

秦岭造山带宽坪群中的变铁镁质岩的成因、时代及其构造意义

闫全人¹, 王宗起¹, 闫 臻¹, 王 涛¹, 陈隽璐², 向忠金¹, 张宗清¹, 姜春发¹

YAN Quan-ren¹, WANG Zong-qi¹, YAN Zhen¹, WANG Tao¹, CHEN Jun-lu²,

XIANG Zhong-jin¹, ZHANG Zong-qing¹, JIANG Chun-fa¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

摘要: 地球化学分析结果显示, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩 SiO₂ 含量均小于 53%, TiO₂ 的含量分别是 0.87%~2.03% 和 0.92%~2.12%, MgO 含量较低 (Mg[#]=29~49), 原岩类型为亚碱性 TH 系列玄武质岩石。宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的轻稀土、重稀土元素无明显分异, LREE 呈现亏损—略富集, 稀土元素配分模式呈平坦型, 与 E-MORB 的配分模式相似。相对于 N-MORB, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的大离子亲石元素 (LILE, 如 Sr、K、Rb 和 Ba) 轻度富集, 高场强元素 (HFSE, 如 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等) 既不富集也不亏损, 显示与 E-MORB 相类似的地球化学特征。宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的初始铈比值比较分散, 但其初始铈比值 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)₀ 比较集中和均一, 分别为 0.511962~0.512192 和 0.512028~0.512157, ε_{Nd}(t) 值均为正值, 分别是 +5.7~+10.2 和 +7.0~+9.5, 表明 2 类岩石来自轻稀土和大离子亲石元素略呈亏损的源区。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代分析揭示, 宽坪群变基性火山岩形成于晚新元古代 Ediacaran 期 (611Ma±13Ma), 较老的残余晶核锆石可能是岩浆活动过程中捕获古老地壳成分的记录。黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学分析表明, 宽坪群原岩变质时代为石炭纪 Serpukhovian 期 (319.1Ma±3.6Ma)。认为宽坪群中的变铁镁岩块/片形成于晚新元古代被动陆缘裂谷洋盆, 是华北陆块南缘大陆裂解作用的产物。

关键词: 秦岭造山带; 宽坪群; 铁镁质岩块/片; 被动陆缘裂谷; 晚新元古代大陆裂解

中图分类号: P588.14⁺⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2008)09-1475-18

Yan Q R, Wang Z Q, Yan Z, Wang T, Chen J L, Xiang Z J, Zhang Z Q, Jiang C F. Origin, age and tectonic implications of metamafic rocks in the Kuanping Group of the Qinling orogenic belt, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9):1475-1492

Abstract: Geochemical analysis shows that: metabasic volcanic rocks (greenschist) and amphibolite in the Kuanping Group both have lower SiO₂ (<53%) and MgO (Mg[#]=29-49) and their TiO₂ contents are 0.87-2.03% and 0.92-2.12% respectively, indicating that their protoliths are basaltic rocks of the subalkaline, tholeiitic series. The chondrite-normalized REE patterns of greenschist and amphibolite in the Kuanping Group show no pronounced differentiation between LREE and HREE ((La/Yb)_N=0.82-1.42), with LREE showing depletion or slight enrichment. The REE patterns are flat, similar to the N-MORB-normalized patterns. The two types of metamafic rocks are slightly enriched in large-ion lithophile elements (LILE) (e.g., K, Rb, and Ba) and neither depleted nor enriched in high-field strength elements (HFSE) (e.g., Nb, Ta, Zr and Ti), indicative of a strong geochemical affinity to E-MORB. The two

收稿日期: 2007-11-09; 修订日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40472119、40602026 和 40772137)、国土资源部“百人计划”项目 (2004)、中国地质调查局项目 (编号: 1212010611807、1212010711816 和 1212010633601)、国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CB412608) 和国家科技支撑计划课题 (编号: 2006BAB01A11) 资助。

作者简介: 闫全人 (1964-), 男, 博士, 研究员, 从事造山带与沉积盆地 (油气地质) 研究。E-mail: qryan@cags.net.cn

types of mafic rocks have relatively dispersed initial Sr ratios, but their initial Nd ratios ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_0$) are relatively concentrated and homogeneous, being 0.511962 to 0.512192 and 0.512028 to 0.512157 respectively. $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of the two types of mafic rocks are both positive, +5.7 - +10.2 and +7.0 - +9.5 respectively, indicating that they were sourced from source regions slightly depleted in LREE and LILE. SHRIMP U-Pb zircon age analysis reveals that greenschist in the Kuanping Group formed in the late Neoproterozoic Ediacaran, at $\sim 611 \pm 13$ Ma. The older relict core zircons are most likely to be the record of the older crust component captured during magmatism. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological analysis of biotite reveals that the protoliths of the Kuanping Group were metamorphosed in the Carboniferous Serpukhovian, at $\sim 319.1 \pm 3.6$ Ma. Conclusively, all those lines of evidence show that the two types of metamafic blocks in the Kuanping Group formed in a late Neoproterozoic passive continental-margin rift ocean basin and were derived from the rifting of the south passive continental margin of the North China block.

Key words: Qinling orogenic belt; Kuanping Group; metamafic block; passive continental-margin rift; late Neoproterozoic continental rifting

宽坪群是组成北秦岭造山带的构造-岩石单元之一。该群最初由《1:20 万商南幅地质图及说明书》定名为宽坪组^①,指商州北宽坪镇以北的一套低—中级变质岩系,时代被定为古元古代。金守文^[1]在研究河南西峡以北地区的变质地层时将其定名为“宽坪群”并一直延用至今。自 20 世纪 50—60 年代以来,有关宽坪群的组成、时代、分布范围、变形变质、形成背景等方面,在地学界一直存在不同看法,特别是对宽坪群中的铁镁质岩块/片的成因、时代、构造意义等关键地质问题的认识差异很大^{②[2-15]}。

张宗清等^[10-11]认为宽坪群中的变基性火山岩形成于华北大边缘弧后拉张的小洋盆环境。根据 Sm-Nd 同位素特征,陈保瑞等^[13]的研究结果揭示:宽坪群中的斜长角闪岩源自强烈亏损的地幔源区,可能经历了多阶段的分异和部分熔融过程,并遭受了地壳组分的污染,形成于具有陆壳性质的大陆边缘区的弧后盆地。李靠社^[14]经过室内外系统调查研究后认为:宽坪群是一套复理石杂砂岩+基性火山岩+硅镁质碳酸盐岩建造,形成于活动大陆边缘弧后盆地。与之截然不同的是,万渝生等^[8]的研究结果显示:宽坪群变玄武质岩具有大洋拉斑玄武岩的成分特征,具轻稀土元素亏损或平坦型稀土配分模式。其高场强元素(Zr、P、Y、Ti 等)含量较低,表明宽坪群变玄武岩源自地幔亏损源区,未遭受大陆物质的同化混染,它们与大洋拉斑玄武岩相当,但又不是典型的亏损地幔岩浆。万渝生等^[8]认为宽坪群形成于华北地块南缘被动大陆边缘的扩张海盆环境。在新一轮地质调查中,王宗起等^②在详细野外地质调查的基础上,根据岩石组合特征,综合岩石学、岩石地球化学、同位素地球化学等研究结果认为:宽坪群内的变铁镁质岩块/片形成于被动陆缘裂谷环境,具地壳

混染的富集地幔(EMI)或下地壳特征的基性火山岩块体表明该裂谷曾有大洋盆地(或洋壳)发育。另外,宽坪群各类云英片岩富含长石和云母,表明原岩为富含火山物质的不成熟的或活动型的杂砂岩。在大地构造相带上,王宗起等^②将宽坪群重新划定为北秦岭裂谷洋盆带或华北陆块南缘被动陆缘裂谷带。

对宽坪群形成时代的认识分歧更大。20 世纪 50—60 年代,宽坪群被划归古元古亚界或震旦系,70 年代不同学者将其划归古元古亚界长城系或震旦系。根据一些微体化石线索,如,张维吉等^[3]在商县北宽坪一带广东坪组硅质大理岩中发现前寒武纪的叠层石(*Crytozoon giganteum* Liang, *St. ratifera*, *St. raticonophyton*, *Colonella* 等)、河南省第三地质队在西峡北部宽坪群中发现种属特征与华北蓟县、辽西震旦亚界地层中的微古化石相似的分子^③,80 年代初宽坪群又被划归震旦系。但多数学者倾向宽坪群属中—古元古亚界这一推断,认为其层位可与华北蓟县大红峪组、高于庄组对比,与熊耳群及其下的铁铜沟组为同期异相的沉积物^{③[2-3, 16]}。

新近完成的地质调查工作在宽坪群地层时代方面取得了重要进展。通过详细的工作,于陕西户县马召、商县板桥北、北宽坪—焦安沟、河南南召马市坪等地的宽坪群浅变质碎屑岩中,采获了疑源类、几丁虫、虫颚等显生宙古生物化石,共计 14 属 28 种。其中,凝源类 7 属 9 种,几丁虫 5 属 17 种,虫颚 2 属 2 种。经中国地质科学院地质研究所古生物专家高联达鉴定,新发现的古生物化石的时代为早—中奥陶世,宽坪群的地层时代被重新厘定为奥陶系^②。

前人的大量同位素年代学研究结果(表 1)表明,宽坪群中的铁镁质岩块/片组成很复杂,也暗示宽坪群变铁镁质岩具有复杂的源区和构造演化历程。除

表 1 宽坪群中变铁镁质岩块/片同位素测年结果一览表

Table 1 Summary of isotope dating results of metamafic blocks in the Kuanping Group

地 点、岩 性	测年方法	测年结果/Ma	资料来源
陕西兰田汤峪汤峪组斜长角闪岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	1516	[17]
陕西洛南马河广东坪组绿片岩	Rb-Sr 等时	1704	[17]
陕西洛南马河广东坪组变基性火山岩	Rb-Sr 等时	1441.6	[18]
河南栾川宽坪群斜长角闪岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	1404	[19]
河南宽坪群斜长角闪岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	1393, 1250	[20]
陕西宽坪群变基性火山岩	Rb-Sr 等时	1411±30	[21]
河南卢氏文石沟宽坪群黑云石英片岩中的角闪岩脉	角闪石 K-Ar	1263	[2]
河南栾川黑严丈沟宽坪群中的角闪岩脉	角闪石 K-Ar	1404	[2]
陕西洛南马河宽坪群广东坪组绿片岩	Rb-Sr 等时	1704	[3]
陕西商州管家坪竹林沟组变基性火山熔岩	锆石 U-Pb	1827±11(U)/418±8(L)*	[14]
陕西马驹口宽坪岩群斜长角闪岩	Sm-Nd 等时	747.72±43.1	[13]
陕西商州北宽坪宽坪群广东坪组绿片岩	Sm-Nd 等时	975±39, 920±59	
	Rb-Sr 等时	240	
陕西洛南马河宽坪群广东坪组斜长角闪岩	Sm-Nd 等时	1142±18, 1050±388	
	Rb-Sr 等时	265	
陕西商州板桥宽坪群谢湾组斜长角闪岩	Sm-Nd 等时	393±42	[10]
	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	323.8±3.3	
河南南召龙脖庄—河西村一带的花岗片麻岩	锆石 U-Pb (2 组)	2486±44(U)/389±20(L) 2027±28(U)/241±17(L)	
河南南召龙脖庄斜长角闪岩	Sm-Nd 等时	1085±37	
河南南召龙脖庄黑云斜长片麻岩	Sm-Nd 模式	2169±90	
陕西商州板桥寺沟广东坪组变质火山岩	SHRIMP	2502, 1475, 882~1080	[12]
		722±4~664±6	
		531±4~469±3	
		355±3~246±2	
陕西商州下铺变质中—酸性岩体	单锆石 Pb-Pb	416, 423, 424	[22]
陕西蒲峪河口斜长角闪岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	324	[23]
甘肃天水宽坪岩群斜长角闪岩	锆石 LA-ICP-MS	1753±14(U)/208±110(L)	[15]
		415±2, 408±3, 383±2	[15]

