

# 华北吕梁地区汉高山群和小两岭组的地层时代

## ——火山岩锆石 U-Pb 年龄的约束

王彦斌<sup>1</sup>, 宋彪<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 焦永艳<sup>1</sup>, 任留东<sup>2</sup>, 杨崇辉<sup>2</sup>, 何碧竹<sup>2</sup>,  
彭阳<sup>2</sup>, 姚宇凯<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所 北京离子探针中心, 北京 100037; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;  
3. 山西省地质调查院, 山西太原 030006)

**摘要:** 华北吕梁地区出露的以陆源碎屑沉积为主的汉高山群为中元古界底界层型的理想候选剖面,其时代的确定对认识华北前寒武纪地质演化历史及初始盖层的确定及 Nuna 超大陆聚散的研究具有重要的意义。目前,汉高山群的时代、划分对比及其意义还存在较大争议。本研究使用 SHRIMP(二次离子质谱仪)对汉高山群安山岩中的锆石进行了 U-Pb 同位素分析,获得其<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄加权平均值为  $1\,769\pm 9\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ )。这是首次直接测得汉高山群锆石 U-Pb 年龄。另测得同一层位的小两岭组 3 个不同部位火山岩中的锆石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄加权平均值分别为  $1\,792\pm 18\text{ Ma}$ 、 $1\,773\pm 19\text{ Ma}$  和  $1\,778\pm 20\text{ Ma}$ ,与汉高山群的年龄在误差范围内一致,故认为汉高山群和小两岭组的时代分别为  $1\,769\pm 9\text{ Ma}$  和  $1\,792\sim 1\,773\text{ Ma}$ 。结合前人的研究资料,认为汉高山群和小两岭组的形成时代为  $1\,780\text{ Ma}$  左右。吕梁地区汉高山群的剖面地层连续,发育区域上分布较为稳定的安山岩,是华北克拉通中南部极好的区域等时标志层。该时期的裂谷沉积和火山岩在扬子陆块西部、劳伦大陆西北部、澳大利亚北部、南美巴西圣弗兰西斯科(São Francisco)克拉通、非洲刚果克拉通及西伯利亚克拉通均有产出,且可以对比,显示同时期由 Nuna 超大陆初始裂解引起的陆内裂谷沉积地层的全球分布特征,由此提出国际中元古界底界应该下移,并且汉高山剖面可作为国际上新的中元古界底界的候选层型剖面。

**关键词:** 汉高山群; 小两岭组; 火山岩; SHRIMP; 锆石 U-Pb 年龄; 中元古界底界

中图分类号: P583.14; P597+.3; P534.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0195-19

## Timing of the Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation in the Lüliang area, North China: Constraints from zircon U-Pb ages of volcanic rocks

WANG Yan-bin<sup>1</sup>, SONG Biao<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, JIAO Yong-yan<sup>1</sup>, REN Liu-dong<sup>2</sup>, YANG Chong-hui<sup>2</sup>,  
HE Bi-zhu<sup>2</sup>, PENG Yang<sup>2</sup> and YAO Yu-kai<sup>3</sup>

(1. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;  
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Exposed in the Lüliang area, North China, the Hangaoshan Group is dominated by terrigenous clastic deposits and bear an ideal candidate section for the stratotype of the lower Mesoproterozoic or upper Paleoproterozoic sequence, especially for the boundary between them. The determination of formation age is of great significance for understanding the Precambrian geological evolution of the North China Craton, such as emergence of the initial cover sequence of the craton, assembling and breakup of the Nuna supercontinent. To date, there are still great contro-

收稿日期: 2021-09-08; 接受日期: 2021-11-30; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(40773042, 41073014, 41373052, 41773049); 中国地质调查局资助项目(DD20190448, DD20190370)

作者简介: 王彦斌(1966-), 男, 博士, 研究员, 地球化学专业, E-mail: wangyanbin@bjshrmp.cn。

网络首发时间: 2022-01-13; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.20220112.1558.002.html>

versies on the age, subdivision, correlation and geological implication of the Hangaoshan Group. In this study, zircon U-Pb isotopes of the andesites from the Hangaoshan Group have been analyzed with SHRIMP technique, giving a weighted mean  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age of  $1\,769\pm 9\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ). This is the first direct measurement of the zircon U-Pb age of the Hangaoshan Group. In addition, weighted mean  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  zircon ages of the volcanic rocks in three different parts of the Xiaoliangling Formation of the same strathorizon are  $1\,792\pm 18\text{ Ma}$ ,  $1\,773\pm 19\text{ Ma}$  and  $1\,778\pm 20\text{ Ma}$ , respectively, which are consistent with the age of Hangaoshan Group within the error range. Therefore, the ages of the Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation are determined at  $1\,769\pm 9\text{ Ma}$  and  $1\,792\sim 1\,773\text{ Ma}$ , respectively. In combination with previous research results, formation time of the Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation is ca.  $1\,780\text{ Ma}$ . As regards sedimentology, the section strata of the Hangaoshan Group in Lüliang Mts area are continuous, and a horizon of andesite is stably and widely distributed in the region. So the horizon is an excellent regional isochronous marker in the central and southern part of the North China Craton. Furthermore, rift deposits and volcanic rocks in this period occur in the western Yangtze Block, the northwestern Laurentia, northern Australia, the São Francisco, Congo and Siberian cratons, and all can be well correlated, showing the global distribution of intracontinental rift sediments during initial breakup of Nuna supercontinent in the same period. We propose here that the international Mesoproterozoic bottom boundary should be moved down, from  $1.6\text{ Ga}$  to  $1.8\text{ Ga}$ , and the Hangaoshan section can be used as a new candidate stratigraphic type section of the international Mesoproterozoic bottom boundary.

**Key words:** Hangaoshan Group; Xiaoliangling Formation; volcanic rocks; SHRIMP; zircon U-Pb age; bottom boundary of the Mesoproterozoic

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (40773042, 41073014, 41373052, 41773049); Project of China Geological Survey (DD20190448, DD20190370)

华北克拉通由基底和盖层组成,是世界上最古老的克拉通之一。中元古代,吕梁山区方山县汉高山一带沉积了以河湖相沉积为主、夹火山岩的汉高山群,角度不整合于古元古代界河口岩群之上,被寒武系角度不整合覆盖。作为在结晶基底上的盖层沉积,汉高山群代表华北地台裂解、克拉通内裂陷槽中的盖层充填。与汉高山群相当的小两岭组地层的年代学研究已有很长历史:乔秀夫等(1983)获得其全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $1\,786\pm 56\text{ Ma}$ ,徐勇航等(2007)利用 LA-ICP-MS 测得一粒锆石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1\,779\pm 20\text{ Ma}$ ,乔秀夫等(2014)使用 SHRIMP 测得的锆石 U-Pb 年龄为  $1\,778\pm 20\text{ Ma}$ ,Yang 等(2019)采用 Cameca 1280 测得其中流纹岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $1\,776\pm 6\text{ Ma}$ ,这几个年龄在误差范围内一致。不少研究者认为汉高山群与小两岭组是同时代的地质体(山西省地质矿产局,1989;乔秀夫等,1985;武铁山,1997;乔秀夫等,2014),但汉高山群一直未获得确切的同位素年龄,只是依据其与小两岭组构成吕梁复背斜的两翼、二者处于同一层位而推定了其年龄(山西省地质矿产局,1989),这直接影响了华北克拉通演化历史及 Nuna 超大陆聚散的认识。因此,本研究选取

汉高山群中安山岩和小两岭组中火山岩为研究对象,使用 SHRIMP 测得的锆石 U-Pb 年龄来限定汉高山群及小两岭组的地层时代,以便与华北克拉通南部熊耳群进行对比,探讨中元古界底界线年龄,为揭示吕梁地区元古宙的构造演化历史、华北克拉通演化及 Nuna 超大陆裂解盆地的演化提供同位素年代学约束。

## 1 地质背景

汉高山群位于吕梁山西侧(临县东南的汉高山,距太原市  $120\text{ km}$ ),与小两岭组构成吕梁复背斜的两翼,二者为同一层位(图 1a,山西省地质矿产局,1989)。汉高山群最早由 Norin (1924) 研究并命名(汉高山统),当时是指吕梁市临县东部的汉高山一带出露面积约  $5\text{ km}^2$  的元古宙陆相地层序列,又划分为下部砾岩质砂岩(河成层)、页岩和上部砂岩(风成层)3 个次级地层单元,另外还有由几层被凝灰岩隔开的杏仁状辉绿岩组成的辉绿岩层(Norin, 1924)。汉高山群为不整合于界河口群贺家湾岩组白云母片岩变质岩系之上、寒武系之下的一套未经区域变质的、以陆源碎屑岩和火山岩为主的地层(图 1a、

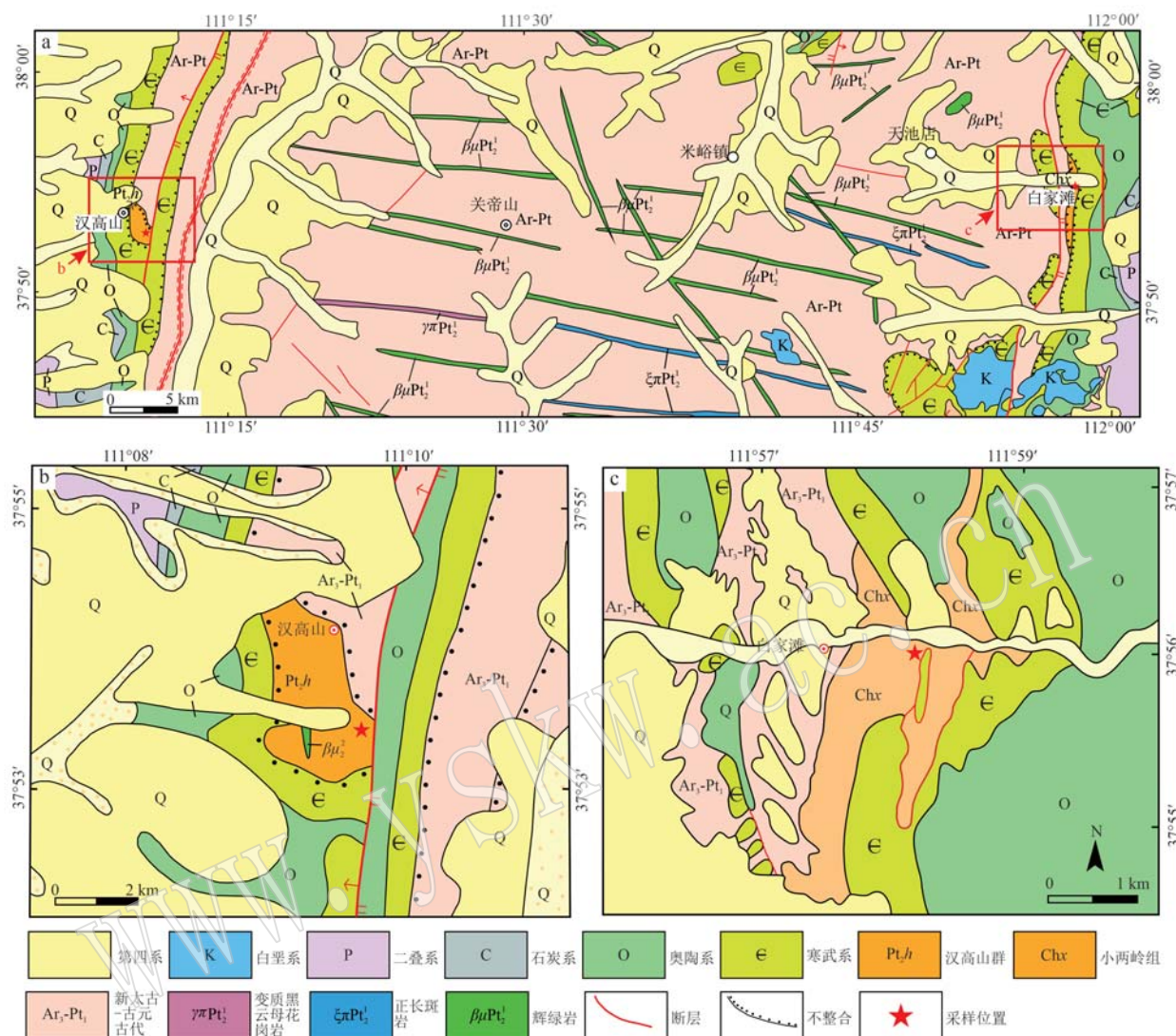


图1 吕梁地区地质图(a)、汉高山地质简图(b)和白家滩地质简图(c) (据山西省地质调查院, 2020)<sup>①</sup>

Fig. 1 Geological sketch map of the Lüliang area(a), Hangaoshan(b) and Baijiatan(c) (Geological Survey of Shanxi Province, 2020)<sup>①</sup>

