

王万能, 庞占基, 李金旺, 等. 上扬子西缘五峰组-龙马溪组下段黑色岩系地球化学特征及其沉积-构造意义[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(6): 14-24.

WANG Wanneng, PANG Zhanji, LI Jinwang, et al. Geochemical characteristics of the black rock series in the Wufeng-Longmaxi Formations on the western margin of the Upper Yangze and the sedimentology and tectonic implications[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(6): 14-24.

上扬子西缘五峰组-龙马溪组下段黑色岩系地球化学特征及其沉积-构造意义

王万能, 庞占基, 李金旺, 李文辉, 袁永盛, 吴亮*, 张耀堂, 李锁明, 赵见波

(中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650100)

摘要: 上扬子西缘晚奥陶世—早志留世广泛沉积五峰组和龙马溪组的黑色岩系, 但关于其物源特征及构造背景缺乏系统性认识。为深入探讨其沉积环境、物源及构造背景, 了解该地区不同阶段物源特征及构造演化特征, 本文针对四川省筠连县金坝村剖面五峰组和龙马溪组下段黑色岩系地球化学特征进行系统分析。研究表明, 该剖面五峰组 ΣREE 平均值为 145.37×10^{-6} , 龙马溪组下段 ΣREE 平均值为 158.54×10^{-6} , 均表现为轻稀土元素相对富集, 重稀土元素亏损的特征; Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素富集, Nb、Sr 及 Ti 等高场强元素亏损, Ce 和 Eu 均表现为较弱的负异常。五峰组沉积期水体先加深后降低, 导致其氧化还原环境经历了贫氧-厌氧-贫氧的转变, 进入龙马溪组沉积期, 气候迅速回暖, 水体加深, 再次转为贫氧环境。五峰组自下而上先加快后变缓的沉积特征和较为复杂的物源反映出晚奥陶世五峰期处于扬子板块向华夏板块俯冲碰撞的弧-陆碰撞岛弧环境, 进入龙马溪期则转为稳定的构造环境, 单一的物源也表明广西运动在该地区已阶段性结束。

关键词: 上扬子西缘; 五峰组; 龙马溪组; 地球化学; 构造背景

中图分类号: P618.13; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.110

0 引言

碎屑岩作为地球表层物质循环的重要组成部分, 其成分、结构和沉积特征能够很好地记录地壳演化的重要信息。沉积物中部分微量元素和稀土元素在搬运和沉积的过程中变化极小, 可用于有效地分析地壳成分和可能的物源区。细粒碎屑沉积岩中, 陆源沉积物占比较高, 比大多数砂岩和碳酸盐岩含有更多的稀土元素, 这些稀土元素主要来自

细粒碎屑如黏土矿物等。微量元素和稀土元素在沉积岩中的分布和分配关系与沉积环境密切相关, 其赋存状态也在一定程度上受到后期成岩作用的影响。因此, 碎屑岩尤其是细粒碎屑岩的地球化学特征可以用来反演沉积物质来源、沉积过程中的古环境条件和大地构造背景^[1-4]。

上奥陶统五峰组和志留系兰多维列统龙马溪组是华南地区广泛沉积的一套黑色岩系, 也是中国南方页岩气的重要产出层位, 近年来已在滇东北地区实现页岩气的商业开发。前人对其研究主要集中在页岩层的沉积环境、储层特征及页岩气的富集机理等方面, 但是在物质来源及构造背景方面研究较少, 因此, 四川盆地西南缘构造演化史有待完善^[5-10]。

上扬子西南缘区域构造属川南低褶皱带, 断裂发育, 构造活动强烈而复杂, 前人对该区域黑色岩系物质来源及构造背景的研究认为其主要来源于

收稿日期: 2024-05-12

资助项目: 中国地质调查局项目“滇中楚雄地区云龙镇等 4 幅 1:50 000 区域地质调查”(DD20220987)

第一作者: 王万能(1995—), 男, 工程师, 主要从事区域地质调查方面的研究工作。E-mail: 1922637474@qq.com

* 通讯作者: 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工作。E-mail: 229471514@163.com

