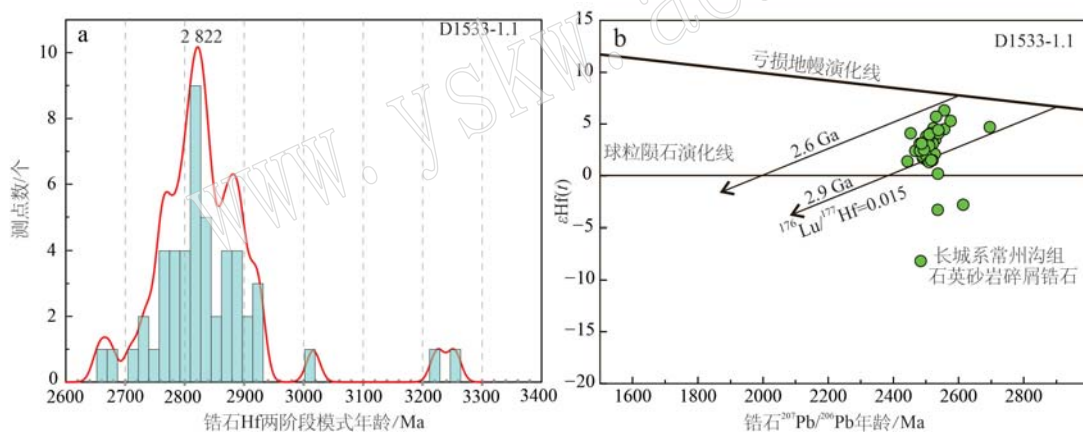


图9 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩中碎屑锆石 Hf 二阶段模式年龄频率直方图(a)和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄图(b)

Fig. 9 Two-stage model Hf ages histogram (a) and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ versus $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age diagram (b) of detrital zircons from quartz sandstones in the Changzhougou Formation in the Wengcheng area of the Zanhuan Complex

5 讨论

5.1 沉积时代

在华北克拉通前寒武纪地质演化过程中,“吕梁运动”被认为是结晶基底最终形成的标志性构造-热事件(孙大中等, 1987; 白瑾, 1993; 赵宗浦, 1993; 程裕淇, 1994),此后开始发育以长城系为代表的地台型沉积盖层。其中,燕辽地区发育的中元古代

地层,基本未受变质作用的影响,顶、底界线清晰,被认为是中国出露最好、最连续的沉积盖层(陈晋镛, 1980, 1999)。20世纪80~90年代,限于当时的测年技术条件,未能准确厘定长城系底界年龄,有1.95 Ga、1.8 Ga和1.7 Ga等不同认识(王曰伦等, 1980; 陆松年等, 1991; 李怀坤等, 1995; 王松山等, 1995)。近年来,随着锆石U-Pb微区原位定年技术的飞速发展,华北克拉通燕辽地区中元古代长城系底界年龄得到进一步的准确限定,但存在不同的观

表 3 赞皇杂岩瓮城地区中元古代长城系石英砂岩的锆石 Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Lu-Hf isotope composition of zircons from quartz sandstone of the Mesoproterozoic Changcheng System from the Zanzhuang Complex in the Wengcheng area

样品分析点	年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf _(corr)	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf _(corr)	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _(corr)	2σ	f _{Lu/Hf}	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	εHf(0)	εHf(t)	T _{Hf2}
D1533-1. 1-120	2 696	0.009 520	0.000 077	0.000 293	0.000 001	0.281 204	0.000 021	-0.99	0.281 189	-55.4	4.66	2 866
D1533-1. 1-94	2 614	0.035 760	0.000 810	0.001 203	0.000 024	0.281 094	0.000 022	-0.96	0.281 034	-59.3	-2.76	3 253
D1533-1. 1-173	2 576	0.041 237	0.000 392	0.001 247	0.000 012	0.281 347	0.000 024	-0.96	0.281 286	-50.4	5.32	2 732
D1533-1. 1-48	2 556	0.009 237	0.000 115	0.000 358	0.000 003	0.281 345	0.000 018	-0.99	0.281 327	-50.5	6.32	2 656
D1533-1. 1-100	2 556	0.013 477	0.000 132	0.000 476	0.000 003	0.281 299	0.000 022	-0.99	0.281 276	-52.1	4.49	2 768
D1533-1. 1-144	2 538	0.024 204	0.000 095	0.000 750	0.000 003	0.281 313	0.000 020	-0.98	0.281 277	-51.6	4.12	2 776
D1533-1. 1-171	2 538	0.018 714	0.000 258	0.000 596	0.000 006	0.281 315	0.000 022	-0.98	0.281 286	-51.5	4.44	2 757
D1533-1. 1-149	2 537	0.017 282	0.000 132	0.000 560	0.000 006	0.281 194	0.000 019	-0.98	0.281 166	-55.8	0.17	3 016
D1533-1. 1-63	2 536	0.019 281	0.000 278	0.000 654	0.000 006	0.281 102	0.000 018	-0.98	0.281 070	-59.1	-3.28	3 225
D1533-1. 1-170	2 531	0.041 449	0.000 882	0.001 307	0.000 036	0.281 389	0.000 020	-0.96	0.281 326	-48.9	5.70	2 675
D1533-1. 1-67	2 529	0.010 220	0.000 284	0.000 359	0.000 007	0.281 283	0.000 024	-0.99	0.281 266	-52.6	3.53	2 805
D1533-1. 1-69	2 527	0.027 025	0.000 910	0.000 904	0.000 022	0.281 270	0.000 023	-0.97	0.281 226	-53.1	2.05	2 894
D1533-1. 1-132	2 523	0.004 051	0.000 154	0.000 145	0.000 005	0.281 307	0.000 021	-1.00	0.281 300	-51.8	4.59	2 736
D1533-1. 1-62	2 522	0.014 859	0.000 150	0.000 520	0.000 003	0.281 290	0.000 021	-0.98	0.281 265	-52.4	3.32	2 812
D1533-1. 1-70	2 521	0.017 619	0.000 240	0.000 603	0.000 005	0.281 309	0.000 021	-0.98	0.281 280	-51.7	3.84	2 781
D1533-1. 1-85	2 521	0.019 897	0.000 280	0.000 664	0.000 007	0.281 290	0.000 021	-0.98	0.281 258	-52.4	3.07	2 827
D1533-1. 1-61	2 520	0.020 787	0.000 754	0.000 715	0.000 022	0.281 265	0.000 022	-0.98	0.281 231	-53.3	2.07	2 888
D1533-1. 1-73	2 520	0.011 545	0.000 069	0.000 407	0.000 001	0.281 233	0.000 020	-0.99	0.281 214	-54.4	1.45	2 925
D1533-1. 1-38	2 517	0.029 990	0.000 334	0.001 035	0.000 010	0.281 293	0.000 020	-0.97	0.281 243	-52.3	2.44	2 862
D1533-1. 1-105	2 516	0.025 953	0.000 102	0.000 788	0.000 005	0.281 256	0.000 023	-0.98	0.281 218	-53.6	1.51	2 919
D1533-1. 1-26	2 515	0.027 653	0.000 268	0.000 936	0.000 015	0.281 297	0.000 024	-0.97	0.281 252	-52.2	2.72	2 844
D1533-1. 1-135	2 513	0.017 202	0.000 144	0.000 515	0.000 007	0.281 317	0.000 024	-0.98	0.281 292	-51.5	4.09	2 759
D1533-1. 1-65	2 510	0.013 442	0.000 189	0.000 461	0.000 003	0.281 290	0.000 020	-0.99	0.281 268	-52.4	3.16	2 813
D1533-1. 1-89	2 510	0.031 590	0.001 248	0.001 079	0.000 043	0.281 268	0.000 018	-0.97	0.281 216	-53.2	1.32	2 926
D1533-1. 1-164	2 510	0.011 615	0.000 040	0.000 358	0.000 002	0.281 279	0.000 019	-0.99	0.281 262	-52.8	2.94	2 827
D1533-1. 1-167	2 510	0.041 627	0.000 682	0.001 228	0.000 014	0.281 351	0.000 021	-0.96	0.281 292	-50.3	4.02	2 761
D1533-1. 1-148	2 506	0.016 732	0.000 088	0.000 512	0.000 002	0.281 306	0.000 022	-0.98	0.281 281	-51.8	3.55	2 787
D1533-1. 1-35	2 505	0.027 598	0.000 252	0.000 945	0.000 003	0.281 296	0.000 020	-0.97	0.281 251	-52.2	2.43	2 854
D1533-1. 1-44	2 505	0.011 621	0.000 165	0.000 431	0.000 003	0.281 282	0.000 017	-0.99	0.281 261	-52.7	2.80	2 831
D1533-1. 1-130	2 505	0.014 565	0.000 151	0.000 464	0.000 002	0.281 302	0.000 021	-0.99	0.281 279	-52.0	3.45	2 792
D1533-1. 1-21	2 503	0.015 337	0.000 306	0.000 537	0.000 008	0.281 252	0.000 021	-0.98	0.281 226	-53.8	1.51	2 908
D1533-1. 1-25	2 502	0.025 773	0.000 482	0.000 910	0.000 009	0.281 275	0.000 019	-0.97	0.281 231	-53.0	1.67	2 898
D1533-1. 1-02	2 501	0.024 365	0.000 161	0.000 798	0.000 004	0.281 275	0.000 019	-0.98	0.281 237	-52.9	1.85	2 886
D1533-1. 1-22	2 501	0.009 107	0.000 352	0.000 347	0.000 008	0.281 308	0.000 018	-0.99	0.281 292	-51.8	3.80	2 767
D1533-1. 1-81	2 500	0.015 399	0.000 204	0.000 538	0.000 004	0.281 267	0.000 023	-0.98	0.281 241	-53.2	1.97	2 878
D1533-1. 1-136	2 499	0.018 912	0.000 298	0.000 591	0.000 006	0.281 302	0.000 020	-0.98	0.281 274	-52.0	3.11	2 808
D1533-1. 1-13	2 498	0.012 702	0.000 088	0.000 460	0.000 003	0.281 289	0.000 018	-0.99	0.281 267	-52.4	2.86	2 822
D1533-1. 1-75	2 494	0.019 915	0.000 328	0.000 694	0.000 007	0.281 293	0.000 019	-0.98	0.281 260	-52.3	2.52	2 840
D1533-1. 1-166	2 494	0.016 871	0.000 342	0.000 516	0.000 010	0.281 285	0.000 017	-0.98	0.281 260	-52.6	2.50	2 841
D1533-1. 1-28	2 492	0.038 388	0.002 720	0.001 217	0.000 092	0.281 326	0.000 021	-0.96	0.281 268	-51.1	2.74	2 825
D1533-1. 1-01	2 491	0.008 977	0.000 078	0.000 310	0.000 002	0.281 254	0.000 020	-0.99	0.281 239	-53.7	1.70	2 888
D1533-1. 1-31	2 491	0.014 503	0.000 786	0.000 565	0.000 021	0.281 298	0.000 022	-0.98	0.281 271	-52.1	2.84	2 818
D1533-1. 1-29	2 490	0.014 207	0.000 326	0.000 484	0.000 008	0.281 269	0.000 022	-0.99	0.281 246	-53.1	1.92	2 873
D1533-1. 1-42	2 488	0.013 585	0.000 123	0.000 484	0.000 002	0.281 299	0.000 019	-0.99	0.281 276	-52.1	2.93	2 810
D1533-1. 1-172	2 487	0.024 763	0.000 348	0.000 772	0.000 011	0.281 318	0.000 021	-0.98	0.281 281	-51.4	3.10	2 799
D1533-1. 1-160	2 482	0.022 272	0.000 220	0.000 691	0.000 010	0.281 297	0.000 019	-0.98	0.281 265	-52.1	2.39	2 838
D1533-1. 1-108	2 481	0.023 334	0.000 658	0.000 791	0.000 019	0.281 322	0.000 021	-0.98	0.281 285	-51.3	3.08	2 796
D1533-1. 1-99	2 467	0.019 246	0.000 226	0.000 633	0.000 005	0.281 305	0.000 019	-0.98	0.281 275	-51.9	2.42	2 825
D1533-1. 1-142	2 453	0.019 071	0.000 238	0.000 591	0.000 008	0.281 360	0.000 016	-0.98	0.281 333	-49.9	4.14	2 709
D1533-1. 1-133	2 443	0.026 964	0.000 494	0.000 863	0.000 009	0.281 303	0.000 022	-0.97	0.281 262	-52.0	1.41	2 868