1b、图2a、图3)。临县刘家沟汉高山群层型剖面(图2a、图3)地层层序显示为一套河流相粗碎屑岩,近500 m厚,自下而上,第1组(Pt<sub>2</sub>h<sup>1</sup>)为紫红色-灰黄色砾岩、灰黄色含砾砂岩、紫红色砂质页岩和页岩,显示从崩塌角砾岩-泥石流砾岩-冲积扇砾岩(广泛发育的砾岩中,砾石成分复杂、分选差,具冲积扇特征)、砂岩-冲积扇中段的河流漫流粉砂、细砂岩-扇前湖相紫红色页岩的沉积序列;第2组(Pt<sub>2</sub>h<sup>2</sup>)为黄色砾岩,夹灰紫色、黄绿色页岩,长石砂岩及砾岩和砂岩互层组成,其中可见辉绿岩墙侵

入;第3组(Pt<sub>2</sub>h<sup>3</sup>)为灰黄色砾岩、白色石英砂岩与紫红色页岩,顶部夹有暗绿色杏仁状和块状安山岩组成,与小两岭组火山岩可对比。第2、3组为山区辫状河沉积,是一个典型的裂陷盆地快速充填序列。详细的沉积学、古河流动力学、盆地分析研究结果表明汉高山群属于山间盆地内河流相及冲积扇相沉积(图2、图3,黄德志,1990;乔秀夫等,2014)。汉高山群与其上的寒武纪“霍山砂岩”等为不整合接触。

出露于太原市娄烦县白家滩东的小两岭组主要

① 山西省地质调查院, 2020. 山西省区域地质志.



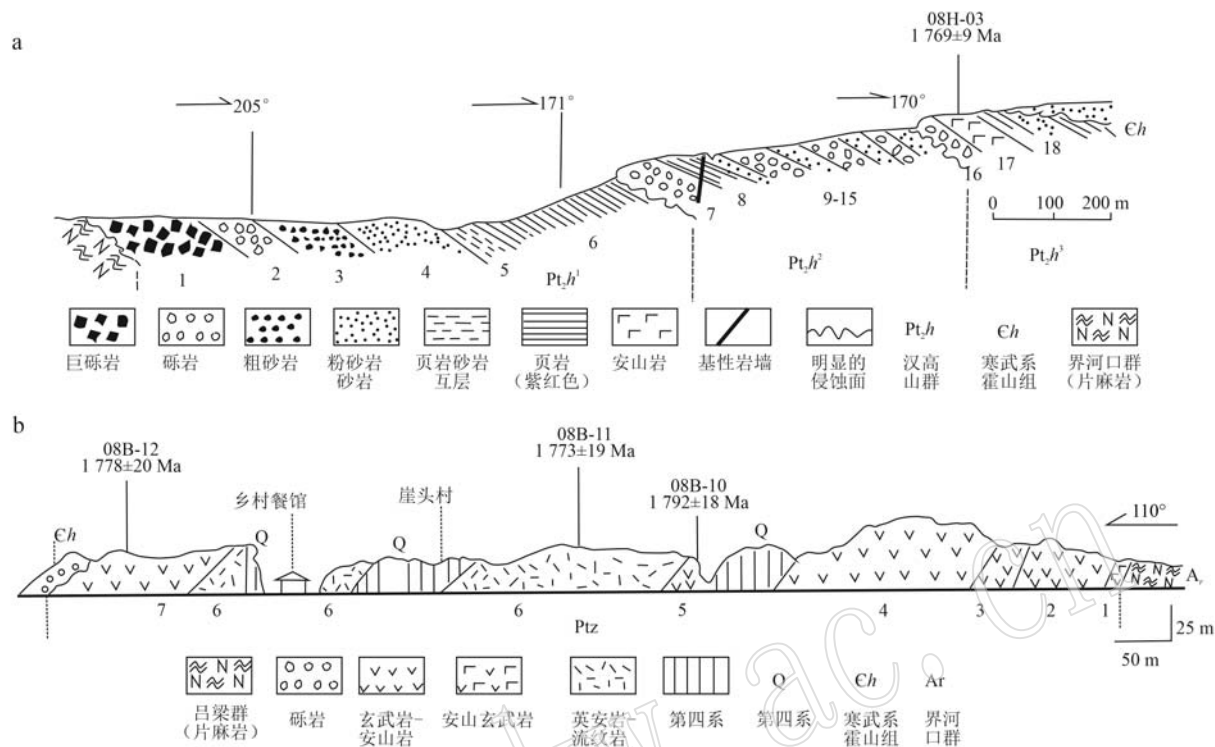


图2 山西省临县刘家沟汉高山群(a)和娄烦县白家滩小两岭组(b)的层型剖面

Fig. 2 Stratotype sections of the Hangaoshan Group in Liujiagou, Lin County(a) and the Xiaoliangling Formation in Baijiatan, Loufan County(b) of Shanxi Province

为一套火山岩建造,以火山岩为主,夹有厚度不等的砾岩、砂岩及页岩。在白家滩沿公路出露的沉积岩层仅厚 20 m,但沿走向可增厚至 35 m(图 4),呈角度不整合覆盖在吕梁群白家滩花岗片麻岩之上,其上被寒武系霍山组不整合覆盖(图 1a、1c、图 2b、图 4)。由西向东的剖面显示其与下伏白家滩花岗片麻岩角度不整合,自下而上由黑色玄武岩、英安岩、玄武安山岩、安山岩、英安流纹岩、流纹岩、玄武安山岩组成。在太原市以北的关口-杨家井-山根底一带的钻孔中也发现有相应时期的火山岩分布(前人称关口火山岩)。按磁异常推断该火山岩呈 NNE-SSW 向展布,长 8 km,宽 2.5 km,面积约 20 km<sup>2</sup>。其下、中部主要由粗玄武岩、安山玄武岩组成(山西省地质调查院, 2020)<sup>①</sup>。

吕梁山的界河口群与吕梁群变质岩系构成地台基底,汉高山群和小两岭组为地台的最底部盖层。小两岭组分布于吕梁复背斜东翼,火山岩成分变化较大,呈双峰式的特征,主要由玄武岩-安山岩和流纹岩-英安岩组成。汉高山群位于吕梁复背斜西翼,

是一套残留盆地沉积为主的地层,在剖面顶部夹有薄层安山岩。

## 2 样品描述

### 2.1 汉高山群安山岩

汉高山群安山岩样品(08H-03)采自山西省吕梁市临县刘家沟(N37°52', E111°00')(图 2a、图 3)。露头新鲜面呈暗绿色,多氧化为紫色、紫红色,多发育杏仁状构造,厚 11.8 m。上部为灰红色、灰白色砾岩,厚约 14 m,在华家塔沟一带安山岩之上见有灰白色石英砂岩与紫色页岩互层,即成层产于下部砾岩和上部紫红色页岩之间(图 2a、图 3),地层产状 210°∠30°。安山岩具斑状结构,隐晶或玻晶交织结构。斑晶主要是斜长石(5%左右),定向不明显,还有少量石英和绿泥石化黑云母;基质中有玻璃质(50%~55%)、斜长石(25%~30%)、方解石(10%~15%)和磁铁矿(1%~2%)以及杏仁体(约 5%,成分为方解石、玉髓、石英、绿泥石等)(图 5)。

① 山西省地质调查院. 2020. 山西省区域地质志.





图3 汉高山群沉积相

Fig. 3 Sedimentary facies of Hangaoshan Group

a—崩塌角砾岩, 风化后砾石突出; b—泥石流堆积; c—冲积扇辫状河道砾岩; d—漫流砂岩; e—扇前湖相紫红色页岩; f—辉绿岩墙侵入位于湖相紫红色页岩中; g—汉高山群中安山岩顺层产出在砾岩和页岩之间; h—汉高山群不整合于界河口群贺家湾组白云母片岩变质岩系之上

Group

样品锆石为浅黄色透明, 锆石晶体呈长柱状-短柱状, 长宽比多约为2, 长轴一般为100~150  $\mu\text{m}$ , 阴极发光图像(图6)显示发育明显的板状分带, 具有典型岩浆锆石特征(Williams, 1998)。

## 2.2 小两岭组安山岩

小两岭组样品采自山西省太原市娄烦县白家滩火山岩剖面(图2b)。该剖面小两岭组总体南北走向, 向东倾斜, 被寒武系角度不整合覆盖, 厚493 m。样品08B-12采自剖面顶部(距寒武系霍山组仅3 m左右), 为安山岩(N37°56', E111°58'); 剖面中部样品08B-11为英安岩, 08B-10为安山岩。

样品08B-12(安山岩)呈紫红色, 具斑状结构,

杏仁状构造。斑晶主要矿物成分是斜长石(1%), 可见帘石化、方解石化和闪石化, 局部可见斜长石残留。基质主要有斜长石(30%~38%)、玻璃质(45%)、方解石(10%)、磁铁矿(1%~2%)及杏仁体(约5%, 成分为方解石、玉髓、石英等)(图5), 可见铁氧化物(黑色)和斜长石定向-半定向组成交织结构。锆石晶体透明、浅黄色, 呈长柱状-短柱状, 长宽比多为1~2, 长轴一般为100~180  $\mu\text{m}$ , 阴极发光图像显示锆石发育明显的板状分带, 具典型岩浆结晶锆石的特征(图6)。

