



扬子板块西缘下志留统龙马溪组底部斑脱岩研究 ——锆石 U-Pb 测年、微量元素特征及地质意义

王万能, 庞占基, 王浩宇, 王东晖, 于一帆

中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650000

摘 要: 奥陶系—志留系之交斑脱岩分布广泛, 且发育数层, 是研究该时期地层年代学、地层对比、事件地层及生物大灭绝的良好载体。通过对扬子板块西缘永善地区上奥陶统一志留统龙马溪组底部地层中的斑脱岩进行锆石 U-Pb 测年, 获得年龄加权平均值 443.5 ± 1.7 Ma, 限定了地层的沉积年龄, 为扬子板块西缘奥陶系—志留系火山喷发事件及地层年代学研究提供了较可靠的依据, 也为扬子板块周缘奥陶系—志留系高分辨率地层格架的建立提供基础信息。锆石微量元素特征显示其具有 I 型花岗岩类特征, 形成于岩浆弧或造山带。晚奥陶世—早志留世多期次、高频率的火山活动可能是造成生物大灭绝的主导因素。

关键词: 扬子板块; 斑脱岩; 锆石 U-Pb 年龄; 微量元素; 生物大灭绝

BENTONITES IN THE BOTTOM OF LOWER SILURIAN LONGMAXI FORMATION ON THE WESTERN MARGIN OF YANGTZE PLATE: Zircon U-Pb Age, Trace Element Characteristics and Geological Implication

WANG Wan-neng, PANG Zhan-ji, WANG Hao-yu, WANG Dong-hui, YU Yi-fan

Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Kunming 650000, China

Abstract: Bentonites are widely distributed and developed in several layers in the Ordovician-Silurian boundary, which is of great significance for the study of stratigraphic chronology, stratigraphic correlation, event stratigraphy and mass extinction in the period. The zircon U-Pb dating of bentonites in the bottom of Upper Ordovician-Lower Silurian Longmaxi Formation in Yongshan area on the western margin of Yangtze Plate yields the weighted average age of 443.5 ± 1.7 Ma, which defines the sedimentary age of the strata and provides a reliable basis for the study of Ordovician-Silurian volcanic eruption event and stratigraphic chronology on the western margin of Yangtze Plate, as well as basic information for the establishment of Ordovician-Silurian high-resolution stratigraphic framework on the periphery of Yangtze Plate. The trace element characteristics of zircon show the features of I-type granite formed in magmatic arc or orogenic belt. The multi-stage and high-frequency volcanic activity in the Late Ordovician-Early Silurian is possibly the dominant factor causing the mass extinction.

Key words: Yangtze Plate; bentonite; zircon U-Pb age; trace element; mass extinction

收稿日期: 2022-08-18; 修回日期: 2022-10-26. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“滇中楚雄云龙镇等 4 幅 1:5 万区域地质调查”(DD20220987).

作者简介: 王万能(1995—), 男, 主要从事区域地质调查工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//1922637474@qq.com

通信作者: 王东晖(1995—), 男, 主要从事矿产地质调查工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//122694975@qq.com

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,它不仅能够记录地史上的火山活动,也提供了一种等时性的标志层,可以应用于地层对比研究。另外由于其含有锆石等可以获得绝对同位素年龄的斑晶矿物,因此它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^[1]。奥陶纪—志留纪钾质斑脱岩在全球广泛分布,在美洲、欧洲及中国南部等地区均有发育。国外对该时期斑脱岩的研究相对较早,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很多成果^[1-5]。

中国对钾质斑脱岩的研究起步较晚,而且对斑脱岩的研究主要集中在华南地区。有关学者^[6-10]对其都有不同程度的研究。胡艳华等^[1]认为钾质斑脱岩原岩以中酸性岩石为主,形成的主要构造环境为与俯冲作用相关的火山弧环境;杨颖等^[11]研究认为华南斑脱岩来自扬子板块北缘秦岭地区的火山爆发;苏文博等^[12]在王家湾剖面五峰组顶部和龙马溪组底部发现多层钾质斑脱岩,并与贵州桐梓的斑脱岩进行了生物地层、层序地层的综合对比,表明奥陶纪—志留纪之交至少在上扬子板块附近,曾经发生过大规模的火山喷发活动,并且可以一一对应。

同时期扬子板块周缘也沉积了数层斑脱岩。熊国庆等^[13-14]在扬子板块北缘、叶飞等^[15]在扬子板块东南缘做了一些同位素年龄及地球化学研究,但对于扬子板块西缘钾质斑脱岩的相关研究报道较少。葛祥英等^[16]通过对扬子板块西缘钾质斑脱岩的研究认为其构造背景也多源于岛弧环境,原岩具中酸性特征。