注：锆石 Hf 同位素计算所用的参数为：¹⁷⁶Lu 衰变常数 λ=1.867×10⁻¹¹，球粒陨石 (CHUR) ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.033 2，¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 772 (Blichert-Toft and Al-berade, 1997)；亏损地幔 (DM) ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.038 4，¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.283 25 (Griffin *et al.*, 2000)；平均地壳 (AC) 的 f_{Lu/Hf} 为 -0.55 (Griffin *et al.*, 2002)

点,大致可以划分为 3 种观点,即约 1 800 Ma、1 730 ~1 700 Ma 和小于 1 700 Ma。万渝生等 (2003) 与 Wan 等 (2011) 根据昌平十三陵地区长城系底部常州沟组石英岩中最年轻一组碎屑锆石年龄,限定长城

系底界时代小于 1 800 Ma。高维等 (2008) 根据侵入新太古代变质地层中的密云环斑花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1 685±15 Ma,结合长城系大红峪组火山岩的 1 626 Ma 成岩年龄,认为密云地区长城系

底界年龄为 1 685~1 626 Ma。和政军等(2011)在北京密云地区发现长城系常州沟组砂岩覆盖在具有古风化壳的环斑花岗岩之上,古风化壳中锆石年龄为 $1\,682\pm20$ Ma 和 $1\,708\pm5$ Ma,从而推断长城系的底界年龄小于 1 682 Ma。李怀坤等(2011)与 Li 等(2013)在北京密云发现了被常州沟组不整合覆盖的花岗斑岩岩脉,并用 LA-MC-ICP-MS 与 SHRIMP 方法获得其锆石 U-Pb 年龄皆为 $1\,673\pm10$ Ma,认为常州沟组的沉积要晚于 1 670 Ma。Peng 等(2012)在密云水库附近发现长城系底部常州组砾岩不整合在基性岩墙群之上,该岩墙的斜锆石 U-Pb 年龄为 $1\,731\pm4$ Ma,据此推断密云地区长城系的沉积时代晚于 1 730 Ma。Zhang 等(2015)对燕辽裂谷带内蓟县地区长城系串岭沟组中 14 颗自生磷钇矿进行了 U-Pb 定年,获得 36 组有效数据年龄分布在 1 713~978 Ma 之间,表明热液活动频繁,其中 25 组年龄数据较为集中, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 峰值年龄为 $1\,576\pm10$ Ma,最老一组年龄为 1716 ± 3 Ma,代表了磷钇矿开始生长的时代,限定了串岭沟组最小沉积时代为 1 716 Ma。周红英等(2020)对蓟县常州沟组之下遵化杂岩中的麻粒岩样品进行了年代学研究,测得了 TIMS 法磷灰石 U-Pb 年龄 $1\,666\pm16$ Ma,间接限定常州沟组底界年龄(亦即燕辽裂谷带长城系底界年龄)为约 1 650 Ma。综合以上分析可知,华北克拉通燕辽地区长城系底界年龄被限定在 1 700~1 650 Ma。

如上所述,太行山中南部赞皇地区长城系常州沟组同样十分发育,并以角度不整合覆盖于新太古代或古元古代变质岩系上,顶部被寒武纪地层平行不整合覆盖,并构成了中国三大砂岩地貌之一——嶂石岩地貌,但区内长城系常州沟组的沉积时代并没有得到准确的限定。1968 年河北省地质局区域地质测量大队在高邑幅、邢台幅 1:20 万区域地质调查时,将本区这套紫红色/粉红色石英砂岩及灰白色长石石英砂岩为主的岩石划为震旦系大红峪组。1984 年河北省地质局第一区调队在赞皇地区南部开展 1:5 万区调时,将区内这套石英砂岩为主的含铁质和海绿石、交错层理发育为特征的碎屑岩,通过与燕山地区蓟县剖面进行对比研究,厘定为常州沟组。1987—1996 年河北省地质矿产局第十一地质大队开展测鱼幅、赞皇幅与将军墓幅等 1:5 万区调工作,通过对比与研究,将赞皇地区长城系厘定为赵家庄组、常州沟组、串岭沟组和团山子组。

本文获得赞皇地区 2 件长城系底部常州沟组石

英砂岩中最年小的一组碎屑锆石年龄分别为 1 822 Ma 与 1 925 Ma,限定了翁城地区常州沟组最大沉积时代应小于 1 822 Ma。结合太行山地区长城系下伏基底岩石普遍经历了 1 850~1 800 Ma 变质作用以及区域上常州沟组上覆大红峪组中火山岩中 1 635 Ma 结晶锆石年龄(张健等, 2015),本文初步限定赞皇地区长城系常州沟组沉积年龄为 1 800~1 635 Ma,但更准确的沉积时代还需要进一步工作。