样品08B-10(安山岩)具斑状结构, 杏仁状构造, 块状构造, 主要由斜长石、黑云母、玻璃质和少



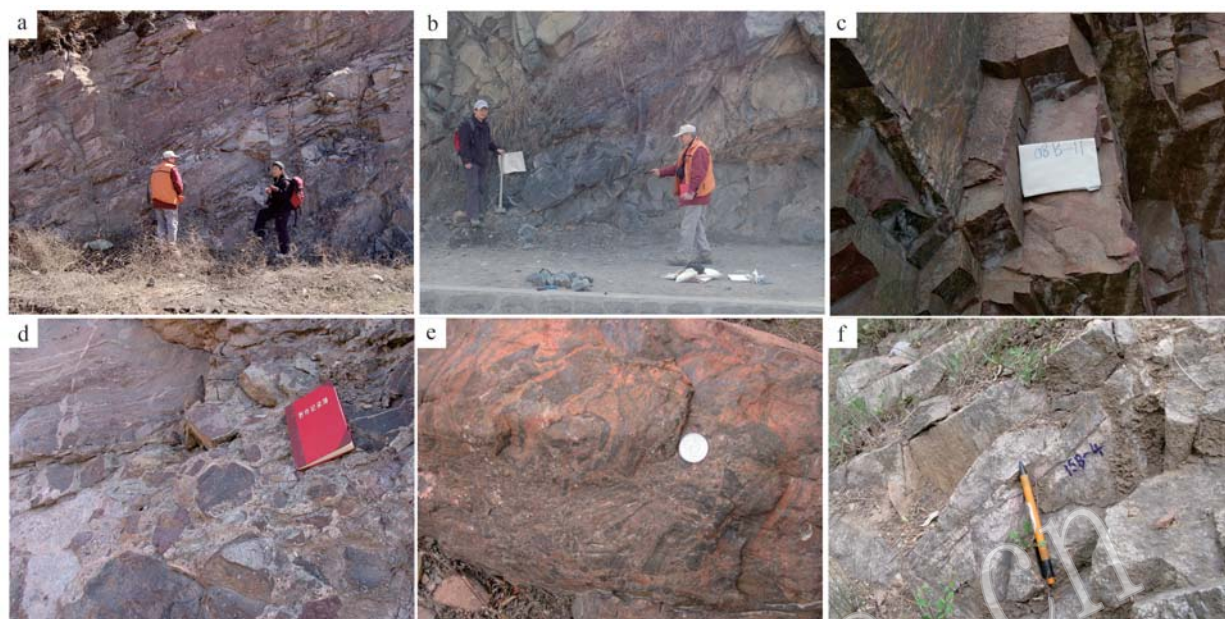


图 4 小两岭组野外露头照片

Fig. 4 Representative field photographs of Xiaoliangling Formation

a—寒武系霍山砂岩与小两岭组不整合界线；b—玄武安山岩；c—英安岩；d—边滩砾岩和含砾砂岩；e—地震软沉积构造；f—基底吕梁群 2.2 Ga 白家滩花岗片麻岩

a—the unconformity boundary between Cambrian Huoshan sandstone and Xiaoliangling Formation; b—basalt-andesite; c—dacite; d—conglomerate and pebbly sandstone in edge beach; e—soft sediment deformation structures triggered by the paleo-earthquakes; f—2.2 Ga Baijiantan granite gneiss of Liliang Group

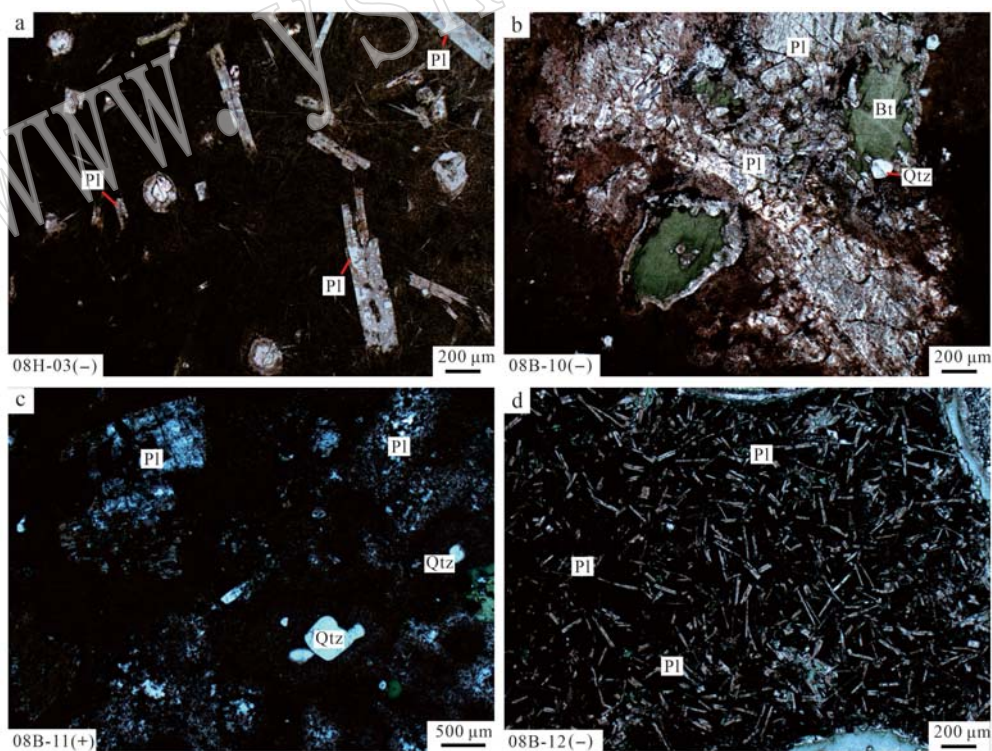


图 5 汉高山群和小两岭组火山岩显微照片

Fig. 5 Microphotographs showing petrographic features of volcanic rocks from Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation in the Lüliang area

a—汉高山群安山岩 (08H-03); b—小两岭组安山岩 (08B-10); c—小两岭组英安岩 (08B-11); d—小两岭组安山岩 (08B-12); Bt—黑云母; Pl—斜长石; Qtz—石英

a—andesite of Hangaoshan Group (08H-03); b—andesite of Xiaoliangling Formation (08B-10); c—dacite of Xiaoliangling Formation (08B-11); d—andesite of Xiaoliangling Formation (08B-12); Bt—biotite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

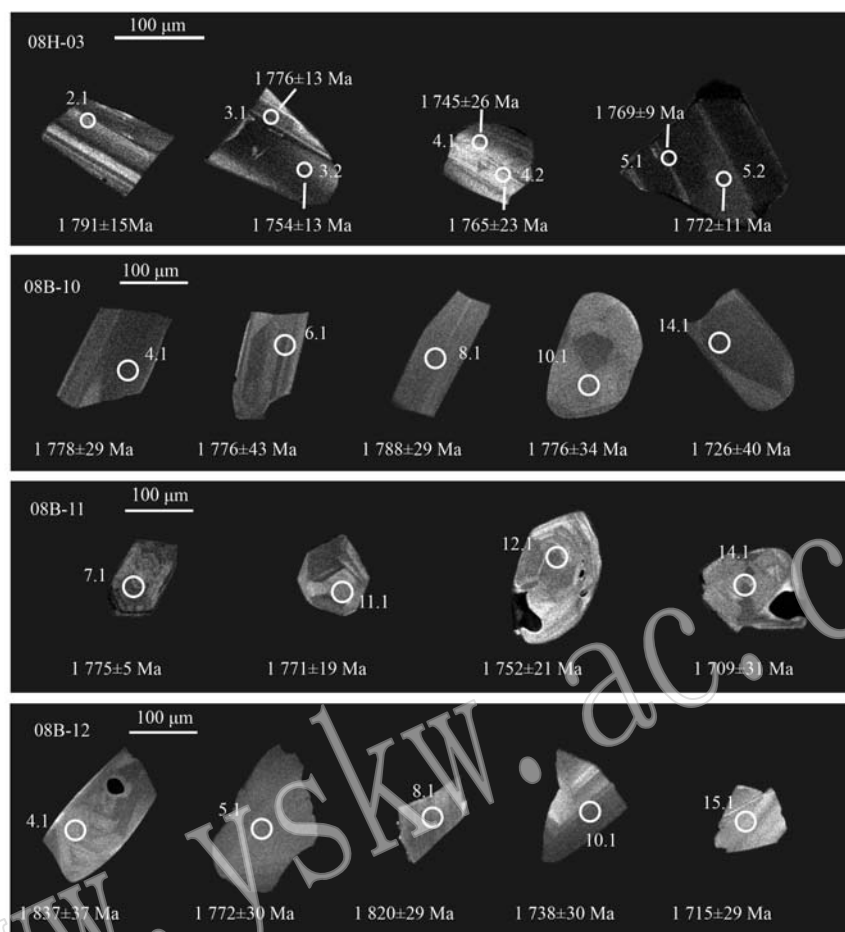


图6 汉高山群和小两岭组火山岩锆石阴极发光图和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值

Fig. 6 Cathodoluminescence images and ages of zircon grains of volcanic rocks from the Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation

量杏仁体组成(图5)。斑晶主要是斜长石,见绢云母化、碳酸盐化,有少量绿泥石化黑云母。样品中锆石为浅黄色透明,晶体呈长柱状,长宽比多为2,长轴一般为150 μm,阴极发光图像显示发育明显的板状分带,具典型岩浆结晶锆石的特征(图6)。

样品08B-11(英安岩),紫红色,斑状结构,杏仁状构造。斑晶主要是斜长石(5%~10%),有少量石英和绿泥石化黑云母。基质主要为斜长石和石英(图5)。锆石晶体透明,浅黄色,呈长柱状-短柱状,长宽比多为1~2,长轴一般为100~150 μm,阴极发光图像显示发育明显的振荡环带和板状分带,具典型岩浆结晶锆石的特征(图6)。

### 3 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测定方法

用于测年的锆石晶体是从5 kg岩石样品中分选出来的。将待测锆石样品与标准锆石样品SL13、

TEM制成一个环氧树脂样品靶(Mount)。待靶固结硬化后,打磨并抛光,使锆石晶体中心暴露出来,然后拍摄可见光和阴极发光(CL)显微图像。清洗、镀金后,用SHRIMP测定U-Pb同位素,具体流程可参见宋彪等(2002)和宋彪(2015)。锆石显微图像拍摄和SHRIMP U-Pb同位素测定在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成,测定原理可参考Williams(1998)。测定时, $^{196}\text{Zr}_2\text{O}$ 、 $^{204}\text{Pb}$ 、背景值、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{248}\text{ThO}$ 、 $^{254}\text{UO}$ 质量峰的积分时间分别选取2、10、10、10、15、5、5、2、2 s。每个测点的数据由5次扫描组成。一次离子为约4.5 nA、10 kV的 $\text{O}_2^-$ ,一次离子束斑的直径为25~30 μm,质量分辨率约5 400(1%峰高)。待测样品与标准样品TEM按4:1交替测定。用SL13(572 Ma, U含量 $238\times 10^{-6}$ )标定待测样品U含量(Williams, 1998),TEM(416.75 Ma, Black *et al.*, 2003)校正Pb/U分馏。离线数据处理使用SQUID 1.02及ISOPLLOT程



序 (Ludwig, 2001)。根据实测的 $^{204}\text{Pb}$  含量扣除普通铅, 普通铅的组成依 Stacey & Kramers (1975) 给出的模式计算得到。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值具 95% 的置信度误差。对  $>1\,000\text{ Ma}$  的样品, U 含量很低时 (如  $10\times 10^{-6}\sim 100\times 10^{-6}$ ), 锆石晶体一般无可观察到的因放射性损伤导致的蜕晶质化和铅丢失, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄与  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄相同, 但  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄误差很大, 此时采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄 (宋彪, 2015)。

#### 4 锆石 U-Pb 同位素测定结果

锆石 U-Pb 同位素测定结果列于表 1, U-Pb 谐和图见图 7。汉高山群中安山岩 (08H-03) 中锆石测得 9 个数据, 其年龄不谐和度都小于 6%, U 含量为  $50\times 10^{-6}\sim 310\times 10^{-6}$ , Th 含量为  $33\times 10^{-6}\sim 466\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.69\sim 1.55$  (表 1)。分析点 1 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $2\,192\pm 15\text{ Ma}$ , 为捕获锆石, 其余 8 个分析点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $1\,769\pm 9\text{ Ma}$ , MSWD=0.71 (图 7a)。

