

通化地区集安群变质表壳岩锆石 U-Pb 定年、 Lu-Hf 同位素分析及其构造指示意义

周喜文¹, 杨崇辉¹, 郑常青², 胡大千²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 有关胶-辽-吉带巨量变沉积岩系时代与物源归属问题一直存在争议。利用 LA-MC-ICP MS 技术对出露于该带北段通化地区集安群变质表壳岩、片麻状花岗岩、斑状花岗岩和 TTG 片麻岩样品开展了锆石 U-Pb 与 Lu-Hf 同位素分析。结果显示, 集安群变质表壳岩碎屑锆石年龄呈现 2.5 Ga 与 2.1 Ga 两个明显的主峰, 不同类型变质岩中碎屑锆石的年龄分布并不一致。变质程度较低的含墨变粒岩碎屑锆石年龄集中在 2.5 Ga 左右, 反映主要来自新太古代地质体。变质程度较高的夕线石榴堇青片麻岩、透辉片麻岩和大理岩碎屑锆石含量很少, 且普遍遭受了变质改造, 难以反映真实的物源时代。集安群变质锆石年龄呈现 1.95~1.90 Ga、1.90~1.85 Ga 和 1.85~1.80 Ga 3 个阶段, 根据定量相图模拟的变质锆石与熔体的产出关系, 推断第 1 阶段年龄代表了变质地体降温初期, 第 2 阶段年龄代表了降温后期大规模熔体冷凝结晶时代, 第 3 阶段则与地体进一步抬升到地壳浅部层次的构造运动有关。集安群变质表壳岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -12.40~+6.17 之间, 主峰在 -8~-2 之间, 二阶段模式年龄介于 3.0~2.3 Ga 之间, 并且与太古宙 TTG 片麻岩和元古代片麻状花岗岩具有同源演化特点。通化地区太古宙角闪斜长片麻岩 (TTG) 的侵位年龄为 2574 ± 11 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 1.87~7.30 之间, 二阶段模式年龄介于 2.89~2.60 Ga 之间, 显示为新生地壳部分熔融产物。片麻状花岗岩的侵位年龄为 2104 ± 18 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -2~+2 之间, 模式年龄介于 2.8~2.7 Ga 之间, 显示为新生地壳与古老表壳岩共同熔融产物。未变形斑状花岗岩的侵位年龄为 1888 ± 8 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -5.43~+0.03, 模式年龄介于 2.7~2.5 Ga 之间, 显示主要为古老表壳岩重熔产物。总体来说, 胶-辽-吉带早期 2.3~2.0 Ga 期间呈现典型大陆裂谷发育特征, 晚期 1.95~1.85 Ga 期间呈现碰撞造山带演化特点, 二者可能分属不同的构造热事件。

关键词: 集安群; 变质表壳岩; 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Lu-Hf 同位素分析; 胶-辽-吉带

中图分类号: P597; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0214-33

Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic analysis of metamorphic supracrustal rocks from the Ji'an Group in Tonghua area and their tectonic implications

ZHOU Xi-wen¹, YANG Chong-hui¹, ZHENG Chang-qing² and HU Da-qian²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The depositional age and provenance of meta-sedimentary rock series in the Jiao-Liao-Ji Belt remain fundamental issues of considerable debate. Using LA-MC-ICP MS zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope analytical techniques, representative rock samples, including metamorphic supracrustal rocks of the Ji'an Group, gneissic granite, porphyry granite and TTG gneiss from the Tonghua area in the northern part of the Belt were analyzed. The

收稿日期: 2021-12-01; 接受日期: 2022-01-18; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072223, 41372196); 中国地质调查局项目 (DD20201116, DD20211116)

作者简介: 周喜文 (1970-), 男, 研究员, 从事前寒武纪地质与变质岩石学研究, E-mail: chouxw@163.com。

results show that the detrital zircon ages from metamorphic supracrustal rocks of the Ji'an Group present two dominant peaks of 2.5 Ga and 2.1 Ga. However, it is noteworthy that the detrital zircons from different metamorphic rock yield various age populations. The detrital zircon ages of the low grade metamorphic graphite-bearing leptynite concentrates at about 2.5 Ga, suggesting provenance of neoproterozoic magmatic unit. Detrital zircon in the high grade metamorphic rocks, such as sillimanite-garnet-cordierite gneiss, diopside gneiss and marble usually suffered alteration, and thus it is difficult to obtain reliable provenance age information. The metamorphic zircons from the Ji'an Group record three stages ages: 1.95~1.90 Ga, 1.90~1.85 Ga and 1.85~1.80 Ga. According to the relationship between metamorphic zircon and melting simulated by quantitative phase diagram, it is inferred that the first stage represents initial cooling timing of the metamorphic terrane, the second stage represents the timing of large-scale melt condensation and crystallization in the later cooling stage, and the third stage might be related to the tectonic exhumation, which led the terrane uplifting to the shallow crust. Zircons from metamorphic supracrustal rocks of the Ji'an Group show $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of $-12.40 \sim +6.17$ (mostly $-8 \sim -2$). Two-stage Hf model ages vary from 3.0 to 2.3 Ga, showing similar source characteristics with Archean TTG gneiss and paleoproterozoic gneissic granite. The emplacement age of Archean amphibolite gneiss (TTG) in Tonghua area is determined as 2574 ± 11 Ma with zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values ranging from $+1.87$ to $+7.30$, and two-stage Hf model ages of 2.89~2.60 Ga, indicating that the rock derived from partial melting of juvenile crust. The emplacement age of gneissic granite is dated as 2104 ± 18 Ma with zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of $-2 \sim +2$, and the Hf model ages of 2.8~2.7 Ga, indicating derivation from partial melting of juvenile crust and ancient supracrustal rocks. The emplacement age of undeformed porphyritic granite is as about 1888 ± 8 Ma, the zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values range from -5.43 to $+0.03$, and the Hf model ages range from 2.7 to 2.5 Ga, indicating that it derived by melting of ancient supracrustal rocks. In general, the Jiao-Liao-Ji Belt presents characteristics of typical continental rift during 2.3~2.0 Ga followed by collision orogenic process during 1.95~1.85 Ga, implying that they might result from different tectonic thermal events.

Key words: Ji'an Group; metamorphic supracrustal rock; zircon U-Pb dating; zircon Lu-Hf isotope analysis; Jiao-Liao-Ji Belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China(42072223, 41372196); Project of China Geological Survey(DD20201116, DD20211116)

胶-辽-吉带是华北克拉通东部一条很重要的古元古代活动带(图1a),北起吉林南部,南至安徽蚌埠一带(Zhao *et al.*, 2005),呈北东-南西向展布,连接了北部的龙岗地块和南部的狼林地块。主要由古元古代花岗质岩石、镁铁质侵入体和绿片岩相至麻粒岩相变质的火山-沉积岩系组成(张秋生等, 1988; 白瑾, 1993; 卢良兆等, 1996)。带内变质火山-沉积岩系包括胶东地区的荆山群和粉子山群,辽东地区的南、北辽河群,吉南地区的集安群和老岭群,以及安徽蚌埠地区的五河群和北朝鲜的摩天岭群(图1),其原岩总体为一套玄武岩和英安岩-流纹岩所构成的火山岩、碳酸盐岩和陆源碎屑沉积岩。

尽管对胶-辽-吉古元古代活动带研究了多年,但有关它的变质演化与大地构造属性却一直存在争论。一种观点认为该带属于陆内闭合裂谷(张秋生等, 1988; Sun *et al.*, 1993; Peng and Palmer, 1995;

Luo *et al.*, 2004, 2008; Zhao *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2005, 2006, 2011; Li and Zhao, 2007; Liu J *et al.*, 2018, 2020; Liu J H *et al.*, 2021),另一种观点认为其属于陆-弧或陆-陆碰撞带(白瑾, 1993; 贺高品等, 1998; Faure *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007; Tam *et al.*, 2011, 2012; 王惠初等, 2011; Meng *et al.*, 2014, 2017a, 2017b; 刘福来等, 2015; 陈斌等, 2016; Cai *et al.*, 2017, 2019; Liu F L *et al.*, 2017; Liu P H *et al.*, 2019; Xu and Liu, 2019; Wang *et al.*, 2020, 2021),还有一些学者倾向于认为该带早期先发生陆内裂解,形成小洋盆,后又经历构造体制转换,发生陆-陆碰撞形成造山带(Li *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2012)。最近, Liu 等(2017)综合胶-辽-吉带上的变质表壳岩、条纹状花岗岩和斑状花岗岩的岩石学与同位素年代学信息,认为该带在

古元古代末期曾经历碰撞造山过程,形成了一系列变质岩石与同造山或造山后花岗岩。

目前看来,碰撞模式的证据主要来自于该带南部,由于荆山群和五河群高压麻粒岩的存在,对其成因的争议相对较小。但是,对于北部的辽吉地区,由于变质程度相对较低,似乎难以用碰撞模式来解释(Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007)。近期,在吉南集安群和辽东辽河群中陆续发现的麻粒岩相变质岩石(刘福来等, 2015; 李修亮, 2016; Cai *et al.*, 2017, 2019; Liu *et al.*, 2019)表明辽吉地区孔兹岩系可能与胶东地区一样经历了高级变质作用改造,这对于进一步认识胶-辽-吉带的成因与构造属性具有重要限定作用。但是,对于这期变质作用发生的时限和构造演化过程仍然存在很多疑问,特别对于区内这套变质沉积建造,是发育于陆内裂谷还是陆缘弧后盆地存在很大争议(Li *et al.*, 2011; 刘福来等, 2015; Meng *et al.*, 2017b; Liu *et al.*, 2018; Xu and Liu, 2019; Liu *et al.*, 2021)。为此,本文选取集安群代表性变质表壳岩以及相邻的太古宙 TTG 片麻岩、古元古代花岗岩样品开展了系统的锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素分析工作,为进一步认识胶-辽-吉带的构造演化过程提供了新的制约。

1 区域地质概况

通化地区是吉林南部早前寒武纪基底出露最为广泛的地区,岩石组合丰富,既有太古宙 TTG 岩套和变质表壳岩,也有古元古代变质沉积建造(集安群和老岭群)、基性侵入岩和一系列同造山、非造山的花岗质侵入体(图 1b)。其中太古宙 TTG 片麻岩分布最广,构成了本区早前寒武纪基底的主体,岩石类型以英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩为主,含少量二长花岗岩和紫苏花岗岩,发育强烈的片麻理。据最新同位素资料,其主要形成于新太古代,少部分可能形成于中太古代(王朝阳等, 2018)。太古宙变质表壳岩主要以零散小块体形式分布于大面积的 TTG 片麻岩之中,包括中太古代的茨沟组和新太古代的红透山组。前者岩性以斜长角闪岩、黑云变粒岩、绿泥片岩为主,后者岩性以黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩为主,局部夹辉石斜长角闪岩和磁铁石英岩等。

区内古元古代变质单元主要分布于东南部的清

河、财源一带,包括集安群、老岭群变质表壳岩,以及 3 种类型变形和未变形的花岗质侵入体(图 1b)。集安群是通化地区分布最为广泛的变质沉积基底,主要是由一套富铝片岩、片麻岩和变粒岩组成,总体相当于孔兹岩系(卢良兆等, 1996)。自下而上包括蚂蚁河、荒岔沟和大东岔 3 个组。蚂蚁河组以含硼建造为主要特征,岩石类型包括斜长角闪岩、黑云变粒岩、电气石变粒岩、蛇纹石化大理岩、白云质大理岩等。与上覆荒岔沟组为构造接触。因构造和岩浆侵入活动影响未见顶底。荒岔沟组以富含石墨建造为特征,主要岩石类型包括石墨变粒岩、含墨黑云片麻岩、含墨大理岩夹斜长角闪岩,与下伏蚂蚁河组断层接触。大东岔组主要岩石类型为夕线石榴堇青片麻岩、石榴石片麻岩、黑云变粒岩、浅粒岩等。据前人锆石 U-Pb 定年结果,集安群碎屑锆石年龄分布较广(2.5~1.9 Ga),集中在 2.2~2.0 Ga 附近,变质年龄集中在 1.90~1.85 Ga 之间,属古元古代无疑(Lu *et al.*, 2006; 秦亚等, 2014; Meng *et al.*, 2017a, 2017b)。集安群整体变质程度较高(角闪岩相),局部已达麻粒岩相(Cai *et al.*, 2017, 2019)。老岭群是一套浅变质建造,原始层序保存较好,主要分布于老岭山脉两侧,下部为一套千枚岩、石英岩、黑云片岩夹碳酸盐岩等组合,上部为白云质大理岩。碎屑锆石 U-Pb 定年结果显示其物源时代介于 2.5~2.0 Ga 之间,但多数集中在 2.2~2.0 Ga 附近(Lu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2018),与集安群大体相当,无明显的变质年龄记录。

区内古元古代花岗岩主要有 3 种类型,包括片麻状花岗岩、淡色花岗岩和巨斑状花岗岩。其中片麻状花岗岩主要分布于通化地区南部的清源、红石、钱桌沟等地(图 1b),岩性以黑云母钾长-二长花岗岩为主,暗色矿物含量较低(小于 10%,体积分数),中细粒结构,片麻状构造。野外,该期花岗岩与集安群 3 个组均有接触,但片麻理产状一致,很难判断之间的关系。特别是与蚂蚁河组变粒岩、浅粒岩常常在空间上相伴出露,彼此穿插,很容易混淆。早期 1/5 万《清河幅》地质图将其笼统称为混合岩,归入蚂蚁河组表壳岩之列。后来,在开展 1/25 万《通化幅》地质调查过程中,发现这部分岩石具有明显的花岗岩结构特征,2 个样品的锆石 SHRIMP 谐和年龄值集中在 2160 ± 14 Ma、 2145 ± 18 Ma,并不具备表壳岩的碎屑沉积特征(路孝平等, 2004)。因

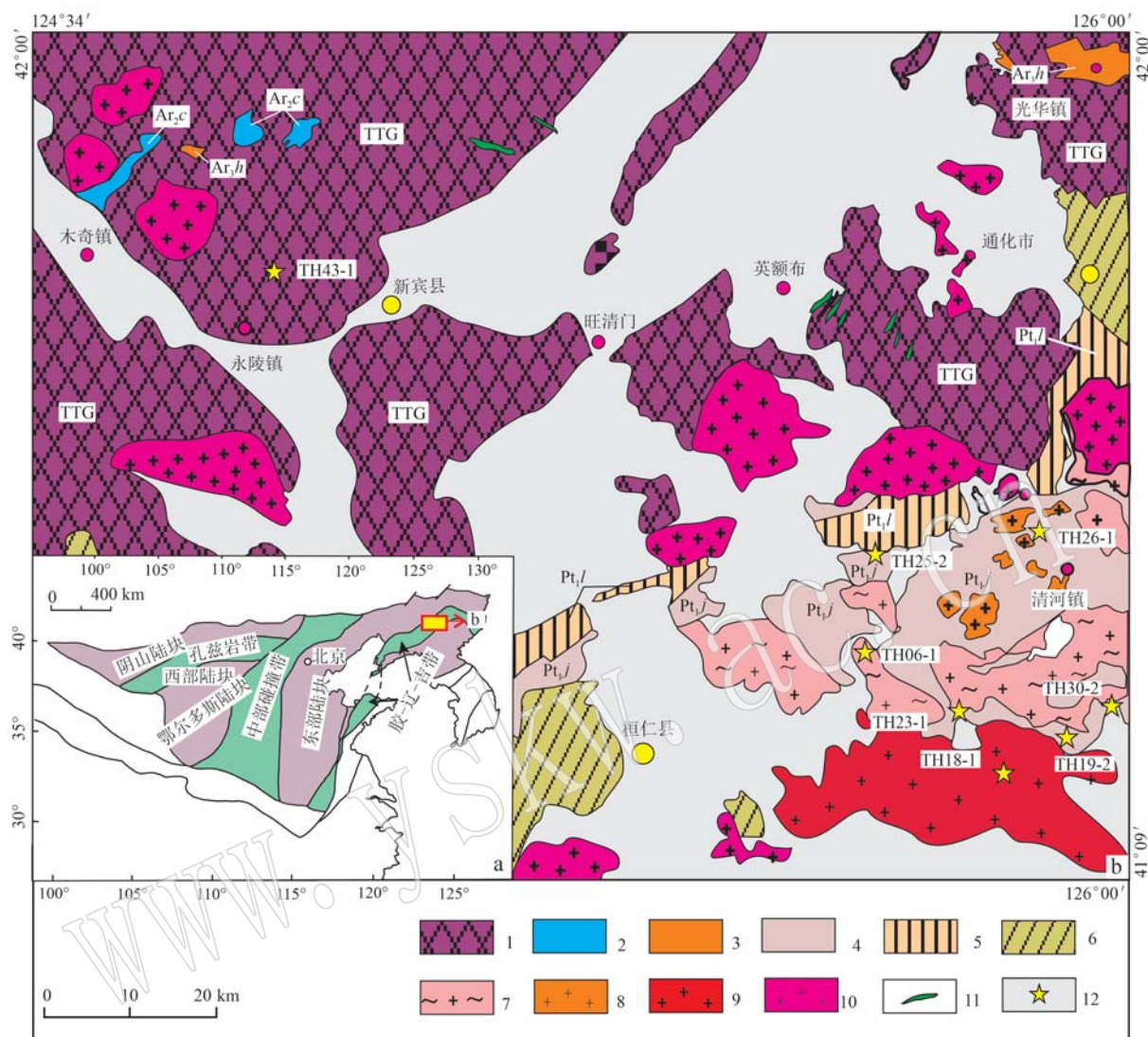


图1 华北克拉通构造分区简图(a, 据 Zhao *et al.*, 2005)与通化地区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton(a, after Zhao *et al.*, 2005) and sketch geological map of the Tonghua area(b)

- 1—太古宙 TTG; 2—中太古界茨沟组 (Ar₂c); 3—新太古界红透山组 (Ar₃h); 4—古元古界集安群 (Pt₁j); 5—古元古界老岭群 (Pt₁l);
6—新元古界地层 (Pt₃); 7—古元古代片麻状花岗岩; 8—古元古代淡色花岗岩; 9—古元古代斑状花岗岩; 10—中生代花岗岩;
11—古元古代基性岩墙; 12—取样位置

- 1—Archean TTG; 2—Mesoarchean Cigou Group (Ar₂c); 3—Neoproterozoic Hongtoushan Group (Ar₃h); 4—Paleoproterozoic Ji'an Group (Pt₁j);
5—Paleoproterozoic Laoling Group (Pt₁l); 6—Neoproterozoic Formation (Pt₃); 7—Paleoproterozoic gneissic granite; 8—Paleoproterozoic leucogranite; 9—Paleoproterozoic porphyritic granite; 10—Mesozoic granite; 11—Paleoproterozoic basic dyke; 12—sample location

此,推断其为变形改造的早期花岗质岩石,与辽宁南部的条痕状花岗岩(辽吉花岗岩)相当,为同一期构造事件的产物(Lu *et al.*, 2006)。淡色花岗岩主要分布于清河、腰营一带(图 1b)。岩性以淡色斜长花岗岩为主,少量为二长花岗岩。中细粒花岗变晶结构,块状构造。暗色矿物主要为黑云母,总量不超过 5%,斜长石含量较高(60%~70%),碱性长石

少量。见有该岩体侵入了集安群荒岔沟组变粒岩,应为古元古代晚期侵入体。同时,该岩体的矿物组成与荒岔沟组变粒岩熔出的浅色脉体极其相似,反映二者可能具有某种成因联系。斑状花岗岩是本区出露面积较大的花岗质岩体,主要分布于通化地区南部的双岔河、大东岔一带(图 1b)。岩性以巨斑状花岗岩为主,少量环斑状花岗岩。矿物组成中,巨

斑状矿物以微斜长石为主,少量为条纹长石。呈长板状半自形,粒径可达3~5 cm,含量达30%~50%。同时包含石榴石、堇青石、黑云母等富铝矿物。野外可见该岩体侵入了集安群大东岔组富铝片麻岩和早期片麻状花岗岩。该岩体锆石 U-Pb 年龄介于 1 870 ~1 840 Ma 之间,属古元古代晚期,很可能为区域富铝片麻岩深熔分异产物(路孝平等, 2005; Lu *et al.*, 2006; 秦亚等, 2014; 杨明春等, 2015; Liu *et al.*, 2017)。此外,区内还常见一些古元古代基性-超基性侵入体,主要是镁铁-超镁铁质岩墙,包括辉长辉绿岩和苏长辉长岩等。它们主要以北东方向展布于太古宙 TTG 片麻岩中(图 1b)。

2 样品产状与岩相学特征

2.1 夕线石榴堇青钾长/二长片麻岩(样品 TH19-2 与样品 TH30-2)

夕线石榴堇青钾长/二长片麻岩为集安群大东岔组的特征变质岩石,变质程度最高,蕴含了丰富的变质演化信息。典型的夕线石榴堇青钾长/二长片麻岩主要出露在清河镇南部大东岔村附近,常与石榴黑云片麻岩、黑云母变粒岩和石榴石花岗岩等相邻共生。由于风化作用,该类岩石野外普遍不够新鲜,表面呈棕黄色(图 2a),片麻理发育。石榴石颗粒粗大,含量较高,局部可见石榴石被长英质细脉包裹现象(图 2b),表明岩石曾经历部分熔融作用。依据钾长石含量高低,选取了 2 件该岩石样品开展锆石 U-Pb 定年工作。其中样品 TH19-2 取自台上镇附近(图 1b),岩性为夕线石榴堇青钾长片麻岩,其主要矿物组成为:夕线石(10%~15%)、石榴石(10%~15%)、黑云母(5%~10%)、堇青石(20%~25%)、钾长石(25%~30%)、斜长石(5%~10%)和石英(20%~25%),其它矿物如尖晶石、锆石和独居石等少量(<5%)。其中石榴石粒径一般都在 2 mm 以上,内含少量长石、石英、夕线石等矿物包体,常与堇青石、黑云母相邻共生(图 3a)。夕线石主要有 3 种形态:第 1 种呈细毛发状包裹于石榴石之中,第 2 种呈针柱状存在于堇青石和长石中,第 3 种呈粗大的板柱状存在于基质中(图 3a, 3c)。堇青石形态不规则,多数已蚀变成胶状云母(图 3a, 3c),仅少部分较为新鲜。岩石中黑云母含量不高,多为棕褐色,内部有较多细针状矿物(图 3a, 3c),可能为脱水分解形成的钛铁矿或金红石。岩石中的长石主要

