王万能,张耀堂,李锁明,等. 上扬子西缘晚奥陶世—早志留世重要层位火山活动记录:来自滇东北地区钾质斑脱岩的信息. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):155-178. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230028.
Wang Wanneng, Zhang Yaotang, Li Suoming, et al. Volcanic Activity Records from Late Ordovician to Early Silurian Stratums in the Western Margin of Upper Yangtze: Insights from K-Bentonites in Northeast Yunnan. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2025,55(1):155-178. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230028.

上扬子西缘晚奥陶世—早志留世重要层位火山活动记录——来自滇东北地区钾质斑脱岩的信息

王万能,张耀堂,李锁明,吴 亮,袁永盛
中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心,昆明 650111

摘要:晚奥陶世—早志留世在扬子地块及其周缘沉积了数层钾质斑脱岩,指示了该时期高频次的火山活动,前人对其年代学的研究大都集中在奥陶系—志留系界线处。本次工作对上扬子西缘云南省永善县石门坎剖面进行了岩石地层划分,在洞草沟组、五峰组、龙马溪组一段、龙马溪组二段及新滩组中共识别出11层厚度大于1 cm的钾质斑脱岩。通过对各组界线附近钾质斑脱岩锆石U-Pb测年,分别获得洞草沟组底部界线年龄(449.9±4.3)Ma、五峰组与龙马溪组界线年龄(443.8±1.0)Ma、龙马溪组一段与龙马溪组二段界线年龄(438.5±3.5)Ma和新滩组顶部界线年龄(437.8±5.6)Ma四组年龄。结合锆石微量元素特征,认为晚奥陶世—早志留世斑脱岩来源于华夏陆块与扬子陆块汇聚背景下的俯冲-碰撞造山环境,而第一层斑脱岩岛弧背景也是对华南地区存在残留洋盆的响应,其锆石U-Pb年龄(449.9±4.3)Ma指示广西运动在上扬子西缘最初发生的时间。然而,生物灭绝与高频次的火山活动并无必然的联系。

关键词:上扬子西缘;钾质斑脱岩;锆石U-Pb测年;锆石微量元素;生物大灭绝
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230028 **中图分类号**:P588.1;P533 **文献标志码**:A

Volcanic Activity Records from Late Ordovician to Early Silurian Stratums in the Western Margin of Upper Yangtze: Insights from K-Bentonites in Northeast Yunnan

Wang Wanneng, Zhang Yaotang, Li Suoming, Wu Liang, Yuan Yongsheng
Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Kunming 650111, *China*

Abstract: During Late Ordovician and Early Silurian, multiple layers of K-bentonite were deposited on Yangtze block and surrounding areas, indicating frequent volcanic activity. Previous studies primarily focused on the chronology of the Ordovician-Silurian boundary. This study carried out a

收稿日期:2023-02-15
作者简介:王万能(1995—),男,工程师,主要从事区域地质调查方面的研究,E-mail:1922637474@qq.com
通信作者:吴亮(1985—),男,高级工程师,主要从事区域地质、矿产地质调查方面的研究,E-mail:229471514@163.com
基金项目:中国地质调查局项目(DD20220987)
Supported by the Project of China Geological Survey (DD20220987)

lithostratigraphic division of the Shimenkan section in Yongshan County, Yunnan Province, western edge of Upper Yangtze, dividing it into the Jiancaogou Formation, Wufeng Formation, Longmaxi Formation Ⅰ, Longmaxi Formation Ⅱ and Xintan Formation. Eleven K-bentonite layers, each over 1 cm thick, were identified. Zircon U - Pb dating of K-bentonite at the boundaries of each formation yielded ages of (449.9±4.3) Ma for the base of Jiancaogou Formation, (443.8±1.0) Ma for the Wufeng and Longmaxi boundary, (438.5±3.5) Ma for the Longmaxi Formation Ⅰ and Ⅱ boundary, and (437.8±5.6) Ma for the top of the Xintan Formation. The trace elements characteristics of zircons suggest that Late Ordovician - Early Silurian bentonites originated from a subduction-collision orogenic environment due to the convergence of Cathaysian and Yangtze blocks. Additionally, the first layer of bentonites reflects the presence of residual ocean basins in South China, with its zircon U - Pb age (449.9±4.3) Ma marking the initial time of Guangxi movement on the western margin of Upper Yangtze. However, there is no direct link between high-frequency volcanic activities with mass extinction events.

Key words: western margin of Upper Yangtze; K-bentonite; zircon U - Pb dating; zircon trace elements; mass extinction event

0 引言

钾质斑脱岩被认为是地质历史时期火山喷发产生的凝灰物质在海相碱性环境下经沉积成岩作用及蚀变作用产生的一种富钾质的黏土岩,初始蚀变形成为以蒙脱石为主的斑脱岩,随着成岩作用及变质作用的进一步加强,逐渐转变为以富含伊-蒙混层矿物和伊利石为特征的钾质斑脱岩[1-2]。它不仅能够记录地质历史上的火山活动,也是一种等时性的标志层,在关键地层对比方面起到非常重要的作用。另外由于含有锆石等可以获得绝对同位素年龄的斑晶矿物,因此钾质斑脱岩是获得地层绝对年龄的良好载体,对于地层年代学研究具有重要意义[3]。奥陶纪—志留纪钾质斑脱岩全球广泛分布,在美洲、欧洲及中国华南等地区均有发育,国外对该时期斑脱岩的研究较早,并在年代地层、古大陆再造、地层对比及构造背景分析方面取得了重要进展[4-7]。

古生代中期地层界面是华南地区地质历史时期重要的构造转换界面之一,具有极其重要的构造演化意义。然而在华南地区,该界面的复杂性导致相关地层的深化研究以及综合分析相对薄弱,特别是在界面上覆和下伏地层年代学方面数据的缺乏,制约了对广西运动的精确认识。近年来,随着对华南地区钾质斑脱岩的不断发现及深入研究,其所代表的重要科学价值也越发突出,并且引起广泛关注[1,8-10]。该时期上扬子地区同样沉积了多层斑脱岩,但是根据已知报道[2-10],目前对于斑脱岩年代学方面的研究主要集中在五峰组与龙马溪组界线附近。而且,斑脱岩的来源一直存在争议[2-10]。另外,关于晚奥陶世生物大灭绝方面,虽然研究认为该事件是由气候急剧变化造成的,但气候巨变机理仍不明确[2]。本次工作以云南省永善县石门坎剖面为例,通过野外剖面测量及岩矿鉴定,对上奥陶统至下志留统涧草沟组、五峰组、龙马溪组及新滩组地层中的多层斑脱岩进行锆石 U - Pb 测年,建立上扬子西缘该时期重要地层之间的时间框架,探讨斑脱岩发育的构造环境特征、来源和意义及其与晚奥陶世生物大灭绝的联系。

1 区域地质背景及岩石地层

研究区大地构造位置位于扬子地块西缘,黔中隆起西北方向(图 1a)。地层属于上扬子地层分区之峨眉—昭通地层小区(图 1b),出露新元古代震旦系、古生代及中新生代地层(图 1c)。研究区中上奥陶统宝塔组以浅海碳酸盐相的厚层龟裂纹灰岩为主,上奥陶统涧草沟组(部分地区称之为临湘组)以浅海碳酸盐相的薄层瘤状灰岩为主,上奥陶统五峰组以浅水陆棚相沉积的炭质泥岩、泥质粉砂岩为主。随着早志留世全球气温快速回暖,海平面持续上升,志留系兰多维列统龙马溪组一段出现深水陆棚相沉积的黑色炭质页岩,龙马溪组二段开始沉积;由于受到广西运动持续向北作用力的加剧,扬子海盆靠近黔中古陆的一侧开始率先发生海退,龙马溪组二段转变为泥质粉砂岩与炭质泥岩互层为主的浅水陆棚相沉积。随着海平面的继续变浅,新滩组沉积了一

套灰色泥质粉砂岩。新滩组之上为黄葛溪组，以碳酸盐台地相沉积的瘤状灰岩为主。各组之间无沉积间断，为整合接触关系。

本次工作位于云南省永善县石门坎剖面（图 1a），剖面露头连续，无地层覆盖，出露地层自下而上分别为宝塔组、涧草沟组、五峰组、龙马溪组、新滩组及黄葛溪组（图 2），具体岩性描述如下。

黄葛溪组：灰色薄层瘤状灰岩。

————————整合接触————————

新滩组：

18. 浅灰色厚层状泥质粉砂岩，中下部及顶部各发育一层斑脱岩，厚度 1～3 cm，含少量笔石，获得笔石：*Petalolithus latus* 及 *Pernerograptus* sp.。 66.60 m

————————整合接触————————

龙马溪组二段：

17. 灰黑色薄层状炭质泥岩，笔石化石丰度低。 40.70 m

黑色炭质页岩与灰色薄层状泥质粉砂岩呈互层或夹层，二者比例 1∶1～8∶1，底部发育一层厚 15 cm 斑脱岩。

16. 灰白色斑脱岩，含大量笔石化石，获得笔石：*Coronograptus cyphus*、*Coronograptus* sp.、*Pernerograptus* sp.、*Pseudorthograptus mutabilis* 及 *Pseudorthograptus* sp.。 64.80 m

————————整合接触————————

龙马溪组一段：

15. 黑色炭质页岩，局部发育方解石细脉，含大量笔石化石，获得笔石：*Coronograptus cyphus*、*Coronograptus* sp. 及 *Rickardsograptus yangtzeensis*。 19.20 m

14. 黑色炭质页岩，发育两层斑脱岩，厚度均为 1～2 cm，含大量笔石化石，获得笔石：*acuminatus*、*Avitograpus avitus*、*Normalograptus normalis* 、*Normalograptus angustus* 及 *Normalograptus mirnyensis*。 14.20 m

13. 灰黑色厚层状泥质粉砂岩。 4.40 m

12. 灰黑色厚层状含钙炭泥质粉砂岩，顶部发育一层厚约 14 cm 的浅灰色斑脱岩，斑脱岩中发育黄铁矿及方解石细脉。 2.40 m

11. 灰黑色厚层状炭泥质粉砂岩，发育大量笔石化石。 6.10 m

————————整合接触————————

五峰组：

10. 观音桥层：灰黑色泥质粉砂岩，发育一层厚 2～3 cm 浅灰色斑脱岩，局部被方解石充填，化石单一，采得腕足：*Aegiromena convexa*，属于赫南特贝动物群。 0.12 m

9. 黑色厚层状含钙炭质泥岩。 1.38 m

8. 灰黑色厚层状炭泥质粉砂岩夹一层厚约 1.2 cm 的斑脱岩，方解石脉充填。 2.20 m

7. 灰黑色中薄层状钙质粉砂岩夹灰黑色薄层状泥晶灰岩，比例 5∶1，发育一层 2～3 cm 厚的浅灰色斑脱岩，采得笔石：*Appendispinograptus supernus* 、*Dicellograptus ornatus*、*Paraorthograptus* sp.。 1.80 m

6. 灰黑色炭质页岩，发育方解石条带。 0.70 m

5. 灰黑色中层状含钙炭质泥岩夹灰黑色薄层状粉晶灰岩。 0.70 m

4. 灰黑色薄层状碳泥质粉砂岩，顶部发育一层厚 2～3 cm 的浅灰色斑脱岩。 1.10 m

————————整合接触————————

涧草沟组：

3. 灰黑色中薄层粉晶灰岩与灰黑色薄层状泥灰岩互层，二者比例 2∶1，采得牙形石 *Dapsilodus* sp.。 1.30 m

2. 深灰色薄层瘤状灰岩，该层采得牙形石 *Protopanderodus* sp.。 6.60 m

1. 深灰色中薄层瘤状灰岩，中上部发育一层 2～3 cm 厚的灰绿色斑脱岩，该层采得牙形石 *Dapsilodus* sp.、*Panderodus* sp.。 2.80 m

————————整合接触————————

宝塔组：灰色厚层状龟裂纹灰岩。

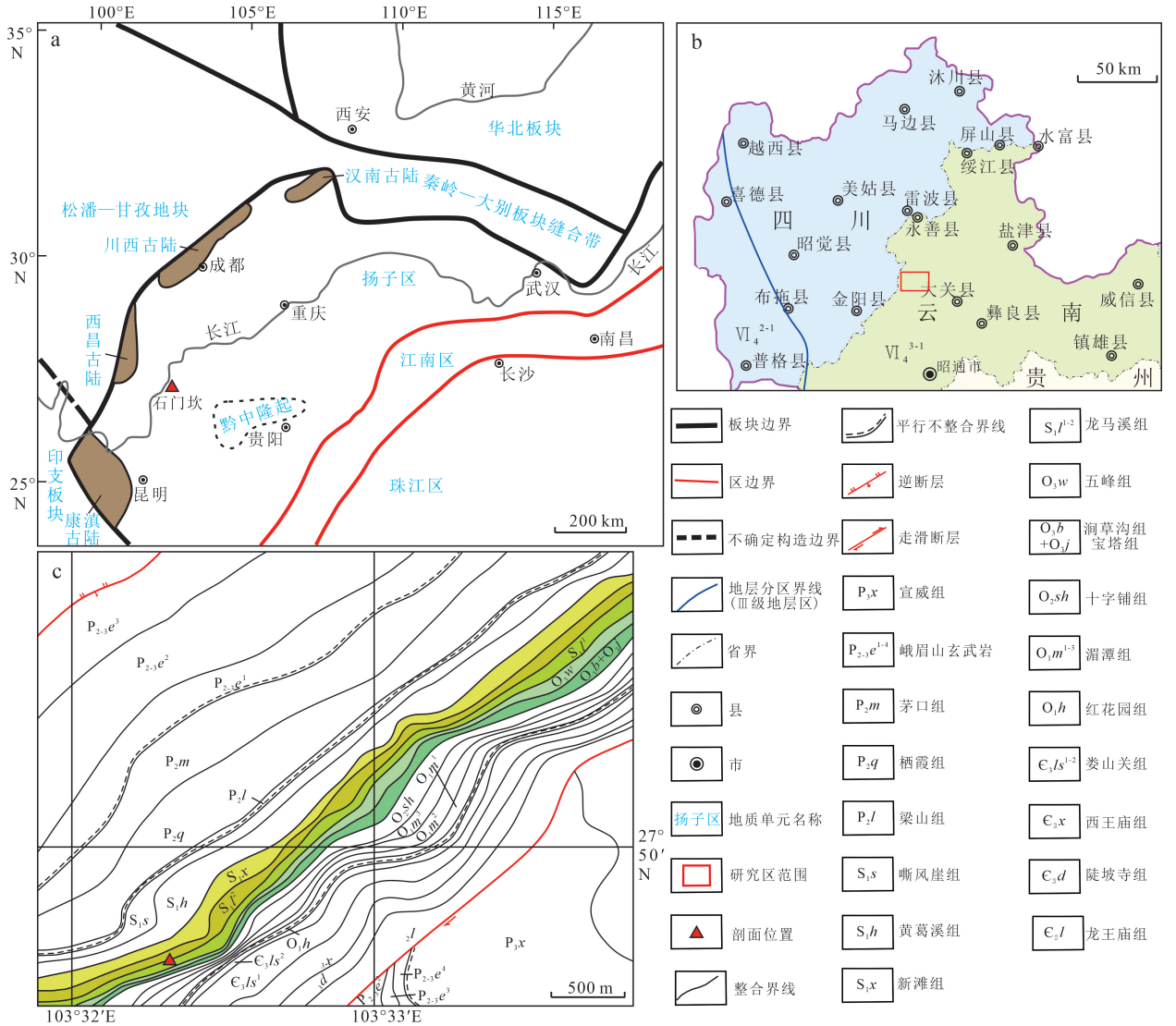
2 测试方法

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局成都地质调查中心实验室完成，激光剥蚀系统为 GeoLasPro 193 nm 激光系统，质谱为高分辨电感耦合等离子体质谱仪 ELEMENT2，实验采用高纯 He 作为剥蚀物质的载气，激光波长为 193 nm、束斑为 32 μm、脉冲频率为 5 Hz、激光能量为 70 mJ，测试前先采用 NIST610 标准调谐仪器调至最佳状态，使得 ^{139}La、^{232}Th 信号达到最强，并使氧化物产率 $^{232}Th^{16}O/^{232}Th$ <0.3%。实验采用锆石标样 GJ-1 作为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算，Plěsovice 锆石标样作为监控盲样来监视测试过程的稳定性；测试时每 5 个样品点插一组标样[11]。数据处理采用软件 ICPMSDataCal[12]。

