苑东洋,石威,刘德民,等.鄂北耿集-板桥地区新元古代变火山岩系地层归属:来自锆石U-Pb测年、Hf同位素的证据.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):516-530. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220199.
Yuan Dongyang, Shi Wei, Liu Demin, et al. Attribution of Neoproterozoic Meta-Volcanic Series in Gengji-Banqiao Area, Northern Hubei Province: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(2):516-530. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220199.

鄂北耿集-板桥地区新元古代变火山岩系地层归属——来自锆石U-Pb测年、Hf同位素的证据

苑东洋[1,2],石 威[3],刘德民[4],黄天统[1,2],徐龙生[1,2],陈 超[4,5],孔令耀[5]

1.核工业二三〇研究所,长沙 410007
2.湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心,长沙 410007
3.湖北省地质局第三地质大队,湖北 黄冈 438000
4.中国地质大学地球科学学院,武汉 430074
5.湖北省地质调查院,武汉 430034

摘要:扬子克拉通北缘、鄂北枣阳市耿集-板桥地区震旦系—奥陶系中相间出露两套变火山岩系,其地层归属存在武当群和花山群的争议且长期缺乏深入研究。耿集-板桥地区野外调查、变火山岩系LA-ICP-MS锆石U-Pb测年、Lu-Hf同位素分析结果表明:耿集地区变火山岩系主要为浅灰色、灰白色变酸性含砾晶屑岩屑凝灰岩、晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩、粉砂岩,与打鼓石群硅质条带叠层石白云岩共生,其中变酸性晶屑凝灰岩锆石年龄为821.7 Ma、$\varepsilon_{Hf}(t)$值为-2.44~9.70,其可能是扬子克拉通前南华纪基底青白口系花山群组成部分;板桥地区变火山岩系主要由灰白色变酸性晶屑岩屑凝灰岩、火山凝灰岩、酸性火山岩、粉砂岩组成,内部发育大量基性侵入岩,其中变酸性火山岩锆石年龄为741.2 Ma,$\varepsilon_{Hf}(t)$值为4.62~9.56,其应归属为南秦岭造山带南华系武当群,可能是印支期逆冲到扬子克拉通盖层上的残块。

关键词:扬子克拉通;新元古代;花山群;武当群;锆石U-Pb测年;Lu-Hf同位素
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220199 **中图分类号**:P588.1;P597 **文献标志码**:A

Attribution of Neoproterozoic Meta-Volcanic Series in Gengji-Banqiao Area, Northern Hubei Province: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes

Yuan Dongyang[1,2], Shi Wei[3], Liu Demin[4], Huang Tiantong[1,2] Xu Longsheng[1,2], Chen Chao[4,5], Kong Lingyao[5]

收稿日期:2022-07-10

作者简介:苑东洋(1984—),男,硕士研究生,主要从事基础地质、油气地质调查与研究工作,E-mail:286988073@qq.com
通信作者:刘德民(1975—),男,副教授,博士,主要从事区域地质矿产调查方面的教学和研究,E-mail:5cug@163.com

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221645)
Supported by the Project of China Geological Survey (DD20221645)

1. *Changsha Uranium Geology Research Institute*, *Changsha* 410007, *China*
2. *Hunan Engineering Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources*, *Changsha* 410007, *China*
3. *Third Geological Brigade of Hubei Geological Bureau*, *Huanggang* 438000, *Hubei*, *China*
4. *School of Earth Sciences*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*
5. *Hubei Geological Survey*, *Wuhan* 430034, *China*

Abstract: There are two sets of meta-volcanic series scattered among the Sinian - Ordovician in Gengji and Banqiao area of Zaoyang City, northern Hubei Province, Northern Yangtze craton. Their attribution is disputed by the Wudang Group and Huashan Group, and has lacked in-depth research for a long time. Through systematic field investigation, LA - ICP - MS zircon U - Pb dating and Lu - Hf isotopic analysis, we propose that the meta-volcanic series in the Gengji area were mainly light gray and grayish white metamorphic acidic pebbly pyroclastic tuff, crystalline tuff, vitroclastic tuff and siltstone, associated with the siliceous striated stromatolite dolomite of the Dagushi Group. The zircon age for the metamorphic pyroclastic tuff from Gengji is 821.7 Ma with zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of -2.44 - 9.70, indicating that they may be part of the Huashan Group in the Northern Yangtze craton. However, the meta-volcanic series in the Banqiao area were mainly composed of grainy and white metamorphic acid clastic rock tuff, volcanic tuff, acid volcanic rock and siltstone, and associated with a large number of basic intrusive rocks. The zircon age of the metamorphic acid volcanic rocks from Banqiao is 741.2 Ma with zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of 4.62 - 9.56, indicating they belong to the Wudang Group in the South Qinling orogen, and may be a remnant of the thrust nappe during Indosinian.

Key words: Yangtze craton; Neoproterozoic; Huashan Group; Wudang Group; zircon U - Pb dating; Lu - Hf isotope

0　引言

鄂北花山群、武当群、随县群是扬子克拉通北缘重要的新元古代含火山岩地层[1-4],它们对研究扬子克拉通新元古代大地构造演化及其与罗迪尼亚超大陆关系等具有重要意义[5-9]。花山群最早由北京地质学院与北京大学于 1959 年创建,原指鄂北大洪山地区南华系莲沱组和中元古界打鼓石群之间的一套浅变质的沉积碎屑岩[10]。20 世纪 90 年代的 1∶20 万、1∶5 万区域地质调查将花山群由下至上分为洪山寺组砾岩-砂岩-板岩组合、六房咀组细碧岩-石英角斑岩-板岩-粉砂岩组合,形成时代为新元古代青白口纪[10-11],此后关于花山群的研究基本都以此为基础[5, 12-14]。武当群、随县群原分属鄂西北武当山地区、鄂北随州—枣阳地区,均指一套原岩以酸性火山岩、酸性火山碎屑岩、泥-砂质沉积岩为主的中、浅变质岩系[6, 15-17],并广泛遭受晚期基性岩脉侵位[18-22]。近年大量的锆石 U-Pb 测年证明武当群、随县群主体形成于早南华世[4, 15, 23-25],且二者岩性组合、岩石序列、变质程度、形成时间均可对比,新一代湖北省区域地质志将它们统称为武当群[26]。