5.2 沉积物源

利用碎屑锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素资料,可以追溯沉积岩的物质来源,并为探讨区域岩浆-变质事件和构造演化等方面提供重要的信息(第五春荣等, 2008; Yao *et al.*, 2011; Xue, 2019)。本文的长城系常州沟组 2 个砂岩样品中,主要的碎屑锆石年龄峰值约为 2.5 Ga,另外还出现古元古代、新太古代早期与中太古代年龄信息(图 9)。碎屑锆石年龄结果反映其主要的物源区为赞皇及其邻区新太古代晚期约 2.5 Ga 基底岩石剥蚀沉积,与北京十三陵长城系常州沟组底部红色含长石石英砂岩具有相似的物源区特征(万渝生等, 2003; Wan *et al.*, 2011)。十三陵长城系常州沟组上部石英砂岩中碎屑锆石主体峰值年龄为 2.5 Ga 外,还有一定数量 2.3~2.1 Ga 和 1.9~1.8 Ga 碎屑锆石出现,表明常州沟组碎屑岩上、下层位物源区的变化(万渝生等, 2003; Wan *et al.*, 2011)。而鄂尔多斯盆地中,长城系碎屑沉积岩中锆石年龄较为复杂:公王斌等(2016)在长庆油田鄂尔多斯 6 口钻井中长城系沉积岩中获得碎屑锆石的年龄峰值为 2.5 Ga、2.35 Ga、1.95 Ga 和 1.85 Ga,同时还有少量 1.6 Ga 锆石;白文倩等(2019)在鄂尔多斯 3 口钻井 4 个长城系沉积岩样品中获得主要的碎屑锆石年龄峰值为约 1.8 Ga,在约 2.5 Ga 存在一个小的峰值。由于鄂尔多斯盆地中长城系样品具体的层位并不十分清晰,其物源区明显较长城系底部常州沟组复杂(万渝生等, 2003; Wan *et al.*, 2011)。北京十三陵长城系常州沟组和本文太行山区长城系常州沟组底部碎屑岩具有几乎完全相同的碎屑锆石峰值特征,表明这两个不同地区的长城系底部沉积物源都来自于华北克拉通新太古代晚期基底。但结合两个地区所处的构造位置发现,北京十三陵位于华北克拉通东部陆块内部,长城系底部沉积应主要来自于稳定的克拉通基底。而本文研究的长城系处于华北中部造山带中部东侧,该区古元古代晚期经历了强烈的变质作用,保留有大量 1.95~1.8 Ga 的变

质锆石年龄记录 (Xiao *et al.*, 2011; 肖玲玲等, 2011a, 2011b)。赞皇杂岩除主体大量发育有约 2.5 Ga 的岩浆岩外 (杨崇辉等, 2011a, 2015; 李伦等, 2017; Wang *et al.*, 2017), 还出露有一定规模的约 2.1 Ga 的花岗岩 (杨崇辉等, 2011b; Du *et al.*, 2016b)、基性杂岩 (Peng *et al.*, 2017) 和火山-沉积岩系 (颧颧强等, 2013; Du *et al.*, 2016a)。因此, 本文推断常州沟组底部的碎屑沉积可能主要来自赞皇杂岩或附近的太古宙基底, 同时还出现了少量的约 2.1 Ga 岩浆碎屑锆石和 1.9~1.8 Ga 变质-岩浆成因的碎屑锆石, 指示长城系接受初始沉积时, 这些古元古代的岩浆岩和变质岩已暴露地表并经历剥蚀作为中元古代碎屑沉积岩的物质源区。此外, 碎屑锆石内部矿物成分分析表明 (图 10), 其内部包裹的矿物主要为长英质矿物, 这进一步表明本区常州沟组的主要物源来自上述花岗质的太古宙-古元古代变质基底。本文研究的紫红色砂岩样品 (D1533-2.1) 除主体为 2.5 Ga 的峰值年龄外, 还存在较为复杂的碎屑锆石年龄信息 (表 1)。该样品中最老的一颗碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3 252 Ma, 而目前中部造山带中北段未有大于 3.2 Ga 的基底岩石报道, 因而初步推断, 该古老的碎屑锆石可能来自冀东地区或者华北克拉通南缘 (Nutman *et al.*, 2011; 第五春荣等, 2018)。另外, 该砂岩碎屑锆石有 13 颗锆石年龄为 2 975~2 654 Ma 之间, 约占所测定锆石 6%, 该年龄阶段的岩石在中部造山带的太华、赞皇和阜平有一定规模的出露 (Liu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2013; 路增龙等, 2014; 宋会侠等, 2018; Diwu *et al.*, 2020; 杜利林等未发表资料), 可能为长城系常州沟组提供了物源。与灰白色砂岩样品不同的是, 紫红色砂岩中还出现许多古元古代碎屑锆石信息 (表 1), 其中 4 粒锆石年龄为 2 402~2 306 Ma。华北克拉通 2 400~2 300 Ma 岩石主要出露于华北南缘太华-登封-小秦岭、中条和吕梁、恒山地区 (耿元生等, 2006; 第五春荣等, 2007; Kröner *et al.*, 2005; Duan *et al.*, 2021; Zhou and Zhai, 2022), 该阶段碎屑锆石可能来自上述地区同时代岩石的剥蚀。2 200~2 000 Ma 的岩石记录在华北克拉通分布较为广泛, 在中部带该期岩浆事件非常强烈, 初步推断紫红色砂岩与灰白色砂岩中 2 200~2 000 Ma 的碎屑锆石可能来自于赞皇、阜平、五台、恒山、吕梁或华北南缘的太华-登封地区 (杨崇辉等, 2011b; 赵瑞幅等, 2011; 杜利林等, 2012, 2015, 2018; Huang

et al., 2012; Du *et al.*, 2013, 2016b; Wang *et al.*, 2020)。

5.3 沉积盆地构造属性

关于华北燕辽-太行地区中元古代早期沉积环境与沉积大地构造环境前人曾开展了大量有益研究 (王鸿祯, 1985; 王长尧, 1986; 王鸿祯等, 1986; 温献德, 1989; 柳永清等, 1997; 和政军等, 2000; 黄学光等, 2001; 赵太平等, 2004; 宋天锐, 2007; 胡良俊等, 2007; 曲永强等, 2011; 潘建国等, 2013; 陈贤等, 2014; 王玺童等, 2021; 陈超等, 2022; 胡漾等, 2024), 目前对于中元古代沉积盆地类型及其发展演化过程仍存在多种不同的认识。其中, 赵太平等 (2004) 与胡良俊等 (2007) 认为燕辽-太行裂谷带属于克拉通内部裂解 (即陆内克拉通盆地), 在盆地发展演化过程中虽有火山作用, 但并未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度, 是一个夭折的板内裂谷。乔秀夫等 (2007) 根据中新元古代地层中存在地震记录与火山活动, 认为燕辽裂谷带是弧后扩张的产物, 代表了沟-弧-盆板块体系下的弧后扩张盆地。曲永强等 (2011) 与潘建国等 (2013) 在分析前人资料的基础上, 结合区域沉积地层对比, 重新梳理了华北克拉通北缘中新元古代沉积大地构造演化, 提出了 5 阶段构造演化模式及其板块动力学背景, 并认为华北克拉通北缘中元古代早期长城系形成于吕梁造山运动之后的大陆裂谷伸展构造背景, 盆地中心大致位于承德-兴隆一带, 随着大陆裂谷进一步伸展与洋壳的形成, 华北克拉通北缘逐步向被动大陆边缘演化。被动大陆边缘构造环境相对稳定, 形成以滨岸和陆棚环境为主的细碎屑岩沉积体系。在铁岭组沉积后, 华北克拉通北缘可能转变为活动大陆边缘。陈贤等 (2014) 通过对蓟县地区常州沟组砂岩碎屑组分特征统计分析后, 指出常州沟早期为近 NE 古流向, 早期河流相沉积的物源区为沉积区西南部五台古陆和密云-怀柔隆起区, 其碎屑沉积物源主要来自克拉通源区, 但再旋回造山隆升蚀源区也提供极少量物源, 它们形成于陆内克拉通盆地, 而不是裂谷型大陆边缘盆地。陈超等 (2022) 在野外地质调查的基础上, 对燕山中段唐山地区常州沟组砂岩进行了沉积岩石学和地球化学综合研究, 认为区内常州沟组沉积环境演化由下至上依次为冲积扇、辫状河和碎屑潮坪, 其源区可能经历了较强的风化作用, 古气候温暖、潮湿, 主要为上地壳环境, 原岩成分以长英质岩石为主, 并推测唐山地区常州沟组砂岩形成于