化石鉴定在中国科学院南京地质古生物研究所完成，X-射线衍射在武汉中地大环境地质研究院有限公司完成，采用仪器为 X 射线衍射仪 TD-3500 (XRD-01)和振动磨 GM-S(MY-01)。

3 钾质斑脱岩特征

通常认为，钾质斑脱岩由黏土矿物和非黏土矿物组成，黏土矿物主要为蒙脱石-伊利石混层矿物或伊利石，非黏土矿物主要为岩浆喷发之前结晶的矿



据文献[8]修改；$Ⅵ_4^{2-1}$：上扬子地层分区之喜德地层小区；$Ⅵ_4^{3-1}$：上扬子地层分区之峨眉—昭通地层小区。

图 1 研究区大地构造简图(a)、位置图(b)和地质图(c)

Fig.1 Tectonic sketch map (a), location map (b) and geological map (c) of the study area

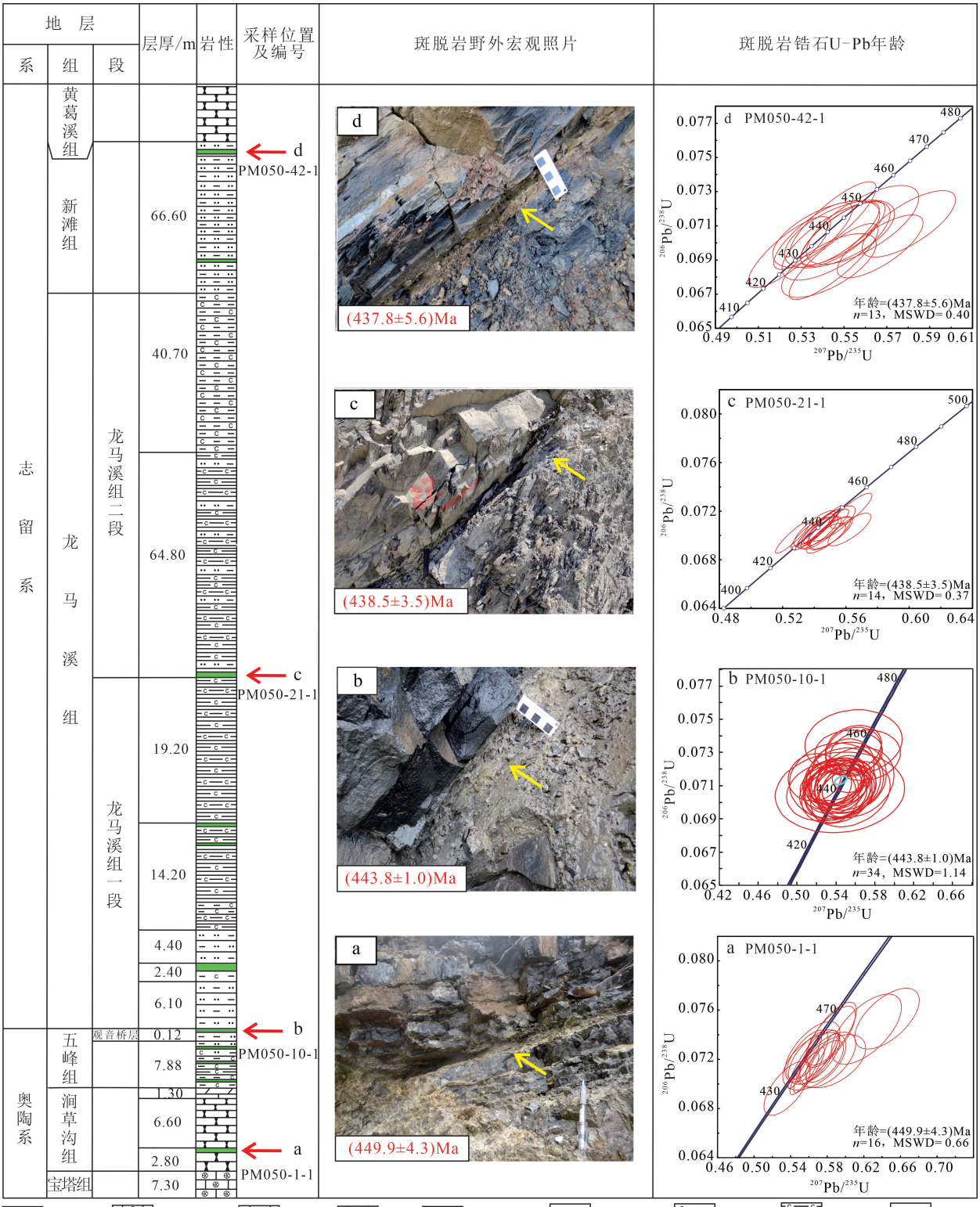
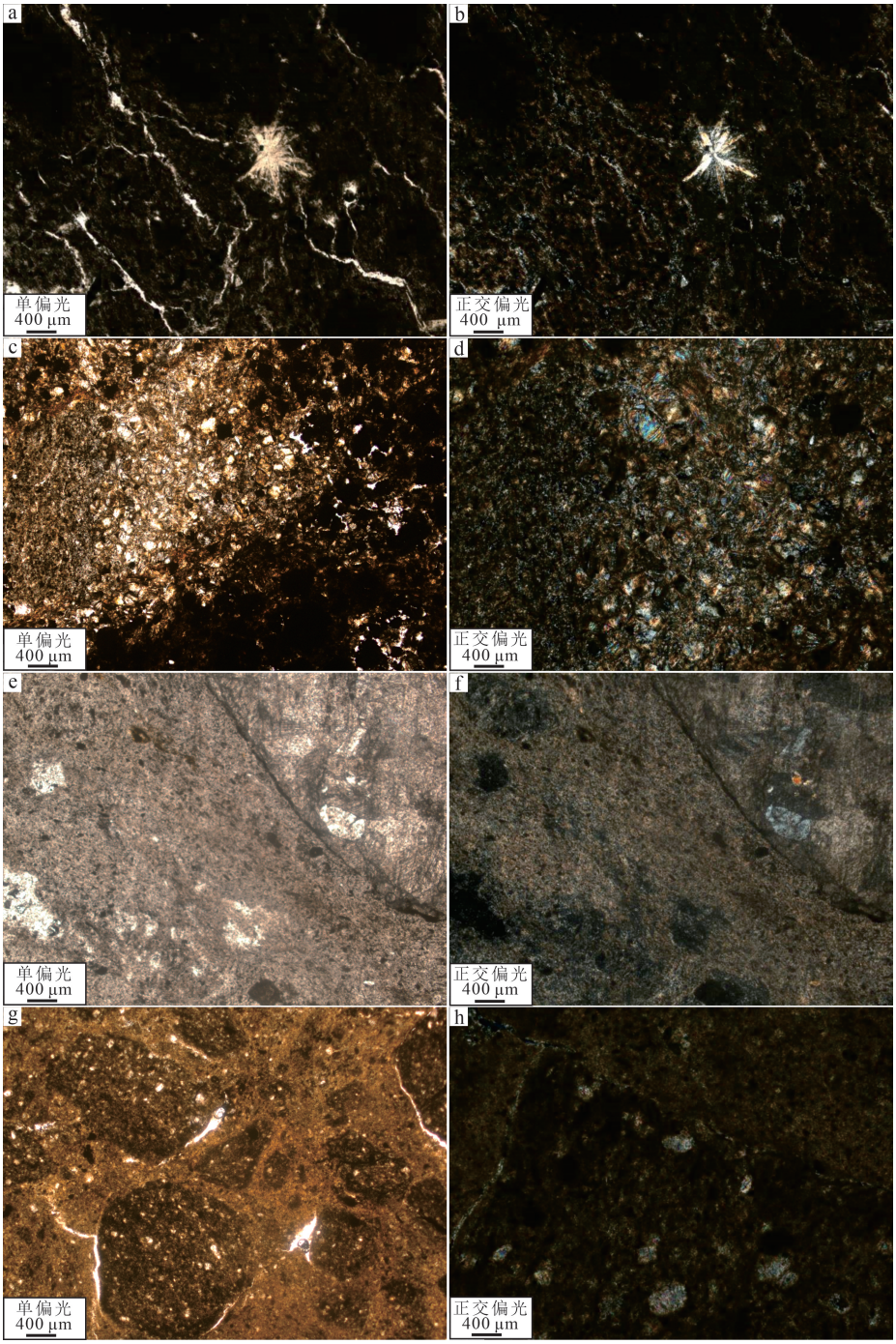


图 2　石门坎剖面综合柱状图

Fig 2　Comprehensive histogram of Shimenkan section

物、晶屑[3]。石门坎剖面厚度>1 cm的钾质斑脱岩共发育11层,新鲜色呈灰、灰绿及灰白色,风化后多呈灰黄色、土黄色,遇水易膨胀,手感光滑细腻。本次锆石U-Pb测年所采4组样品镜下照片如下(图3):样品PM050-1-1(图3a、b)主要由隐晶质和显微鳞片状黏土矿物组成,含少量单晶石英、长石、沸石及重金属矿物;样品PM050-10-1(图3c、d)主要由蒙脱石组成,呈淡黄褐色,显微鳞片状,与少量



a、b. 样品PM050-1-1;c、d. 样品PM050-10-1;e、f. 样品PM050-21-1;g、h. 样品PM050-42-1。

图3 钾质斑脱岩镜下照片

Fig 3 Microscopic photos of K-bentonites

高岭石混杂分布，其次为少量黄铁矿、长石、石英及微量白云母等；样品 PM050－21－1(图 3e、f)主要由隐晶质和显微鳞片状黏土矿物组成，含少量方解石、斜长石和铁泥质；样品 PM050－42－1(图 3g、h)主要由蒙脱石组成，显微鳞片状，少量水白云母、单晶石英和黄铁矿。

PM050－1－1 和 PM050－21－1 样品经提纯后，X－射线图谱(图 4)显示钾质斑脱岩主要成分为黏土矿物伊利石，质量分数为 70%～90%，其次为少量黄铁矿、长石、石英及方解石等非黏土矿物。

综合上述特征，4 件样品属于钾质斑脱岩。

4　锆石 U－Pb 年龄及形态特征

本次工作锆石测年共采集 4 层钾质斑脱岩，层位分别位于涧草沟组底部(PM050－1－1)、奥陶系与志留系界线处(PM050-10-1)、龙马溪组二段底

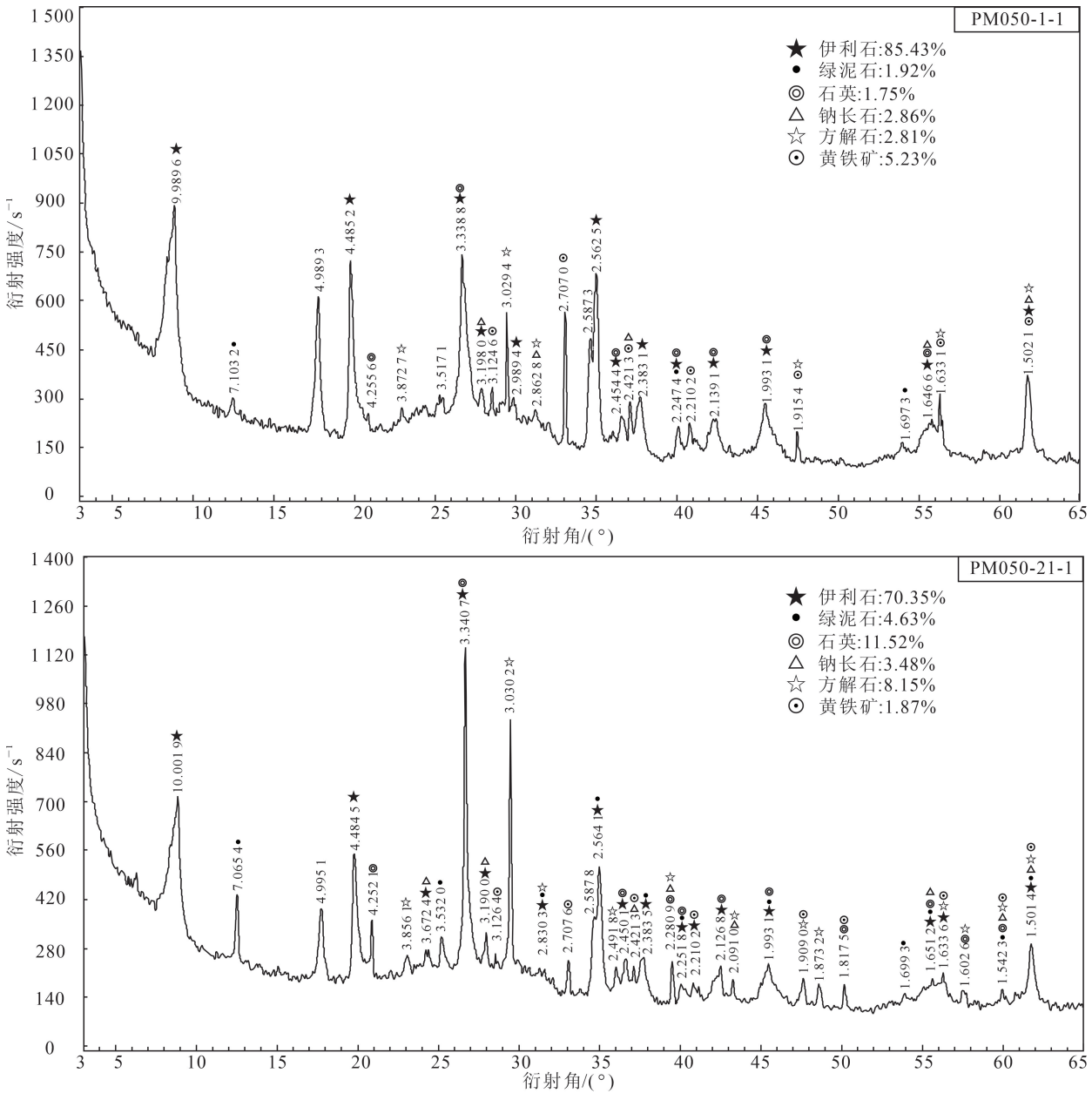


图 4　钾质斑脱岩 X－射线衍射图谱

Fig 4　X-ray diffraction pattern of K-bentonites

部(PM050-21-1)及新滩组顶部(PM050-42-1),锆石绝大多数为自形晶,具有典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构(图5),属于岩浆锆石,锆石Th/U值绝大多数集中在0.4～2.0之间,且具有很好的相关性,显示为岩浆锆石特征。通过测年结果(表1),分别获得锆石U-Pb年龄为(449.9±4.3)Ma(图2a)、(443.8±1.0)Ma(图2b)、(438.5±3.5)Ma(图2c)和(437.8±5.6)Ma(图2d)。

5 讨论

5.1 年代学意义

地层中沉积的钾质斑脱岩作为一种等时性标志层,不仅记录了地质历史时期的火山活动,而且其中所包含的锆石等斑晶矿物可以提供多种年龄信息,是获得地层绝对年龄的良好载体。前人对于奥陶系—志留系界线附近的钾质斑脱岩年代学方面已经做过大量的研究。谢尚克等[13]在湖南桃源郝坪剖面五峰组顶部斑脱岩中获得的年龄为(442.8±8.1)Ma、熊国庆等[14]在扬子北缘大巴山西段龙马溪组底部和南大巴山东段五峰组顶部斑脱岩中分别获得的年龄为(445.1±3.5)Ma和(447.9±2.9)Ma、叶飞等[15]在扬子东南缘思南地区五峰组顶部斑脱岩中获得的年龄为(449.0±11.0)Ma、Ling等[16]在上扬子西缘万和剖面奥陶系—志留系界线处斑脱岩中获得的年龄为(442.7±0.2)Ma,显然这些年龄数据极大地丰富了扬子地区奥陶系—志留系界线附近斑脱岩的年代学意义。苏文博等[17]认为不同地区的斑脱岩层几乎可以一一对应,但上述多层斑脱岩由于发育的层位不同,无法一一对应,在年代学的对比上存在一定的局限性。而本次工作在石门坎剖面观音桥层顶部(即赫南特阶顶部)斑脱岩发育的层位便具有很好的代表性及对比意义,从中所获得的锆石谐和年龄