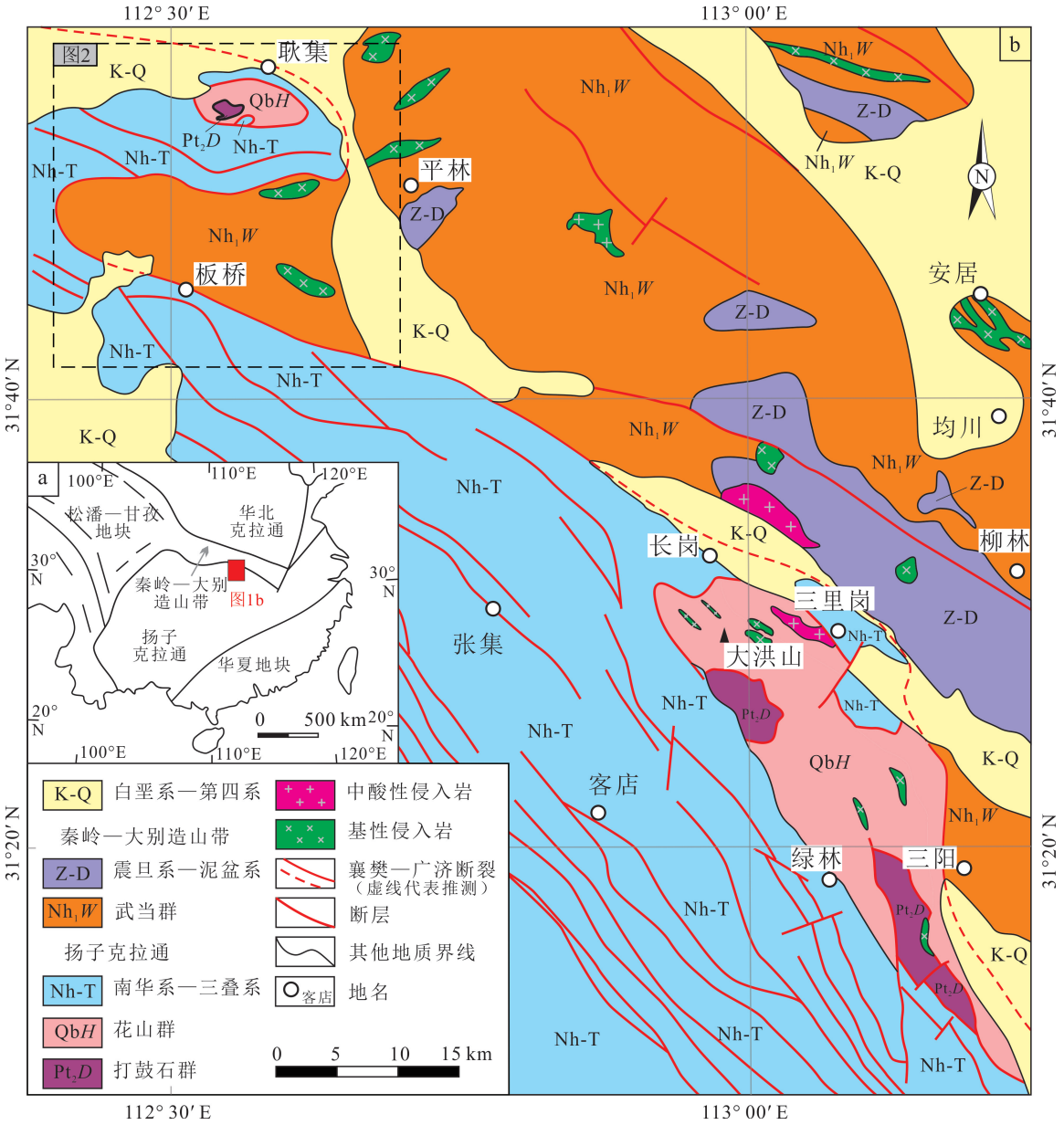
鄂北耿集-板桥地区出露一套浅变质火山岩系,早期区域地质调查根据岩性组合将其归为花山群[10]。董云鹏等[27-29]通过研究认为早期定义的花山群应进行解体,大洪山地区部分花山群具有"构造混杂岩"的特点,而耿集-板桥一带的变火山-沉积岩组合与随县群相似,应将其归为随县群(即武当群)[30]。自此之后相当长一段时间内扬子克拉通北缘桐柏—大别段新元古代地质研究相对薄弱,加上该区出露条件较差,一直缺乏系统深入的研究,鄂北耿集-板桥地区浅变质火山岩系的地层归属问题长期悬而未解。本文在系统野外地质调查的基础上,对耿集-板桥地区变酸性火山碎屑岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、锆石 Lu-Hf 同位素分析,通过对比区域上花山群和武当群岩石组合、锆石年代学、Hf 同位素组成特点,对区内变火山岩系地层归属提出新的认识。

1　地质特征

1.1　区域地质背景

耿集-板桥地区位于大洪山地区北西约 40 km

处,大地构造位置同属于扬子克拉通与秦岭—大别造山带的接触部位(图1a),二者边界襄樊—广济断裂大体呈北西—南东向横穿研究区,局部被K-Q掩盖(图1b)。襄樊—广济断裂是桐柏—大别造山带中生代碰撞造山、深俯冲—折返等地质过程的南界[31-32],断裂两侧地质体中广泛记录与该断裂伴生的褶皱和次级断层[33]。断裂北部秦岭—大别造山带区内主体为南华系武当群,伴生少量震旦系—泥盆系,以及岩浆岩。其中,岩浆岩大致可以分为中—晚南华世和早古生代两期,早期主要以基性火山岩和侵入岩为主[21, 25, 34],晚期主要为碱性基性、中性火山岩和侵入岩[35-36],可能为秦岭—大别造山带南缘南华纪、早古生代两期陆缘裂谷事件的产物[24-25, 35]。受华北和华南之间中生代强烈造山作用的影响,断裂北部地层和岩浆岩均发生强烈变形和不同程度的变质。断裂南部扬子克拉通区以南华系莲沱组—三叠系稳定沉积盖层为主,少量前南华纪建造出露于大洪山地区长岗—三阳一带,主要为中



耿集-板桥地区变火山岩系的地层归属参考本次研究。

图1 研究区花山群、武当群出露地质简图

Fig.1 Geological sketch for the outcrop of Huashan Group and Wudang Group in the study area

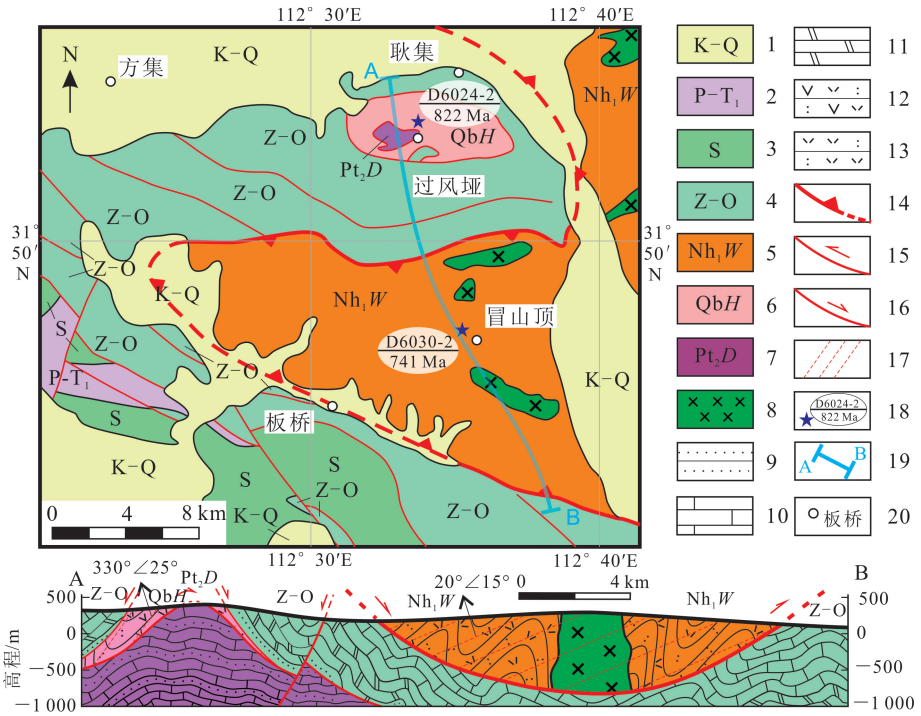
元古界打鼓石群和新元古界花山群[14, 37]，局部发育志留纪基性侵入岩，说明扬子克拉通北缘一定程度上卷入了南秦岭早古生代裂谷作用[38]，断裂南侧整体表现为强变形、弱变质（大部分显生宙地层几乎未发生变质）的特点，属于桐柏－大别造山带的前陆褶冲带[39]。