注:U—锆石 U-Pb 测年的上交点年龄,L—锆石 U-Pb 测年的下交点年龄

可以明确标示宽坪群经历了早古生代和晚古生代 2 次明显的构造变形/变质作用之外,前人所获同位素测年结果并不能精确标定宽坪群形成的确切时代。

与地层时代取得重要进展相比而言,对宽坪群中的变铁镁质岩块/片的确切时代、构造成因及其与碎屑岩基质(或围岩)的关系仍缺乏深入的研究。这对深入解剖和认识北秦岭造山带的结构组成及其造山作用过程具有重要意义。

在详细的野外地质调查和室内岩石学、岩相学研究的基础上,本文利用新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年技术,对商州市板桥镇北宽坪群中的铁镁质岩块进行了精确的定年研究,并系统开展了岩石地球化学、同位素地球化学研究,对宽坪群中的铁

镁质岩块的形成时代、环境及其意义进行了深入探索。本文的研究结果显示:宽坪群中变铁镁质岩块/片形成于被动陆缘裂谷环境,时代为晚新元代(611 Ma±13 Ma),可能代表了晚新元古代末华北陆块南缘所发生的一次大陆裂解事件。

1 简要地质特征

宽坪群西起甘肃天水,经陕西眉县—户县、商洛地区和河南卢氏—栾川—南召至云阳—方城,向东湮灭于南阳盆地。过南阳盆地,该群又出露于桐柏—信阳北,终没于华北平原之下。东西断续出露长度约 1000 km。宽坪群南北两侧以区域性断裂带为界,北与陶湾群、太华群、官道口群、汝阳群等以铁炉子—

栾川断裂(区内为洛南-栾川断裂)相邻,南与草滩沟群、斜峪关群、云架山群、二郎坪群等以斜峪关-瓦穴子断裂(区内为官坡-乔端断裂)相邻(图 1)。

宽坪群主要由变铁镁质岩、云母石英片岩、大理岩等组成。前人的区测工作将其划分为下部广东坪组、中部四岔口组 and 上部谢湾组。变铁镁质岩主要分布于广东坪组中,包括绿片岩和斜长角闪岩两大类。在陕西商州-洛南地区,即本文的研究目标区,变铁镁质岩出露面积占宽坪群的 40%左右,呈厚层状产出,在一些地方与基性凝灰岩互层。云母石英片岩类的主要岩石类型有白云母石英片岩、黑云母石英片岩、二云母石英片岩、石榴二云斜长片岩等,原岩以泥质为主,在变形较弱处可见变余的递变层理。大理岩类包括石英大理岩、黑云母大理岩、透

闪石大理岩等。

但是,张寿广等^[6]认为:宽坪群不是一个简单的地层单位,而是由若干个构造岩片堆叠而成的岩石、地层和构造岩片组合体。笔者的实测地质剖面显示,沿商州至洛南的地质剖面由南向北,宽坪群大体上可分为 4 个岩性组合段,南北两侧以断层与新生代白垩系相接(图 2)。第一岩性段为二云母石英片岩-石榴子石黑云母石英片岩-黑云母变粒岩组合,黑云母变粒岩与石榴子石黑云母石英片岩呈互层状。其中含大量大理岩-变铁镁质岩组合的构造块体,不协调地卷入片岩(或围岩)中,局部近断层处见角砾状大理岩。第二岩性段以二云母石英片岩为主,局部见互层状二云母石英片岩-变铁镁质岩组合,含大量大理岩或角砾状大理岩块体,变铁镁质岩块体

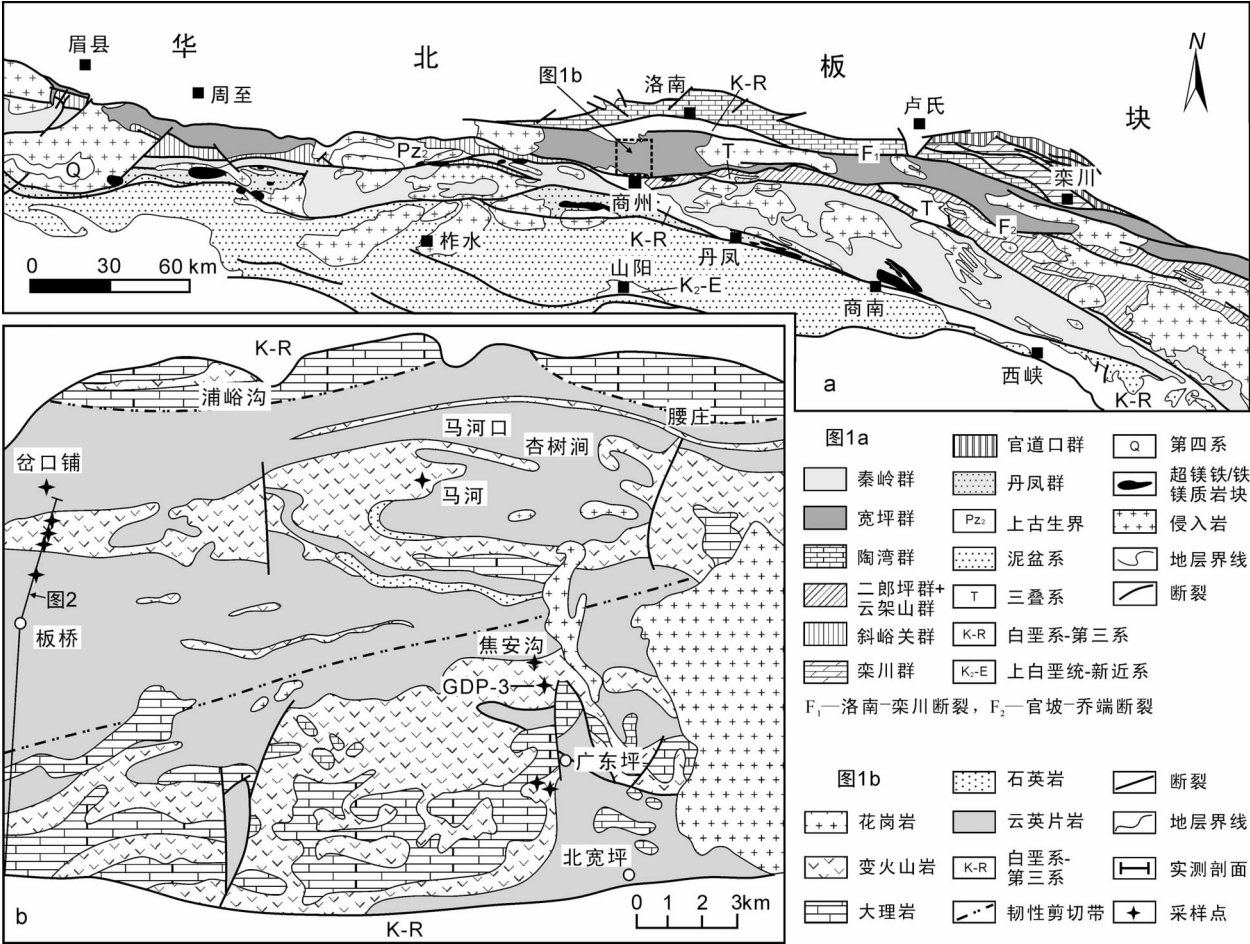


图 1 北秦岭造山带地质构造简图(a)和商洛地区宽坪群地质构造图(b)
(a 图据参考文献[24]简化,b 图据参考文献[10]简化)
Fig. 1 Geological sketch maps of the North Qinling orogenic belt (a)
and the Kuanping Group in the Luonan-Luanchuan area (b)

相对较少,这些构造块体同样与围岩呈断层接触。第三岩性段的主体为黑云母石英片岩,含少量二云母石英片岩和石榴子石黑云母石英片岩,夹少量大理岩和变铁镁质岩块体。岩相学研究显示,云英片岩中富含长石,表明原岩为长石岩屑杂砂岩,成熟度低。黑云母石英片岩粒度较粗,局部黑云母呈现为簇状集合体。石榴子石黑云母片岩中石榴子石或其集合体粒度巨大。第四岩性段以黑云母石英片岩为主,含大量变铁镁质岩块。变铁镁质岩体积较大,呈不规则块状裹于片岩(或围岩)中,与围岩为断层接触。局部见互层状黑云母石英片岩和二云母石英片岩。

2 样品处理与实验方法

本文重点对商洛地区宽坪群第四岩性段(大体相当于前人所划分的广东坪组)中的变铁镁质岩块/片进行了岩相学、岩石地球化学和同位素地球化学研究,样品采集位置见图 1 和图 2。地球化学测试分析工作在北京大学地球与空间科学学院的 ICP-MS 实验室完成,结果见表 2。本文全岩 Sr、Nd 同位素分析,测试工作利用中国地质科学院地质研究所同位素实验室的 MAT-261 固体同位素质谱计进行,Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$,Sm/Nd 比值测定精度优于 0.1%,Sm 和 Nd 流程空白=0.05ng。Sr 同位素质量分馏用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.37521$,Rb/Sr 比值测定精度优于 0.1%,Rb 和 Sr 流程空白=0.1~1 ng。详细实验流程参见张宗清等^[25]的描述。收集并根据本文最新测年结果重新处理前人的 Sr、Nd 同位素分析结果 34 件,结果见表 3。

同位素测年样品分别采自第三岩性段的石榴子石黑云母石英片岩(QD04-50)和第四岩性段的变质铁

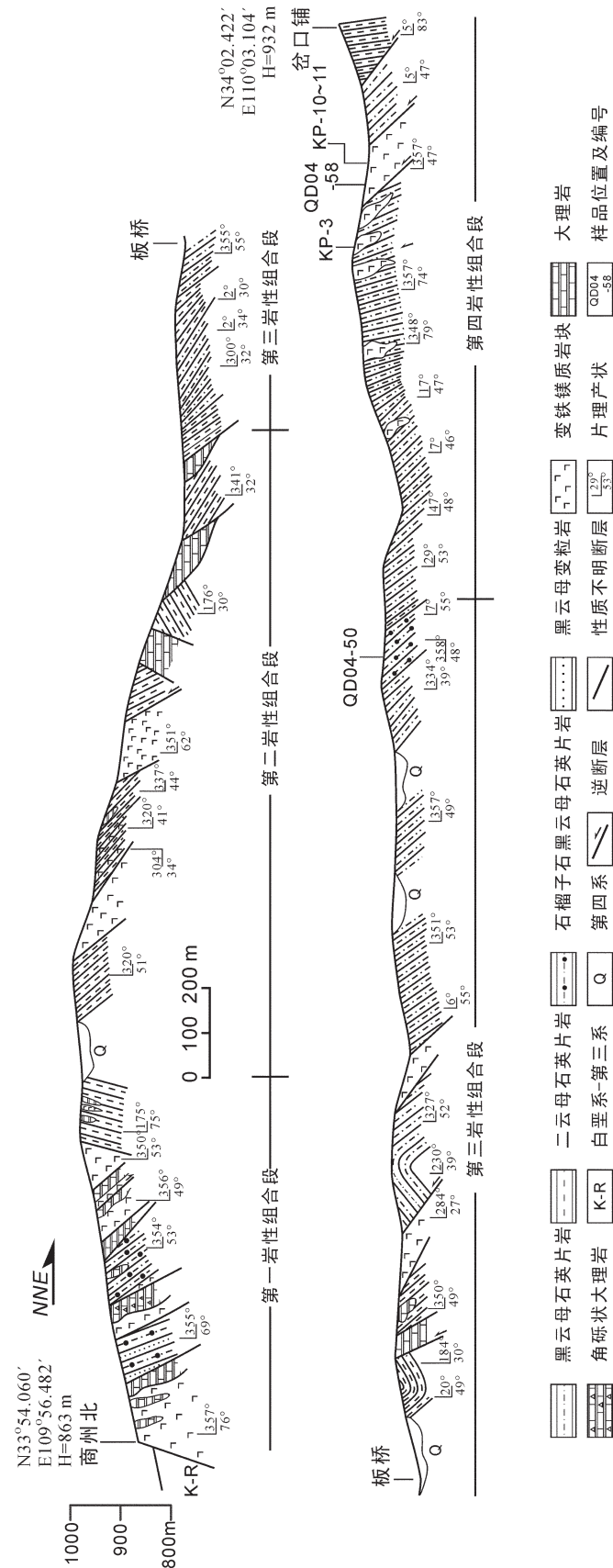


图 2 商州北—板桥—岔口铺宽坪群实测地质剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Geological section across the Kuangping Group from Shangzhou through Banqiao to Chakoupu