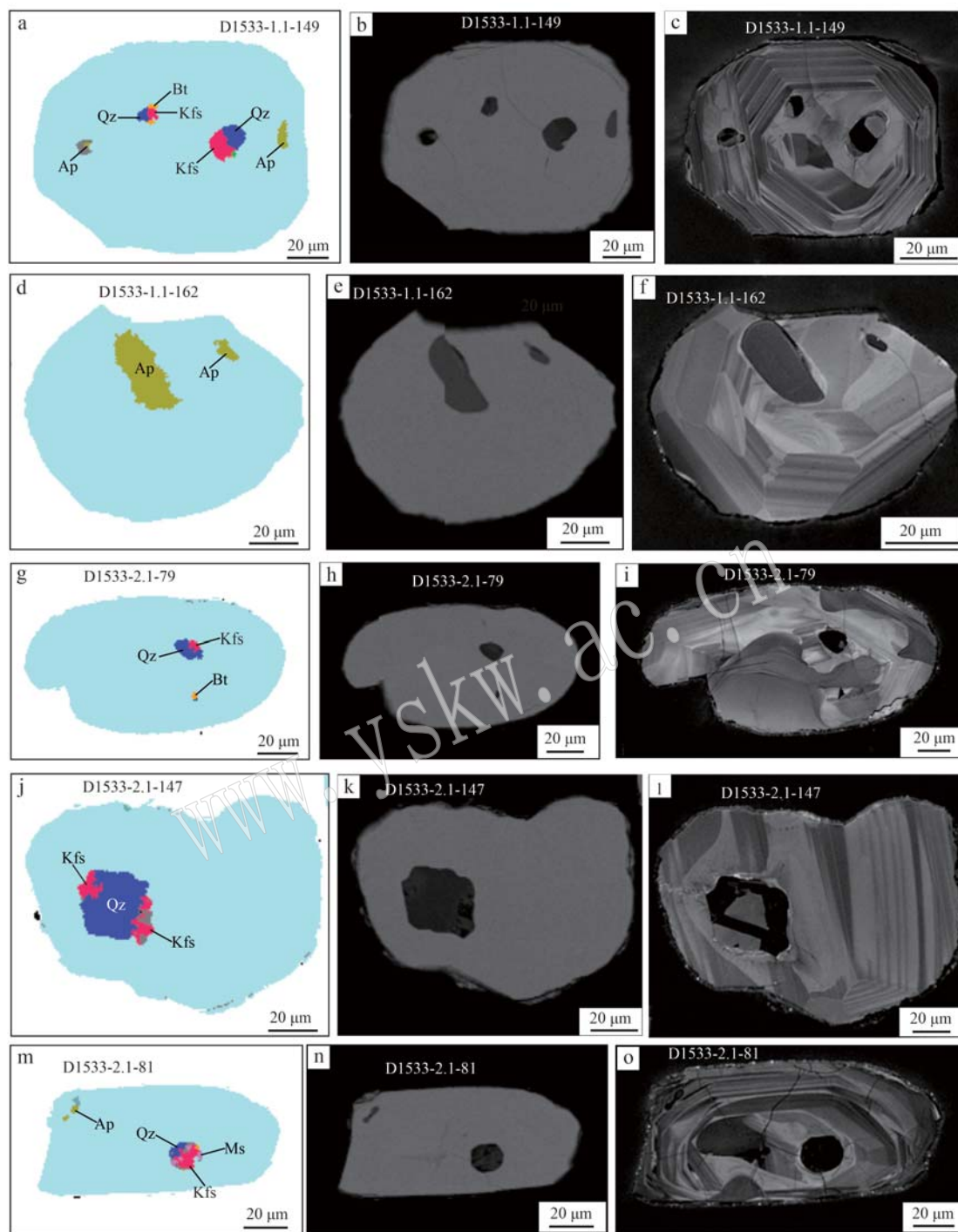


图 10 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩中碎屑锆石矿物相图(a、d、g、j、m)、背散射电子图像(b、e、h、k、n)与阴极发光图像(c、f、i、l、o)(矿物缩写据沈其韩, 2009)

Fig. 10 Representative mineral phase (a, d, g, j, m), backscatter electron (b, e, h, k, n), and cathodoluminescence images (c, f, i, l, o) showing mineral inclusions of zircons from the quartz sandstone in the Changzhougou Formation of the Zanzhuang Complex (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

克拉通盆地,即燕辽裂谷带应属于华北克拉通陆壳基底上形成的滨浅海,未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度。综合以上分析可知,尽管前人对燕辽-太

行裂谷带中元古代中晚期沉积盆地大地构造背景存在不同的认识,但绝大部分研究者均认为燕辽地区中元古代早期常州沟组形成于克拉通内部裂谷盆地

(陈贤等, 2014; 王玺童等, 2021; 陈超等, 2022; 胡漾等, 2024)。

与华北克拉通北部的燕辽地区相比, 目前对于太行山赞皇及其相邻地区长城系常州沟组沉积环境与沉积大地构造环境的研究资料相对匮乏。周杰(2016)对赞皇地区常州沟组开展了野外剖面观测与沉积环境、沉积相类型及特征分析, 并认为测鱼地区常州沟组形成于滨浅海相沉积环境。王玺童等(2021)对山西黎城常州沟组进行了岩石学和沉积环境的系统分析, 认为常州沟组沉积环境主要为障壁型海岸相碎屑岩潮坪, 常州沟组沉积过程中水动力条件变化为强-弱-强-弱的过程, 海平面变化表现为上升-下降-上升的特征。

一般来说, 形成于不同构造背景下的碎屑沉积岩中的碎屑锆石往往会呈现出不同的年龄谱, 位于汇聚板块边缘沉积岩的锆石年龄谱常呈现为一个接近沉积物沉积年龄的单峰, 与板块碰撞造山带有关的沉积盆地中的碎屑锆石则以出现多个年龄峰值为特征, 而被动大陆边缘和裂谷环境中的碎屑锆石往往由于记录了地壳演化历史的多期地质事件而呈现更为复杂的年龄峰值, 并以大多数碎屑锆石的年龄都远大于其沉积年龄为特点(Cawood and Nemchin, 2001; Hawkesworth *et al.*, 2009; Gehrels, 2014)。基于此, Cawood 等(2012)提出可利用碎屑锆石年龄分布的不同判别它们的沉积环境, 通过碎屑锆石结晶年龄(crystallization age, 简称 CA)与沉积年龄(deposition age, 简称 DA)之间时间跨度累计频率图, 划分出汇聚、碰撞和伸展3个主要的沉积环境类型(图11)。赞皇地区长城系常州沟组2件样品的碎屑锆石结晶年龄与其沉积年龄时间跨度均超过150 Ma, 与伸展构造背景沉积盆地的碎屑锆石年龄谱系特征基本一致(图11), 结合赞皇及其邻区常州沟组岩石学、沉积环境与碎屑锆石年龄谱系特征(周杰, 2016; 王玺童等, 2021; 胡漾等, 2024), 本文推测赞皇地区长城系常州沟组形成于陆内伸展盆地的陆表海环境, 这与燕辽-太行以及熊耳地区中元古代早期(1.87~1.67 Ga)发育大量与伸展构造环境下形成岩浆作用相吻合(相振群等, 2020), 如著名的大庙斜长岩(赵太平等, 2004; Zhang *et al.*, 2007)、密云环斑花岗岩(杨进辉等, 2005; 高维等, 2008)以及华北克拉通中东部地区1.78~1.67 Ga基性岩墙(脉)群(李江海等, 2001; 赵太平等, 2001; 廖超林等, 2003; 彭澎等, 2004; 胡国辉等, 2010; Peng *et al.*, 2012)。

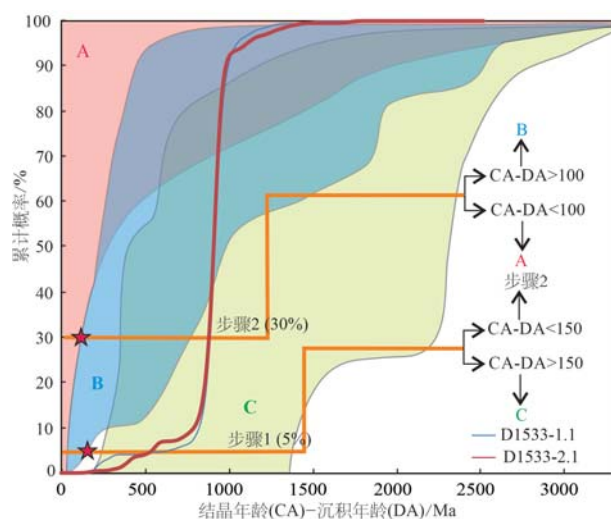


图11 赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组石英砂岩锆石年龄累计概率曲线图(据 Cawood *et al.*, 2012)

Fig. 11 Accumulative probability diagrams of detrital zircon age for quartz sandstone in the Changzhougou Formation of the Changcheng System in the Wengcheng area of the Zhanhuang Complex (after Cawood *et al.*, 2012)

CA—锆石的结晶年龄; DA—常州沟组的沉积年龄; A—汇聚(俯冲)环境; B—碰撞环境; C—拉张环境

CA—crystallization age of zircon grains; DA—depositional age of the Changzhougou Formation; A—convergent (subduction) setting; B—collisional setting; C—extensional setting

5.4 源区地壳演化历史

虽然全球各个典型的克拉通形成与演化过程不尽相同, 但大量同位素年代学资料表明太古宙是全球大陆地壳生长最关键时期(Belousova *et al.*, 2010; Cawood and Hawkesworth, 2019)。华北克拉通与全球其他典型的克拉通大陆地壳演化规律类似, 均呈现阶段性特征, 且主要形成于太古宙。但华北克拉通大陆地壳的增长速率在中太古代中期—新太古代晚期(3.0~2.5 Ga)增生速率最大(第五春荣等, 2012; 第五春荣, 2021), 至少有50%的大陆地壳形成于这一时期, 新太古代末大约有60%~80%的现今大陆地壳已经形成, 此后华北克拉通大陆地壳呈缓慢增长速率(第五春荣, 2021)。此外, 一些研究人员发现华北克拉通年龄为2.52 Ga的基底岩石的全岩Nd同位素或者其中锆石的Hf同位素地壳模式年龄为2.8~2.7 Ga, 因此提出2.8~2.7 Ga是华北克拉通最主要的地壳生长时期(Wu *et al.*, 2005; Geng *et al.*, 2012)。这与目前华北克拉通胶东、鲁西、恒山、阜平、赞皇、中条、鲁山和霍邱识别出年龄约为2.7 Ga岩石相一致(万渝生等, 2022)。