1.2　耿集-板桥变火山岩系

耿集-板桥地区主体为扬子克拉通区震旦系—下三叠统（Z－T_1）以碳酸盐岩为主体的稳定陆缘沉积地层，在 Z－T_1 地层中间分别于耿集、板桥一带相间出露两套变中酸性火山岩-火山碎屑岩组合（图 2 中的武当群和花山群）。耿集地区主要以浅灰色、灰白色变酸性含砾晶屑岩屑凝灰岩、晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩、粉砂岩为主，在过风垭伴生一套硅质条带叠层石白云岩，这套白云岩大致可归到中元古界打鼓石群陈家冲组[10, 37]，耿集地区变火山岩系与围岩呈正断层接触（图 2）。板桥地区主体为灰白色变酸性晶屑岩屑凝灰岩、火山凝灰岩、酸性火山岩、粉砂岩，在冒山顶附近可见到多个基性侵入岩（图 2）。耿集、板桥地区的变火山岩系均发生强烈变形，片理较为发育，并发育绿片岩相变质作用，镜下可观察到长石、云母矿物定向排列。

2　样品描述及测试方法

分别在耿集、板桥地区采集变酸性火山（碎屑）岩进行锆石 U－Pb 测年和 Lu－Hf 同位素分析。耿集地区样品岩性为白云石英二长片岩（编号 D6024－2），变余晶屑凝灰结构，片状构造（图 3a），主要矿物组合为钾长石（26%）、钠长石（20%）、石英（25%）和云母（25%），副矿物为磁铁矿（褐铁矿）、绿帘石。其中，长英矿物多数粒度细小，可能是火山凝灰质重结晶所致，少数残余晶屑状，大量的白云母定向排列形成片状构造，局部可见微弯曲变形，是受后期构造应力作用所致（图 3b），原岩应为酸性晶屑凝灰岩，伴生一套叠层石白云岩（图 3c）。板桥地区样品岩性为白云钠长变粒岩（编号 D6030－2），鳞片花岗变晶结构，块状构造（图 3d），主要矿物组合为钠长石（42%）、石英（28%）、白云母（15%），少量钾长石（7%），副矿物包括绿帘石、磷灰石、方解石等。其中，长英矿物成分以钠长石为主，次为石英，含少量



1. 白垩系—第四系；2. 二叠系—下三叠统；3. 志留系；4. 震旦系—奥陶系；5. 南华系武当群；6. 青白口系花山群；7. 中元古界打鼓石群；8. 辉绿-辉长岩；9. 砂岩；10. 灰岩；11. 白云岩；12. 变中酸性火山碎屑岩；13. 变酸性火山碎屑岩；14. 逆冲断层（襄樊—广济断裂，虚线代表推测断层）；15. 剖面图中的逆断层；16. 剖面图中的正断层；17. 片理；18. 本次锆石测年位置、代号及结果；19. 剖面；20. 地名。

图 2　耿集-板桥地区地质简图及图切剖面图

Fig.2　Simplified geological map and its cutting profile of Gengji－Banqiao area

的钾长石,石英粒度细小且呈他形齿状常与钠长石伴生,片状矿物较少,白云母沿长英矿物之间定向分布,略具片理化,绿帘石和褐铁矿呈微粒状集合体常与云母伴生,方解石和磷灰石多与长英矿物伴生,磷灰石呈细小柱粒状稀散分布(图3e),恢复其原岩为酸性火山岩。

锆石单矿物挑选、制靶、透-反射和阴极发光照相都在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。首先将样品粉碎到0.180～0.154 mm(80～100目),然后利用常规的浮选和电磁法分离出锆石,最后在双目镜下挑选出晶型较好的锆石制靶。阴极发光(CL)采用TESCAN MIRA3场发射扫描电镜和TESCAN公司阴极发光探头进行锆石内部结构分析研究。LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素和微量元素微区分析在湖北省地质试验测试中心完成,测试仪器采用美国Coherent Inc公司生产的GeoLasPro全自动版193 nm ArF准分子激光剥蚀系统(LA)和美国Agilent公司生产的7700X型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用构成的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析系统(LA-ICP-MS),激光束斑直径为32 μm,用He作为剥蚀物质的载气,哈佛大学标准锆石91500作为外标,GJ-1或者Plešovic为监控标样[40]。锆石Lu-Hf同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,实验室采用德国MicroLas公司生产的GeoLasPro2005激光剥蚀系统作为进样的采集系统,测试仪器为Neptune Plus型MC-ICP-MS。分析斑束为44 μm,频率为10 Hz,以标准锆石91500作为外标,TEMORA以及GJ-1进行数据质量监控。分别用ICPMSDataCal (V10.1)[41]、ICPMSDataCal(V8.6)[42]软件对锆石U-Th-Pb测年、Lu-Hf同位素分析结果进行分析,用Isoplot 3.0程序进行谐和图绘制和加权平均年龄计算[43-44]。



a. 耿集变酸性晶屑凝灰岩野外特征;b. 耿集变酸性晶屑凝灰岩镜下特征;c. 耿集过风垭叠层石白云岩野外特征;d. 板桥变酸性火山岩野外特征;e. 板桥变酸性火山岩镜下特征。

图3 耿集-板桥地区野外和镜下岩石特征

Fig.3 Field and microscopic features of the petrology in Gengji and Banqiao area

3　测试结果

3.1　LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

样品 D6024-2 和 D6030-2 中的锆石均以长柱状为主,大小集中在 100～150 μm 之间,自形程度较高,裂纹较少,发育较好的振荡环带(图 4),且 Th/U 值分布在 0.37～1.76 之间(表 1),大部分显示为岩浆锆石的特点[45]。耿集地区变酸性火山凝灰岩(D6024-2)18 个分析点中,12、13、14 号分析点$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为 2 521、2 483、2 457 Ma,可能为捕获锆石,另 15 个分析点除 3 个点(05、07、10 号)相对分散,剩余 12 个分析点在$^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和年龄图(图 5a)上比较集中,$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为(821.7±7.9)Ma (MSWD=2.1),代表原岩成岩年龄。

板桥地区变酸性火山岩(D6030-2)18 个分析点中,05 号分析点因谐和度较差而舍弃,另 17 个分析点除 02、07、14、17 号点相对分散,其余 13 个相对集中的分析点$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(741.2±4.5)Ma (MSWD=1.04),代表原岩成岩年龄(图 5b)。

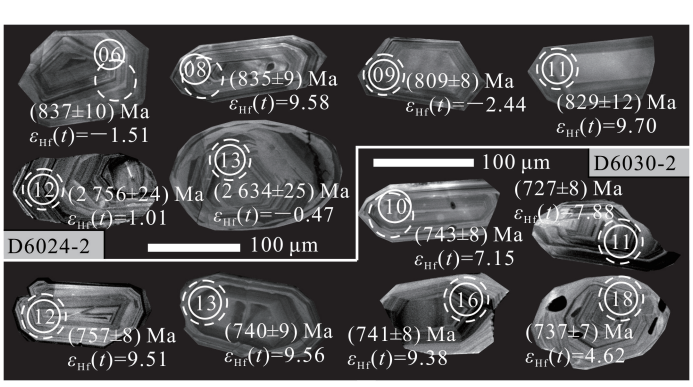
3.2　锆石 Lu-Hf 同位素

对两个样品分别选择了 6 个点进行 Lu-Hf 同位素分析,分析结果见表 2。耿集变火山凝灰岩(D6024-2)两颗太古宙末期的捕获锆石(分析点 12、13)$^{176}Hf/^{177}Hf$ 值分别为 0.281 254 和 0.281 229,$\varepsilon_{Hf}(t)$值分别为 1.01 和 -0.47;分析点 06 和 09 的$^{176}Hf/^{177}Hf$ 值分别为 0.282 218 和 0.282 209,$\varepsilon_{Hf}(t)$值分别为-1.51 和-2.44,T_{DM2}分别为 1 695 和 1 724 Ma;而分析点 08 和 11 的$^{176}Hf/^{177}Hf$ 值分别为 0.282 550 和 0.282 541,$\varepsilon_{Hf}(t)$值分别为 9.58 和 9.70,一阶模式年龄 T_{DM1} 分别为 1 016 和 1 002 Ma。板桥变酸性火山岩(D6030-2)$^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282 454～0.282 608,$\varepsilon_{Hf}(t)$值为 4.62～9.56,一阶模式年龄 T_{DM1} 为 937～1 123 Ma。