康滇古陆和黔中古陆, 形成于缺氧的被动大陆边缘^[11-16], 但研究主要集中在龙马溪组。上扬子地区晚奥陶世—志留纪经历了漫长且复杂的构造运动, 其中, 以广西运动的早期阶段(晚奥陶世—早志留世)为研究热点, 特别是晚奥陶世的构造活动尤为重要, 导致了上扬子板块西缘古地理格局由碳酸盐台地相向陆棚相的转换^[17], 因此, 系统性研究五峰组-龙马溪组物源及构造背景能够较为全面地认识上扬子西缘构造演化。王万能等^[17]通过对晚奥陶世—早志留世斑脱岩地球化学特征的研究认为, 扬子板块与华夏板块之间存在复杂的构造背景转换, 但是缺乏地层方面的地球化学证据。本文从上扬子板块西缘金珂村剖面五峰组-龙马溪组地球化学特征入手, 系统分析该时期沉积环境、物质来源及其沉积构造背景, 结合该时期区域构造运动, 探讨不同阶段的物源特征和构造背景, 为区域大地构造背景及沉积古地理演化研究提供新的证据。

1 地质概况

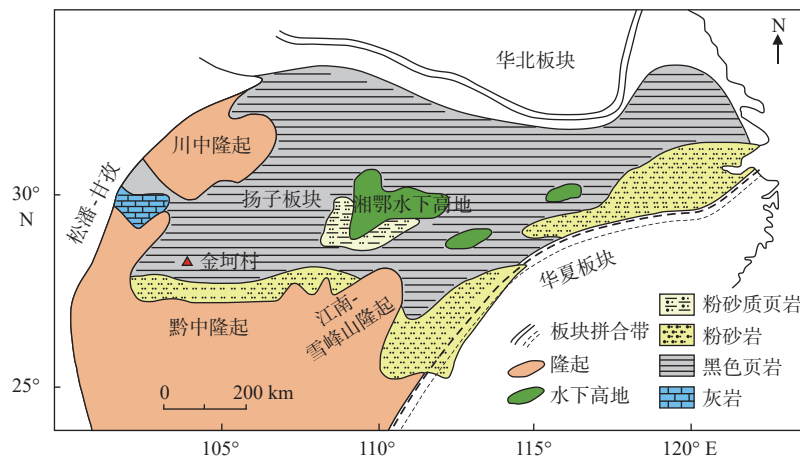
研究区地处云、贵、川三省交界区域, 位于上扬子板块西缘, 四川盆地西南缘, 靠近黔中隆起的西北端(图 1)。晚元古代的晋宁运动形成了稳定的克拉通盆地基底, 自早奥陶世开始, 扬子海域便由广阔的陆表海覆盖, 沉积了大量碳酸盐岩; 中奥陶世以后, 由于加里东运动导致川中隆起和黔中隆起不断扩大和挤压隆升, 致使中上扬子地区相对海平面下降; 进入晚奥陶世, 由于扬子板块向华夏板块的持续俯冲, 区内应力以挤压环境为主, 碳酸盐台地发生挠曲沉降, 在克拉通边缘遭受挤压

隆起, 使扬子板块南缘的黔中、雪峰山隆起发生抬升露出水面, 与西南康滇古陆相连形成滇黔桂古陆, 同时, 扬子板块西缘的川中隆起范围不断延伸, 上扬子地区被几大古陆隆起围限, 克拉通内部则为挤压拗陷盆地, 沉积水体加深, 从而在扬子板块形成“三隆围一坳”的沉积格局。随着早志留世气候回暖, 水体持续上升, 最终形成了滞留、低能、缺氧的海洋环境, 并沉积了五峰组与龙马溪组的黑色岩系^[13,18-21]。