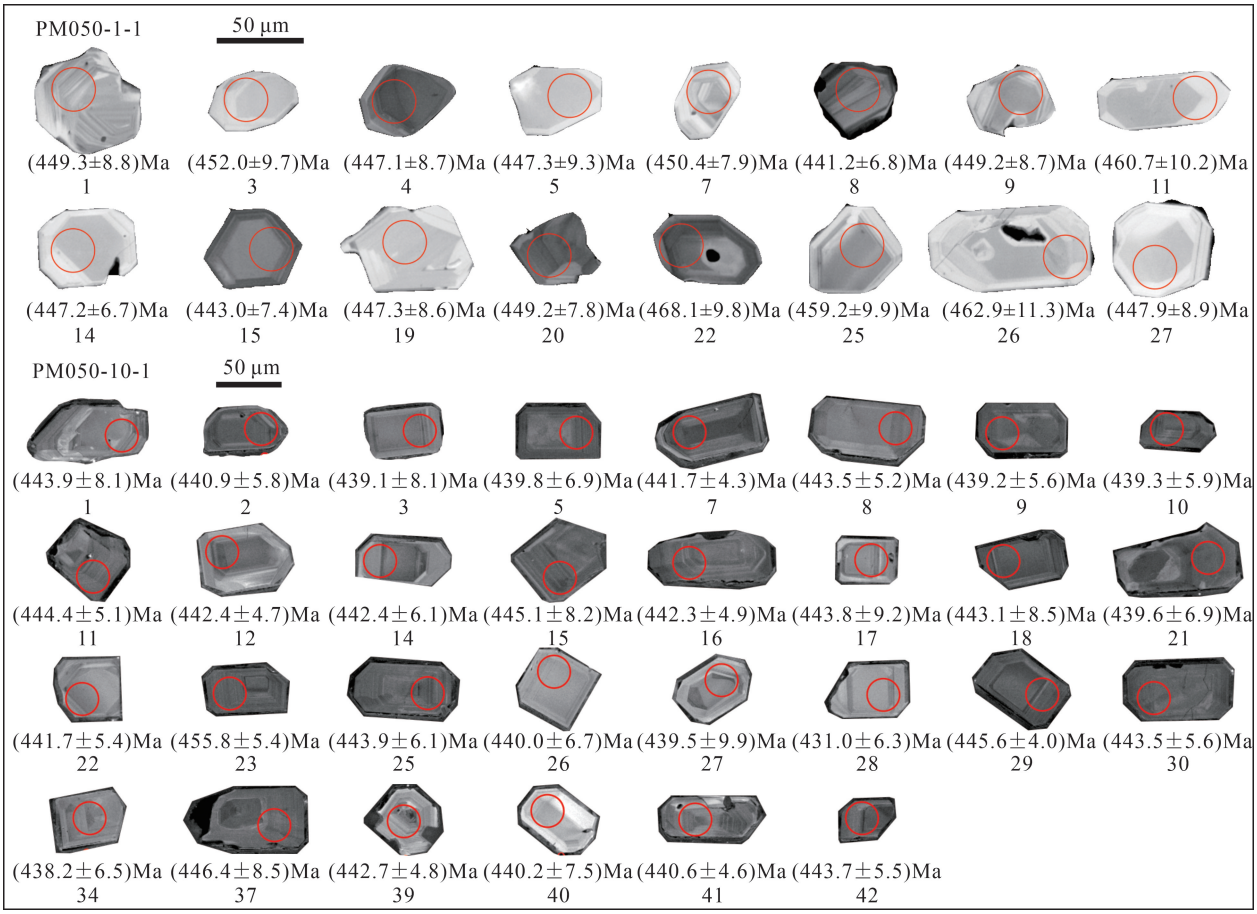


图5 钾质斑脱岩典型样品锆石阴极发光图像及年龄

Fig 5 Zircon cathodoluminescence images and ages of the K-bentonites typical sample

表 1　钾质斑脱岩样品 LA－ICP－MS 锆石 U－Pb 同位素测试结果

Table 1　LA－ICP－MS zircon U－Pb isotopic test results of K-bentonite samples

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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	%
PM050－1－1RZ－1	92.2	124.0	1.3	0.057 0	0.001 7	0.565 8	0.018 5	0.072 2	0.001 5	500.0	66.7	455.3	12.0	449.3	8.8	98
PM050－1－1RZ－2	313.0	145.0	0.5	0.064 8	0.001 5	0.626 2	0.016 5	0.069 8	0.001 0	768.5	50.0	493.8	10.3	435.0	5.8	87
PM050－1－1RZ－3	44.9	69.9	1.6	0.056 7	0.001 9	0.563 7	0.019 8	0.072 6	0.001 6	479.7	43.5	454.0	12.9	452.0	9.7	99
PM050－1－1RZ－4	595.0	334.0	0.6	0.055 9	0.000 7	0.555 6	0.012 1	0.071 8	0.001 4	450.0	27.8	448.7	7.9	447.1	8.7	99
PM050－1－1RZ－5	39.5	65.4	1.7	0.057 2	0.002 1	0.565 9	0.022 7	0.071 8	0.001 5	498.2	86.1	455.4	14.7	447.3	9.3	98
PM050－1－1RZ－6	142.0	128.0	0.9	0.078 4	0.007 1	0.972 8	0.125 0	0.081 9	0.002 1	1 166.7	181.5	689.9	64.4	507.3	12.5	69
PM050－1－1RZ－7	108.0	192.0	1.8	0.055 9	0.001 4	0.558 2	0.015 0	0.072 4	0.001 3	450.0	53.7	450.4	9.8	450.4	7.9	99
PM050－1－1RZ－8	327.0	123.0	0.4	0.056 7	0.000 9	0.555 0	0.010 5	0.070 8	0.001 1	479.7	33.3	448.3	6.8	441.2	6.8	98
PM050－1－1RZ－9	134.0	298.0	2.2	0.057 3	0.001 3	0.569 5	0.015 1	0.072 2	0.001 4	501.9	50.0	457.7	9.8	449.2	8.7	98
PM050－1－1RZ－10	55.7	104.0	1.9	0.066 7	0.002 5	0.651 1	0.023 2	0.071 1	0.001 2	827.8	76.7	509.2	14.3	443.0	7.2	86
PM050－1－1RZ－11	65.9	94.5	1.4	0.057 6	0.001 6	0.584 8	0.017 9	0.074 1	0.001 7	516.7	63.0	467.5	11.5	460.7	10.2	98
PM050－1－1RZ－12	107.0	192.0	1.8	0.060 8	0.001 6	0.559 6	0.015 4	0.066 8	0.001 2	631.5	55.5	451.2	10.0	416.8	7.0	92
PM050－1－1RZ－13	94.1	210.0	2.2	0.059 4	0.001 8	0.549 8	0.020 0	0.066 6	0.001 1	588.9	66.7	444.9	13.1	415.6	6.9	93
PM050－1－1RZ－14	131.0	338.0	2.6	0.058 3	0.001 3	0.577 0	0.013 7	0.071 8	0.001 1	542.6	43.5	462.5	8.9	447.2	6.7	96
PM050－1－1RZ－15	428.0	191.0	0.4	0.057 1	0.001 0	0.560 1	0.011 2	0.071 1	0.001 2	498.2	35.2	451.6	7.3	443.0	7.4	98
PM050－1－1RZ－16	114.0	160.0	1.4	0.056 4	0.001 3	0.539 6	0.014 2	0.069 3	0.001 2	477.8	50.0	438.2	9.4	432.0	7.5	98
PM050－1－1RZ－17	179.0	408.0	2.3	0.058 4	0.001 3	0.558 7	0.014 3	0.069 6	0.001 4	542.6	48.1	450.7	9.3	433.5	8.7	96
PM050－1－1RZ－18	46.7	74.0	1.6	0.053 2	0.002 4	0.505 7	0.019 6	0.070 0	0.001 3	338.9	101.8	415.6	13.2	436.4	8.1	95
PM050－1－1RZ－19	49.5	81.8	1.7	0.059 2	0.002 2	0.586 1	0.023 7	0.071 9	0.001 4	576.0	76.8	468.4	15.2	447.3	8.6	95
PM050－1－1RZ－20	534.0	310.0	0.6	0.057 6	0.000 7	0.574 1	0.011 4	0.072 2	0.001 3	516.7	21.3	460.7	7.4	449.2	7.8	97
PM050－1－1RZ－21	85.0	137.0	1.6	0.060 5	0.002 1	0.553 8	0.019 2	0.066 7	0.001 2	621.9	74.1	447.5	12.6	416.5	7.3	92
PM050－1－1RZ－22	347.0	156.0	0.5	0.061 3	0.001 2	0.645 3	0.023 3	0.075 3	0.001 6	650.0	47.2	505.6	14.4	468.1	9.8	92
PM050－1－1RZ－23	48.7	80.2	1.6	0.058 6	0.001 8	0.563 7	0.018 8	0.070 3	0.001 6	553.7	64.8	453.9	12.2	438.2	9.4	96
PM050－1－1RZ－24	73.1	152.0	2.1	0.059 2	0.001 7	0.567 3	0.016 7	0.070 0	0.001 2	576.0	64.8	456.3	10.8	436.2	7.5	95
PM050－1－1RZ－25	124.0	261.0	2.1	0.057 5	0.001 4	0.583 4	0.018 1	0.073 8	0.001 6	509.3	55.6	466.7	11.6	459.2	9.9	98
PM050－1－1RZ－26	47.9	82.6	1.7	0.061 3	0.002 2	0.622 8	0.025 3	0.074 5	0.001 9	650.0	77.8	491.6	15.8	462.9	11.3	93
PM050－1－1RZ－27	72.1	125.0	1.7	0.059 0	0.002 0	0.580 1	0.020 5	0.072 0	0.001 5	564.9	69.4	464.5	13.2	447.9	8.9	96
PM050－1－1RZ－28	168.0	453.0	2.7	0.061 3	0.001 2	0.565 1	0.015 0	0.066 7	0.001 1	650.0	47.2	454.9	9.7	416.4	7.0	91

续表1

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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	
PM050-1-1RZ-29	127.0	299.0	2.4	0.130 6	0.011 0	1.094 4	0.100 9	0.059 3	0.001 2	2 106.5	148.1	750.6	48.9	371.7	7.0	32
PM050-1-1RZ-30	96.9	138.0	1.4	0.056 8	0.002 0	0.536 1	0.016 7	0.069 6	0.001 5	483.4	50.0	435.8	11.0	434.0	8.8	99
PM050-10-1RZ-1	301.0	279.0	0.9	0.055 6	0.002 9	0.548 0	0.027 0	0.071 3	0.001 3	390.0	110.0	442.0	18.0	443.9	8.1	100
PM050-10-1RZ-2	627.0	529.0	0.8	0.055 6	0.002 2	0.539 0	0.021 0	0.070 8	0.001 0	408.0	87.0	437.0	14.0	440.9	5.8	99
PM050-10-1RZ-3	323.3	446.0	1.4	0.057 2	0.002 7	0.555 0	0.027 0	0.070 5	0.001 3	470.0	100.0	447.0	18.0	439.1	8.1	98
PM050-10-1RZ-4	308.9	221.7	0.7	0.056 8	0.003 5	0.526 0	0.032 0	0.067 6	0.001 0	430.0	140.0	427.0	21.0	421.4	6.1	99
PM050-10-1RZ-5	457.0	285.5	0.6	0.055 4	0.002 2	0.535 0	0.019 0	0.070 6	0.001 2	396.0	88.0	434.0	12.0	439.8	6.9	99
PM050-10-1RZ-6	296.7	179.4	0.6	0.059 6	0.001 7	0.712 0	0.020 0	0.086 3	0.000 8	545.0	61.0	544.0	12.0	533.7	4.8	98
PM050-10-1RZ-7	887.0	658.0	0.7	0.055 4	0.001 0	0.541 0	0.010 0	0.070 9	0.000 7	413.0	40.0	438.8	6.7	441.7	4.3	99
PM050-10-1RZ-8	270.1	183.4	0.7	0.054 7	0.001 8	0.542 0	0.018 0	0.071 2	0.000 9	382.0	70.0	439.0	12.0	443.5	5.2	99
PM050-10-1RZ-9	493.0	411.0	0.8	0.056 2	0.001 8	0.548 0	0.018 0	0.070 5	0.000 9	434.0	70.0	443.0	12.0	439.2	5.6	99
PM050-10-1RZ-10	558.0	406.6	0.7	0.056 9	0.001 9	0.551 0	0.019 0	0.070 5	0.001 0	461.0	75.0	445.0	12.0	439.3	5.9	99
PM050-10-1RZ-11	540.0	338.8	0.6	0.054 6	0.002 1	0.539 0	0.022 0	0.071 4	0.000 9	364.0	86.0	436.0	14.0	444.4	5.1	98
PM050-10-1RZ-12	467.0	638.0	1.4	0.055 0	0.002 0	0.539 0	0.020 0	0.071 1	0.000 8	383.0	83.0	439.0	13.0	442.4	4.7	99
PM050-10-1RZ-13	294.2	73.4	0.2	0.061 5	0.001 4	0.952 0	0.021 0	0.113 0	0.001 4	635.0	47.0	677.0	11.0	690.3	8.2	98
PM050-10-1RZ-14	446.0	573.0	1.3	0.056 6	0.002 0	0.551 0	0.020 0	0.071 0	0.001 0	448.0	78.0	444.0	13.0	442.4	6.1	100
PM050-10-1RZ-15	365.0	206.2	0.6	0.056 4	0.002 9	0.551 0	0.027 0	0.071 5	0.001 4	430.0	120.0	444.0	18.0	445.1	8.2	100
PM050-10-1RZ-16	437.0	281.8	0.6	0.056 1	0.001 6	0.550 0	0.016 0	0.071 0	0.000 8	432.0	62.0	444.0	10.0	442.3	4.9	100
PM050-10-1RZ-17	314.9	446.0	1.4	0.055 1	0.003 2	0.539 0	0.031 0	0.071 3	0.001 5	370.0	130.0	435.0	20.0	443.8	9.2	98
PM050-10-1RZ-18	378.0	191.5	0.5	0.057 0	0.002 8	0.559 0	0.027 0	0.071 2	0.001 4	460.0	100.0	450.0	17.0	443.1	8.5	98
PM050-10-1RZ-19	209.6	137.5	0.7	0.055 1	0.003 5	0.558 0	0.033 0	0.073 6	0.001 3	380.0	140.0	448.0	21.0	457.9	7.6	98
PM050-10-1RZ-20	760.0	845.0	1.1	0.055 2	0.001 2	0.525 0	0.012 0	0.069 0	0.0008	404.0	50.0	427.9	7.7	430.1	4.6	99
PM050-10-1RZ-21	511.5	253.8	0.5	0.056 0	0.002 3	0.540 0	0.021 0	0.070 6	0.001 1	421.0	89.0	437.0	14.0	439.6	6.9	99
PM050-10-1RZ-22	250.1	197.4	0.8	0.054 8	0.002 2	0.535 0	0.021 0	0.070 9	0.000 9	368.0	84.0	435.0	14.0	441.7	5.4	98
PM050-10-1RZ-23	469.9	315.7	0.7	0.055 5	0.001 9	0.558 0	0.019 0	0.073 3	0.000 9	400.0	74.0	449.0	12.0	455.8	5.4	98
PM050-10-1RZ-24	358.0	237.0	0.7	0.056 6	0.002 3	0.620 0	0.024 0	0.079 7	0.001 2	438.0	87.0	488.0	15.0	494.2	7.1	99
PM050-10-1RZ-25	639.0	484.0	0.8	0.055 4	0.001 7	0.544 0	0.017 0	0.071 3	0.001 0	407.0	70.0	440.0	11.0	443.9	6.1	99
PM050-10-1RZ-26	198.8	222.4	1.1	0.055 9	0.002 6	0.542 0	0.026 0	0.070 7	0.001 1	387.0	99.0	436.0	17.0	440.0	6.7	99
PM050-10-1RZ-27	163.6	168.9	1.0	0.055 6	0.004 5	0.544 0	0.044 0	0.070 6	0.001 6	380.0	180.0	436.0	29.0	439.5	9.9	99

