

南秦岭随枣地块耀岭河组双峰式火山岩:对扬子克拉通北缘大陆裂解过程的约束

吴年文^{1,2}, 江拓^{1,2}, 徐琼^{2,3}, 赵小明^{1,2}, 赵龙⁴, 邱啸飞^{1,2,3*}

WU Nianwen^{1,2}, JIANG Tuo^{1,2}, XU Qiong^{2,3}, ZHAO Xiaoming^{1,2}, ZHAO Long⁴, QIU Xiaofei^{1,2,3*}

1. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中南地质科技创新中心, 湖北 武汉 430205;

3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

4. 中国冶金地质总局山东局测试中心, 山东 济南 250014

1. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

4. The Testing Center of Shandong Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250014, Shandong, China

摘要:长期以来, 扬子克拉通北缘新元古代地质构造演化一直是地学界研究的热点。在南秦岭随州地区耀岭河组中新识别出一套双峰式变火山岩, 对其开展锆石 U-Pb 年代学研究结果表明, 变玄武岩中锆石较少, 且多为捕获锆石, 年龄组成特征与下伏武当岩群顶部岩石中碎屑锆石基本一致; 白云母千枚岩中锆石年龄集中, 获得的 U-Pb 年龄为 623 ± 3 Ma, 代表了南秦岭随枣地区耀岭河组的形成时代, 该结果与侵入武当岩群中的基性岩墙年龄 650~600 Ma 一致, 两者应为同时期不同产出相的岩浆作用的产物。结合区域研究成果, 扬子克拉通北缘裂解可能经历了更长期且复杂的地质构造过程, 西部裂解较早, 东部(现今方向)较晚, 总体呈“拉链式”裂解模式。

关键词: 南秦岭; 随州地区; 耀岭河组; 双峰式火山岩; 大陆裂解

中图分类号: P588.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)06-0920-10

Wu N W, Jiang T, Xu Q, Zhao X M, Zhao L, Qiu X F. Recognition of Late Neoproterozoic bimodal volcanic rocks from the Yaolinghe Formation in the Suizao terrane of South Qinling massif and constraints on the continental rifting of the northern margin of Yangtze craton. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 920-929

Abstract: Neoproterozoic tectonic evolution of the northern Yangtze craton is of great significance to the Precambrian geological evolution of South China. Zircon samples collected from the newly recognized bimodal meta-volcanic rocks of the Yaolinghe Formation in the Suizhou area were dated by LA-ICP-MS U-Pb method. Most zircons in the metabasalts are inherited zircons, their ages are consistent with those of detrital zircons from the underlying Wudang Formation in the region. Geochronological results also indicate that the muscovite-phylrites (felsic rocks) were formed at 623 ± 3 Ma, representing the sedimentary age of the Yaolinghe Formation, synchronous with the 650-600 Ma intrusive sills in the Suizao terrane. Combined with the new geochronological data recording rifting-

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-09-25

资助项目: 中国地质调查局项目《国家地质大数据汇聚与管理》(编号: DD20190385)、《地质调查综合智能编图系统与应用》(编号: DD20190415) 和国家自然科学基金项目《扬子克拉通神农架地区新元古代基性岩墙时代、成因和构造意义的地球化学研究》(批准号: 41303026)

作者简介: 吴年文(1987-), 硕士, 助理研究员, 从事区域地质调查及地层学研究。E-mail: wunianwen@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者: 邱啸飞(1985-), 副研究员, 岩石学和地球化学专业。E-mail: qiuxiaofei@mail.cgs.gov.cn

related magmatic-sedimentary rocks during the Late Neoproterozoic in the northern margin of the Yangtze craton, it can be advocated that the breakup of the Rodinia supercontinent in the northern part of the Yangtze craton might have been a long-lasting process. An oblique diachronous rifting model is further hypothesized for the breakup process.

Key words: South Qingling Massif; Suizao terrane; Yaolinghe Formation; bimodal volcanic rocks; continental rifting

地质历史时期超大陆的周期性聚合和裂解过程对地球古气候、海洋化学组成及生命演化等均产生了重要影响^[1-3]。华南陆块是中国东部最重要的构造块体之一,目前大多数研究者认为其由扬子克拉通和华夏陆块于新元古代沿江南造山带碰撞拼合而成^[4-8]。然而,不断积累的证据表明,华南陆块本身可能由不同次一级陆块于元古宙经多次碰撞拼合形成^[9-13]。因此,要较完整地认识中国东部统一陆块的形成与演化历史,离不开对其内部不同构造单元前寒武纪地质构造过程的深入了解。

扬子克拉通作为华南陆块的重要组成部分,由于大面积被巨厚的显生宙地层覆盖,鲜有大范围的前寒武纪地质体出露,因而至今有关其前寒武纪演化过程仍缺乏系统、详细地了解。南秦岭块体是秦岭-大别造山带的重要构造单元之一,长期以来被认为代表了扬子克拉通北缘卷入造山带的部分^[14]。部分研究者提出,在泥盆纪勉略洋盆打开以前,南秦岭块体是扬子克拉通北缘的一部分^[15-17]。随枣地块作为南秦岭块体的重要组成部分,被认为代表了南秦岭前震旦纪浅变质过渡基底,保留了秦岭-大别造山带较完整的前寒武纪基底岩系,因而成为解读南秦岭块体、扬子克拉通北缘新元古代地质构造演化过程的理想窗口。

在近年来对南秦岭随枣地块开展的野外地质调查基础上,本次编图研究在随枣地块新元古代耀岭河组中新识别出一套双峰式火山岩,对该套双峰式火山岩中变玄武岩和白云母千枚岩分别开展了锆石 U-Pb 年代学研究,探讨了该套地层的形成时代,为扬子克拉通北缘新元古代末裂解过程提供了新的年代学资料。