2 样品采集及测试

样品采于四川省筠连县金珂村剖面, 共计 16 件样品, 五峰组和龙马溪组各 8 件, 采样过程中剔除表面风化岩石, 确保样品新鲜无污染(图 2)。

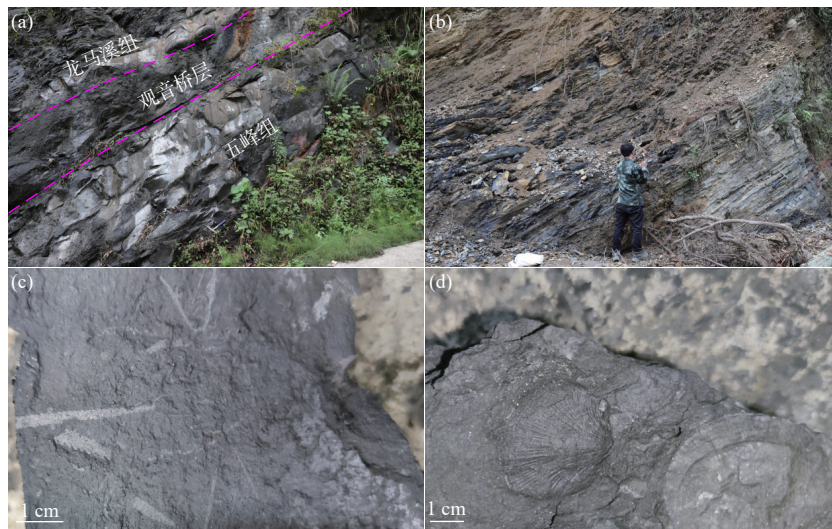
样品元素分析在中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心实验室进行测定。常量元素使用 Axios X 射线荧光光谱仪(XRF, Panalytical B.V)测试, 微量元素使用 ICP-QC 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific)和 ICP6300 电感耦合等离子体-光发射光谱仪(ICP-OES, Thermo Fisher Scientific)进行分析。样品预处理方法如下: 称岩石样品 50 mg 过 200 目筛, 经过烘干处理, 将粉末置于溶样器中; 依次加入硝酸、盐酸、氢氟酸混合, 对样品进行密封处理, 消解放置过夜; 将样品置于恒温加热板上, 在 150 °C 条件下蒸干 12 h, 用 2% 盐酸稀释, 移入干净的聚乙烯容量瓶, 定容摇匀。样品检测过程中使用标准物质作为质量监控样, 并且重复检测, 样品分析误差 < 5%(质量分数)。



据文献[21]修改

图 1 研究区大地构造位置

Fig.1 Tectonic setting of the study area



(a)金珂村剖面; (b)龙马溪组黑色页岩; (c)笔石化石; (d)观音桥层腕足化石

图2 金珂村剖面五峰组-龙马溪组野外特征

Fig.2 Outcrops of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Jinkecun section

3 地球化学特征

3.1 主量元素

主量元素和微量元素保存了古气候、陆源输入等古环境因素的记录,组成页岩的元素通常以化合物的形式存在于矿物成分中,因此,主量元素含量往往与主要的矿物成分含量相对应^[5]。金珂村剖面五峰组 SiO₂ 含量为 39.04%~49.84%, 平均为 43.38%, 龙马溪组下段 SiO₂ 含量为 52.35%~64.50%, 平均为 56.69%, 表明页岩中富含 SiO₂ 的矿物(石英)含量较高,且自下而上逐渐增多,在龙马溪组底部达到峰值,但总体含量均低于北美页岩的 64.80%; 五峰组 Al₂O₃ 含量为 4.63%~8.74%, 平均为 6.35%, 龙马溪组下段 Al₂O₃ 含量为 9.90%~16.17%, 平均为 15.00%, 也表现为自下而上逐渐增多的趋势,二者平均值也均低于北美页岩 16.90%; CaO 主要来源于碳酸盐岩,五峰组 CaO 含量为 16.25%~23.74%, 平均为 19.04%, 进入龙马溪组下段, CaO 含量急剧下降, 平均值仅为 5.49%, 可能是由于晚奥陶世强烈的构造运动致使碳酸盐台地抬升剥蚀,从而使更多的碎屑物质流入盆地,导致五峰组碳酸盐岩碎屑沉积过多,进入龙马溪组,由于海平面的快速上升,部分隆起区域再次没入水下,流入盆地的碳酸盐岩碎屑急剧减少; 五峰组 K₂O 含量为 1.43%~2.45%, 平均为 1.83%, 龙马溪组下段 K₂O 含量为 2.60%~4.36%, 平均为 3.98%; 五峰组 Na₂O 含量为 0.16%~1.10%, 平均为 0.43%, 龙马溪

组下段 Na₂O 含量为 0.46%~0.96%, 平均为 0.77%; 五峰组 TiO₂ 含量为 0.21%~0.39%, 平均为 0.30%, 龙马溪组下段 TiO₂ 含量为 0.47%~0.70%, 平均为 0.65%(图 3)。上述特征表明,五峰组与龙马溪组下段主量元素含量存在较大差异,在进入龙马溪组之后发生突变,可能与该时期气候环境的突变有关。