续表 1

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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	
PM050－10－1RZ－28	253.8	434.0	1.7	0.055 2	0.002 7	0.524 0	0.026 0	0.069 2	0.001 1	370.0	100.0	425.0	17.0	431.0	6.3	99
PM050－10－1RZ－29	468.0	272.0	0.6	0.056 5	0.001 4	0.556 0	0.013 0	0.071 6	0.000 7	445.0	54.0	449.2	8.7	445.6	4.0	99
PM050－10－1RZ－30	549.0	364.8	0.7	0.054 7	0.002 1	0.539 0	0.020 0	0.071 2	0.000 9	373.0	85.0	436.0	13.0	443.5	5.6	98
PM050－10－1RZ－31	292.0	376.0	1.3	0.054 0	0.003 0	0.512 0	0.029 0	0.068 7	0.001 4	340.0	120.0	418.0	19.0	428.1	8.4	98
PM050－10－1RZ－32	432.1	223.0	0.5	0.071 6	0.001 2	1.621 0	0.027 0	0.164 0	0.001 6	968.0	33.0	979.0	11.0	978.8	8.9	100
PM050－10－1RZ－33	192.4	113.4	0.6	0.056 7	0.002 6	0.570 0	0.024 0	0.072 8	0.001 0	422.0	98.0	455.0	16.0	453.1	6.1	100
PM050－10－1RZ－34	268.8	188.2	0.7	0.055 4	0.002 4	0.541 0	0.024 0	0.070 4	0.001 1	412.0	98.0	440.0	17.0	438.2	6.5	100
PM050－10－1RZ－35	310.7	209.5	0.7	0.055 2	0.001 9	0.558 0	0.019 0	0.073 0	0.001 0	388.0	76.0	449.0	12.0	454.4	5.9	99
PM050－10－1RZ－36	547.0	363.0	0.7	0.052 5	0.001 9	0.518 0	0.018 0	0.071 5	0.000 9	288.0	79.0	423.0	12.0	445.2	5.7	95
PM050－10－1RZ－37	409.7	237.3	0.6	0.054 9	0.002 2	0.546 0	0.022 0	0.071 7	0.001 4	385.0	90.0	442.0	14.0	446.4	8.5	99
PM050－10－1RZ－38	153.7	147.6	1.0	0.054 6	0.002 3	0.553 0	0.023 0	0.073 0	0.000 9	341.0	89.0	443.0	15.0	454.2	5.2	98
PM050－10－1RZ－39	239.8	266.0	1.1	0.055 2	0.001 9	0.539 0	0.018 0	0.071 1	0.000 8	371.0	75.0	437.0	12.0	442.7	4.8	99
PM050－10－1RZ－40	174.2	174.8	1.0	0.053 8	0.002 6	0.533 0	0.029 0	0.070 7	0.001 2	350.0	110.0	432.0	19.0	440.2	7.5	98
PM050－10－1RZ－41	446.0	326.0	0.7	0.055 2	0.001 6	0.539 0	0.014 0	0.070 7	0.000 8	392.0	61.0	436.7	9.3	440.6	4.6	99
PM050－10－1RZ－42	582.0	397.0	0.7	0.055 0	0.001 8	0.540 0	0.018 0	0.071 3	0.000 9	409.0	78.0	441.0	13.0	443.7	5.5	99
PM050－21－1RZ－1	395.0	227.0	0.6	0.056 1	0.000 6	0.533 2	0.008 0	0.069 0	0.000 9	457.5	24.1	433.9	5.3	430.0	5.6	99
PM050－21－1RZ－2	378.0	218.0	0.6	0.055 3	0.000 6	0.529 9	0.008 1	0.069 7	0.001 0	433.4	28.7	431.7	5.4	434.2	6.3	99
PM050－21－1RZ－3	311.0	183.0	0.6	0.054 7	0.000 6	0.526 5	0.007 3	0.069 9	0.000 9	466.7	28.7	429.5	4.9	435.4	5.3	98
PM050－21－1RZ－4	441.0	374.0	0.8	0.056 5	0.001 0	0.538 4	0.008 7	0.069 3	0.000 8	477.8	38.9	437.4	5.7	432.0	4.9	98
PM050－21－1RZ－5	265.0	151.0	0.6	0.056 4	0.000 7	0.548 6	0.008 7	0.070 7	0.001 0	477.8	27.8	444.1	5.7	440.1	6.0	99
PM050－21－1RZ－6	250.0	138.0	0.6	0.056 6	0.000 7	0.571 6	0.010 4	0.073 2	0.001 1	476.0	25.9	459.0	6.7	455.2	6.5	99
PM050－21－1RZ－7	137.0	63.6	0.5	0.075 1	0.004 8	0.796 2	0.062 4	0.075 0	0.001 1	1 072.2	128.2	594.7	35.3	465.9	6.9	75
PM050－21－1RZ－8	470.0	318.0	0.7	0.055 9	0.000 5	0.529 0	0.007 3	0.068 6	0.000 8	455.6	25.0	431.2	4.9	428.0	5.0	99
PM050－21－1RZ－9	302.0	196.0	0.6	0.056 0	0.000 7	0.542 4	0.008 5	0.070 3	0.000 9	453.8	23.1	440.0	5.6	437.7	5.4	99
PM050－21－1RZ－10	433.0	245.0	0.6	0.056 2	0.000 6	0.551 3	0.009 7	0.071 0	0.001 0	461.2	24.1	445.8	6.4	442.1	5.8	99
PM050－21－1RZ－11	665.0	549.0	0.8	0.055 9	0.000 6	0.468 1	0.008 3	0.060 9	0.001 1	450.0	19.4	389.9	5.7	381.0	6.8	97
PM050－21－1RZ－12	460.0	384.0	0.8	0.057 0	0.000 6	0.545 4	0.007 2	0.069 5	0.000 8	500.0	25.9	442.0	4.8	433.3	5.0	98
PM050－21－1RZ－13	475.0	383.0	0.8	0.070 5	0.002 5	0.753 7	0.040 2	0.075 1	0.001 5	942.6	69.4	570.3	23.3	467.0	8.8	80
PM050－21－1RZ－14	376.0	272.0	0.7	0.055 5	0.000 6	0.540 1	0.008 7	0.070 6	0.000 9	431.5	22.2	438.5	5.7	439.8	5.7	99

续表1

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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	
PM050-21-1RZ-15	406.0	251.0	0.6	0.055 8	0.000 6	0.540 7	0.007 7	0.070 4	0.000 9	442.6	22.2	438.9	5.1	438.6	5.5	99
PM050-21-1RZ-16	540.0	404.0	0.7	0.055 8	0.000 5	0.545 4	0.008 1	0.070 9	0.001 0	455.6	22.2	442.0	5.3	441.7	6.1	99
PM050-21-1RZ-17	400.0	280.0	0.7	0.056 8	0.000 6	0.548 3	0.007 7	0.069 9	0.000 7	487.1	24.1	443.9	5.0	435.7	4.4	98
PM050-21-1RZ-18	525.0	547.0	1.0	0.056 1	0.000 6	0.563 2	0.008 4	0.072 9	0.000 9	453.8	24.1	453.6	5.5	453.3	5.5	99
PM050-21-1RZ-19	363.0	262.0	0.7	0.055 6	0.000 6	0.537 5	0.008 0	0.070 1	0.000 9	435.2	24.1	436.8	5.3	437.0	5.3	99
PM050-21-1RZ-20	228.0	115.0	0.5	0.068 7	0.002 5	0.743 1	0.038 6	0.076 2	0.001 4	900.0	74.5	564.2	22.5	473.5	8.1	82
PM050-21-1RZ-21	393.0	226.0	0.6	0.056 9	0.000 7	0.546 3	0.009 4	0.069 7	0.001 0	487.1	30.6	442.6	6.2	434.2	5.8	98
PM050-21-1RZ-22	526.0	443.0	0.8	0.056 5	0.000 6	0.535 8	0.007 3	0.068 8	0.000 8	472.3	19.4	435.7	4.9	429.0	4.5	98
PM050-21-1RZ-23	468.0	274.0	0.6	0.056 7	0.000 6	0.543 6	0.009 0	0.069 4	0.000 9	483.4	24.1	440.8	5.9	432.6	5.4	98
PM050-21-1RZ-24	319.0	213.0	0.7	0.056 3	0.000 7	0.544 4	0.008 5	0.070 2	0.000 9	464.9	32.4	441.3	5.6	437.4	5.3	99
PM050-21-1RZ-25	333.0	283.0	0.9	0.056 0	0.000 6	0.494 2	0.008 1	0.064 0	0.000 9	453.8	22.2	407.7	5.5	399.6	5.2	97
PM050-21-1RZ-26	350.0	212.0	0.6	0.057 2	0.000 7	0.543 3	0.008 1	0.069 0	0.000 9	501.9	25.9	440.6	5.3	430.0	5.5	97
PM050-21-1RZ-27	318.0	135.0	0.4	0.063 7	0.000 7	0.832 3	0.025 9	0.094 0	0.002 4	731.5	24.1	614.9	14.4	579.1	14.4	94
PM050-21-1RZ-28	507.0	327.0	0.6	0.056 1	0.000 5	0.535 6	0.008 5	0.069 2	0.001 0	457.5	22.2	435.5	5.7	431.5	6.0	99
PM050-21-1RZ-29	342.0	241.0	0.7	0.057 9	0.000 7	0.562 3	0.009 0	0.070 5	0.000 9	524.1	25.9	453.0	5.8	439.1	5.3	96
PM050-21-1RZ-30	386.0	305.0	0.8	0.056 4	0.000 6	0.510 6	0.007 5	0.065 6	0.000 7	477.8	25.9	418.9	5.0	409.6	4.0	97
PM050-21-1RZ-31	300.0	94.7	0.3	0.065 4	0.000 6	1.004 3	0.024 9	0.110 9	0.002 4	787.0	20.4	706.0	12.6	678.0	13.8	95
PM050-21-1RZ-32	343.0	319.0	0.9	0.056 9	0.000 7	0.549 1	0.009 2	0.070 0	0.001 0	487.1	30.6	444.4	6.1	436.4	5.9	98
PM050-21-1RZ-33	430.0	234.0	0.5	0.056 8	0.000 5	0.550 9	0.008 8	0.070 2	0.000 9	483.4	22.2	445.6	5.8	437.6	5.3	98
PM050-21-1RZ-34	365.0	269.0	0.7	0.058 2	0.000 7	0.554 1	0.009 8	0.069 0	0.000 9	538.9	19.4	447.7	6.4	429.9	5.6	95
PM050-21-1RZ-35	355.0	244.0	0.7	0.056 6	0.000 6	0.538 2	0.008 4	0.069 0	0.001 0	476.0	24.1	437.2	5.6	430.0	5.8	98
PM050-21-1RZ-36	306.0	178.0	0.6	0.056 8	0.000 6	0.563 4	0.008 6	0.072 0	0.001 0	483.4	25.9	453.8	5.6	448.4	5.7	98
PM050-21-1RZ-37	372.0	219.0	0.6	0.056 3	0.000 6	0.539 9	0.007 6	0.069 6	0.000 8	464.9	24.1	438.3	5.0	433.6	4.9	98
PM050-21-1RZ-38	415.0	290.0	0.7	0.056 4	0.000 5	0.535 3	0.007 8	0.068 7	0.000 9	477.8	18.5	435.3	5.2	428.5	5.3	98
PM050-21-1RZ-39	247.0	145.0	0.6	0.072 9	0.002 0	0.775 9	0.031 8	0.075 4	0.001 3	1 013.0	56.3	583.1	18.2	468.5	8.0	78
PM050-21-1RZ-40	296.0	147.0	0.5	0.055 9	0.000 7	0.543 7	0.007 9	0.070 7	0.000 9	450.0	27.8	440.8	5.2	440.3	5.6	99
PM050-42-1RZ-1	357.0	259.0	0.7	0.057 3	0.001 0	0.532 5	0.012 1	0.067 4	0.001 1	501.9	38.9	433.5	8.0	420.4	6.6	96
PM050-42-1RZ-2	110.0	74.4	0.7	0.055 8	0.001 5	0.556 8	0.018 2	0.072 4	0.001 5	455.6	61.1	449.5	11.8	450.8	8.9	99
PM050-42-1RZ-3	113.0	75.2	0.7	0.057 7	0.001 6	0.543 0	0.014 6	0.068 7	0.001 2	520.4	59.3	440.4	9.6	428.2	7.4	97

续表 1

样品编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	U	Th		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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	
PM050－42－1RZ－4	91.0	59.3	0.7	0.052 1	0.001 4	0.536 5	0.016 3	0.075 0	0.001 7	300.1	61.1	436.1	10.8	466.4	9.9	93
PM050－42－1RZ－5	163.0	130.0	0.8	0.059 2	0.001 3	0.580 3	0.014 4	0.071 1	0.001 3	576.0	48.1	464.6	9.3	442.9	7.7	95
PM050－42－1RZ－6	133.0	81.2	0.6	0.066 9	0.001 6	0.643 4	0.021 3	0.069 4	0.001 4	835.2	51.1	504.4	13.1	432.2	8.4	84
PM050－42－1RZ－7	398.0	94.8	0.2	0.096 4	0.001 5	3.158 0	0.116 5	0.233 2	0.007 1	1 554.6	29.3	1 447.0	28.5	1 351.2	36.9	93
PM050－42－1RZ－8	62.1	46.9	0.8	0.067 6	0.001 8	1.225 9	0.065 3	0.130 4	0.005 9	857.4	114.6	812.5	29.8	790.4	33.6	97
PM050－42－1RZ－9	222.0	153.0	0.7	0.056 6	0.001 2	0.549 5	0.013 0	0.070 5	0.001 3	476.0	44.4	444.7	8.5	439.4	7.6	98
PM050－42－1RZ－10	129.0	68.5	0.5	0.055 5	0.001 2	0.535 5	0.012 1	0.070 4	0.001 3	431.5	48.1	435.5	8.0	438.6	7.8	99
PM050－42－1RZ－11	112.0	79.0	0.7	0.059 7	0.001 6	0.566 9	0.013 2	0.069 8	0.001 2	590.8	59.2	456.0	8.6	434.9	7.3	95
PM050－42－1RZ－12	131.0	86.1	0.7	0.058 3	0.001 3	0.583 4	0.014 2	0.072 8	0.001 2	542.6	48.1	466.7	9.1	452.9	7.2	97
PM050－42－1RZ－13	173.0	132.0	0.8	0.056 7	0.001 1	0.548 1	0.012 1	0.070 5	0.001 2	479.7	44.4	443.7	8.0	439.4	7.3	99
PM050－42－1RZ－14	187.0	225.0	1.2	0.125 2	0.001 1	6.172 4	0.095 8	0.357 5	0.005 0	2 031.2	15.0	2 000.5	13.6	1 970.2	23.6	98
PM050－42－1RZ－15	54.6	29.8	0.5	0.073 1	0.004 5	0.786 8	0.044 2	0.078 4	0.001 6	1 016.7	128.7	589.4	25.1	486.9	9.7	80
PM050－42－1RZ－16	243.0	129.0	0.5	0.076 1	0.000 9	1.959 9	0.042 1	0.186 7	0.003 3	1 098.2	22.2	1 101.8	14.5	1 103.7	18.1	99
PM050－42－1RZ－17	113.0	70.6	0.6	0.074 6	0.002 4	1.719 7	0.060 8	0.167 4	0.003 3	1 057.4	65.3	1 015.9	22.7	997.8	18.5	98
PM050－42－1RZ－18	154.0	111.0	0.7	0.057 3	0.001 4	0.558 7	0.017 3	0.071 1	0.001 5	501.9	55.6	450.7	11.3	442.5	9.2	98
PM050－42－1RZ－19	79.5	56.0	0.7	0.064 4	0.002 5	0.677 2	0.031 9	0.075 8	0.001 6	753.7	49.8	525.1	19.3	470.8	9.6	89
PM050－42－1RZ－20	192.0	147.0	0.8	0.055 2	0.001 2	0.524 5	0.012 7	0.069 5	0.001 4	420.4	54.6	428.2	8.4	432.9	8.3	98
PM050－42－1RZ－21	200.0	181.0	0.9	0.066 5	0.001 2	0.668 4	0.014 9	0.073 4	0.001 4	820.4	37.8	519.8	9.1	456.6	8.5	87
PM050－42－1RZ－22	162.0	115.0	0.7	0.057 7	0.001 1	0.545 2	0.013 7	0.068 9	0.001 5	520.4	42.6	441.8	9.0	429.6	8.9	97
PM050－42－1RZ－23	94.2	61.4	0.7	0.056 1	0.001 6	0.541 7	0.016 5	0.070 5	0.001 3	457.5	61.1	439.6	10.9	439.2	7.8	99
PM050－42－1RZ－24	78.9	48.6	0.6	0.056 9	0.001 8	0.547 9	0.017 0	0.070 5	0.001 3	487.1	75.0	443.6	11.1	439.3	7.9	99
PM050－42－1RZ－25	181.0	175.0	1.0	0.063 7	0.002 7	0.548 8	0.016 0	0.064 5	0.001 5	731.5	88.9	444.2	10.5	403.0	9.2	90
PM050－42－1RZ－26	95.3	48.8	0.5	0.057 0	0.001 5	0.546 3	0.016 7	0.070 1	0.001 5	500.0	59.3	442.6	11.0	436.8	9.1	98
PM050－42－1RZ－27	142.0	80.4	0.6	0.081 1	0.004 2	0.850 3	0.044 4	0.076 5	0.001 3	1 233.3	101.1	624.8	24.4	475.4	7.7	72
PM050－42－1RZ－28	137.0	92.2	0.7	0.059 6	0.001 4	0.622 2	0.017 2	0.075 9	0.001 3	590.8	51.8	491.2	10.8	471.8	7.8	95
PM050－42－1RZ－29	73.3	43.5	0.6	0.056 7	0.001 8	0.559 2	0.018 0	0.072 4	0.001 4	479.7	68.5	451.0	11.7	450.4	8.5	99
PM050－42－1RZ－30	207.0	151.0	0.7	0.055 5	0.000 9	0.544 9	0.013 3	0.071 3	0.001 5	431.5	41.7	441.6	8.8	444.3	8.9	99