1 区域地质概况

秦岭-大别-苏鲁造山带位于扬子克拉通和北克拉通的拼合部位,商丹缝合带和勉略缝合带将近东西向秦岭-大别-苏鲁造山带由南至北分为扬子克拉通北缘、南秦岭块体和北秦岭块体^[18]。基于扬子克拉通北缘和南秦岭块体新元古代地层中岩

浆作用时代的一致性,南秦岭块体被大多数学者认为是扬子克拉通北缘卷入造山带的一部分^[19]。

随枣地块位于南秦岭块体东缘,其变质基底主要由新太古代-古元古代陡岭杂岩、新元古代武当岩群火山-沉积岩及之上耀岭河组双峰式火山-沉积地层构成。

陡岭杂岩主要为一套中级变质杂岩,由条带状闪长质-花岗质片麻岩(包括角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、斜长片麻岩和二长片麻岩)组成,夹钙硅酸岩变粒岩、斜长角闪岩和大理岩,其中斜长角闪岩有时与片麻岩呈互层状产出,为南秦岭陆块内典型的早前寒武纪结晶基底,其与新元古代武当岩群以韧性剪切带相隔。

武当岩群可分为两部分。下部由中厚层状长石石英砂岩、长石砂岩、石英杂砂岩夹少量岩屑砂岩、粉砂岩、泥岩组成;上部为典型的中酸性火山-沉积岩组合,主要由变英安岩-流纹岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩及变碎屑碳酸盐岩构成。武当岩群上、下两部分以韧性剪切带相隔。

随枣地块耀岭河组整合覆盖于武当岩群之上,主要由黑云绿帘钠长片岩、绿帘钠长片岩等组成。随枣地块变质基底岩石均经历了相对强烈的变形和蓝片岩相低温-高压变质作用,但目前大多已退变为绿片岩相岩石组合,蓝片岩仅呈条带状残留于绿片岩中。前人已对随枣地块武当岩群开展了年代学研究,锆石 U-Pb 定年结果表明,随枣地块武当岩群沉积时代为 770~680 Ma^[20-23]。与武当岩群相比,目前对随枣地块耀岭河组研究较少,有关其时代、沉积环境等均不清楚。原岩为辉长-辉绿岩的基性岩墙或基性岩脉近顺层侵入武当岩群和耀岭河组中,前人获得的基性岩脉年龄为 650~600 Ma^[20, 24-26]。通过最近的地质调查研究,在随州市以北高城镇附近识别出一组双峰式变火山岩地层,产于武当岩群之上,划归耀岭河组,对该套火山岩地层开展相应的年代学研究,有望对随枣地块耀岭河组的时代提供有效约束。

2 样品特征和分析方法

样品采自随州市北部高城镇附近公路边耀岭河组(图1),野外可见变玄武岩和白云母千枚岩互层产出(图2-a),变玄武岩中可见明显的枕状构造,表明耀岭河组变火山岩原岩为海相火山岩(图2-b)。耀岭河组整体产状向北东(倾向 50°)倾斜,与下伏武当岩群呈整合接触关系。变玄武岩和白云母千枚岩在空间上密切相关,两者之间呈整合接触关系。

样品 17GC-11 为白云母千枚岩,岩石具粒状片状变晶结构,片状构造。主要矿物由白云母(92%)、石英(4%)及少量钾长石、斜长石(4%)组成,副矿物见不透明金属矿物。岩石受构造作用影响,镜下褶皱现象明显(图2-c)。白云母呈他形片状、鳞片状,粒径 $0.10\sim 0.32$ mm,最大约 0.78 mm,干涉色鲜艳,个别可见闪突起现象,定向排列明显。石英呈他形粒状,粒径 $0.12\sim 0.30$ mm,颗粒间呈平直接触,多分布于定向排列的白云母周围,局部镶嵌或夹杂于白云母片状集合体内,部分波状消光。钾长石呈他形板状,粒径 $0.14\sim 0.25$ mm,粘土化较强,表面较脏杂。斜长石呈他形板状,粒径 $0.12\sim 0.24$ mm,隐约可见聚片双晶,局部可见长英质岩屑、晶屑(图2-c),推测其原岩可能为酸性火山(凝灰)岩。

样品 17GC-13 为变玄武岩,岩石具变余斑状结构,斑晶为基性斜长石,呈半自形-他形板状,粒径 $0.24\sim 0.68$ mm,隐约可见聚片双晶, $An=54$,多数已绢云母化、粘土化;基质具间粒-间隐结构,主要由微晶斜长石及隐晶质物质组成,微晶斜长石呈细针状,表面已蚀变完全,表面附着较多细鳞片状维晶绢云母。隐晶质物质可能多为后期蚀变产物粘土矿物类;副矿物见不透明金属矿物(图2-d)。岩石整体蚀变强烈,主要为绢云母化及粘土化。

样品采集后直接送往河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司进行锆石分选工作。锆石分选采用传统重磁技术完成。将锆石粘于环氧树脂上进行制靶,然后进行阴极发光(CL)照相以确定锆石内部结构,以便于测年过程中选择合适区域。锆石制靶、透射光、反射光及 CL 照相均在北京铀年领航科技有限公司完成。透射光、反射光及 CL 照相在配备英国 Gatan 公司阴极荧光探头装置的 JSM6510 扫描电镜上完成。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试在中国冶金地质总局山东局测试中心完成。测试仪器为装配 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 Thermol Element II 型 ICP-MS 联机。实验中采用氦气作为剥蚀物质载气,激光束斑直径为 $32\text{ }\mu\text{m}$ 。锆石 U-Pb 同位素组成原始数据采用 ICPMSDataCal 8.3 软件进行处理^[27]。将锆石 91500 作为外标,同时将