一些研究资料表明(刘富等, 2009; Diwu *et al.*,

2011), 在华北克拉通中部造山带内怀安杂岩、涑水杂岩、登封杂岩和太华杂岩中大量出露约 2.52 Ga 的岩石, 这些岩石具有正的全岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值和/或锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值, 大多数岩石中锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值接近于同期亏损地幔值, 且模式年龄与岩石的形成年龄比较接近(年龄差 < 200 Ma), 表明新太古代晚期亦存在较强烈的地壳生长(刘富等, 2009; Diwu *et al.*, 2011)。

本文碎屑锆石两阶段 Hf 模式年龄分析结果显示, 其变化范围为 3 130~2 637 Ma(表 3), 且主要集中于 2 800~2 700 Ma(图 9), 表明赞皇地区出露大面积新太古代早期 TTG 片麻岩(Yang *et al.*, 2013; 宋会侠等, 2018), 同时古元古代甘陶河群中碎屑锆石两阶段 Hf 模式年龄具有强烈的 2 800~2 700 Ma 峰值(Du *et al.*, 2016a), 进一步表明新太古代早期是赞皇杂岩强烈的地壳生长时期(Wu *et al.*, 2005; Geng *et al.*, 2012)。

6 结论

通过对赞皇杂岩瓮城地区长城系常州沟组砂岩中碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素分析, 结合前人相关资料, 本文获得以下初步认识:

(1) 根据碎屑锆石阴极发光图像特征与 U-Pb 年龄结果, 在 2 件砂岩样品中获得最年轻碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 1 925 Ma 与 1 822 Ma, 结合下伏于长城系的基底杂岩曾经历了 1 850~1 800 Ma 变质作用与区域上常州沟组上覆大红峪组中火山岩中 1 635 Ma 结晶锆石年龄, 初步限定瓮城地区常州沟组石英砂岩沉积时代为 1 800~1 635 Ma。

(2) 赞皇杂岩长城系常州沟组砂岩碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 3 252~1 822 Ma 之间, 最主要的峰值年龄约为 2 500 Ma, 指示其主要物源为新太古代晚期中酸性岩浆岩; 代表性碎屑锆石 Hf 两阶段模式年龄为 3 253~2 656 Ma, 峰值年龄为 2 900~2 700 Ma, 结合赞皇杂岩中 2 700 Ma 岩浆锆石和碎屑锆石 Hf 同位素结果, 进一步揭示了 2 900~2 700 Ma 是赞皇杂岩大陆地壳最主要的生长阶段。

(3) 结合赞皇及其邻区已发表的常州沟组岩石学、沉积环境与碎屑锆石的相关数据, 推测赞皇杂岩翁城地区长城系常州沟组形成于陆内裂谷盆地。

致谢 感谢刘茂森同学在野外样品采集过程中

的帮助; 感谢 3 位审稿专家对本文的认真审阅了本文并提出了宝贵的修改建议, 感谢编辑部老师认真细致的编辑。

References

- Bai Guodian, Ju Genshe, He Kai, *et al.* 2019. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and tectonic significance of Fengyu altered syenite granite in the southern section of the Taihang Mountains[J]. *Geology of China*, 46(1): 140~154(in Chinese with English abstract).
- Bai Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 102~104(in Chinese).
- Bai Wenqian, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, *et al.* 2019. SHRIMP U-Pb dating and Hf isotope study of detrital zircons from the Great Wall System in the Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 363~2 376 (in Chinese with English abstract).
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602~622.
- Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, *et al.* 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data[J]. *Lithos*, 119: 457~466.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Cawood P A and Hawkesworth C J. 2019. Continental crustal volume, thickness and area, and their geodynamic implications[J]. *Gondwana Research*, 66: 116~125.
- Cawood P A, Hawkesworth C J and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 40(10): 875~878.
- Cawood P A and Nemchin A A. 2001. Paleogeographic development of the east Laurentian margin: Constraints from U-Pb detrital zircons in the Newfoundland Appalachians[J]. *GSA Bulletin*, 113: 1 234~1 246.
- Chen Chao, Xiu Di, Wang Haimin, *et al.* 2022. Petrology, geochemical characteristics, and geological significance of sandstones from the Changzhou Gou Formation in the middle section of the Yanshan Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 771~785 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jinbiao. 1980. A brief discussion on several problems of the aurora subboundary in Jixian County and its adjacent areas[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, Tianjin Institute of Geology

- and Mineral Resources, 1(1): 18~27 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jinbiao. 1999. Chinese Stratigraphy: Middle Proterozoic[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~89 (in Chinese).
- Chen Xian, Zhang Chuanheng, Jia Jun. *et al.* 2014. Sedimentary characteristics and geological significance of the Changzhou Gou Formation in Jixian County[J]. Journal of Stratigraphy, 38(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuqi. 1994. Introduction to Regional Geology in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~517 (in Chinese).
- Deng Y, Wang H J, Lu D, *et al.* 2021. Evolution of the 1.8~1.6 Ga Yanliao and Xiong'er basins, north China Craton[J]. Precambrian Research, 365: 106383.
- Diwu Chunrong. 2021. Growth and evolution of the Archean continental crust in the southern part of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(2): 317~340 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Liu Xiang and Sun Yong. 2018. Composition and evolution of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 999~1 018 (in Chinese with English abstract).
- Diwu C R, Sun Y, Guo A L, *et al.* 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng Complex [J]. Gondwana Research, 20: 149~170.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 253~262 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong and Wang Qian. 2012. Crustal growth and evolution of the North China Craton: Implications from the Hf isotopic composition of zircons from modern river debris[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3 520~3 530 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Yuan Honglin, *et al.* 2008. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope composition, and geological significance of detrital zircons from the Songshan quartzite in the Dengfeng area, Henan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 53(16): 1 923~1 934 (in Chinese with English abstract).
- Diwu C R, Wang T Y and Yan J H. 2020. New evidence for Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) crustal growth in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 350: 105~921.
- Du Rulin. 1984. The establishment of the Zhaojiazhuang Formation and the relationship between the Hutuo Group and the Great Wall System in the Taihang Wutai Mountains[J]. Journal of Hebei GEO University, (1): 23~29 (in Chinese).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Lu Zenglong, *et al.* 2015. The Sijizhuang Formation at Jiangcun area of Wutai Mountains: Further constraints on the age of the Hutuo Group[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 599~612 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Ren Liudong, *et al.* 2012. The 2.2~2.1 Ga magmatic event and its tectonic implication in the Lüliang Mountains, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2 751~2 769 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Song Huixia, *et al.* 2018. Petrogenesis and tectonic setting of 2.2~2.1 Ga granites in Wutai area, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1 154~1 174 (in Chinese with English abstract).
- Du L L, Yang C H, Wang W, *et al.* 2013. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2 137 Ma Huangjinshan A-type granite porphyry in the Wutai area[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 190~202.
- Du L L, Yang C H, Wyman D A, *et al.* 2016a. Age and depositional setting of the Paleoproterozoic Gantaohu Group in Zhanhuang Complex: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of sandstones and dacite [J]. Precambrian Research, 286: 59~100.
- Du L L, Yang C H, Wyman D A, *et al.* 2016b. 2090~2070 Ma A-type granitoids in Zhanhuang Complex: Further evidence on a Paleoproterozoic rift-related tectonic regime in the Trans-North China Orogen[J]. Lithos, 254~255: 18~35.
- Duan Q S, Du L L, Song H X, *et al.* 2021. Petrogenesis of the 2.3 Ga Lengkou metavolcanic rocks in the North China Craton: Implications for tectonic settings during the magmatic quiescence[J]. Precambrian Research, 357: 106~151.
- Fisher C M, Vervoort J D and Hanchar J M. 2014. Guidelines for reporting zircon Hf isotopic data by LA-MC-ICPMS and potential pitfalls in the interpretation of these data[J]. Chemical Geology, 363: 125~133.
- Gao Wei, Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age and its tectonic significance of the Miyun rapakivi granite in Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 157(6): 793~798 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels G E. 2014. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42: 127~149.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wan Yusheng. 2006. Paleoproterozoic