表 2 宽坪群变铁镁质岩块/片主量元素、稀土元素和微量元素分析结果

Table 2 Major and trace elements and REE analysis of metamafic rocks of the Kuangping Group

样号 岩性	Q85-113	Q85-105 绿泥 / 绿帘斜长阳起片岩	Q85-110	Q85-123	Q86-113	Q86-10	Q86-103	Q86-72	Q85-137	Q85-128	Q85-138 斜长角闪岩	Q87109	Q87113	Q86102	Q86103	Q86105
SiO ₂	48.47	47.89	51.13	51.29	48.13	49.75	50.36	48.77	50.06	50.01	51.99	48.88	48.64	51.59	51.25	49.85
TiO ₂	1.27	1.26	1.34	1.51	2.03	1.31	2.09	2.12	0.99	1.03	1.55	1.64	1.12	0.92	1.17	1.67
Al ₂ O ₃	15.55	14.46	14.36	15.15	15.62	14.75	15.24	14.45	14.55	14.59	14.97	13.95	13.90	14.36	13.44	12.32
Fe ₂ O ₃	2.99	9.50	6.26	3.43	3.45	2.13	0.70	4.65	2.31	4.62	3.49	4.27	3.79	2.55	2.67	3.70
FeO	8.92	6.21	6.71	9.80	11.34	10.37	9.95	10.52	8.90	6.75	7.27	9.39	8.65	8.04	9.75	12.76
MnO	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.16	0.25	0.20	0.19	0.18	0.21	0.19	0.18	0.22	0.26
MgO	8.22	7.24	8.36	6.55	8.97	8.14	8.16	6.75	7.86	8.19	7.52	7.12	9.04	7.79	7.59	6.51
CaO	11.75	8.34	9.71	8.65	5.60	11.47	9.79	9.55	11.59	12.48	9.01	11.99	12.53	12.25	11.43	10.80
Na ₂ O	2.46	3.74	1.75	2.99	4.34	1.71	3.12	2.82	3.30	1.94	3.74	2.25	1.85	2.12	2.26	1.79
K ₂ O	0.09	1.03	0.07	0.28	0.10	0.07	0.26	0.20	0.17	0.11	0.13	0.17	0.20	0.13	0.12	0.22
P ₂ O ₅	0.10	0.13	0.12	0.14	0.24	0.11	0.16	0.10	0.08	0.08	0.14	0.13	0.07	0.07	0.08	0.12
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mg [#]	42	47	49	34	38	38	39	33	41	48	44	50	53	43	38	28
La	3.25	3.28	3.62	4.14	7.15	4.66	3.01	6.09	2.34	2.34	4.19	1.94	1.94	3.16	3.16	4.70
Ce	10.18	9.93	10.47	12.51	20.00	13.29	8.91	17.85	6.84	6.77	12.05	6.77	6.77	6.07	8.58	13.15
Pr	1.51	1.38	1.56	1.70	2.72	1.73	1.20	2.21	1.01	1.06	1.68	1.64	1.64	1.68	1.68	1.68
Nd	7.31	6.61	7.74	8.84	13.98	10.27	7.06	13.20	5.21	5.42	8.84	5.42	5.42	5.24	6.63	10.53
Sm	2.37	2.11	2.56	2.82	4.24	3.16	2.24	3.98	1.77	1.81	2.77	1.77	1.74	1.74	2.19	3.38
Eu	1.03	0.91	1.03	1.26	1.58	1.06	0.82	1.36	0.75	0.74	1.00	0.74	0.74	0.76	0.92	1.37
Gd	3.26	2.78	3.37	4.03	5.56	4.30	3.63	5.42	2.63	2.56	3.62	2.56	2.53	2.53	3.06	4.19
Tb	0.68	0.47	0.71	0.81	1.05	0.70	0.55	0.97	0.52	0.55	0.73	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Dy	3.65	3.15	3.87	4.56	6.37	4.53	3.92	5.94	3.06	3.04	4.15	3.04	3.08	3.08	3.80	5.25
Ho	0.74	0.58	0.78	0.88	1.25	0.82	0.73	1.10	1.61	0.62	0.80	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
Er	2.09	1.87	2.21	2.62	3.64	2.26	2.19	2.98	1.75	1.77	2.26	1.77	1.77	2.00	2.52	3.32
Tm	0.30	0.27	0.34	0.49	0.52	0.33	0.33	0.45	0.28	0.38	0.35	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Yb	1.95	1.78	2.19	2.46	3.47	2.18	2.23	2.95	1.68	1.74	2.15	1.74	1.83	1.83	2.46	3.35
Lu	0.32	0.25	0.34	0.40	0.52	0.20	0.38	0.41	0.35	0.22	0.30	0.22	0.28	0.28	0.38	0.50
TREE	38.64	35.31	40.79	47.52	72.05	49.49	37.16	64.91	28.80	29.02	44.89	28.80	25.47	25.47	29.90	49.74
(La/Yb) _N	0.82	0.85	0.89	0.86	0.92	0.91	0.85	0.88	0.88	0.89	0.90	0.89	0.76	0.76	0.92	1.01
δEu	1.14	1.16	0.92	1.15	1.00	0.89	0.88	0.90	1.07	1.06	1.03	1.03	1.11	1.11	1.09	1.11
Rb	6.00	23.90	8.20	17.00	7.30	3.00	7.00	2.00	10.10	7.30	7.30	1.18	1.18	0.96	0.96	4.47
Sr	161.90	184.80	216.90	130.50	82.93	159.90	178.50	71.17	124.50	115.00	98.86	98.86	149.18	149.18	100.21	94.78
Ba	21.53	200.10	10.85	45.51	26.93	65.40	160.60	53.73	19.64	21.89	65.00	21.89	73.13	73.13	22.24	50.71
Y	19.79	17.07	20.88	25.46	34.39	19.28	17.64	25.94	16.21	16.48	21.32	16.21	20.90	20.90	24.80	25.50
Zr			74.00		116.00				53.00	52.00	83.00					
Sc	28.51	34.46	40.06	37.80	44.89				41.56	40.20	38.62					
V	282.30	273.20	287.10	292.90	356.70	300.00	286.50	397.20	230.40	282.30	281.10					
Co	36.75	26.37	38.45	44.11	43.11	39.66	41.12	39.58	43.43	36.75	36.20					
Cr	116.20	90.42	87.30	106.10	73.81		111.90	99.08	31.30	116.20	185.20					
Ni	61.71	45.46	58.07	63.13	51.90	93.91	65.87	56.68	60.00	61.71	92.09					

续表 2

样号	Q86107	Q8855	Q8654	Q8655	Q8656	Q8661	Q8662	Q8663	Q8668	Q8669	Q8811	QD04-58	KP-03	KP-10	KP-11	GDP-3
岩性	斜长角闪岩			绿泥 / 绿帘钠长阳起片岩												
SiO ₂	49.53	49.47	47.25	50.00	49.97	49.99	50.34	49.22	47.66	48.80	49.93	52.48	52.42	50.49	47.71	47.11
TiO ₂	0.97	1.64	1.28	1.25	1.33	1.23	1.14	1.11	1.38	1.59	1.68	1.45	0.87	1.51	1.99	1.68
Al ₂ O ₃	14.13	13.10	14.45	14.09	15.68	14.60	14.36	14.21	14.11	14.11	13.74	14.67	15.66	13.60	13.92	14.02
Fe ₂ O ₃	2.73	2.94	2.22	3.10	4.31	3.78	4.54	3.65	3.82	3.49	7.23	4.20	5.05	6.74	7.26	6.89
FeO	8.64	11.72	7.70	8.40	6.59	7.46	7.53	9.22	10.46	5.96	4.44	6.16	6.16	8.23	8.86	8.42
MnO	0.18	0.23	0.17	0.18	0.17	0.21	0.19	0.19	0.22	0.23	0.20	0.15	0.18	0.19	0.22	0.48
MgO	9.06	6.50	7.58	8.41	7.25	8.50	8.26	8.75	7.93	8.95	7.45	8.05	6.19	7.09	6.70	7.92
CaO	13.12	11.16	16.21	11.45	11.76	11.26	11.30	11.70	13.62	8.17	10.75	13.62	9.30	11.01	9.02	10.20
Na ₂ O	1.36	2.95	2.94	2.75	2.77	2.80	2.05	2.65	1.53	3.29	2.83	3.30	3.65	0.90	3.96	2.85
K ₂ O	0.17	0.17	0.09	0.26	0.05	0.08	0.20	0.19	0.39	0.79	0.08	0.10	0.41	0.11	0.21	0.30
P ₂ O ₅	0.07	0.11	0.11	0.10	0.11	0.09	0.09	0.08	0.11	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13	0.14	0.14
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mg [#]	45	30	43	44	46	47	46	45	40	40	49	64	44	40	37	42
La	2.22	4.03	4.31	4.02	5.37	3.76	6.32	8.61	4.17	4.80	7.79	7.79	5.20	4.45	7.99	5.67
Ce	7.01	10.70	10.83	11.68	14.14	10.09	16.54	23.22	10.86	12.14	18.80	18.80	10.03	10.31	17.51	12.46
Pr											2.78	2.78	1.69	1.54	2.73	1.86
Nd	5.72	8.12	7.74	9.53	10.89	7.44	12.31	17.79	8.03	8.74	12.76	12.76	7.40	7.83	12.53	9.66
Sm	1.88	2.67	2.54	3.16	3.48	2.46	4.12	6.06	2.51	2.72	4.01	4.01	2.32	2.54	4.05	2.89
Eu	0.81	1.14	1.00	1.33	1.87	1.03	1.77	2.63	0.99	1.12	1.37	1.37	0.76	0.98	1.38	1.40
Gd	2.60	3.76	3.40	4.52	4.65	3.48	5.99	9.00	3.36	3.70	5.08	5.08	2.62	3.31	5.10	3.62
Tb											0.87	0.87	0.48	0.60	0.87	0.63
Dy	3.24	4.64	3.81	5.75	5.92	4.27	7.66	11.06	3.98	4.47	5.60	5.60	3.18	4.11	5.58	4.17
Ho											1.15	1.15	0.58	0.95	1.19	0.79
Er	2.23	3.10	2.41	3.70	3.84	2.76	5.00	7.12	2.49	2.85	3.21	3.21	1.72	2.69	3.25	2.36
Tm											0.52	0.52	0.31	0.44	0.53	0.41
Yb	1.92	2.88	2.13	3.49	3.58	2.45	4.92	6.53	2.24	2.48	3.22	3.22	1.87	2.61	3.05	2.51
Lu	0.28	0.42	0.32	0.51	0.52			0.98	0.32	0.36	0.47	0.47	0.29	0.39	0.44	0.37
TREE	27.91	41.46	38.49	47.69	54.26	37.74	64.63	93.00	38.95	43.38	67.62	67.62	38.45	42.75	66.20	48.80
(La/Yb) _N	0.83	1.00	1.45	0.83	1.08	1.10	0.92	0.95	1.34	1.39	1.74	1.74	1.99	1.22	1.88	1.62
δEu	1.12	1.10	1.04	1.08	1.42	1.08	1.09	1.09	1.04	1.08	0.93	0.93	0.94	1.03	0.93	1.32
Rb	2.26	2.08	3.40	23.03	1.97	5.58	62.36	20.96	37.64	89.84	2.75	8.44	8.44	10.72	4.85	10.04
Sr	71.57	206.91	166.74	181.32	348.58	349.47	247.91	447.15	157.79	175.65	37.50	37.50	263.10	223.57	95.99	192.40
Ba	25.69	18.00	36.38	48.00	32.56	54.93	63.24	30.82	68.04	232.20	53.02	53.02	69.89	18.85	66.15	126.51
Y	15.68	22.35	74.90	23.60	16.68	17.89	18.74	21.90	18.39	18.86	29.43	29.43	20.76	25.33	28.90	28.90
Zr											99.47	99.47	73.32	74.54	89.54	73.97
Nb											5.70	5.70	2.59	2.77	4.57	3.23
Ta			0.49	0.35							0.41	0.41	0.13	0.13	0.24	0.16
Hf			2.03	2.23							2.67	2.67	1.91	2.05	2.54	1.76
Pb			0.32	0.31							1.52		1.52	1.11	5.82	3.60
Th											0.63	0.63	0.46	0.30	0.64	0.29
U											0.16	0.16	0.10	0.11	0.17	0.06
Se											39.21	39.21	40.19	43.42	46.96	1.13
Co											46.45	46.45	28.27	43.19	50.16	9.66
Cr			199.00	179.00												
Ni			114.00	118.00												