4　讨论

鄂北耿集、板桥地区的变火山碎屑岩-沉积岩组合的地层归属主要存在花山群[30]和武当群[10]的争议。1∶20 万宜城幅、随县幅区域地质调查报告[10]认为,这套火山岩系与下伏中元古界打鼓石群呈角度不整合接触,与上覆陡山沱组呈平行不整合接触,另在火山岩中获得 973 Ma 的同位素年龄,岩性组合和年代学证据都与湖北大洪山地区花山群相似。而董云鹏等[30]认为耿集、板桥地区主要岩性为灰色、灰白色绢云石英钠长片岩、绢云母千枚岩、钠长浅粒岩,原岩以酸性火山碎屑岩为主,其岩性组合与随县群(现为武当群)更相似。

花山群主要出露于湖北大洪山地区(图 1),与中元古界打鼓石群共同构成扬子克拉通北缘南华系莲沱组之下的基底[1-2, 46]。耿集地区变火山岩系主要由变酸性火山碎屑岩组成,相似的岩性组合在大洪山地区花山群也发育[46];且在耿集过风垭一带发育一套叠层石白云岩(图 2、图 3c),这套叠层石白云岩可与大洪山地区中元古界打鼓石群陈家冲组对比[10, 11, 37],据此将耿集变火山岩系归为花山群更为合适。武当群出露于南秦岭造山带武当—桐柏一带,为一套以变酸性火山岩、火山碎屑岩为主的早南华世裂谷火山岩系[47],内部可见大量南华纪晚期的镁铁质侵入岩[22, 25]。板桥地区变火山岩系相对独



实线圈代表 LA-ICP-MS 分析点位置,虚线圈代表 Lu-Hf 同位素分析点位置。

图 4　耿集变火山凝灰岩(D6024-2)、板桥变酸性火山岩(D6030-2)代表性锆石阴极发光图

Fig.4　Cathodoluminescence (CL) images for representative zircon grains of meta-tuff in Gengji area (D6024-2) and acidic meta-volcanic in Banqiao area (D6030-2)

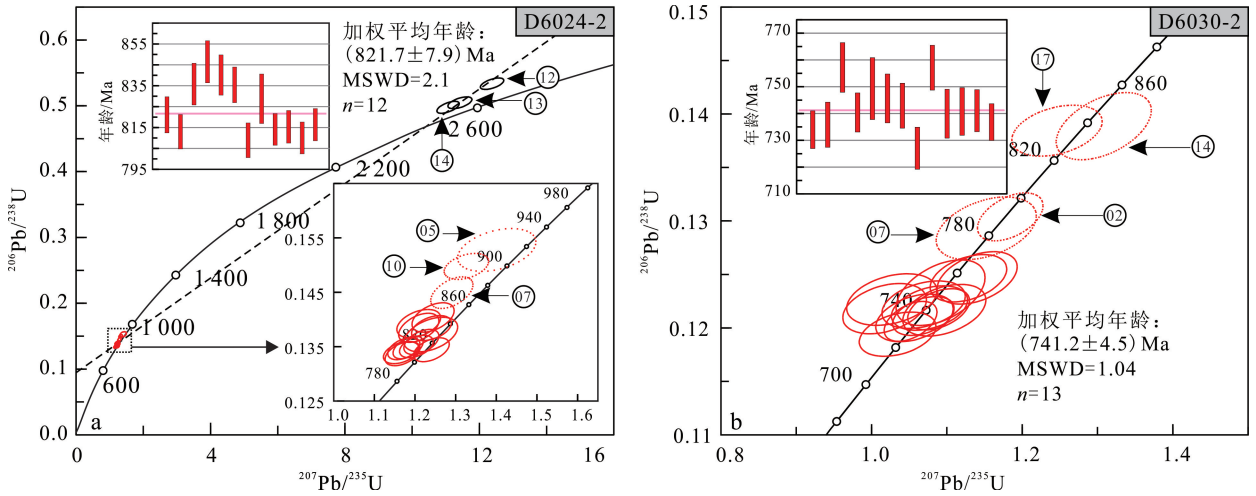


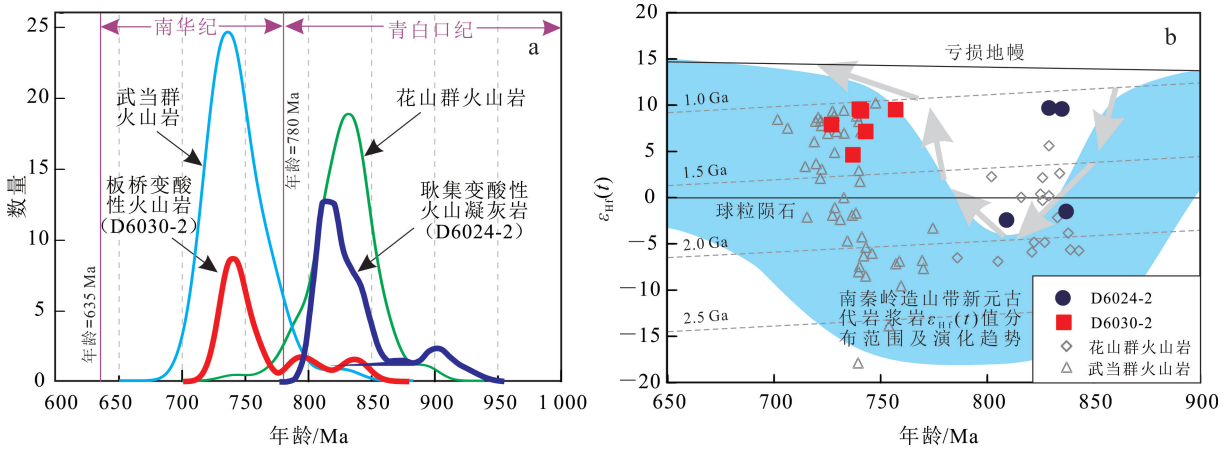
图5 耿集变火山凝灰岩(D6024-2)(a)、板桥变酸性火山岩(D6030-2)(b)LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果图解

Fig.5 Diagrams for LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for meta-tuff in Gengji area (D6024-2) (a) and acidic meta-volcanic in Banqiao area (D6030-2) (b)

立产出,未见打鼓石群白云岩,而在冒山顶一带可见多个基性岩脉、岩株侵入(图2),这一特征与武当—桐柏地区武当群相似[21-22, 25],据此将板桥变火山岩系归为武当群更为合适。