- granitic magmatism in the Lüliang area, North China Craton: Constraints from isotopic geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305~314 (in Chinese with English abstract).
- Geng Y S, Du L L, Ren L D. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes [J]. *Gondwana Research*, 21: 517~529.
- Gong Wangbin, Xi Shengli, Liu Xinshe, *et al.* 2016. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons from the Ordos block in the western part of the North China Craton and its significance [J]. *Geological Review*, 62(6): 1 379~1 391 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magmatism, SE Chian: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Hawkesworth C J, Cawood P A, Kemp T, *et al.* 2009. A matter of preservation [J]. *Science*, 322: 49~50.
- He Zhengjun. 1990. Current research status on the relationship between sandstone clastic components and plate tectonic positions [J]. *Geological Science and Technology Information*, 9(4): 7~12 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Niu Bbaogui, Zhang Xinyuan, *et al.* 2011. The discovery of ancient weathering crust rocks of ringed granite under the Proterozoic Changzhou Gou Formation in Miyun, Beijing and their detrital zircon ages [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 798~802 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Song Tianrui, Ding Xiaozhong, *et al.* 2000. Sedimentary records of the Great Wall period volcanic events in Beijing and adjacent areas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(4): 510~514, 520 (in Chinese with English abstract).
- He Ping, Wang Qingchun, Shen Fangle, *et al.* 2020. Discovery and significance of stacked sandy MISS combinations in the Zhaojiazhuang Formation of the Mesoproterozoic Great Wall in southwestern Hebei Province [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(6): 1 005~1 014 (in Chinese with English abstract).
- Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geological Records of Beijing and Tianjin in Hebei Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~741 (in Chinese).
- Hou Guiting, Zhang Cheng, Qian Xianglin, *et al.* 1998. Formation mechanism and tectonic stress field of the Mesoproterozoic basic rock wall group in the North China Craton [J]. *Geological Review*, 44(3): 309~314 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guohui, Hu Junliang, Chen Wei, *et al.* 2010. Geochemical characteristics and tectonic environment of the 1.78 Ga basic rock wall group in the Zhongtiaoshan Songshan area on the southern edge of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 563~1 576 (in Chinese with English abstract).
- Hu Junliang, Zhao Taiping, Xu Yonghang, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and petrogenesis of high potassium volcanic rocks in the Dahongyu Formation of the North China Craton [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(4): 70~77 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yang, Zhu Xiyan, Zhang Ruiying, *et al.* 2024. Sedimentary age and source area analysis of the Great Wall System in Licheng, Shanxi Province: Evidence from elastic zircon U-Pb chronology and Lu-Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(1): 295~312 (in Chinese with English abstract).
- Huang X L, Wilde S A, Yang Q J, *et al.* 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic [J]. *Lithos*, 134~135: 236~252.
- Huang Xueguang, Zhu Shixing and He Yuzhen. 2001. Several Basic Issues in the Study of Sequence Stratigraphy of the Middle and New Proterozoic Sections in Jixian County [J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(4): 201~221 (in Chinese with English abstract).
- Kröner A, Wilde S A, Li J H, *et al.* 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577~595.
- Li Huaikun, Li Huimin and Lu Songnian. 1995. Zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Tuanshanzi Formation of the Great Wall System and its geological significance [J]. *Geochimica*, 24(1): 43~48, 101 (in Chinese with English abstract).
- Li H K, Lu S N, Su W B, *et al.* 2013. Recent advances in the study of the Mesoproterozoic geochronology in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 216~227.
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, *et al.* 2011. The base age of the Changchengian System at the northern North China Craton should be younger than 1 670 Ma: Constraints from zircon U-Pb LA-MC-ICPMS dating of a granite-porphry dike in Miyun County, Beijing [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 108~120 (in Chinese with English abstract).

- Li Huaikun, Zhang Jian, Tian Hui, *et al.* 2020. Progress in the study of Meso Neoproterozoic stratigraphic chronology in the Yanliao rift on the northern edge of the North China Craton[J]. Geological Survey and Research, 43(2): 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Hou Guiting, Qian Xianglin, *et al.* 2001. Single grain zircon U-Pb ages of early Mesoproterozoic basic rock wall groups in Hengshan and their implications for cratonic tectonic evolution[J]. Geological Review, 47(3): 234~238 (in Chinese with English abstract).
- Li Lun, Yang Yongqiang, Yang Chonghui, *et al.* 2017. The petrogenesis and tectonic setting of ca. 2.5 Ga A-type granite in the Zanzhuang complex: An example from the Huangcha granite[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2850~2866 (in Chinese with English abstract).
- Liao Chaolin, Wang Yuejun and Peng Toupeng. 2003. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of early Proterozoic basic vein rocks in the southern section of the Taihang Mountains and their tectonic significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 27(4): 354~361 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, *et al.* 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic[J]. Chemical Geology, 261: 140~154.
- Liu Fu, Guo Jinghui, Lu Xiaoping, *et al.* 2009. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane[J]. Chinese Science Bulletin, 54(17): 4704~4713 (in Chinese).
- Liu Yongqing, Liu Xiaowen and Li Yan. 1997. Research on the tectonic cycle sequence of the Meso and Neoproterozoic rift troughs in the Yanshan Mountains: Also discussing the concept and classification of the tectonic cycle sequence of the rift troughs[J]. Acta Geoscientia Sinica, 18(2): 142~149 (in Chinese).
- Lu Songnian and Li Huimin. 1991. Accurate dating of single-grain zircon U-Pb method of volcanic rocks of Dahongyu Formation of the Great Wall system in Jixian County[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 22(1): 137~146 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zenglong, Song Huixia, Du Lilin, *et al.* 2014. Delineation of ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Fuping Complex, North China Craton and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(10): 2872~2884 (in Chinese with English abstract).
- Meng Y, Zuo P F, Zheng D S, *et al.* 2018. The earliest clastic sediments overlying the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Mesoproterozoic tectonics of the southern North China Craton[J]. Precambrian Research, 305: 268~285.
- Nutman A P, Wan Y S, Du L L, *et al.* 2011. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei[J]. Precambrian Research, 189: 43~65.
- Pan Jianguo, Qu Yongqiang, Ma Rui, *et al.* 2013. Evolution of the Meso Neoproterozoic sedimentary structures on the northern margin of the North China Block[J]. Geological Journal of China Universities, 19(1): 109~122 (in Chinese with English abstract).
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al.* 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11: Q0AA06.
- Peng P, Feng L J, Sun F B, *et al.* 2017. Dating the Gaofan and Hutuo Groups—Targets to investigate the Paleoproterozoic Great Oxidation Event in North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 535~547.
- Peng P, Liu F, Zh M G, *et al.* 2012. Age of the Miyun Dyke swarm: Constraints on the maximum depositional age of the Changcheng System[J]. Chinese Science Bulletin, 57: 105~110.
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, *et al.* 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North Chian dyke swarm[J]. Lithos, 101: 260~280.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Zhang Huafeng, *et al.* 2004. The geochemical characteristics and geological significance of the 1.8 Ga mafic rock wall group in the North China Craton: A case study of the border area between Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 439~456 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Zhang Chhuanheng. 2007. New reflections on the chronostratigraphic columns and tectonic environment of the Mesozoic and Neoproterozoic in the China Korea Plate[J]. Geological Bulletin of China, 26(5): 503~509 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yongqiang, Meng Qingren, Ma Shuxian, *et al.* 2011. Geological characteristics and tectonic significance of several important Proterozoic unconformities in the northern margin of the North China Massif[J]. Earth Science Frontiers, 17(4): 112~127 (in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 48(Supp.): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Song Huixia, Yang Chonghui, Du Lilin, *et al.* 2018. Delineation of the ~

- 2.7 Ga TTG gneisses in Zanhuang Complex, Hebei province, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1 599~1 611 (in Chinese with English abstract).
- Song Tianrui. 2007. The sedimentary facies indicators and sedimentary environment models of the Middle Proterozoic Great Wall System in the Thirteen Tombs area of Beijing[J]. *Journal of Paleogeography*, 9(5): 461~472 (in Chinese with English abstract).
- Su Wenbo, Li Huaikun, Xu Li, *et al.* 2012. The Luoyu Group-Ruyang Group on the southern edge of the North China Craton belongs to the Middle Proterozoic Great Wall System-direct constraint of zircon LA-MC-ICPMSU-Pb ages in the Luoyukou Formation of Ruzhou, Henan Province[J]. *Geological Survey and Research*, 35(2): 96~108 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dazhong and Lu Songnian. 1987. Proterozoic Tectonic Evolution of the North China Platform[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 16(2): 55~69 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313~345.
- Thompson J, Meffre S and Danyushevsky L. 2018. Impact of air, laser pulse width and fluence on U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33: 221~230.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, *et al.* 2022. Massive continental crust accretion from early Neoproterozoic to late Mesoproterozoic (2.6-3.0 Ga) in the North China Craton: A review[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 866~906 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Liu D Y, Wang W, *et al.* 2011. Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 219~242.
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda and Song Tianrun. 2003. SHRIMP age of detrital zircons from the Changzhougou Formation of the Great Wall System in the Ming Tombs of Beijing: Limitations on the source area and maximum sedimentary age of the North China Craton cover[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 1 970~1 975(in Chinese).
- Wang Changyao. 1986. Definition of Early Ancient Rivers and Paleogeographic Characteristics and Evolution in Changzhou Gully, Yanshan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 243~245 (in Chinese).
- Wang Hongzhen. 1985. Atlas of Ancient Chinese Geography [M]. Beijing: Map Publishing House, 1~283(in Chinese).
- Wang Hongzhen and Qiao Xiufu. 1986. Proterozoic Tectonic Units and Their Boundary Properties in China Pre Cambrian Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~15(in Chinese).
- Wang J L, Yang, C H, Derek A., *et al.* 2020. Petrogenesis and tectonic implications of the 2.1~2.0 Ga granitoids in Fuping Complex, North China Craton: Constraints from petrology, geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes[J]. *Precambrian Research*, 339: 105611.
- Wang J P, Kusky T, Wang L, *et al.* 2017. Petrogenesis and geochemistry of circa 2.5 Ga granitoids in the Zanhuang Massif: Implications for magmatic source and Neoproterozoic metamorphism of the North China Craton[J]. *Lithos*, 268~271: 149~162.
- Wang Qingchun, He Ping, Du Jiangmin, *et al.* 2017. Sedimentary characteristics of the Zhaojiazhuang Formation of the Changcheng Formation in the central southern section of the Taihang Mountains [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*, 39(4): 47~56(in Chinese with English abstract).
- Wang Songshan, Sang Haiqing, Qiu Ji, *et al.* 1995. A study on the formation age of the Yangzhuang Formation and Wumishan Formation in the Jixian section[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 30(2): 166~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xitong, Wang Huaichang, Guan Yulong, *et al.* 2021. Petrological characteristics and sedimentary environment of the Changzhougou Formation of the Middle Proterozoic Changcheng Formation in Licheng, Shanxi[J]. *Marine Oil and Gas Geology*, 26(1): 71~80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuelun, Lu Songnian, Gao Zhenjia, *et al.* 1980. Characteristics, staging and comparison of Sinian glacies in China[J]. *Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources*, 1(1): 1~17(in Chinese with English abstract).
- Wen Xiande. 1989. Middle and Late Proterozoic lithofacies, paleogeography, and their evolution in northern North China[J]. *Journal of Petroleum University (Natural Science Edition)*, 13(2): 13~21 (in Chinese with English abstract).
- Whitehouse M J and Platt J P. 2003. Dating high-grade metamorphism—Constraints from rare-earth elements in zircon and garnet[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 61~74.
- Wu F Y, Yang J H, Liu X M, *et al.* 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523~545.
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Shen Qihan, *et al.* 1998. Geological