为钾长石,且多为正条纹长石(图 3b),说明前期为三元长石,反映其变质峰期温度至少在 800℃ 以上。样品 TH30-2 取自大东岔村附近(图 1b),岩性为夕线石榴堇青二长片麻岩。其镜下岩相结构与矿物特征与样品 TH19-2 大体相同,只是钾长石含量稍低一些。

2.2 黑云透辉片麻岩(样品 TH25-2)

该样品取自集安市头道镇附近(图 1b),作为集安群荒岔沟组变粒岩的一部分产出,出露厚度约 3 ~5 m,局部可见花岗质脉体顺层侵入(图 2c)。该岩石主要矿物组成为:透辉石(10%~15%)、黑云母(10%~15%)、角闪石(5%~10%)、石英(15%~20%)、斜长石(40%~45%)。中细粒变晶结构,弱片麻状构造。其中透辉石呈短柱状(图 3d),粒径 0.5~1.0 mm 不等。黑云母呈棕褐色,角闪石呈黄绿色(图 3d)。值得注意的是,该样品中的角闪石都出现在单斜辉石和黑云母的边部(图 3d),基质中少见,反映为后期退变而成。

2.3 含墨黑云变粒岩(样品 TH26-1)

该样品同样取自集安市头道镇附近(图 1b),岩石出露规模较大(图 2d),是集安群荒岔沟组的主体岩石,局部可见透辉变粒岩/片麻岩、石榴黑云片麻岩等夹层。其主要矿物组成为:黑云母(15%~20%)、斜长石(40%~45%)、石英(30%~35%)、石墨(3%~5%)。细粒鳞片粒状变晶结构,弱片麻状/块状构造。其中黑云母和斜长石普遍遭受了不同程度的蚀变改造(图 3e)。

2.4 含墨大理岩(样品 TH23-1)

该岩石样品取自集安市花甸镇附近(图 1b),所属地层为集安群荒岔沟组。此处出露的主要岩石类型为含墨黑云变粒岩,含墨大理岩以 3~5 m 的夹层出现在变粒岩中(图 2e)。岩石主要矿物组成为:方解石($\geq 90\%$)、石墨(3%~5%)以及其它矿物(<5%)。中粗粒变晶结构,块状构造。在大颗粒方解石之间常见由于碎裂而重结晶的细粒方解石微晶(图 3f)。

2.5 片麻状花岗岩(样品 TH06-1)

该岩石样品取自通化县红石村附近(图 1b),外表呈浅粉色调,局部可见被晚期基性岩墙侵入(图 2f)。主要矿物组成为:黑云母(5%~10%)、石英(25%~30%)、斜长石(25%~30%)、碱长石(条纹长石)(40%~45%),局部可见钾长石交代早期大颗粒斜长石现象(图 3g)。中细粒花岗结构,片麻状构



图2 通化地区集安群代表性岩石野外图片

Fig. 2 Field pictures of representative rocks from the Ji'an Group in the Tonghua area

a—夕线石榴堇青钾长片麻岩; b—夕线石榴堇青二长片麻岩中的石榴石斑晶被长英质脉体包裹; c—黑云透辉片麻岩(暗色部分)与花岗质侵入体(浅色部分); d—含墨黑云变粒岩; e—含墨大理岩(灰色部分); f—片麻状花岗岩与基性岩墙(暗色部分); g—斑状花岗岩; h—斑状花岗岩中钾长石与石榴石斑晶; i—角闪斜长片麻岩

a—sillimanite garnet cordierite K-feldspar gneiss; b—garnet porphyry wrapped by felsic veins in sillimanite cordierite monzogneiss; c—biotite diopside gneiss (dark part) and granitic intrusion (light part); d—graphite bearing biotite leptynite; e—graphite bearing marble (gray part); f—gneissic granite and basic dyke (dark part); g—porphyritic Granite; h—K-feldspar and garnet phenocrysts in porphyritic granite; i—amphibole plagioclase gneiss

造。构造变形明显, 普遍波状消光。

2.6 斑状石榴石花岗岩(样品 TH18-1)

该岩石以发育石榴石和钾长石巨型斑晶为特征(图 2g, 2h), 没有明显变形改造痕迹, 并可见其侵入集安群变质表壳岩。样品 TH18-1 取自台上镇附近(图 1b), 其主要矿物组成为: 夕线石(5%~10%)、石榴石(5%~10%)、黑云母(10%~15%)、钾长石(30%~35%)、斜长石(15%~20%)和石英(20%~25%), 中粗粒斑状结构, 块状构造。其中石榴石呈粒径 1~10 mm 不等的斑晶, 夕线石多呈板柱状, 与条纹长石等交生(图 3h), 黑云母呈棕色鳞片。总体来看, 该类岩石中暗色矿物分布极不均匀, 有时石榴石、夕线石、堇青石完全不见, 而过渡

为似斑状钾长或二长花岗岩。

2.7 太古宙 TTG 片麻岩(样品 TH43-1)

该 TTG 片麻岩样品(TH43-1)取自新宾县永陵镇附近(图 1b), 岩性为角闪斜长片麻岩, 外表呈青灰色(图 2i), 其矿物组成比较简单, 主要由角闪石(35%~40%)和斜长石(60%~65%)构成(图 3i), 其他矿物不足 1%。中细粒粒状变晶结构, 片麻状构造。

3 分析方法

LA-ICP MS 锆石 U-Pb 原位定年在中国地质大学(北京)地质实验中心元素地球化学实验室进行。

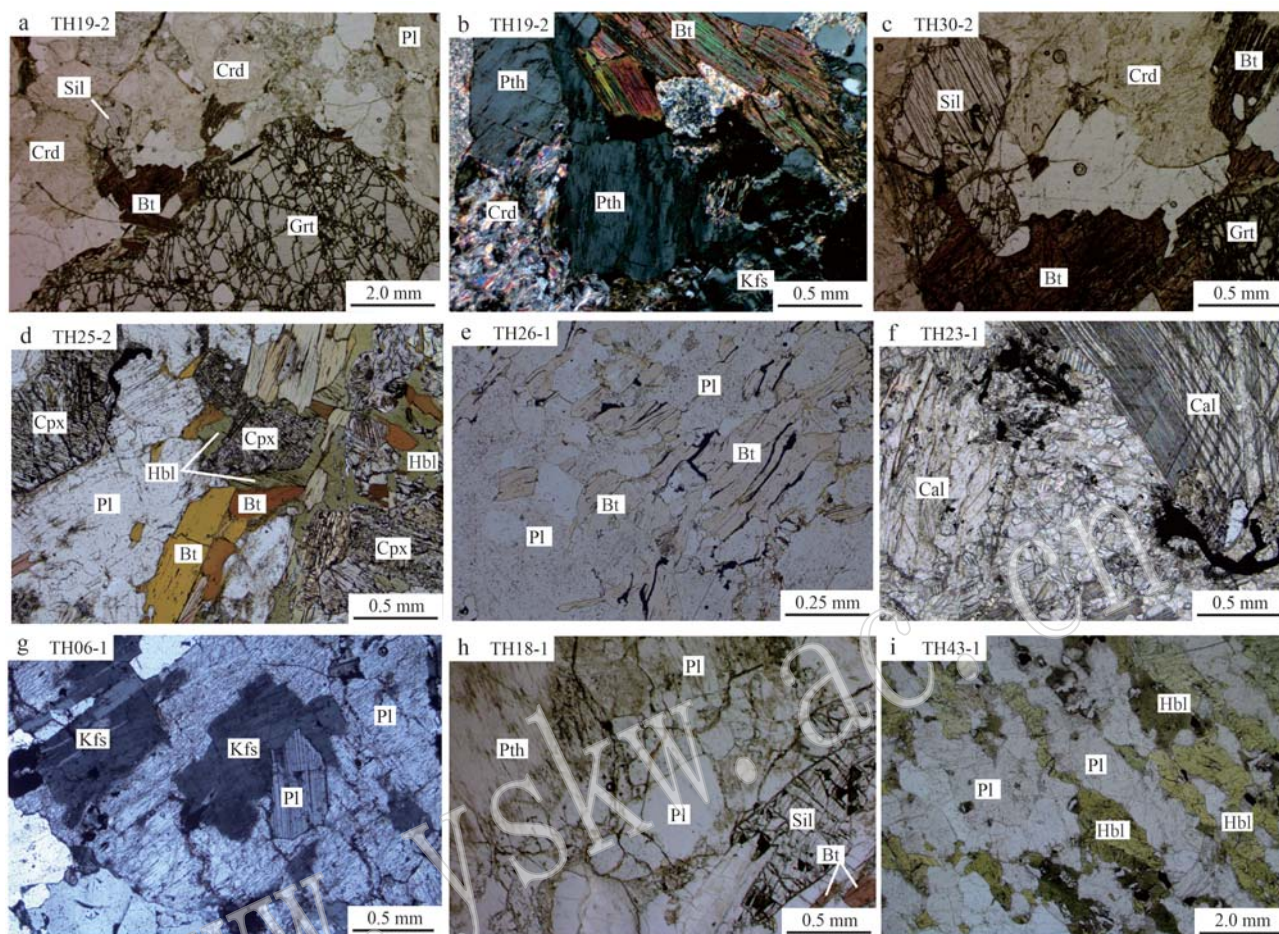


图 3 通化地区集安群代表性岩石岩相图片

Fig. 3 Photomicrographs of representative rocks from the Ji'an Group in the Tonghua area

a—夕线石榴堇青钾长片麻岩(-); b—夕线石榴堇青钾长片麻岩(+); c—夕线石榴堇青二长片麻岩(-); d—黑云透辉片麻岩(-); e—含墨黑云变粒岩(-); f—含墨大理岩(-); g—片麻状花岗岩(+); h—斑状花岗岩(-); i—角闪斜长片麻岩(-); 详细说明见正文, 矿物代号参照沈其韩(2009): Grt—石榴子石; Crd—堇青石; Sil—夕线石; Bt—黑云母; Cpx—单斜辉石; Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Pth—条纹长石; Cal—方解石; Qtz—石英

a—sillimanite garnet cordierite K-feldspar gneiss(-); b—sillimanite garnet cordierite K-feldspar gneiss(+); c—sillimanite garnet cordierite monzonite(-); d—biotite diopside gneiss(-); e—graphite bearing biotite leptynite(-); f—graphite bearing marble(-); g—gneissic granite(+); h—porphyritic granite(-); i—amphibole plagioclase gneiss(-); detailed description in text; mineral abbreviations after Shen Qihan(2009): Grt—garnet; Crd—cordierite; Sil—sillimanite; Bt—biotite; Cpx—clinopyroxene; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Pth—perthite; Cal—calcite; Qtz—quartz

分析仪器采用由美国 New Wave Research 公司生产的激光剥蚀进样系统(UP193SS)和美国 AGLENT 科技有限公司生产的 Agilent 7500 型四级杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子质谱仪。激光频率 10 Hz, 波长 193 nm, 束斑直径 36 μm , 激光预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5 s 和 45 s, U、Th、Pb 元素积分时间为 20 ms, 其它元素积分时间为 15 ms。年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正, 以 TEM 为监控盲样。元素含量以国际标样

NIST612 为外标, Si 为内标计算。普通铅校正与 Andersen(2002)方法相同, 数据采用 Glitter 4 程序进行处理。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室的 193 nm 准分子激光剥蚀系统(NewWave)和多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)完成。仪器运行条件、Lu-Hf 同位素分析方法见吴福元等(2007)和耿建珍等(2011)。静态信号采集模式, 激光剥蚀时间 30 s, 积分

时间 0.131 s。激光束斑直径 50 μm , 能量密度 10~11 J/ cm^2 , 频率 8 Hz。采用 GJ-1 和 Plesvice 作为外标。

4 锆石 CL 图像与 U-Pb 定年结果

4.1 夕线石榴堇青钾长片麻岩 (样品 TH19-2)

该样品中的锆石以短柱状为主, 粒径 50~150 μm 之间, 长宽比基本在 2~3 之间。阴极发光图像 (图 4b) 显示锆石主要存在两种类型: 一种为发育核

边结构的复合锆石, 其特点是核部保留碎屑残核, 具有一定的环带结构, 外围发育黑色的增生边; 另一种锆石的阴极荧光基本为黑色, 无环带结构, 其特点与复合锆石的外围增生边类似, 可能为熔体结晶产物。该样品共分析了 64 组定年数据 (表 1)。结果显示, 锆石总体呈现 U 高、Th 低的特点, Th/U 值除 4 颗锆石高于 0.1 之外, 其余 60 颗全部低于 0.1, 表明该样品中的锆石基本都是变质改造或变质结晶锆石。锆石表观年龄基本都在 1 950~1 850 Ma 之

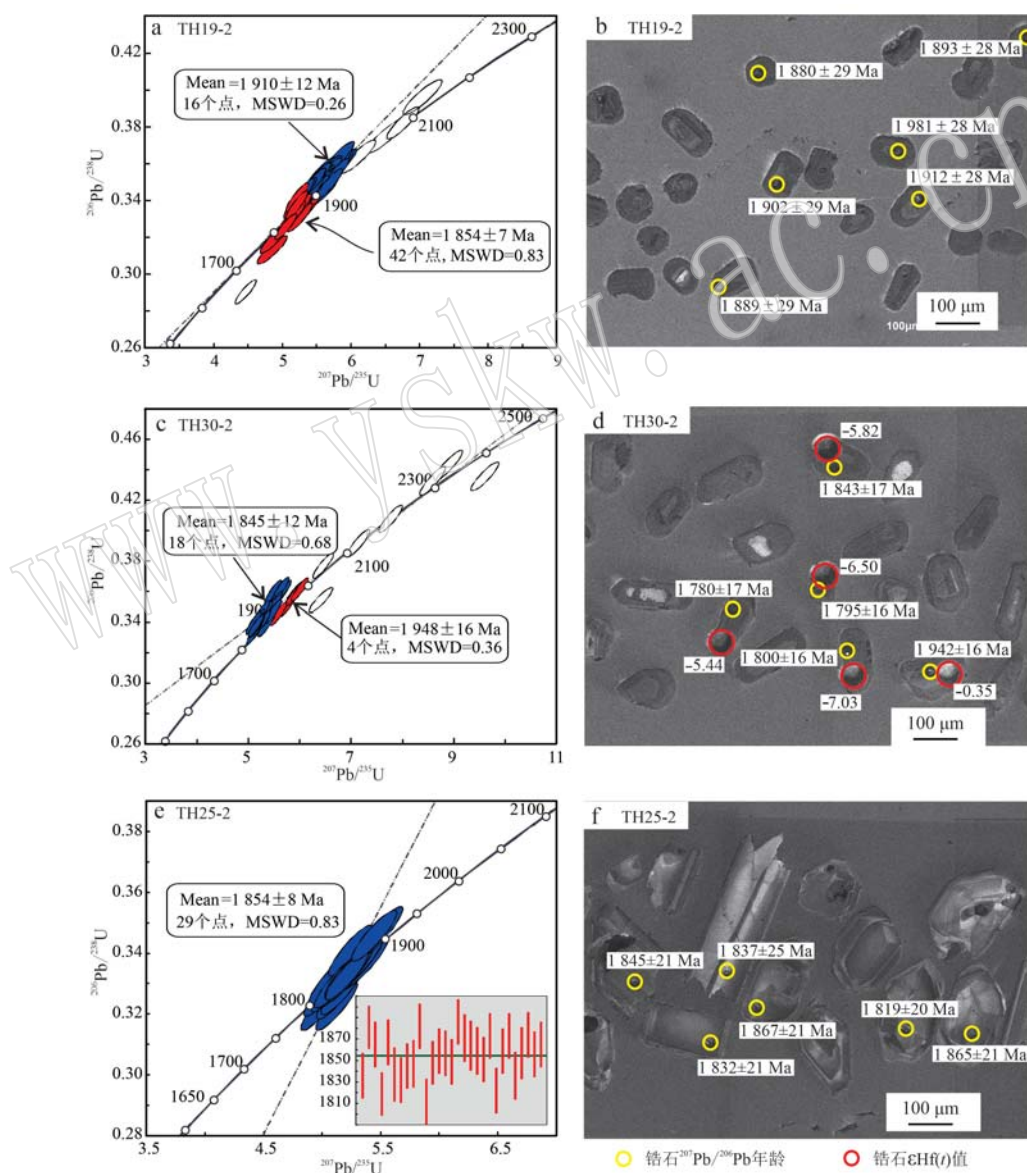


图 4 集安群夕线石榴堇青片麻岩 (TH19-2 与 TH30-2) 与黑云透辉片麻岩 (TH25-2) 锆石 U-Pb 谐和图与阴极发光图像

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams and CL images of zircons from sillimanite garnet cordierite gneiss (TH19-2 and TH30-2) and biotite diopside gneiss (TH25-2) in the Ji'an Group

间, 锆石核部最老年龄为 $2\,085\pm26\text{ Ma}$ (点 48)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 4a), 几乎所有锆石数据都在谐和线上或其附近, 表明数据可信度高。除了 4 个年龄大于 2.0 Ga 的碎屑锆石外, 其余数据点主要集中在 2 个年龄附近, 一组是在 1.9 Ga 左右, 有 16 个数据点, 加权平均年龄为 $1\,910\pm12\text{ Ma}$; 另一组是在 1.85 Ga 左右, 42 个数据点, 加权平均年龄为 $1\,854\pm7\text{ Ma}$ 。值得注意的是, 所采集两组年龄的锆石形态与阴极发光图像并无明显区别。

4.2 夕线石榴堇青二长片麻岩 (样品 TH30-2)

该样品中的锆石以柱状为主, 粒径 $50\sim150\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 长宽比基本在 $2\sim3$ 之间, 有些发育较完整的晶形。阴极发光图像 (图 4d) 显示, 该样品中的锆石与样品 TH19-2 类似, 也主要存在两种类型: 一种为发育核边结构的复合锆石, 其特点是核部保留碎屑残核 (颜色较亮), 具有一定的环带结构, 外围发育黑色的增生边; 另一种锆石的阴极荧光基本为黑色, 无环带结构。该样品共分析了 32 颗锆石的微区成分 (表 1), 结果显示锆石总体呈现 U 高、Th 低的特点, Th/U 值绝大多数低于 0.1, 显示变质改造或变质结晶锆石特点。最老核部年龄为 $2\,454\pm42\text{ Ma}$ (点 15)。采自锆石增生边部和 U 含量较高的锆石幔部数据给出的年龄值普遍在 $1\,950\sim1\,850\text{ Ma}$ 之间。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 4c), 除 2 个数据点不在谐和线上外, 其它数据都在谐和线上或其附近, 并主要集中在 2 个年龄附近, 一组是在 1.95 Ga 左右, 有 4 个数据点, 加权平均年龄为 $1\,948\pm16\text{ Ma}$; 另一组是在 1.85 Ga 左右, 18 个数据点, 加权平均年龄为 $1\,845\pm12\text{ Ma}$ 。

4.3 黑云透辉片麻岩 (样品 TH25-2)

该样品中的锆石以规则柱状为主, 普遍保持较完好的晶形 (图 4f), 长宽比在 $2\sim3$ 之间, 粒径在 $150\sim400\text{ }\mu\text{m}$ 之间。少数成近等轴状, 但边缘棱角仍很清晰, 显示未经搬运过程。阴极发光图像显示, 其内部成黑白条带状韵律环带 (图 4f), 类似中基性侵入岩的锆石形态特征。该样品共测试了 29 颗锆石颗粒, 其数据见表 1。结果显示, 该样品锆石的 Th 含量介于 $113.38\times10^{-6}\sim728.44\times10^{-6}$ 之间, U 含量介于 $239.66\times10^{-6}\sim1\,027.73\times10^{-6}$ 之间, Th/U 值介于 $0.20\sim0.85$ 之间。表观年龄则集中在 $1\,886\sim1\,812\text{ Ma}$ 之间。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 4e), 所有数据点都位于谐和线上, 并集中在 $1\,850\text{ Ma}$ 附近, 加权平均年龄为 $1\,854\pm8\text{ Ma}$, 可能代表该

岩石遭受变质改造的年龄。

4.4 含墨黑云变粒岩 (样品 TH26-1)

该样品中的锆石整体以浑圆状为主, 粒径大小不一, 多数不足 $100\text{ }\mu\text{m}$, 长宽比在 $1\sim4$ 之间。阴极发光图像显示, 其内部结构多样, 有的发育规则韵律环带, 有的呈条带状或云雾状 (图 5b), 显示来源多样。个别颗粒外围发育暗色增生边, 可能为变质成因 (图 5b)。该样品共分析了 26 颗锆石颗粒的微区成分 (表 1)。结果显示, 该样品锆石的 Th 含量介于 $29.95\times10^{-6}\sim368.97\times10^{-6}$ 之间, U 含量介于 $78.93\times10^{-6}\sim539.82\times10^{-6}$ 之间, Pb 含量介于 $49.82\times10^{-6}\sim233.36\times10^{-6}$ 之间, Th/U 值介于 $0.33\sim1.39$ 之间, 表观年龄介于 $2\,547\sim1\,886\text{ Ma}$ 之间。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 5a), 绝大多数锆石数据都偏离了谐和线, 但是仍有一部分点位于谐和线上或其附近。主要集中在 2 个年龄附近, 一组是在 2.5 Ga 左右, 有 8 个数据点, 加权平均年龄为 $2\,522\pm21\text{ Ma}$; 另一组是在 1.9 Ga 左右, 2 个数据点, 加权平均年龄为 $1\,895\pm45\text{ Ma}$ 。从锆石特征与年龄的关系看, 岩石中晶形保持较好, 阴极发光呈暗色的锆石所得年龄值偏低, 其中位于谐和线上的最小年龄 $1\,886\pm32\text{ Ma}$, 表明其结晶于变质作用晚期。总体来看, 该岩石中的碎屑锆石主要形成于新太古代, 新生锆石则形成于古元古代末期。

4.5 含墨大理岩 (样品 TH23-1)