本研究对扬子板块西缘云南省永善县水竹乡殷家湾上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组地层剖面钾质斑脱岩采样,并进行锆石 U-Pb 同位素测年,获得了较精准的同位素年龄(443.5 ± 1.7 Ma),丰富了该区域奥陶系—志留系之交同位素年龄数据,可为建立扬子板块西缘界线附近高分辨率的综合年代地层格架提供同位素年代学依据。同时,晚奥陶世发生了重大的生物灭绝事件,本次对斑脱岩的研究,有助于了解晚奥陶世生物大灭绝与火山喷发事件的关系。

1 地质背景及地层

研究区大地构造位于扬子板块西缘,黔中隆起西北端(图 1)。区内出露古生代和中生代地层,从老到新

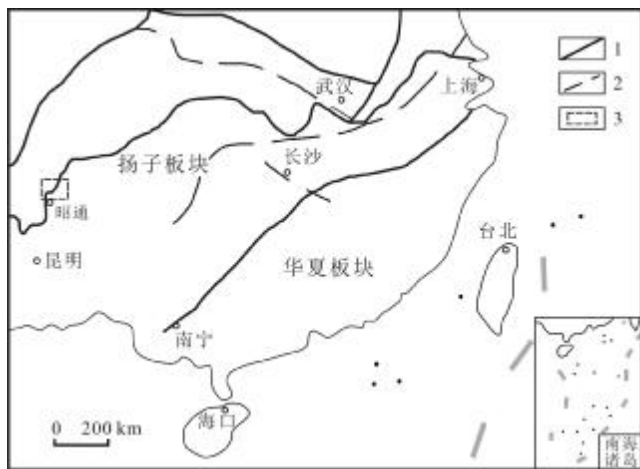


图 1 研究区大地构造位置图

(据文献[9]改编)

Fig. 1 Tectonic location map of the study area

(Modified from Reference [9])

1—构造单元界线(boundary of tectonic unit); 2—相区界线(boundary of facies); 3—研究区位置(study area)

依次为寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系。本次研究的斑脱岩采自云南省永善县水竹乡殷家湾剖面龙马溪组底部。龙马溪组底部主要岩性为黑色碳质页岩及钙质粉砂岩,发育灰岩结核及多层斑脱岩(图 2)。

2 样品采集及分析方法

本研究斑脱岩样品采自龙马溪组底部,厚 2~4 cm,颜色为深灰色,风化后呈灰白色、灰黄色,遇水易膨胀,手感光滑细腻,镜下鉴定结果显示其矿物成分主要为蒙脱石(图 3),含量 90%以上。蒙脱石颗粒细小,呈纤维状、聚片状及球粒状,浅黄绿色、淡粉红色。其次为少量黄铁矿及火山碎屑成分。为保证样品新鲜、分析结果有效,采样时剔除风化层及围岩。

锆石 U-Pb 定年使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS),在北京锆年领航科技有限公司完成。激光剥蚀平台为 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Applied Spectra,美国),配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent,美国)。锆石样品固定

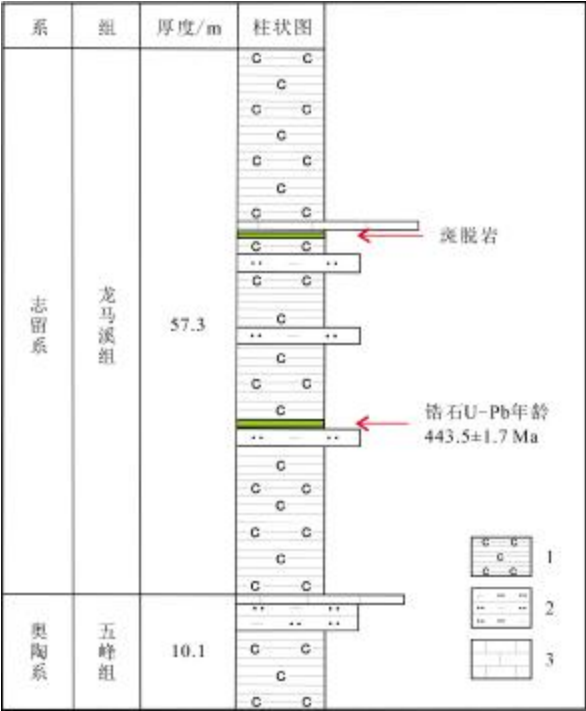


图 2 五峰组-龙马溪组剖面柱状图

Fig. 2 Stratigraphic sequences and sampling horizons of Wufeng and Longmaxi formations

1—炭质页岩(carbonaceous shale); 2—泥质粉砂岩(argillaceous siltstone); 3—灰岩(limestone)