注:主量元素含量 wt%; 稀土和微量元素含量 μg/g; 前 11 个样品的数据据参考文献[8], 中间 16 个样品的数据据参考文献[10], 后 5 个样品的数据为本文成果

镁质岩石(QD04-58)(图 1 和图 2)。样品野外地质特征见图 3, 岩相学特征见图 4。

用于 U-Pb 测年的锆石选自变基性火山岩样品(QD04-58)。锆石 U-Pb 测年在北京离子探针中心的 SHRIMP-II 上采用标准测定程序进行, 详细的

分析流程见刘敦一等^[26]和简平等^[27]的详细论述。应用澳大利亚国家地质调查局标准锆石 TEM 进行元素间的分馏校正, 并应用澳大利亚国立大学地学院的标准锆石 SL13(572 Ma, U=238×10⁶)标定样品的 U、Th 及 Pb 含量。数据处理采用 Isoplot 软件^[28]。普

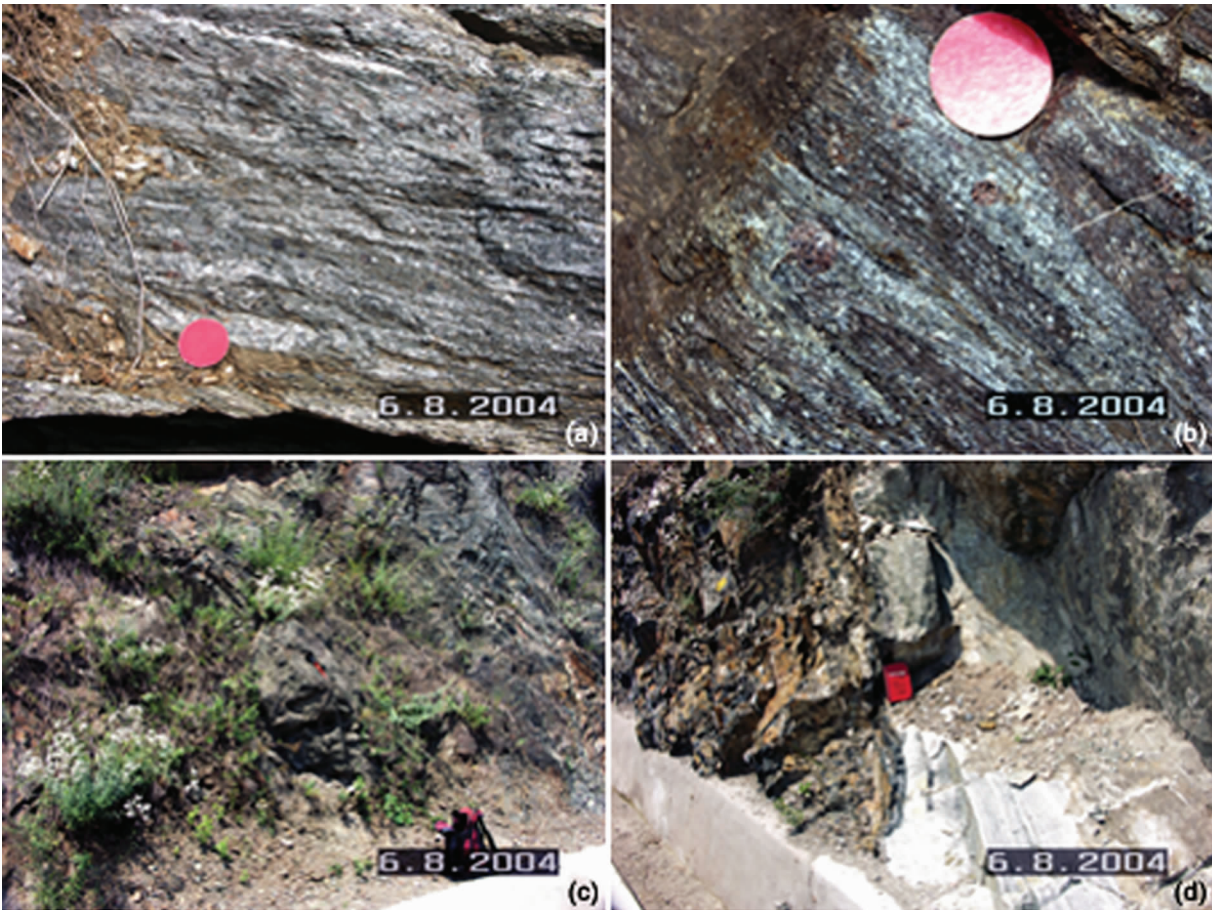


图 3 宽坪群石榴子石黑云母石英片岩和变铁镁质岩块/片的地质产状野外照片

Fig. 3 Photographs showing the geology of garnet-biotite-quartz schist and metamafic blocks of the Kuanping Group
(a) 强烈构造片理化的石榴子石黑云母石英片岩;(b) 石榴子石黑云母石英片岩中的黑云母条带和石榴子石;(c) 黑云母石英片岩中的变铁镁质岩块体;(d) 变铁镁质岩块与围岩的接触关系(记录本右侧)。红色圆标直径=35mm,钢钎长度=30cm

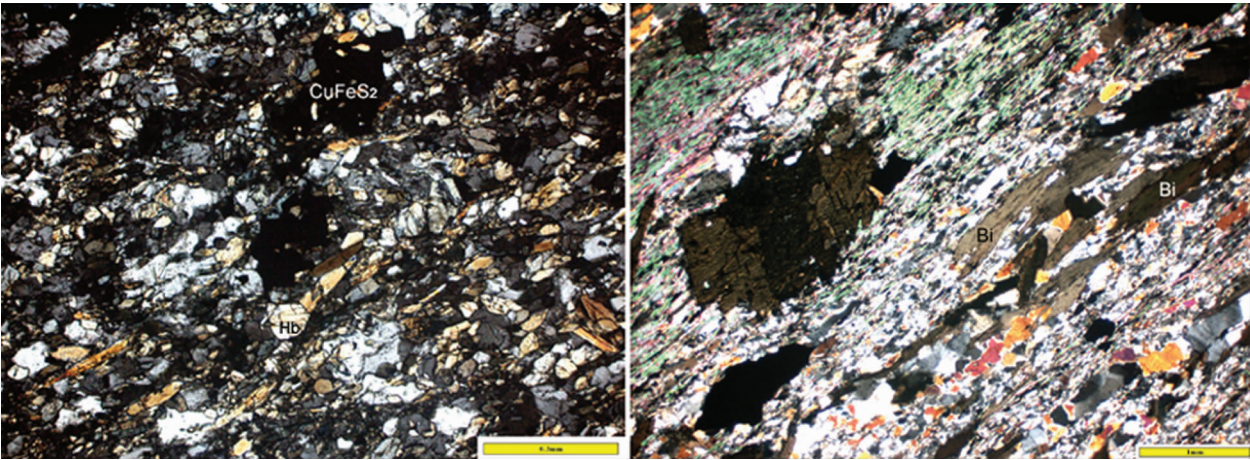


图 4 宽坪群变铁镁质岩和黑云母石英片岩显微组构特征

Fig. 4 Photomicrographs showing the microfabrics of metamafic rocks and biotite-quartz schist (crossed polars) in the Kuanping Group
(a)具变斑状结构的基性火山岩(正交偏光),角闪石变斑晶,基质为长英质,长石强烈蚀变,含黄铜矿;(b)片理化石榴子石黑云母石英片岩(正交偏光),黑云母和石英条带平行片理。Hb—角闪石,Bi—黑云母,Pl—蚀变斜长石,Q—石英,CuFeS₂—黄铜矿

表 3 宽坪群变铁镁质岩块/片 Sr 和 Nd 同位素分析结果
Table 3 Sr and Nd isotopic analyses of metamafic blocks from the Kuangping Group

样品	岩性	Rb	Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM}	<i>f</i> _{Sm/Nd}
QD04-58		0.78	39.50	0.0571	0.7082	13	4.49	15.54	0.1744	0.512825	12	0.707741	0.512127	+8.9	1259	-0.11
KP-03		4.72	160.68	0.0850	0.7055	11	3.79	11.51	0.1992	0.512760	11	0.704753	0.511962	+5.7	4064	0.01
KP-10		1.70	204.83	0.0240	0.7033	11	2.34	7.31	0.1937	0.512953	12	0.703078	0.512178	+9.9	1497	-0.02
GDP-3		1.40	241.39	0.0168	0.7032	10	2.20	6.93	0.1920	0.512961	11	0.703053	0.512192	+10.2	1323	-0.02
Q8654	变基性	3.40	166.74	0.0590	0.7055	5	2.31	7.57	0.1843	0.512809	12	0.705026	0.512071	+7.8	1763	-0.06
Q8655	基性	23.03	181.82	0.3670	0.7045	3	2.19	6.82	0.1943	0.512958	9	0.701342	0.512180	+9.9	1506	-0.01
Q8656	火	1.97	348.58	0.0160	0.7048	1	2.05	6.28	0.1976	0.512981	8	0.704681	0.512190	+10.1	1597	0.00
Q8661	山	5.58	349.47	0.0460	0.7037	3	2.46	7.44	0.1997	0.512897	10	0.703259	0.512097	+8.3	2739	0.02
Q8662	岩	62.36	247.91	0.7280	0.7044	2	1.99	6.43	0.1873	0.512862	7	0.698066	0.512112	+8.6	1659	-0.05
Q8663		20.96	447.15	0.1360	0.7044	1	6.06	17.79	0.2059	0.512916	9	0.703165	0.512092	+8.2	4520	0.05
Q8665		7.43	20.62	1.0400	0.7088	2	10.25	46.64	0.1329	0.512549	9	0.699707	0.512017	+6.8	1133	-0.32
Q8666		10.66	25.38	1.2160	0.7071	8	10.53	46.08	0.1382	0.512520	5	0.696524	0.511967	+5.8	1271	-0.30
Q8668		37.64	157.79	0.6910	0.7071	1	2.50	8.03	0.1886	0.512815	13	0.701049	0.512060	+7.6	2027	-0.04
Q8669		89.84	175.65	1.4810	0.7087	10	2.53	8.02	0.1908	0.512852	7	0.695785	0.512088	+8.2	1977	-0.03
Q86102		1.18	149.18	0.0230	0.7012	2	1.74	5.24	0.2013	0.512886	9	0.701000	0.512080	+8.0	3221	0.02
Q86103		0.96	100.21	0.0280	0.7024	7	2.19	6.63	0.2001	0.512869	19	0.702156	0.512068	+7.8	3127	0.02
Q86105	斜	4.47	94.78	0.1360	0.7039	1	3.39	10.50	0.1953	0.512839	47	0.702715	0.512057	+7.5	2563	-0.01
Q86107	长	2.26	71.57	0.0920	0.7045	1	1.88	5.72	0.1987	0.512879	12	0.703698	0.512083	+8.1	2738	0.01
Q8853	角	2.49	62.09	0.1160	0.7067	2	1.99	6.03	0.1998	0.512957	20	0.705689	0.512157	+9.5	2108	0.02
Q8854	岩	3.13	99.16	0.0910	0.7040	1	3.51	11.13	0.1909	0.512920	11	0.703207	0.512156	+9.5	1535	-0.03
Q8855		2.08	206.91	0.0290	0.7037	2	2.67	8.12	0.1986	0.512860	25	0.703447	0.512065	+7.7	2909	0.01
Q8684		2.99	181.30	0.0477	0.7047	7	3.87	11.54	0.2030	0.512841	25	0.704234	0.512028	+7.0	4353	0.03

注:1)前 4 个样品的数据是本文成果,后边样品的数据据参考文献[10]。
2)Rb、Sr、Sm、Nd 的含量为 μg/g, 变基性火山岩、斜长角闪岩的 Sr 和 Nd 初始比值计算取 $t = 611\text{Ma}$ (QD04-58 = 611Ma, SHRIMP, 本文实测)。
3)参数: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.1967$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.2137$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.51315$ (据参考文献[30]); $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}$ (据参考文献[31]); $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}$ 。
4)公式: $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0] - 1 \times 10^4$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda_{\text{Nd}} - 1})$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample}} - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample}} \times (e^{\lambda_{\text{Rb}} - 1})$;
 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} \times e^{\lambda_{\text{Sm}} - 1}] / \lambda \times \ln[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] + 1$;
 $f_{\text{Sm/Nd}} = (\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{S}} / (\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1 = [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} / 0.1967] - 1$