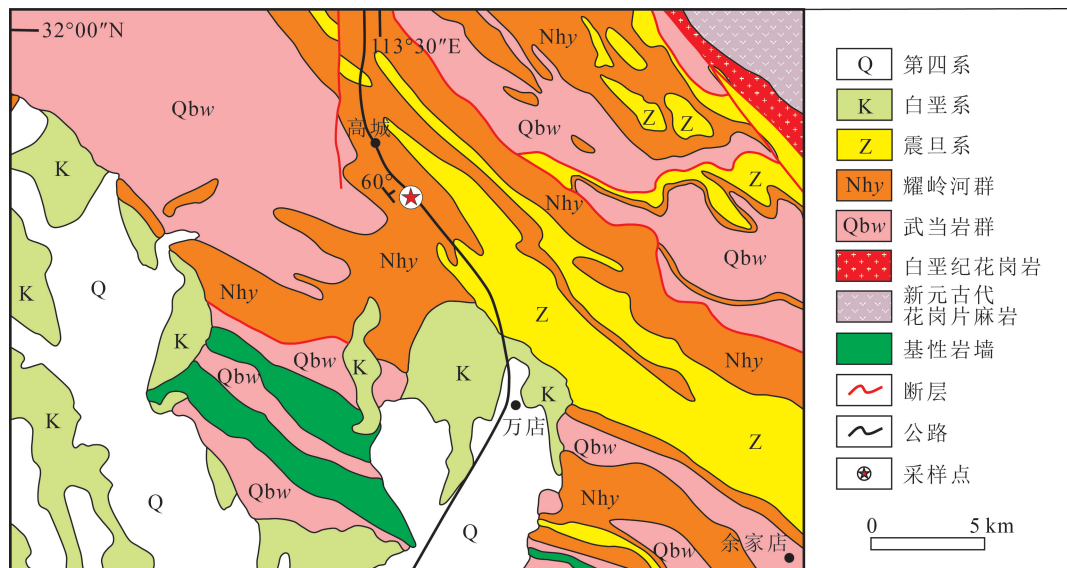


图1 随枣地块耀岭河组地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Yaolinghe Formation in the Suizao terrane

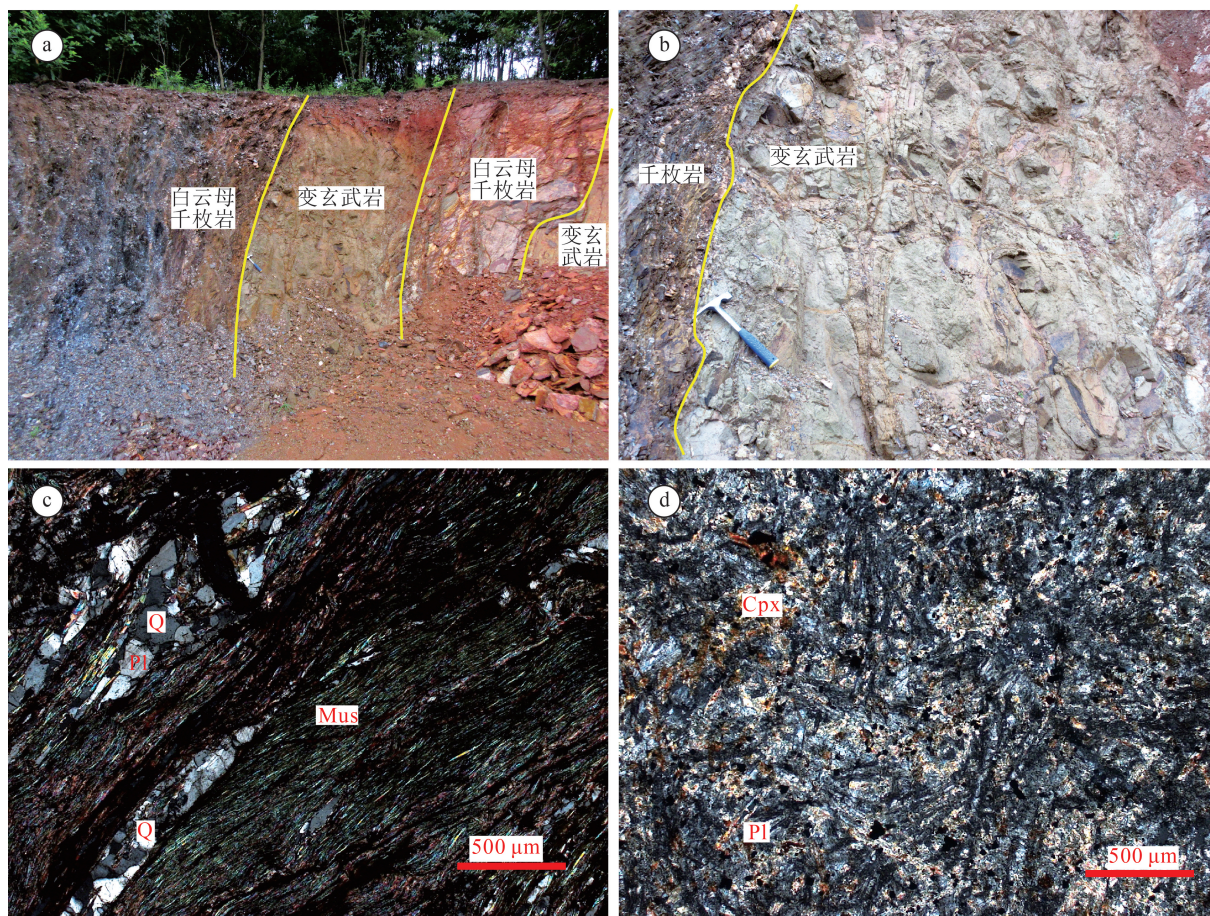


图 2 随枣地块耀岭河组白云母千枚岩(a、c)和蚀变玄武岩(b、d)野外和镜下岩相学照片

Fig.2 Field outcrop photos (a,b) and micrographs (c,d) of the Yaolinghe bimodal volcanic rocks in the Suizao terrane