((443.8±1.0)Ma)不仅与胡艳华等[18]在王家湾剖面赫南特阶顶部获得的(443.2±1.6)Ma高度一致、可以作为同一层斑脱岩进行对比,而且与最新国际地层表中奥陶—志留系界线处年龄((443.8±1.5)Ma)几乎完全吻合。

此外,本次于石门坎剖面涧草沟组底部、龙马溪组二段底部及新滩组顶部发现的斑脱岩亦具有很好的代表性。涧草沟组底部斑脱岩位于涧草沟组与宝塔组界线附近、龙马溪组二段底部斑脱岩位于龙马溪组一段与二段附近、新滩组顶部斑脱岩位于新滩组与黄葛溪组界线附近,三者均处于距各自界线1 m厚的范围之内,而于三处界线附近获得的三组锆石谐和年龄(449.9±4.3)Ma、(438.5±3.5)Ma和(437.8±5.6)Ma则代表了上扬子地区宝塔组—涧草沟组、龙马溪组一段—龙马溪组二段和新滩组—黄葛溪组的界线年龄,以上4组斑脱岩所处的地层位置即代表了指明在地质演化史上的重要地位,为上扬子地区晚奥陶世—早志留世各组、段地层之间开展高分辨率综合地层研究提供了精确的年龄数据。

5.2 斑脱岩构造背景及意义

锆石物理化学稳定性较高,可以很好地保存源区的原始信息。不同环境中形成的锆石具有明显不同的特征,锆石微量元素含量从超基性岩到中酸性岩石总体呈上升趋势,与全岩成分特征一致;而且其微量元素在沉积成岩过程中和表生环境下很稳定,不同岩石类型的岩浆锆石具有不同的微量元素组合特征。因此,通过分析锆石的外部形态、微量元素特征及变化图解可以很好地揭示锆石的成因环境[19-20],对研究源区环境具有重要的指示意义。

根据4件斑脱岩样品的锆石微量元素球粒陨石标准化稀土配分曲线(图6)可以看出,它们具有近乎相同的变化特征,整体上从La到Lu质量分数逐渐升高,均表现为轻稀土元素强烈亏损和重稀土元

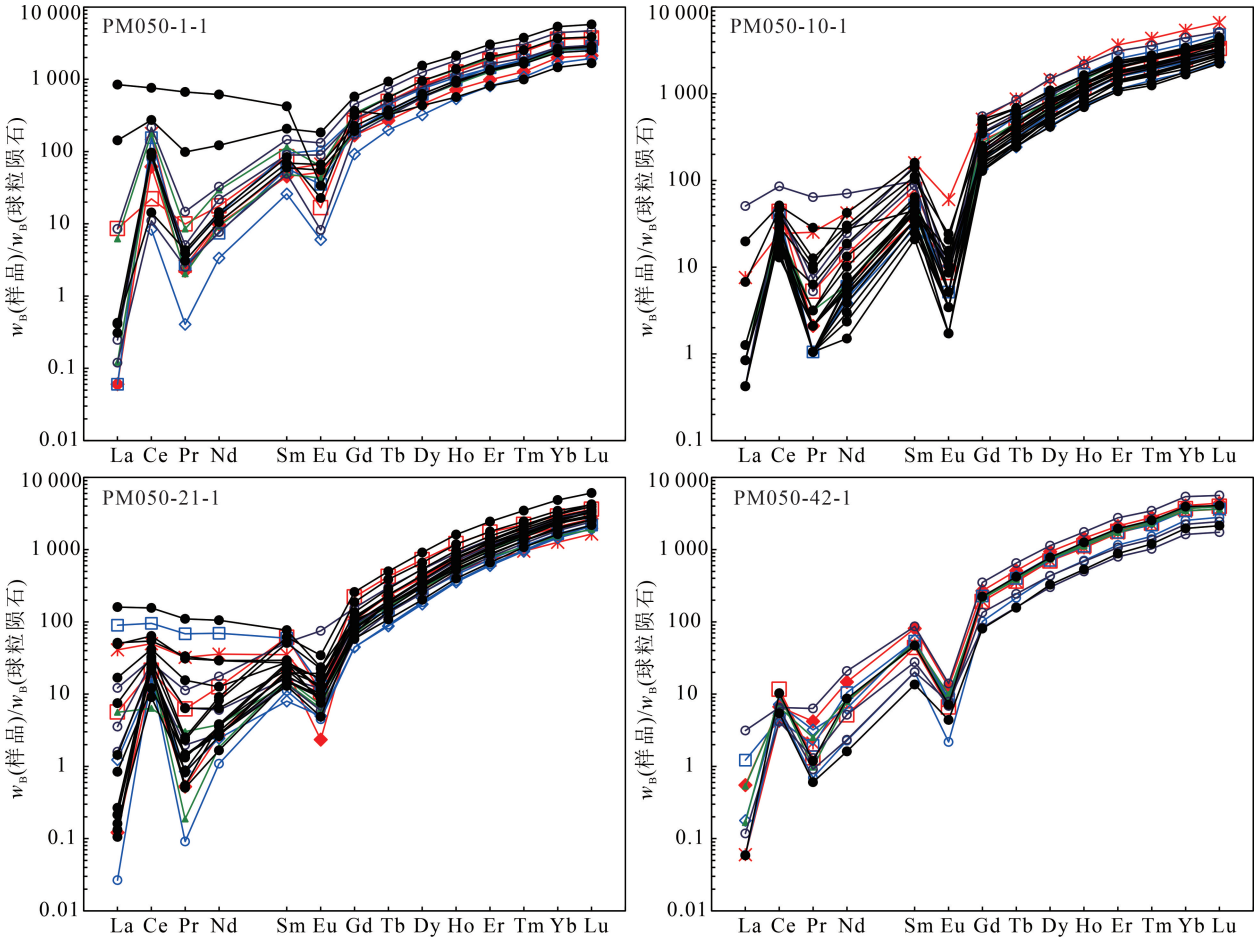


图6 钾质斑脱岩锆石球粒陨石标准化稀土配分曲线

Fig 6 Normalized REE distribution curve of zircon chondrite from K-bentonite

素的极度富集状态，而且 Ce 显示强烈的正异常，Eu 显示强烈的负异常，表现为典型岩浆锆石的特征。

锆石微量元素判别图解显示，斑脱岩样品均高度富集。根据锆石微量元素测试结果（表 2）投图，在 U/Yb－w(Y)和 Th/Yb－w(Y)图解（图 7a、b）中，除了第一层斑脱岩（PM050－1－1）落于大陆锆石与洋壳锆石的重叠区域外，其余均落于大陆花岗质岩浆锆石区。在$(Nb/Pb)_N$－Eu/Eu^*图解（图 7c）中第一层斑脱岩和后续三层（PM050－10－1、PM050－21－1、PM050－42－1）分别落于 I 型花岗岩和 S 型花岗岩区，表明锆石源区主要形成于碰撞挤压的构造背景。Nb/Hf－Th/U、Hf/Th－Th/Nb 和 U/Yb－Nb/Yb 图解（图 7d、e、f）则进一步说明斑脱岩主要形成于与碰撞和挤压有关的造山环境和大陆弧环境，表明物源区主要为造山带有关的构造背景，而第一层斑脱岩形成于岛弧环境。

晚奥陶世—早志留世地层中多层斑脱岩的发现，表明该时期扬子地块及其周缘地区曾经发生过大规模多频次的火山活动，而到目前为止，扬子地块内部依旧没有发现该时期对应的岩浆活动，因此只能从扬子周缘寻找。前人对于斑脱岩已经有了相当深入的研究，斑脱岩原岩是以安山岩和英安岩为主的中酸性火山岩，原岩构造环境可能是与俯冲相关的火山弧环境，也可能是板内环境[2-3,14]。关于斑脱岩的来源，争议主要指向扬子和华夏陆块汇聚以及古生代秦岭洋闭合过程中的板块俯冲[23-24]。根据马昌前等[25]对秦岭地区早古生代岩浆研究，该地区岩浆以 I 型和 S 型花岗岩为主，大多形成于岛弧背景下，形成背景与第一层斑脱岩构造背景相同，说明该层斑脱岩可能来源于此。但是据闫全人等[26]的研究，秦岭洋的俯冲闭合开始于早奥陶世（472.0±11.0）Ma，因此，若该层斑脱岩来源于秦岭洋的闭合，则早—中奥陶世扬子陆块应该也有明显的火山活动记录，然而，目前极少有这方面的报道，所以，斑脱岩并非来源于秦岭地区。苏文博等[1]通过对中国南方晚奥陶世—早志留世五峰组和龙马溪组中斑脱岩的研究，认为其来源于同碰撞岛弧背景下的火山喷发，与扬子和华夏陆块汇聚过程中板块边缘的俯冲-碰撞有关，而且在华夏陆块拼合带存在大量峰值在 450～390 Ma 的锆石 U－Pb 年龄，岩浆活动以中酸性侵入岩体为主，因此，晚奥陶世—早志留世斑脱岩来源于华夏陆块与扬子陆块汇聚背景下的俯冲-碰撞造山环境。

扬子与华夏陆块结合带的拼合造山过程的时间节点及碰撞造山的动力学机制等问题对于揭示华南自新元古代以来的大地构造演化具有重要的科学意义。覃小锋等[27]通过对云开地块北缘加里东期中-基性火山岩的研究，证明了华南早古生代残留洋盆的存在。晚奥陶世全球发生大规模的造山运动，广西运动即是全球加里东期构造运动在华南的体现。在扬子陆块最初发生的时间为晚奥陶世凯迪期，该运动持续向北西的作用力导致华夏陆块向扬子陆块的俯冲碰撞，使得上扬子地区晚奥陶世的沉积环境转变加快。而本次工作中斑脱岩可能也是对华南地区残留洋盆俯冲闭合的响应。第一层锆石 U－Pb 年龄（（449.9±4.3）Ma）可能代表了俯冲的开始阶段，随着晚奥陶世广西运动的启动，来自南东方向的作用力致使华夏陆块向扬子陆块的俯冲，开始了最初的弧-陆碰撞，自此，上扬子区完成了从拉张到挤压的构造转换；后续 3 件锆石年龄表明，短暂的构造活动将残存洋盆覆灭之后，继而进入陆-陆碰撞阶段。

5.3　生物大灭绝与火山活动的关系

奥陶纪末生物大灭绝事件作为 5 次生物大灭绝中最早的一次，在地质历史时期中具有重要的意义，此次生物灭绝造成海洋中约 80％种和 50％属消亡，致使海洋生物群发生重大变化。前人对于奥陶纪末的生物大灭绝已经有了相当深入的研究，认为此次生物大灭绝分为两幕：第 1 幕发生在凯迪阶到赫南特早期，与冈瓦纳冰期有关，导致全球温度骤降，海平面大幅下降，多门类暖水生物遭受重创；第 2 幕发生在赫南特晚期之初，全球温度上升，冰川融化，海平面快速上升，导致浅水海底严重缺氧，凉水腕足动物群整体灭绝[28]。

奥陶纪末生物大灭绝事件一直是地质学研究的重要课题，前人对于此次生物大灭绝的研究程度较高，且普遍认为气候的急剧变化才是造成这次灭绝的主要因素。但究竟是什么原因导致了气候的急剧变化，气候从温室向冰室转变导致海洋环境发生巨变的机理尚有待考究。何龙等[29]通过碳、氮同位素的研究认为大规模的有机碳埋藏致使大气 CO_2 分压降低，并引起气候变冷，而冰期有机碳氧化分解释放分 CO_2 以及底层水体反硝化作用的产物再次引起气候的回暖；但目前对于碳同位素的研究还颇具争议。随着近年来对全球火山事件的研究，越来越多的人认为高频次的火山活动对此次生物大灭绝具有深远的影响。胡东平[30]通过多硫同位素的研究