在环氧树脂靶上,抛光后在超纯水中超声清洗,分析前用分析级甲醇擦拭样品表面.采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约 0.3 μm),以去除样品表面可能的污染.本次实验在束斑直径 30 μm、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2 J/cm 的激光条件下分析样

品.数据处理采用 Iolite 程序,锆石 91500 作为校正标样, GJ-1 作为监测标样,每隔 10~12 个样品点分析 2 个 91500 标样及一个 GJ-1 标样.通常采集 20 s 的气体空白, 35~40 s 的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正.以 NIST610 作为外标, 91Zr 作为内标计算微量元素含量.利用 Isoplot 软件计算锆石样品的 U-Pb 年龄并绘制对应图表及计算年龄加权平均值.

3 测试结果

阴极发光图像显示,样品锆石晶形较好,多为自形长柱状晶体,部分为短柱状,柱状长宽比为 2:3,锆石粒度多在 80~150 μm 之间,且具典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构,属于岩浆锆石(图 4).根据测年结果,锆石的 Th/U 比值绝大多数集中在 0.4~0.8,平均值 0.59,且具有很好的相关性(图 5),显示为岩浆锆石的特征.

PM002a-5 样品共测试 50 个点,有 12 个测试点的测年结果明显偏大,可能为继承性锆石,未纳入年龄加权计算.其中最老的一颗锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 686\pm38\ \text{Ma}$,谐和度 106%,其余测试点均位于谐和线上(图 6). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $443.5\pm1.7\ \text{Ma}$ (图 7),且谐和度很高,均位于 90%~110%之间,绝大多数位于 98%~102%之间,最年轻锆石(2 颗) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $438\pm4\ \text{Ma}$,谐和度达 100%.同位素分析结果如表 1(扫描首页 OSID 二维码可见).

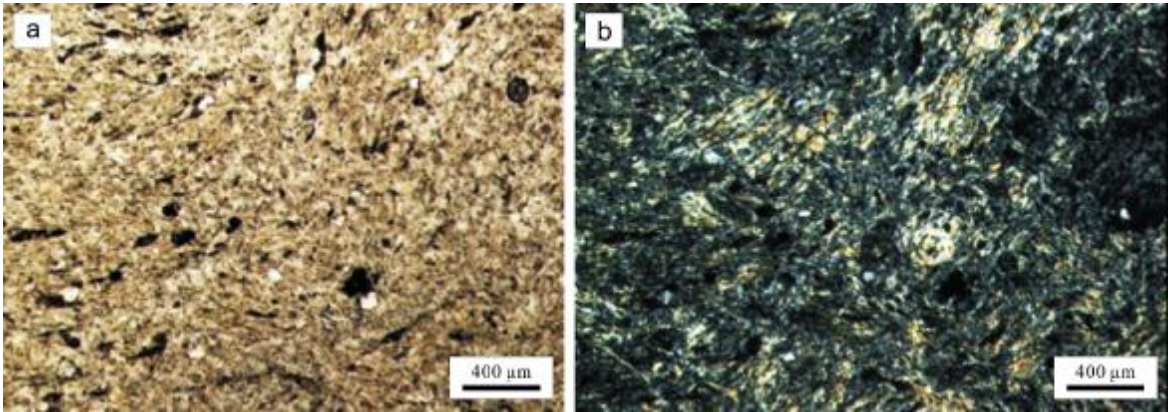


图 3 斑脱岩镜下照片

Fig. 3 Microphotographs of bentonite

a—单偏光(plane-polarized light); b—正交偏光(cross-polarized light)