Q—石英;Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石;Mus—白云母

NIST SRM 610 作为元素含量测定标准。样品测试过程中将 GJ-1 标样作为未知样品进行分析,分析结果与推荐值 608.5 ± 0.4 Ma^[28] 在误差范围内一致。锆石 U-Pb 年龄图件绘制及加权平均值计算均采用 Isoplot 3.0 软件完成^[29]。

3 分析结果

白云母千枚岩样品(17GC-11)中代表性锆石的 CL 图像见图 3,锆石 U-Pb 同位素分析数据见表 1。锆石主要为自形-半自形,棱角状、柱状,振荡环

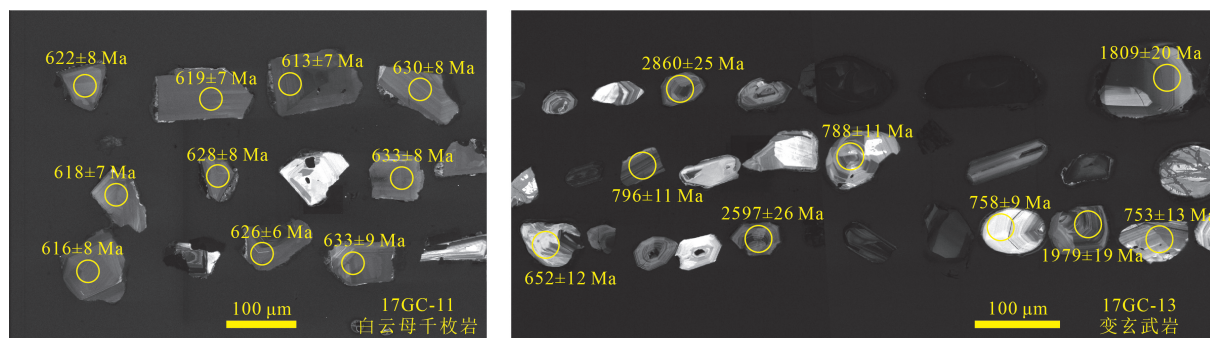


图 3 随枣地块耀岭河组双峰式火山岩锆石阴极发光(CL)图像及锆石年龄

Fig.3 CL images of typical zircon from the Yaolinghe bimodal volcanic rocks and corresponding ages

带明显,显示典型的岩浆锆石特征。本次研究对该样品中 22 粒锆石开展了 U-Pb 年龄测定,结果显示所有锆石年龄均分布在谐和曲线上,为谐和年龄。这些锆石 Th、U 含量分别为 $104 \times 10^{-6} \sim 392 \times 10^{-6}$ 和 $140 \times 10^{-6} \sim 427 \times 10^{-6}$,对应的 Th/U 值为 0.74~1.21,进一步表明为岩浆成因锆石。22 个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 613~633 Ma 之间,年龄加权平均值为 623 ± 3 Ma (MSWD=0.80, $n=22$) (图 4),应代表白云母千枚岩的原岩年龄。

变玄武岩样品 (17GC-13) 中代表性锆石的 CL 图像见图 3,锆石 U-Pb 同位素分析数据见表 2。与白云母千枚岩相比,耀岭河组变玄武岩中锆石数量很少,且普遍较小。锆石 CL 图像显示,锆石振荡环带密集且清晰(图 3),明显不同于基性岩中锆石的基本特征(振荡环带发育),暗示样品锆石可能为玄武质岩浆上升过程中捕获的围岩锆石。对样品中 20 粒锆石开展了 U-Pb 测年,其中 6 粒锆石年龄为不谐和年龄(谐和度<90%),剩余 14 粒均为谐和年龄。这些锆石的 Th/U 值介于 0.23~1.72 之间,表明均为岩浆成因锆石,其年龄代表了锆石的结晶年龄。对变玄武岩中获得的锆石年龄进行统计(锆石 U-Pb 年龄小于 1000 Ma 选 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,大于 1000 Ma 选 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄),结果表明,年龄大致可分为 3 组,新元古代(800 Ma)、古元古代(2000~1800 Ma)和新太古代(2700~2500 Ma)(图 5)。

4 讨论

4.1 南秦岭块体随枣地块基底时代

在随枣地块耀岭河组内新识别出一套白云母千枚岩和变玄武岩岩石组合。对白云母千枚岩开展的锆石 U-Pb 定年结果显示,该样品形成于 623 ± 3 Ma,与区域上基性侵入岩群年龄基本一致^[20, 24-26],暗示两者可能为同时期不同产出相的岩浆作用产物。白云母千枚岩中锆石年龄高度集中,所有锆石均未获得与下伏新太古代—古元古代基底岩系及新元古代(800~700 Ma)武当岩群围岩时代一致的年龄。此外,白云母千枚岩镜下局部可见中酸性岩浆岩变余结构特征,且岩石中可见长英质岩屑晶屑,表明其原岩