3.2 微量、稀土元素

金珂村剖面五峰组稀土元素总量(Σ REE)为 (117.86~188.57) $\times 10^{-6}$, 平均为 145.37 $\times 10^{-6}$, 轻、重稀土比值(LREE/HREE)为 5.37~7.15, 平均为 6.12, 龙马溪组下段 Σ REE 为 (135.69~178.58) $\times 10^{-6}$, 平均为 158.54 $\times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 7.56~10.77, 平均为 9.01, 二者均表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素亏损的特征,与大多数黑色页岩稀土元素分布规律相符,但稀土总量均低于北美页岩 (193.18 $\times 10^{-6}$)。前人研究表明,稳定的浅海环境富集轻稀土元素,而深海环境或构造活动区则富集重稀土元素^[22],研究区五峰组和龙马溪组下段轻稀土元素富集的特征则表明其主要为陆架浅海环境。

五峰组和龙马溪组样品在微量元素原始地幔标准化蛛网图中均表现为 Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素的富集和 Nb、Sr 及 Ti 等高场强元素亏损的特征(图 4a), Ce 和 Eu 表现为较弱的负异常,而在五峰组观音桥层 Eu 负异常相对强烈,稀土元素北美页岩标准化分布曲线中显示整体较为平坦,表明研究区物源相对一致且构造相对稳定^[23-24],但相对来说五峰组中部至其顶部观音桥层,稀土元素北美

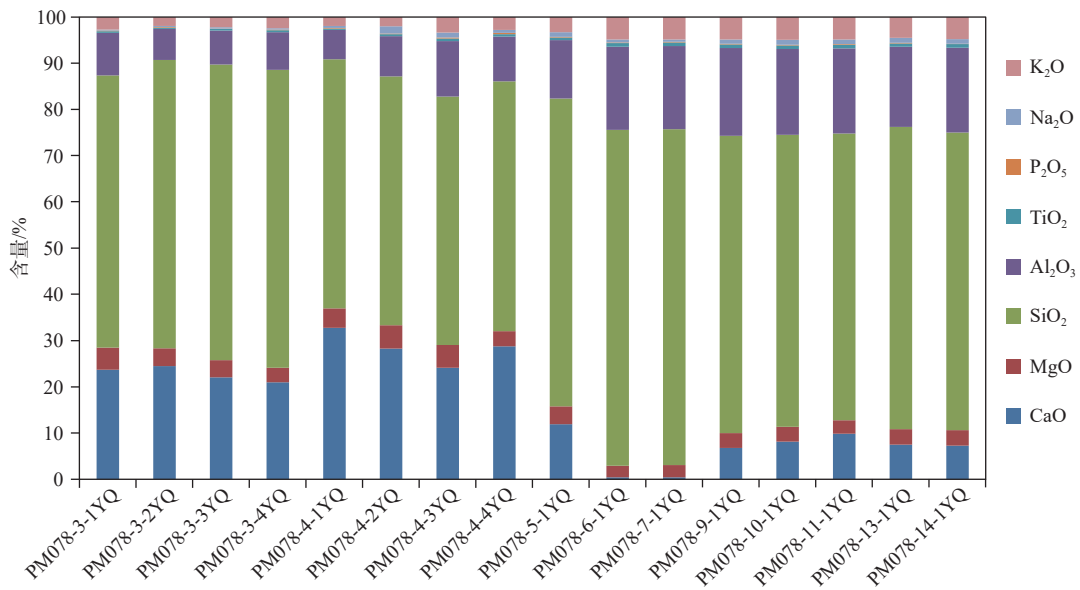


图 3 金坷村剖面五峰组-龙马溪组主量元素堆积柱状图

Fig.3 The accumulative histogram of main chemical elements of Wufeng-Longmaxi Formations in the Jinkecun section