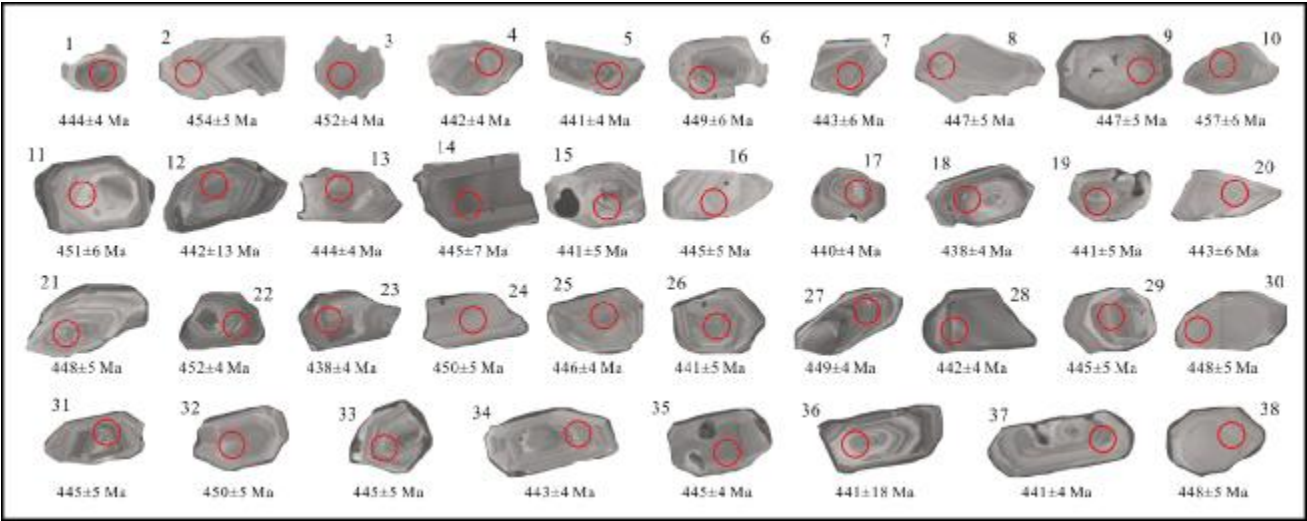


图 4 锆石阴极发光图
Fig. 4 CL images of the selected zircons

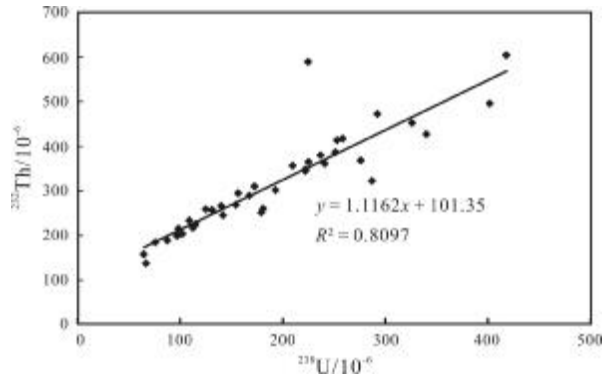


图 5 斑脱岩锆石 Th、U 含量相关性
Fig. 5 Correlation between Th and U contents in bentonite

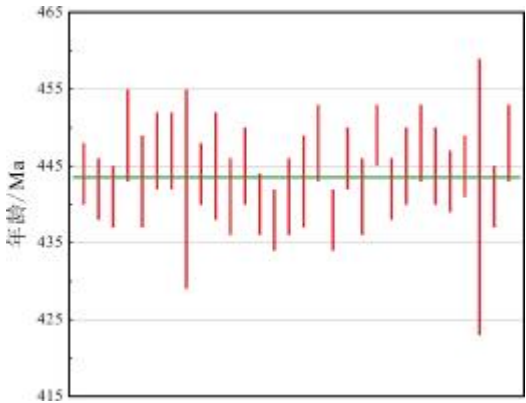


图 7 锆石 U-Pb 加权平均图
Fig. 7 U-Pb weighted average diagram of zircons

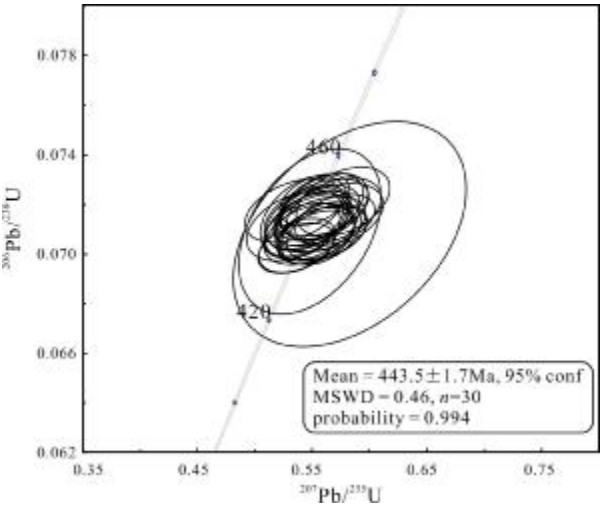


图 6 锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 6 Zircon U-Pb concordia plot

4 讨论

4.1 火山活动时间及地层沉积年龄的限定

云南省永善县殷家湾剖面所测斑脱岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 443.5 ± 1.7 Ma, 该年龄是扬子板块西缘获得的高精度锆石 U-Pb 年龄, 与国际地层委员会 2022 年发布的奥陶系 - 志留系界线年龄 443.8 ± 1.5 Ma 较为接近, 而且与扬子板块周缘已报道的年龄大体一致, 如: 扬子板块北缘大巴山西段 445.1 Ma^[13], 南大巴山东段 445.5 Ma、 450.9 Ma 和 447.9 Ma^[14], 扬子板块东南缘思南地区 449 Ma^[15], 扬子板块西缘万和乡 442.67 Ma^[17], 说明扬子地区发生过多期次的火山活动. 作为斑脱岩的原始沉积年龄不仅间接限定了五峰