小两岭组中安山岩 (08B-12) 中的锆石测得 21 个数据, 除分析点 1.1、1.2、20.1 不谐和度分别为 -8%、-9%、10% 外, 其余分析点的不谐和度都不大于 7% (表 1、图 7d)。20.1 分析点的 U 含量为  $401\times 10^{-6}$ , 其余 20 个分析点锆石的 U 含量为  $17\times 10^{-6}\sim 120\times 10^{-6}$ , Th 含量为  $12\times 10^{-6}\sim 232\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.41\sim 1.20$ , 分析点 17.1 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $2\,376\pm 9\text{ Ma}$ , 为捕获基底锆石。因锆石 U 含量很低, 特别是参与加权平均计算的 19 个分析点的 U 含量仅为  $17\times 10^{-6}\sim 51\times 10^{-6}$ , 且其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄与  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄基本相同, 而  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄变化范围和误差很大, 故采用其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值  $1\,778\pm 20\text{ Ma}$ , MSWD=1.4。

对小两岭组中英安岩 (08B-11) 测定了 15 粒岩浆结晶锆石 (图 7c)。该样品按锆石特征和年龄可分两种, 一种是反映该样品锆石结晶年龄的锆石, 即分析点 7.1、11.1、12.1、14.1, 其 U 含量为  $45\times 10^{-6}\sim 1\,345\times 10^{-6}$ , Th 含量  $53\times 10^{-6}\sim 894\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.69\sim 1.25$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄值为  $1\,773\pm 19\text{ Ma}$ , MSWD=1.8; 另一种是捕获的年龄较老的基底锆石 (其余的 11 个分析点)。15 个分析点的不谐和度为 -7%~0 (表 1、图 7)。捕获的基底锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄值变化范围  $2\,462\sim 1\,813\text{ Ma}$ , 反

映基底特征, 如 10.1 分析点为  $2\,462\pm 5\text{ Ma}$  (不谐和度 2%), 9.1 和 15.1 分别为  $2\,141\pm 8\text{ Ma}$  和  $2\,153\pm 8\text{ Ma}$  (不谐和度分别为 2% 和 4%), 4 个捕获锆石分析点 (分析点 2.1、6.1、8.1、13.1) 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $2\,065\pm 33\text{ Ma}$ , MSWD=3.3。

小两岭组中安山岩 (08B-10) 中锆石, 测定了 16 粒岩浆结晶锆石 (图 7b、表 1), 其 U 含量为  $18\times 10^{-6}\sim 43\times 10^{-6}$ , Th 含量为  $14\times 10^{-6}\sim 51\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.78\sim 1.33$ 。5.1 的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄值为  $1\,911\pm 53\text{ Ma}$ , 可能为继承锆石, 其余 15 个分析点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $1\,792\pm 18\text{ Ma}$ , MSWD=0.99。

#### 5 讨论

##### 5.1 汉高山群指示的盆地性质

华北克拉通于  $1\,800\text{ Ma}$  克拉通化后, 板内裂解, 吕梁山的汉高山群和小两岭组所在区域为吕梁裂陷槽 (乔秀夫等, 1985, 2014), 汉高山裂陷盆地裂解的沉积地层纪录了该过程。

汉高山裂陷盆地是一个南北长  $3\,500\text{ m}$ 、宽约  $1\,500\text{ m}$  的残留盆地 (乔秀夫等, 2014)。盆地东部沿同沉积断裂为崩塌石块堆积与泥石流。崩塌石块大者可达  $1\sim 2\text{ m}$ , 砾石为界河口群的片麻岩、变粒岩、石英岩等, 代表裂解初期堆积。由东向西依次为冲积扇河流、漫流至扇前湖泊 ( $\text{Pt}_2h^1$ ), 是一个自东向西展布的冲积扇-湖泊体系。随着裂解的发生, 安山岩喷发, 盆地裂解作用继续, 北部相继裂开, 发育自北东向南西流动的辫状河 ( $\text{Pt}_2h^3$ ), 古流向为  $210^\circ\sim 245^\circ$ 。整个盆地底是一个向南倾斜的古地形, 河流动力学参数计算表明其为高流态山区辫状河, 汉高山古河平均流速  $0.86\sim 2\text{ m/s}$ , 平均水面坡度为  $0.008\,3\sim 0.023$ , 流量  $48.7\text{ m}^3/\text{s}$  (黄德志, 1990; 乔秀夫等, 2014)。

##### 5.2 汉高山群及相当层位的全球对比

华北地块的吕梁-豫西三叉裂陷槽中的汉高山群和熊耳群是  $1\,800\sim 1\,600\text{ Ma}$  华北克拉通裂解期的地层。汉高山群是吕梁裂陷盆地的产物, 其下部以陆相碎屑岩为主, 上部以中基性火山岩为主。熊耳群同时也是裂陷槽阶段的产物, 由火山-沉积建造组成, 角度不整合覆盖于古元古代变质岩之上。底部大古石组为一套以紫红、黄绿色含砾砂岩-长石石英砂岩-砂质、粉砂质泥 (页) 岩组合, 显示其为裂谷

表 1 汉高山群和小两岭组火山岩中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素数据  
Table 1 SHRIMP U-Pb isotopic compositions of zircons in the volcanic rocks from Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation

点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		年龄/Ma		不谐和度/%		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		同位素比值		$\pm\sigma$		误差相关系数	
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	不谐和度/%	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	误差相关系数	$\pm\sigma$
08H-03 (汉高山群英安岩)																								
1.1	0.90	189	149	65.0	0.82	1.15	2 192	1 835	40	1 912	32	2	0.137 2	0.001 2	7.51	0.13	0.397 0	0.006 0	0.9	0.13	0.397 0	0.006 0	0.9	0.9
2.1	0.03	98	110	26.4	1.15	1.756	1 791	1 738	42	1 854	26	2	0.109 5	0.000 9	4.73	0.09	0.313 0	0.005 0	0.9	0.09	0.313 0	0.005 0	0.9	0.9
2.2	0.11	96	105	25.0	1.13	1.709	1 764	1 794	36	1 820	23	3	0.107 9	0.000 9	4.52	0.08	0.303 7	0.004 9	0.9	0.08	0.303 7	0.004 9	0.9	0.9
3.1	0.31	220	304	57.8	1.43	1.713	1 776	1 778	29	1 848	25	4	0.108 6	0.000 8	4.56	0.08	0.304 4	0.005 2	0.9	0.08	0.304 4	0.005 2	0.9	0.9
3.2	0.08	184	235	47.2	1.32	1.680	1 754	1 776	34	1 862	26	4	0.107 31	0.000 74	4.407	0.071	0.297 8	0.004 5	0.9	0.071	0.297 8	0.004 5	0.9	0.9
4.1	0.13	70	63	19.4	0.93	1.794	1 745	1 749	36	1 865	27	-3	0.106 8	0.001 5	4.72	0.10	0.321 0	0.005 1	0.8	0.10	0.321 0	0.005 1	0.8	0.8
4.2	0.08	50	33	13.8	0.69	1.802	1 765	1 788	29	1 824	21	-2	0.107 9	0.001 4	4.80	0.10	0.322 6	0.005 5	0.8	0.10	0.322 6	0.005 5	0.8	0.8
5.1	0.03	310	466	80.1	1.55	1.693	1 769	1 776	34	1 862	26	4	0.108 19	0.000 51	4.481	0.067	0.300 4	0.004 2	0.9	0.067	0.300 4	0.004 2	0.9	0.9
5.2	0.01	181	201	46.1	1.15	1.673	1 772	1 776	34	1 862	26	6	0.108 37	0.000 63	4.429	0.071	0.296 4	0.004 4	0.9	0.071	0.296 4	0.004 4	0.9	0.9
08B-10 (小两岭组英安岩)																								
1.1	-	19	14	5.61	0.78	1.912	1 835	1 776	43	1 907	43	-4	0.112 2	0.002 5	5.34	0.15	0.345 3	0.006 6	0.7	0.15	0.345 3	0.006 6	0.7	0.7
2.1	0.27	29	32	8.29	1.14	1.854	1 738	1 749	36	1 865	27	-7	0.106 4	0.002 4	4.89	0.14	0.333 2	0.005 3	0.6	0.14	0.333 2	0.005 3	0.6	0.6
3.1	0.17	38	49	10.7	1.33	1.820	1 794	1 778	29	1 848	25	-2	0.109 6	0.002 2	4.93	0.12	0.326 3	0.004 6	0.6	0.12	0.326 3	0.004 6	0.6	0.6
4.1	-	39	51	11.1	1.37	1.848	1 778	1 778	29	1 848	25	-4	0.108 7	0.001 7	4.98	0.11	0.332 0	0.005 3	0.7	0.11	0.332 0	0.005 3	0.7	0.7
5.1	-	27	27	7.52	1.04	1.830	1 911	1 776	43	1 907	43	4	0.117 0	0.003 5	5.30	0.18	0.328 4	0.005 6	0.5	0.18	0.328 4	0.005 6	0.5	0.5
6.1	0.03	25	23	7.25	0.98	1.907	1 776	1 776	43	1 907	43	-7	0.108 6	0.002 6	5.15	0.18	0.344 0	0.009 0	0.7	0.18	0.344 0	0.009 0	0.7	0.7
7.1	-	25	25	7.07	1.05	1.865	1 749	1 749	36	1 865	27	-7	0.107 0	0.002 1	4.95	0.13	0.335 5	0.005 7	0.7	0.13	0.335 5	0.005 7	0.7	0.7
8.1	0.02	43	44	12.2	1.04	1.824	1 788	1 788	29	1 824	21	-2	0.109 3	0.001 7	4.93	0.10	0.327 1	0.004 6	0.6	0.10	0.327 1	0.004 6	0.6	0.6
9.1	-	30	34	8.43	1.17	1.849	1 848	1 848	32	1 849	28	0	0.113 0	0.002 0	5.18	0.13	0.332 2	0.005 6	0.7	0.13	0.332 2	0.005 6	0.7	0.7
10.1	-	28	25	8.04	0.94	1.862	1 776	1 776	34	1 862	26	-5	0.108 6	0.002 1	5.01	0.13	0.334 8	0.054 0	0.7	0.13	0.334 8	0.054 0	0.7	0.7
11.1	-	35	44	9.92	1.30	1.860	1 811	1 811	55	1 860	25	-3	0.110 7	0.003 3	5.10	0.17	0.334 4	0.005 0	0.5	0.17	0.334 4	0.005 0	0.5	0.5
12.1	-	31	32	8.48	1.07	1.800	1 851	1 851	41	1 800	25	3	0.113 2	0.002 6	5.03	0.14	0.322 0	0.005 2	0.6	0.14	0.322 0	0.005 2	0.6	0.6
13.1	-	25	24	7.36	1.00	1.877	1 811	1 811	35	1 877	28	-4	0.110 7	0.002 1	5.16	0.13	0.338 0	0.005 7	0.7	0.13	0.338 0	0.005 7	0.7	0.7
14.1	0.27	36	40	10.2	1.16	1.851	1 726	1 726	40	1 851	26	-7	0.105 7	0.002 3	4.85	0.13	0.332 6	0.005 3	0.6	0.13	0.332 6	0.005 3	0.6	0.6
15.1	-	35	46	10.2	1.33	1.864	1 787	1 787	30	1 864	24	-4	0.109 2	0.001 9	5.05	0.11	0.335 3	0.005 0	0.7	0.11	0.335 3	0.005 0	0.7	0.7
16.1	-	18	15	5.27	0.85	1.864	1 842	1 842	61	1 864	32	-1	0.112 6	0.003 8	5.20	0.20	0.335 2	0.006 7	0.5	0.20	0.335 2	0.006 7	0.5	0.5
08B-11 (小两岭组英安岩)																								
1.1	0.09	40	16	12.6	0.41	2 023	1 982	1 982	29	2 023	31	-2	0.121 8	0.001 9	6.19	0.15	0.368 5	0.006 6	0.7	0.15	0.368 5	0.006 6	0.7	0.7
2.1	0.78	450	224	118	0.51	1 707	2 038	1 982	11	1 707	21	16	0.125 6	0.000 8	5.25	0.08	0.303 3	0.004 2	0.9	0.08	0.303 3	0.004 2	0.9	0.9
3.1	1.33	467	329	111	0.73	1 554	1 813	1 813	17	1 554	20	14	0.110 8	0.001 1	4.166	0.071	0.272 6	0.003 8	0.8	0.071	0.272 6	0.003 8	0.8	0.8
4.1	0.95	360	236	89.8	0.68	1 627	1 964	1 964	14	1 627	24	17	0.120 5	0.001 0	4.77	0.09	0.287 1	0.004 9	0.9	0.09	0.287 1	0.004 9	0.9	0.9