表 4 样品 QD04-58 锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果
Table 4 SHRIMP U-Pb analysis of zircon grains from sample QD04-58

测点	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	U / 10^{-6}	Th / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ / 10^{-6}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm$ (%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm$ (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm$ (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄/Ma $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
QD04-58-1.1	0.18	298	68	0.24	49.7	0.0865	4.1	2.320	7.2	0.1940	6	0.1940	1144	± 63
-1.2	0.56	339	146	0.44	28.3	0.0711	3.1	0.948	4.2	0.0966	3	0.0966	594	± 16
-2.1	0.17	1007	28	0.03	85.4	0.0667	2.6	0.906	4.4	0.0985	4	0.0985	606	± 21
-3.1	0.19	520	496	0.99	76.9	0.0737	1.4	1.748	3.1	0.1720	3	0.1720	1023	± 26
-4.1	0.03	1349	40	0.03	113.0	0.0695	1.3	0.935	3.0	0.0976	3	0.0976	600	± 16
-4.2	0.01	288	85	0.30	82.1	0.1404	3.7	6.410	4.7	0.3311	3	0.3311	1844	± 46
-5.1	0.12	322	135	0.43	28.7	0.0711	4.2	1.015	5.1	0.1036	3	0.1036	635	± 17
-6.1	0.27	327	139	0.44	27.8	0.0685	4.2	0.934	5.1	0.0988	3	0.0988	607	± 17
-7.1	0.25	327	140	0.44	30.1	0.0662	3.6	0.976	7.9	0.1068	7	0.1068	654	± 44
-8.1	0.04	1173	27	0.02	99.5	0.0750	1.9	1.021	3.3	0.0987	3	0.0987	607	± 16
-9.1	0.06	1076	27	0.03	94.4	0.0719	1.2	1.013	3.7	0.1021	4	0.1021	626	± 21

注:误差为 1σ ; $^{206}\text{Pb}_c$ 为普通 Pb; $^{206}\text{Pb}^*$ 为放射性 Pb; 普通 Pb 采用实测的 ^{206}Pb 校正

通 Pb 由实测 ^{206}Pb 校正。所有测点的误差均为 1σ , 所采用的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄具 95% 的置信度。分析结果见表 4。

用于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学分析的黑云母样品(QD04-50)选自第三岩性段的石榴子石黑云母石英片岩。初选出的黑云母单矿物样品纯度均达到 99% 以上, 将其置于稀硝酸(0.01N)中浸泡清洗 2 h 并用去离子水清洗后, 低温($<100^\circ\text{C}$)烘干。电子天平称重后, 用纯净铝箔纸包裹待测样品, 并将其与用于 K、Ca、Cl 诱发同位素校正的 K_2SO_4 、 CaF_2 、 KCl 及标准样品, 用铝铂纸包装并制成圆球状, 密封于真空石英瓶中, 送中国原子能科学研究院 49-2 核反应堆 H8 通道进行快中子照射 24 h 8 min, 积分中子通量为 $5.78\times 10^{17}\text{n}/\text{cm}^2$ 。用作中子通量监测的标准样是中国标样 ZGC 粗面岩和国际标样 Bern4 白云母, 标样年龄分别为 50.1 Ma 和 18.6 Ma。测定的 K、Ca 诱发同位素校正系数为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=2.71\times 10^{-4}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=7.03\times 10^{-3}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=6.52\times 10^{-4}$, ^{37}Ar 的半衰期取 35.1 天, ^{40}K 的衰变常数取 $5.543\times 10^{-10}\text{a}$ 。数据处理采用 Isoplot 3.0^[28] 计算坪年龄及等时线年龄。测试工作在北京大学地球与空间学院造山带与地壳演化教育部重点实验室进行, 详细实验流程见龚俊峰等^[29] 的描述。黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学分析结果见表 5。

3 结果分析

3.1 岩石地球化学特征

地球化学分析结果显示, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩 SiO_2 含量分别为 47.05%~51.29% 和 47.11%~52.48%。 TiO_2 的含量分别是 0.87%~2.03% 和 0.92%~2.12%, 多数大于 1.00%。 MgO 含量较低($\text{Mg}^\#$ =29~49), 样品 QD04-58 的 MgO 含量略高($\text{Mg}^\#$ =64)。表明宽坪群中的变铁镁质岩的原岩类型主要是亚碱性玄武质岩石。在 SiO_2 - TFeO/MgO 和 TiO_2 - TFeO/MgO 判别图上, 宽坪群中的变铁镁质岩主要是 TH 系列的铁镁质岩石(图 5)。

宽坪群变基性火山岩的稀土元素总量为 37.74~93.00 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)无明显分异, LREE 呈现亏损—

表 5 样品 QD04-50 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学分析结果

Table 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronologic analysis of biotite from sample QD04-50

T /°C	年龄 /Ma $\pm 2\sigma$	$^{40}\text{Ar}^*$ /%	^{39}Ar /moles	^{39}Ar	($^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)	($^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)	($^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)
400	282.05 $\pm$ 4.68	93.1282	1.30E-13	159.4189 $\pm$ 1.5396	8.1558 $\pm$ 0.0208	0.2297 $\pm$ 0.0047	2.6242 $\pm$ 0.0050
500	306.47 $\pm$ 3.36	95.2942	1.96E-13	256.2763 $\pm$ 2.9695	12.2621 $\pm$ 0.1111	0.2543 $\pm$ 0.0090	2.2728 $\pm$ 0.0086
600	315.76 $\pm$ 5.28	85.765	1.49E-13	223.3051 $\pm$ 3.2591	9.3086 $\pm$ 0.0297	0.2282 $\pm$ 0.0053	2.3181 $\pm$ 0.0032
700	316.90 $\pm$ 14.49	77.4621	7.47E-14	124.6096 $\pm$ 5.0872	4.6732 $\pm$ 0.0183	0.1441 $\pm$ 0.0053	1.8033 $\pm$ 0.0047
800	319.95 $\pm$ 3.74	95.989	1.65E-13	224.4259 $\pm$ 1.5435	10.3209 $\pm$ 0.0392	0.1913 $\pm$ 0.0056	1.4314 $\pm$ 0.0060
850	320.53 $\pm$ 3.27	99.3569	2.83E-13	373.2642 $\pm$ 1.8911	17.7332 $\pm$ 0.0918	0.2506 $\pm$ 0.0058	1.1867 $\pm$ 0.0042
900	318.90 $\pm$ 3.52	86.3718	1.45E-13	218.8903 $\pm$ 1.0757	9.0905 $\pm$ 0.0135	0.1333 $\pm$ 0.0035	1.2093 $\pm$ 0.0054
950	318.61 $\pm$ 3.05	87.6484	1.86E-13	276.4778 $\pm$ 0.2217	11.6633 $\pm$ 0.0354	0.1692 $\pm$ 0.0016	1.0213 $\pm$ 0.0023
1050	293.42 $\pm$ 4.16	88.0566	4.13E-14	55.7525 $\pm$ 0.0478	2.5841 $\pm$ 0.0142	0.0543 $\pm$ 0.0032	0.8685 $\pm$ 0.0019
1100	271.33 $\pm$ 7.97	96.6112	1.56E-14	17.6835 $\pm$ 0.1218	0.9786 $\pm$ 0.0140	0.0259 $\pm$ 0.0021	0.8968 $\pm$ 0.0018
1180	283.05 $\pm$ 104.62	6.6827	1.91E-15	32.7360 $\pm$ 0.0329	0.1197 $\pm$ 0.0033	0.0176 $\pm$ 0.0021	0.8360 $\pm$ 0.0026
1250	147.52 $\pm$ 77.05	3.4292	1.91E-15	31.9968 $\pm$ 0.0617	0.1197 $\pm$ 0.0022	0.0152 $\pm$ 0.0026	0.7236 $\pm$ 0.0012
1300	162.24 $\pm$ 65.60	3.1202	2.16E-15	43.8808 $\pm$ 0.0208	0.1352 $\pm$ 0.0018	0.0173 $\pm$ 0.0020	0.7497 $\pm$ 0.0022

注: $j=0.0093\pm0.00004785$, 标样年龄为 50.1Ma, 大气比值为 295.5, ($^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)_g=0.000271, ($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)_g=0.00652, ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)_g=0.00703

略富集, (La/Yb)_N=0.82~1.99, 多数介于 0.85~1.22 间。球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈平坦型

(图 6-a), 与 E-MORB 的配分模式相似, 表明宽坪群变基性火山岩的源区比 N-MORB 的相对富集。宽坪群变基性火山岩的 δEu 值($\delta\text{Eu}=0.82\sim1.42$)暗示, 初始玄武质岩浆的分离结晶作用很弱, 斜长石分异程度较低。在 N-MORB 标准化微量元素蛛网图上, 宽坪群变基性火山岩的大离子亲石元素(LILE, 如 Sr、K、Rb、Ba)轻度富集, 高场强元素(HFSE)除 P 略呈亏损外, 其他高场强元素(如 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等)既不富集也不亏损, 显示与 E-MORB 相类似的地球化学特征(图 6-b)。

宽坪群斜长角闪岩的稀土元素总量相对较低, 为 25.47~64.91 $\mu\text{g/g}$ 。LREE 和 HREE 同样无明显分异, LREE 呈现亏损-略富集, (La/Yb)_N=0.76~1.11, 多数介于 0.83~1.11 之间。球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈平坦型(图 6-c), 与 E-MORB 的配分模式相似, 表明宽坪群斜长角闪岩的源区相对于 N-MORB 富集。宽坪群斜长角闪岩的 δEu 值($\delta\text{Eu}=0.882\sim1.32$)暗示, 初始玄武质岩浆的分离结晶作用很弱, 斜长石分异程度较低。N-MORB 标准化微量元素蛛网图上, 宽坪群斜长角闪岩的大离子亲石元素(LILE, 如 Sr、K、Rb、Ba)略显富集, 但 Th 略显亏损, 高场强元素(如 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等)既不富集也不亏损, 显示与 E-MORB 相类似的地球化学特征(图 6-d)。

3.2 同位素地球化学特征

宽坪群变基性火山岩的初始锶比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀=0.695785~0.707741, 相当分散, 可能与海底喷发过程中熔岩与海水相互作用或受到碳酸盐壳的混染^[34]和后期构造变形变质作用的破坏或改造有关。除样品 Q8662 和 Q8669 外, 宽坪群变基性火山岩多数样品的初始锶比值集中于 0.701049~0.705026 之间, 占全部样品的 83.33%。初始钕比值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)₀=0.511962~0.512192, 比较集中和均一, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值(+5.7~+10.2), 多介于+7.0~+8.9 范围内。宽坪群斜长角闪岩的全岩初始锶比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀=0.701000~0.705689, 同样比较分

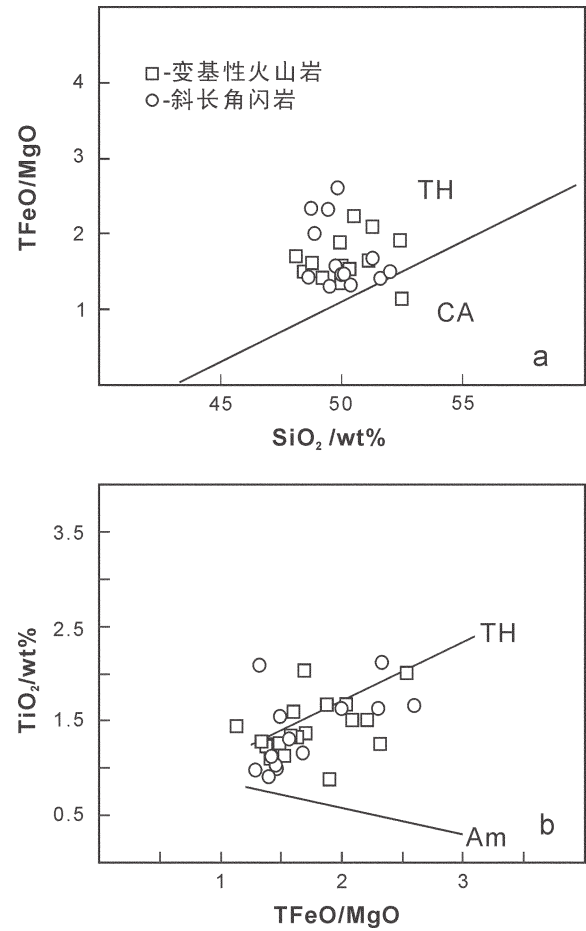


图5 宽坪群变铁镁质岩石系列 SiO_2 - TFeO/MgO (a) 和 TFeO/MgO - TiO_2 判别图(b)(据参考文献[32])
Fig. 5 Discrimination diagrams of SiO_2 - TFeO/MgO (a) and TFeO/MgO - TiO_2 (b) for metamafic rock samples from the Kuanping Group
TH—拉斑系列;CA—钙碱性系列;Am—碱性铁镁质岩