不难发现,耿集、板桥地区变火山岩系均以变酸性火山岩、火山碎屑岩为主,对应的岩性组合在花山群、武当群中都发育,仅从岩性组合方面判别地层归属难免片面。年代学方面,20世纪80年代获得的同位素年龄973 Ma不确定因素较多,本次分别获得耿集变火山凝灰岩、板桥变酸性火山岩锆石U-Pb成岩年龄分别为821.7、741.2 Ma,为探讨耿集、板桥地区的两套浅变质岩系形成时代及属性提供了重要依据。近年对鄂北武当—随枣地区武当群、花山群锆石U-Pb测年结果显示,武当群中的火山岩形成年龄集中在776~703 Ma之间[4, 17, 47-48],而花山群中的火山岩形成年龄集中在841~814 Ma之间[1-2, 14, 46, 49],本次获得的耿集变火山凝灰岩的形成年龄落在花山群范围内,板桥变酸性火山岩的形成年龄落在武当群范围内(图6a)。

另外,Wang等[51]统计南秦岭造山带新元古代



a图花山群火山岩年龄数据据文献[1-2, 5, 12, 46, 49],武当群火山岩年龄数据据文献[4, 47],青白口纪和南华纪绝对年龄区间据文献[50];b图花山群火山岩Hf同位素数据据文献[5, 12],武当群火山岩Hf同位素数据据文献[47],南秦岭造山带新元古代岩浆岩$\varepsilon_{Hf}(t)$值分布范围及演化趋势据文献[51]。

图6 耿集-板桥变火山岩与花山群、武当群火山岩锆石U-Pb年龄频率分布对比图(a)和Hf同位素对比图(b)

Fig.6 Comparison diagram of zircon U-Pb age spectra (a) and zircon Hf isotope (b) between meta-volcanic in Gengji-Banqiao area and volcanic of Huashan Group, Wudang Group

表 1　耿集变火山凝灰岩(D6024-2)、板桥变酸性火山岩(D6030-2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据

Table 1　LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for meta-tuff in Gengji area (D6024-2), acidic meta-volcanic in Banqiao area (D6030-2)

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
D6024-2-01	34.9	206.5	180.3	1.14	0.064 4	0.001 5	1.215 6	0.028 5	0.135 9	0.001 5	754	247	808	13	821	9
D6024-2-02	22.9	121.3	123.3	0.98	0.066 5	0.001 6	1.240 4	0.029 0	0.134 4	0.001 5	820	53	819	13	813	8
D6024-2-03	20.3	125.7	101.1	1.24	0.063 1	0.001 7	1.209 3	0.032 7	0.138 5	0.001 8	709	59	805	15	836	10
D6024-2-04	21.6	62.5	122.7	0.51	0.064 1	0.001 8	1.244 4	0.034 2	0.140 4	0.001 8	746	61	821	15	847	10
D6024-2-05	6.4	16.4	34.9	0.47	0.067 3	0.003 1	1.401 2	0.063 6	0.152 8	0.002 6	856	96	889	27	917	15
D6024-2-06	20.9	89.3	114.9	0.78	0.062 5	0.001 8	1.202 4	0.035 6	0.138 7	0.001 7	700	63	802	16	837	10
D6024-2-07	33.5	181.0	165.2	1.10	0.064 5	0.001 7	1.296 4	0.034 3	0.145 0	0.001 9	759	56	844	15	873	11
D6024-2-08	51.6	207.3	287.8	0.72	0.065 7	0.001 6	1.235 6	0.033 1	0.138 2	0.001 5	798	55	817	15	835	9
D6024-2-09	25.9	116.1	144.3	0.80	0.063 0	0.001 5	1.169 3	0.028 3	0.133 7	0.001 5	707	55	786	13	809	8
D6024-2-10	25.8	66.4	109.6	0.61	0.063 5	0.001 9	1.326 4	0.036 1	0.149 8	0.001 6	724	65	857	16	900	9
D6024-2-11	12.2	43.9	68.5	0.64	0.065 6	0.002 5	1.238 9	0.043 6	0.137 2	0.002 1	794	75	818	20	829	12
D6024-2-12	148.7	92.8	213.7	0.43	0.166 3	0.003 0	12.378 3	0.229 5	0.533 6	0.005 7	2 521	30	2 634	17	2 756	24
D6024-2-13	41.5	28.9	62.3	0.46	0.162 6	0.003 3	11.421 9	0.236 1	0.504 6	0.005 9	2 483	33	2 558	19	2 634	25
D6024-2-14	25.8	15.0	40.4	0.37	0.160 1	0.003 1	11.068 3	0.220 4	0.497 7	0.006 0	2 457	33	2 529	19	2 604	26
D6024-2-15	34.5	201.6	175.4	1.15	0.062 7	0.001 4	1.172 5	0.026 1	0.134 6	0.001 3	698	48	788	12	814	8
D6024-2-16	44.9	251.5	234.5	1.07	0.063 1	0.001 3	1.183 0	0.024 4	0.134 9	0.001 4	722	17	793	11	815	8
D6024-2-17	29.2	146.3	157.2	0.93	0.062 7	0.001 6	1.165 9	0.028 8	0.133 9	0.001 3	698	56	785	14	810	8
D6024-2-18	32.5	167.8	171.3	0.98	0.064 0	0.001 5	1.203 4	0.027 4	0.135 0	0.001 4	743	45	802	13	817	8
D6030-2-01	47.0	286.9	274.2	1.05	0.062 9	0.001 5	1.051 8	0.023 2	0.120 6	0.001 2	706	50	730	11	734	7
D6030-2-02	9.8	52.3	52.9	0.99	0.063 9	0.002 6	1.162 0	0.046 4	0.132 2	0.001 9	739	85	783	22	801	11
D6030-2-03	17.8	128.4	97.4	1.32	0.063 4	0.002 1	1.057 0	0.034 0	0.120 9	0.001 5	720	70	732	17	736	8
D6030-2-04	12.1	44.6	75.2	0.59	0.066 7	0.002 2	1.140 2	0.035 1	0.124 7	0.001 6	828	64	773	17	757	9

续表 1

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
D6030-2-05	7.2	32.6	35.7	0.91	0.114 4	0.007 4	2.184 4	0.159 5	0.133 1	0.002 9	1 870	117	1 176	51	805	16
D6030-2-06	33.2	114.9	215.3	0.53	0.064 6	0.001 6	1.089 0	0.027 1	0.121 7	0.001 3	761	52	748	13	741	7
D6030-2-07	25.4	103.2	147.9	0.70	0.066 1	0.001 7	1.184 1	0.028 8	0.130 4	0.001 5	809	56	793	13	790	8
D6030-2-08	15.4	109.8	88.1	1.25	0.063 8	0.002 1	1.091 6	0.039 0	0.123 3	0.002 0	744	70	749	19	750	12
D6030-2-09	11.7	48.4	73.9	0.66	0.060 6	0.002 4	1.026 9	0.039 6	0.122 7	0.001 6	633	83	717	20	746	9
D6030-2-10	16.8	133.2	90.2	1.48	0.063 6	0.002 3	1.069 1	0.036 5	0.122 2	0.001 5	728	275	738	18	743	8
D6030-2-11	15.5	83.9	95.0	0.88	0.062 7	0.002 1	1.034 6	0.033 6	0.119 4	0.001 4	698	70	721	17	727	8
D6030-2-12	29.9	147.1	179.0	0.82	0.065 4	0.001 9	1.128 6	0.033 6	0.124 7	0.001 5	787	62	767	16	757	8
D6030-2-13	13.1	72.0	78.6	0.92	0.065 8	0.002 4	1.096 7	0.036 5	0.121 7	0.001 6	800	78	752	18	740	9
D6030-2-14	20.5	125.3	111.3	1.13	0.068 1	0.002 0	1.308 4	0.041 7	0.138 9	0.002 1	872	61	849	18	838	12
D6030-2-15	12.8	115.1	65.6	1.76	0.060 8	0.002 3	1.017 3	0.036 7	0.121 8	0.001 6	632	81	713	18	741	9
D6030-2-16	17.5	78.4	110.0	0.71	0.063 6	0.001 9	1.076 9	0.033 4	0.121 9	0.001 4	728	63	742	16	741	8
D6030-2-17	15.2	48.9	87.1	0.56	0.065 1	0.002 1	1.246 2	0.039 6	0.138 4	0.001 6	789	73	822	18	836	9
D6030-2-18	24.2	115.2	151.5	0.76	0.063 6	0.001 6	1.068 7	0.026 9	0.121 1	0.001 2	728	56	738	13	737	7