续表 1  
Continued Table 1

点号	$^{206}\text{Pb}_c/\%$		$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		年龄/Ma		不谐和度/%		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		误差相关系数	
	U	Th	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$	$\pm\sigma$
5.1	0.76	391	179	102	0.47	2.004	1.698	21	15	0.123 2	0.000 8	5.12	0.08	0.301 3	0.004 2	0.9		
6.1	0.35	347	216	99.8	0.64	2.081	1.857	23	11	0.128 78	0.000 67	5.93	0.09	0.333 9	0.004 7	0.9		
7.1	0.13	1 345	894	294	0.69	1.775	1.459	18	18	0.108 56	0.000 29	3.801	0.053	0.253 9	0.003 6	1.0		
8.1	0.41	391	226	117	0.60	2.073	1.918	24	7	0.128 2	0.000 9	6.13	0.10	0.346 6	0.004 9	0.9		
9.1	0.12	224	161	73.8	0.74	2.141	2.088	26	2	0.133 23	0.000 63	7.03	0.11	0.382 6	0.005 7	1.0		
10.1	0.11	358	121	140	0.35	2.462	2.411	29	2	0.160 6	0.000 5	10.05	0.15	0.453 6	0.006 4	1.0		
11.1	—	55	67	15.4	1.25	1.771	1.817	35	-3	0.108 3	0.001 2	4.86	0.12	0.325 5	0.007 2	0.9		
12.1	0.13	45	53	12.7	1.21	1.752	1.811	28	-3	0.107 2	0.001 2	4.79	0.10	0.324 4	0.005 8	0.8		
13.1	0.16	64	31	20.4	0.51	2.062	2.042	30	1	0.127 4	0.001 2	6.55	0.12	0.372 7	0.006 3	0.9		
14.1	0.36	65	75	17.9	1.19	1.709	1.776	26	-4	0.104 7	0.001 8	4.58	0.11	0.317 1	0.005 4	0.7		
15.1	0.17	310	236	100.0	0.79	2.153	2.058	25	4	0.134 17	0.000 58	6.96	0.10	0.376 0	0.005 3	1.0		
08B-12 (小两岭组安山岩)																		
1.1	1.01	31	29	8.73	0.97	1.658	1.798	32	-8	0.101 8	0.003 9	4.52	0.19	0.321 8	0.006 4	0.5		
1.2	1.12	20	15	5.84	0.77	1.699	1.844	40	-9	0.104 1	0.003 6	4.76	0.20	0.331 0	0.008 0	0.6		
2.1	1.21	41	51	11.3	1.27	1.708	1.769	29	-4	0.104 6	0.004 6	4.55	0.22	0.315 7	0.006 0	0.4		
3.1	1.14	17	12	4.53	0.72	1.810	1.699	36	6	0.110 6	0.003 3	4.60	0.18	0.301 6	0.007 2	0.6		
4.1	0.63	18	14	5.17	0.80	1.796	1.837	37	-2	0.109 8	0.003 4	4.99	0.19	0.330 0	0.008 0	0.6		
5.1	0.44	37	40	10.1	1.11	1.784	1.772	30	1	0.109 1	0.002 8	4.76	0.16	0.316 3	0.006 0	0.6		
6.1	0.72	20	17	5.19	0.87	1.806	1.688	72	7	0.110 4	0.002 8	4.56	0.25	0.299 0	0.015 0	0.9		
7.1	0.77	29	34	8.24	1.20	1.724	1.803	32	-5	0.105 5	0.003 1	4.70	0.17	0.322 7	0.006 8	0.6		
8.1	0.61	48	44	13.7	0.95	1.770	1.820	29	-3	0.108 2	0.002 6	4.87	0.15	0.326 1	0.005 9	0.6		
9.1	0.87	24	20	6.66	0.84	1.718	1.759	34	-2	0.105 2	0.006 2	4.55	0.29	0.313 8	0.006 9	0.4		
10.1	0.50	34	34	9.21	1.02	1.773	1.738	30	2	0.108 4	0.002 6	4.62	0.14	0.309 4	0.006 2	0.6		
11.1	—	43	38	11.6	0.91	1.816	1.773	30	2	0.111 0	0.001 3	4.84	0.11	0.316 6	0.006 3	0.9		
12.1	0.22	40	46	10.8	1.20	1.794	1.773	50	1	0.109 6	0.002 2	4.79	0.18	0.317 0	0.010 0	0.8		
13.1	0.14	33	18	8.82	0.56	1.812	1.753	51	3	0.110 8	0.001 7	4.78	0.17	0.313 0	0.010 0	0.9		
14.1	0.75	33	30	8.97	0.95	1.722	1.759	30	-2	0.105 4	0.002 6	4.56	0.15	0.313 6	0.006 3	0.6		
15.1	0.95	35	25	9.34	0.73	1.742	1.715	29	2	0.106 6	0.003 8	4.48	0.18	0.304 7	0.006 1	0.5		
16.1	0.23	27	25	7.33	0.98	1.850	1.795	34	3	0.113 1	0.004 8	5.01	0.24	0.321 1	0.006 7	0.5		
17.1	0.03	120	48	45.8	0.41	2.376	2.369	31	0	0.152 7	0.000 8	9.35	0.16	0.444 1	0.007 1	0.9		
18.1	0.13	17	13	4.74	0.78	1.860	1.844	38	1	0.113 7	0.005 8	5.19	0.29	0.331 1	0.007 9	0.4		
19.1	0.09	51	44	14	0.89	1.808	1.797	28	1	0.110 5	0.001 8	4.90	0.12	0.321 5	0.005 8	0.7		
20.1	0.32	401	232	118	0.60	2.100	1.895	26	10	0.130 13	0.000 74	6.13	0.10	0.341 7	0.005 5	0.9		

注: 误差为  $1\sigma$ ,  $\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别表示普通铅和放射成因铅, 标准样品 TEM 测值传递给未知样品的误差为 1.03%, 普通铅根据实测的  $^{204}\text{Pb}$  值扣除。



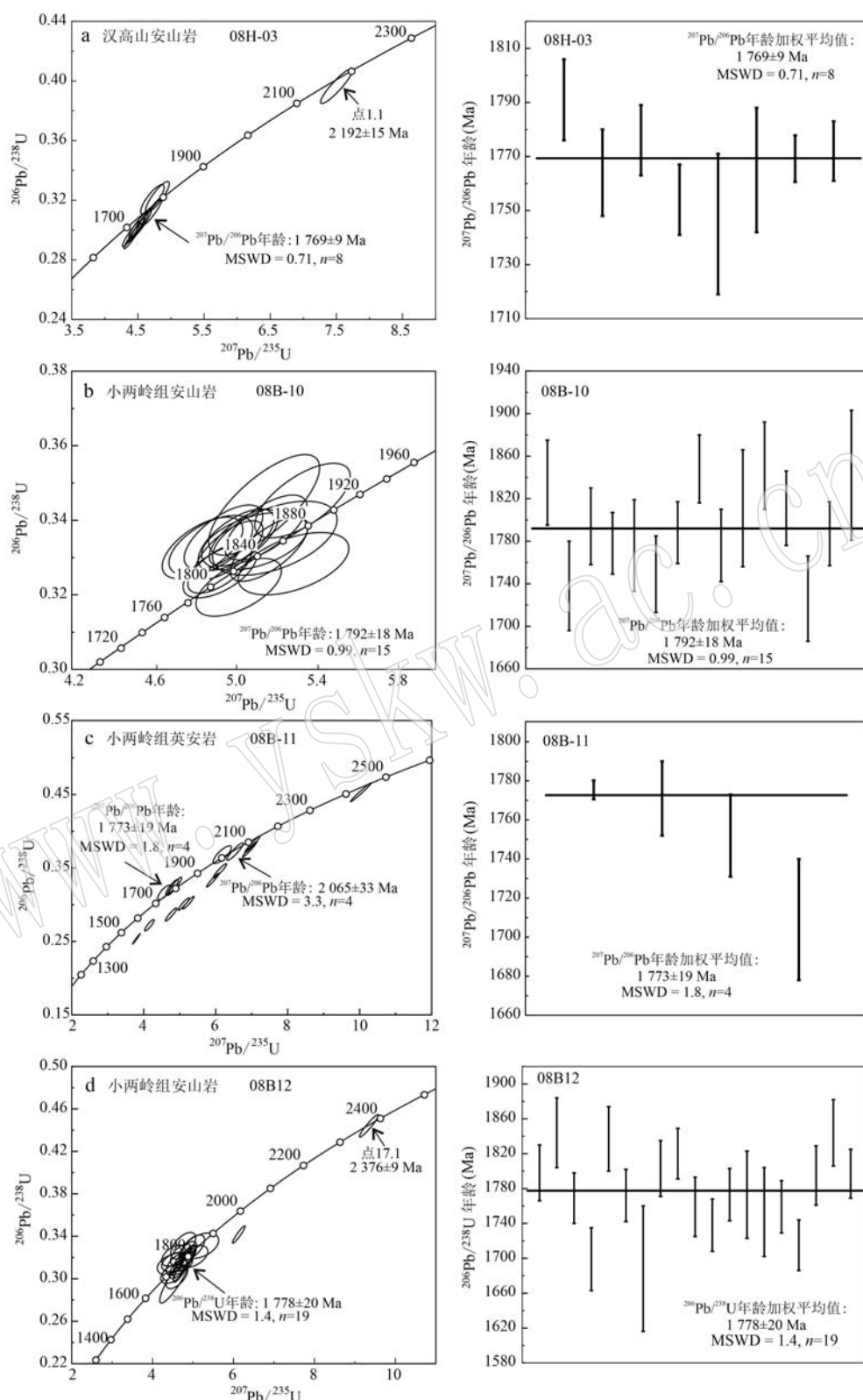


图7 汉高山群和小两岭组火山岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 SHRIMP U-Pb concordia diagrams of zircons in volcanic rocks from Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation

初始裂开阶段河湖相沉积；许山组为一套辉石安山岩-安山岩组合；鸡蛋坪组为英安质流纹岩-流纹岩

组合；马家河组亦为辉石安山岩-安山岩多韵律火山岩组合，间断期均发育砂岩、页岩或凝灰岩，中偏

基性熔岩中可见枕状、绳状构造,总体以陆相为主,间夹海侵层(山西省地质矿产局,1989)。近年研究认为熊耳群形成于大陆边缘三岔裂谷环境(Zhao *et al.*, 2002, 2004; 赵太平等, 2015),熊耳群底部大古石组河流和湖泊相粗至细碎屑沉积以及地球化学特征均指示它们发育于被动大陆边缘裂谷构造背景(徐勇航等, 2008)。吕梁-豫西三叉裂陷槽的岩组是典型的盖层沉积,不变形、不变质,属于国际地层委员会“盖层系”定义的范畴。