散。初始钕的比值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)₀=0.512028~0.512157,比较集中和均一, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值(+7.0~+9.5)。宽坪群变基性火山岩的 $t_{\text{DMI}}=1133\sim 4520\text{ Ma}$,多介于1133~1977 Ma 范围内。除样品 Q8854($t_{\text{DMI}}=1535\text{ Ma}$)和 Q8684($t_{\text{DMI}}=4353\text{ Ma}$)外,其他斜长角闪岩样品的 t_{DMI} 落于2108~3221 Ma 之间。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

CL 图像显示,从宽坪群变基性火山岩样品(QD04-58)中分选出来的锆石颗粒外形不规则,少数呈自形或半自形晶,最大粒度小于100 μm 。内部结构上,锆石由2部分组成,暗色(或高U)晶域被非常薄的浅色边(或低U晶域)包围(图7)。暗色晶

域略显振荡环带结构特征,而浅色晶域非常均一,无典型岩浆锆石的振荡环带结构。个别锆石颗粒内部可见残余锆石晶核,呈现核幔结构。总体上,暗色晶域宽阔而稳定,不同颗粒间不存在明显的变化或差异,暗示其为基性岩浆分离结晶的产物。浅色薄边(低U晶域)可能是后期变质增生的部分,其厚度1~2 μm ,难以进行 SHRIMP 原位测年。残余晶核可能是锆石捕晶,其年龄明显偏大,所获得的3个锆石晶核(测点-1.1、-3.1和-4.2)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别是(1844 $\pm$ 46)Ma、(1144 $\pm$ 63)Ma和(1023 $\pm$ 26)Ma(表4),可能是岩浆活动过程中捕获古老地壳成分的记录。其余8个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值比较集中,构成了主群锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为611 Ma $\pm$ 13 Ma(图8),表明商州板桥北宽坪群变基性火山岩的形成时代为晚新元古代 Ediacaran 期。

3.4 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

在实验过程中,对选自石榴子石黑云母石英片岩的黑云母样品进行了13个温阶(400~1300 $^{\circ}\text{C}$)测试。低温熔样阶段(400~700 $^{\circ}\text{C}$)增温步长为100 $^{\circ}\text{C}$,中—高温熔样阶段(800~1300 $^{\circ}\text{C}$)的增温步长为50~80 $^{\circ}\text{C}$ 。最初2个温阶(400和500 $^{\circ}\text{C}$)和最后5个温级(1050~1300 $^{\circ}\text{C}$)给出了较年轻的年龄值,分别是282.1 $\pm$ 4.7、306.5 $\pm$ 3.4、293.4 $\pm$ 4.2、271.3 $\pm$ 7.9、283.1 $\pm$ 104.6、147.5 $\pm$ 77.1和162.3 $\pm$ 65.6(Ma)(表5)。余下6个温阶的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比值非常稳定,年龄谱平坦, ^{39}Ar 析出量为62.79%(总析出量为87.14%),由这6个视年龄构成的坪年龄为319.1 Ma $\pm$ 3.6 Ma(MSWD=0.56)(图9),与之对应的等时线年龄为320.4 Ma $\pm$ 3.5 Ma(MSWD=0.81),表明宽坪群石榴子石黑云母石英片岩的形成时代或原岩变质时代为石炭纪 Serpukhovian 期。初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为279 Ma $\pm$ 13 Ma,略低于尼尔值(295.5 Ma),暗示该样品不存在过剩Ar。

4 讨 论

4.1 变铁镁质岩的成因

宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩虽然在岩性和变质程度上不同,但前文岩石地球化学分析表明2类岩石的化学组成非常相似。 SiO_2 含量均小于53%,绝大部分样品的 TiO_2 含量小于2%, MgO 含量也较低($\text{Mg}^{\#}=29\sim 49$),且二者均属亚碱性 TH 系列玄武质岩石(图5)。二者的轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)无明显分异,LREE 呈现轻微

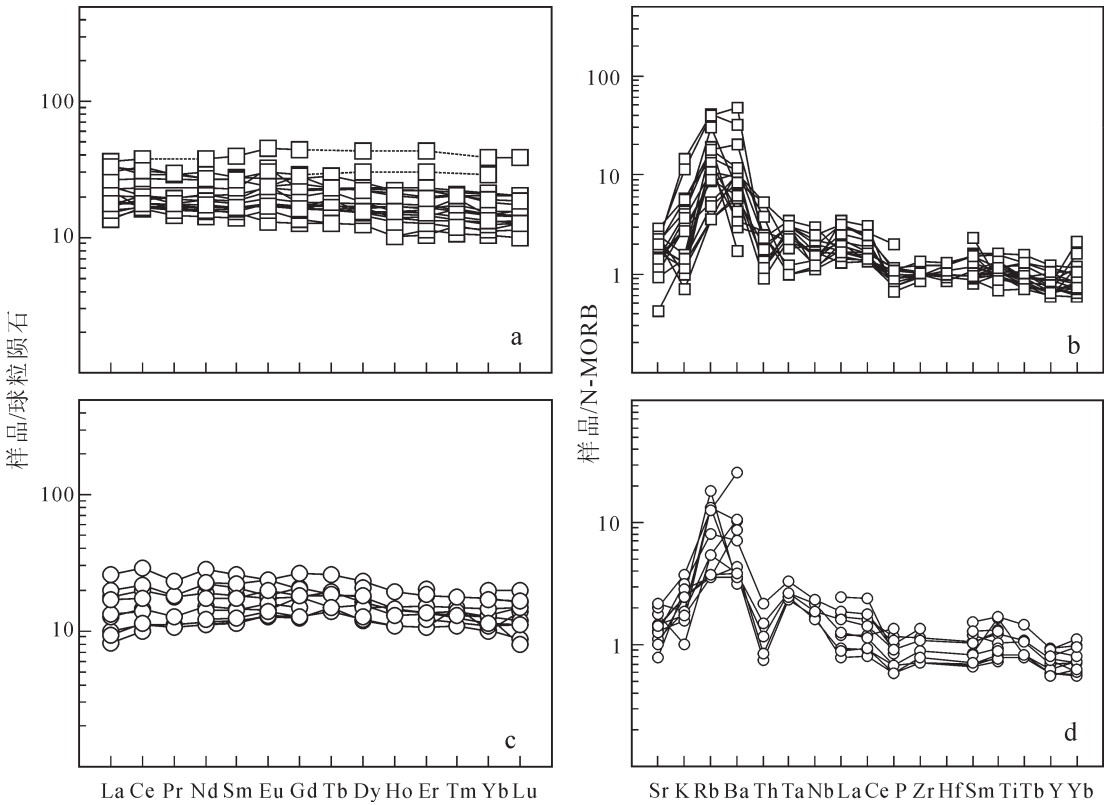


图 6 球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a 和 c)和 N-MORB 标准化微量元素蛛网图(b 和 d)
(图例同图 5, 标准化数值据参考文献[33])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a and c) and N-MORB-normalized trace element spidergrams (b and d) of metamafic rock samples from the Kuanping Group

亏损或略显富集的状态，球粒陨石标准化稀土元素配分模式均为平坦型(图 6-a、c)，与 E-MORB 的配分模式相似，表明宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的源区比 N-MORB 富集。在 N-MORB 标准化微量元素蛛网图上，宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的大离子亲石元素(LILE, 如 Sr、K、Rb、Ba) 轻度富集,高场强元素(HFSE, 如 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti 等) 既不富集也不亏损，显示与 E-MORB 相类似的地球化学特征(图 6-b、d)。这暗示 2 类岩石来自轻稀土和大离子亲石元素略呈亏损的源区。在 Zr-Zr/Y 判别图上, 大多数宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩样品投入 MORB 和 E-MORB 2 个区域(图 10-a), 在经典的 Hf/3-Ta-Th 玄武岩构造环境判别图上，变基性火山岩样品投入

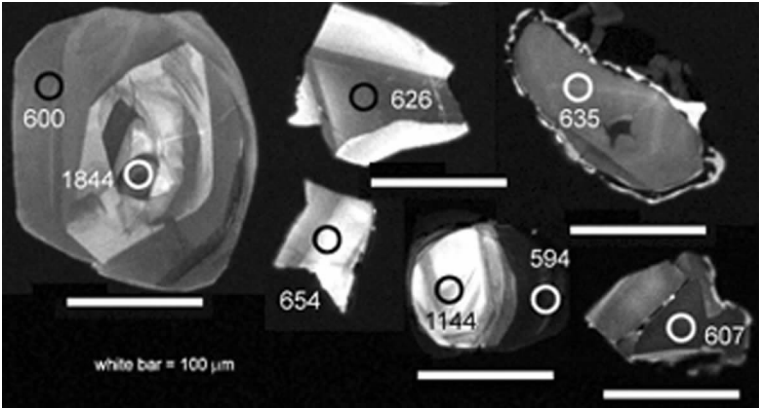


图 7 样品 QD04-58 锆石阴极发光图像(详细描述见正文)

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images showing the external appearance and internal texture of polished zircon grains from the leucocratic rock sample (QD04-58)

E-MORB 和 $Hf/Th > 3$ 区域(图 10-b)暗示: 变基性火山岩的岩浆源区中无太多的大洋沉积混入，或者

变基性火山岩的初始岩浆并非俯冲洋壳部分熔融而成。而在 $Ti/100-Sr/2-Zr$ 和 $TFeO-MgO-Al_2O_3$ 判别图上, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩表现出与大洋玄武岩(OIB 或 OFB)强烈的亲缘性(图 10-c,d), 说明 2 类岩石形成于洋盆环境。与弧后盆地火山岩($MgO>9\%$ 、LREE 富集和 Nb 显著亏损)相比, 宽坪群变基性火山岩并未显示这样的地球化学特征, 也未表现洋岛玄武岩(OIB)诸如富 TiO_2 、大离子亲石元素和高场强元素的特点。分析判断, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩形成于大陆边缘裂谷洋盆环境。

Sr 和 Nd 同位素地球化学分析显示, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均为正值。其中, 变基性火山岩样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值集中于 +5.6~+8.2 和 +8.6~+10.2 两个区间, 后者与 N-MORB 的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+8.9~+9.7)相当, 暗示变基性火山岩可能是 2 个 LREE 亏损程度不同的源区端元的部分熔融、混合形成的, 其一是与 N-MORB 类似的亏损地幔源。斜长角闪岩样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值也分布于 +7.0~+8.1 和 +9.5 两个区间, 后者属 N-MORB 的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的范围, 同样反映了斜长角闪岩可能是 2 个 LREE 亏损程度不同的源区端元的部分熔融、混合形成的, 其一是与 N-MORB 类似