表 2 钾质斑脱岩锆石微量元素分析结果

Table 2 Trace elements of zircon from K-bentonite analysis results

10^{-6}

样品编号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
PM050-1-1RZ-1	18.89	0.00	108.72	0.25	4.97	8.59	3.90	53.40	16.30	201.35	71.44	308.13	61.64	607.85	95.41	8 248.97	5.44	13.75	123.97	92.15
PM050-1-1RZ-2	13.59	0.06	6.17	0.23	1.42	4.65	0.69	21.75	6.94	83.80	30.25	135.39	26.99	273.83	44.81	9 978.77	1.70	27.57	144.92	312.86
PM050-1-1RZ-3	4.70	0.01	37.79	0.21	4.56	6.93	2.98	34.41	10.05	114.52	40.55	162.60	32.48	339.74	54.26	8 108.95	1.97	6.92	69.90	44.91
PM050-1-1RZ-4	4.03	2.04	13.58	0.94	8.24	12.95	0.97	55.64	18.43	211.46	70.99	304.39	61.28	607.60	94.11	9 104.91	1.18	56.32	333.69	595.36
PM050-1-1RZ-5	3.24	0.00	48.38	0.37	6.34	14.40	6.03	58.57	17.06	188.44	60.48	236.28	45.56	429.87	67.01	8 399.24	1.68	6.16	65.38	39.51
PM050-1-1RZ-6	8.15	0.15	11.04	0.35	6.48	12.88	0.68	60.03	18.82	208.42	63.34	264.96	46.50	435.80	64.78	7 413.63	2.90	19.06	127.97	142.13
PM050-1-1RZ-7	14.40	0.01	95.40	0.26	3.46	8.90	2.04	39.78	13.64	157.26	55.30	239.37	47.43	465.03	73.13	8 482.51	4.80	19.25	191.67	108.34
PM050-1-1RZ-8	2.01	0.00	5.11	0.04	1.57	3.97	0.35	19.00	7.45	81.46	30.30	133.98	27.50	286.99	49.32	9 046.80	1.07	27.56	122.60	326.61
PM050-1-1RZ-9	13.11	1.47	108.74	0.81	13.70	17.63	3.63	69.42	21.20	242.23	76.45	324.61	64.58	628.44	97.14	8 262.95	4.47	25.64	297.66	133.77
PM050-1-1RZ-10	6.33	214.12	510.18	58.73	264.59	64.40	13.90	94.96	21.84	216.66	64.36	263.47	49.48	461.39	72.54	8 106.55	2.33	9.85	104.09	55.73
PM050-1-1RZ-11	7.50	0.03	53.14	0.19	4.30	7.40	2.49	39.65	12.23	142.83	48.61	210.27	42.16	425.62	69.62	9 096.40	2.68	10.25	94.55	65.88
PM050-1-1RZ-12	18.86	0.23	105.84	0.44	6.88	10.53	4.17	48.85	16.04	193.45	64.80	273.47	52.98	537.04	81.79	7 950.19	4.88	16.71	191.52	106.64
PM050-1-1RZ-13	11.30	248.36	626.92	67.87	345.18	71.88	16.02	118.55	26.27	268.97	82.52	335.15	61.13	601.84	94.56	7 981.37	3.40	16.44	209.53	94.14
PM050-1-1RZ-14	14.29	2.01	132.40	1.40	15.25	22.33	7.62	91.97	27.85	317.15	103.23	427.32	77.95	749.85	119.56	7 520.14	4.08	29.17	337.75	131.28
PM050-1-1RZ-15	2.16	0.03	6.76	0.24	3.59	7.51	0.48	35.19	11.58	140.64	50.39	219.72	44.68	442.37	70.49	9 762.70	1.20	38.54	190.93	427.89
PM050-1-1RZ-16	21.86	0.04	109.19	0.31	4.01	10.10	3.93	51.41	16.48	203.38	69.81	306.14	58.88	569.32	90.71	8 033.52	5.51	16.66	159.58	114.20
PM050-1-1RZ-17	22.76	1.32	222.28	1.60	26.48	42.21	14.47	191.46	58.27	635.81	197.61	770.97	144.13	1 271.99	194.00	8 030.90	6.08	35.07	407.61	178.64
PM050-1-1RZ-18	4.82	0.04	52.60	0.35	6.46	9.98	4.54	48.29	14.03	158.90	53.70	223.08	41.55	398.98	63.80	8 269.07	2.42	7.30	74.02	46.71
PM050-1-1RZ-19	4.10	0.06	51.25	0.48	10.19	13.73	5.18	57.09	18.36	197.14	65.09	269.64	50.06	470.76	75.18	8 023.78	2.05	7.90	81.80	49.48
PM050-1-1RZ-20	4.18	0.10	8.77	0.41	6.76	12.77	1.32	65.24	20.87	241.89	78.39	338.56	64.62	625.43	98.20	8 961.06	1.21	52.94	309.84	534.18
PM050-1-1RZ-21	9.87	0.87	59.65	0.41	6.45	8.48	4.11	46.11	15.42	181.53	62.46	275.41	54.63	565.67	92.32	8 789.86	3.25	12.24	137.19	85.03
PM050-1-1RZ-22	3.22	200.06	466.76	63.46	287.04	64.67	1.97	75.30	12.03	110.42	32.08	133.79	25.36	249.09	42.31	9 211.77	0.82	31.89	156.18	346.96
PM050-1-1RZ-23	5.47	1.09	54.70	0.70	5.87	10.00	3.98	35.62	12.14	136.58	45.45	188.71	36.72	361.22	57.43	7 965.24	2.20	7.76	80.18	48.69
PM050-1-1RZ-24	8.02	0.01	73.88	0.45	7.70	12.92	5.65	64.72	17.72	205.49	66.10	274.77	52.92	505.28	78.97	7 738.06	3.04	13.07	151.82	73.13
PM050-1-1RZ-25	10.84	33.92	167.11	9.36	57.03	31.72	10.65	118.44	34.85	393.31	120.65	503.10	96.02	908.82	145.53	8 171.49	3.38	23.50	260.75	123.96
PM050-1-1RZ-26	6.39	0.10	58.90	0.38	6.09	10.56	3.83	46.33	13.86	159.80	53.99	218.57	41.84	400.38	63.43	8 250.70	2.30	8.30	82.58	47.92
PM050-1-1RZ-27	7.19	0.07	53.02	0.29	4.94	9.14	3.21	39.38	12.62	146.60	50.65	224.69	44.65	447.79	72.61	8 343.28	2.50	11.82	124.60	72.08

续表 2

样品编号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
PM050－1－1RZ－28	16.13	19.15	183.20	6.55	33.13	20.79	5.26	84.58	22.73	258.89	81.13	336.51	62.44	615.32	96.72	7 642.80	5.76	34.62	453.10	168.23
PM050－1－1RZ－29	24.67	0.23	77.02	0.73	11.24	19.86	6.01	85.11	26.32	304.44	92.80	396.41	74.27	711.26	108.18	7 758.43	4.33	23.80	299.42	126.71
PM050－1－1RZ－30	25.19	0.09	104.36	0.19	3.44	9.65	1.84	53.59	18.78	214.48	67.27	275.78	49.50	473.16	67.39	7 271.07	7.32	14.00	137.69	96.95
PM050－10－1RZ－1	6.70	1.80	14.90	2.40	19.70	24.50	3.50	104.50	32.60	371.00	130.40	604.00	111.20	917.00	168.60	8 970.00	1.90	30.01	279.00	301.00
PM050－10－1RZ－2	11.40	0.00	29.30	0.20	2.90	5.30	0.60	43.20	16.00	199.00	71.80	326.00	62.60	494.00	95.40	10 540.00	3.10	62.78	529.00	627.00
PM050－10－1RZ－3	7.00	0.00	26.80	0.50	6.50	12.00	0.50	59.20	16.60	190.70	66.90	276.20	49.30	422.00	84.20	9 740.00	1.60	36.08	446.00	323.30
PM050－10－1RZ－4	4.50	0.00	12.10	0.20	4.70	9.80	0.30	48.10	14.50	178.90	65.40	282.00	52.30	411.00	81.90	11 360.00	1.50	28.96	221.70	308.90
PM050－10－1RZ－5	10.60	0.10	15.20	0.10	2.00	5.50	0.10	35.80	11.70	149.50	56.70	258.40	48.10	393.00	78.50	12 800.00	2.70	42.86	285.50	457.00
PM050－10－1RZ－6	3.10	0.00	16.20	0.10	1.70	3.50	0.20	14.00	4.30	49.80	16.60	75.70	14.50	127.60	24.70	11 440.00	1.40	32.69	179.40	296.70
PM050－10－1RZ－7	19.90	0.00	24.50	0.10	2.80	8.00	0.30	61.50	20.50	251.80	94.70	420.90	78.00	637.00	121.60	13 020.00	5.10	83.75	658.00	887.00
PM050－10－1RZ－8	4.40	0.00	12.40	0.10	1.80	4.30	0.60	27.90	9.10	108.40	41.20	186.10	36.40	299.30	58.60	10 650.00	1.50	24.14	183.40	270.10
PM050－10－1RZ－9	9.00	0.30	14.00	0.20	2.90	6.70	0.20	42.40	14.30	172.40	63.10	283.40	53.10	446.00	82.80	12 750.00	2.50	42.44	411.00	493.00
PM050－10－1RZ－10	10.20	0.20	16.10	0.30	2.90	8.00	0.60	55.40	17.40	224.30	81.90	374.00	67.90	542.00	106.50	12 940.00	2.80	54.45	406.60	558.00
PM050－10－1RZ－11	13.20	12.00	52.40	6.10	33.00	15.10	0.30	44.00	14.30	160.00	59.60	265.10	51.10	427.00	80.70	12 990.00	3.60	49.92	338.80	540.00
PM050－10－1RZ－12	9.10	0.00	30.10	0.50	8.30	13.40	0.50	73.70	21.90	242.50	86.40	364.00	66.90	542.00	103.70	10 220.00	1.90	49.66	638.00	467.00
PM050－10－1RZ－13	1.40	0.00	4.20	0.10	1.90	3.90	0.20	18.60	5.70	65.30	22.30	100.80	19.80	170.90	33.10	9 240.00	0.60	38.46	73.40	294.20
PM050－10－1RZ－14	9.70	0.10	28.70	0.70	11.50	22.80	0.50	113.20	31.80	377.00	123.90	516.00	92.10	755.00	131.30	9 690.00	2.00	43.01	573.00	446.00
PM050－10－1RZ－15	8.10	0.10	13.40	0.10	1.10	3.80	0.20	26.40	9.10	120.40	44.80	221.90	40.70	328.00	66.40	12 060.00	2.70	34.54	206.20	365.00
PM050－10－1RZ－16	7.40	0.20	13.00	0.20	2.50	6.50	0.30	42.20	14.50	177.70	63.70	284.00	52.00	442.00	80.90	12 500.00	1.90	37.53	281.80	437.00
PM050－10－1RZ－17	5.70	1.60	28.30	1.20	14.10	21.40	0.30	95.90	25.30	277.00	92.50	396.00	70.70	578.00	110.00	9 720.00	1.20	35.29	446.00	314.90
PM050－10－1RZ－18	7.20	0.00	9.70	0.10	1.80	5.30	0.20	29.20	10.30	136.60	50.30	237.00	44.60	379.00	72.30	12 890.00	2.00	31.32	191.50	378.00
PM050－10－1RZ－19	1.90	0.00	7.20	0.10	2.50	3.50	0.80	28.00	8.70	108.00	39.30	184.60	34.60	296.00	57.50	8 970.00	0.90	18.78	137.50	209.60
PM050－10－1RZ－20	12.50	0.10	32.40	0.50	8.00	18.00	2.40	105.40	32.90	377.00	130.40	565.00	100.00	807.00	147.80	9 910.00	2.90	73.93	845.00	760.00
PM050－10－1RZ－21	10.70	0.00	12.30	0.10	0.70	3.20	0.10	27.30	9.80	132.40	50.00	235.90	44.40	376.00	73.50	14 260.00	3.50	47.01	253.80	511.50
PM050－10－1RZ－22	2.50	0.00	8.30	0.20	3.00	6.80	0.90	34.70	11.50	139.20	50.10	225.10	42.80	360.00	69.30	10 020.00	0.90	23.44	197.40	250.10
PM050－10－1RZ－23	7.50	0.10	14.00	0.10	2.80	7.80	0.20	49.50	17.00	204.10	74.90	340.00	63.80	508.00	97.80	12 810.00	2.30	46.77	315.70	469.90
PM050－10－1RZ－24	6.50	0.10	13.70	0.10	2.70	6.20	0.30	36.90	12.70	160.70	58.90	271.30	51.30	432.00	83.50	11 990.00	1.80	38.52	237.00	358.00
PM050－10－1RZ－25	12.10	0.10	18.20	0.20	2.70	8.20	0.20	49.70	17.20	207.80	75.20	343.10	64.20	529.00	98.20	12 720.00	3.30	56.89	484.00	639.00
PM050－10－1RZ－26	2.60	0.00	12.80	0.30	6.20	8.70	0.50	39.10	11.20	122.50	42.80	187.10	33.80	301.70	61.60	9 140.00	0.90	21.30	222.40	198.80

续表2

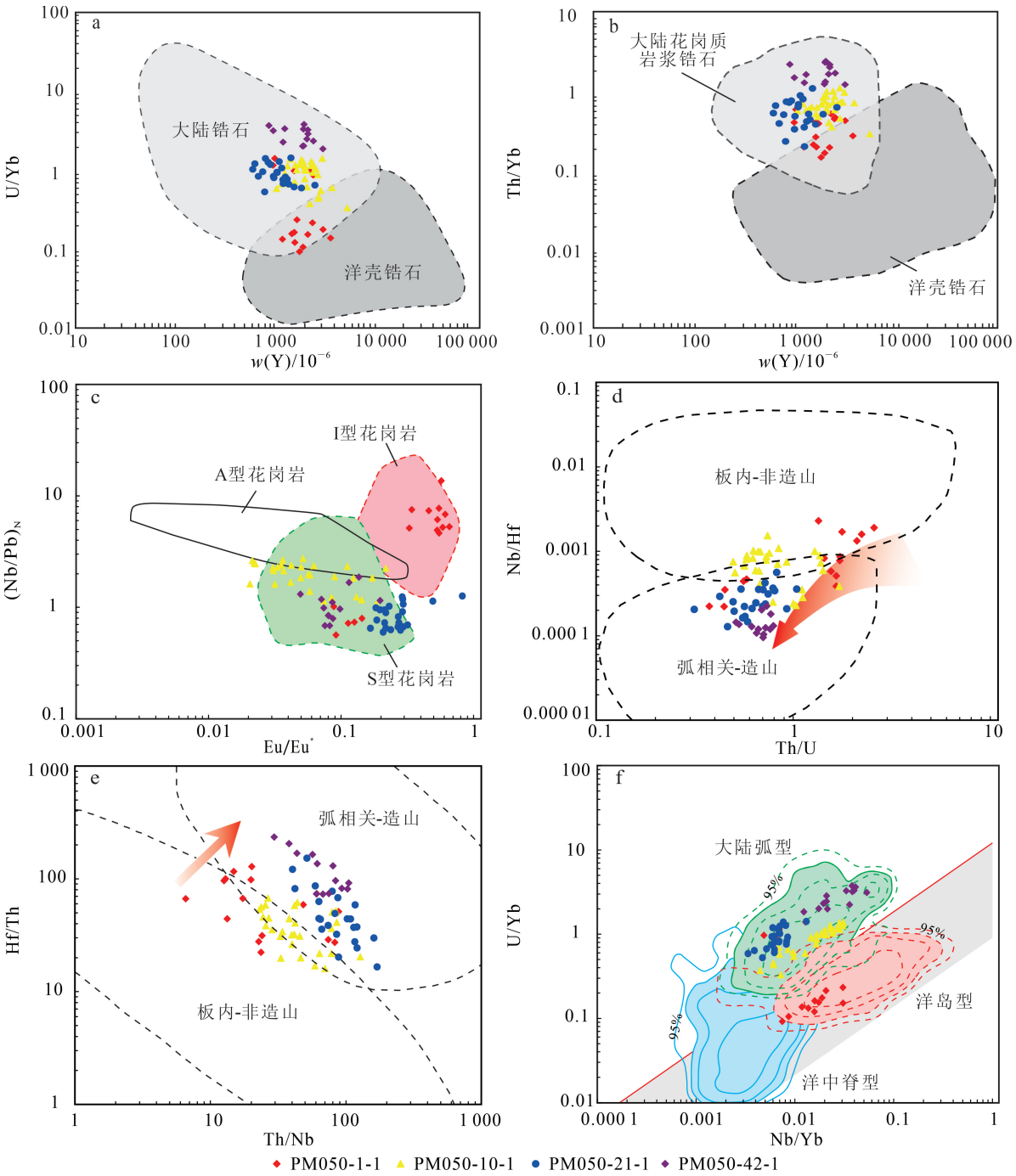
样品编号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
PM050-10-1RZ-27	2.00	0.00	7.90	0.20	3.60	7.00	0.70	33.70	9.30	105.50	39.60	176.50	31.80	283.00	56.60	8 750.00	0.60	17.22	168.90	163.60
PM050-10-1RZ-28	3.40	0.20	23.90	1.00	19.70	24.50	1.20	104.00	25.60	271.30	91.70	376.90	68.50	557.00	113.40	8 840.00	0.90	30.00	434.00	253.80
PM050-10-1RZ-29	11.10	0.10	14.30	0.10	2.30	5.40	0.10	39.00	13.30	163.10	62.80	287.80	54.30	454.00	84.50	12 500.00	2.60	42.52	272.00	468.00
PM050-10-1RZ-30	12.80	0.10	16.40	0.10	2.20	5.20	0.10	36.50	12.50	156.40	58.10	263.60	49.80	409.00	76.80	12 900.00	3.40	52.28	364.80	549.00
PM050-10-1RZ-31	4.30	0.10	20.90	0.70	12.80	20.10	1.40	92.60	23.60	272.00	90.20	388.00	69.80	572.00	107.90	9 760.00	0.90	30.64	376.00	292.00
PM050-10-1RZ-32	5.50	0.00	12.90	0.00	1.00	2.20	0.10	15.20	6.00	79.90	32.00	148.20	30.20	253.50	48.80	13 000.00	2.70	91.03	223.00	432.10
PM050-10-1RZ-33	2.00	0.00	7.10	0.00	1.10	2.60	0.30	17.70	5.80	74.50	27.30	127.40	24.80	215.40	42.90	10 300.00	1.00	18.22	113.40	192.40
PM050-10-1RZ-34	4.30	0.00	13.40	0.30	4.70	9.80	0.30	51.50	16.00	190.50	67.00	290.60	53.30	444.00	82.30	11 620.00	1.40	25.73	188.20	268.80
PM050-10-1RZ-35	7.30	0.00	14.70	0.10	2.40	4.90	0.20	29.50	9.70	116.20	41.50	188.00	35.80	308.30	58.30	11 540.00	1.90	28.58	209.50	310.70
PM050-10-1RZ-36	6.40	0.00	13.40	0.20	3.60	10.60	0.20	62.60	20.40	250.00	92.00	424.00	75.90	624.00	112.60	12 710.00	2.00	46.80	363.00	547.00
PM050-10-1RZ-37	10.30	0.00	12.60	0.10	1.40	4.60	0.20	31.70	10.40	128.70	50.20	227.40	42.10	357.00	70.00	12 720.00	2.80	37.77	237.30	409.70
PM050-10-1RZ-38	1.80	0.00	9.80	0.30	6.30	9.80	0.80	47.40	13.50	146.40	50.20	218.20	40.60	347.20	69.10	9 010.00	0.60	15.75	147.60	153.70
PM050-10-1RZ-39	3.40	0.30	17.90	0.90	12.90	17.00	0.70	83.70	23.20	257.30	86.20	366.50	66.00	552.90	103.50	9 660.00	0.90	24.52	266.00	239.80
PM050-10-1RZ-40	2.10	0.00	9.00	0.60	8.70	15.80	1.40	71.50	20.30	214.60	72.30	302.50	56.70	469.00	92.50	8 750.00	0.60	17.03	174.80	174.20
PM050-10-1RZ-41	9.60	0.00	20.20	0.10	3.00	6.60	0.60	43.00	14.00	177.20	65.60	292.40	54.40	453.00	83.70	11 070.00	2.40	41.42	326.00	446.00
PM050-10-1RZ-42	12.10	4.70	31.40	2.70	12.90	6.90	0.20	45.20	15.90	194.50	72.00	329.00	62.70	515.00	92.80	12 300.00	3.00	50.45	397.00	582.00
PM050-21-1RZ-1	2.69	0.13	11.60	0.09	0.80	2.40	0.36	15.44	6.15	83.34	35.31	175.34	41.82	408.56	82.68	10 424.34	1.60	32.93	226.92	395.44
PM050-21-1RZ-2	3.11	0.01	9.74	0.06	1.06	2.54	0.61	17.75	7.15	91.65	37.47	174.73	40.08	374.43	72.94	9 968.77	1.56	31.45	217.94	378.49
PM050-21-1RZ-3	1.56	0.01	10.66	0.01	0.51	1.69	0.26	9.14	3.41	47.34	20.73	102.75	24.92	260.50	53.35	10 725.59	1.09	26.27	182.69	311.03
PM050-21-1RZ-4	3.00	0.03	15.43	0.13	2.24	4.11	0.76	24.75	9.57	120.85	49.25	227.55	52.51	501.27	96.51	9 886.89	1.35	38.67	373.91	441.08
PM050-21-1RZ-5	1.74	21.28	58.31	6.52	32.46	9.10	0.76	17.93	5.45	64.17	25.44	121.18	28.75	281.40	55.59	10 292.77	1.10	22.72	151.25	265.19
PM050-21-1RZ-6	1.75	0.29	9.37	0.08	1.14	1.22	0.29	9.22	3.27	44.58	20.10	98.95	24.11	246.41	49.20	10 733.33	1.01	21.32	138.43	249.59
PM050-21-1RZ-7	1.24	1.33	3.90	0.29	1.76	2.16	0.37	18.50	6.03	75.50	28.52	129.30	27.81	260.75	48.38	9 679.60	0.70	12.56	63.61	136.69
PM050-21-1RZ-8	3.43	6.59	31.97	1.98	10.05	4.95	0.48	20.32	7.44	98.10	41.03	194.34	46.11	448.76	89.34	10 740.19	1.81	39.98	317.84	470.42
PM050-21-1RZ-9	2.36	0.00	13.57	0.02	0.86	2.46	0.41	14.15	5.81	78.47	32.75	161.21	38.87	381.45	76.39	9 662.12	1.39	26.55	195.84	302.34
PM050-21-1RZ-10	2.40	0.38	12.03	0.19	1.32	2.10	0.34	11.80	4.99	63.20	27.00	131.30	30.92	311.38	61.72	10 833.41	1.60	37.04	245.17	432.99
PM050-21-1RZ-11	6.22	0.84	16.49	1.07	8.18	7.93	4.36	32.03	11.20	134.89	50.50	230.34	50.09	471.21	87.70	11 088.13	2.82	49.49	548.57	664.90
PM050-21-1RZ-12	2.50	1.12	20.08	0.55	5.41	5.02	0.99	31.52	11.84	145.66	59.07	268.68	60.65	573.29	112.64	10 042.65	1.17	41.61	384.08	459.91
PM050-21-1RZ-13	3.17	2.88	18.56	0.61	2.81	2.54	0.69	18.52	6.99	93.01	39.48	189.55	44.93	451.63	92.16	9 331.65	1.50	45.82	382.82	475.00