表 2　耿集变火山凝灰岩(D6024－2)、板桥变酸性火山岩(D6030－2)锆石 Lu－Hf 同位素数据

Table 2　Zircon Hf isotopic data for meta-tuff in Gengji area (D6024－2), acidic meta-volcanic in Banqiao area (D6030－2)

分析点号	$^{176}Hf/^{177}Hf$	1σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	1σ	$^{176}Yb/^{177}Hf$	1σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	年龄/Ma	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	1σ	T_{DM1}/Ma	1σ	T_{DM2}/Ma	1σ	$f_{Lu/Hf}$
D6024－2－06	0.282 218	0.000 020	0.000 743	0.000 024	0.022 456	0.000 665	−19.6	837	0.282 206	−1.51	0.71	1 448	56	1 695	78	−0.98
D6024－2－08	0.282 550	0.000 015	0.001 864	0.000 042	0.058 650	0.001 100	−7.9	835	0.282 521	9.58	0.54	1 016	44	1 082	60	−0.94
D6024－2－09	0.282 209	0.000 017	0.000 733	0.000 028	0.021 902	0.000 764	−19.9	809	0.282 198	−2.44	0.60	1 460	47	1 724	66	−0.98
D6024－2－11	0.282 541	0.000 017	0.000 829	0.000 015	0.024 438	0.000 602	−8.2	829	0.282 528	9.70	0.60	1 002	47	1 071	66	−0.98
D6024－2－12	0.281 254	0.000 016	0.001 122	0.000 012	0.036 640	0.000 355	−53.7	2 521	0.281 200	1.01	0.57	2 793	43	2 900	60	−0.97
D6024－2－13	0.281 229	0.000 019	0.000 965	0.000 015	0.028 698	0.000 427	−54.6	2 483	0.281 183	−0.47	0.66	2 816	51	2 948	71	−0.97
D6030－2－10	0.282 538	0.000 019	0.002 013	0.000 091	0.059 992	0.002 745	−8.3	743	0.282 510	7.15	0.67	1 038	55	1 143	74	−0.94
D6030－2－11	0.282 556	0.000 019	0.001 098	0.000 027	0.031 481	0.001 015	−7.7	727	0.282 541	7.88	0.69	988	55	1 090	76	−0.97
D6030－2－12	0.282 596	0.000 018	0.001 948	0.000 031	0.055 381	0.001 144	−6.2	757	0.282 568	9.51	0.66	953	53	1 023	73	−0.94
D6030－2－13	0.282 608	0.000 019	0.001 999	0.000 049	0.057 937	0.001 326	−5.8	740	0.282 580	9.56	0.67	937	55	1 007	74	−0.94
D6030－2－16	0.282 593	0.000 019	0.001 367	0.000 036	0.038 917	0.001 162	−6.3	741	0.282 574	9.38	0.68	941	54	1 018	75	−0.96
D6030－2－18	0.282 454	0.000 017	0.000 854	0.000 012	0.021 672	0.000 322	−11.2	737	0.282 442	4.62	0.60	1 123	47	1 278	66	−0.97

岩浆岩锆石 Hf 同位素数据研究时发现,$\varepsilon_{Hf}(t)$值在>850 Ma 和 750～600 Ma 以大于 0 为主,主体表现为陆壳增生的特点,而 850～750 Ma 的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值以小于 0 为主,表现为以陆壳物质再循环为主的特点(图 6b)。笔者通过收集、分析前人对花山群、武当群火山岩锆石 Hf 同位素测试的数据,发现武当群 $\varepsilon_{Hf}(t)$值分布与 Wang 等[51]总结的规律高度相似,而花山群 $\varepsilon_{Hf}(t)$值分布与此规律有着较大的出入,具体表现为花山群出现部分锆石分析点 $\varepsilon_{Hf}(t)$值大于 0(图 6b)。本次获得的板桥变酸性火山岩与武当群火山岩 Hf 同位素相似,以 $\varepsilon_{Hf}(t)$值大于 0 的新生地壳为主;耿集变火山凝灰岩与花山群火山岩 Hf 同位素相似,$\varepsilon_{Hf}(t)$值既有正值也有负值,说明它们既有新生地壳的形成,也有古老地壳的循环作用。

综合对比锆石年代学、Lu－Hf 同位素、岩性组合和岩石产出等方面的特点,结合桐柏—大别造山带区域地质背景,本文认为耿集地区变火山岩系应属于花山群组成部分,与打鼓石群叠层石白云岩同作为扬子陆块基底呈穹窿产出;而板桥地区变火山岩系与基性侵入岩共生,其应属于武当群组成部分,为南秦岭造山带印支期造山过程中逆冲到扬子克拉通寒武系—奥陶系之上的残块(图 2 剖面 AB 所示)。耿集-板桥地区变火山岩系的清理为鄂北新元古代地层划分获得了新的依据,也为扬子克拉通北缘新元古代地质研究提供了新的线索。

5 结论

1)鄂北耿集地区变火山岩系锆石 U－Pb 成岩年龄为 821.7 Ma,锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为－2.44～9.70,综合其形成时间、Hf 同位素组成和岩性组合特点,建议将其归为青白口系花山群,是扬子克拉通前南华纪基底组成部分。

2)鄂北板桥地区变火山岩系锆石 U－Pb 成岩年龄为 741.2 Ma,锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(4.62～9.56)大于 0,综合其形成时间、Hf 同位素组成和岩性组合特点,其应归为南华系武当群,是印支期造山过程逆冲到扬子克拉通盖层上的残块。

参考文献(References):

[1] 陈超,毛新武,胡正祥,等. 鄂北大洪山地区～817 Ma 洋岛玄武岩的发现及意义[J]. 地质科技情报,2017,36(6):22－31.
Chen Chao, Mao Xinwu, Hu Zhengxiang, et al. Discovery of～817 Ma Oceanic Island Basalts in the Dahongshan Region, Northern Hubei Province and Its Significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(6): 22－31.

[2] 胡正祥,陈超,毛新武,等. 鄂北大洪山晋宁期岛弧火山岩和增生杂岩的厘定及地质意义[J]. 资源环境与工程,2015,29(6):757－766.
Hu Zhengxiang, Chen Chao, Mao Xinwu, et al. Documentation of Jingningian Island-Arc Volcanic Rocks and Accretionary Complexes in the Dahongshan Region, Northern Hubei and Its Tectonic Significance[J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(6): 757－766.