扬子地块该时期陆内裂谷初始沉积时代和上述的华北克拉通最早沉积盖层比较稍晚。扬子地块西南缘的大红山群(云南大红山地区)底部老厂河组以砂岩沉积为主,其中的砾岩可能为河道滞留砾石成因,其中斜长角闪岩的锆石 U-Pb 谐和线与不一致线的上交点年龄  $1722 \pm 19$  Ma 和所夹  $1711 \pm 4$  Ma 的薄层火山岩(Zhao and Zhou, 2011; 杨红等, 2012)限定大红山群下部的沉积时限大致为  $1722$  Ma。云南东川武定地区东川群和四川会理南部的通安组以碎屑岩至碳酸盐岩并夹少量凝灰岩沉积序列为主,东川群底部粗粒砂屑岩指示其沉积相以碎屑流为主的冲积扇末端为特征,通安组一段的砂板岩等指示其形成于冲积扇-滨海相。东川群下部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为  $1742 \pm 13$  Ma (Zhao *et al.*, 2010),通安组下部凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为  $1744 \pm 14$  Ma (耿元生等, 2017),表明大红山群、东川群和通安组是扬子地块西南缘裂谷盆地于  $1750$  Ma 裂解期的岩组(Zhao *et al.*, 2010; 耿元生等, 2019; Lu *et al.*, 2020)。

从全球角度看, Nuna 超大陆在  $1800$  Ma 形成后,这一时期克拉通化后的盖层的沉积特征对比具有全球意义。从 Nuna 超大陆裂解事件角度分析,世界各主要大陆从  $\sim 1.80$  Ga 已开始形成具有相当规模的裂谷盆地、凹陷盆地(Payne *et al.*, 2009; 耿元生等, 2019),大部分古地理重建模型中劳亚古陆被认为在近中央的位置(Rogers and Santosh, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2012; Pisarevsky *et al.*, 2014; Pehrsson *et al.*, 2016)。劳伦古陆西南部美国西南部 Mojave 省的 Vishnu 沉积盆地主要由浊积岩和不成熟的碎屑岩组成,沉积时代为  $1.79 \sim 1.74$  Ga (Holland *et al.*, 2018)。劳伦西北部的 Wernecke-Hornby Bay-Athabasca 盆地底部由河流相沉积的陆源碎屑岩组成,沉积序列从底部以硅质碎屑及碳酸盐岩为主的沉积颗粒物向上逐渐变细,记

录了裂谷活动的持续,盆地沉积逐渐由河流相、滨海向浅海相转变(Kerans *et al.*, 1981)。盆地的伸展指示的起始沉积多在  $1750 \sim 1740$  Ma (Rainbird *et al.*, 2006, 2007; Rainbird and Davis, 2007; Furlanetto *et al.*, 2016; Verbaas *et al.*, 2018)。澳大利亚北部克拉通发育  $1790 \sim 1740$  Ma 的 Leichhardt 盆地,底部为含砾砂岩,向上为发育交错层理(cross-and trough-bedding)的石英岩和长石砂岩的河流相至浅海相环境,下部夹玄武岩层,Argylla 组酸性火山岩年龄为  $1760 \sim 1780$  Ma (Jackson *et al.*, 2000; Southgate *et al.*, 2000; Neumann *et al.*, 2006, 2009; Betts and Giles, 2006; Betts *et al.*, 2008, 2016; Gibson *et al.*, 2012, 2018, 2020; Withnall & Hutton, 2013)。南美巴西圣弗兰西斯科(São Francisco)克拉通以圣弗兰西斯科盆地的下部序列河流相砾岩和风成砂岩为主,其中的火山岩年龄为  $1775 \pm 3 \sim 1724 \pm 5$  Ma (Turpin *et al.*, 1988; Danderfer *et al.*, 2009, 2015; Lobato *et al.*, 2015),指示该盆地伸展起始时代为  $1.77$  Ga (Alkmim and Martins-Neto, 2012)。非洲刚果克拉通的 Chela 群由厚约  $600$  m 的海相砂岩与酸性火山岩、页岩、砾岩和少量碳酸盐岩夹层组成,Chela 群中部基性-酸性火山岩年龄  $1790 \pm 17$  Ma 指示其沉积时代(Mccourt *et al.*, 2004)。由上可见相似的裂谷沉积在扬子陆块、劳伦大陆西北部、澳大利亚北部、南美巴西圣弗兰西斯科(São Francisco)克拉通、非洲刚果克拉通及西伯利亚克拉通都可以对比,显示同时期由 Columbia (Naun) 超大陆初始裂解引起的陆内裂谷沉积地层的全球陆块的同时性(王伟等, 2019)。从  $1.8 \sim 1.7$  Ga 盆地的发育看,该阶段全球性的重要地质事件是在 Nuna 超大陆基础上陆内初始裂解形成一系列的盆地(耿元生等, 2019)。

### 5.3 汉高山群作为中元古界底界年龄的地质意义

本研究获得的年龄数据说明汉高山群和小两岭组的形成时代约为  $1780$  Ma,再结合已有的小两岭组和熊耳群的年龄报道(乔秀夫等, 1983, 2014; 赵太平, 2004; 徐永航等, 2007, 2008; Yang *et al.*, 2019),指示汉高山群、小两岭组和熊耳群的形成时代为  $1780$  Ma,其年龄的重要意义值得深入探究。

目前国际地层委员会将中元古界底界年龄定为  $1600$  Ma (Gradstein *et al.*, 2004),  $1800 \sim 1600$  Ma 的 Statherian(固结系)为古元古界最顶部的一个系,以克拉通化为特征,  $1600 \sim 1400$  Ma 的 Calymmian

(盖层系)是中元古界最底部的系,指地台的盖层(Gradstein *et al.*, 2004; Van Kranendonk, 2012)。国际亚洲地质图的中元古界采用 1 650 Ma 为底界(任纪舜等, 2013),但国际地层委员会新的全球前寒武纪地质年代表划分建议方案则把 17.8 亿年作为古/中元古代界限年龄(Van Kranendonk, 2012; Gradstein *et al.*, 2012)。Van Kranendonk 等(2008)、Van Kranendonk(2012)指出当前国际地层表中元古代与中元古代的界限年龄 1 600 Ma 不能反映标志 Nuna 超大陆形成的重要地质事件年龄(Ogg *et al.*, 2008)。实际上, Gradstein 等(2004)就提出可用 Nuna 超大陆形成的地质标志时代作为中元古界底界年龄,即 1 800 Ma。2012 年国际地层委员会推出了全球地质年代建议表(The Geological Time Scale 2012, Gradstein *et al.*, 2012),该方案以全球关键事件为基础,以 Nuna 超大陆的形成重大地质事件为标志,海相硫化物沉积首次出现,把中元古底界年龄由早先的 1 600 Ma 下拉到了 1 780 Ma(Van Kranendonk, 2012; 苏文博, 2014)。我国的古元古代与中元古代的分界在实际工作中一直采用 1 800 Ma,而非国际地层划分方案中的 1 600 Ma(王鸿祯,

1986, 1999; 陆松年, 1992; Wang Hongzhen and Mo Xuanxue, 1995; Wang Hongzhen *et al.*, 1997; Van Kranendonk, 2012; 王泽九等, 2014)。2021 年,国际地层委员会正式公布的国际地层年代表,仍将 1 600 Ma 作为中元古界的底界年龄(<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2021-07.pdf>),而在我国是把中元古代底界年龄置于 1 800 Ma(王泽九等, 2014)。显然,我国应用的地层年表标准与国际地层年代表不一致,易造成中外学者在学术交流上的不便(赵太平等, 2015)。

吕梁运动是华北克拉通结晶基底最终形成的标志性构造-热事件,我国地质学家根据吕梁运动结束时间,将古/中元古代的时间界限置于 18 亿年(赵太平等, 2019)。吕梁山的汉高山群及小两岭组火山岩与同期的岩墙群及熊耳群形成于同一构造环境,即华北克拉通基底形成后,初始裂解形成熊耳群底部大古石组 and 汉高山群底部的河流相沉积,之后火山喷溢,在华北克拉通南缘形成巨厚的熊耳群火山岩,在吕梁山形成汉高山群、小两岭组 and 关口等火山岩(图 8),并与熊耳群一样,形成于吕梁-豫西三叉裂陷槽中。

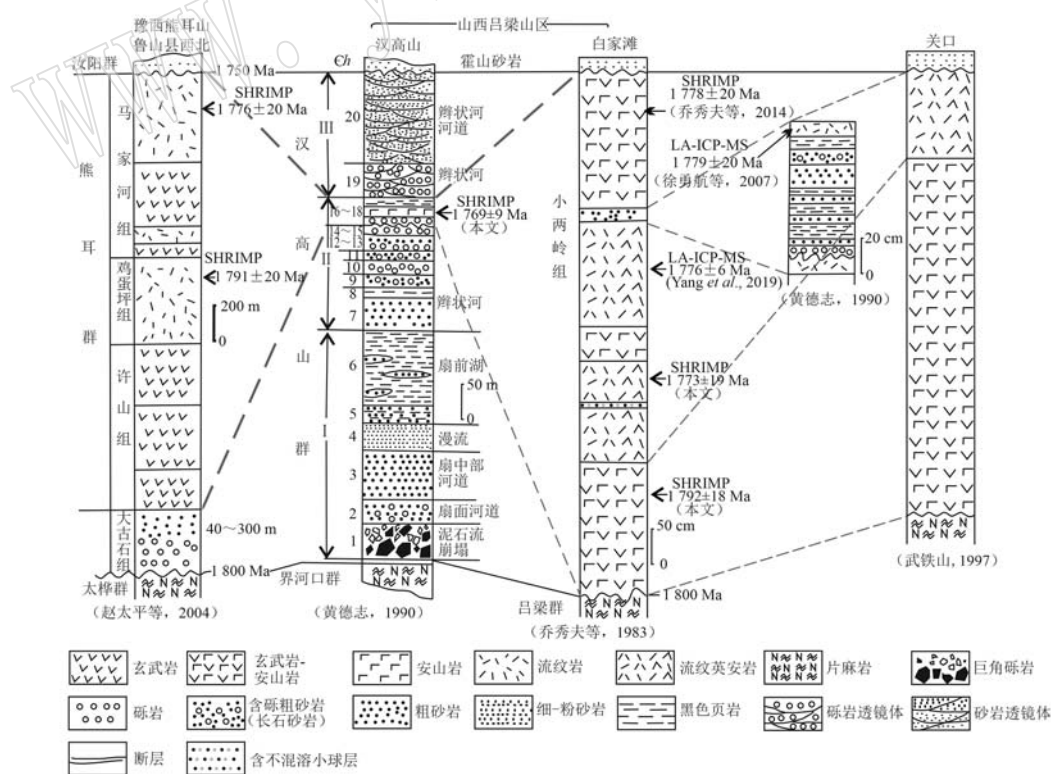


图 8 吕梁地区小两岭组火山岩、汉高山群、豫西熊耳群火山岩年龄值及对比[据乔秀夫等(2014)修改]

Fig. 8 Comparisons of Xiaoliangling Formation, Hangaoshan Group in Lüliang area and Xiong'er Group in West Henan Province and the ages of their volcanic rocks (after Qiao Xiufu *et al.*, 2014)



全球年代地层单位是以其底界年龄来厘定的，显生宙全球年代地层单位是通过全球界线层型剖面

记录、重要年龄值与盆地构造类型（乔秀夫等，2014）。右侧的年龄值中，1 800 Ma 为汉高山群、小两岭组、熊耳群的底界年龄（乔秀夫等，1983，2014；赵太平等，2004；徐勇航等，2007；Yang *et al.*，2019）；1 750 Ma(赵太平等，2004)为熊耳群顶界年龄，暂时被当作小两岭组与汉高山群顶界的年龄。