- Characteristics and Tectonic Evolution of the Archean Period in the Ancient Continent of China and Korea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 192~211(in Chinese).
- Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Li Huaikun, *et al.* 2020. Mesoproterozoic magmatic event group in the North China Craton [J]. Geological Survey and Research, 43(2): 137~152 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Lingling, Jiang Zongsheng, Wang Guodong, *et al.* 2011b. Metamorphic reaction textures and metamorphic *P-T-t* loops of the Precambrian Zhanhuang metamorphic complex, Hebei, North China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 980~1 002 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Lingling and Wang Guodong. 2011a. Zircon U-Pb dating of metabasic rocks in the Zhanhuang metamorphic complex and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Minealogica, 30(5): 781~794 (in Chinese with English abstract).
- Xiao L L, Wu C M, Zhao G C, *et al.* 2011. Metamorphic *P-T* paths of the Zhanhuang amphibolites and metapelites: Constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen[J]. International Journal of Earth Sciences, 100(4): 717~739.
- Xie Hangqiang, Liu Dunyi, Yin Xiaoyan, *et al.* 2013. Formation age and tectonic environment of the Gantao River Group; Geology, geochemistry, and zircon SHRIMP dating[J]. Chinese Science Bulletin, 58(1): 75~85(in Chinese).
- Xue G M. 2019. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-Rock geochemistry of Neoproterozoic-Cambrian successions in the Cathaysia Block of South China: Implications on paleogeographic reconstruction in supercontinent[J]. Precambrian Research, 331: 105~348.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, *et al.* 2011a. Petrogenesis and geodynamic setting of Jiandeng potassic granite at the end of the Neoproterozoic in Zhanhuang Complex, North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 18(2): 62~78(in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, *et al.* 2011b. The age and petrogenesis of the Xuting granite in the Zhanhuang Complex, Hebei Province: Constraints on the structural evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1 003~1 016(in Chinese with English abstract).
- Yang C H, Du L L, Ren L D, *et al.* 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and its geological implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 178~189.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, *et al.* 2015. Early Precambrian Stratigraphic Division and Magmatic Evolution in the North China Craton[M]. Beijing: Science Press, 1~277(in Chinese).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, *et al.* 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Miyun ringed granite in Beijing and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1 633~1 644(in Chinese with English abstract).
- Yao J L, Shu L S and Santosh M. 2011. Detrital Zircon U-Pb Geochronology, Hf-Isotopes and Geochemistry: New Clues for the Precambrian Crustal Evolution of Cathaysia Block, South China[J]. Gondwana Research, 20: 553~567.
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, *et al.* 2014. Magmatism and Multiple Rift Events in the Meso Neoproterozoic of North China[J]. Earth Science Frontiers, 21(1): 100~119(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. Gondwana Research, 20: 6~25.
- Zhang Jian, Tian Hui, Li Huaikun, *et al.* 2015. Columbia supercontinent rupture event on the northern edge of the North China Craton: geochemical, zircon U-Pb geochronology, and Hf isotope evidence from alkaline volcanic rocks of the Changcheng Formation in the central part of the Yanliao Rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(10): 3 129~3 146(in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, *et al.* 2007. The 1.75~1.68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen [J]. Precambrian Research, 155: 287~312.
- Zhang Y B, Li Q L, Lan Z W, *et al.* 2015. Diagenetic xenotime dating to constrain the initial depositional time of the Yan-Liao Rift[J]. Precambrian Research, 271: 20~32.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 136: 177~202.
- Zhao G C and Zhai M. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications [J]. Gondwana Research, 23: 1 207~1 240.
- Zhao Runfu, Guo Jinhun, Peng Peng, *et al.* 2011. 2.1 Ga crustal remelting event in Hengshan Complex: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf-Nd study on potassic granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1 607~1 623 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Deng Xiaolin, Hu Guohui, *et al.* 2015. Discussion on the Paleo/Middle Proterozoic Boundary and Related Geological Issues of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(6): 1 495~

- 1 508(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Pang Lanyi, Qiu Yifan, *et al.* 2019. Paleozoic/Mesoproterozoic boundary: 1.8 Ga [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 281~2 298(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, *et al.* 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2 495~2 502(in Chinese).
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Jin Chengwei, *et al.* 2001. Discussion on the Formation Era of the Xiong'er Group on the Southern Edge of the North China Block[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36(3): 326~334(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongpu. 1993. Evolution of the Precambrian Crust of the Sino Korean paraplatform[M]. Beijing: Science Press, 1~444(in Chinese).
- Zhou Hongying, Li Huankun, Zhang Jian, *et al.* 2020. Constraints on the age of the bottom boundary of the Proterozoic Great Wall Group in the Yanliao Rift Trough by U-Pb dating of granulite xenoliths in the Neoproterozoic granite gneiss[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 88~81(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jie. 2016. Study on the Sedimentary Environment of the Mesoproterozoic Great Wall System in Liaoyu Lincheng, Hebei Province[D]. Master Thesis of Hebei University of Geosciences, 1~39(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Y and Zhai M G. 2022. Mantle plume-triggered rifting closely following Neoproterozoic cratonization revealed by 2.50-2.20 Ga magmatism across North China Craton [J]. *Earth-Sciences Reviews*, 230: 104060.
- 白国典, 琚根社, 何 凯, 等. 2019. 太行山南段丰峪蚀变正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *中国地质*, 46(1): 140~154.
- 白 瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌矿成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 102~104.
- 白文倩, 董春艳, 颜颇强, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地长城系碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 35(8): 2 363~2 376.
- 陈 超, 修 迪, 王海敏, 等. 2022. 燕山中段常州沟组砂岩岩石学、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(4): 771~785.
- 陈晋镡. 1980. 略论蓟县及邻区震旦亚界的几个问题[J]. *中国地质科学院报*. 天津地质矿产研究所分刊, 1(1): 18~27.
- 陈晋镡. 1999. 中国地层典: 中元古界[M]. 北京: 地质出版社, 1~89.
- 陈 贤, 张传恒, 家 军, 等. 2014. 蓟县常州沟组沉积特征及其地质意义[J]. *地层学杂志*, 38(2): 236~244.
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1~517.
- 第五春荣. 2021. 华北克拉通南部太古宙大陆地壳的生长和演化[J]. *岩石学报*, 37(2): 317~340.
- 第五春荣, 刘 祥, 孙 勇. 2018. 华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化[J]. *岩石学报*, 34(4): 999~1 018.
- 第五春荣, 孙 勇, 林慈奎, 等. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学[J]. *岩石学报*, 23(2): 253~262.
- 第五春荣, 孙 勇, 王 倩. 2012. 华北克拉通地壳生长和演化: 来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 520~3 530.
- 第五春荣, 孙 勇, 袁洪林, 等. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *科学通报*, 53(16): 1 923~1 934.
- 杜汝霖. 1984. 赵家庄组的建立及太行一五台山区溥沱群与长城系的关系[J]. *河北地质学院学报*, (1): 23~29.
- 杜利林, 杨崇辉, 路增龙, 等. 2015. 五台山蒋村地区四集庄组——对溥沱群时代的再限定[J]. *地球学报*, 36(5): 599~612.
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 等. 2012. 吕梁地区 2.2~2.1 Ga 岩浆事件及其构造意义[J]. *岩石学报*, 28(9): 2 751~2 769.
- 杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 等. 2018. 华北克拉通五台地区 2.2~2.1 Ga 花岗岩的成因与构造背景[J]. *岩石学报*, 34(4): 1 154~1 174.
- 高 维, 张传恒, 高林志, 等. 2008. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质通报*, 157(6): 793~798.
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 22(2): 305~314.
- 公王斌, 席胜利, 刘新社, 等. 2016. 华北克拉通西部鄂尔多斯地块长城系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及意义[J]. *地质论评*, 62(6): 1 379~1 391.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 地质出版社, 1~741.
- 和政军. 1990. 砂岩碎屑组分与板块构造位置关系的研究现状[J]. *地质科技情报*, 9(4): 7~12.