页岩标准化曲线(图 4b)显示出略微左倾的特征, 波动幅度较龙马溪组下段更大, 表明该阶段具有相对

强烈的构造活动, 这一时期与区域上扬子板块不断向华夏板块俯冲的大地构造背景吻合^[22]。

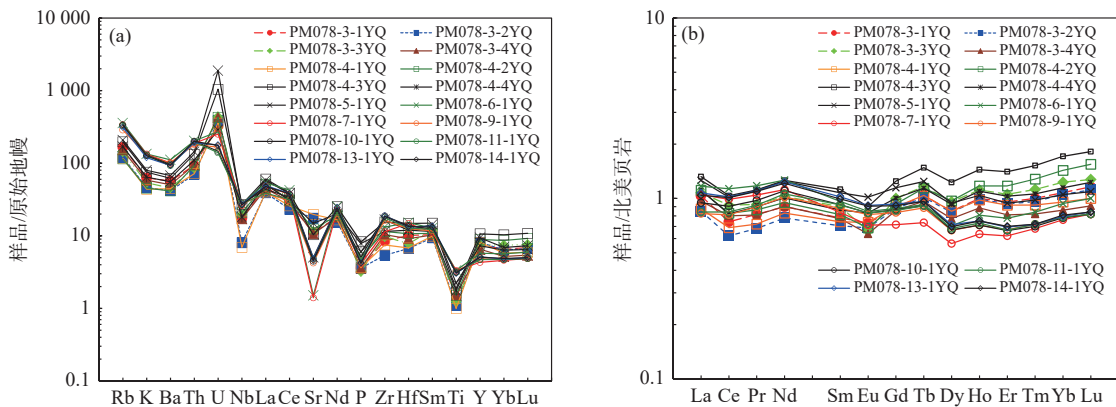


图 4 样品原始地幔标准化微量元素蛛网图 (a) 和北美页岩标准化稀土配分模式图 (b)

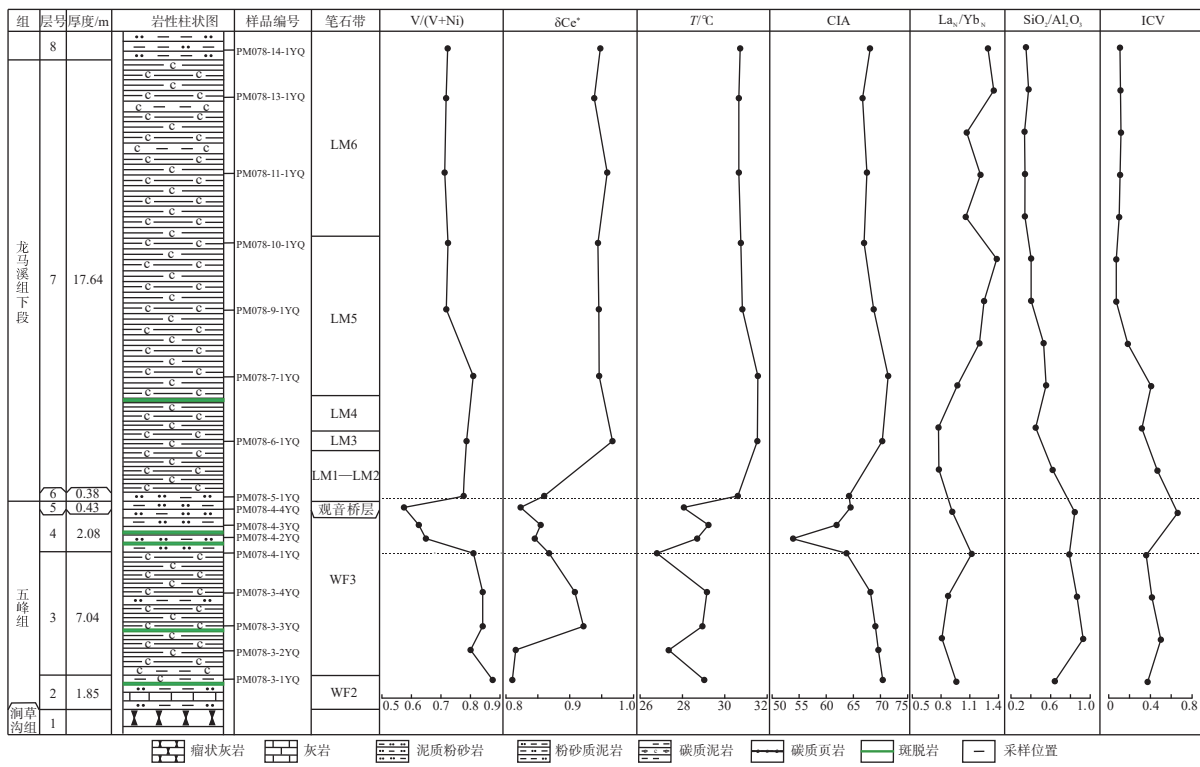
Fig.4 Spider web diagram of standardized trace elements in the primitive mantle of the sample (a) and standardized rare earth partition model of shale in North America (b)