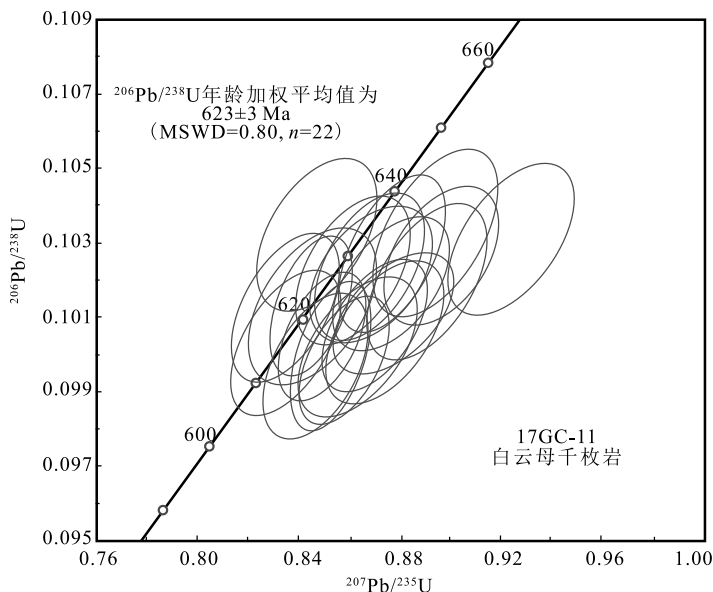


图 4 耀岭河组白云母千枚岩锆石谐和年龄图

Fig. 4 U-Pb concordia of zircons from muscovite-phyllites of the Yaolinghe Formation

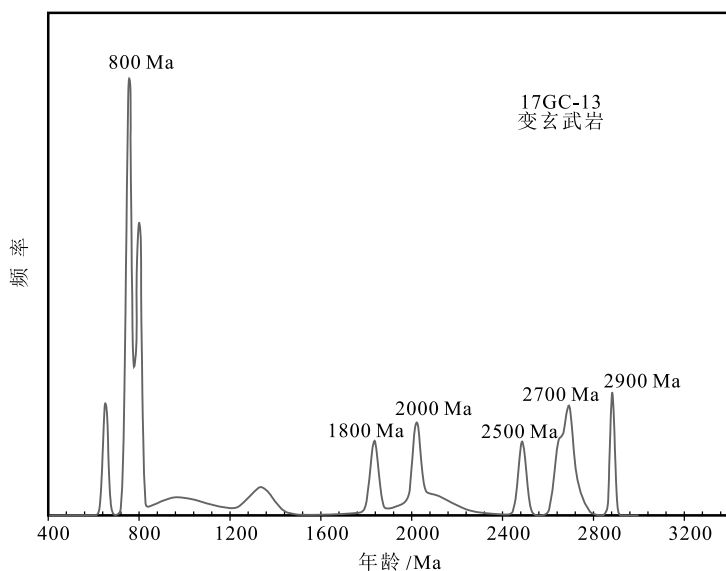


图 5 耀岭河组枕状玄武岩捕获锆石年龄谱

Fig. 5 Histogram of inherited zircon ages for the meta-basalts of the Yaolinghe Formation

可能为中酸性火山凝灰岩。该套白云母千枚岩与变玄武岩互层,时代和空间上一致,两者共同构成双峰式岩浆岩体系,这是首次在随枣地块内识别出时代为 620 Ma 的双峰式火山岩浆事件,同时也可将区域上耀岭河组的沉积时代限定在新元古代末期。

表 1 随枣地块耀岭河组白云母千枚岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results from the muscovite-phylite of the Yaolinghe Formation in the Suizao terrane

点号	元素/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma				谐和度			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
17GC-11-01	242	250	0.97	0.00083	0.83520	0.01428	0.10124	0.00133	598	30	616	8	622	8	99%
17GC-11-02	244	225	1.08	0.00095	0.87453	0.01513	0.10056	0.00125	709	31	638	8	618	7	96%
17GC-11-03	135	178	0.76	0.00089	0.83539	0.01423	0.10032	0.00128	618	31	617	8	616	7	99%
17GC-11-05	341	297	1.15	0.00089	0.87015	0.01378	0.10075	0.00119	694	30	636	7	619	7	97%
17GC-11-06	159	179	0.88	0.00101	0.86187	0.01464	0.10225	0.00133	656	37	631	8	628	8	99%
17GC-11-07	253	240	1.06	0.00086	0.89117	0.01547	0.10195	0.00136	717	29	647	8	626	8	96%
17GC-11-08	165	224	0.74	0.00071	0.85821	0.01160	0.09983	0.00112	683	24	629	6	613	7	97%
17GC-11-10	325	292	1.11	0.00084	0.89443	0.01618	0.10325	0.00147	694	29	649	9	633	9	97%
17GC-11-11	160	192	0.83	0.00090	0.87721	0.01389	0.10270	0.00137	672	31	639	8	630	8	98%
17GC-11-12	125	149	0.83	0.00106	0.84735	0.01557	0.10324	0.00136	591	39	623	9	633	8	98%
17GC-11-13	198	236	0.84	0.00088	0.86900	0.01594	0.10216	0.00122	657	27	635	9	627	7	98%
17GC-11-14	294	285	1.03	0.00071	0.84505	0.01063	0.10130	0.00123	633	26	622	6	622	7	99%
17GC-11-15	104	140	0.74	0.00091	0.89639	0.01498	0.10264	0.00123	720	25	650	8	630	7	96%
17GC-11-16	339	294	1.15	0.00069	0.84974	0.01157	0.10049	0.00112	654	24	625	6	617	7	98%
17GC-11-17	302	250	1.21	0.00084	0.84711	0.01383	0.09970	0.00128	665	30	623	8	613	8	98%
17GC-11-18	392	427	0.92	0.00073	0.85267	0.01030	0.09993	0.00133	680	26	626	6	614	8	98%
17GC-11-19	300	271	1.11	0.00112	0.92414	0.01631	0.10308	0.00132	783	37	665	9	632	8	95%
17GC-11-20	120	145	0.83	0.00099	0.87753	0.01550	0.10109	0.00109	709	34	640	8	621	6	97%
17GC-11-22	313	300	1.04	0.00081	0.87670	0.01493	0.10190	0.00120	687	32	639	8	626	7	97%
17GC-11-23	216	216	1.00	0.00090	0.86816	0.01409	0.10234	0.00130	661	31	635	8	628	8	98%
17GC-11-25	228	259	0.88	0.00099	0.86331	0.01536	0.10020	0.00123	694	34	632	8	616	7	97%
17GC-11-27	151	178	0.85	0.00095	0.84546	0.01662	0.10129	0.00137	633	33	622	9	622	8	99%