组—龙马溪组地层沉积年龄,为扬子板块西缘奥陶—志留系界线附近火山喷发事件、地层年代学提供了依据,并为建立扬子板块周缘奥陶系—志留系界线附近高分辨的综合年代地层格架提供了同位素年代学依据。

4.2 锆石微量元素特征及大地构造背景

晚奥陶世—早志留世的钾质斑脱岩全球广泛分布,且沉积层数较多。苏文博等^[12]在贵州桐梓和湖北宜昌两条相距近 500 km 的剖面上,在五峰组—龙马溪组底部均发现 20 余层斑脱岩。关于钾质斑脱岩的来源,一直未有定论。苏文博等^[12]认为扬子板块周缘的钾质斑脱岩与扬子板块和华夏板块的汇聚有关;杨颖等^[11]认为更可能与古特提斯洋的俯冲有关;甚至有观点认为是早古生代北祁连造山带的火山喷发或者晚奥陶世广西运动早期扬子板内或边缘拉张所形

成的构造—岩浆产物^[18]。

锆石的微量元素在沉积成岩过程中和表生环境下很稳定,常被用于判断岩浆岩的岩浆亲缘性及其形成的大地构造背景^[19-20]。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,可以通过微量元素变化图解来区分锆石源岩及岩浆形成的大地构造背景。

在 Y-U (图 8a) 和 Yb/Sm-Y (图 8b) 图解中,明显看出所有样品的数据点均落入花岗岩区;赵志丹等^[21]认为应用花岗岩全岩元素地球化学判别岩石类型和构造环境的方法,在锆石中也有系统的显示。据此结合 Th/Pb 图解(图 9)可以看出,数据点绝大多数落在 I 型花岗岩区内,仅个别落入 S 型花岗岩类区中或其他区域。推断其源岩为 I 型花岗岩类。