4 沉积环境及构造背景分析

4.1 氧化还原环境及水平面变化

在应用地球化学参数恢复古沉积环境的氧化还原条件时, 通常会选择一些对水体氧化还原环境极为敏感的化学元素比值作为指标, 这些元素在页岩中的富集程度往往受到沉积时水体氧化还原状态的控制, 从而导致其易向还原性水体和沉积物中迁移而富集^[25]。例如 V、Ni、Co 等元素, 一般认为 $V/(V+Ni) < 0.46$ 为常氧环境, $0.46 < V/(V+Ni) <$

0.60 为贫氧环境, $V/(V+Ni) > 0.60$ 为厌氧环境, 但是通常 V 和 Ni 在具有缺氧孔隙水的沉积物中也会富集, 导致其反映的沉积环境可能是沉积时也可能是成岩时^[26], 因此, 在利用这些敏感元素判断水体氧化还原环境需慎重选择, 通常可利用多组反映氧化还原环境的不同元素综合分析, 更有利于准确判断其沉积环境。五峰组 $V/(V+Ni)$ 值为 $0.57 \sim 0.87$, 平均为 0.75 , 其中第 2—3 层沉积环境较为稳定, 属于厌氧环境, 进入第 4 层, 沉积环境发生突变, 从第 4 层的厌氧环境到第 5 层(观音桥层)的贫氧环境, 龙马溪组开始, 沉积环境再次发生转变, 水体还原性增强, 由贫氧环境转为厌氧环境(图 5)。



岩性柱据文献 [21] 修改

图 5 金坷村剖面地球化学综合柱状图

Fig.5 Comprehensive geochemical histogram of the Jinkecun section

稀土元素 Ce 异常能够很好地记录水体的氧化还原状况,并在后期埋藏和成岩过程中得以保持,可以作为氧化还原环境判别的重要指标。在氧化条件下 Ce³⁺易氧化呈 Ce⁴⁺而被铁锰等氧化物胶体吸附,从而导致海洋中 Ce 亏损,还原条件下则不显负异常^[27]。金坷村剖面五峰组 δCe^{*}值为 0.81~0.92,平均为 0.86,自下而上先增大后减小,在观音桥层降低至 0.82,龙马溪组下段 δCe^{*}值为 0.86~0.97,平均为 0.94,在龙马溪组底部快速增大,而后趋于平稳(图 5)。表明五峰期水体先加深致使环境还原性增强,而后水体逐渐变浅,在观音桥层达到最低水位,进入龙马溪组,水体快速上升,保持较深水体的强还原环境。

4.2 化学风化蚀变指数及古温度

化学蚀变指数(CIA)作为气候敏感性指标被广泛应用于古气候变化的研究中,常用于反映沉积物化学风化程度与温湿度之间的关系,而陆地化学风化作用则主要受控于温度和湿度,当气候由干冷向暖湿转变时,化学风化作用显著增强,前人通过研究给出了定量分析化学蚀变作用强度的计算公式^[28-29]为 $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$

×100,公式中氧化物单位为摩尔分数。CaO^{*}为硅酸盐中的 CaO 摩尔分数,对于 CaO^{*}的计算和矫正,一般采用 MCLENNAN^[28]提出的公式: $CaO^* = CaO - (10/3 \times P_2O_5)$,当矫正后的 CaO 摩尔分数 < Na₂O 摩尔分数,则采用 CaO 的摩尔分数作为 CaO^{*}的摩尔分数,反之则采用 Na₂O 的摩尔分数作为 CaO^{*}的摩尔分数。当沉积物经历过强烈的化学风化作用,其 CIA 值介于 80~100,代表炎热潮湿的热带气候环境;经历中等风化过程,其 CIA 值介于 65~80,代表温暖湿润的气候环境;当 CIA 值介于 50~65 时,表明沉积物经历了较弱的化学风化过程,指示寒冷干燥的气候环境。五峰组 CIA 值为 54~71,平均为 66,自下而上 CIA 值逐渐减小,表明化学风化作用逐渐减弱,气候环境逐渐转为寒冷干燥;在第 4 层底部达到最小值,观音桥层 CIA 值为 65,表明气候开始向温暖湿润转变;龙马溪组下段 CIA 值为 65~72,平均为 69,转为典型的温暖湿润气候(图 5)。