表 2 随枣地块耀岭河组变玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis results from the metabasalt of the Yaolinghe Formation in the Suizao terrane

点号	元素/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma				谐和度			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
17GC-13-01	97.6	58.9	1.66	0.00203	1.33552	0.04012	0.13147	0.00200	1032	56	861	17	796	11	92%
17GC-13-02	214	345	0.62	0.00191	15.9222	0.19504	0.55840	0.00603	2883	10	2872	12	2860	25	99%
17GC-13-03	146	164	0.89	0.00103	1.21670	0.02150	0.13009	0.00189	872	31	808	10	788	11	97%
17GC-13-04	101	146	0.69	0.00111	6.16464	0.08084	0.35935	0.00400	2021	17	1999	12	1979	19	98%
17GC-13-05	27.8	27.8	1.00	0.01304	2.71459	0.43474	0.13303	0.00416	2028	191	1332	119	805	24	50%
17GC-13-06	164	232	0.71	0.00105	5.00605	0.07068	0.32385	0.00399	1836	18	1820	12	1808	19	99%
17GC-13-07	191	176	1.08	0.00088	1.14021	0.01572	0.12476	0.00165	833	27	773	7	758	9	98%
17GC-13-08	223	130	1.72	0.00094	1.14075	0.01945	0.12505	0.00148	813	30	773	9	760	8	98%
17GC-13-09	150	151	1.00	0.00645	0.66382	0.06970	0.05985	0.00096	1102	170	517	43	375	6	68%
17GC-13-10	40.8	41.7	0.98	0.00153	1.07244	0.02693	0.12383	0.00219	722	52	740	13	753	13	98%
17GC-13-11	519	422	1.23	0.00605	2.56614	0.28455	0.13325	0.00527	2080	83	1291	81	806	30	53%
17GC-13-12	63.2	116	0.55	0.00187	12.5917	0.14965	0.49604	0.00610	2691	17	2650	11	2597	26	97%
17GC-13-13	50.9	61.5	0.83	0.00162	10.2759	0.15144	0.45730	0.00605	2487	17	2460	14	2428	27	98%
17GC-13-14	1043	626	1.66	0.00218	0.75286	0.01658	0.06408	0.00090	1339	50	570	10	400	5	65%
17GC-13-15	255	318	0.80	0.00170	1.02346	0.02514	0.10640	0.00192	943	45	716	13	652	11	90%
17GC-13-16	50.7	88.5	0.57	0.00124	1.13528	0.02557	0.12260	0.00171	839	161	770	12	746	10	96%
17GC-13-17	1004	744	1.35	0.00341	0.65102	0.02996	0.06688	0.00073	959	98	509	18	417	4	80%
17GC-13-18	94.0	417	0.23	0.00394	13.0734	1.79294	0.48566	0.05204	2710	36	2685	129	2552	22	94%
17GC-13-19	77.8	80.2	0.97	0.00097	1.23889	0.02053	0.13304	0.00149	850	30	818	9	805	8	98%
17GC-13-20	133	214	0.62	0.00207	9.97593	0.14193	0.40208	0.00455	2647	19	2433	13	2179	21	88%

变玄武岩样品中的捕获锆石自形程度良好,说明其搬运距离不大,其源区可能来自南秦岭块体内部。捕获锆石所获得的3组年龄指示,南秦岭随枣地块基底时代可大致划分为新太古代、古元古代和新元古代3期。其中,新元古代锆石颗粒构成变玄武岩年龄谱中的最大锆石群体,其峰值在800 Ma左右,这与其下伏武当岩群变沉积岩中碎屑锆石主峰年龄一致^[21]。新元古代岩浆作用在随枣地块乃至整个扬子克拉通北缘广泛分布,构成了耀岭河组变玄武岩捕获锆石的最主要来源。已有研究表明,随枣地块武当岩群沉积时代为770~680 Ma^[20-23]。这些年龄与变玄武岩捕获锆石年龄谱中新元古代年龄峰值一致。此外,新太古代和古元古代年龄与随枣地块目前已发现的最古老基底,即陡岭杂岩相一致。前人对南秦岭块体陡岭杂岩已开展了一定程度的年代学研究。近年较可靠的数据包括:Hu等^[30]在5件闪长质-花岗质片麻岩样品中获得了2469~2509 Ma的岩浆锆石年龄;Nie等^[31]在3件正片麻岩样品中获得了2433~2478 Ma的锆石U-Pb年龄;此外,对陡岭杂岩中沉积岩(副片麻岩)进行碎屑锆石U-Pb定年,结果显示,其年龄谱峰值与耀岭河组变玄武岩中捕获锆石年龄特点也类似;陆松年等^[32]对陡岭岩群瓦屋场组云母石英片岩中的锆石进行了分析,42个点中最大的锆石年龄为3027±8 Ma,主要年龄分布于新元古代(0.8~1.0 Ga),此外,1.8~2.0 Ga、2.5 Ga的年龄也有少量分布;Hu等^[30]对1件变沉积岩(石榴黑云斜长片麻岩)样品进行了分析,120个点中主要峰值为2个(2.60 Ga和2.48 Ga),次要峰值为3个(1.96 Ga、1.40 Ga和0.82 Ga),最老的锆石年龄为3032±19 Ma;Nie等对3件陡岭杂岩副片麻岩样品中的82个点进行了分析^[31],获得最老的锆石年龄为2862 Ma,年龄峰值为2.5 Ga、2.0 Ga、1.5 Ga和0.8 Ga(主峰)。因此,区域上新太古代和古元古代中晚期基底岩石也是耀岭河组变玄武岩捕获锆石的重要物源之一。