该样品中的锆石形态不规则, 有浑圆状、椭球状和不规则粒状, 也有规则的柱状晶体, 反映来源比较复杂。大小一般在 $100\sim200\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 表面经常有溶蚀的裂痕。锆石阴极发光图像显示, 其内部多发育不规则的条带状或云雾状环带 (图 5d), 整体发光性较差, 呈现变质成因锆石特征。该样品共分析了 32 颗锆石颗粒。结果 (表 1) 显示, 该样品锆石的 Th 含量介于 $10.23\times10^{-6}\sim774.01\times10^{-6}$ 之间, U 含量介于 $489.28\times10^{-6}\sim2\,064.42\times10^{-6}$ 之间, 呈现明显 U 高、Th 低的特点。Th/U 值介于 $0.01\sim0.37$ 之间, 其中只有 6 个点的数值大于 0.1, 表明绝大多数锆石为变质成因。表观年龄最大数值为 $1\,939\pm18\text{ Ma}$, 最小年龄为 $1\,674\pm60\text{ Ma}$ 。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 5c), 大多数数据点都位于谐和线上或其附近, 并集中在 1.9 Ga 附近, 27 个点的加权平均年龄为 $1\,905\pm7\text{ Ma}$, 很可能反映的是该岩石遭受变质作用强烈改造的年龄。此外, 有几个数据点在 $1\,800\text{ Ma}$ 附近, 其中 1 个位于谐和线上的数据点年龄为 $1\,812\pm18\text{ Ma}$ 。

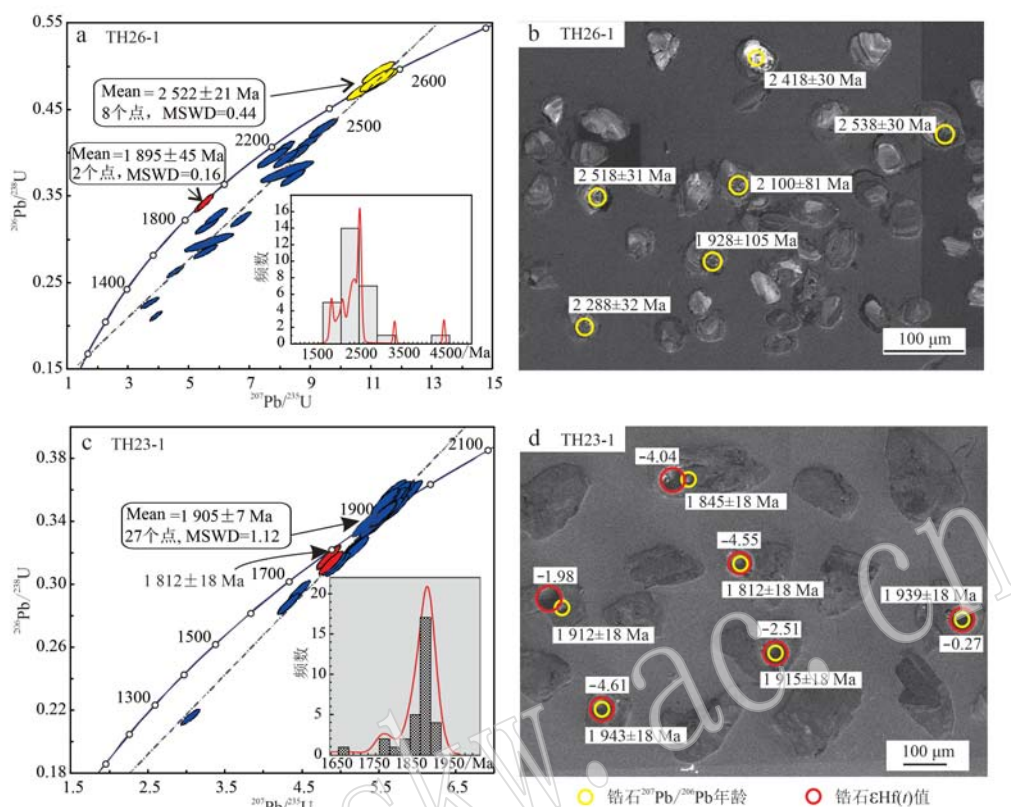


图5 集安群含墨黑云变粒岩 (TH26-1) 与含墨大理岩 (TH23-1) 锆石 U-Pb 谐和图与阴极发光图像
Fig. 5 U-Pb concordia diagrams and CL images of zircons from graphite bearing biotite leptynite (TH26-1) and graphite bearing marble (TH23-1) in the Ji'an Group

4.6 片麻状花岗岩 (样品 TH06-1)

该样品中的锆石普遍较大, 以柱状为主, 普遍保持较好晶形 (图 6b), 粒度介于 150~350 μm 之间, 长宽比在 1~3 之间, 内部含有磷灰石等矿物包体, 属典型岩浆锆石。该样品共分析了 32 颗锆石颗粒。结果 (表 1) 显示, 该样品锆石的 Th 含量介于 66.90×10^{-6} ~ 996.38×10^{-6} 之间, U 含量介于 168.60×10^{-6} ~ 1272.76×10^{-6} 之间, Th/U 值介于 0.13~0.93 之间。表观年龄最大值为 2155 ± 14 Ma, 最小年龄为 1410 ± 17 Ma。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上 (图 6a), 大多数数据点都偏离了谐和线, 表明存在较严重的 Pb 丢失。但仍有一些数据点位于谐和线上或其附近, 并集中在 2.1 Ga 附近, 11 个点的加权平均年龄为 2104 ± 18 Ma。

4.7 斑状花岗岩 (TH18-1)

该样品中的锆石以柱状为主, 较为自形, 粒度介于 100~350 μm 之间, 长宽比多在 2~4 之间, 少数细长柱状可达 5 以上。阴极发光图像显示内部发育不规则的韵律环带 (图 6d), 有条带状、有环状,

也有条带状内核被规则环带包裹, 显示晚期结晶特征。该样品共测试了 33 颗锆石颗粒, 其数据列于表 1。结果显示, 该样品锆石的 Th 含量介于 24.90×10^{-6} ~ 157.60×10^{-6} 之间, U 含量介于 135.30×10^{-6} ~ 624.10×10^{-6} 之间, Th/U 值介于 0.07~0.58 之间, 表观年龄则集中在 1935~1841 Ma 之间, 只有一个数据点超过了 2.0 Ga。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上, 所有数据点都位于谐和线上 (图 6c), 其中最老一个点的年龄为 2159 ± 22 Ma, 很可能为继承或捕获锆石。其余数据点都集中在 1900~1850 Ma 之间, 32 个点的加权平均年龄为 1888 ± 8 Ma。

4.8 角闪斜长片麻岩 (样品 TH43-1)

该样品中的锆石以柱状和椭球状为主 (图 6f), 粒度普遍较大, 一般都在 100~300 μm 之间, 长宽比在 2~4 之间。阴极发光图像显示, 内部普遍发育韵律环带 (图 6f), 环带样式多样, 有标准的同心环状、不规则的块状, 还有一些呈云雾状, 个别颗粒外部可见白色的增生边, 但往往很窄 (小于 5 μm)。对该样品中的 29 颗锆石进行了分析, 其数据列于表 1。

表 1 代表性岩石锆石 LA-ICP MS 分析结果
Table 1 LA-ICP MS zircon analytical data for representative rocks

样品点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				表观年龄/Ma					
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
TH19-2-01	31.45	584.66	204.88	0.05	0.112 0	0.002 2	5.214 4	0.108 1	0.337 6	0.005 0	1.832	18	1.875	24
TH19-2-02	27.08	854.33	305.59	0.03	0.112 5	0.002 2	5.376 0	0.111 3	0.346 5	0.005 2	1.840	18	1.881	25
TH19-2-03	27.07	642.75	216.47	0.04	0.112 5	0.002 2	5.053 4	0.106 3	0.325 6	0.004 9	1.841	19	1.828	24
TH19-2-04	32.43	741.93	258.33	0.04	0.113 5	0.002 2	5.261 6	0.110 2	0.336 1	0.005 0	1.856	18	1.863	24
TH19-2-05	32.01	712.15	257.74	0.04	0.113 3	0.002 2	5.460 4	0.114 7	0.349 6	0.005 2	1.852	18	1.894	25
TH19-2-06	24.63	677.78	240.45	0.04	0.111 7	0.002 2	5.304 6	0.112 1	0.344 5	0.005 2	1.827	19	1.870	25
TH19-2-07	20.64	606.50	213.22	0.03	0.110 8	0.002 2	5.219 9	0.110 9	0.341 7	0.005 1	1.812	19	1.856	25
TH19-2-08	20.89	648.07	230.58	0.03	0.114 1	0.002 3	5.430 0	0.116 0	0.345 0	0.005 2	1.866	19	1.890	25
TH19-2-09	38.28	987.74	342.48	0.04	0.113 1	0.002 3	5.179 7	0.110 5	0.332 2	0.005 0	1.849	19	1.849	24
TH19-2-10	57.11	544.12	203.94	0.10	0.118 2	0.002 4	5.780 8	0.125 1	0.354 8	0.005 4	1.928	19	1.944	26
TH19-2-11	26.65	748.53	268.88	0.04	0.113 4	0.002 3	5.462 3	0.119 0	0.349 4	0.005 3	1.854	19	1.895	25
TH19-2-12	20.22	650.81	229.88	0.03	0.112 0	0.002 3	5.321 2	0.116 6	0.344 5	0.005 2	1.832	20	1.872	25
TH19-2-13	281.50	1 017.83	387.68	0.28	0.118 2	0.002 4	5.695 4	0.124 6	0.349 4	0.005 3	1.929	19	1.931	25
TH19-2-14	39.10	967.74	288.22	0.04	0.111 7	0.002 3	4.469 3	0.098 9	0.290 2	0.004 4	1.827	20	1.725	22
TH19-2-15	22.90	554.34	194.34	0.04	0.113 9	0.002 4	5.354 8	0.119 5	0.340 8	0.005 2	1.863	20	1.878	25
TH19-2-16	25.94	731.53	258.56	0.04	0.112 4	0.002 4	5.346 7	0.118 9	0.344 8	0.005 2	1.839	20	1.876	25
TH19-2-17	25.15	726.10	251.19	0.03	0.111 5	0.002 4	5.194 4	0.116 4	0.337 9	0.005 1	1.824	20	1.852	25
TH19-2-18	29.47	645.65	218.00	0.05	0.112 2	0.002 4	5.099 1	0.114 7	0.329 4	0.005 0	1.836	20	1.836	24
TH19-2-19	28.03	814.13	293.54	0.03	0.113 7	0.002 4	5.520 5	0.124 4	0.352 2	0.005 4	1.859	20	1.904	26
TH19-2-20	102.30	425.91	179.54	0.24	0.128 3	0.002 8	6.758 9	0.154 7	0.382 0	0.005 9	2.075	20	2.080	27
TH19-2-21	24.09	778.61	277.28	0.03	0.113 1	0.002 5	5.440 7	0.125 0	0.349 0	0.005 3	1.849	21	1.891	26
TH19-2-22	25.08	770.75	272.70	0.03	0.115 2	0.002 5	5.496 2	0.127 7	0.345 9	0.005 3	1.884	21	1.900	25
TH19-2-23	26.76	602.27	213.69	0.04	0.112 8	0.002 5	5.390 6	0.125 8	0.346 7	0.005 3	1.844	21	1.883	26
TH19-2-24	32.16	750.47	257.71	0.04	0.115 4	0.002 6	5.260 1	0.123 2	0.330 6	0.005 1	1.886	21	1.862	25
TH19-2-25	23.37	742.32	260.16	0.03	0.113 4	0.002 5	5.375 2	0.126 3	0.343 8	0.005 3	1.854	22	1.881	25
TH19-2-26	23.89	659.83	235.16	0.04	0.115 7	0.002 6	5.558 5	0.131 6	0.348 3	0.005 4	1.891	22	1.910	26
TH19-2-27	24.86	706.76	251.11	0.04	0.113 1	0.002 6	5.441 5	0.129 0	0.348 9	0.005 4	1.850	22	1.891	26
TH19-2-28	33.68	663.33	238.28	0.05	0.114 2	0.002 6	5.530 3	0.132 4	0.351 3	0.005 5	1.867	22	1.905	26
TH19-2-29	23.36	690.75	247.95	0.03	0.113 5	0.002 6	5.518 9	0.132 3	0.352 7	0.005 5	1.856	22	1.904	26
TH19-2-30	22.02	656.70	224.26	0.03	0.113 9	0.002 6	5.254 1	0.126 9	0.334 5	0.005 2	1.863	23	1.861	25
TH19-2-31	20.56	691.71	244.84	0.03	0.114 3	0.002 7	5.491 0	0.134 8	0.348 5	0.005 5	1.868	23	1.899	26
TH19-2-32	23.36	731.08	259.27	0.03	0.115 3	0.002 7	5.546 6	0.136 2	0.348 9	0.005 5	1.884	23	1.908	26

续表 1-1
Continued Table 1-1

样品点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				表观年龄/Ma							
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$					
					1σ		1σ		1σ		1σ					
TH19-2-33	94.88	670.03	249.15	0.14	0.115 5	0.002 7	5.653 2	0.139 8	0.355 0	0.005 6	1.888	23	1.924	21	1.958	27
TH19-2-34	33.59	835.72	298.49	0.04	0.114 8	0.002 7	5.556 1	0.137 8	0.350 9	0.005 5	1.877	23	1.909	21	1.939	26
TH19-2-35	20.28	645.82	228.54	0.03	0.113 2	0.002 7	5.452 1	0.136 2	0.349 3	0.005 5	1.851	24	1.893	21	1.931	26
TH19-2-36	30.40	486.06	180.73	0.06	0.116 4	0.002 8	5.832 4	0.147 6	0.363 4	0.005 8	1.902	24	1.951	22	1.998	27
TH19-2-37	42.98	737.34	259.75	0.06	0.116 8	0.002 8	5.537 4	0.139 9	0.343 8	0.005 4	1.908	24	1.906	22	1.905	26
TH19-2-38	30.03	888.37	301.90	0.03	0.111 0	0.003 5	4.882 7	0.131 8	0.319 0	0.005 0	1.816	58	1.799	23	1.785	24
TH19-2-39	25.15	709.18	245.56	0.04	0.113 8	0.002 8	5.367 4	0.137 3	0.342 1	0.005 4	1.860	24	1.880	22	1.897	26
TH19-2-40	19.07	648.02	225.41	0.03	0.116 0	0.002 9	5.497 0	0.141 4	0.343 6	0.005 5	1.896	25	1.900	22	1.904	26
TH19-2-41	32.48	601.64	216.58	0.05	0.113 7	0.002 9	5.568 1	0.147 2	0.355 0	0.005 7	1.860	26	1.911	23	1.959	27
TH19-2-42	26.40	791.46	279.18	0.03	0.113 6	0.002 9	5.465 9	0.143 4	0.349 0	0.005 6	1.858	25	1.895	23	1.930	27
TH19-2-43	18.84	630.84	226.32	0.03	0.115 0	0.002 9	5.639 9	0.149 4	0.355 5	0.005 7	1.881	26	1.922	23	1.961	27
TH19-2-44	23.40	551.85	200.38	0.04	0.116 8	0.003 0	5.773 5	0.155 0	0.358 6	0.005 8	1.907	26	1.942	23	1.976	28
TH19-2-45	24.80	660.87	233.55	0.04	0.117 0	0.003 0	5.633 5	0.150 8	0.349 3	0.005 6	1.910	26	1.921	23	1.931	27
TH19-2-46	17.50	567.42	199.73	0.03	0.113 6	0.003 0	5.478 0	0.147 8	0.349 6	0.005 7	1.858	26	1.897	23	1.933	27
TH19-2-47	22.22	805.14	286.56	0.03	0.116 9	0.003 0	5.687 9	0.153 2	0.352 9	0.005 7	1.909	26	1.930	23	1.948	27
TH19-2-48	589.39	1 036.03	475.03	0.57	0.129 0	0.003 3	7.0462	0.190 1	0.396 0	0.006 4	2.085	26	2 117	24	2 151	29
TH19-2-49	21.73	564.08	197.99	0.04	0.113 9	0.003 0	5.472 5	0.150 7	0.348 6	0.005 7	1.862	27	1.896	24	1.928	27
TH19-2-50	15.33	622.10	214.22	0.02	0.116 2	0.003 1	5.490 4	0.150 8	0.342 7	0.005 6	1.898	27	1.899	24	1.900	27
TH19-2-51	25.77	622.26	224.93	0.04	0.117 3	0.003 2	5.792 9	0.161 6	0.358 2	0.005 9	1.915	28	1.945	24	1.974	28
TH19-2-52	40.67	525.49	179.41	0.08	0.115 3	0.003 1	5.332 5	0.149 5	0.335 3	0.005 5	1.885	28	1.874	24	1.864	26
TH19-2-53	85.17	571.71	224.82	0.15	0.126 1	0.003 4	6.517 5	0.183 1	0.374 9	0.006 1	2.044	27	2.048	25	2.052	29
TH19-2-54	18.75	648.80	226.98	0.03	0.115 9	0.003 2	5.575 1	0.157 4	0.349 0	0.005 7	1.893	28	1.912	24	1.930	27
TH19-2-55	40.56	459.39	164.68	0.09	0.117 1	0.003 2	5.684 6	0.161 8	0.352 0	0.005 8	1.912	28	1.929	25	1.944	28
TH19-2-56	37.94	558.19	206.25	0.07	0.121 7	0.003 4	6.101 1	0.174 1	0.363 6	0.006 0	1.981	28	1.990	25	1.999	28
TH19-2-57	23.10	677.24	235.98	0.03	0.115 0	0.003 2	5.517 0	0.158 5	0.347 8	0.005 7	1.880	29	1.903	25	1.924	27
TH19-2-58	31.84	568.44	200.29	0.06	0.116 4	0.003 2	5.612 0	0.161 9	0.349 6	0.005 8	1.902	29	1.918	25	1.933	28
TH19-2-59	23.74	726.44	248.67	0.03	0.115 6	0.003 2	5.452 7	0.157 9	0.342 0	0.005 6	1.889	29	1.893	25	1.896	27
TH19-2-60	20.45	671.37	230.83	0.03	0.115 5	0.003 3	5.478 5	0.159 7	0.343 8	0.005 7	1.888	29	1.897	25	1.905	27
TH19-2-61	32.89	805.40	276.97	0.04	0.117 2	0.003 4	5.541 9	0.164 1	0.343 0	0.005 7	1.913	30	1.907	25	1.901	27
TH19-2-62	45.84	795.82	288.24	0.06	0.117 7	0.003 4	5.824 9	0.173 3	0.358 9	0.006 0	1.921	30	1.950	26	1.977	28
TH19-2-63	25.87	810.85	282.81	0.03	0.114 4	0.003 3	5.524 2	0.165 4	0.350 0	0.005 9	1.871	31	1.904	26	1.935	28
TH19-2-64	34.88	936.30	293.70	0.04	0.112 5	0.003 8	4.856 0	0.141 4	0.313 1	0.005 1	1.840	62	1.795	25	1.756	25
TH30-2-01	46.88	501.11	193.87	0.09	0.119 4	0.002 1	5.904 0	0.111 6	0.358 3	0.005 2	1.947	16	1.962	16	1.974	25
TH30-2-02	16.87	507.32	180.15	0.03	0.110 4	0.002 0	5.148 2	0.098 1	0.338 0	0.004 9	1.805	16	1.844	16	1.877	24
TH30-2-03	20.63	550.17	195.13	0.04	0.110 7	0.002 0	5.155 7	0.097 8	0.337 5	0.004 9	1.811	16	1.845	16	1.874	24