续表 2

样品编号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
PM050－21－1RZ－14	2.38	1.77	19.94	0.60	2.96	3.32	0.51	17.09	6.52	83.60	35.94	169.16	40.14	404.39	76.42	10 085.24	1.52	33.00	271.99	376.36
PM050－21－1RZ－15	2.32	0.00	12.99	0.05	0.78	2.28	0.52	13.38	5.15	68.25	29.48	140.06	33.57	327.29	65.70	11 077.56	1.53	34.92	251.28	405.89
PM050－21－1RZ－16	3.47	0.03	16.94	0.05	1.76	2.74	0.58	16.14	6.53	84.94	36.70	179.09	42.97	426.09	86.15	11 154.37	1.85	47.96	403.51	540.31
PM050－21－1RZ－17	2.33	38.03	95.59	10.41	49.26	11.74	1.36	21.65	6.43	78.72	30.71	144.31	33.89	344.94	65.71	10 490.43	1.26	34.98	280.07	400.31
PM050－21－1RZ－18	3.22	0.03	24.06	0.24	4.26	9.39	1.99	53.20	18.75	231.78	91.21	404.63	88.35	822.50	153.84	9 073.44	1.53	51.98	547.25	524.90
PM050－21－1RZ－19	3.95	0.00	15.98	0.08	1.22	3.24	0.78	22.11	8.76	113.30	47.42	222.22	49.85	477.40	90.45	9 353.95	1.72	32.04	261.88	363.16
PM050－21－1RZ－20	1.93	12.15	33.31	3.16	13.59	4.14	0.44	12.01	4.03	51.43	22.52	109.19	27.55	276.75	55.32	9 942.90	1.21	20.47	114.74	228.43
PM050－21－1RZ－21	2.99	24.28	67.69	6.94	31.44	7.96	0.80	21.04	7.04	85.42	36.61	176.22	41.96	424.88	83.91	10 596.74	1.76	33.12	225.95	392.67
PM050－21－1RZ－22	4.20	0.72	20.78	0.24	2.62	3.77	0.70	22.68	8.72	114.42	48.94	232.40	53.56	527.49	102.41	9 909.37	1.83	46.97	443.38	526.25
PM050－21－1RZ－23	3.56	2.88	19.89	0.72	4.11	3.80	0.45	16.83	6.90	91.50	39.13	193.27	47.43	479.74	95.06	10 557.35	1.94	40.04	273.95	468.21
PM050－21－1RZ－24	3.29	0.05	13.58	0.13	1.67	3.86	0.96	27.93	10.73	136.86	55.00	254.59	56.04	526.40	99.46	9 321.96	1.49	27.96	212.88	318.62
PM050－21－1RZ－25	2.76	10.02	33.56	2.98	15.04	6.75	1.69	22.22	7.45	89.63	36.09	173.94	39.45	405.85	79.60	10 353.20	1.24	26.37	282.82	332.72
PM050－21－1RZ－26	2.11	0.00	11.99	0.05	0.80	1.81	0.34	11.20	4.64	58.91	25.38	126.51	30.88	323.06	63.31	10 738.17	1.33	29.14	212.24	349.59
PM050－21－1RZ－27	3.21	0.34	14.17	0.14	1.32	2.36	0.55	14.87	5.68	76.89	33.36	157.77	37.52	385.28	75.49	11 024.88	3.33	35.35	134.79	317.59
PM050－21－1RZ－28	2.88	0.33	14.81	0.16	1.28	3.09	0.62	18.42	7.27	93.22	38.94	192.90	45.97	458.73	90.18	10 745.84	1.74	42.94	327.32	507.09
PM050－21－1RZ－29	3.26	3.99	25.70	1.47	5.90	4.22	0.93	23.37	8.93	111.59	47.82	226.90	52.78	520.60	100.15	9 305.73	1.56	30.68	241.05	342.48
PM050－21－1RZ－30	3.58	0.05	14.27	0.14	1.42	3.02	1.11	16.89	6.64	81.17	35.48	171.08	41.53	420.12	84.58	9 833.70	1.58	31.68	305.28	386.28
PM050－21－1RZ－31	2.35	0.20	7.41	0.14	1.29	1.99	0.28	14.18	6.97	95.84	42.04	203.41	46.75	450.63	81.43	11 500.68	2.32	36.40	94.69	300.43
PM050－21－1RZ－32	1.98	0.06	17.43	0.22	3.85	7.78	1.30	38.60	14.45	167.68	66.85	294.18	62.59	586.31	106.63	9 530.30	1.06	31.67	318.77	343.39
PM050－21－1RZ－33	3.70	11.66	38.99	2.95	13.62	4.49	0.69	19.82	7.25	97.20	41.49	215.26	52.66	531.87	107.43	10 384.71	1.96	36.39	233.79	429.83
PM050－21－1RZ－34	1.93	0.05	11.93	0.11	2.76	4.92	0.93	27.80	9.37	117.84	48.70	221.57	50.21	486.84	92.61	10 105.11	1.03	31.73	268.88	365.40
PM050－21－1RZ－35	1.95	0.01	12.83	0.04	1.62	2.41	0.57	13.89	5.70	72.73	31.27	150.17	35.08	338.32	65.48	10 068.12	1.13	30.32	243.86	355.33
PM050－21－1RZ－36	1.88	0.00	12.26	0.06	0.75	1.94	0.38	11.67	5.03	61.88	27.36	136.87	32.93	333.08	65.30	10 343.68	1.34	26.83	177.80	306.10
PM050－21－1RZ－37	2.16	3.68	20.91	0.99	5.99	2.85	0.28	13.45	4.82	64.23	27.09	135.90	33.18	347.47	68.08	10 822.91	1.39	31.60	219.12	371.81
PM050－21－1RZ－38	2.76	0.02	14.45	0.06	1.61	2.85	0.87	17.53	6.94	88.60	36.54	180.90	42.63	431.76	84.86	10 231.69	1.49	35.15	289.63	414.83
PM050－21－1RZ－39	1.94	1.87	12.65	0.30	1.75	2.05	0.27	9.52	3.81	47.64	21.12	107.60	26.82	282.47	55.30	9 741.87	0.92	22.18	145.26	247.42
PM050－21－1RZ－40	2.32	0.04	5.55	0.08	1.79	4.14	0.68	24.26	8.84	111.11	44.14	201.16	42.66	395.14	71.17	9 209.10	1.09	24.63	146.52	295.57
PM050－42－1RZ－1	3.25	6.77	23.44	2.83	15.89	13.89	0.39	73.91	26.91	339.80	121.06	569.95	111.02	1 162.45	184.50	11 221.76	1.52	36.31	259.29	357.11
PM050－42－1RZ－2	1.68	0.00	3.55	0.07	1.74	4.17	0.46	28.12	8.87	116.15	40.57	183.34	37.73	380.33	61.74	10 449.21	0.76	11.16	74.41	109.60

续表 2

样品编号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
PM050－42－1RZ－3	1.23	0.01	2.57	0.20	3.60	7.54	0.47	39.52	13.45	177.19	59.58	280.24	56.81	581.68	91.93	10 241.47	0.67	11.10	75.24	112.96
PM050－42－1RZ－4	0.95	0.03	2.51	0.14	3.87	6.18	0.45	34.06	10.19	131.76	47.89	216.17	43.38	455.44	75.08	10 082.93	0.73	9.31	59.33	91.03
PM050－42－1RZ－5	1.39	0.13	4.09	0.40	6.86	12.41	0.73	55.20	19.14	237.69	81.42	351.21	70.82	692.74	111.67	10 649.60	0.67	17.63	129.56	163.41
PM050－42－1RZ－6	1.66	0.36	5.39	0.22	1.91	3.40	0.37	25.17	8.56	110.01	42.10	193.60	40.83	424.76	68.63	11 006.81	0.84	13.35	81.22	132.76
PM050－42－1RZ－7	1.16	0.01	2.31	0.19	1.61	4.03	1.25	23.70	6.98	80.21	25.88	111.75	22.48	229.69	37.32	12 696.03	1.01	103.69	94.75	398.39
PM050－42－1RZ－8	0.97	0.00	7.78	0.12	1.18	2.00	0.57	14.62	5.10	66.70	24.00	115.41	25.75	280.19	49.78	9 847.82	0.43	10.67	46.92	62.11
PM050－42－1RZ－9	2.27	0.00	7.11	0.12	2.40	6.72	0.38	39.10	13.62	175.71	63.59	294.62	59.08	625.58	100.71	11 212.68	1.27	23.09	153.39	221.72
PM050－42－1RZ－10	1.58	0.01	3.55	0.07	1.06	3.07	0.13	20.78	8.04	109.87	39.96	191.72	39.03	431.72	70.87	11 557.44	0.77	12.07	68.52	129.12
PM050－42－1RZ－11	0.98	0.29	2.76	0.19	4.89	8.27	0.50	46.77	14.92	180.44	62.92	286.18	55.83	583.85	92.89	10 296.94	0.76	11.71	78.99	112.14
PM050－42－1RZ－12	1.18	0.06	3.63	0.21	3.41	5.41	0.35	36.74	12.13	153.84	56.57	257.17	52.12	540.25	87.56	10 845.10	0.98	13.93	86.09	130.81
PM050－42－1RZ－13	1.29	0.04	4.42	0.30	2.97	8.56	0.47	44.72	15.99	199.71	70.20	315.51	60.80	634.31	102.29	10 745.48	0.79	18.91	132.22	173.07
PM050－42－1RZ－14	2.23	0.01	51.63	0.09	2.02	5.25	2.24	20.64	6.44	79.36	26.37	111.88	23.38	234.24	37.76	9 767.39	1.29	132.09	225.04	186.96
PM050－42－1RZ－15	0.85	1.34	2.86	0.38	3.83	5.30	0.42	28.11	10.50	125.94	46.62	210.90	42.50	460.72	75.75	9 614.98	0.36	6.92	29.84	54.63
PM050－42－1RZ－16	16.72	0.15	16.24	0.11	2.05	3.53	0.20	23.68	7.52	100.14	37.67	175.11	35.55	392.96	58.97	10 642.43	6.98	60.52	129.37	242.53
PM050－42－1RZ－17	1.22	1.19	6.42	0.21	1.39	2.23	0.32	13.95	5.00	58.73	20.69	103.68	20.35	213.51	33.87	9 671.51	0.71	27.15	70.65	112.55
PM050－42－1RZ－18	1.33	0.13	4.05	0.24	3.98	7.07	0.45	43.72	14.79	188.83	67.11	305.54	62.63	627.84	99.63	10 723.87	0.77	15.88	111.25	153.68
PM050－42－1RZ－19	1.17	36.24	86.96	12.42	59.32	22.21	1.32	51.54	14.40	159.86	54.37	244.61	48.07	498.75	80.81	9 910.76	0.70	8.91	56.02	79.51
PM050－42－1RZ－20	1.97	0.04	6.02	0.09	3.70	7.80	0.57	42.88	14.40	187.60	63.43	285.50	58.75	588.38	92.33	10 894.42	0.98	20.52	147.37	191.60
PM050－42－1RZ－21	1.78	221.37	534.17	76.81	385.24	91.67	2.91	141.25	26.60	256.29	75.94	321.11	57.95	583.24	90.39	9 597.41	1.33	25.22	180.84	199.53
PM050－42－1RZ－22	1.09	0.74	4.01	0.60	9.72	13.24	0.81	72.06	24.24	287.85	99.24	455.35	87.97	921.13	142.64	10 543.37	0.89	16.09	114.70	162.02
PM050－42－1RZ－23	1.08	0.00	3.83	0.09	1.09	3.09	0.46	17.14	5.96	76.48	28.20	131.77	26.01	275.92	44.12	10 092.24	0.76	9.46	61.44	94.22
PM050－42－1RZ－24	1.28	0.03	2.53	0.12	2.41	4.24	0.40	27.70	9.12	110.07	38.92	176.73	35.29	381.14	61.98	9 974.13	0.60	7.69	48.59	78.90
PM050－42－1RZ－25	2.77	0.00	6.20	0.15	1.86	4.92	0.77	32.49	11.45	146.18	53.71	251.04	49.36	523.92	80.24	11 700.37	1.11	18.26	175.24	180.99
PM050－42－1RZ－26	1.65	0.00	3.33	0.06	0.75	2.07	0.25	16.59	5.85	82.81	30.00	145.66	30.54	333.38	54.43	11 466.28	0.82	8.91	48.84	95.26
PM050－42－1RZ－27	2.33	3.24	13.07	0.82	3.05	2.78	0.12	12.99	4.64	65.43	25.76	118.40	24.01	266.97	42.46	10 064.42	1.11	17.56	80.45	142.29
PM050－42－1RZ－28	0.76	0.17	2.93	0.20	5.28	9.35	0.60	52.44	18.42	220.52	79.25	348.60	69.10	709.00	113.67	10 578.02	0.68	15.59	92.18	136.75
PM050－42－1RZ－29	1.02	0.01	2.09	0.09	1.51	4.60	0.33	28.21	8.89	119.50	43.12	194.56	39.75	435.23	68.90	10 305.08	0.44	7.30	43.53	73.32
PM050－42－1RZ－30	2.50	0.01	6.28	0.11	4.04	7.20	0.41	45.98	15.71	197.94	71.01	323.28	64.59	665.84	103.28	11 138.77	0.97	21.29	151.43	206.53



a. U/Yb－w(Y)图解；b. Th/Yb－w(Y)图解；c. $(Nb/Pb)_N$－Eu/Eu* 图解；d. Nb/Hf－Th/U 图解；e. Hf/Th－Th/Nb 图解；f. U/Yb－Nb/Yb 图解。a、b 据文献[21]修改；c—f.据文献[22]修改。