基于以上讨论,笔者认为,随枣地块耀岭河组变玄武岩中的捕获锆石均来自下伏基底和(或)围岩,其中的新太古代和古元古代锆石可能来自陡岭杂岩,而新元古代锆石主要来自武当岩群。该结论进一步得到区域上碎屑锆石年龄统计结果的支持。对随枣地块新元古代地层(武当岩群和耀岭河组)

576颗碎屑锆石的原位U-Pb同位素年龄数据统计结果显示,碎屑锆石年龄主要分布于640~950 Ma、1800~2200 Ma和2400~2600 Ma之间^[33],与耀岭河组双峰式火山岩所获得的锆石年龄数据具有较好的对应关系。

4.2 新元古代末扬子克拉通北缘裂解过程

南秦岭块体被大多数学者认为是扬子克拉通北缘卷入秦岭-大别造山带的一部分^[19],新元古代岩浆岩在南秦岭块体和扬子克拉通北缘均广泛出露,被多数学者认为与Rodinia超大陆的聚合和裂解过程密切相关,但有关这些岩浆作用的成因却长期存在争议^[26, 34-35]。与新元古代中期820~750 Ma岩浆岩相比,虽然多数研究者认为新元古代末期岩浆岩可能与Rodinia裂解过程相关,但局限于有限的地质体出露,有关新元古代末期(<650 Ma)构造岩浆事件的研究仍较有限,使得目前对扬子克拉通北缘新元古代与Rodinia超大陆裂解过程的理解也相对不足。本次研究在南秦岭随枣地块内新发现620 Ma的双峰式火山作用,为进一步认识南秦岭块体新元古代晚期构造演化提供了新的约束。双峰式火山岩通常形成于伸展背景下,与裂解作用过程相关已得到共识,国内外存在不少与陆内裂解相关的双峰式火山作用。例如,扬子克拉通北缘西大别地区定远组双峰式火山岩,被认为形成于大陆边缘裂谷环境^[36];巴西中部和东南部出露的晚古元古代双峰式火山岩与放射状拉斑质基性岩墙群共生,为1.77~1.72 Ga地幔柱事件引发岩石圈伸展裂解部分熔融的产物^[37]。因此,笔者倾向于随枣地块耀岭河组双峰式火山岩形成于陆内裂解背景,代表了扬子克拉通北缘于新元古代末的一期裂解事件,可能与Rodinia超大陆的裂解过程相关。结合前人在随枣地块已开展的同位素测年结果,认为南秦岭陆块内新元古代存在至少3期与伸展相关的岩浆事件:830~780 Ma、750~680 Ma、650~600 Ma,反映南秦岭块体可能经历了多期次裂解过程。因此,Rodinia超大陆在南秦岭块体和扬子克拉通北缘的裂解可能为一个长期且持续的过程。

武当地块和随枣地块均出露武当岩群及上覆耀岭河组火山-沉积地层,两者基底岩石在岩石组合、岩浆作用类型等方面具有相似性,因而将这2个块体新元古代基底岩石进行对比,有助于对扬子克拉通北缘新元古代构造过程产生新的理解。虽然

前人对武当地块和随枣地块新元古代沉积岩碎屑锆石进行的年龄谱对比结果显示两者基底可以类比,但本文对随枣地块耀岭河组双峰式火山岩获得的新的年代学结果显示,武当地块武当岩群和耀岭河组地层时代可能早于其东侧的随枣地块。武当地块武当岩群火山岩时代为 780~730 Ma,峰值为 750 Ma^[19,38],耀岭河组及基性侵入岩墙时代则为 680 Ma^[19];与之相比,随枣地块武当岩群时代为 770~680 Ma^[20-23],武当岩群顶部沉积时代甚至在 680 Ma 之后(待发表数据),而基性侵入岩墙的时代为 650~600 Ma^[20,24-26],本文获得的耀岭河组时代大致为 620 Ma,同样明显年轻于西边的武当地块内耀岭河组。基于此,本文初步设想南秦岭块体不同地块虽然有共同基底,但在新元古代末期 Rodinia 超大陆裂解的响应中可能存在自西向东的“拉链式(Zipped)”裂解过程,即西部裂解较早,而东部裂解较晚。该设想也得到位于南秦岭块体西部岩浆作用的佐证,对陕西北大巴山凤凰山岩体开展的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,该岩体为多期岩浆侵入形成,时间从 797±6 Ma 到 743±6 Ma,被认为其形成可能与导致 Rodinia 超大陆裂解作用的幕式地幔活动有关^[39]。

5 结 论

(1)在南秦岭随枣地块耀岭河组中识别出一套双峰式变火山岩组合,其锆石 U-Pb 年代学研究结果表明,白云母千枚岩锆石 U-Pb 年龄为 623±3 Ma,代表了随枣地块耀岭河组的地层时代,与侵入区域上武当岩群的基性岩墙一致,两者应为同时期不同产出相的岩浆作用产物。变玄武岩中锆石为捕获锆石,年龄组成特征与下伏武当岩群顶部碎屑锆石基本一致。