续表 1-2

Continued Table 1-2

样品点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						表观年龄/Ma								
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	1 σ
TH30-2-04	19.71	516.49	183.55	0.04	0.110 6	0.002 0	5.163 0	0.098 4	0.338 1	0.004 9	1.810	16	1 847	16	1 878	24			
TH30-2-05	282.26	1254.18	504.18	0.23	0.120 4	0.002 1	5.999 0	0.112 5	0.361 1	0.005 2	1.962	16	1 976	16	1 987	25			
TH30-2-06	57.34	585.29	220.51	0.10	0.113 2	0.002 0	5.481 8	0.105 2	0.351 0	0.005 1	1.851	16	1 898	16	1 939	24			
TH30-2-07	104.88	183.87	96.70	0.57	0.1437	0.002 7	8.583 9	0.168 5	0.432 9	0.006 4	2.272	16	2 295	18	2 319	29			
TH30-2-08	271.59	463.19	200.25	0.59	0.119 0	0.002 1	5.886 3	0.113 5	0.358 3	0.005 2	1.942	16	959	17	1 974	25			
TH30-2-09	33.54	590.12	210.55	0.06	0.110 0	0.002 0	5.139 8	0.098 7	0.338 5	0.004 9	1.800	16	1 843	16	1 879	24			
TH30-2-10	20.80	519.79	185.60	0.04	0.109 7	0.002 0	5.162 4	0.099 6	0.340 9	0.005 0	1.795	16	1 846	16	1 891	24			
TH30-2-11	29.02	586.51	223.23	0.05	0.112 7	0.002 1	5.619 6	0.109 5	0.361 5	0.005 3	1.843	17	1 919	17	1 989	25			
TH30-2-12	36.84	652.23	232.22	0.06	0.108 9	0.002 0	5.098 4	0.098 4	0.339 5	0.005 0	1.780	17	1 836	16	1 884	24			
TH30-2-13	44.56	570.75	208.57	0.08	0.111 3	0.002 0	5.312 3	0.103 4	0.345 9	0.005 1	1.821	17	1 871	17	1 915	24			
TH30-2-14	40.97	437.55	162.15	0.09	0.114 4	0.002 1	5.481 6	0.107 4	0.347 2	0.005 1	1.871	17	1 898	17	1 921	24			
TH30-2-15	44.18	435.70	212.37	0.10	0.159 8	0.003 9	9.599 0	0.185 0	0.435 6	0.006 3	2.454	42	2 397	18	2 331	28			
TH30-2-16	148.17	208.74	116.37	0.71	0.145 4	0.002 7	8.885 1	0.177 4	0.442 9	0.006 6	2.292	16	2 326	18	2 364	29			
TH30-2-17	35.72	412.74	154.26	0.09	0.117 0	0.002 1	5.576 8	0.109 3	0.345 4	0.005 1	1.911	17	1 913	17	1 913	24			
TH30-2-18	37.91	254.78	98.54	0.15	0.114 0	0.002 2	5.654 5	0.114 7	0.359 5	0.005 4	1.864	17	1 924	18	1 980	25			
TH30-2-19	122.18	302.19	144.08	0.40	0.138 0	0.002 6	7.767 2	0.155 0	0.408 0	0.006 1	2.202	16	2 204	18	2 206	28			
TH30-2-20	41.41	718.48	260.04	0.06	0.110 1	0.002 0	5.256 6	0.103 6	0.346 2	0.005 1	1.801	17	1 862	17	1 916	24			
TH30-2-21	68.58	367.34	141.82	0.19	0.119 0	0.002 2	5.771 1	0.115 7	0.351 7	0.005 2	1.941	17	1 942	17	1 942	25			
TH30-2-22	28.47	503.59	179.42	0.06	0.112 3	0.002 1	5.269 2	0.105 5	0.340 1	0.005 0	1.837	17	1 864	17	1 887	24			
TH30-2-23	20.63	504.41	182.59	0.04	0.112 5	0.002 1	5.392 1	0.108 4	0.347 4	0.005 1	1.840	17	1 884	17	1 922	25			
TH30-2-24	92.80	194.18	89.49	0.48	0.132 2	0.002 6	7.143 9	0.147 8	0.391 7	0.005 9	2.127	17	2 130	18	2 131	27			
TH30-2-25	246.01	631.89	262.16	0.39	0.131 1	0.003 7	6.407 7	0.155 1	0.354 4	0.005 4	2.113	51	2 033	21	1 955	26			
TH30-2-26	45.06	644.99	246.19	0.07	0.110 4	0.002 1	5.479 3	0.111 2	0.359 8	0.005 3	1.806	18	1 897	17	1 981	25			
TH30-2-27	21.30	583.43	201.83	0.04	0.111 3	0.002 1	5.115 1	0.103 6	0.333 3	0.004 9	1.820	18	1 839	17	1 854	24			
TH30-2-28	86.57	661.52	269.70	0.13	0.124 0	0.002 4	6.450 5	0.130 8	0.377 1	0.005 6	2.015	17	2 039	18	2 063	26			
TH30-2-29	46.64	773.60	284.48	0.06	0.113 1	0.002 2	5.499 6	0.112 1	0.352 4	0.005 2	1.850	18	1 901	18	1 946	25			
TH30-2-30	18.36	507.07	180.57	0.04	0.113 5	0.002 2	5.364 9	0.111 5	0.342 8	0.005 1	1.856	18	1 879	18	1 900	25			
TH30-2-31	36.87	587.49	218.48	0.06	0.111 7	0.002 2	5.503 4	0.114 2	0.357 2	0.005 3	1.827	18	1 901	18	1 969	25			
TH30-2-32	35.47	694.74	244.76	0.05	0.114 6	0.002 2	5.348 8	0.110 9	0.338 3	0.005 0	1.874	18	1 877	18	1 879	24			
TH25-2-01	531.81	690.28	249.51	0.77	0.112 3	0.002 5	4.995 4	0.118 6	0.322 7	0.005 3	1.836	21	1 819	20	1 803	26			
TH25-2-02	728.44	1 027.73	369.07	0.71	0.115 1	0.002 5	5.118 5	0.118 3	0.322 7	0.005 3	1.881	20	1 839	20	1 803	26			
TH25-2-03	566.42	763.10	277.85	0.74	0.114 1	0.002 5	5.133 3	0.121 1	0.326 4	0.005 4	1.865	21	1 842	20	1 821	26			
TH25-2-04	652.03	766.97	287.28	0.85	0.111 2	0.002 4	5.016 2	0.115 7	0.327 2	0.005 3	1.819	20	1 822	20	1 825	26			
TH25-2-05	532.61	771.65	280.80	0.69	0.114 2	0.002 5	5.164 4	0.120 2	0.328 0	0.005 4	1.867	21	1 847	20	1 829	26			
TH25-2-06	113.38	239.66	83.59	0.47	0.112 3	0.002 9	5.112 0	0.137 3	0.330 1	0.005 8	1.837	25	1 838	23	1 839	28			
TH25-2-07	585.77	804.41	295.71	0.73	0.112 0	0.002 4	5.078 4	0.117 3	0.328 8	0.005 3	1.832	21	1 832	20	1 833	26			
TH25-2-08	432.79	579.23	215.77	0.75	0.112 8	0.002 5	5.164 2	0.121 6	0.332 1	0.005 4	1.845	21	1 847	20	1 848	26			

续表 1-3
Continued Table 1-3

样品点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				表观年龄/Ma			
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
TH25-2-09	337.46	450.61	171.41		0.75	5.263 3	0.002 6	0.338 0	0.005 6	1 863	21	1 877	27
TH25-2-10	448.53	614.55	231.80		0.73	5.337 2	0.002 6	0.336 2	0.005 6	1 875	20	1 868	27
TH25-2-11	671.20	830.33	313.41		0.81	5.052 3	0.002 4	0.330 8	0.005 4	1 828	20	1 842	26
TH25-2-12	711.24	948.55	354.35		0.75	5.148 2	0.002 4	0.330 5	0.005 3	1 844	19	1 841	26
TH25-2-13	360.45	514.71	195.31		0.70	5.329 7	0.002 6	0.340 0	0.005 6	1 874	20	1 886	27
TH25-2-14	350.73	608.18	227.22		0.58	5.365 1	0.002 5	0.342 7	0.005 6	1 879	20	1 900	27
TH25-2-15	304.88	522.53	189.52		0.58	5.199 2	0.002 6	0.333 5	0.005 5	1 852	20	1 855	26
TH25-2-16	562.25	749.48	286.63		0.75	5.364 8	0.002 6	0.337 2	0.005 6	1 879	21	1 873	27
TH25-2-17	390.67	545.67	206.05		0.72	5.308 4	0.002 7	0.336 3	0.005 6	1 870	21	1 869	27
TH25-2-18	138.39	347.48	122.93		0.40	5.276 2	0.002 8	0.335 7	0.005 7	1 865	22	1 866	28
TH25-2-19	285.74	697.80	245.36		0.41	5.249 8	0.002 6	0.334 9	0.005 5	1 861	20	1 862	27
TH25-2-20	372.21	732.19	262.35		0.51	5.191 8	0.002 5	0.332 6	0.005 4	1 851	20	1 851	26
TH25-2-21	412.10	665.58	248.56		0.62	5.324 0	0.002 6	0.337 1	0.005 5	1 873	21	1 873	26
TH25-2-22	449.76	641.42	244.65		0.70	5.235 5	0.002 5	0.340 8	0.005 6	1 822	20	1 891	27
TH25-2-23	739.15	899.94	344.46		0.82	5.204 6	0.002 5	0.332 0	0.005 3	1 859	21	1 848	26
TH25-2-24	669.84	937.94	357.39		0.71	5.334 2	0.002 5	0.337 5	0.005 4	1 874	20	1 875	26
TH25-2-25	291.99	679.83	238.16		0.43	5.112 3	0.002 6	0.330 2	0.005 4	1 838	20	1 839	26
TH25-2-26	180.74	321.65	117.46		0.56	5.226 6	0.002 9	0.333 7	0.005 7	1 857	22	1 856	28
TH25-2-27	449.40	683.74	263.99		0.66	5.486 3	0.002 6	0.347 0	0.005 7	1 874	21	1 920	27
TH25-2-28	201.88	1 009.21	338.53		0.20	5.208 7	0.002 5	0.332 7	0.005 3	1 856	21	1 852	26
TH25-2-29	544.73	850.90	320.47		0.64	5.439 7	0.002 5	0.345 7	0.005 6	1 891	20	1 914	27
TH26-1-01	80.83	197.93	76.71		0.41	5.412 7	0.003 6	0.340 1	0.005 8	1 887	26	1 887	28
TH26-1-02	88.44	176.45	99.99		0.50	5.638 3	0.013 4	0.296 9	0.006 9	1 922	81	1 676	34
TH26-1-03	56.47	143.97	82.37		0.39	11.237 9	0.005 3	0.483 9	0.008 4	2 543	29	2 544	36
TH26-1-04	184.50	326.98	197.10		0.56	11.205 0	0.005 2	0.493 1	0.008 4	2 540	29	2 584	36
TH26-1-05	217.58	457.84	183.31		0.48	5.549 1	0.006 2	0.315 1	0.005 7	1 908	39	1 766	28
TH26-1-06	176.50	167.84	109.34		1.05	11.189 4	0.005 4	0.483 1	0.008 3	2 539	29	2 541	36
TH26-1-07	311.95	458.37	233.36		0.68	8.845 1	0.005 0	0.410 0	0.007 0	2 322	28	2 215	32
TH26-1-08	87.66	217.81	86.87		0.40	5.871 4	0.005 9	0.327 2	0.006 0	1 957	36	1 825	29
TH26-1-09	148.51	453.94	138.90		0.33	3.693 1	0.006 8	0.226 8	0.004 2	1 570	43	1 318	22
TH26-1-10	203.88	255.27	157.63		0.80	10.944 0	0.005 4	0.478 0	0.008 3	2 518	29	2 519	36
TH26-1-11	105.10	189.69	93.67		0.55	8.059 5	0.004 8	0.403 1	0.007 0	2 238	29	2 183	32
TH26-1-12	74.82	232.44	88.54		0.32	5.527 6	0.003 9	0.343 6	0.006 0	1 905	28	1 904	29
TH26-1-13	29.95	78.93	49.82		0.38	8.197 1	0.011 5	0.378 4	0.008 3	2 253	63	2 069	39
TH26-1-14	173.35	507.45	160.47		0.34	4.526 3	0.005 5	0.262 9	0.004 7	1 736	33	1 504	24

续表 1-4
Continued Table 1-4

样品点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值						表观年龄/Ma					
	Th	U	Pb			207Pb/206Pb	1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	1σ		
TH26-1-15	176.25	195.97	122.05		0.90	0.163 9	0.005 5	10.688 5	0.346 9	0.473 2	0.008 3	2 496	32	2 496	30	2 497	36
TH26-1-16	171.21	234.20	117.81		0.73	0.154 4	0.005 3	8.486 7	0.279 3	0.398 6	0.007 1	2 396	32	2 284	30	2 163	33
TH26-1-17	321.78	343.07	169.25		0.94	0.163 9	0.005 5	8.383 8	0.272 4	0.371 1	0.006 5	2 496	32	2 273	29	2 034	31
TH26-1-18	200.51	521.69	126.33		0.38	0.133 1	0.004 5	3.889 3	0.127 4	0.212 0	0.003 7	2 139	33	1 611	26	1 240	20
TH26-1-19	237.68	324.69	157.64		0.73	0.150 5	0.005 2	8.156 3	0.270 7	0.393 2	0.007 0	2 351	32	2 249	30	2 138	32
TH26-1-20	129.89	283.08	140.04		0.46	0.142 2	0.006 6	7.727 5	0.328 1	0.394 2	0.007 3	2 254	83	2 200	38	2 142	34
TH26-1-21	172.99	124.78	86.39		1.39	0.169 0	0.005 9	11.280 4	0.376 9	0.484 4	0.008 7	2 547	33	2 547	31	2 546	38
TH26-1-22	166.13	260.37	140.73		0.64	0.158 9	0.005 5	9.382 5	0.312 0	0.428 5	0.007 6	2 444	33	2 376	31	2 299	34
TH26-1-23	133.21	147.39	94.56		0.90	0.167 6	0.005 9	11.172 1	0.376 3	0.483 8	0.008 6	2 533	33	2 538	31	2 544	38
TH26-1-24	368.97	539.82	220.27		0.68	0.150 1	0.005 3	6.695 7	0.224 1	0.323 6	0.005 7	2 347	34	2 072	30	1 807	28
TH26-1-25	113.87	278.31	102.83		0.41	0.139 9	0.006 9	5.516 3	0.252 5	0.286 0	0.005 4	2 226	88	1 903	39	1 622	27
TH23-1-01	121.22	1 204.10	414.87		0.10	0.117 4	0.002 2	5.658 6	0.121 5	0.349 2	0.005 6	1 917	18	1 925	19	1 931	27
TH23-1-02	113.19	1 653.04	549.56		0.07	0.117 0	0.002 1	5.474 9	0.116 4	0.339 0	0.005 4	1 911	18	1 897	18	1 882	26
TH23-1-03	100.27	1 423.16	451.66		0.07	0.116 8	0.002 2	5.204 0	0.110 8	0.322 8	0.005 1	1 907	18	1 853	18	1 804	25
TH23-1-04	68.42	1 230.31	388.48		0.06	0.115 9	0.002 2	5.168 0	0.110 7	0.323 0	0.005 1	1 894	18	1 847	18	1 804	25
TH23-1-05	128.48	1 279.32	428.25		0.10	0.116 3	0.002 1	5.424 6	0.115 3	0.337 9	0.005 4	1 900	18	1 889	18	1 876	26
TH23-1-06	116.56	1 163.00	402.19		0.10	0.118 8	0.002 2	5.708 9	0.122 4	0.348 1	0.005 5	1 939	18	1 933	19	1 926	26
TH23-1-07	73.34	1 263.38	443.93		0.06	0.117 3	0.002 2	5.783 1	0.123 3	0.357 3	0.005 7	1 915	18	1 944	18	1 970	27
TH23-1-08	292.82	1 474.31	473.07		0.20	0.110 8	0.002 1	4.842 8	0.103 8	0.316 8	0.005 0	1 812	18	1 792	18	1 774	25
TH23-1-09	71.71	1 114.04	342.70		0.06	0.112 8	0.002 1	4.883 5	0.104 0	0.313 8	0.005 0	1 845	18	1 799	18	1 759	24
TH23-1-10	97.30	1 825.11	644.14		0.05	0.119 1	0.002 2	5.880 2	0.123 4	0.357 8	0.005 6	1 943	18	1 958	18	1 972	27
TH23-1-11	29.58	830.53	282.86		0.04	0.117 0	0.002 2	5.593 3	0.118 5	0.346 4	0.005 5	1 912	18	1 915	18	1 917	26
TH23-1-12	71.27	962.76	331.74		0.07	0.117 4	0.002 2	5.594 3	0.117 8	0.345 4	0.005 4	1 917	18	1 915	18	1 913	26
TH23-1-13	107.54	908.53	285.73		0.12	0.115 1	0.002 2	4.966 2	0.105 2	0.312 8	0.004 9	1 881	18	1 814	18	1 754	24
TH23-1-14	204.64	1 668.51	516.60		0.12	0.113 9	0.002 1	4.918 5	0.103 7	0.313 1	0.004 9	1 862	18	1 805	18	1 756	24
TH23-1-15	91.96	1 055.10	372.78		0.09	0.117 2	0.002 2	5.703 8	0.119 9	0.352 8	0.005 5	1 914	18	1 932	18	1 948	26
TH23-1-16	37.96	786.93	274.80		0.05	0.114 8	0.002 2	5.582 7	0.118 1	0.352 7	0.005 5	1 876	18	1 913	18	1 948	26
TH23-1-17	65.82	905.17	312.42		0.07	0.116 8	0.002 2	5.560 2	0.117 7	0.345 0	0.005 4	1 908	18	1 910	18	1 911	26
TH23-1-18	53.91	1 147.52	388.08		0.05	0.114 7	0.002 1	5.370 3	0.113 1	0.339 4	0.005 3	1 875	18	1 880	18	1 884	25
TH23-1-19	194.02	835.53	308.32		0.23	0.116 5	0.002 2	5.679 1	0.120 0	0.353 4	0.005 5	1 904	18	1 928	18	1 951	26
TH23-1-20	23.34	813.38	286.43		0.03	0.116 9	0.002 2	5.725 7	0.121 3	0.355 1	0.005 5	1 910	18	1 935	18	1 959	26
TH23-1-21	227.33	1 179.94	358.32		0.19	0.109 4	0.002 1	4.465 2	0.095 4	0.295 9	0.004 6	1 790	19	1 725	18	1 671	23
TH23-1-22	75.35	1 405.05	494.82		0.05	0.117 1	0.002 2	5.663 8	0.119 5	0.350 7	0.005 4	1 913	18	1 926	18	1 938	26
TH23-1-23	59.47	1 287.18	453.83		0.05	0.115 1	0.002 2	5.594 7	0.118 4	0.352 6	0.005 5	1 881	18	1 915	18	1 947	26
TH23-1-24	100.70	1 056.95	383.03		0.10	0.116 5	0.002 2	5.736 7	0.122 1	0.357 2	0.005 5	1 903	18	1 937	18	1 969	26

续表 1-5
Continued Table 1-5

样品点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值						表观年龄/Ma			
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$
TH23-1-25	774.01	2 064.42	487.75		0.37	0.003 3	0.083 8	0.102 7	0.003 3	0.215 7	0.003 4	60	1 421	21	1 259
TH23-1-26	136.81	1 322.07	384.95		0.10	0.002 1	0.092 1	0.109 0	0.002 1	0.287 7	0.004 5	19	1 698	18	1 630
TH23-1-27	10.23	504.14	176.88		0.02	0.002 3	0.122 0	0.117 5	0.002 3	0.350 8	0.005 5	19	1 929	19	1 938
TH23-1-28	12.75	874.07	303.66		0.01	0.002 3	0.120 6	0.117 7	0.002 3	0.347 0	0.005 4	18	1 921	18	1 920
TH23-1-29	30.97	649.63	235.30		0.05	0.002 3	0.123 4	0.116 7	0.002 3	0.356 5	0.005 5	19	1 937	19	1 966
TH23-1-30	61.31	1 262.81	456.32		0.05	0.002 2	0.121 1	0.114 7	0.002 2	0.358 5	0.005 5	18	1 926	18	1 975
TH23-1-31	33.52	711.29	254.60		0.05	0.002 3	0.122 7	0.116 8	0.002 3	0.353 5	0.005 5	19	1 930	19	1 951
TH23-1-32	10.56	489.28	169.88		0.02	0.002 3	0.120 6	0.117 0	0.002 3	0.344 7	0.005 3	19	1 910	19	1 909
TH06-1-01	183.99	334.31	148.06		0.55	0.002 1	0.120 7	0.130 5	0.002 1	0.386 0	0.005 6	14	2 103	15	2 104
TH06-1-02	641.87	755.65	232.38		0.85	0.002 1	0.072 0	0.133 2	0.002 1	0.261 9	0.003 8	14	1 672	14	1 500
TH06-1-03	109.55	222.31	103.93		0.49	0.002 2	0.135 7	0.134 3	0.002 2	0.414 4	0.006 1	14	2 168	16	2 235
TH06-1-04	119.68	243.85	110.74		0.49	0.002 1	0.131 2	0.132 2	0.002 1	0.398 8	0.005 8	14	2 152	16	2 164
TH06-1-05	162.46	261.47	121.47		0.62	0.001 8	0.131 9	0.115 7	0.001 8	0.398 0	0.005 8	14	2 157	16	2 160
TH06-1-06	188.24	318.62	148.57		0.59	0.002 0	0.130 3	0.120 0	0.002 0	0.400 3	0.005 8	14	2 148	16	2 170
TH06-1-07	510.44	860.57	275.29		0.59	0.002 1	0.079 9	0.132 4	0.002 1	0.282 1	0.004 1	15	1 731	15	1 602
TH06-1-08	181.33	472.24	159.09		0.38	0.001 7	0.093 7	0.101 4	0.001 7	0.306 9	0.004 5	15	1 833	16	1 725
TH06-1-09	318.38	426.59	195.58		0.75	0.002 2	0.127 4	0.128 7	0.002 2	0.391 7	0.005 7	14	2 131	16	2 131
TH06-1-10	227.36	816.38	208.31		0.28	0.002 1	0.062 1	0.128 4	0.002 1	0.244 9	0.003 6	15	1 510	14	1 412
TH06-1-11	151.94	317.17	135.82		0.48	0.002 1	0.125 1	0.132 9	0.002 1	0.380 6	0.005 6	15	2 080	16	2 079
TH06-1-12	423.93	652.45	287.51		0.65	0.002 8	0.121 4	0.103 2	0.002 8	0.380 6	0.005 5	14	2 078	16	2 079
TH06-1-13	193.71	433.45	194.20		0.45	0.002 2	0.129 9	0.130 5	0.002 2	0.392 6	0.005 7	14	2 136	16	2 135
TH06-1-14	173.00	759.67	208.92		0.23	0.002 4	0.082 0	0.131 2	0.002 4	0.251 5	0.003 7	51	1 544	18	1 446
TH06-1-15	129.40	249.95	111.52		0.52	0.002 3	0.131 1	0.131 9	0.002 3	0.392 6	0.005 8	15	2 120	17	2 135
TH06-1-16	66.90	168.60	70.82		0.40	0.003 1	0.134 9	0.115 1	0.003 1	0.377 9	0.005 7	16	2 090	17	2 066
TH06-1-17	120.71	215.50	97.19		0.56	0.002 1	0.136 2	0.128 2	0.002 1	0.392 6	0.005 9	15	2 129	17	2 135
TH06-1-18	238.62	689.71	217.54		0.35	0.002 1	0.103 2	0.127 4	0.002 1	0.287 2	0.004 3	50	1 741	19	1 627
TH06-1-19	493.30	625.51	245.92		0.79	0.002 1	0.109 4	0.126 0	0.002 1	0.337 8	0.004 9	15	1 972	16	1 876
TH06-1-20	300.35	603.08	260.47		0.50	0.002 1	0.123 1	0.125 5	0.002 1	0.384 0	0.005 6	15	2 078	16	2 095
TH06-1-21	384.47	564.91	221.51		0.68	0.002 2	0.109 8	0.130 8	0.002 2	0.340 6	0.005 0	15	1 964	16	1 890
TH06-1-22	618.54	665.01	275.07		0.93	0.001 5	0.109 3	0.089 3	0.001 5	0.341 1	0.005 0	15	1 962	16	1 892
TH06-1-23	173.65	290.31	138.28		0.60	0.002 2	0.140 9	0.132 4	0.002 2	0.414 7	0.006 1	15	2 171	17	2 237
TH06-1-24	167.32	1 272.76	245.54		0.13	0.002 0	0.045 6	0.116 5	0.002 0	0.195 7	0.002 9	14	1 245	14	1 152
TH06-1-25	246.49	513.28	227.34		0.48	0.002 0	0.133 4	0.116 2	0.002 0	0.392 4	0.005 7	15	2 132	17	2 134
TH06-1-26	996.38	1 134.48	337.27		0.88	0.003 1	0.074 6	0.111 1	0.003 1	0.247 5	0.003 6	16	1 629	15	1 426
TH06-1-27	571.83	820.52	252.40		0.70	0.002 2	0.083 6	0.127 2	0.002 2	0.275 5	0.004 0	16	1 715	16	1 569
TH06-1-28	242.10	722.69	237.33		0.33	0.002 3	0.108 5	0.133 9	0.002 3	0.301 5	0.004 5	52	1 752	20	1 699