图 9 概括总结华北地台 1 800~1 400 Ma 的地层

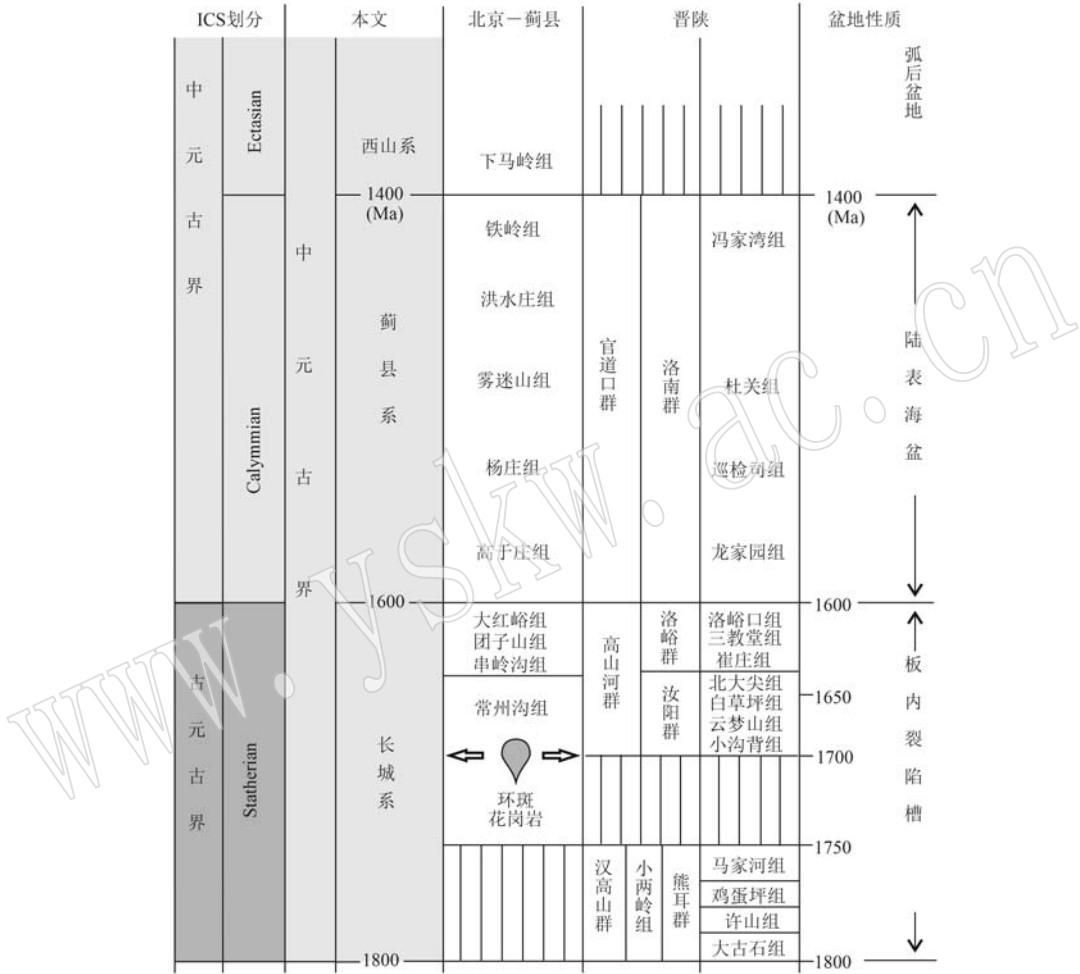


图 9 华北克拉通 1 800~1 400 Ma 年代地层柱 (据乔秀夫等，2014)

Fig. 9 Chronostratigraphic time scale during 1 800~1 400 Ma in North China Craton (after Qiao Xiufu *et al.*，2014)

高林志等(2014)把 1 700 Ma 作为燕山地区(传统的称为蓟县剖面)长城系的底界年龄；李怀坤等(2011)则提出该时限应为 1 650 Ma。1 800~1 600 Ma 是华北克拉通基底固结后的裂解期（翟明国等，2014），1 800 Ma 是华北克拉通岩浆活动频繁裂陷槽开始接受沉积时期，华北克拉通中南部形成了熊耳群、汉高山群和小两岭组的沉积与火山建造，时代上与上部的长城-蓟县系之间没有明显的构造运动，可视作连续的地台盖层沉积。

依据上述原则，且前寒武系年代地层界线要以

全球关键事件为基础，Nuna 超大陆的聚合完成可以作为古元古代的结束，而中元古代的开始以 Nuna 超大陆的初始裂解为标志。1 800 Ma 后华北形成基本稳定的华北克拉通，接受了基本连续的沉积。这样的话，华北克拉通中元古代以沉积为主的建造应包括熊耳群(以及类似的汉高山群、小两岭组)和长城-蓟县系，因此，选取汉高山群、熊耳群、小两岭组作为中元古界的底界是较合理的（乔秀夫等，2014），1 800 Ma 则可作为中元古代的底界年龄。中国前寒武纪界长期坚持的中元古界底界年龄

1 800 Ma 与 Nuna 超大陆聚合事件吻合, 符合国际地层委员会选取规范。本研究的结论可供地质调查参考, 可为相关项目如地质编图中确定前寒武纪编图单元与界线提供年龄依据, 也可为讨论华北克拉通演化提供年代学基础。

## 6 结论

(1) 汉高山群中安山岩的锆石 U-Pb 年龄为  $1\,769 \pm 9$  Ma, 限定了汉高山群的时代约为 1 770 Ma。小两岭组火山岩剖面顶部 (距寒武系霍山组仅 3 m 左右) 获得的  $1\,778 \pm 20$  Ma 锆石 U-Pb 年龄、剖面中部获得的锆石 U-Pb 年龄  $1\,773 \pm 19$  Ma 与  $1\,792 \pm 18$  Ma, 限定了小两岭组的时代为 1 792~1 773 Ma。在汉高山群顶部火山岩首次获得  $1\,769 \pm 9$  Ma 年龄值, 证实了其与小两岭组火山岩同时代。

(2) 依据本文新的年代学研究结果, 汉高山群和小两岭组底界置于 1 800 Ma 是合理的, 且与已有地质纪录相吻合。1 800 Ma 是 Nuna 超大陆的聚汇期, 汉高山群和小两岭组在年代地层中的位置表明是 Nuna 超大陆聚合即克拉通化后的初始盖层, 也是目前全球已有年龄纪录的最低层位的盖层。从吕梁山区南至中条山、陕豫地区, 由汉高山群、小两岭组与晋南熊耳群组成一个巨型三岔裂谷, 它是地球赐予华北地台的独有礼物。

(3) 汉高山群时代的研究可为全国地层委员会确定中元古界底界年龄提供界线层型剖面。

**致谢** 乔秀夫研究员 2008 年 3 月带领并指导笔者开展汉高山群和小两岭组的地质研究, 2015 年 6 月和 2018 年 10 月的野外工作还得到余卓颖等的帮助, 论文撰写中, 刘福来研究员提供了良好建议, 审稿人和编辑对本文做了认真的审阅并提出了很好的修改意见, 在此一并向大家表示感谢。

谨以此文祝贺沈其韩院士百岁寿诞。

## References

- Alkmim F F and Martins Neto M A. 2012. Proterozoic first order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1): 127~139.
- Betts P G, Armit R J, Stewart J, *et al.* 2016. Australia and Nuna[J]. Geological Society, London. Special Publications, 424(1): 47~81.
- Betts P G and Giles D. 2006. The 1 800~1 100 Ma tectonic evolution of Australia[J]. *Precambrian Research*, 144(1~2): 92~125.
- Betts P G, Giles D and Schaefer B F. 2008. Comparing 1800-1600 Ma accretionary and basin processes in Australia and Laurentia: Possible geographic connections in Columbia[J]. *Precambrian Research*, 166(1~4): 81~92.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200: 155~170.
- Danderfer F A, De Waele B, Pedreira A J, *et al.* 2009. New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço basin within the São Francisco craton, Brazil[J]. *Precambrian Research*, 170(1~2): 116~128.
- Danderfer F A, Lana C C, Nalini Junior H A, *et al.* 2015. Constraints on the Statherian evolution of the intraplate rifting in a Paleoproterozoic paleocontinent: New stratigraphic and geochronology record from the eastern São Francisco Craton[J]. *Gondwana Research*, 28(2): 668~688.
- Furlanetto F, Thorkelson D J, Rainbird R H, *et al.* 2016. The Paleoproterozoic Wernecke Supergroup of Yukon, Canada: Relationships to orogeny in northwestern Laurentia and basins in North America, East Australia and China[J]. *Gondwana Research*, 39: 14~40.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Qiao Xiufu, *et al.* 2014. Progress in isotope chronology of Meso- and Neoproterozoic strata in eastern China [A]. Wang Tieguan. *Geology and Hydrocarbon Resources of the Meso- and Neoproterozoic in Eastern China* [C]. Beijing: Science and Technology Press, 25~50 (in Chinese).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Du Lilin, *et al.* 2019. On the Paleoproterozoic boundary from the breakup event of the Columbia supercontinent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 299~2 324 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, *et al.* 2017. Subdivision and correlation of the Mesoproterozoic stratigraphy in the western and northern margins of Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2 151~2 174 (in Chinese with English abstract).
- Gibson G M, Champion D C, Huston D L, *et al.* 2020. Orogenesis in Paleoproterozoic eastern Australia: A response to arc-continent and continent-continent collision during assembly of the Nuna Supercontinent[J]. *Tectonics*, 39(2): e2019TC005717.
- Gibson G M, Champion D C, Wothnall I W, *et al.* 2018. Assembly and breakup of the Nuna supercontinent: Geodynamic constraints from 1 800 to 1 600 Ma sedimentary basin and basaltic magmatism in