(2)扬子克拉通北缘 Rodinia 超大陆裂解可能经历了更长期且复杂的过程,且存在自西向东(现今方向)的“拉链式”裂解模式。

致谢:野外工作期间得到了中国地质调查局武汉地质调查中心彭练红教授级高级工程师、邓新博士及湖北地质调查院杨成工程师的大力协助;锆石 U-Pb 定年测定过程中得到了中国冶金地质总局山东局测试中心林培军主任的热情帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Dalziel I W D. Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: Review, hypothesis, environmental speculation [J]. Geological Society of America Bulletin, 1997, 108: 16-42.
- [2] Gaucher C, Sial A N, Halverson G P, et al. The Neoproterozoic and Cambrian: a time of upheavals, extremes and innovations [C]// Gaucher C, Sial A N, Halverson G P, et al. Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a Focus on Southwestern Gondwana, Developments in Precambrian Geology. Amsterdam, Elsevier, 2009, 16: 3-11.
- [3] Stern R J. Neoproterozoic crustal growth: The solid Earth system during a critical episode of Earth history [J]. Gondwana Research, 2015, 14: 33-50.
- [4] Chen J F, Foland K A, Xing F M, et al. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China [J]. Geology, 1991, 19: 815-818.
- [5] Li Z X, Kinny P D. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. Geology, 2002, 30: 163-166.
- [6] Greentree M R, Li Z X, Li X H, et al. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia [J]. Precambrian Research, 2006, 151: 79-100.
- [7] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. Precambrian Research, 2007, 159: 117-131.
- [8] Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny [J]. Geology, 2011, 39: 299-302.
- [9] Qiu X F, Ling W L, Liu X M, et al. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton [J]. Precambrian Research, 2011, 191: 101-119.
- [10] Qiu X F, Yang H M, Lu S S, et al. Geochronology and geochemistry of Grenville-aged (1063±16 Ma) metabasalts in the Shennongjia district, Yangtze block: implications for tectonic evolution of the South China Craton [J]. International Geology Review, 2015, 57: 76-96.
- [11] Qiu X F, Zhao X M, Yang H M, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of the Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the Kongling complex, nucleus of Yangtze craton, South China block: implications for provenance and tectonic evolution [J]. Geological Magazine, 2018, 155: 1263-1276.
- [12] Peng S B, Kusky T M, Jiang X F, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent [J]. Gondwana Research, 2012, 21: 577-594.
- [13] Wu Y B, Gao S, Zhang H F, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the

- Northwestern Yangtze Block and its geological implications [J]. Precambrian Research, 2012, 200: 26–37.
- [14] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11: 101–114.
- [15] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–855.
- [16] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 213–237.
- [17] Dong Y P, Safonova I, Wang T. Tectonic evolution of the Qinling orogen and adjacent orogenic belts[J]. Gondwana Research, 2016, 30: 1–5.
- [18] Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China [J]. Tectonophysics, 2000, 323: 183–196.
- [19] Ling W L, Ren B F, Duan R C, et al. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U–Pb zircon geochronology and tectonic implication [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 2192–2199.
- [20] 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: 1116–1130.
- [21] 薛怀民, 马芳. 桐柏山造山带南麓随州群变沉积岩中碎屑锆石的年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29: 564–580.
- [22] Yang Y A, Wang X C, Li Q L, 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- $\delta^{18}\text{O}$ magmas in the South China Block [J]. Precambrian Research, 2016, 273: 151–164.
- [23] Liu H, Zhao J H, Cawood P A, et al. South China in Rodinia: Constrains from the Neoproterozoic Suixian volcano–sedimentary group of the South Qinling Belt [J]. Precambrian Research, 2018, 314: 170–193.
- [24] 洪吉安, 马斌, 黄琦. 湖北枣阳大阜山镁铁/超镁铁杂岩体与金红石矿床成因[J]. 地质科学, 2009, 44: 231–244.
- [25] Wang M X, Wang Y, Bo W. Platinum–group elemental and Sr–Nd–Os isotopic geochemistry of the ~635 Ma mafic intrusions in the northern margin of the Yangtze Block: a link of metasomatized subcontinental lithospheric mantle and Ni–Cu–(PGE) sulfide mineralization [J]. Precambrian Research, 2017, 309: 325–342.
- [26] Zhao J H, 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: 1811–1844.
- [27] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh–pressure metamorphism of lower crustal cumulates [J]. Chemical Geology, 2008, 247: 133–153.
- [28] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology [J]. Chemical Geology, 2004, 211: 47–69.
- [29] Ludwig K R. ISOPLOT 3. 0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel (Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California) [M]. BGC Special Publication 1a, Berkeley, 2003: 55.
- [30] Hu J, Liu X C, Chen L Y, et al. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U–Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling Complex in the South Qinling orogen [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 3564–3579.
- [31] Nie H, Yao J, Wan X, et al. Precambrian tectonothermal evolution of South Qinling and its affinity to the Yangtze Block: Evidence from zircon ages and Hf–Nd isotopic compositions of basement rocks [J]. Precambrian Research, 2016, 286: 167–179.
- [32] 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 秦–祁–昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2009, 25: 2195–2208.
- [33] 卢山松, 江拓, 彭三国, 等. 武当地块与扬子陆核区新元古代早期沉积岩碎屑锆石 U–Pb 年代学对比及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36: 646–654.
- [34] Deng Q, Wang J, Wang Z J, 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: 1865–1884.
- [35] Xu Y, Yang K G, Polat A, et al. The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic [J]. Precambrian Research, 2016, 275: 310–331.
- [36] 朱江, 彭三国, 彭练红, 等. 扬子陆块北缘西大别地区定远组双峰式火山岩 U–Pb 年代学及其地质构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44: 355–365.
- [37] Chaves A D O, Neves J M C. Magmatism, rifting and sedimentation related to Late Paleoproterozoic mantle plume events of Central and Southeastern Brazil [J]. Journal of Geodynamics, 2005, 39: 197–208.
- [38] 祝禧艳, 陈福坤, 王伟, 等. 豫西地区秦岭造山带武当岩群火山岩和沉积岩锆石 U–Pb 年龄[J]. 地球学报, 2008, 29: 817–829.
- [39] 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 等. 北大山凤凰山岩体锆石 U–Pb LA–ICP–MS 年龄及其构造意义[J]. 地质论评, 2012, 58: 581–593.