续表 1-6
Continued Table 1-6

样品点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				表观年龄/Ma			
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
TH06-1-29	179.99	344.58	141.03		0.52	0.108 3	0.001 9	6.354 6	0.122 4	0.362 2	0.005 4	2 060	17
TH06-1-30	122.50	221.21	98.57		0.55	0.103 8	0.001 8	7.276 8	0.140 0	0.394 1	0.005 8	2 150	17
TH06-1-31	399.10	777.41	209.57		0.51	0.130 3	0.002 0	3.909 6	0.074 6	0.261 8	0.003 8	1 771	15
TH06-1-32	370.32	908.72	166.78		0.41	0.115 9	0.001 8	2.511 0	0.048 3	0.175 4	0.002 6	1 693	14
TH18-1-01	62.30	529.40	187.70		0.12	0.116 2	0.002 4	5.484 6	0.120 1	0.342 5	0.005 3	1 898	19
TH18-1-02	59.90	531.30	188.10		0.11	0.115 8	0.002 4	5.468 0	0.120 0	0.342 6	0.005 3	1 892	19
TH18-1-03	157.60	270.50	106.20		0.58	0.115 8	0.002 4	5.435 9	0.122 3	0.340 7	0.005 3	1 892	20
TH18-1-04	60.70	553.00	197.70		0.11	0.117 1	0.002 4	5.580 5	0.123 1	0.345 6	0.005 4	1 913	19
TH18-1-05	58.80	181.10	69.50		0.32	0.117 4	0.002 6	5.662 1	0.131 3	0.349 8	0.005 6	1 917	20
TH18-1-06	49.20	438.00	157.30		0.11	0.115 7	0.002 4	5.523 1	0.123 0	0.346 3	0.005 4	1 891	19
TH18-1-07	53.70	198.30	73.10		0.27	0.115 6	0.002 5	5.470 6	0.126 7	0.343 3	0.005 4	1 890	21
TH18-1-08	45.70	201.20	74.00		0.23	0.116 6	0.002 6	5.525 1	0.127 4	0.343 9	0.005 4	1 904	21
TH18-1-09	53.10	331.00	121.60		0.16	0.113 4	0.002 4	5.463 1	0.124 2	0.349 6	0.005 5	1 854	20
TH18-1-10	30.00	294.00	106.70		0.10	0.118 6	0.002 6	5.679 7	0.132 0	0.347 4	0.005 5	1 935	21
TH18-1-11	43.00	405.70	146.10		0.11	0.114 5	0.002 5	5.460 3	0.126 2	0.346 1	0.005 4	1 871	20
TH18-1-12	72.90	495.30	185.70		0.15	0.115 7	0.002 5	5.678 3	0.129 6	0.356 1	0.005 5	1 891	20
TH18-1-13	71.20	489.90	179.70		0.15	0.115 8	0.002 5	5.542 7	0.126 6	0.347 4	0.005 4	1 892	21
TH18-1-14	54.00	432.50	161.40		0.12	0.117 6	0.002 6	5.743 8	0.132 0	0.354 4	0.005 5	1 920	21
TH18-1-15	48.40	383.40	140.80		0.13	0.116 7	0.002 6	5.605 8	0.129 7	0.348 6	0.005 4	1 906	21
TH18-1-16	67.80	549.40	201.50		0.12	0.117 2	0.002 6	5.621 0	0.130 1	0.348 0	0.005 4	1 913	21
TH18-1-17	42.20	360.90	131.50		0.12	0.114 6	0.002 6	5.472 4	0.128 0	0.346 4	0.005 4	1 873	21
TH18-1-18	39.10	367.70	134.70		0.11	0.115 2	0.002 6	5.542 3	0.129 2	0.348 9	0.005 5	1 884	21
TH18-1-19	60.60	243.30	92.20		0.25	0.117 4	0.002 7	5.607 9	0.133 0	0.346 6	0.005 5	1 917	22
TH18-1-20	96.70	515.50	189.70		0.19	0.114 2	0.002 6	5.391 9	0.126 9	0.342 5	0.005 3	1 867	22
TH18-1-21	24.90	386.10	136.10		0.06	0.114 0	0.002 6	5.304 4	0.124 8	0.337 5	0.005 3	1 864	22
TH18-1-22	26.50	456.70	160.50		0.06	0.114 4	0.002 6	5.311 5	0.124 9	0.336 8	0.005 2	1 870	22
TH18-1-23	35.80	347.70	126.40		0.10	0.116 0	0.002 7	5.484 6	0.130 5	0.342 9	0.005 4	1 896	22
TH18-1-24	64.60	479.40	175.30		0.13	0.115 1	0.002 7	5.437 7	0.128 8	0.342 8	0.005 3	1 881	22
TH18-1-25	61.50	280.10	101.20		0.22	0.112 8	0.002 7	5.154 8	0.124 0	0.331 5	0.005 2	1 845	22
TH18-1-26	57.40	617.20	226.50		0.09	0.116 1	0.002 7	5.546 9	0.132 2	0.346 5	0.005 4	1 897	22
TH18-1-27	107.20	263.80	122.10		0.41	0.134 7	0.003 2	7.385 1	0.177 4	0.397 8	0.006 2	2 159	22
TH18-1-28	76.40	361.20	133.60		0.21	0.114 0	0.002 7	5.329 2	0.128 1	0.338 9	0.005 3	1 865	22
TH18-1-29	36.40	261.00	95.10		0.14	0.115 2	0.002 8	5.392 9	0.130 6	0.339 5	0.005 3	1 883	23
TH18-1-30	67.40	624.10	228.80		0.11	0.115 7	0.002 8	5.471 9	0.132 7	0.342 9	0.005 3	1 891	23
TH18-1-31	96.90	475.90	180.50		0.20	0.112 6	0.002 7	5.397 7	0.131 6	0.347 8	0.005 4	1 841	23

续表 1-7
Continued Table 1-7

样品点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值						表观年龄/Ma			
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$
TH18-1-32	75.80	135.30	53.90		0.56	0.002 9	5.232 5	0.131 7	0.334 7	0.005 3	1 854	24	1 858	21	1 861
TH18-1-33	33.10	462.70	171.60		0.07	0.002 8	5.533 2	0.136 1	0.350 1	0.005 5	1 874	23	1 906	21	1 935
TH43-1-01	209.18	509.48	295.71		0.41	0.003 6	11.235 8	0.254 5	0.483 3	0.007 3	2 544	19	2 543	21	2 542
TH43-1-02	29.41	32.04	20.93		0.92	0.004 6	11.743 8	0.317 9	0.490 0	0.008 5	2 595	23	2 584	25	2 571
TH43-1-03	25.09	55.35	33.78		0.45	0.004 2	12.037 7	0.301 5	0.502 5	0.008 2	2 594	21	2 607	23	2 625
TH43-1-04	20.07	34.64	21.28		0.58	0.004 5	11.869 6	0.316 5	0.495 1	0.008 6	2 595	23	2 594	25	2 593
TH43-1-05	131.76	116.09	77.28		1.13	0.003 8	11.222 5	0.267 5	0.482 6	0.007 6	2 544	20	2 542	22	2 538
TH43-1-06	22.18	51.01	30.37		0.43	0.004 3	11.778 4	0.303 7	0.493 7	0.008 1	2 587	22	2 587	24	2 587
TH43-1-07	68.61	86.69	53.90		0.79	0.003 9	11.099 6	0.270 8	0.481 1	0.007 7	2 531	21	2 532	23	2 532
TH43-1-08	17.36	42.45	24.98		0.41	0.004 6	11.572 8	0.315 7	0.490 0	0.008 5	2 570	24	2 570	25	2 571
TH43-1-09	122.60	121.30	80.24		1.01	0.003 8	11.232 9	0.273 3	0.492 4	0.007 8	2 512	21	2 543	23	2 581
TH43-1-10	32.72	50.20	31.11		0.65	0.004 5	11.534 4	0.311 2	0.488 8	0.008 4	2 569	24	2 567	25	2 566
TH43-1-11	16.41	23.90	14.60		0.69	0.005 3	11.081 0	0.349 3	0.481 9	0.009 3	2 525	28	2 530	29	2 536
TH43-1-12	47.21	41.90	28.00		1.13	0.004 5	11.482 8	0.309 1	0.487 9	0.008 3	2 564	24	2 563	25	2 561
TH43-1-13	22.72	57.15	33.79		0.40	0.004 3	11.950 4	0.302 8	0.497 0	0.008 1	2 600	22	2 601	24	2 601
TH43-1-14	10.10	46.46	26.77		0.22	0.004 4	12.124 3	0.310 8	0.500 4	0.008 2	2 613	22	2 614	24	2 615
TH43-1-15	28.11	104.11	59.88		0.27	0.004 0	11.916 2	0.290 3	0.496 3	0.007 8	2 598	21	2 598	23	2 598
TH43-1-16	17.76	35.68	21.27		0.50	0.004 6	11.682 3	0.316 3	0.492 3	0.008 5	2 578	24	2 579	25	2 581
TH43-1-17	8.17	23.74	13.49		0.34	0.005 1	11.371 9	0.341 4	0.486 2	0.008 9	2 554	27	2 554	28	2 554
TH43-1-18	14.42	58.73	33.88		0.25	0.004 3	12.123 6	0.308 1	0.500 0	0.008 1	2 614	22	2 614	24	2 614
TH43-1-19	16.03	30.95	18.40		0.52	0.005 1	11.527 9	0.343 9	0.488 4	0.008 9	2 569	27	2 567	28	2 564
TH43-1-20	30.56	55.74	34.00		0.55	0.004 4	11.910 7	0.308 6	0.496 4	0.008 1	2 596	23	2 597	24	2 598
TH43-1-21	23.72	37.30	22.83		0.64	0.004 5	11.551 7	0.311 8	0.491 7	0.008 3	2 561	24	2 569	25	2 578
TH43-1-22	17.58	45.82	26.45		0.38	0.004 5	11.617 9	0.309 7	0.490 6	0.008 2	2 575	24	2 574	25	2 573
TH43-1-23	114.87	107.14	70.37		1.07	0.004 2	11.408 2	0.290 4	0.486 4	0.007 7	2 558	23	2 557	24	2 555
TH43-1-24	40.39	89.04	52.60		0.45	0.004 3	11.718 9	0.299 9	0.492 6	0.007 8	2 582	23	2 582	24	2 582
TH43-1-25	8.59	175.35	95.63		0.05	0.004 2	12.062 1	0.303 0	0.497 1	0.007 7	2 615	22	2 609	24	2 601
TH43-1-26	26.93	48.33	29.68		0.56	0.005 0	12.414 6	0.350 0	0.499 8	0.008 7	2 654	25	2 636	26	2 613
TH43-1-27	15.61	59.33	33.36		0.26	0.004 5	11.685 6	0.315 6	0.491 7	0.008 1	2 581	24	2 580	25	2 578
TH43-1-28	44.72	137.57	77.19		0.33	0.004 2	11.303 4	0.292 1	0.484 7	0.007 6	2 549	23	2 548	24	2 548
TH43-1-29	114.70	57.99	46.62		1.98	0.004 8	12.032 0	0.337 6	0.497 1	0.008 4	2 611	25	2 607	26	2 601

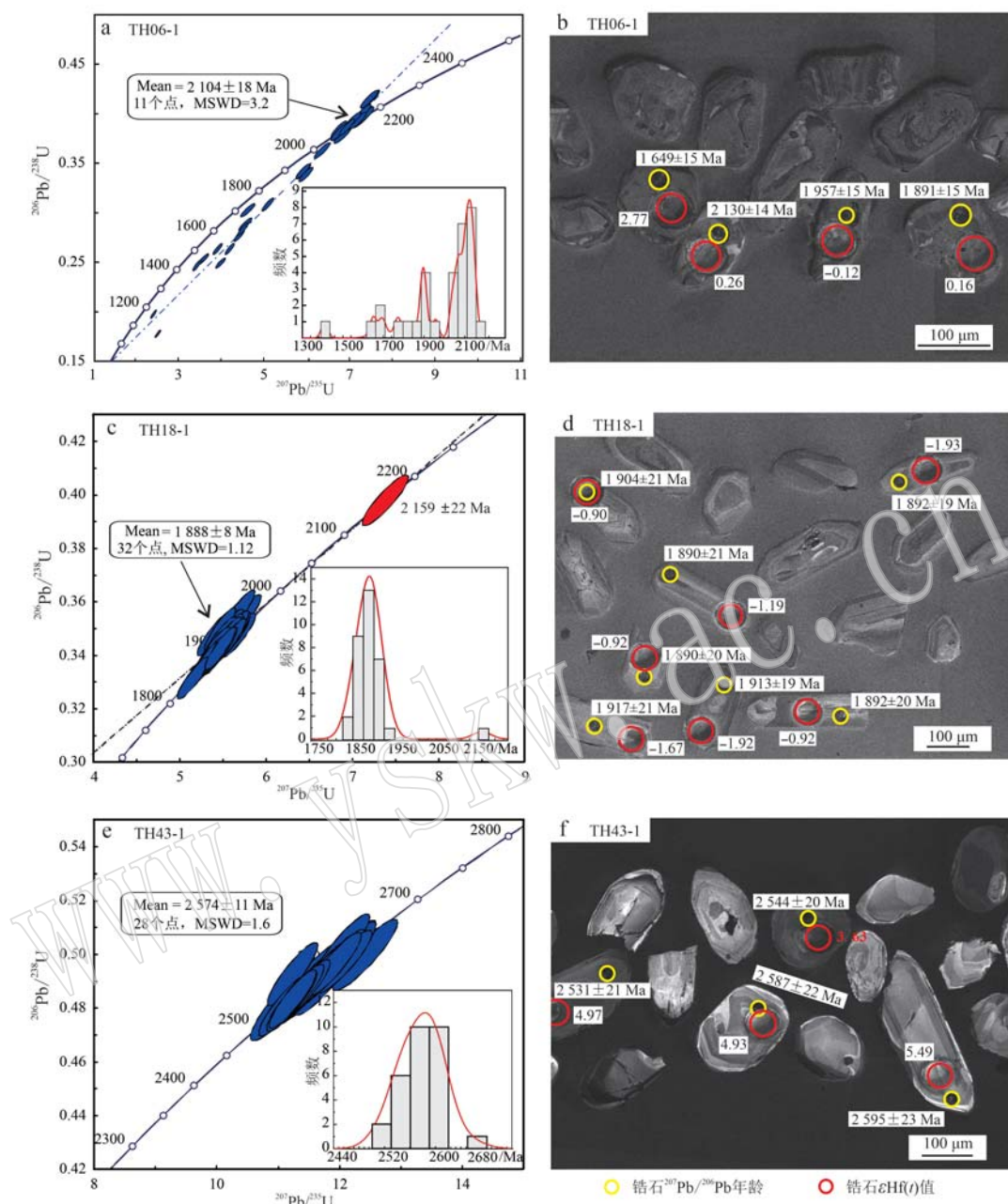


图6 通化地区片麻状花岗岩(TH06-1)、斑状花岗岩(TH18-1)与角闪斜长片麻岩(TH43-1)锆石 U-Pb 谐和图与阴极发光图像

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams and CL images of zircons from gneissic granite(TH06-1), porphyritic granite(TH18-1) and amphibole plagioclase gneiss(TH43-1) in the Tonghua area

结果显示,该样品锆石的 Th、U 含量普遍不高, Th 含量介于 $8.17 \times 10^{-6} \sim 209.18 \times 10^{-6}$ 之间, U 含量介于 $23.74 \times 10^{-6} \sim 509.48 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值介于 0.05~1.98 之间。锆石表观年龄非常集中, 介于 2654 ± 25 Ma~ 2512 ± 21 Ma 之间。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上, 全部数据点都位于谐和线上或附近(图 6e), 28 个数据点给出的加权平均年龄为

2574 ± 11 Ma。

5 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

为了探寻通化地区古老物质的起源, 追索彼此之间的成因联系, 在对一些代表性岩石样品开展锆石 U-Pb 同位素体系定年的同时, 还利用多接收等

离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)对其中一些样品开展了锆石 Lu-Hf 同位素体系分析。测试样品包括集安群富铝片麻岩、片麻状花岗岩、斑状花岗岩和太古宙 TTG 片麻岩, 共计 5 个样品, 结果列于表 2。对

于片麻状花岗岩和斑状花岗岩, 分别采用前文所获得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(谐和线上加权平均年龄)计算 Hf 模式年龄, 对其余样品, 全部采用各自锆石原位 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

表 2 代表性岩石锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic data of representative rocks

样品点号	t/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
TH30-2.01	1 947	0.000 7	0.281 396	0.000 017	-0.98	-48.6	-6.13	0.62	2 571	2 948
TH30-2.02	1 805	0.000 4	0.281 459	0.000 014	-0.99	-46.4	-6.77	0.50	2 470	2 879
TH30-2.03	1 811	0.000 5	0.281 421	0.000 015	-0.99	-47.8	-8.01	0.53	2 523	2 959
TH30-2.04	1 810	0.000 6	0.281 474	0.000 013	-0.98	-45.9	-6.34	0.47	2 461	2 856
TH30-2.05	1 962	0.001 1	0.281 698	0.000 020	-0.97	-38.0	4.42	0.72	2 182	2 312
TH30-2.06	1 851	0.000 5	0.281 379	0.000 017	-0.98	-49.3	-8.64	0.59	2 581	3 028
TH30-2.07	2 272	0.000 5	0.281 224	0.000 016	-0.98	-54.7	-4.68	0.56	2 790	3 108
TH30-2.08	1 942	0.000 8	0.281 567	0.000 015	-0.97	-42.6	-0.35	0.53	2 347	2 590
TH30-2.09	1 800	0.000 9	0.281 469	0.000 016	-0.97	-46.1	-7.03	0.58	2 483	2 891
TH30-2.10	1 795	0.000 5	0.281 474	0.000 014	-0.99	-45.9	-6.50	0.49	2 452	2 855
TH30-2.11	1 843	0.000 1	0.281 450	0.000 014	-1.00	-46.7	-5.32	0.50	2 461	2 849
TH30-2.12	1 780	0.000 1	0.281 500	0.000 012	-1.00	-45.0	-5.44	0.44	2 392	2 778
TH30-2.13	1 821	0.000 1	0.281 483	0.000 016	-1.00	-45.6	-5.11	0.57	2 415	2 789
TH30-2.14	1 871	0.000 5	0.281 392	0.000 014	-0.99	-48.8	-7.70	0.50	2 562	2 986
TH30-2.15	2 454	0.000 9	0.281 430	0.000 016	-0.97	-47.5	6.17	0.56	2 537	2 586
TH30-2.16	2 292	0.000 7	0.281 182	0.000 015	-0.98	-56.2	-6.05	0.54	2 862	3 206
TH30-2.17	1 911	0.000 8	0.281 414	0.000 019	-0.98	-48.0	-6.37	0.69	2 550	2 935
TH30-2.18	1 864	0.000 6	0.281 582	0.000 015	-0.98	-42.1	-1.27	0.53	2 313	2 587
TH30-2.19	2 202	0.000 6	0.281 265	0.000 014	-0.98	-53.3	-4.90	0.49	2 740	3 068
TH30-2.20	1 801	0.000 1	0.281 456	0.000 012	-1.00	-46.6	-6.60	0.41	2 455	2 866
TH30-2.21	1 941	0.001 4	0.281 251	0.000 019	-0.96	-53.8	-12.40	0.67	2 821	3 326
TH30-2.22	1 837	0.000 4	0.281 484	0.000 015	-0.99	-45.5	-5.12	0.53	2 435	2 802
TH30-2.23	1 840	0.000 9	0.281 480	0.000 015	-0.97	-45.7	-5.83	0.54	2 472	2 848
TH30-2.24	2 127	0.001 2	0.281 416	0.000 016	-0.97	-47.9	-2.05	0.57	2 575	2 836
TH30-2.25	2 113	0.000 7	0.281 471	0.000 012	-0.98	-46.0	0.22	0.44	2 471	2 686
TH30-2.26	1 806	0.000 1	0.281 509	0.000 011	-1.00	-44.7	-4.53	0.39	2 380	2 742
TH30-2.27	1 820	0.000 6	0.281 434	0.000 016	-0.98	-47.3	-7.50	0.56	2 513	2 935
TH30-2.28	2 015	0.000 5	0.281 395	0.000 013	-0.98	-48.7	-4.42	0.47	2 561	2 895
TH30-2.29	1 850	0.000 1	0.281 477	0.000 012	-1.00	-45.8	-4.64	0.41	2 422	2 783
TH30-2.30	1 856	0.000 5	0.281 463	0.000 011	-0.98	-46.3	-5.59	0.40	2 470	2 846
TH30-2.31	1 827	0.000 1	0.281 506	0.000 011	-1.00	-44.8	-4.22	0.40	2 387	2 739
TH30-2.32	1 874	0.000 2	0.281 474	0.000 011	-0.99	-45.9	-4.38	0.39	2 435	2 785
TH23-1.01	1 917	0.000 6	0.281 472	0.000 018	-0.98	-46.0	-3.97	0.63	2 462	2 793
TH23-1.02	1 911	0.000 3	0.281 475	0.000 016	-0.99	-45.9	-3.60	0.56	2 438	2 765
TH23-1.03	1 907	0.000 0	0.281 463	0.000 013	-1.00	-46.3	-3.76	0.48	2 437	2 772
TH23-1.04	1 894	0.001 2	0.281 547	0.000 017	-0.96	-43.3	-2.57	0.59	2 396	2 689
TH23-1.05	1 900	0.000 3	0.281 536	0.000 013	-0.99	-43.7	-1.73	0.47	2 358	2 642
TH23-1.06	1 939	0.000 3	0.281 550	0.000 015	-0.99	-43.2	-0.27	0.54	2 336	2 583
TH23-1.07	1 915	0.000 6	0.281 516	0.000 015	-0.98	-44.4	-2.51	0.54	2 405	2 702
TH23-1.08	1 812	0.000 5	0.281 520	0.000 012	-0.98	-44.3	-4.55	0.44	2 393	2 748
TH23-1.09	1 845	0.000 2	0.281 502	0.000 013	-0.99	-44.9	-4.04	0.47	2 397	2 742
TH23-1.10	1 943	0.000 1	0.281 418	0.000 019	-1.00	-47.9	-4.61	0.69	2 500	2 852
TH23-1.11	1 912	0.000 4	0.281 526	0.000 014	-0.99	-44.1	-1.98	0.50	2 379	2 667
TH23-1.12	1 917	0.000 2	0.281 502	0.000 014	-0.99	-44.9	-2.41	0.50	2 397	2 697
TH23-1.13	1 881	0.000 2	0.281 490	0.000 011	-0.99	-45.4	-3.69	0.40	2 415	2 748
TH23-1.14	1 862	0.000 4	0.281 522	0.000 014	-0.99	-44.2	-3.17	0.51	2 381	2 701
TH23-1.15	1 914	0.000 3	0.281 529	0.000 014	-0.99	-44.0	-1.67	0.48	2 368	2 650
TH23-1.16	1 876	0.000 3	0.281 481	0.000 014	-0.99	-45.7	-4.16	0.49	2 429	2 773
TH23-1.17	1 908	0.000 8	0.281 490	0.000 013	-0.98	-45.3	-3.76	0.46	2 448	2 773
TH23-1.18	1 875	0.000 5	0.281 525	0.000 011	-0.98	-44.1	-2.93	0.40	2 385	2 697