[3] 邓乾忠,杨青雄,毛新武,等. 湖北武当—随枣地区中—晚南华世岩石地层序列与年代学研究[J]. 资源环境与工程,2016,30(2):132－142.
Deng Qianzhong, Yang Qingxiong, Mao Xinwu, et al. Study of Lithostratigraphic Sequences and Chronology of Middle-Late Nanhua in Wudang-Suizhou Area[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(2): 132－142.

[4] 薛怀民,马芳,宋永勤. 扬子克拉通北缘随(州)-枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U－Pb 年代学研究[J]. 岩石学报,2011,27(4):1116－1130.
Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin. Geochemistry and SHRIMP Zircon U－Pb Data of Neoproterozoic Meta-Magmatic Rocks in the Suizhou-Zaoyang Area, Northern Margin of the Yangtze Craton, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1116－1130.

[5] Deng Qi, Wang Jian, Wang Zhengjiang, et al. Continental Flood Basalts of the Huashan Group, Northern Margin of the Yangtze Block: Implications for the Breakup of Rodinia[J]. International Geology Review, 2013, 55(15): 1865－1884.

[6] Zhao Junhong, Li Qiwei, Liu Hang, et al. Neoproterozoic Magmatism in the Western and Northern Margins of the Yangtze Block (South China) Controlled by Slab Subduction and Subduction-Transform-Edge-Propagator[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 187: 1－18.

[7] Dong Yunpeng, Sun Shengsi, Yang Zhao, et al. Neoproterozoic Subduction-Accretionary Tectonics of the South Qinling Belt, China[J]. Precambrian Research, 2017, 293: 73－90.

[8] 景先庆,杨振宇,仝亚博,等. 三峡地区新元古代莲沱

组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 165-180.
Jing Xianqing, Yang Zhenyu, Tong Yabo, et al. A SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of a Tuff Bed from the Bottom of Liantuo Formation in the Three Gorges Area and Its Geological Implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 165-180.

[9] 崔建军, 王艳红, 郑光高, 等. 大悟杂岩的形成和抬升时代及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(1): 139-153.
Cui Jianjun, Wang Yanhong, Zheng Guanggao, et al. The Timing of the Formation and Exhumation of the Dawu Complex in West Dabie Orogen, East China, and Its Geological Significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1): 139-153.

[10] 湖北省地质局区域地质测量队. 1∶20 万宜城幅(H-49-V)、随县幅(H-49-M)区域地质调查报告[R]. 武汉: 湖北省地质调查院, 1982.
Regional Geological Survey Team of Hubei Geological Bureau. 1∶200 000 Regional Geology Survey of Yicheng (H-49-V) and Suixian (H-49-M)[R]. Wuhan: Hubei Geological Survey, 1982.

[11] 湖北省地质矿产局鄂东北地质大队一分队. 1∶5 万客店坡东半幅(H49-22-D)、古城畈幅(H49-23-C)、三阳店幅(H49-35-A)区域地质调查报告[R]. 武汉: 湖北省地质调查院, 1986.
First Geological Brigade of Hubei Geological Bureau. 1∶50 000 Regional Geology Survey of Eastern Half of Kedianpo (H49-22-D), Guchengfan (H49-23-C) and Sanyangdian (H49-35-A)[R]. Wuhan: Hubei Geological Survey, 1986.

[12] Li Kuizhou, Deng Qi, Hou Mingcai, et al. Geochronology and Sedimentology of the Huashan Group in the Northern Yangtze Block: Implications for the Initial Breakup of the South China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2020, 109(3/4): 2113-2131.

[13] Yang Zhenning, Yang Kunguang, Polat Ali, et al. Early Crustal Evolution of the Eastern Yangtze Block: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Composition of the Neoproterozoic Huashan Group in the Dahongshan Area[J]. Precambrian Research, 2018, 309: 248-270.

[14] 田辉, 李怀坤, 周红英, 等. 扬子板块北缘花山群沉积时代及其对 Rodinia 超大陆裂解的制约[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2387-2408.
Tian Hui, Li Huaikun, Zhou Hongying, et al. Depositional Age of the Huashan Group on the Northern Margin of the Yangtze Plate and Its Constraints on Breakup of the Rodinia Supercontinent[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(11): 2387-2408.

[15] Yang Zhenning, Yang Kunguang, Xu Yang, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopic Composition, and Geological Implications of the Neoproterozoic Meta-Sedimentary Rocks in Suizhou-Zaoyang Area, the Northern Yangtze Block[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 58(11): 1910-1923.

[16] 祝禧艳, 陈福坤, 王伟, 等. 豫西地区秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 817-829.
Zhu Xiyan, Chen Fukun, Wang Wei, et al. Zircon U-Pb Ages of Volcanic and Sedimentary Rocks of the Wudang Group in the Qinling Orogenic Belt with in Western Henan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(6): 817-829.

[17] 蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 等. 武当群上部变沉积岩组时代归属问题:单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地层学杂志, 2006, 30(1): 60-63.
Cai Zhiyong, Luo Hong, Xiong Xiaolin, et al. A Discussion on the Age of the Meta-Sedimengtary Rocks in the Upper Part of the Wudang Group: Constrained by the Grain-Zircon U-Pb Dating[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(1): 60-63.

[18] 罗郧, 李金发. 武当地块耀岭河群中两类不同性质的酸性火山岩研究[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(1): 125-132.
Luo Yun, Li Jinfa. Geochemical Characteristics for Two Types of Acid Volcanic Rocks of the Yaolinghe Group in the Wudang Block[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(1): 125-132.

[19] 赵国春, 胡健民, 孟庆任. 武当地块西部席状基性侵入岩群地球化学特征: 南秦岭古生代底侵作用的依据[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 612-622.
Zhao Guochun, Hu Jianmin, Meng Qingren. Geochemistry of the Basic Sills in the Western Wudang Block: The Evidences of the Paleozoic Underplating in South Qinling[J]. Acta Patrologica Sinica, 2003, 19(4): 612-622.

[20] 胡健民, 赵国春, 孟庆任, 等. 武当地块基性侵入岩

群的地质特征与构造意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 601-611.
Hu Jianmin, Zhao Guochun, Meng Qingren, et al. The Geological Features and Tectonic Significances of the Basic Swarms in Wudang Terrain of Qinling Orogen[J]. Acta Patrologica Sinica, 2003, 19(4): 601-611.

[21] Liu Hang, Zhao Junhong, Li Longming. Opening of the Proto-Tethys Ocean: Implications from the Late Neoproterozoic Mafic Dike Swarms in the South Qinling Belt, South China[J]. Gondwana Research, 2022, 101: 44-58.

[22] Zhao Junhong, Asimow P D. Formation and Evolution of a Magmatic System in a Rifting Continental Margin: Neoproterozoic Arc- and MORB-Like Dike Swarms in South China[J]. Journal of Petrology, 2018, 59(9): 1811-1844.

[23] Wang Ruirui, Xu Zhiqin, Santosh M, et al. Middle Neoproterozoic (ca. 705-716 Ma) Arc to Rift Transitional Magmatism in the Northern Margin of the Yangtze Block: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes[J]. Journal of Geodynamics, 2017, 109: 59-74.

[24] Zhu Xiyan, Chen Fukun, Hu Nie, et al. Neoproterozoic Tectonic Evolution of South Qinling, China: Evidence from Zircon Ages and Geochemistry of the Yaolinghe Volcanic Rocks[J]. Precambrian Research, 2014, 245: 115-130.

[25] Wang Mengxi, Wang C Y, Sun Yali. Mantle Source, Magma Differentiation and Sulfide Saturation of the ~637 Ma Zhouan Mafic-Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block, Central China[J]. Precambrian Research, 2013, 228: 206-222.