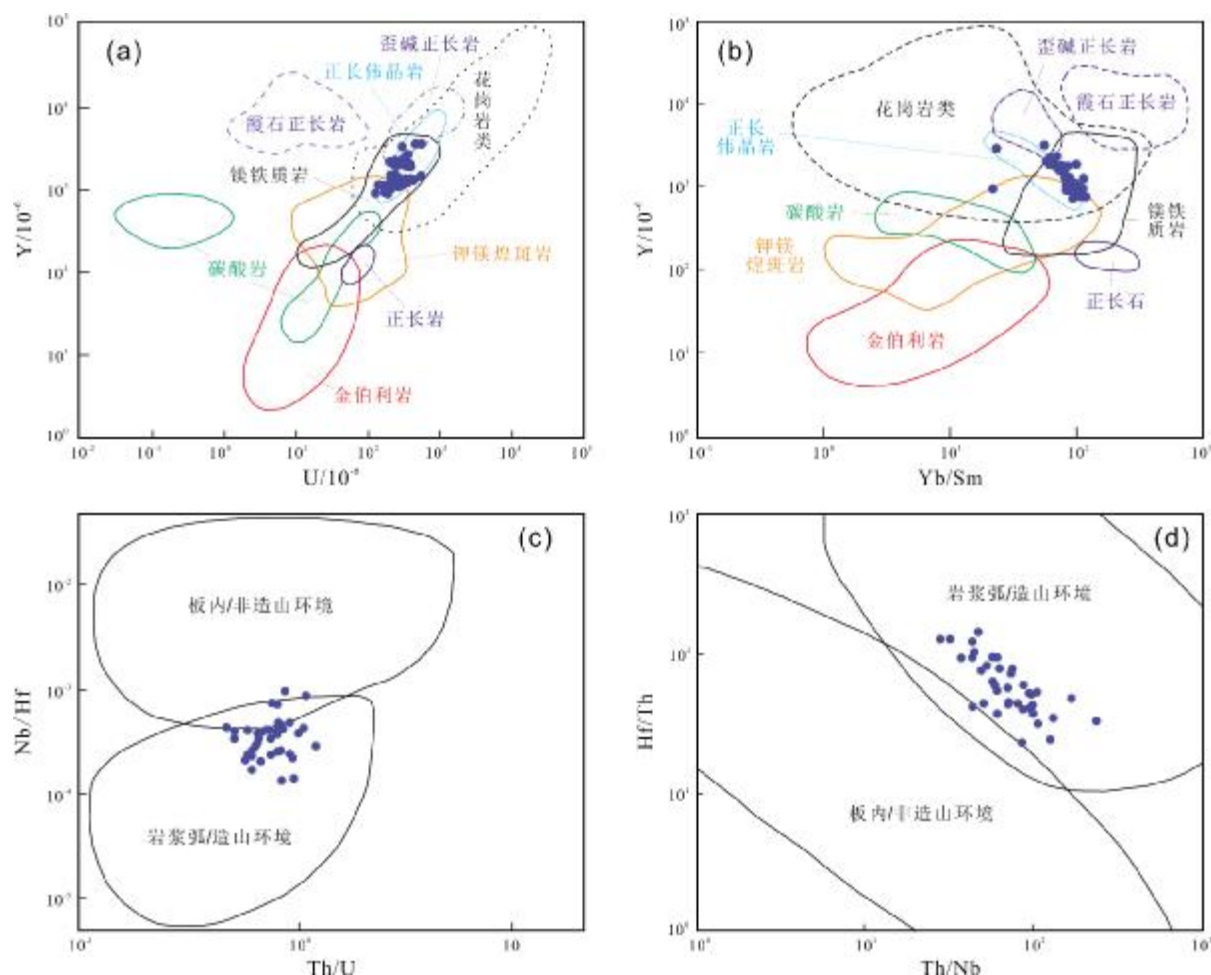


图8 殷家湾斑脱岩锆石微量元素特征判别图

(底图据文献[19-21])

Fig. 8 Trace element discrimination diagrams of zircons from Yinjiawan bentonite

(After References [19-21])

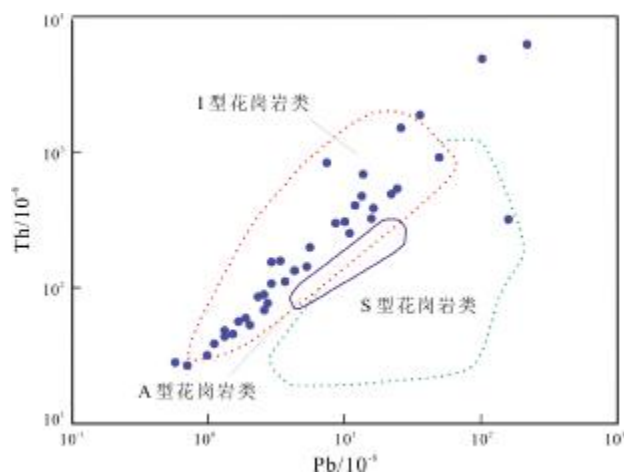


图9 花岗岩类锆石微量元素成分差异图解

(底图据文献[21])

Fig. 9 Trace element plots for zircons from I-, S- and

A-type granites

(After Reference [21])

在 Th/U-Nb/Hf (图 8c) 和 Th/Nb-Hf/Th (图 8d) 图解中, 样品数据点绝大多数落入岩浆弧/造山带环境内, 仅个别落入板内/非造山环境, 说明其源岩形成的地构造背景为岩浆弧或造山带。

晚奥陶世—早志留世, 扬子板块北缘早古生代秦岭洋闭合过程中板块俯冲发育岛弧岩浆活动。随着板块持续的俯冲消减, 在秦岭造山带内发现 450 Ma 左右的岛弧火山岩^[22-25]。本研究在扬子板块西缘滇东北地区龙马溪组底部斑脱岩中获得的 443.5 ± 1.7 Ma 与秦岭造山带中奥陶纪岩浆弧的形成时间同步。该层斑脱岩的形成可能与古秦岭洋壳向北的俯冲有关。

4.3 生物大灭绝与火山事件的关系

奥陶纪末期发生了地球上第二次生物大灭绝事件, 其诱发因素是多方面的, 而今地外事件的因素逐渐趋于弱化, 主流思想集中在冰川事件、火山事件、缺氧和全球升温。前人认为此次生物灭绝是 5 次灭绝事件中唯一一次与降温有关的灭绝, 其他 4 次都与大火成岩省和全球变暖有关, 并将此次生物大灭绝分为两幕: 第一幕发生在凯迪阶到赫南特阶早期, 与冈瓦纳冰期有关, 导致全球温度降低, 海平面下降; 第二幕发生在赫南特阶顶部, 全球温度上升, 冰川融化, 海平面快速上升。冰川的发育、海平面的下降及海水的降温诱发了暖水生物及原浅水底栖生物集群灭绝^[26-27]; 富氧、凉水环境为 Hirnantia 动物群提供了迅速发展的适宜条