续表 2-1

Continued Table 2-1

样品点号	t/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
TH23-1.19	1 904	0.000 5	0.281 544	0.000 012	-0.98	-43.4	-1.62	0.44	2 360	2 639
TH23-1.20	1 910	0.000 0	0.281 675	0.000 011	-1.00	-38.8	3.82	0.40	2 154	2 308
TH23-1.21	1 790	0.000 7	0.281 535	0.000 013	-0.98	-43.8	-4.75	0.45	2 385	2 744
TH23-1.22	1 913	0.000 0	0.281 459	0.000 018	-1.00	-46.4	-3.80	0.64	2 444	2 779
TH23-1.23	1 881	0.000 0	0.281 451	0.000 015	-1.00	-46.7	-4.79	0.55	2 453	2 815
TH23-1.24	1 903	0.000 0	0.281 531	0.000 011	-1.00	-43.9	-1.46	0.40	2 347	2 628
TH23-1.25	1 900	0.000 8	0.281 507	0.000 012	-0.98	-44.7	-3.34	0.44	2 425	2 741
TH23-1.26	1 782	0.000 4	0.281 537	0.000 014	-0.99	-43.7	-4.52	0.49	2 365	2 723
TH23-1.27	1 919	0.000 0	0.281 434	0.000 014	-1.00	-47.3	-4.51	0.50	2 475	2 827
TH23-1.28	1 922	0.000 0	0.281 680	0.000 013	-1.00	-38.6	4.28	0.46	2 147	2 290
TH23-1.29	1 906	0.000 0	0.281 455	0.000 016	-1.00	-46.6	-4.09	0.56	2 448	2 792
TH23-1.30	1 875	0.000 1	0.281 396	0.000 017	-1.00	-48.7	-6.95	0.59	2 530	2 943
TH23-1.31	1 908	0.000 4	0.281 513	0.000 014	-0.99	-44.5	-2.47	0.49	2 394	2 694
TH23-1.32	1 911	0.000 0	0.281 435	0.000 012	-1.00	-47.3	-4.67	0.44	2 474	2 831
TH06-1.01	2 160	0.001 4	0.281 547	0.000 013	-0.96	-43.3	1.76	0.47	2 409	2 585
TH06-1.02	2 104	0.000 6	0.281 431	0.000 014	-0.98	-47.4	-1.30	0.49	2 520	2 772
TH06-1.03	2 104	0.001 0	0.281 437	0.000 019	-0.97	-47.2	-1.65	0.67	2 538	2 794
TH06-1.04	2 104	0.001 9	0.281 530	0.000 020	-0.94	-43.9	0.41	0.70	2 467	2 668
TH06-1.05	2 104	0.001 1	0.281 482	0.000 018	-0.97	-45.6	-0.16	0.63	2 481	2 703
TH06-1.06	2 104	0.001 2	0.281 455	0.000 021	-0.96	-46.6	-1.24	0.75	2 524	2 769
TH06-1.07	2 104	0.001 4	0.281 501	0.000 015	-0.96	-44.9	0.16	0.55	2 471	2 683
TH06-1.08	2 104	0.001 2	0.281 485	0.000 018	-0.97	-45.5	-0.12	0.63	2 480	2 700
TH06-1.09	2 104	0.001 8	0.281 519	0.000 017	-0.95	-44.3	0.26	0.60	2 471	2 677
TH06-1.10	2 104	0.001 7	0.281 587	0.000 015	-0.95	-41.9	2.77	0.54	2 372	2 523
TH06-1.11	2 104	0.001 2	0.281 463	0.000 017	-0.96	-46.3	-0.92	0.61	2 511	2 749
TH06-1.12	2 104	0.001 0	0.281 436	0.000 018	-0.97	-47.2	-1.59	0.62	2 535	2 790
TH06-1.13	2 104	0.001 5	0.281 492	0.000 020	-0.95	-45.3	-0.40	0.72	2 495	2 717
TH06-1.14	2 104	0.001 6	0.281 503	0.000 020	-0.95	-44.9	-0.03	0.72	2 481	2 695
TH06-1.15	2 104	0.001 6	0.281 429	0.000 021	-0.95	-47.5	-2.82	0.76	2 591	2 865
TH06-1.16	2 104	0.001 7	0.281 561	0.000 022	-0.95	-42.8	1.75	0.78	2 413	2 585
TH06-1.17	2 104	0.001 3	0.281 526	0.000 017	-0.96	-44.1	1.11	0.61	2 434	2 625
TH06-1.18	2 104	0.000 7	0.281 505	0.000 015	-0.98	-44.8	1.24	0.53	2 424	2 617
TH06-1.19	2 104	0.002 2	0.281 499	0.000 022	-0.94	-45.0	-1.05	0.78	2 527	2 757
TH06-1.20	2 104	0.001 9	0.281 531	0.000 019	-0.94	-43.9	0.44	0.68	2 466	2 666
TH06-1.21	2 104	0.001 6	0.281 425	0.000 022	-0.95	-47.6	-2.82	0.78	2 590	2 866
TH06-1.22	2 104	0.001 7	0.281 541	0.000 021	-0.95	-43.5	1.04	0.76	2 441	2 629
TH06-1.23	2 104	0.001 4	0.281 525	0.000 021	-0.96	-44.1	0.97	0.75	2 440	2 633
TH06-1.24	2 104	0.001 8	0.281 584	0.000 017	-0.95	-42.0	2.53	0.60	2 382	2 538
TH06-1.25	2 104	0.001 7	0.281 485	0.000 022	-0.95	-45.5	-0.92	0.77	2 518	2 749
TH06-1.26	2 104	0.002 1	0.281 489	0.000 022	-0.94	-45.4	-1.29	0.78	2 536	2 772
TH06-1.27	2 104	0.002 2	0.281 603	0.000 020	-0.93	-41.3	2.55	0.72	2 385	2 536
TH06-1.28	2 104	0.001 4	0.281 435	0.000 021	-0.96	-47.3	-2.30	0.76	2 568	2 834
TH06-1.29	2 104	0.001 2	0.281 438	0.000 025	-0.96	-47.2	-1.79	0.88	2 545	2 803
TH06-1.30	2 104	0.001 2	0.281 444	0.000 021	-0.97	-47.0	-1.56	0.74	2 536	2 788
TH06-1.31	2 104	0.001 3	0.281 506	0.000 022	-0.96	-44.8	0.38	0.78	2 463	2 670
TH06-1.32	2 104	0.001 4	0.281 500	0.000 019	-0.96	-45.0	0.10	0.66	2 474	2 687
TH18-1.01	1 888	0.000 5	0.281 530	0.000 012	-0.99	-43.9	-2.42	0.43	2 376	2 676
TH18-1.02	1 888	0.001 0	0.281 560	0.000 013	-0.97	-42.9	-2.02	0.45	2 368	2 651
TH18-1.03	1 888	0.000 9	0.281 584	0.000 013	-0.97	-42.0	-1.01	0.46	2 327	2 589
TH18-1.04	1 888	0.000 9	0.281 545	0.000 014	-0.97	-43.4	-2.47	0.49	2 384	2 679
TH18-1.05	1 888	0.000 9	0.281 547	0.000 015	-0.97	-43.3	-2.31	0.53	2 377	2 669
TH18-1.06	1 888	0.000 8	0.281 582	0.000 011	-0.98	-42.1	-0.99	0.40	2 325	2 587
TH18-1.07	1 888	0.001 2	0.281 588	0.000 016	-0.96	-41.9	-1.23	0.57	2 339	2 603
TH18-1.08	1 888	0.001 0	0.281 583	0.000 013	-0.97	-42.0	-1.25	0.46	2 338	2 604
TH18-1.09	1 888	0.000 9	0.281 583	0.000 014	-0.97	-42.0	-1.07	0.49	2 330	2 593
TH18-1.10	1 888	0.001 3	0.281 615	0.000 014	-0.96	-40.9	-0.44	0.49	2 310	2 554

续表 2-2

Continued Table 2-2

样品点号	t/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
TH18-1.11	1 888	0.000 9	0.281 607	0.000 014	-0.97	-41.2	-0.17	0.50	2 295	2 538
TH18-1.12	1 888	0.000 7	0.281 559	0.000 012	-0.98	-42.9	-1.73	0.44	2 353	2 633
TH18-1.13	1 888	0.001 1	0.281 607	0.000 013	-0.97	-41.2	-0.43	0.47	2 307	2 553
TH18-1.14	1 888	0.001 0	0.281 594	0.000 011	-0.97	-41.7	-0.81	0.40	2 321	2 577
TH18-1.15	1 888	0.001 1	0.281 584	0.000 013	-0.97	-42.0	-1.24	0.45	2 338	2 603
TH18-1.16	1 888	0.000 8	0.281 599	0.000 011	-0.97	-41.5	-0.41	0.39	2 303	2 552
TH18-1.17	1 888	0.001 1	0.281 620	0.000 011	-0.97	-40.7	0.01	0.38	2 290	2 526
TH18-1.18	1 888	0.000 9	0.281 579	0.000 011	-0.97	-42.2	-1.15	0.41	2 332	2 598
TH18-1.19	1 888	0.000 9	0.281 560	0.000 012	-0.97	-42.9	-1.87	0.43	2 360	2 642
TH18-1.20	1 888	0.000 7	0.281 570	0.000 012	-0.98	-42.5	-1.26	0.42	2 334	2 604
TH18-1.21	1 888	0.000 9	0.281 558	0.000 013	-0.97	-42.9	-1.98	0.48	2 365	2 649
TH18-1.22	1 888	0.001 1	0.281 589	0.000 015	-0.97	-41.8	-1.13	0.54	2 334	2 596
TH18-1.23	1 888	0.001 0	0.281 556	0.000 013	-0.97	-43.0	-2.11	0.46	2 371	2 657
TH18-1.24	1 888	0.000 7	0.281 560	0.000 012	-0.98	-42.8	-1.68	0.41	2 351	2 630
TH18-1.25	1 888	0.001 2	0.281 599	0.000 013	-0.96	-41.5	-0.90	0.46	2 327	2 582
TH18-1.26	1 888	0.001 0	0.281 544	0.000 013	-0.97	-43.4	-2.53	0.45	2 387	2 682
TH18-1.27	1 888	0.001 0	0.281 582	0.000 010	-0.97	-42.1	-1.24	0.37	2 337	2 603
TH18-1.28	1 888	0.000 5	0.281 447	0.000 012	-0.98	-46.8	-5.43	0.42	2 491	2 860
TH18-1.29	1 888	0.000 9	0.281 614	0.000 011	-0.97	-41.0	0.03	0.40	2 287	2 525
TH18-1.30	1 888	0.001 0	0.281 555	0.000 012	-0.97	-43.0	-2.24	0.43	2 376	2 665
TH18-1.31	1 888	0.000 9	0.281 573	0.000 014	-0.97	-42.4	-1.40	0.50	2 342	2 613
TH18-1.32	1 888	0.001 3	0.281 623	0.000 014	-0.96	-40.6	-0.15	0.49	2 298	2 536
TH43-1.01	2 544	0.000 3	0.281 278	0.000 018	-0.99	-52.8	3.83	0.64	2 701	2 798
TH43-1.02	2 595	0.000 5	0.281 289	0.000 017	-0.98	-52.5	4.92	0.59	2 705	2 772
TH43-1.03	2 594	0.000 7	0.281 348	0.000 014	-0.98	-50.4	6.71	0.51	2 636	2 662
TH43-1.04	2 595	0.000 5	0.281 305	0.000 016	-0.98	-51.9	5.49	0.58	2 683	2 737
TH43-1.05	2 544	0.000 3	0.281 275	0.000 015	-0.99	-53.0	3.63	0.53	2 709	2 811
TH43-1.06	2 587	0.000 3	0.281 284	0.000 013	-0.99	-52.6	4.93	0.45	2 697	2 765
TH43-1.07	2 531	0.000 4	0.281 326	0.000 013	-0.99	-51.2	4.97	0.48	2 647	2 719
TH43-1.08	2 570	0.000 9	0.281 331	0.000 017	-0.97	-51.0	5.25	0.60	2 672	2 732
TH43-1.09	2 512	0.000 2	0.281 240	0.000 015	-0.99	-54.2	1.87	0.54	2 747	2 893
TH43-1.10	2 569	0.000 4	0.281 311	0.000 015	-0.99	-51.7	5.31	0.54	2 668	2 728
TH43-1.11	2 525	0.000 4	0.281 300	0.000 014	-0.99	-52.1	3.95	0.51	2 681	2 776
TH43-1.12	2 564	0.001 8	0.281 389	0.000 018	-0.95	-48.9	5.54	0.65	2 658	2 710
TH43-1.13	2 600	0.000 8	0.281 335	0.000 015	-0.97	-50.8	6.12	0.53	2 664	2 703
TH43-1.14	2 613	0.000 5	0.281 332	0.000 015	-0.98	-50.9	6.88	0.54	2 646	2 667
TH43-1.15	2 598	0.000 4	0.281 346	0.000 014	-0.99	-50.4	7.27	0.51	2 618	2 631
TH43-1.16	2 578	0.000 2	0.281 297	0.000 013	-0.99	-52.2	5.35	0.45	2 673	2 733
TH43-1.17	2 554	0.000 2	0.281 304	0.000 012	-0.99	-51.9	5.07	0.44	2 663	2 731
TH43-1.18	2 614	0.000 4	0.281 345	0.000 011	-0.99	-50.4	7.56	0.40	2 621	2 626
TH43-1.19	2 569	0.000 3	0.281 290	0.000 012	-0.99	-52.4	4.75	0.43	2 688	2 762
TH43-1.20	2 596	0.000 6	0.281 344	0.000 012	-0.98	-50.5	6.84	0.43	2 633	2 656
TH43-1.21	2 561	0.000 5	0.281 340	0.000 017	-0.99	-50.6	6.09	0.59	2 631	2 674
TH43-1.22	2 575	0.000 7	0.281 342	0.000 014	-0.98	-50.6	6.05	0.51	2 645	2 688
TH43-1.23	2 558	0.000 2	0.281 309	0.000 014	-0.99	-51.7	5.29	0.48	2 658	2 721
TH43-1.24	2 582	0.000 4	0.281 339	0.000 012	-0.99	-50.7	6.67	0.43	2 627	2 655
TH43-1.25	2 615	0.000 4	0.281 333	0.000 011	-0.99	-50.9	7.26	0.40	2 633	2 645
TH43-1.26	2 654	0.000 4	0.281 310	0.000 014	-0.99	-51.7	7.30	0.51	2 666	2 673
TH43-1.27	2 581	0.001 0	0.281 300	0.000 015	-0.97	-52.0	4.14	0.55	2 724	2 809
TH43-1.28	2 549	0.000 4	0.281 334	0.000 014	-0.99	-50.9	5.72	0.48	2 634	2 687
TH43-1.29	2 611	0.001 4	0.281 373	0.000 017	-0.96	-49.5	6.74	0.60	2 651	2 673

样品 TH30-2(夕线石榴二长片麻岩)共进行了 32 个数据点分析(表 2), 其中 7 个分析点位于核部碎屑锆石, 锆石年龄在 2.0 Ga 以上, 其余都是变质锆石。结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除了 3 个锆石的数据为正值外, 其余全部为负值, 整体变化范围介于 $-12.40 \sim 6.17$, 峰期集中在 $-6 \sim -4$ (图 7), 二阶段模式年龄介于 $3\,326 \sim 2\,312$ Ma, 跨度较大, 多数集中在 2.75 Ga 左右(图 7, 图 8), 反映其来源多样, 但主要来自古老物质的再循环。样品 TH23-1(含墨大理岩)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除 2 个点为正值外, 其余全部为负值(表 2), 峰值介于 $-6 \sim -2$ 之间(图 7), 二

阶段模式年龄变化介于 $2\,943 \sim 2\,290$ Ma, 多数集中在 $2.8 \sim 2.7$ Ga(图 7, 图 8), 显示该大理岩的物质主要来自壳内古老物质的再循环, 并有少量新生地壳物质加入。样品 TH06-1(片麻状花岗岩)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值非常集中, 基本在 $-2 \sim +2$ 之间变化(图 7), 二阶段模式年龄变化介于 $2\,794 \sim 2\,523$ Ma, 多数集中在 $2.8 \sim 2.7$ Ga(图 7, 图 8), 显示该花岗岩的原岩复杂, 既有来自亏损地幔物质, 也有壳内再循环产物。样品 TH18-1(斑状花岗岩)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 基本为负值, 变化介于 $-5.43 \sim +0.03$, 多数集中在 $-2 \sim 0$ 之间(图 7), 二阶段模式年龄介于 $2\,860 \sim 2\,525$ Ma,

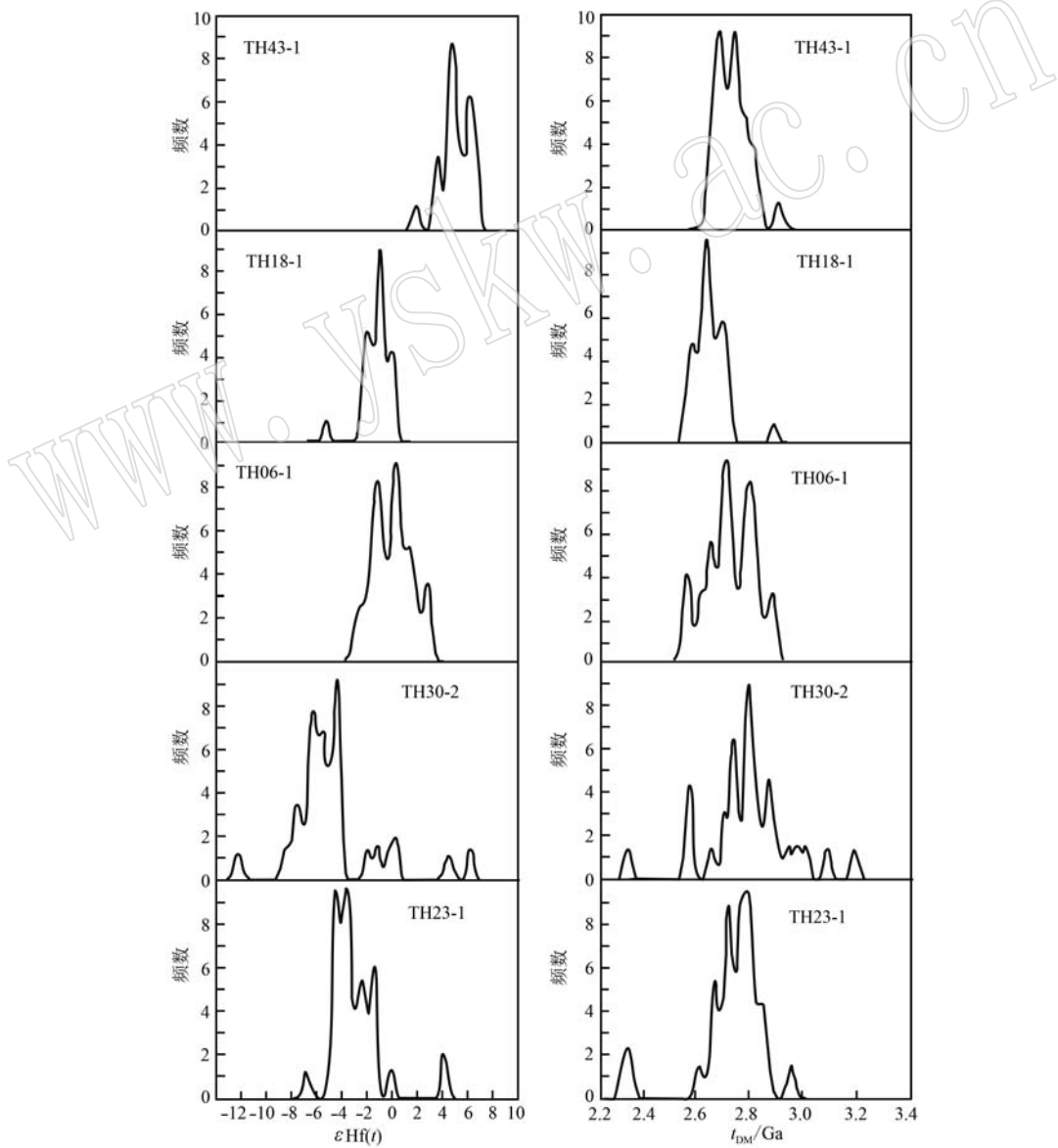


图 7 通化地区代表性岩石锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与模式年龄分布图

Fig. 7 Distribution patterns for $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and Hf model ages of zircons from representative rocks in the Tonghua area

峰期集中在 2.6 Ga (图 7, 图 8), 反映其主要来自古老地壳物质的再循环。样品 TH43-1 (TTG 片麻岩) 锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 全部为正值, 变化介于 +1.87 ~ +7.30 之间 (图 7), 二阶段模式年龄介于 2 893 ~ 2 645 Ma (图 7, 图 8), 与一阶段模式年龄和锆石表观年龄相差不大, 反映其为来自亏损地幔的新生陆壳。