图 7　钾质斑脱岩锆石微量元素图解

Fig 7　Zircon trace element diagram of K-bentonites

认为晚奥陶世多次平流层火山喷发与此次大灭绝有着密不可分的联系。龚清[31]通过汞同位素及主微量地球化学的研究认为大规模的火山作用是导致当时极端气候及生物灭绝的驱动因素之一。也有学者研究认为晚奥陶世凯迪阶—赫南特阶界线附近火山温室气体的喷发导致深水低氧带的扩散及生产力的崩塌，由此造成生物的灭绝[7]；同时，华南五峰组中多层斑脱岩的发现，也表明二者间存在一定的关系。

然而，近期却有学者对晚奥陶世生物大灭绝提出了新的认识。Jing 等[32]通过古地磁做出的最新

研究成果表明,奥陶纪末在450～440 Ma之间地球发生过一次约50°的真极移事件,并通过重建该时期古地理格局很好地解释了奥陶纪末冰川发育的过程及成因,提出真极移引起的快速的地理环境变化造成了奥陶纪末的生物大灭绝。本次工作在石门坎剖面五峰组中发现多层斑脱岩,但厚度极薄,均在1～3 cm,而在龙马溪组中同样发现多层斑脱岩,最大厚度可达15 cm,综合来看,志留系龙马溪组中沉积的斑脱岩厚度远大于奥陶系五峰组中斑脱岩的厚度。王玉满等[33]在川北—鄂西地区多条剖面的斑脱岩研究中也发现,龙马溪组中发育的斑脱岩厚度及层数远高于五峰组。晚奥陶世生物大灭绝期间虽然发生了火山活动,但是在进入志留纪后,随着全球气候持续回暖及海平面的上升,笔石及腕足等生物逐渐复苏并繁盛起来,这期间较晚奥陶世更为强烈的火山活动却并未造成生物的灭绝,因此,本文认为晚奥陶世生物大灭绝与火山活动没有必然的联系。

6 结论

1)在云南省永善县石门坎剖面晚奥陶世—早志留世地层中共发现11层厚度大于1 cm的斑脱岩。通过锆石U-Pb测年,分别限定了晚奥陶世—早志留世地层部分组段界线年龄:宝塔组与涧草沟组界线年龄(449.9±4.3)Ma、五峰组与龙马溪组界线年龄(443.8±1.0)Ma、龙马溪组一段与龙马溪组二段界线年龄(438.5±3.5)Ma、新滩组与黄葛溪组界线年龄(437.8±5.6)Ma。系统建立了上扬子地区晚奥陶世—早志留世年代学框架,为区域对比研究提供了重要依据。

2)晚奥陶世—早志留世斑脱岩来源于华夏陆块与扬子陆块汇聚背景下的俯冲-碰撞造山环境,可能是广西运动在该区的表现。

3)晚奥陶世生物大灭绝虽然是由温度的急剧变化造成的,但其变化机理与火山活动没有必然的联系。

参考文献(References):

[1] 苏文博,李志明,史晓颖,等. 华南五峰组—龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系:两个地史转折期板块构造运动的沉积响应[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):82-95.
Su Wenbo, Li Zhiming, Shi Xiaoying, et al. K-Bentonites and Black Shales from the Wufeng-Longmaxi Formations(Early Paleozoic, South China) and Xiamaling Formation (Early Neoproterozoic, North China): Implications for Tectonic Processes During Two Important Transitions[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 82-95.

[2] 周明忠,罗泰义,黄智龙,等. 钾质斑脱岩的研究进展[J]. 矿物学报, 2007, 27(3): 351-359.
Zhou Mingzhong, Luo Taiyi, Huang Zhilong, et al. Advances in Research in K-Bentonite[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2007, 27(3): 351-359.

[3] 胡艳华,孙卫东,丁兴,等. 奥陶纪—志留纪边界附近火山活动记录:来华南周缘钾质斑脱岩的信息[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3298-3308.
Hu Yanhua, Sun Weidong, Ding Xing, et al. Volcanic Event at the Ordovician-Silurian Boundary: The Message from K-Bentonite of Yangtze Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3298-3308.

[4] Bergström S M, Huff W D, Kolata D R. The Lower Silurian Osmundsberg K-Bentonite[J]. Geological Magazine, 1998, 135: 1-13.

[5] Bergström S M, Huff W D, Saltzman M R, et al. The Greatest Volcanic Ash Falls in the Phanerozoic: Millbrig and Kinnekulle K-Bentonites [J]. The Sedimentary Record, 2004, 2: 4-7.

[6] Jones D S, Martini A M, Fike D A, et al. A Volcanic Trigger for the Late Ordovician Mass Extinction? Mercury Data from South China and Laurentia[J]. The Geological Society of America, 2017, 45: 631-634.

[7] David B, Stephen E. Grasby Late Ordovician Mass Extinction Caused by Volcanism, Warming, and Anoxia, not Cooling and Glaciation [J]. Geology, 2020, 48(8): 777-781.

[8] 舒逸,陆永潮,刘占红,等. 海相页岩中斑脱岩发育特征及对页岩储层品质的影响:以涪陵地区五峰组—龙马溪组一段为例[J].石油学报, 2017, 38(12): 1371-1380.
Shu Yi, Lu Yongchao, Liu Zhanhong, et al. Development Characteristics of Bentonite in Marine Shale and Its Effect on Shale Reservoir Quality: A Case Study of Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation, Fuling Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1371-1380.

[9] 熊国庆,王剑,李园园,等. 大巴山西段上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组斑脱岩锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(2): 46-58.
Xiong Guoqing, Wang Jian, Li Yuanyuan, et al.

Zircon U－Pb Dating and Geological Significance of the Bentonites from the Upper Ordovician Wufeng Formaiton and Lower Silurian Longmaxi Formation in Western Daba Mountains[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，2017，37(2)：46－58.

[10] 王玉满，李新景，王皓，等. 四川盆地东部上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组斑脱岩发育特征及地质意义[J].石油勘探与开发，2019，46(4)：653－665.
Wang Yuman，Li Xinjing，Wang Hao，et al. Developmental Characteristics and Geological Significance of the Bentonite in the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in Eastern Sichuan Basin，SW China[J]. Petroleum Exploration and Development，2019，46(4)：653－665.

[11] Yang F，Sun J G，Wang Y，et al. Geochronology and Geochemistry of Weilasituo Sn-Polymetallic Deposit in Inner Mongolia，China[J]. Minerals，2019，9(2)：104.

[12] Liu Y S，Gao S，Hu Z C，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，2010，51：537－571.

[13] 谢尚克，汪正江，王剑，等. 湖南桃源郝坪奥陶系五峰组顶部斑脱岩 LA－ICP－MS 锆石 U－Pb 年龄[J].沉积与特提斯地质，2012，32(4)：65－69.
Xie Shangke，Wang Zhengjiang，Wang Jian，et al. LA－ICP－MS Zircon U－Pb Dating of the Bentonites from the Uppermost Part of the Ordovician Wufeng Formation in the Haoping Section，Taoyuan，Hunan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，2012，32(4)：65－69.

[14] 熊国庆，王剑，李园园，等. 南大巴山东段上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组钾质斑脱岩锆石 U－Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质学报，2019，93(4)：843－864.
Xiong Guoqing，Wang Jian，Li Yuanyuan，et al. Zircon U－Pb Dating of K-Bentonite from Late Ordovician Wufeng Formation and Earlier Silurian Longmaxi Formation in the Eastern Section of South Dabashan and Its Tectonic Signification[J]. Acta Geologica Sinica，2019，93(4)：843－864.

[15] 叶飞，潘文，左勇，等. 扬子地台东南缘上奥陶统五峰组斑脱岩锆石 U－Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报，2019，38(10)：1718－1725.
Ye Fei，Pan Wen，Zuo Yong，et al. Zircon U－Pb Age of Bertonite of Upper Ordovician Wufeng Formation in Southeast Yangtze Platform and Its Geological Significance[J]. Geological Bulletin of China，2019，38(10)：1718－1725.

[16] Ling M X，Zhan R B，Wang G X，et al. An Extremely Briefand Ordovician Mass Extinction Linked to Abrupt Onset of Glaciation[J]. Solid Earth Science，2019，4(4)：190－198.

[17] 苏文博，何龙清，王永标，等. 华南奥陶—志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层[J]. 中国科学 D 辑：地球科学，2003，32(3)：207－219.
Su Wenbo，He Longqing，Wang Yongbiao，et al. Bentonite and High-Resolution Integrated Strata at the Bottom of Wufeng Formation and Longmaxi Formation of Ordovician-Silurian in South China[J]. Science in China Series D：Earth Sciences，2003，32(3)：207－219.

[18] 胡艳华，周继彬，宋彪，等. 中国湖北宜昌王家湾剖面奥陶系顶部斑脱岩 SHRIMP 锆石 U－Pb 定年[J]. 中国科学 D 辑：地球科学，2008，38(1)：72－77.
Hu Yanhua，Hu Jibin，Song Biao，et al. SHRIMP Zircon U－Pb Dating of the Top of Ordovician Pegmatite in Wangjiawan Section，Yichang，Hubei Province，China[J]. Science in China Series D：Earth Sciences，2008，38(1)：72－77.

[19] 赵志丹，刘栋，王青，等. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J].地学前缘，2018，25(6)：124－135.
Zhao Zhidan，Liu Dong，Wang Qing，et al. Zircon Trace Elements and Their Use in Probing Deep Processes[J]. Earth Science Frontiers，2018，25(6)：124－135.

[20] 胡彩霞，袁万明. 不同成因类型的锆石特征及年代学意义[J].中国矿业，2021，30(增刊 1)：204－207.
Hu Caixia，Yuan Wanming. Zircon Characteristics of Different Genetic Types and Their Geochronological Significance[J]. China Mining Magazine，2021，30(Sup.1)：204－207.

[21] Grimes C B，John B E，Kelemen P B，et al. Trace Element Chemistry of Zircons from Oceanic Crust：A Method for Distinguishing Detrital Zircon Provenance[J]. Geology，2007，35(7)：643－646.

[22] Yang J H，Cawood P A，Du Y S，et al. Large Igneous Province and Magmatic Arc Sourced Permian-Triassic Volcanogenic Sediments in China[J]. Sedimentary Geology，2012，261/262：120－131.

[23] 杨颖,马昌前,王世明. 宜昌上奥陶统钾质斑脱岩锆石U-Pb年龄、Lu-Hf同位素特征及其源区示踪意义[J].地质学报, 2019, 93(12): 3183-3196.
Yang Ying, Ma Changqian, Wang Shiming. Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotope of the Upper Ordovician K-Bentonites in Yichang and Their Trace Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(12): 3183-3196.

[24] 葛祥英,牟传龙,余谦,等. 云南大关新地2井奥陶—志留纪之交钾质斑脱岩岩石地球化学特征分析[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 911-924.
Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Yu Qian, et al. Petrology and Geochemistry of the K-Bentonites at the Ordovician-Silurian Transition in XD2 Well, Daguan, Yunan Province[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 911-924.

[25] 马昌前,佘振兵,张金阳,等. 地壳根、造山热与岩浆作用[J]. 地学前缘,2006,13(2): 130-139.
Ma Changqian, She Zhenbing, Zhang Jinyang, et al. Crustal Roots, Orogenic Heat and Magmatism[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 130-139.

[26] 闫全人,王宗起,陈隽璐,等. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP年代及其意义[J]. 地质学报,2007, 81(4): 488-502.
Yan Quanren, Wang Zongqi, Chen Juanlu, et al. Tectonic Setting and SHRIMP Age of Volcanic Rocks in the Xieyuguan and Caotangou Groups: Implications for the North Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(4): 488-502.

[27] 覃小锋,王宗起,宫江华,等.云开地块北缘加里东期中-基性火山岩的厘定:钦-杭结合带南西段早古生代古洋盆存在的证据[J].岩石学报, 2017, 33(3): 791-809.
Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Gong Jianghua, et al. The Confirmation of Caledonian Intermediate-Mafic Volcanic Rocks in Northern Margin of Yunkai Block: Evidence for Early Paleozoic Paleo-Ocean Basin in Southwestern Segment of Qinzhou-Hangzhou Joint Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(3): 791-809.

[28] 戎嘉余,黄冰. 华南奥陶纪末生物大灭绝的肇端标志:腕足动物稀少贝组合(Manosia Assemblage)及其穿时分布[J]. 地质学报,2019,93(3): 509-527.
Rong Jiayu, Huang Bing. An Indicator of the Onset of the End Ordovician Mass Extinction in South China: The Manosia Brachiopod Assemblage and Its Diachronous Distribution[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 509-527.

[29] 何龙,王云鹏,陈多福. 四川盆地晚奥陶世有机碳、氮同位素异常及其古环境意义[J]. 地球化学,2021,50(6): 623-634.
He Long, Wang Yunpeng, Chen Duofu. Organic Carbon and Nitrogen Isotope Anomalies During the Late Ordovician in Sichuan Basin, and Their Implications for the Palaeoenvironment[J]. Geochimica, 2021, 50(6): 623-634.

[30] 胡东平. 晚奥陶—早志留世海洋的碳、硫、锶和汞循环[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.
Hu Dongping. C, S, Sr, and Hg Cycles in the Late Ordovician-Early Silurian Oceans[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

[31] 龚清. 中国华南地区奥陶纪—志留纪之交汞异常沉积对火山作用和灭绝事件关系的指示[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2018.
Gong Qing. Mercury Spikes Suggest Volcanic Driver of the Ordovician-Silurian Mass Extinction in South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.

[32] Jing X G, Yang Z Y, Tong Y B, et al. Ordovician-Silurian True Polar Wander as a Mechanism for Severe Glaciation and Mass Extinction[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7941.

[33] 王玉满,王红岩,沈均均,等. 川北—鄂西地区下志留统龙马溪组上端厚层斑脱岩的新发现及地质意义[J]. 石油学报,2020, 41(11): 1309-1323.
Wang Yuman, Wang Hongyan, Shen Junjun, et al. A New Discovery and Geological Significance of Thick-Layered Bentonites in the Upper Member of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Northern Sichuan-Western Hubei Area[J]. Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1309-1323.