件^[17]。此后, 相对活跃的火山作用引发了使全球变暖的“温室效应”, 使海平面快速回升、海水水温回暖、海底缺氧, 从而最终导致 Hirnantia 动物群的灭绝^[26]。近年来随着对全球范围火山事件的研究, 认为斑脱岩则是该次生物灭绝直接的证据。Bond 等^[5]通过研究认为, 火山作用可能是导致生物大灭绝的原因, 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, 即生物大灭绝的第一幕, 短暂降温后赫南特阶晚期的火山再兴导致生物大灭绝的第二幕。

扬子地区发生过多期次的火山活动, 规律的火山喷发代表了扬子板块及其周边板块因地球内部层圈某种节律性的调整, 它们使得该区域的沉积基准面产生了节律性的变化, 从而影响到相对海平面的变化^[12]。因此, 笔者认为, 晚奥陶世—早志留世广泛分布的多期次火山活动可能才是导致生物大灭绝的主导因素, 大范围火山频发造成全球气候及环境等发生巨变, 最终导致生物灭绝。

5 结论

(1) 扬子板块西缘永善县水竹乡殷家湾剖面龙马溪组底部斑脱岩中获得锆石 U-Pb 年龄为 443.5 ± 1.7 Ma。该年龄代表了斑脱岩原岩的火山喷发时间, 间接限定了五峰组—龙马溪组地层的沉积年龄, 为扬子板块西缘奥陶系—志留系界线附近火山喷发事件、地层年代学提供了依据, 有助于扬子板块周缘奥陶系/志留系界线附近高分辨的综合年代地层格架的建立。

(2) 斑脱岩中锆石源岩为 I 型花岗岩, 其形成的地构造背景为岩浆弧或造山带。斑脱岩可能来源于古秦岭洋闭相关的岩浆弧环境。

(3) 奥陶纪—志留纪之交广泛分布的多期次火山活动可能是造成晚奥陶世生物大灭绝的主导因素。

参考文献 (References):

- [1] 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: 来自华南周缘钾质斑脱岩的信息[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3298–3308.
Hu Y H, Sun W D, Ding X, 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.
- [2] Bergström S M, Huff W D, Kolata D R. The Lower Silurian

- Osmundsberg K-bentonite. Part I: Stratigraphic position, distribution, and palaeogeographic significance [J]. *Geological Magazine*, 1998, 135(1): 1-13.
- [3] Bergström S M, Huff W D, Saltzman M R, et al. The greatest volcanic ash falls in the Phanerozoic: Trans-Atlantic relations of the Ordovician Millbrig and Kinnekulle K-bentonites [J]. *The Sedimentary Record*, 2004, 2(4): 4-8.
- [4] 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]. *Geology*, 2017, 45(7): 631-634.
- [5] Bond D P G, Grasby S E. Late Ordovician mass extinction caused by volcanism, warming, and anoxia, not cooling and glaciation [J]. *Geology*, 2020, 48(8): 777-781.
- [6] 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 Y H, Zhou J B, Song B, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating from K-bentonite in the top of Ordovician of Wangjiawan section, Yichang, Hubei, China [J]. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 2008, 51(4): 493-498.
- [7] 胡艳华, 刘健, 周明忠, 等. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述 [J]. *地球化学*, 2009, 38(4): 393-404.
- Hu Y H, Liu J, Zhou M Z, et al. An overview of Ordovician and Silurian K-bentonites [J]. *Geochimica*, 2009, 38(4): 393-404.
- [8] 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 S K, Wang Z J, Wang J, 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.
- [9] 罗华, 何仁亮, 潘龙克, 等. 湖北宣恩县麻阳寨晚奥陶—早志留世龙马溪组斑脱岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *资源环境与工程*, 2016, 30(4): 547-550.
- Luo H, He R L, Pan L K, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb age and its significance of Late Ordovician-Early Silurian Longmaxi bentonite [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2016, 30(4): 547-550.
- [10] 罗华, 潘龙克, 何仁亮. 湖北省麻阳寨地区晚奥陶—早志留世龙马溪组斑脱岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(1): 1-5, 12.
- Luo H, Pan L K, He R L. Geochemical characteristics and geological significance of Longmaxi Formation of Late Ordovician-Early Silurian in Mayangzhai area, Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2017, 31(1): 1-5, 12.
- [11] 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 Y, Ma C Q, Wang S M. 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.
- [12] 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)*, 2002, 32(3): 207-219.
- Su W B, He L Q, Wang Y B, et al. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the uppermost Ordovician Wufeng and the lowest Silurian Longmaxi formations in South China [J]. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 2003, 46(11): 1121-1133.
- [13] 熊国庆, 王剑, 李园园, 等. 大巴山西段上奥陶统一志留统五峰组—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 G Q, Wang J, Li Y Y, et al. Zircon U-Pb dating and geological significance of the bentonites from the Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation in western Daba Mountains [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2017, 37(2): 46-58.
- [14] 熊国庆, 王剑, 李园园, 等. 南大巴山东段上奥陶统五峰组—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 G Q, Wang J, Li Y Y, 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 significance [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 F, Pan W, Zuo Y, et al. Zircon U-Pb age of bentonite of Upper Ordovician Wufeng Formation in southeast Yangtze platform and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(10): 1718-1725.
- [16] 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 X Y, Mou C L, Yu Q, et al. Petrology and geochemistry of the K-bentonites at the Ordovician-Silurian transition in XD2 well, Daguan, Yunnan Province [J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 911-924.
- [17] Ling M X, Zhan R B, Wang G X, et al. An extremely brief end Ordovician mass extinction linked to abrupt onset of glaciation [J]. *Solid Earth Sciences*, 2019, 4(4): 190-198.
- [18] 汪隆武, 张建芳, 陈津华, 等. 浙江安吉上奥陶统钾质斑脱岩特征 [J]. *地层学杂志*, 2015, 39(2): 155-168.
- Wang L W, Zhang J F, Chen J H, et al. Characteristics of Katian (Late Ordovician) K-bentonites from Anji, Zhejiang Province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(2): 155-168.