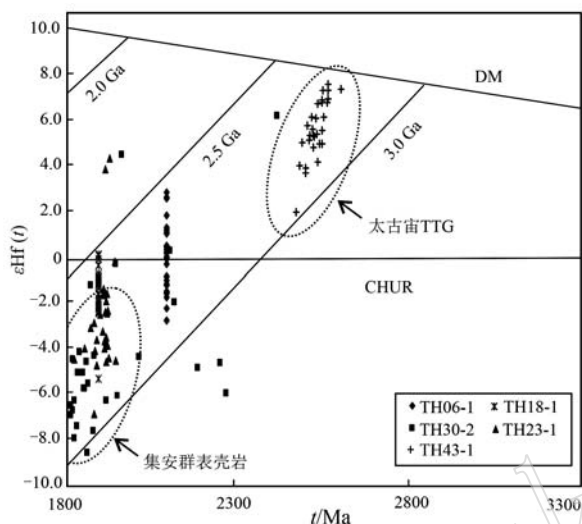


图 8 通化地区代表性岩石锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 演化图解

Fig. 8 Diagram of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ vs. t of zircons from representative rocks in the Tonghua area

6 讨论

6.1 集安群物质来源与沉积时限

关于集安群变质表壳岩的物质来源与沉积时代, 路孝平等 (2004) 和 Lu 等 (2006) 报道了集安群 4 个代表性片麻岩样品的锆石 U-Pb 定年数据, 结果显示, 透辉石片麻岩、变粒岩和石榴石片麻岩的碎屑锆石年龄集中在 2.2 ~ 2.0 Ga 之间, 少数在 2.5 Ga 以上, 3 个副片麻岩样品都给出了 1.83 Ga 左右的变质年龄, 作者认为集安群的沉积时限在 2.1 ~ 1.83 Ga 之间。秦亚等 (2014) 报道了一组集安群黑云变粒岩的锆石 U-Pb 定年数据, 碎屑锆石给出了 2.65 ~ 2.63 Ga、~2.5 Ga 和 2.19 ~ 2.16 Ga 3 组年龄数据, 其中 ~2.5 Ga 最为集中, 并有 1.88 ~ 1.87 Ga 的变质年龄记录, 作者认为太古代基底提供了主要物源, 并受到了古元古代岩浆事件的混染。近年, Meng 等 (2017a, 2017b) 对集安群变质火山岩开展锆石 U-Pb 定年显示, 存在 2 184 Ma、2 365 Ma、2 503 Ma 和 2 710 Ma 4 个碎屑锆石年龄峰值, 作者

认为其沉积时代为 2.18 Ga, 并遭受了 1.90 Ga 和 1.85 Ga 两阶段变质改造。Zhang 等 (2018) 对集安群 3 个岩组变质表壳岩的碎屑锆石 U-Pb 定年结果显示, 存在 2.57 ~ 2.41 Ga、2.23 ~ 2.09 Ga 和 2.04 ~ 2.02 Ga 3 个峰值区间, 并认为其沉积时代在 2.13 ~ 1.90 Ga 之间, 物源主要来自古元古代辽吉花岗岩。由此可见, 有关通化地区集安群的准确沉积时限以及沉积物来源, 目前并没有统一认识。

本文对集安群几种代表性变质表壳岩的锆石 U-Pb 定年结果显示 (表 1), 变质程度较低的含墨黑云变粒岩 (样品 TH26-1) 的碎屑锆石年龄最老, 并且在 ~2.5 Ga 左右呈现明显的峰值 (图 5a), 这与秦亚等 (2014) 的测试结果相同。位于谐和线上 8 个数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,522 \pm 21$ Ma, 表明该变质岩沉积物主要来源于新太古代的岩体剥蚀。尽管该岩石有大量锆石数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄分布在 2.3 ~ 2.0 Ga 之间, 但是多偏离谐和线 (图 5a), 可信度较低, 很可能是受后期热事件扰动的结果。变质程度较高的几件变质岩样品给出的碎屑锆石年龄与上述样品明显不同, 一方面岩石中碎屑锆石保留很少, 以至于绝大多数测点数据为变质年龄。如两件夕线石榴堇青片麻岩 (泥质麻粒岩) 样品共计分析了 96 个数据点, 其中大于 2.0 Ga 的碎屑锆石年龄不足 10 个。两件富钙岩石 (黑云透辉片麻岩和含墨大理岩) 样品则完全没有保留碎屑锆石年龄, 所有数据点年龄都低于 1.95 Ga, 属于变质改造年龄。另一方面, 这些高级变质岩石所获得的碎屑锆石年龄普遍低于 2.3 Ga, 很少保留太古代年龄记录。这种现象不仅本文所测年龄数据如此, 其他学者所测集安群锆石 U-Pb 年龄数据也呈现出类似的变化特征 (Lu *et al.*, 2006; Meng *et al.*, 2017a; Zhang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019)。这一方面表明其沉积物主要来自古元古代地质体, 更大原因可能还是与后期热事件改造有关。本区泥质麻粒岩中存在石榴石+夕线石+斜方辉石+条纹长石的特征矿物组合, 表明其峰期温度至少在 850℃ 以上 (李修亮, 2016; Cai *et al.*, 2017), 经历高温改造的锆石 U-Pb 体系必然会重置而偏离原始年龄信息。因此, 对于高级变质岩石, 利用碎屑锆石年龄判断其沉积时限是值得商榷的, 而用其判断物质来源则更要慎重。

由于锆石的 Lu-Hf 同位素体系相对于 U-Pb 体系封闭温度要高得多, 基本不受后期热事件改造影响, 因此被广泛用于判断物源归属 (吴福元等,

2007)。从本文对集安群代表性变质岩锆石 Hf 同位素的分析结果看,不论是夕线榴片麻岩,还是大理岩中的锆石都具有负的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值,二阶段 Hf 模式年龄都在 2.5 Ga 以上(表 2,图 7)。在 $\varepsilon\text{Hf}(t) - t$ 图解(图 8)上,绝大多数分析点均位于亏损地幔演化线之下的 3.0~2.5 Ga 地壳演化线之间,表明其物质主要来源于太古宙古老物质。这有两种可能:一种是直接接收太古宙地质体的剥蚀沉积物,另一种是接收由太古宙地壳重熔后形成的岩体剥蚀物。从集安群变质表壳岩碎屑锆石的年龄分布情况来看,低级变质的黑云变粒岩与含角闪石斜长片麻岩都以 2.5 Ga 碎屑锆石为主,并含有少量~2.1 Ga 的锆石(秦亚等, 2014; Meng *et al.*, 2017a; Zhang *et al.*, 2018)。同时,也有些黑云片麻岩样品呈现以~2.1 Ga 碎屑锆石为主,2.5 Ga 锆石含量较少的情况(Meng *et al.*, 2017a; Zhang *et al.*, 2018),说明不同层位岩石在接受沉积时,物源主体是有变化的。前文提过,本区古元古代片麻状花岗岩与集安群长英质片麻岩常常彼此交生,片麻理一致,野外并没有明显的分界线,反映二者曾共同经历变质、变形作用改造,说明集安群的沉积与这期花岗岩的侵入时代有可能是相近或稍晚。本文对片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果显示其侵入年龄为 2104 ± 18 Ma,因此可以限定集安群的沉积时限为~2.1 Ga 左右。由于岩体侵入初期规模较小,剥蚀量有限,造成早期沉积物源以太古宙 2.5 Ga 花岗质岩石为主,晚期沉积物以 2.1 Ga 花岗质岩石为主的不均匀分布现象。

6.2 集安群变质时代

相对于胶-辽-吉带上的荆山群和辽河群,有关集安群的变质时代资料并不是很多,但已报道变质锆石 U-Pb 年龄数据多数在 1.95~1.85 Ga 之间(路孝平等, 2004; Lu *et al.*, 2006; 秦亚等, 2014; 刘福来等, 2015; Liu *et al.*, 2017; Meng *et al.*, 2017a; Zhang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021),少部分在 1.85~1.80 Ga 之间(Liu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020)。还有部分学者通过独居石 U-Pb 定年,获得了大致相同的变质年龄区间(Liu *et al.*, 2017; Cai *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020)。这与胶-辽-吉活动带上的其他变质岩系,如胶东地区荆山群与粉子山群、五河地区五河群、辽东地区辽河群和朝鲜北部的南浦群、甄山群等所记录的变质年龄值大体相当(周喜文等, 2004; Wan *et*

al., 2006; Zhou *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011, 2012; Zhao *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; 刘福来等, 2015; 赵磊等, 2016),说明这期构造热事件贯穿了整个构造带。本文对集安群 5 件变质表壳岩样品的 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年结果亦显示记录了 1.95~1.80 Ga 变质改造年龄(图 4~图 6)。其中有 3 件样品记录两组变质年龄,分别是夕线石榴钾长片麻岩(样品 TH19-2)记录了 1910 ± 12 Ma 和 1854 ± 7 Ma,夕线石榴二长片麻岩(样品 TH30-2)记录了 1948 ± 16 Ma 和 1845 ± 12 Ma,含墨大理岩(样品 TH23-1)记录了 1905 ± 7 Ma 和 1812 ± 18 Ma。含墨变粒岩(样品 TH26-1)和黑云透辉片麻岩则只记录了一组变质年龄,分别为 1895 ± 45 Ma 和 1854 ± 8 Ma,总体呈现 1.95~1.90 Ga、1.90~1.85 Ga 和 1.85~1.80 Ga 3 个阶段演化,与前人报道的集安群变质年龄变化区间大体相当(Lu *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2015; Meng *et al.*, 2017a; Zhang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021)。至于是什么原因导致不同岩石记录的变质年龄不完全一致,可能主要还是与变质程度有关,同时体系中熔体的含量与移出程度也是重要因素之一(王伟等, 2014)。变质程度较低的含墨变粒岩只获得了 2 个变质锆石年龄数据(图 5a),变质程度较高的夕线石榴堇青片麻岩所获得绝大多数锆石数据为变质年龄(图 4a, 4c),富含钙质和流体的黑云透辉片麻岩和大理岩则全部为变质年龄数据(图 4e, 图 5c)。从变质年龄的分布区间看,1.90~1.85 Ga 区间数据呈现绝对高值,占据总量的 80%以上(图 4~图 6)。这种现象不仅集安群如此,在整个胶-辽-吉带上的深变质岩石都呈现如此特征,说明 1.90~1.85 Ga 是区域上变质锆石结晶的重要阶段(刘福来等, 2015)。

由于野外可见未变形的斑状花岗岩侵入集安群变质表壳岩现象,花岗岩中含有石榴石、夕线石、堇青石等富铝特征变质矿物,锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为负值,显示与富铝片麻岩高度同源的特点(图 8),很可能为其部分熔融的产物。本文对一件斑状花岗岩样品(TH18-1)的锆石 U-Pb 定年结果显示其侵入年龄为 1888 ± 8 Ma,与上述第二阶段变质年龄 1.90~1.85 Ga 高度重合。因此,可以认为 1.90~1.85 Ga 变质年龄应代表本区麻粒岩相变质峰期后,加厚地壳发生大规模垮塌、热松弛并引起大规模部分熔融作用的阶段。由于这期斑状花岗岩不仅在吉南地区,在相邻的辽东地区,以及南部的胶东地区均有不同程

度的出露, 侵位年龄集中在 1.88~1.85 Ga 之间(Lu *et al.*, 2006; 秦亚等, 2014; Liu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020), 因此对于 1.90~1.85 Ga 变质年龄指示意义的认识适用于整个胶-辽-吉带。

对于胶-辽-吉带上第一阶段 1.95~1.90 Ga 变质年龄的指示意义, 多数学者倾向于认为其代表麻粒岩相变质峰期或接近峰期时代(周喜文等, 2004; Luo *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012; Tam *et al.*, 2012; 刘福来等, 2015; 刘平华等, 2015; Wang *et al.*, 2017), 但多缺乏有效的依据。有学者依据锆石中所含显微矿物包体来限定其变质阶段, 将含有石榴石、单斜辉石、斜长石等矿物包体的确定为峰期阶段, 含有斜方辉石、夕线石、钾长石的确定为峰期后减压阶段(Liu *et al.*, 2012; 刘平华等, 2015)。这无疑是一个很好的尝试, 在超高压变质岩研究中已有很多成功先例(Liu *et al.*, 2010)。但是该方法未必适用于高压麻粒岩, 原因在于高压麻粒岩相属于中压相系(魏春景等, 2021), 标定其温压条件的是“石榴石+单斜辉石+斜长石+石英”矿物组合(Green and Ringwood, 1967), 单个矿物并不具有超高压变质岩石中绿辉石、柯石英、金刚石所呈现的指示特征。由于单斜辉石在高压麻粒岩相、中压麻粒岩相、甚至角闪岩相阶段都是稳定存在的, 很难依靠它限定变质阶段。事实上, 胶北地块含有单斜辉石包体的锆石颗粒与含有斜方辉石包体的锆石颗粒所给出变质年龄都在 1.90~1.85 Ga 之间, 并没有明显的差距(刘平华等, 2015)。因此, 对于高压麻粒岩相变质峰期阶段时代的确定还存在很大不确定性。

最近 20 年, 随着热力学计算软件和矿物固溶体活度模型的改进, 使得通过计算定量相图模拟岩石变质演化过程成为可能(魏春景等, 2003)。特别是通过含 Zr 体系的定量相图, 可以模拟随温、压变化锆石的消耗与产出过程(Kelsey and Powell, 2011; 张颖慧等, 2013; Wang *et al.*, 2014; 王伟等, 2014)。一般来说, 进变质过程中随着温度升高超越饱和水固相线, 岩石将发生部分熔融, 导致体系中熔体比例逐渐增加(White *et al.*, 2001; Brown, 2007; 魏春景等, 2017)。若熔体不发生丢失, 岩石中的锆石将逐渐消耗进入熔体, 并在 850℃ 时完全消失, 因此进变质过程一般不会生成变质锆石(Kelsey and Powell, 2011; Wang *et al.*, 2014)。但是, 由于岩石体系并不完全封闭, 在变质过程中经

常会发生熔体移出现象, 导致原有锆石的稳定温度增高, 并不会被完全消耗(王伟等, 2014)。这也使得我们有机会在麻粒岩相变质岩石中看到保存较好的碎屑锆石。至于碎屑锆石保留多少, 则与变质温度和体系熔体残留比例密切相关(王伟等, 2014)。对于变质锆石, 则主要通过降温过程中熔体中含锆组分的结晶形成, 因此其只能反映麻粒岩地体的降压冷却时代(张颖慧等, 2013; 王伟等, 2014)。但是, 并不是所有麻粒岩样品都能发育变质锆石。周喜文等(2009)在对贺兰山高压泥质麻粒岩开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年过程中, 发现只有 1 件样品(HL0706)发育了变质增生锆石, 并给出 1.95 Ga 的变质改造年龄。其余两件样品则基本没有变质锆石, 而保留大量岩浆锆石。说明样品 HL0706 在进变质过程中熔体逃出比例适当, 得以既保留了碎屑锆石残核, 降温过程中又有变质锆石结晶。另两件样品则可能从开始熔体就不断逃逸, 导致原有锆石不会被消耗而得以保留, 降温过程中也没有新的变质锆石结晶。

由于胶-辽-吉带的变质岩系最高变质程度都达到了麻粒岩相以上, 野外普遍可见长英质脉体顺层产出现象, 表明变质过程中均不同程度地有熔体产生和移出现象。既然定量相图模拟计算结果显示变质锆石主要形成于降温过程中(Kelsey and Powell, 2011; 张颖慧等, 2013; Wang *et al.*, 2014; 王伟等, 2014), 笔者认为第一阶段 1.95~1.90 Ga 变质年龄反映的也应是麻粒岩地体的抬升冷却时代。从胶-辽-吉活动带已发表年龄数据看, 除了变质程度相对较低的北辽河群、老岭群报道较多该期变质锆石 U-Pb 年龄外(Luo *et al.*, 2004, 2008; Li and Zhao, 2007; Meng *et al.*, 2017a, 2017b), 在其余深变质岩系中都占据少数(刘福来等, 2015)。之所以如此, 可能与浅变质岩系在热构造运动中所处层位较浅, 因而可以更早抬升冷却。达到麻粒岩相的深变质岩系, 处于中下地壳层位, 其抬升必然经历更长时间。随着降温过程, 熔体中变质锆石逐步结晶生长, 初期(1.95~1.90 Ga)含量较少, 后期(1.90~1.85 Ga)伴随花岗质脉体进入冷凝阶段, 变质锆石也会集中产出。至于区域变质岩系中出现的第 3 阶段 1.85~1.80 Ga 变质年龄, 则可能与变质地体抬升到更浅层次的构造运动有关。

6.3 花岗质岩石成因及其与变质表壳岩的关系

吉南地区出露的前寒武纪花岗质岩石主要有 3

类,包括太古宙 TTG 片麻岩、古元古代片麻状花岗岩和斑状花岗岩。对于太古宙 TTG 片麻岩,李俊建等(1996, 1998, 2000)最早曾对清源地区出露的岩石开展地球化学与单颗粒锆石 U-Pb 定年工作,确定其时代为 2.58~2.51 Ga,具有大陆边缘弧属性特征。同一地区,万渝生等(2005)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,确定其时代为 2.55~2.50 Ga,并存在 2.47 Ga 的变质事件,反映弧陆增生作用。随后,陆续又有学者针对通化、靖宇和和龙等地出露的太古宙绿岩带与 TTG 片麻岩开展锆石 U-Pb、Lu-Hf 定年工作,得出认识大体相当,认为吉林南部这套 TTG 片麻岩主成岩期为 2.6~2.5 Ga,局部为 2.7 Ga,具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,形成于大陆边缘弧环境(Guo *et al.*, 2016, 2017; 王朝阳等, 2017, 2018)。本文对采自通化西部新宾附近的 1 件角闪斜长片麻岩(样品 TH43-1)的锆石 U-Pb 定年结果显示其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 2 654~2 512 Ma 之间,数据点基本都在谐和线上,加权平均年龄为 $2\,574\pm 11$ Ma,与前人报道的区域 TTG 片麻岩成岩年龄大体相当。锆石 Hf 同位素显示其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(1.87~7.3)全部为正(图 7),二阶段模式年龄介于 2.89~2.60 Ga 之间(图 7,图 8),集中在 2.7 Ga 左右,反映曾存在大规模的陆壳增生事件,这与全球太古宙的大规模陆壳发育时间一致(Condie, 2000; Zhai and Santosh, 2011)。目前所出露的大规模 2.60~2.50 Ga TTG 片麻岩应为这期新生陆壳物质发生重熔作用的产物。值得关注是,几个高正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(大于 7.0)的二阶段模式年龄值与其实测 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值在误差范围内基本一致,在 2 650~2 600 Ma 之间,反映其直接来源于亏损地幔,表明来自于深部的地壳增生事件一直延续到 2.6 Ga。尽管有不少学者倾向于认为华北克拉通东北缘 TTG 片麻岩成因与新太古代末期弧-陆碰撞事件有关(李俊建等, 1998, 2000; 万渝生等, 2005; Guo *et al.*, 2016, 2017; 王朝阳等, 2017, 2018)。但是由于这方面证据多来自于对地球化学数据的解译,往往缺少直接的地质证据支持,以至于很多现象用碰撞模式难以解释,如吉南地区太古宙花岗岩质岩石中广泛发育的穹窿-龙骨构造(Wu and Wei, 2021)、同期变质表壳岩记录逆时针样式的 pT 演化轨迹(葛文春等, 1994; Ge *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2013; Wu and Wei, 2021)和短时间内(~2.5 Ga)巨量花岗质物质的形成等等。另一方面,具有现代板块运动特点俯冲作用是在新元古代后才出现

的(Zhai and Peng, 2020),其所呈现的岛弧岩浆特征能否应用于早前寒武纪地质依然存在很大争议。因此,本文与很多学者一样,倾向于用地幔柱模式解释吉南地区新太古代末大规模 TTG 片麻岩的成因问题(赵国春, 2009; Geng *et al.*, 2012; Wu K K *et al.*, 2013; Wu M L *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2021)。

出露于吉南地区的片麻状花岗岩是胶-辽-吉带北部 2.1 Ga 辽吉花岗岩的重要组成部分(张秋生等, 1988; Sun *et al.*, 1993; 李三忠等, 1997; Li *et al.*, 2007)。路孝平等(2004, 2005)利用离子探针 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年技术获得该花岗岩的成岩年龄为 2.16 Ga,并依据地球化学数据认为其为铝质 A 型花岗岩,形成于拉张盆地底部,并作为基底接受集安群表壳岩的沉积。秦亚等(2014)利用 LA-ICP-MS 获得区内片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 2.18~2.13 Ga,依据地球化学特征判断其属于 A 型花岗岩,形成于大陆裂谷环境。本次对清河区片麻状花岗岩(样品 TH06-1)的锆石 U-Pb 定年结果表明,其最大谐和年龄为 $2\,137\pm 14$ Ma,加权平均年龄为 $2\,104\pm 18$ Ma,与前人定年结果基本一致,表明这期花岗岩的侵位时代在 2.18~2.10 Ga 之间。锆石 Hf 同位素分析结果显示,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围很窄,介于-2~+2 之间,模式年龄主要在 2.8~2.7 Ga(图 7)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 演化图解上(图 8),其与集安群变质表壳岩混杂在一起,显示同源特征。据此推断,通化地区的这期片麻状钾长-二长花岗岩为原地重熔型花岗岩,其来源既有新生的太古代 TTG 片麻岩,也有变质表壳岩,形成环境相当于裂谷盆地。其与集安群的沉积时代大体相同,并在盆地拉开后为其提供了部分物源。

关于胶-辽-吉带古元古代末期的斑状花岗岩,在辽东、吉南地区出露非常广泛,以含巨大钾长石斑晶为特征,局部含石榴石,通化地区同时见有夕线石、堇青石等富铝矿物,显示与富铝片麻岩有很强的成因关系(刘福来等, 2015; Liu *et al.*, 2017)。对于通化地区的斑状石榴石花岗岩,多名学者曾对其开展过工作,获得其锆石 U-Pb 年龄为 1.89~1.85 Ga,并依据地球化学数据判断其为 S 型花岗岩,形成于造山后或同造山环境(路孝平等, 2005; 秦亚等, 2014; 杨明春等, 2015; 王朝阳等, 2017; Liu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020)。本文对通化地区斑状含石榴石花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果显示,样品 TH18-1 年龄值为 $1\,888\pm 8$ Ma,这与前人的

测试结果一致。同时,样品中包含 1 颗 2159 ± 22 Ma 的捕获锆石年龄,显示来自于上述片麻状花岗岩。锆石 Hf 同位素分析结果显示(表 2),通化地区斑状花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较窄,且绝大多数为负值,模式年龄在 2.7~2.6 Ga 之间(图 7)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 演化图解上(图 8),其多与集安群变质表壳岩混杂在一起,显示同源特征。由于该花岗岩侵入了集安群变质表壳岩,并且自身没有遭受任何变形改造,推测其形成于造山后拉伸环境下,由于加厚地壳发生热松弛垮塌,导致大规模部分熔融形成。