[26] 湖北省地质调查院. 中国区域地质志·湖北志[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
Hubei Geological Survey. Regional Geology of Hubei Province, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.

[27] 董云鹏, 张国伟, 赵霞, 等. 鄂北大洪山岩浆带地球化学及其构造意义:南秦岭勉略洋盆东延及其俯冲的新证据[J]. 中国科学:D辑, 2003, 33(12): 1143-1153.
Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhao Xia, et al. Geochemistry and Tectonic Implication of Igneous Rocks in the Northern Hubei Province: New Evidence of Dubduction and Eastward Extension of the Mianlue Ocean in the South Qinling[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(12): 1143-1153.

[28] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhao Xia, et al. Geochemistry of the Subduction-Related Magmatic Rocks in the Dahong Mountains, Northern Hubei Province[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2006, 47(4): 366-377.

[29] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Lai Shaocong, et al. An Ophiolitic Tectonic Mélange First Discovered in Huashan Area, South Margin of Qinling Orogenic Belt, and Its Tectonic Implications[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 1999, 42(3): 292-302.

[30] 董云鹏, 张国伟, 柳小明, 等. 鄂北大洪山地区"花山群"的解体[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 371-376.
Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, et al. Disintegration of the Huashan Group in the Dahongshan Mountain Area, Northern Hubei[J]. Regional Geology of China, 1998, 17(4): 371-376.

[31] Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Tectonic Evolution of a Composite Collision Oogen: An Overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1402-1428.

[32] Liu Xiaochun, Li Sanzhong, Jahn Bor-Ming. Tectonic Evolution of the Tongbai-Hong'an Orogen in Central China: From Oceanic Subduction/Accretion to Continent-Continent Collision[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 58(9): 1477-1496.

[33] 杨坤光, 程万强, 朱清波, 等. 论大别山南缘襄樊—广济断裂的两次向南逆冲推覆[J]. 地质论评, 2011, 54(4): 480-494.
Yang Kunguang, Cheng Wanqiang, Zhu Qingbo, et al. A Discussion on Two Times Southward Thrusting of Xiangfan-Guangji Fault in South Dabie Orogen, Central China[J]. Geological Review, 2011, 54(4): 480-494.

[34] Wang Mengxi, Wang Christinayan, Zhao Junhong. Zircon U/Pb Dating and Hf-O Isotopes of the Zhouan Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block, SW China: Constraints on the Nature of Mantle Source and Timing of the Spercontinent Rodinia Breakup[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(7): 777-787.

[35] Ahmed Hafizullah Abba, Ma Changqian, Wang Lianxun, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Peralkaline A-Type Granites and Syenites from the Suizhou-Zaoyang Region, Central

China[J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(5): 1181-1202.

[36] 马昌前, 余振兵, 许聘, 等. 桐柏-大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类:SHRIMP 锆石年代学和地球化学证据[J]. 中国科学:D 辑, 2004, 34(12): 1100-1110.
Ma Changqian, She Zhenbing, Xu Pin, et al. Silurian A-Type Granitoids in the Southern Margin of the Tongbai-Dabieshan: Evidence from SHRIMP Zircon Geochronology and Geochemistry[J]. Science in China:Series D, 2004, 34(12): 1100-1110.

[37] 孔令耀, 毛新武, 陈超, 等. 扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义[J]. 地球科学, 2017, 42(4): 485-501.
Kong Lingyao, Mao Xinwu, Chen Chao, et al. Chronological Study on Detrital Zircons and Its Geological Significance from Mesoproterozoic Dagushi Group in the Dahongshan Area, North Margin of the Yangtze Block[J]. Earth Science, 2017, 42(4): 485-501.

[38] 陈超, 苑金玲, 孔令耀, 等. 扬子北缘大洪山地区早古生代基性岩脉的厘定及其地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(7): 2370-2388.
Chen Chao, Yuan Jinling, Kong Lingyao, et al. Documentation of Early Paleozoic Mafic Dykes in the Dahongshan Region, Northern Yangze Block and Its Geological Significance[J]. Earth Science, 2018, 43(7): 2370-2388.

[39] 陈璘. 襄樊—广济断裂湖北段构造特征研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 186-191.
Chen Lin. Study of Structrural Characteristics of Xiangfan-Guangji Fault in Hubei Province[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31(2): 186-191.

[40] 周亮亮, 魏均启, 王芳, 等. LA-ICP-MS 工作参数优化及在锆石 U-Pb 定年分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2017, 36(4): 350-359.
Zhou Liangliang, Wei Junqi, Wang Fang, et al. Optimization of the Working Parameters of LA-ICP-MS and Its Application to Zircon U-Pb Dating[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(4): 350-359.

[41] Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.

[42] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.

[43] Ludwig Kenneth R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.

[44] 贺根文, 周兴华, 袁慧香, 等. 赣南高陂花岗斑岩地球化学、年代学特征及其对成矿作用的启示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 161-176.
He Genwen, Zhou Xinghua, Yuan Huixiang, et al. Geochemistry and Geochronology of Early Cretaceous Granite Porphyry in Gaobei, South Jiangxi Province and Its Implications for Mineralization[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 161-176.

[45] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1594.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1594.

[46] 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等. 扬子北缘青白口系土门岩组岛弧火山-碎屑岩的定义及意义[J]. 地层学杂志, 2017, 41(3): 304-317.
Hu Zhengxiang, Chen Chao, Mao Xinwu, et al. The Qingbaikouan Tumen Formation-Complex Island Arc Volcanic-Clastic Rocks on the Northern Margin of Yangtze Block and Its Significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2017, 41(3): 304-317.

[47] Yang Yanan, Wang Xuance, Li Qiuli, et al. Integrated in Situ U-Pb Age and Hf-O Analyses of Zircon from Suixian Group in Northern Yangtze: New Insights into the Neoproterozoic Low-$\delta^{18}O$ Magmas in the South China Block[J]. Precambrian Research, 2016, 273: 151-164.

[48] 孔令耀, 杨成, 李琳静, 等. 扬子北缘南华系武当群锆石 U-Pb 年龄:对扬子北缘南华纪裂解模式的启示[J]. 地质通报, 2022, 41(12): 2224-2243.
Kong Lingyao, Yang Cheng, Li Linjing, et al. Zircon U-Pb Age of Wudang Group: Implication to the Breakup Model of North Yangtze Block During the Early Neoproterozoic[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(12): 2224-2243.

[49] 谢纪海, 胡正祥, 毛新武, 等. 鄂北大洪山晋宁期 MORB-like 玄武岩的识别与洋内俯冲作用[J]. 中国

地质，2019，46(6)：1496－1511.
Xie Jihai，Hu Zhengxiang，Mao Xinwu，et al. The Discrimination of Jinningian MORB-Like Basalt and Intra-Oceanic Subduction in the Dahongshan Area，Northern Hubei[J]. Geology in China，2019，46(6)：1496－1511.

[50] 章森桂，张允白，严惠君.《中国地层表》(2014)正式使用[J]. 地层学杂志，2015，39(4)：359－366.
Zhang Sengui，Zhang Yunbai，Yan Huijun. Introduction to the Stratigraphic Chart of China (2014)[J]. Journal of Stratigraphy，2015，39(4)：359－366.

[51] Wang Ruirui，Xu Zhiqin，Santosh M，et al. Mid-Neoproterozoic Magmatism in the Northern Margin of the Yangtze Block，South China：Implications for Transition from Subduction to Post-Collision[J]. Precambrian Research，2021，354：106073.