附中文参考文献

- 和政军, 牛宝贵, 张新元, 等. 2011. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄[J]. 地质通报, 30(5): 798~802.
- 和政军, 宋天锐, 丁孝忠, 等. 2000. 北京及邻区长城纪火山事件的沉积记录[J]. 沉积学报, 18(4): 510~514, 520.
- 贺萍, 王青春, 申方乐, 等. 2020. 冀西南中元古界长城系赵家庄组叠层砂质 MISS 组合的发现及意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 50(6): 1 005~1 014.
- 侯贵廷, 张臣, 钱祥麟, 等. 1998. 华北克拉通中元古代基性岩墙群形成机制及构造应力场[J]. 地质论评, 44(3): 309~314.
- 胡国辉, 胡俊良, 陈伟, 等. 2010. 华北克拉通南缘中条山-嵩山地区 1.78 Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 26(5): 1 563~1 576.
- 胡俊良, 赵太平, 徐勇航, 等. 2007. 华北克拉通大红峪组高钾火山岩的地球化学特征及其岩石成因[J]. 矿物学报, 27(4): 70~77.
- 胡漾, 祝禧艳, 张瑞英, 等. 2024. 山西黎城地区长城系沉积时代及源区分析: 碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 40(1): 295~312.
- 黄学光, 朱士兴, 贺玉贞. 2001. 蓟县中、新元古界剖面层序地层学研究的几个基本问题[J]. 前寒武纪研究进展, 24(4): 201~221.
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 24(1): 43~48.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1 670 Ma: 来自北京密云花岗岩斑岩岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的约束[J]. 地学前缘, 18(3): 108~120.
- 李怀坤, 张健, 田辉, 等. 2020. 华北克拉通北缘燕辽裂陷槽中-新元古代地层年代学研究进展[J]. 地质调查与研究, 43(2): 127~136.
- 李江海, 侯贵廷, 钱祥麟, 等. 2001. 恒山中元古代早期基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义[J]. 地质论评, 47(3): 234~238.
- 李伦, 杨永强, 杨崇辉, 等. 2017. 赞皇地区~2.5 Ga A 型花岗岩的成因及构造背景: 以黄岔岩体为例[J]. 岩石学报, 33(9): 2 850~2 866.
- 廖超林, 王岳军, 彭头平. 2003. 太行山南段早元古代基性脉岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 27(4): 354~361.
- 刘富, 郭敬辉, 陆孝平, 等. 2009. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例[J]. 科学通报, 54(17): 2 517~2 526.
- 柳永清, 刘晓文, 李寅. 1997. 燕山中、新元古代裂陷槽构造旋回层序研究: 兼论裂陷槽构造旋回概念及级序的划分[J]. 地球学报, 18(2): 142~149.
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年[J]. 中国地质科学院院报, 22(1): 137~146.
- 路增龙, 宋会侠, 杜利林, 等. 2014. 华北克拉通阜平杂岩中~2.7 Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(10): 2 872~2 884.
- 潘建国, 曲永强, 马瑞, 等. 2013. 华北地块北缘中新元古界沉积构造演化[J]. 高校地质学报, 19(1): 109~122.
- 彭澎, 翟明国, 张华锋, 等. 2004. 华北克拉通 1.8Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义: 以晋冀蒙交界地区为例[J]. 岩石学报, 20(3): 439~456.
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 26(5): 503~509.
- 曲永强, 孟庆任, 马收先, 等. 2011. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 17(4): 112~127.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(Supp.): 26~30.
- 宋会侠, 杨崇辉, 杜利林, 等. 2018. 河北赞皇杂岩中 2.7 Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(6): 1 599~1 611.
- 宋天锐. 2007. 北京十三陵地区中元古界长城系沉积相标志及沉积环境模式[J]. 古地学报, 9(5): 461~472.
- 苏文博, 李怀坤, 徐莉, 等. 2012. 华北克拉通南缘洛峪群-汝阳群属于中元古界长城系——河南汝州洛峪口组层凝灰岩锆石 LA-MC-ICPMSU-Pb 年龄的直接约束[J]. 地质调查与研究, 35(2): 96~108.
- 孙大中, 陆松年. 1987. 华北地台的元古宙构造演化[J]. 中国地质科学院院报, 16(2): 55~69.
- 万渝生, 董春艳, 颜强强, 等. 2022. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期(2.6~3.0 Ga)巨量陆壳增生: 综述[J]. 地质力学学报, 28(5): 866~906.
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定[J]. 科学通报, 48(18): 1 970~1 975.
- 王长尧. 1986. 燕山常州沟早期古河流的厘定与古地理特征及其演化[M]. 前寒武纪地质, 北京: 地质出版社, 243~245.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1~283.
- 王鸿祯, 乔秀夫. 1986. 中国元古宙构造单元及其边界性质. 前寒武

- 纪地质[M]. 北京:地质出版社, 1~15.
- 王青春, 贺萍, 杜江民, 等. 2017. 太行山中南段长城系赵家庄组沉积特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(4): 47~56.
- 王松山, 桑海清, 裴冀, 等. 1995. 蓟县剖面杨庄组和雾迷山组形成年龄的研究[J]. 地质科学, 30(2): 166~173.
- 王玺童, 王怀厂, 官玉龙, 等. 2021. 山西黎城中元古界长城系常州沟组岩石学特征和沉积环境[J]. 海相油气地质, 26(1): 71~80.
- 王曰伦, 陆松年, 高振家, 等. 1980. 中国震旦纪冰川特征、分期及对比[J]. 中国地质科学院报, 天津地质矿产研究所分刊, 1(1): 1~17.
- 温献德. 1989. 华北北部中晚元古代岩相古地理及其演化[J]. 石油大学学报(自然科学版), 13(2): 13~21.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京:地质出版社, 192~211.
- 相振群, 陆松年, 李怀坤, 等. 2020. 华北克拉通中元古代岩浆事件群[J]. 地质调查与研究, 43(2): 137~152.
- 肖玲玲, 蒋宗胜, 王国栋, 等. 2011b. 赞皇前寒武纪变质杂岩区变质反应结构与变质作用 P - T - t 轨迹[J]. 岩石学报, 27(4): 980~1 002.
- 肖玲玲, 王国栋. 2011a. 赞皇变基性岩中锆石的 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 781~794.
- 颜强, 刘敦一, 殷小艳, 等. 2013. 甘陶河群形成时代和构造环境: 地质、地球化学和锆石 SHRIMP 定年[J]. 科学通报, 58(1): 75~85.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2011a. 赞皇杂岩中太古宙末期营等钾质花岗岩的成因及动力学背景[J]. 地学前缘, 18(2): 62~78.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2011b. 河北赞皇地区许亭花岗岩的时代及成因: 对华北克拉通中部带构造演化的制约[J]. 岩石学报, 27(4): 1 003~1 016.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2015. 华北克拉通早前寒武纪地层划分对比及岩浆演化[M]. 北京:科学出版社, 1~277.
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(6): 1 633~1 644.
- 张健, 田辉, 李怀坤, 等. 2015. 华北克拉通北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 来自燕辽裂陷槽中部长城系碱性火山岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 31(10): 3 129~3 146.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 等. 2011. 恒山地区元古代 2.1 Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究[J]. 岩石学报, 27(6): 1 607~1 623.
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 等. 2015. 华北克拉通古-中元古代界线和相关地质问题讨论[J]. 岩石学报, 31(6): 1 495~1 508.
- 赵太平, 庞岚尹, 仇一凡, 等. 2019. 古/中元古代界线: 1.8 Ga[J]. 岩石学报, 35(8): 2 281~2 298.
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 2004. 熊耳群火山岩锆石 U-Pb SHRIMP 定年: 华北克拉通盖层初始形成年龄的制约因素[J]. 中国科学公报, 49(23): 2 495~2 502.
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 等. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论[J]. 地质科学, 36(3): 326~334.
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京:科学出版社, 1~444.
- 周红英, 李怀坤, 张健, 等. 2020. 新太古代花岗片麻岩中麻粒岩包体磷灰石 U-Pb 定年对燕辽裂陷槽中元古代长城群底界年龄的制约[J]. 地质调查与研究, 43(2): 81~88.
- 周杰. 2016. 河北省测鱼—临城中元古代长城系沉积环境研究[D]. 河北地质大学硕士论文, 1~39.