- [19] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602–622.
- [20] 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.
- [21] 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 Z D, Liu D, Wang Q, et al. Zircon trace elements and their use in probing deep processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(6): 124–135.
- [22] 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 等. 秦岭-祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(6): 455–462.
- Chen J L, He S P, Wang H L, et al. Zircon LA-ICP MS U-Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and the Qilian orogenic belts and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(6): 455–462.
- [23] 闫全人, 陈隽璐, 王宗起, 等. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义[J]. *中国科学 D 辑 (地球科学)*, 2007, 37(10): 1301–1313.
- Yan Q R, Chen J L, Wang Z Q, et al. Geochemical characteristics, SHRIMP age and geological significance of light intrusive rocks in pillow lava of Xiaowangjian, North Qinling [J]. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 2007, 37(10): 1301–1313. (in Chinese)
- [24] 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): 488–500.
- Yan Q R, Wang Z Q, Chen J L, 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): 488–500.
- [25] 赵姣, 陈丹玲, 谭清海, 等. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 118–125.
- Zhao J, Chen D L, Tan Q H, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of basic volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, eastern Qinling Mountains and its geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 118–125.
- [26] 戎嘉余, 詹仁斌. 华南奥陶、志留纪腕足动物群的更替兼论奥陶纪末冰川活动的影响[J]. *现代地质*, 1999, 13(4): 390–394.
- Rong J Y, Zhan R B. Ordovician-Silurian brachiopod fauna turnover in South China[J]. *Geoscience*, 1999, 13(4): 390–394.
- [27] 王传尚, 陈孝红, 汪啸风. 峡区晚奥陶世地球化学异常与奥陶系-志留系之交环境变迁[J]. *地层学杂志*, 2002, 26(4): 272–279, 285.
- Wang C S, Chen X H, Wang X F. Late Ordovician chemical anomaly and the environmental changes across the Ordovician-Silurian boundary in Yangtze Gorges [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2002, 26(4): 272–279, 285.

(上接第 669 页/Continued from Page 669)

- [20] 肖霞, 王少华, 刘正宏, 等. 大兴安岭中北段奥陶系裸河组碎屑岩地球化学特征及物源环境分析[J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(3): 138–142.
- Xiao X, Wang S H, Liu Z H, et al. Geochemical characteristics and provenance environment of the clastic rocks of Ordovician Luohe Formation in the middle and northern parts of Daxinganling Mountains [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(3): 138–142. (in Chinese)
- [21] 张海华, 徐德斌, 张扩. 大兴安岭北段泥盆系泥鳅河组地球化学特征及沉积环境[J]. *地质与资源*, 2014, 23(4): 316–322.
- Zhang H H, Xu D B, Zhang K. Geochemical characteristic and sedimentary environment of the Devonian Niquhe Formation in northern Daxinganling Range [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(4): 316–322.
- [22] 刘娜. 牙克石地区泥盆系“大民山组”的解体及构造属性探讨[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- Liu N. Disintegration and tectonic attribute of Devonian “Daminshan Formation” in Yakeshi [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [23] 李亚林, 张国伟, 王成善, 等. 秦岭勉县-略阳地区的构造混杂岩及其意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 476–482.
- Li Y L, Zhang G W, Wang C S, et al. Characteristics and implication of the tectonic melanges in Mianxian-Lueyang area, Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 476–482.