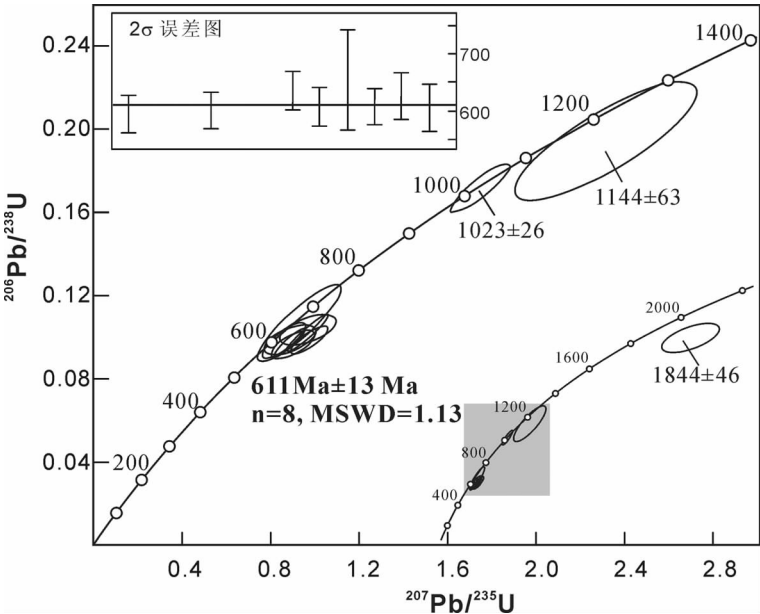


图 8 宽坪群变基性火山岩样品 QD04-58 锆石 SHRIMP U-Pb 谐和曲线

Fig. 8 SHRIMP zircon U-Pb concordia plots for sample QD04-58 of metabasic volcanic rocks of the Kuanping Group

的亏损地幔源。基本相同的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值表明, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩具有同源区, 且根据大的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 正值判断, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩均来自大离子亏损、Nd 同位素值不均匀的地幔源区, 与主量、稀土和微量元素所反映的特征相似。Sr 同位素值相当分散, 一方面可能与海底喷发过程中

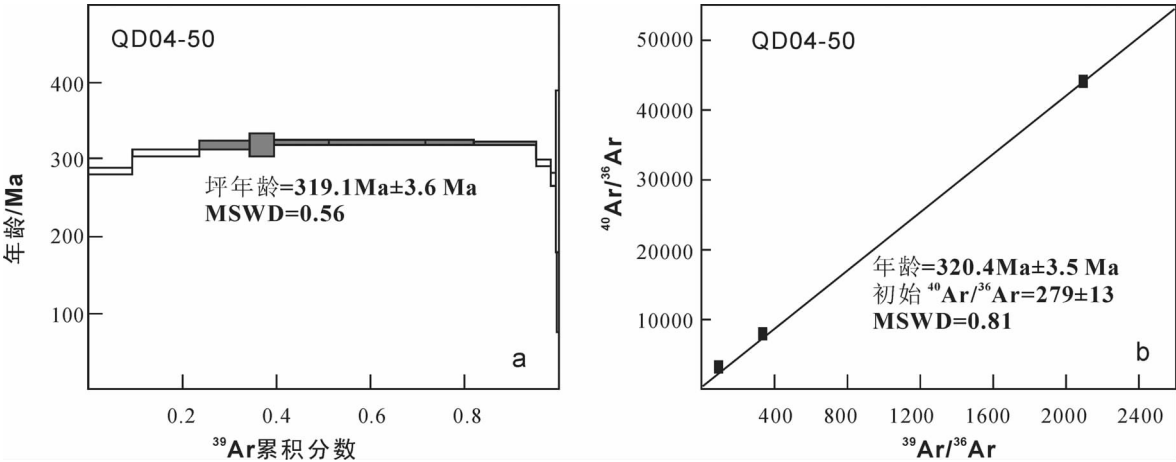


图 9 样品 QD04-50 黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 测年结果(详细描述见正文)

Fig. 9 $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of biotite from schist sample QD04-50

a—年龄坪谱;b—等时线年龄

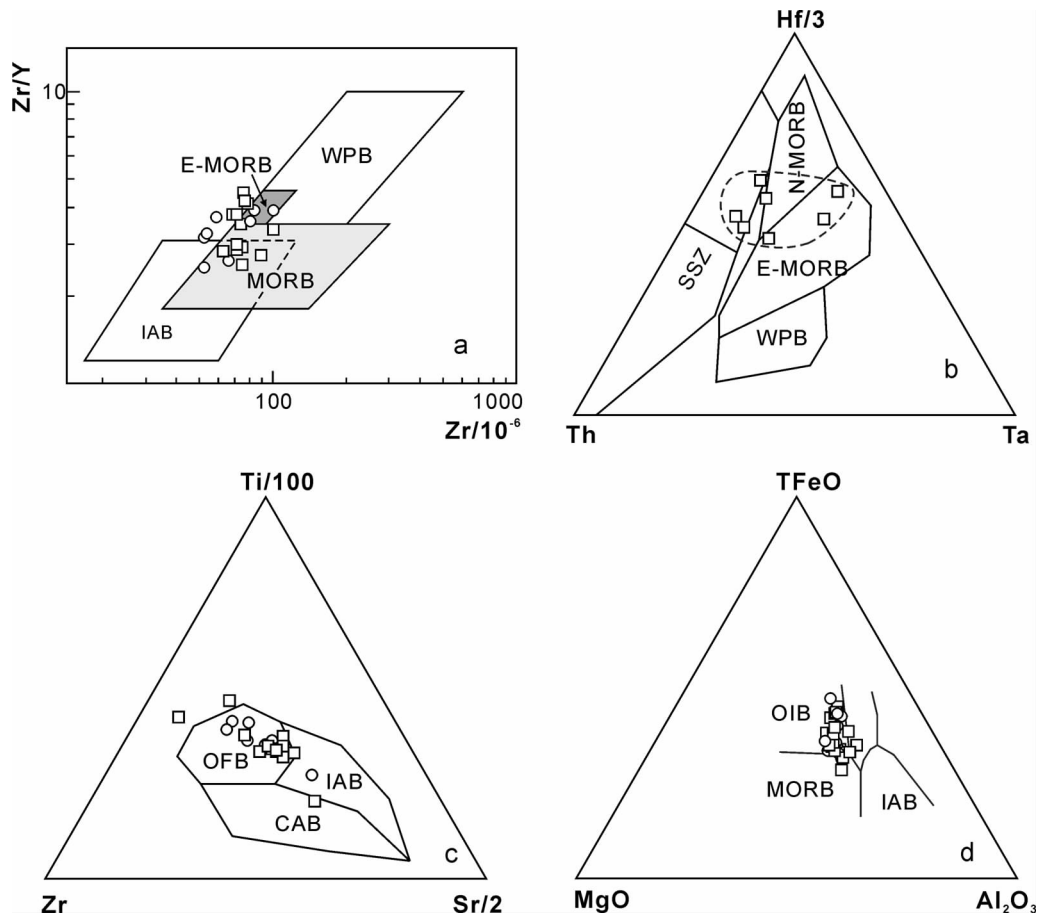


图 10 宽坪群变铁镁质岩构造环境判别图

Fig. 10 Tectonic setting discrimination diagrams of Zr–Zr/Y (a), Hf/3–Ta–Th (b), Ti/100–Sr/2–Zr (c) and TFeO–MgO–Al₂O₃ (d) for metamafic rock samples from the Kuanping Group

a—Zr–Zr/Y 判别图 (据参考文献[35]); b—Hf/3–Ta–Th 判别图 (据参考文献[36]); c—Ti/100–Sr/2–Zr 判别图 (据参考文献[37]) 和 d—TFeO–MgO–Al₂O₃ 判别图 (据参考文献[38])。图例同图 5。

IAB—岛弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; E-MORB—富集的 MORB; WPB—板内玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; OFB—洋底玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; SSZ—超级俯冲带

熔岩与海水相互作用或受到碳酸盐壳的混染^[34]; 另一方面也暗示宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩遭受了后期, 可能主要是早、晚古生代 2 次构造变形/变质事件的强烈破坏或改造。尽管 Sr 同位素特征已不能完全反映岩石的源区特征, 但除变基性火山岩样品 QD04–58 外, 其他样品的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ 很低, 均小于 0.705, 且低于现代球粒陨石的 0.7047, 大体上仍反映了宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩来自亏损地幔源区的特征。

尽管岩石地球化学和 Sr、Nd 同位素特征均揭示宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩来自亏损地幔

源区, 但与 N-MORB (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.5130~0.5133)^[39] 相比, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的 Nd 同位素 (0.511962~0.512192 和 0.512028~0.512157) 均显示富集, 并非典型的亏损地幔源区。与 N-MORB 的 ε_{Nd}(t) 值 (+8.9~+9.7) 相比, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩还具有更富集的成分, 其 ε_{Nd}(t) 值分别为 +5.6~+8.2 和 +7.0~+8.1, 表明有其他端元成分不同程度的混染。本文 SHRIMP 测年所获得较老的锆石晶核 (1844 Ma±46 Ma、1144 Ma±63 Ma、1023 Ma±26 Ma), 明确地显示岩浆活动过程中有古老地壳成分的混染。在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀–ε_{Nd}(t) 判别图上, 宽坪群变基

性火山岩和斜长角闪岩样品投入亏损地幔源区,多分布于地幔列阵(Mantle Array)与普通地幔(PRE-MA)附近(图 11)。且 2 类岩石样品主要位于亏损地幔源区的低 Rb/Sr 高 Sm/Nd 区、这与由稀土、微量元素所反映的 2 类岩石来自轻稀土和大离子亲石元素略呈亏损的源区的判断是一致的。其中,富集的源区端元部分可能是被裂谷作用湮灭的陆壳成分。由此分析,宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩应是大陆边缘裂谷初始洋壳的组成部分。

4.2 变铁镁质岩的时代含义

本文锆石 U-Pb 年代学分析表明,北秦岭商—洛地区宽坪群变基性火山岩的形成时代为晚新元古代 Ediacaran 期($611 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$),这一年龄所代表的事件在北秦岭造山带及其邻近区域具有广泛的分布。首先,如前文所述,宽坪群变沉积岩的时代为奥陶纪,但在板桥剖面盆口铺以南的宽坪群四岔口组云母石英片岩中获得了 $609 \text{ Ma} + 43/-48 \text{ Ma}$ 的锆石(U-Pb)^[10],在南召县铁匠炉宽坪群云母石英片岩中获得了 $697 \text{ Ma} \pm 1 \text{ Ma}$ 的锆石($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)^[10],这些碎屑锆石与本文用于 SHRIMP 测年的岩浆锆石的年代或完全一致或非常接近,说明宽坪群变沉积岩的部分蚀源区来自其本身的变铁镁质岩。宽坪群以北大面积稳定出露的栾川群大红口组碱质粗面岩的形成时代($660 \text{ Ma} \pm 27 \text{ Ma}$, Rb-Sr 等时; $682 \text{ Ma} \pm 60 \text{ Ma}$, Sm-Nd 等时; $700 \text{ Ma} \pm$, 单锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)^[10],与本文测年结果一致或相近,表明晚新元古代末期北秦岭造山带发育一次显著的裂谷或地壳伸展事件。另外,北秦岭地区广泛发育的岩浆岩($959 \sim 850 \text{ Ma}$)具有由 S 型、I 型向 A 型演化的特点^[41],说明北秦岭在新元古代时期经历了碰撞造山、后造山伸展到造山后裂解的构造过程^[42]。侵入丹凤群和二郎坪群基性火山岩中的奥长花岗岩($540 \sim 480 \text{ Ma}$, 锆石 U-Pb)^[43]则表明,丹凤群和二郎坪群所代表的北秦岭新元古代—早古生代洋盆是造山后再次裂解的产物^[42]。其次,在南秦岭造山带及邻区,晚新元古代的裂谷或地壳伸展事件的记录也非常显著。如,龙门山地区侵入宝兴和彭灌杂岩体中的煌斑岩脉($636 \sim 773 \text{ Ma}$, K-Ar^[44])是晚新元古代扬子陆块西缘裂谷或地壳伸展作用的产物;南秦岭碧口群中发育的辉绿岩墙群($689 \text{ Ma} \pm 24 \text{ Ma}$, SHRIMP 锆石 U-Pb; $652.72 \text{ Ma} \pm 0.88 \text{ Ma}$, 角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ^[45])和大规模侵入武当群中的基性岩墙群($750 \text{ Ma} \pm 4 \text{ Ma} \sim 694 \text{ Ma} \pm 1 \text{ Ma}$, 角闪石