- northern Australia[J]. *Precambrian Research*, 313: 148~169.
- Gibson G M, Henson P A, Neumann N L, *et al.* 2012. Paleoproterozoic earliest Mesoproterozoic basin evolution in the Mount Isa region, northern Australia and implications for reconstructions of the Nuna and Rodinia supercontinents[J]. *Episodes*, 35(1): 131~141.
- Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, *et al.* 2012. The Geological Time Scale 2012[M]. Amsterdam: Elsevier, 1~1 144.
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, *et al.* 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. *Episodes*, 27(2): 83~100.
- Holland M E, Karlstrom K E, Gehrels G, *et al.* 2018. The Paleoproterozoic Vishnu basin in southwestern Laurentia: Implications for supercontinent reconstructions, crustal growth, and the origin of the Mojave crustal province[J]. *Precambrian Research*, 308: 1~17.
- Huang Dezhi. 1990. Analysis of Sedimentary Facies and Basin Structure of Hangaoshan Group[D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Jackson M J, Scott D L and Rawlings D J. 2000. Stratigraphic framework for the Leichhardt and Calvert Superbasins: Review and correlations of the pre-1 700 Ma successions between Mt Isa and McArthur River [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47(3): 381~403.
- Kerans C, Ross G M, Donaldson J A, *et al.* 1981. Tectonism and depositional history of the Helikian Hornby Bay and Disal Lakes groups, District of Mackenzie [A]. Campbell F H A. Proterozoic basins of Canada[C]. Geological Survey of Canada, 81~10.
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, *et al.* 2011. The base age of the Changchengian System at the northern North China Craton should be younger than 1 670 Ma: Constraints from Zircon U-Pb LA-MC-ICPMS dating of a granite-porphyry dike in Miyun County, Beijing [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 108~120 (in Chinese with English abstract).
- Lobato L M, Pimentel M M, Cruz S C P, *et al.* 2015. U-Pb geochronology of the Lagoa Real uranium district, Brazil: Implications for the age of the uranium mineralization[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 58: 129~140.
- Lu G M, Wang W, Cawood P A, *et al.* 2020. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic mafic magmatism in the SW Yangtze Block: Mantle plumes associated with Nuna breakup? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB019260.
- Lu Songnian. 1992. Advances in isotope geochronology of the Meso-paleoproterozoic section in Jixian[A]. Li Qingbo, Dai Jinxing and Liu Ruqi. *Modern Geological Research Anthology*[C]. Nanjing: Nanjing University Press, 122~129 (in Chinese).
- Ludwig K R. 2001. Squid 1. 02: A User's Manual[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2, 19.
- Mccourt S, Armstrong R A, Kampunzu A B, *et al.* 2004. New SHRIMP ages zircons from the Lubango region, Southwest Angola: Insights into the Proterozoic evolution of South-Western Africa[A]. *Proceedings of the 20th CAG*. Orleans, France[C]. Geoscience: Geological Society of South Africa, 438~439.
- Neumann N L, Gibson G M and Southgate P N. 2009. New SHRIMP age constraints on the timing and duration of magmatism and sedimentation in the Mary Kathleen Fold Belt, Mt Isa Inlier, Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 56(7): 965~983.
- Neumann N L, Southgate P N, Gibson G M, *et al.* 2006. New SHRIMP geochronology for the western fold belt of the Mt. Isa Inlier: Developing a 1 800~1 650 Ma event framework[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 53(6): 1 023~1 039.
- Norin E. 1924. An Algonkian Continental Sedimentary Formation in Western Shanxi [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 3(1): 55~71.
- Ogg J G, Ogg G and Gradstein F M. 2008. The Concise Geologic Time Scale[M]. Cambridge University Press, 1~177.
- Payne J L, Hand M, Barovich K M, *et al.* 2009. Correlations and reconstruction models for the 2500 - 1500 Ma evolution of the Mawson Continent[J]. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 323: 319~355.
- Pehrsson S J, Eglington B M, Evans D A D, *et al.* 2016. Metallogeny and its link to orogenic style during the Nuna supercontinent cycle [J]. *Geological Society London Special Publications*, 424: 83~94.
- Pisarevsky S A, Elming S A, Pesonen L J, *et al.* 2014. Mesoproterozoic paleogeography: Supercontinent and beyond [J]. *Precambrian Research*, 244: 207~225.
- Qiao Xiufu and Wang Yanbin. 2014. Discussions on the lower boundary age of the Mesoproterozoic and basin tectonic evolution of the Mesoproterozoic in North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1 623~1 637(in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Zhang Dequan, Wang Xueying, *et al.* 1983. Rb-Sr age determination of the volcanic rocks of Xiaoliangling Formation in central Shanxi [J]. *Bulletin of Chinese Academy Geological Sciences*, (5): 111~114(in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Zhang Dequan, Wang Xueying, *et al.* 1985. A preliminary study on isotope geochronology of the Xiyanghe group from Southern Shanxi province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 59(3): 258~268 (in Chinese with English abstract).
- Rainbird R H and Davis W J. 2007. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of the late Paleoproterozoic Dubawnt Supergroup:



- Linking sedimentation with tectonic reworking of the western Churchill Province, Canada[J]. *GSA Bulletin*, 119(3): 314~328.
- Rainbird R H, Davis W J, Stern R A, *et al.* 2006. Ar-Ar and U-Pb geochronology of a Late Paleoproterozoic rift basin: Support for genetic link with Hudsonian orogenesis, western Churchill Province, Nunavut, Canada[J]. *The Journal of Geology*, 114(1): 1~17.
- Rainbird R H, Stern R A, Rayner N, *et al.* 2007. Age, provenance and regional correlation of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta, constrained by igneous and detrital zircon geochronology[A]. Jefferson C W and Delaney G. *EXTech IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta*[C]. *Bulletin Geological Survey of Canada*, 588: 193.
- Ren Jishun. 2013. *International Geological Map of Asia (1:5 000 000)* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Rogers J and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 5: 5~22.
- Shanxi Bureau of Geology and Minerals. 1989. *Regional Geology of Shanxi Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~789(in Chinese).
- Song Biao. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1 777~1 788 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48: 26~30(in Chinese with English abstract).
- Southgate P N, Bradshaw B E, Domagala J, *et al.* 2000. Chronostratigraphic basin framework for Palaeoproterozoic rocks (1 730~1 575) in northern Australia and implications for base-metal mineralization [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47(3): 461~483.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and planetary science letters*, 26(2): 207~221.
- Su Wenbo. 2014. A review of the revised Precambrian Time Scale (GTS2012) and the research of the Mesoproterozoic chronostratigraphy of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 119~138(in Chinese with English abstract).
- Turpin L, Maruejol P and Guney M. 1988. U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd chronology of granitic basement, hydrothermal albitites and uranium mineralizations (Lagoa Real, South Bahia Brazil) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 139~147.
- Van Kranendonk M J. 2012. Chapter16: A chronostratigraphic division of the Precambrian[A]. Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, *et al.* *The Geological Time Scale 2012*[C]. Amsterdam: Elsevier, 299~392.
- Van Kranendonk M J, Gehling J and Shields G. 2008. Precambrian[A]. Ogg J G, Ogg G and Gradstein F M. *The Concise Geologic Time Scale*[C]. Cambridge University Press, 23~36.
- Verbaas J, Thorkelson D J, Crowley J, *et al.* 2018. A sedimentary overlap assemblage links Australia to northwestern Laurentia at 1.6 Ga [J]. *Precambrian Research*, 305:19~39.
- Wang Hongzhen. 1986. Precambrian geochronologic and chronostratigraphic subdivision of China[J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 11(5): 447~453(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen. 1999. On the international stratigraphic chart and the stratigraphic regionalization of China[J]. *Geoscience*, 13(2): 190~193(in Chinese).
- Wang Hongzhen, Li Xiang, Mei Shilong, *et al.* 1997. Pangean cycles, earth's rhythms and possible earth expansion [A]. Wang Hongzhen, Jiang Boming and Mei Shihong. *Origin and History of the Earth*[C]. Utrecht: Proc. 30th Intern. Geol. Congr., 1: 111~128 VSP.
- Wang Hongzhen and Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China[J]. *Episodes*, 18(1~2): 6~16.
- Wang Wei, Lu Guimei, Huang Sifang, *et al.* 2019. Geological evolution of the Yangtze Block in Paleo-to Meso-proterozoic and its implication on the reconstruction of the Columbia Supercontinent[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(1): 30~52(in Chinese with English abstract).
- Wang Zejiu, Huang Zhigao, Yao Jianxin, *et al.* 2014. Characteristics and Main Progress of the Stratigraphic Chart of China and Directions [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(3): 271~276(in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Withnall I W and Hutton L J. 2013. Chapter 2: North Australian Craton [A]. *Jell P A. Geology of Queensland*[C]. Brisbane: Geological Survey of Queensland, 23~112.
- Wu Tieshan. 1997. *Lithostratigraphy of Shanxi Province* [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1~366(in Chinese).
- Xu Yonghang, Zhao Taiping, Peng Peng, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and geological significance of the Paleoproterozoic volcanic rocks from the Xiaoliangling Formation in the Liliang area, Shanxi

- Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1 123~1 132 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yonghang, Zhao Taiping, Zhang Yuxiu, *et al.* 2008. Geochemical-Characteristics and geological significances of the Dagushi Formation Siliciclastic rocks, the Paleoproterozoic Xiong'er Group from the Southern North China Craton[J]. *Geological Review*, 54(3): 145~156 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanite in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze Block, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 994~3 014 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shuyan, Peng Peng, Qin Zhaoyuan, *et al.* 2019. Genetic relationship between 1 780 Ma dykes and coeval volcanic in the Lvliang area, North China[J]. *Precambrian Research*, 329(329): 232~246.
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, *et al.* 2014. Meso Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Li Z X, Evans D A D, *et al.* 2012. Pre-Rodinia supercontinent Nuna shaping up: A global synthesis with new paleomagnetic results from North China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 353~354, 145~155.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth Science Review*, 59: 125~162.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhao Taiping, Deng Xiaoqin, Hu Guohui, *et al.* 2015. The Paleoproterozoic-mesoproterozoic boundary of the North China Craton and the related geological issues: A review[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 495~1 508 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Pang Lanyin, Qiu Yifan, *et al.* 2019. The Paleo-mesoproterozoic boundary: 1.8 Ga[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 281~2 298 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, *et al.* 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 9(23): 2 495~2 502.
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Zhai Mingguo, *et al.* 2002. Paleoproterozoic rift related volcanism of the Xiong'er Group, North China Craton: Implications for the breakup of Columbia[J]. *International Geology Review*, 44(4): 336~351.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jiawei, *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 182(1~2): 57~69.
- Zhao Xinfu and Zhou Meifu. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) *met* allogenic province [J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731~747.

## 附中文参考文献

- 高林志, 丁孝忠, 乔秀夫, 等. 2014. 中国东部中-新元古代地层同位素年代学研究进展[A]. 王铁冠. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源[C]. 北京: 科学技术出版社, 25~50.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 2019. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限[J]. *岩石学报*, 35(8): 2 299~2 324.
- 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 等. 2017. 扬子地块西-北缘中元古代地层的划分与对比[J]. *地质学报*, 91(10): 2 151~2 174.
- 黄德志. 1990. 汉高山群沉积相及盆地构造分析[D]. 中国地质科学院.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1 670 Ma: 来自北京密云花岗斑岩岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的约束[J]. *地学前缘*, 18(3): 108~120.
- 陆松年. 1992. 蓟县中-上元古界剖面同位素地质年代学进展[A]. 李清波, 戴金星, 刘如琦. 现代地质学研究文集[C]. 南京: 南京大学出版社, 122~129.
- 乔秀夫, 王彦斌. 2014. 华北克拉通中元古界底界年龄与盆地性质讨论[J]. *地质学报*, 88(9): 1 623~1 637.
- 乔秀夫, 张德全, 王雪英, 等. 1983. 山西中部小两岭组火山岩的铷-锶同位素年龄测定[J]. *中国地质科学院院报*, (5): 111~114.
- 乔秀夫, 张德全, 王雪英, 等. 1985. 晋南西阳河群同位素年代学研究及其地质意义[J]. *地质学报*, 59(3): 258~268.
- 任纪舜. 2013. 国际亚洲地质图(1:5 000 000)[M]. 北京: 地质出版社.
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~789.
- 宋彪. 2015. 用 SHRIMP 测得锆石 U-Pb 年龄的工作方法[J]. *地质通报*, 34(10): 1 777~1 788.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品制靶、年龄测

- 定及有关想象讨论[J]. 地质论评, 48(增): 26~30.
- 苏文博. 2014. 2012 年全球前寒武纪新年表与中国中元古代地层学研究[J]. 地学前缘, 21(2): 119~138.
- 王鸿祯. 1986. 论中国前寒武纪地质时代及年代地层的划分[J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 11(5): 447~453.
- 王鸿祯. 1999. 关于国际(年代)地层表与中国地层区划[J]. 现代地质, 13(2): 190~193.
- 王伟, 卢桂梅, 黄思访, 等. 2019. 扬子陆块古-中元古代地质演化与 Columbia 超大陆重建[J]. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 30~52.
- 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 等. 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展[J]. 地球学报, 35(3): 271~276.
- 武铁山. 1997. 山西省岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1~366.
- 徐勇航, 赵太平, 彭澎, 等. 2007. 山西吕梁地区古元古界小两岭组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(5): 1 123~1 132.
- 徐勇航, 赵太平, 张玉修, 等. 2008. 华北克拉通南部古元古界熊耳群大古石组碎屑岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 54(3): 145~156.
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 2012. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9): 2 994~3 014.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 等. 2015. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论[J]. 岩石学报, 31(6): 1 495~1 508.
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 49(22): 2 342~2 349.
- 赵太平, 庞岚尹, 仇一凡, 等. 2019. 古/中元古代界线: 1.8 Ga[J]. 岩石学报, 35(8): 2 281~2 298.