6.4 构造指示意义

胶-辽-吉带作为华北克拉通东部的重要构造带,尽管对其成因和构造演化过程存在较大争议,但对一些基本地质事实大家都认可。首先,这条活动带从北到南发育了巨量的变质沉积建造,包括辽河群(南、北)、集安群(含老岭群)、荆山群(含粉子山群)和五河群等,它们都大致呈现下部火山碎屑、中部泥砂质、上部大理岩的沉积建造,其中变质火山建造具有双峰式特点;第二,这套建造在 1.95~1.85 Ga 期间普遍遭受了绿片岩相-角闪岩相、局部麻粒岩相(甚至高压麻粒岩相)的变质改造,具有顺时针样式的 pT 演化轨迹,反映其经历了碰撞造山过程(刘福来等, 2015);第三,普遍发育一套 2.2~2.0 Ga 片麻状(或条痕状)花岗岩和基本同期的基性岩墙群,花岗岩主体呈现碱性(A 型)非造山特征,个别呈现埃达克质钙碱性特征,且都遭受了 1.95~1.85 Ga 构造热事件的改造(李三忠等, 2005; Li *et al.*, 2011; 刘福来等, 2015; 王朝阳等, 2017; Liu J *et al.*, 2018, 2020; Liu J H *et al.*, 2021);第四,发育一套 1.88~1.85 Ga 的斑状钾长花岗岩,未遭受任何变形改造,具有 S 型、后造山特征,野外可见该期花岗岩侵入了同时代的变质表壳岩(Liu *et al.*, 2017)。由此可见,胶-辽-吉构造带一定是一条重要的板块边界缝合带,否则难以造成长达上千公里的沉积建造在相同时间内遭受相近的变质作用改造(Zhao *et al.*, 2005)。至于这条构造带是板内裂谷闭合带还是弧-陆或陆-陆碰撞造山带,目前还很难得出确切结论。早期 2.2~2.0 Ga 出现的双峰式火山建造、碱性(A 型)花岗岩、基性岩墙群和稳定的海侵系列沉积,表明当时为一个大陆拉张环境。本文对集安群变粒岩碎屑锆石 U-Pb 定年,以及其他学者对老岭群和辽河群某些层位的碎屑锆石定年

结果都显示 2.5 Ga 呈现一个绝对峰值(Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2018),表明开始是在太古代基底上接收沉积并提供物源。随后转为滨浅海相泥砂质和大理岩沉积,物源逐渐变为 2.2~2.0 Ga 时期为主,这种沉积建造与裂谷盆地的发育过程吻合。虽然弧后盆地也可以接受陆缘碎屑沉积,但是其所形成的弧岩浆岩必然是随年代连续变化的,不会在某一区间内集中爆发。后期 1.95~1.85 Ga 呈带状分布的麻粒岩相变质岩石、顺时针样式 pT 演化轨迹和一系列同碰撞、后碰撞花岗岩的产出具有明显碰撞造山带演化特点,其与早期裂谷发育可能不属于同一期构造热事件。可是如果籍此认为古元古代晚期构造环境为活动大陆边缘,又缺少岛弧环境下普遍发育的构造增生杂岩。因此,正如刘福来等(2015)对胶-辽-吉带全面总结所认识的那样,其在几亿年时间跨度上经历了异常复杂的构造演化过程,很难用某一个单一构造模式进行全面解释。

7 结论

(1) 通化地区集安群变质表壳岩碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现 2.5 Ga 与 2.1 Ga 两个明显的主峰,且不同类型变质岩石中碎屑锆石的年龄分布并不一致,变质程度较低的含墨变粒岩碎屑锆石年龄集中在 2.5 Ga 左右,反映主要来自新太古代地质体,变质程度较高的夕线石榴堇青片麻岩、透辉片麻岩和大理岩碎屑锆石含量很少,且普遍遭受了变质改造,难以反映真实的物源时代。

(2) 集安群变质锆石年龄主要呈现 1.95~1.90 Ga、1.90~1.85 Ga 和 1.85~1.80 Ga 3 个阶段,根据定量相图模拟的变质锆石与熔体的产出关系,推断第 1 阶段年龄代表了变质地体抬升降温初期,第 2 阶段年龄代表了抬升降温后期大规模熔体冷凝结晶时代,第 3 阶段则与地体进一步抬升到地壳浅部层次的构造运动有关。

(3) 通化地区太古宙角闪斜长片麻岩(TTG)的侵位时代为 2574 ± 11 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 1.87~7.3 之间,二阶段模式年龄介于 2.89~2.60 Ga 之间,显示为新生地壳部分熔融产物。片麻状二长花岗岩的侵位时代为 2104 ± 18 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -2~+2 之间,模式年龄介于 2.8~2.7 Ga 之间,显示为新生地壳与古老表壳岩共同熔融产物。未变

形斑状石榴石花岗岩的侵位时代为 1888 ± 8 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-5.43 \sim +0.03$, 模式年龄介于 2.7~2.5 Ga 之间, 显示主要为古老表壳岩重熔产物。

(4) 集安群变质表壳岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-12.4 \sim +6.17$ 之间, 主峰在 $-8 \sim -2$ 之间, 二阶段模式年龄介于 3.0~2.3 Ga 之间, 并且与太古宙 TTG 片麻岩和古元古代片麻状花岗岩具有同源演化特点。

(5) 胶-辽-吉带早期 2.3~2.0 Ga 期间呈现典型大陆裂谷发育特征, 晚期 1.95~1.85 Ga 期间呈现碰撞造山带演化特点, 二者可能分属不同的构造热事件。

致谢 感谢中国地质大学(北京)地球科学研究所苏犁教授和天津地质调查中心李怀坤研究员在锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析过程中给予的帮助。感谢匿名审稿人对文章初稿提出的建设性意见。

谨以此文恭祝沈其韩院士百岁寿诞。作为晚辈, 我是从阅读沈先生著作的《中国早前寒武纪麻粒岩》开始步入前寒武纪地质与变质岩石学专业。后来有幸在同一单位工作, 能够近距离聆听先生的教诲和指导, 使我受益匪浅。特别是先生对地质事业的热爱和一丝不苟的科研精神, 以 90 多岁高龄仍然坚持发表学术论文, 永远是我们学习的榜样!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Bai Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 36: 83~130.
- Cai J, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2017. Discovery of granulite-facies metamorphic rocks in the Ji'an area, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Metamorphic *P-T* evolution and geological implications [J]. *Precambrian Research*, 303: 626~40.
- Cai J, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2019. Metamorphic *P-T* evolution and tectonic implications of pelitic granulites in the Ji'an area, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104~97.
- Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: After thoughts and extensions [J]. *Tectonophysics*, 322: 153~162.
- Chen B, Li Z, Wang J L, *et al.* 2016. Liaodong peninsula ~2.2 Ga Magmatic event and its geologic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 303~320 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Lin W, Monie P, *et al.* 2004. Paleoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China) [J]. *Terra Nova*, 16: 75~80.
- Ge Wenchun, Sun Deyou, Wu Fuyuan, *et al.* 1994. The metamorphic *p-T* path of Archean granulites in Huadian area, Jilin Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4): 309~318 (in Chinese with English abstract).
- Ge W C, Zhao G C, Sun D Y, *et al.* 2003. Metamorphic *P-T* path of the Southern Jilin Complex: Implications for tectonic evolution of the eastern block of the North China Craton [J]. *International Geology Review*, 45: 1029~1043.
- Geng Y S, Du L L and 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.
- Green D H and Ringwood A E. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 767~833.
- Guo B R, Liu S W, Santosh M, *et al.* 2017. Neoproterozoic arc magmatism and crustal growth in the northeastern North China craton: Evidence from granitoid gneisses in the southern Jilin Province [J]. *Precambrian Research*, 303: 30~53.
- Guo B R, Liu S W, Zhang J, *et al.* 2016. Neoproterozoic Andean-type active continental margin in the northeastern North China craton: Geochemical and geochronological evidence from metavolcanic rocks in the Jiapigou granite-greenstone belt, southern Jilin Province [J]. *Precambrian Research*, 285: 147~169.
- He Gaopin and Ye Huiwen. 1998. Two types of early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 25~35 (in Chinese with English abstract).
- Kelsey D E and Powell R. 2011. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{ZrO}_2$ system [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 151~166.
- Li Junjian and Shen Baofeng. 2000. Geochronology of Precambrian conti-

- ment crust in Liaoning Province and Jilin Province[J]. *Progress in Precambrian Research*, 23(4): 242~249(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Shen Baofeng and Li Shuangbao. 1996. Geology and geochemistry of archean granite-greenstone belts in northern Liaoning Province and southern Jilin Province[J]. *Geochimica*, 25(5): 458~466(in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Shen Baofeng, Li Shuangbao, *et al.* 1998. Geological feature and evolution of the early Precambrian continental crust in Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province[J]. *Regional Geology of China*, 17: 30~38(in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong and Yang Zhensheng. 1997. Types and genesis of paleoproterozoic granites in the Jiao-Liao massif[J]. *Northwestern Geology*, 18(3): 21~26(in Chinese with English abstract).
- Li S Z and Zhao G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 158: 1~16.
- Li S Z, Zhao G C, Santosh M, *et al.* 2011. Palaeoproterozoic tectono-thermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A review[J]. *Geological Journal*, 46: 525~543.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohé assemblages in the Eastern Block of the North China Craton[A]. Wilde S A and Zhao G C. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton[C]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 659~674.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2006. Are the Southern and North Liaohé groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints[J]. *Gondwana Research*, 9: 198~208.
- Li Xiuliang. 2016. Metamorphic Evolution and Genesis of the Ji'an Group in the Tonghua Region, Jilin Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Liu C H, Liu P H, *et al.* 2017. Geochemistry, U-Pb dating, and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 300: 78~106.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 816~2 846 (in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Robinson P T, Gerdes A, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages, REE concentrations and Hf isotope compositions of granitic leucosome and pegmatite from the north Sulu UHP terrane in China: Constraints on the timing and nature of partial melting[J]. *Lithos*, 117: 247~268.
- Liu J, Zhang J, Liu Z H, *et al.* 2018. Geochemical and geochronological study on the Paleoproterozoic rock assemblage of the Xiuyan region: New constraints on an integrated rift-and-collision tectonic process involving the evolution of the Jiao-Liao-Ji belt, North China craton[J]. *Precambrian Research*, 310: 179~197.
- Liu J, Zhang J, Yin C Q, *et al.* 2020. Synchronous A-type and adakitic granitic magmatism at ca. 2.2 Ga in the Jiao-Liao-Ji belt, North China craton: Implications for rifting triggered by lithospheric delamination[J]. *Precambrian Research*, 342: 105629.
- Liu J H, Wang X J and Chen H. 2021. Intracontinental extension and geodynamic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt, North China craton: Insights from coeval A-type granitic and mafic magmatism in eastern Liaoning Province[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 133: 1 765~1 792.
- Liu P H, Liu F L, Yang H, *et al.* 2012. Protolith ages and timing of peak and retrograde metamorphism of the high pressure granulites in the Shandong Peninsula, eastern North China Craton[J]. *Geoscience Frontiers*, 3: 923~943.
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2015. *P-T-t* paths of the multiple metamorphic events of the Jiaobei terrane in the southeastern segment of the Jiao-Liao-Ji belt (JLJB), in the north china craton: Implication for formation and evolution of the JLJB[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 889~2 941(in Chinese with English abstract).
- Liu P H, Liu F L, Tian Z H, *et al.* 2019. Petrological and geochronological evidence for Paleoproterozoic granulite facies metamorphism of the South Liaohé Group in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 327: 121~143.
- Lu Liangzhao, Xu Xuechun and Liu Fulai. 1996. Early Precambrian Khondalite Series in North China[M]. Changchun: Changchun Publishing House(in Chinese).
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, *et al.* 2004. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 381~392(in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Guo Jinghui, *et al.* 2005. Late Paleoproterozoic granitic magmatism and crustal evolution in the Tonghua region, northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 721~736(in Chinese with English abstract).
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern

- block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146(3~4): 138~164.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohé Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134: 349~371.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohé Groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 163: 279~306.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2014. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 247: 92~109.
- Meng E, Wang C Y, Li Z, *et al.* 2017a. Palaeoproterozoic metasedimentary rocks of the Ji'an Group and their significance for the tectonic evolution of the northern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Geological Magazine*, <https://doi.org/10.1017/S0016756817000632>.
- Meng E, Wang C Y, Yang H, *et al.* 2017b. Paleoproterozoic metavolcanic rocks in the Ji'an Group and constraints on the formation and evolution of the northern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, China[J]. *Precambrian Research*, 294: 133~150.
- Peng Q M and Palmer M R. 1995. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporate[J]. *Precambrian Research*, 72: 185~197.
- Qin Ya, Chen Dandan, Liang Yihong, *et al.* 2014. Geochronology of Ji'an Group in Tonghua area, Southern Jilin Province[J]. *Earth Sciences*, 39(11): 1 487~1 499 (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).
- Sun M, Armstrong R L, Lambert R S, *et al.* 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of Palaeoproterozoic Kundian Complex, the eastern Liaoning Province, China[J]. *Precambrian Research*, 62: 171~190.
- Tam P Y, Zhao G C, Liu F L, *et al.* 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 19: 150~162.
- Tam P Y, Zhao G C, Zhou X W, *et al.* 2012. Metamorphic *P-T* path and implications of high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 22: 104~117.
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen[J]. *Precambrian Research*, 152: 48~82.
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectono-thermal event[J]. *Precambrian Research*, 149: 249~271.
- Wan Yusheng, Song Biao, Yang Chun, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan Area, Liaoning Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78~87 (in Chinese with English abstract).
- Wang A D, Liu Y C, Santosh M, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes from the metamorphic basement in the Wuhe Complex: Implications for Neoproterozoic active continental margin along the southeastern North China Craton and constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids[J]. *Geoscience Frontiers*, 4: 57~71.
- Wang Chaoyang, Meng En, Li Zhuang, *et al.* 2017. Age and petrogenesis of Middle-Late Paleoproterozoic potassium-rich granitic rocks in southeastern Jilin and their constraints on regional tectonic evolution [J]. *Global Geology*, 36(4): 1 031~1 052 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chaoyang, Meng En, Li Zhuang, *et al.* 2018. Age, petrogenesis and their constraints on regional crustal evolution of the Late Neoproterozoic granitic gneisses in Tonghua area in southeast of Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(3): 587~625 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2017. In situ zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metasedimentary rocks from South Liaohé Group, Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Constraints on the depositional and metamorphic ages, and implications for tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 303: 764~780.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohé Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 322~1 334 (in Chinese with English abstract).
- Wang X H, Oh C W, Lee B C, *et al.* 2020. Paleoproterozoic postcollisional metamorphic and igneous activities in the Jinan area of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton and their tectonic impli-

- cations[J]. *Precambrian Research*, 346: 105793.
- Wang Xiaohan, Oh C W, Wang Xinping, *et al.* 2021. The ~1.87 Ga granulite facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt and its tectonic implications[J]. *Lithos*, 392~393: 106081.
- Wang Wei, Wei Chunjing, Liu Xiaochun, *et al.* 2014. Modelling of melt composition and zircon behaviour during anatexis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3 075~3 084 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Dunkley E, Clarke G L, *et al.* 2014. The evolution of zircon during low-P partial melting of metapelitic rocks: Theoretical predictions and a case study from Mt. Stafford, central Australia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32: 791~808.
- White R W, Powell R and Holland T J B. 2001. Calculation of partial melting equilibria in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (NCKFMASH) [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 139~153.
- Wu Ding and Wei Chunjing. 2021. Metamorphic evolution of two types of garnet amphibolite from the Qingyuan terrane, North China Craton: Insights from phase equilibria modelling and zircon dating[J]. *Precambrian Research*, 355: 106091.
- Wu K K, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2013. Metamorphism of the northern Liaoning Complex: Implications for the tectonic evolution of Neoproterozoic basement of the Eastern Block, North China Craton evolution of Neoproterozoic basement of the Eastern Block, North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 4: 305~320.
- Wu M L, Lin S F, Wan Y S, *et al.* 2016. Crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of the Northern Liaoning Complex [J]. *Precambrian Research*, 275: 35~47.
- Wei Chunjing and Zhou Xiwen. 2003. Progress in the study of metamorphic phase equilibrium[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 341~351 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing, Guan Xiao and Dong Jie. 2017. HT-UHT metamorphism of metabasites and the petrogenesis of TTGs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 381~1 404 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing, Zhang Yuanyuan and Dong Jie. 2021. Some advances and research approaches on granulite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(1): 52~64 (in Chinese with English abstract).
- Xu W and Liu F L. 2019. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 193: 162~198.
- Yang Mingchun, Chen Bin and Yan Cong. 2015. Petrological, geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Shuangcha Paleoproterozoic megaporphyritic granite in the southern Jilin Province: Tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 573~1 588 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Peng P. 2020. Origin of early continents and beginning of plate tectonics[J]. *Science Bulletin*, 65: 970~973.
- 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 Qiusheng and Yang Zhensheng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang W, Liu F L, Cai J, *et al.* 2018. Geochemistry, zircon U-Pb dating and tectonic implications of the Paleoproterozoic Ji'an and Laoling groups, northeastern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 314: 264~87.
- Zhang Yinghui, Wei Chunjing, Tian Wei, *et al.* 2013. Reinterpretation of metamorphic age of Hengshan Complex, North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(34): 3 589~3 596 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion [J]. *Precambrian Research*, 222~223: 55~76.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao Lei, Zhang Yanbin, Wu Fuyuan, *et al.* 2016. Paleoproterozoic high temperature metamorphism and anatexis in the northwestern Korean Peninsula: Constraints from petrology and zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3 045~3 069 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X W, Wei C J, Geng Y S, *et al.* 2004. Discovery and implications of high pressure pelitic granulite from the north Jiaodong, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1 942~1 948.
- Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, *et al.* 2008. Metamorphic evolution and Th-U-Pb zircon and monazite geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton[J]. *American Journal of Sciences*, 308: 328~350.
- Zhou Xiwen and Geng Yuansheng. 2009. Metamorphic age of the Khondalite series in the Helanshan Region: Constraints on the Evolution of the Western block in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 843~1 852 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白瑾. 1993. 华北地台北缘前寒武纪地质与铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈斌, 李壮, 王家琳, 等. 2016. 辽东半岛~2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义[J]. 岩石学报, 32(2): 303~320.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 1 508~1 513.
- 贺高品, 叶慧文. 1998. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. 岩石学报, 14(2): 152~162.
- 葛文春, 孙德有, 吴福元, 等. 1994. 吉林桦甸地区太古宙麻粒岩变质作用的 *P-T* 轨迹[J]. 岩石矿物学杂志, 13(4): 309~318.
- 李俊建, 沈保丰. 2000. 辽吉地区早前寒武纪大陆地壳的地质年代代表[J]. 前寒武纪研究进展, 23(4): 242~249.
- 李俊建, 沈保丰, 李双保. 1996. 辽北-吉南地区太古宙花岗岩-绿岩带[J]. 地质地球化学, 25(5): 458~466.
- 李俊建, 沈保丰, 李双保, 等. 1998. 辽北-吉南早前寒武纪大陆壳的地质特征和演化[J]. 中国区域地质, 17: 30~38.
- 李三忠, 杨振生. 1997. 胶辽地块古元古代花岗岩类型及成因[J]. 西北地质, 18(3): 21~26.
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. 岩石学报, 31(10): 2 816~2 846.
- 李修亮. 2016. 吉林通化地区集安群变质演化与成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 2015. 胶北地体多期变质事件的 *P-T-t* 轨迹及其对胶-辽-吉带形成与演化的制约[J]. 岩石学报, 31(10): 2 889~2 941.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方孔兹岩系成因[M]. 长春: 长春出版社.
- 路孝平, 吴福元, 郭敬辉, 等. 2005. 通化地区古元古代晚期花岗质岩浆作用与地壳演化[J]. 岩石学报, 21(3): 721~736.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景[J]. 岩石学报, 20(4): 381~392.
- 秦亚, 陈丹丹, 梁一鸿, 等. 2014. 吉林南部通化地区集安群的年代学[J]. 地球科学, 39(11): 1 487~1 499.
- 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.
- 万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 2005. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地质学报, 79(1): 78~87.
- 王朝阳, 孟恩, 李壮, 等. 2017. 吉林东南部古元古代中-晚期富钾花岗质岩石的时代、成因及其对区域构造演化的制约[J]. 世界地质, 36(4): 1 031~1 052.
- 王朝阳, 孟恩, 李壮, 等. 2018. 吉东南新太古代晚期片麻岩类的时代、成因及其对早期地壳形成演化的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(3): 587~625.
- 王惠初, 陆松年, 初航, 等. 2011. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1 322~1 334.
- 王伟, 魏春景, 刘晓春, 等. 2014. 深熔过程中熔体成分与锆石行为模拟计算[J]. 岩石学报, 30(10): 3 075~3 084.
- 魏春景, 周喜文. 2003. 变质相平衡的研究进展[J]. 地学前缘, 10(4): 341~351.
- 魏春景, 关晓, 董杰. 2017. 基性岩高温-超高温变质作用与 TTG 质岩成因[J]. 岩石学报, 33(5): 1 381~1 404.
- 魏春景, 张媛媛, 董杰. 2021. 麻粒岩的研究进展与方法[J]. 岩石学报, 37(1): 52~64.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 杨明春, 陈斌, 闫聪. 2015. 吉南地区古元古代双岔巨斑状花岗岩成因及其构造意义: 岩石学、年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 31(6): 1 573~1 588.
- 张秋生, 杨振升. 1988. 辽东半岛早期地壳演化与矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 张颖慧, 魏春景, 田伟, 等. 2013. 华北克拉通中部带恒山杂岩变质年龄的重新认识[J]. 科学通报, 58(34): 3 589~3 596.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1 772~1 792.
- 赵磊, 张艳斌, 吴福元, 等. 2016. 朝鲜半岛西北部古元古代高温变质-深熔作用: 宏观和微观岩石学以及锆石 U-Pb 年代学制约[J]. 岩石学报, 32(10): 3 045~3 069.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 等. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 49(14): 1 424~1 430.
- 周喜文, 耿元生. 2009. 贺兰山孔兹岩系的变质时代及其对华北克拉通西部陆块演化的制约[J]. 岩石学报, 25(8): 1 843~1 852.