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ^[46-47])是晚新元古代扬子陆块北缘裂谷或地壳伸展作用的显著表现。作为扬子陆块北缘大陆裂解或地壳伸展作用产物的双峰式碱性花岗岩与铁镁质岩墙群一样,形成于晚新元古代($680 \sim 686 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$, SHRIMP 锆石 U-Pb^[42]; 687 Ma ^[48])。另外,对湖北随州大洪山地区的 MORB 型玄武岩的研究表明,扬子陆块北缘的海底扩张作用发生于 $698 \text{ Ma} \pm 180 \text{ Ma}$ (全岩 Sm-Nd 等时^[49]),与上述基性岩墙群和碱性花岗岩的侵位时代一致。因此,本文获得的宽坪群变基性火山岩的锆石 U-Pb 年龄代表了华北陆块南缘晚新元古代大陆裂解事件的时代。牛宝贵等^[42]认为,这次裂解事件是中国古地台裂解的开始,是秦岭造山带早古生代洋盆开启的开始,也为晚新元古代—早古生代华北陆块南缘被动陆缘沉积(如陶湾群和宽坪群等)和扬子陆块北缘被动陆缘沉积(如城口—房县断裂以北的震旦系凝灰质砂岩、寒武系—奥陶系洞河群、志留系梅子垭群等)提供了可容纳空间。

根据上述岩浆热事件年代学研究结果和沉积特征分析,晚新元古代大陆裂解(或裂谷)作用在华北陆块南缘和扬子陆块北缘是同时进行的。但是,这次大陆裂解事件是否是 Rodinian 大陆裂解作用的响应,尚需进一步探讨。另外,中国南北 2 个陆块是否

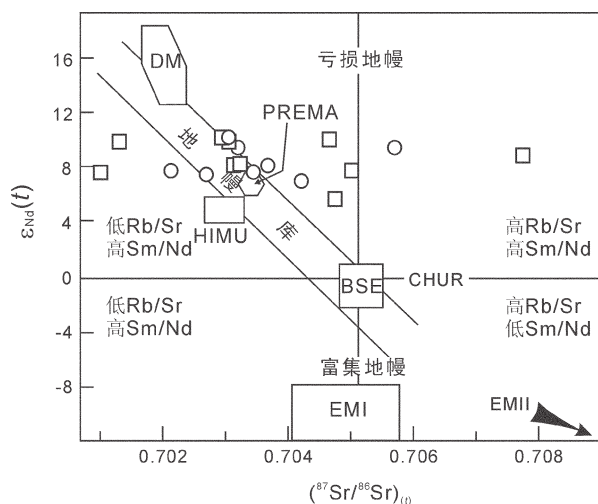


图 11 宽坪群变铁镁质岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 同位素相关图(据参考文献[40])

Fig. 11 Discrimination diagram of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for metamafic rock samples from the Kuanping Group DM—亏损地幔; PREMA—普通地幔; BSE—硅质地球; HIMU—高 U/Pb 比地幔; EMI—I 型富集地幔; EMII—II 型富集地幔; CHUR—球粒陨石均一化库。图例同图 5

如牛宝贵等^[4]所提出的因这次裂解作用而裂离,目前尚存疑问。因为对勉略混杂带中的蛇绿岩残片的最新年代研究结果表明,残留于勉略混杂带中的古秦岭洋盆的时代更早些($841\text{ Ma}\pm 19\text{ Ma}\sim 808\text{ Ma}\pm 10\text{ Ma}$, SHRIMP 锆石 U-Pb^[50]),说明新元古代期间存在分隔中国南北陆块的古秦岭洋。

本文获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($319.1\text{ Ma}\pm 3.6\text{ Ma}$)与前人获得的与北秦岭造山带变形变质事件有关的大量测年结果一致或相近。如,商州北宽坪地区宽坪群广东坪组绿片岩 Rb-Sr 等时线年龄($240\text{ Ma}^{[10]}$)、洛南县马河宽坪群广东坪组斜长角闪岩单矿物(角闪石和斜长石)Rb-Sr 等时线年龄($265\text{ Ma}^{[10]}$)、商州板桥宽坪群谢湾组斜长角闪岩角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄($323.8\text{ Ma}\pm 3.3\text{ Ma}^{[10]}$)、南召龙脖庄—河西村一带的花岗片麻岩锆石 U-Pb 下交点年龄($389\text{ Ma}+20/-21\text{ Ma}$, $241\text{ Ma}+17/-18\text{ Ma}^{[10]}$)、蒲峪河口斜长角闪岩体中角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $324\text{ Ma}^{[23]}$ 、洛南谢湾水库南侧宽坪群二云片麻岩 S_2 劈理面上二云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($327\text{ Ma}\pm 7\text{ Ma}$ 和 $348\text{ Ma}\pm 7\text{ Ma}^{[5]}$)。这些数据表明:宽坪群于晚古生代经历了一次显著的变形变质事件,或晚古生代北秦岭存在一次显著的造山事件。

5 结 论

宽坪群中的变铁镁岩块/片形成于晚新元古代被动陆缘裂谷洋盆,是华北陆块南缘大陆裂解作用的产物。这次裂解事件在秦岭造山带构造演化中具有重要意义,它开启了秦岭造山带晚新元古代—早古生代洋盆,为华北陆块南缘和扬子地块北缘晚新元古代—早古生代被动陆缘沉积(震旦系—志留系)提供了可容纳空间。但是,这次大陆裂解事件是否是 Rodinian 大陆裂解作用的响应,仍待进一步探索;与记录于南秦岭勉略混杂带中的古秦岭洋的关系尚须深入研究。

致谢:张宗清和陈高潮在野外工作中给予指导,张玉海、杨之青、唐索寒、王进辉、曹亚平、季建清等在实验过程中给予帮助,牛宝贵对文稿提出了建设性的修改意见,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 金守文. 宽坪群和陶湾群的地层划分及时代问题[J]. 中国地质科技情报, 1976, (1): 1-10.
- [2] 张秋生. 中国东秦岭变质地质[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1980: 1-

222.

- [3] 张维吉, 马志和. 陕西蟒岭马河地区宽坪群多期褶皱变形[J]. 西安地质学院院报, 1988, 10(4): 33-42.
- [4] 张国伟. 秦岭造山带的形成及演化[M]. 西安: 西北大学出版社, 1987: 1-192.
- [5] 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 东秦岭复合山链的形成——变形演化及板块动力学[M]. 北京: 中国环境出版社, 1988: 1-193.
- [6] 张寿广, 万渝生, 刘国惠. 北秦岭宽坪变质地质[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1991: 1-119.
- [7] 丛日祥, 刘国惠. 陕西商洛地区宽坪群变质作用及演化[C]//刘国惠, 张寿广. 秦岭—大巴山论文集(一)变质地质. 北京: 北京科学技术出版社, 1990: 72-88.
- [8] 万渝生, 刘国惠, 丛日祥. 东秦岭商洛地区宽坪群变玄武岩的地球化学特征[C]//刘国惠, 张寿广. 秦岭—大巴山论文集(一)变质地质. 北京: 北京科学技术出版社, 1990: 47-59.
- [9] 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 秦岭造山带主要变质群及其变质演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-190.
- [10] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-191.
- [11] 张宗清, 张旗. 北秦岭晚元古代宽坪蛇绿岩中变基性火山岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 166-177.
- [12] 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-348.
- [13] 陈保瑞, 崔霄峰, 杨俊峰. 宽坪岩群斜长角闪岩 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 河南地质, 1999, 17(4): 278-282.
- [14] 李靠社. 陕西宽坪群变基性火山熔岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 陕西地质, 2002, 20(1): 72-85.
- [15] 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段宽坪岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 79-87.
- [16] 乔秀夫, 张德全, 王雪英, 等. 晋南西阳河群同位素年代研究及其地质意义[J]. 地质学报, 1985, (3): 260-269.
- [17] 肖思云, 张维吉, 宋子季. 北秦岭变质地层(下) [M]. 西安: 西安交通大学出版式社, 1988: 171-228.
- [18] 王荣华. 陕西秦岭群、宽坪群、陶湾群变质岩系地质年代学研究[J]. 秦岭区测, 1987, 29(2): 56-70.
- [19] 贾承造, 郭令智. 东秦岭板块构造[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988: 1-130.
- [20] 董申保. 中国变质作用及其与地壳演化的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1-76.
- [21] 高洪学, 李栓禄, 成学涛. 中元古界宽坪群岩石化学及微量元素特征[J]. 陕西地质, 1989, 7(1): 11-27.
- [22] 刘敦一, 赵敦敏. 用热离子发射质谱计直接测定单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄[J]. 地质论评, 1988, 34(6): 496-505.
- [23] 富云莲, 罗修泉, 张思红, 等. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年法的试验技术与一些地质样品年龄的测定[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1987, 17: 85-107.
- [24] 张二朋, 牛道韞, 霍有光, 等. 秦岭及邻区地质—构造特征概论[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-291.
- [25] 张宗清, 叶笑江. 稀土元素的质谱同位素稀释分析和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的精确测定方法[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1987, 17:

- 108–128.
- [26]刘敦一,简平,张旗,等.内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克浅色岩 SHRIMP U–Pb 测年[J].地质学报,2003,77(3):317–327.
- [27]简平,刘敦一,张旗,等.蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U–Pb 测年[J].地学前缘,2003,10(4):439–456.
- [28]Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/Ex Version3.0, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, (4): 1–70.
- [29]龚俊峰,季建清,桑海清,等.喜马拉雅中段哲古拉花岗岩中高压麻粒岩包体及其主岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J].岩石学报,2006,22(11): 2677–2686.
- [30]Peucat J J, Vidal P, Bernard–Griffiths J. Sr, Nd, Pb isotopic systematics in the Archean low– to high–grade transition zone of southern India: syn–accretion vs. postaccretion granulites[J]. J. Geol., 1988, 97: 537–550.
- [31]Lugmair G W, Marti K. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1978, 39: 3349–3357.
- [32]Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Can. J. Earth Sci., 1971, 8: 523–548.
- [33]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London Spec. Pub., 1989, 42: 315–345.
- [34]Yogodzinski G M, Naumann T R, Smith E I, et al. Evolution of a mafic volcanic field in the central Great Basin, south central Nevada [J]. Journal of Geophysical Research, 1996,101 (B8): 17425–17445.
- [35]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J. Petrol., 1984, 25: 956–983.
- [36]Wood D A. The application of s Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to a establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1980, 50: 11–30.
- [37]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1973, 19: 290–300.
- [38]Pearce J A, Gale G H. Identification of ore–deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks[J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1977, 25: 956–983.
- [39]Saunders A D, Norry M J, Tarbey J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints[J]. J. Petro., Special Lithosphere Issue, 1988: 415–445.
- [40]Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics[J]. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1986, 14: 493–571.
- [41]王涛,张国伟,裴先治,等.北秦岭新元古代北北西向碰撞造山带存在的可能性及两侧陆块汇聚与裂解[J].地质通报,2002,21(8/9): 516–522.
- [42]牛宝贵,和政军,任纪舜,等.秦岭南地区陡岭–小茅岭隆起带西段的几个岩体的 SHRIMP 锆石 U–Pb 测年及其地质意义[J].地质论评, 2006,52(6):826–835.
- [43]薛锋,张国伟.秦岭造山带丹凤群变质岛弧火山岩系的岩石组合与地球化学特征[J].地球化学,1993,22(1):80–92.
- [44]陈笃宗.龙门山地区(中、北段)前震旦系火山岩成矿系列及矿床成因探讨[J].四川地质学报,1995,15(2):113–122.
- [45]Yan Q R, Hanson A D, Wang Z Q, et al. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia reconstruction[J]. International Geology Review, 2004, 46: 817–832.
- [46]周鼎武,张成立,刘良,等.武当地块基性岩墙群 Sm–Nd 定年及相关问题的讨论[J].地球学报,1998,19(1):25–30.
- [47]周鼎武,张成立,刘良,等.秦岭造山带及相邻地块元古代基性岩墙群研究综述及相关问题探讨[J].岩石学报,2000,16(1):22–27.
- [48]邱家骧,李昌年,喻学惠.秦巴碱性岩[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [49]Li J Y. Petrological evidence of continental disintegration in the Late Neoproterozoic: Sinian volcanic rocks in Central China Mainland [J]. Gondwana Research, 2001, 4: 682–683.
- [50]闫全人,王宗起,闫臻,等.秦岭勉略构造混杂带康县–勉县段蛇绿岩块/铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J].地质论评,2007,53(6): 755–764.
- ① 秦岭区测队.1:200000 商南幅地质图及说明书.1961.
- ② 王宗起,等.秦岭造山带结构与造山作用过程.中国地质调查局地质调查项目研究报告,中国地质科学院地质研究所,2006.
- ③ 河南省第三地质队.1:50000 河南省栾川县南部区域地质调查报告.1978.