根据前人给出的计算古温度经验公式^[30] $\omega(Sr) = 2578 - 80.8T$,计算出研究区五峰组温度为 26.77~29.21 °C,平均温度为 28.39 °C,温度波动幅度较大,呈锯齿状,其中,发生了 3 次较为明显的降温事件,

分别第 3 层底部, 第 4 层底部和观音桥层。龙马溪组下段温度介于 30.59~31.54 °C, 平均为 30.90 °C, 进入龙马溪组, 气温快速回升, 最高温达到 31.54 °C。

4.3 沉积速率

海水中黏土等细碎屑或悬浮物是有机质和稀土元素(REE)的共同载体, 而有机质又是稀土元素最强的吸附剂之一, 因此, 有学者研究认为细碎屑或悬浮物在水中停留时间的长短决定了 REE 分异程度的强弱^[31]。当沉积速率较快时, 悬浮物质由于在水中停留的时间较短从而导致其与海水发生物质交换较少, 故而造成 REE 分异减弱, 反之, 悬浮物质停留时间较长则会使其中的稀土元素发生分解, 被黏土吸附, 并使之与有机质络合发生一系列的反应。据此, 将 REE 分异程度作为反映沉积速率的化学指标^[29], 通常认为 La_N/Yb_N 值越大则沉积速率越缓慢, La_N/Yb_N 值越小则沉积速率越快^[25]。

根据研究区北美页岩标准化稀土元素配分值来看(表 1), 五峰组样品 La_N/Yb_N 值为 0.78~1.12, 平均为 0.91, 观音桥层样品 La_N/Yb_N 值为 0.77~0.78, 平均为 0.77, 龙马溪组样品 La_N/Yb_N 值为 1.06~1.38, 平均为 1.23。上述结果表明, 观音桥层沉积速率最快, 其次是五峰组, 龙马溪组下段沉积速率最缓慢。从 La_N/Yb_N 值来看, 五峰组沉积速率发生较明显的波动, 自下而上沉积速率发生由快-慢-快的转变, 在观音桥层达到最快, 进入龙马溪组, 沉积速率迅速变缓, 而后转为波动起伏的状态(图 5)。

4.4 构造环境及物质来源

不同构造背景下元素的地球化学特征存在明显差异, 据此可以利用稀土元素特征来推断当时的构造环境。例如 La、Th、Sc、Zr 等具有较强稳定性的稀土和微量元素组合, 在分析判断沉积物构造背景具有较好的效果^[32]。La-Th-Sc 图解中五峰组样品更靠近活动陆缘+被动陆缘区域, 龙马溪组样品则落于大陆岛弧区域(图 6a), 而在 Th-Sc-Zr/10 图解中五峰组和龙马溪组大部分样品均落于大陆岛弧区域, 靠近活动陆缘边缘(图 6b)。上述结果表明, 研究区在五峰期构造背景还是以大陆岛弧为主, 进入龙马溪期开始向活动陆缘转换。

SiO_2 与 Al_2O_3 的比值是判断沉积物成熟度的重要指标。碎屑物随着风化和搬运的推移, 石英含量逐渐增加, 长石和基性物质逐渐减少, 成熟度随

之提高, 导致 SiO_2 与 Al_2O_3 的比值变大^[34]。金珂村剖面五峰组 SiO_2/Al_2O_3 值为 4.5~9.3, 平均为 7.1, 自下而上 SiO_2/Al_2O_3 值先增大后减小, 龙马溪组下段 SiO_2/Al_2O_3 值为 3.4~5.3, 平均为 3.8, 数值变化较为平稳。上述特征表明, 五峰组沉积物成熟度总体较高, 但具有整体逐渐降低的趋势, 离物源区相对较远, 而龙马溪组沉积物成熟度相对较低, 具有离物源区较近的特点。成分变异指数(ICV 值)也是判别碎屑岩成熟度的重要指标, 同时, 也可以指示沉积物的构造背景。当 ICV 值 > 1 时, 通常代表构造活动带的首次沉积和具有丰富的相对未风化的碎屑矿物; ICV 值 < 1 则代表克拉通非活动性环境下的沉积, 有时也可能是强风化条件下的首次沉积^[35-36], 其公式为 $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$, 公式中氧化物单位为摩尔数。通过计算, 五峰组 ICV 值为 3.2~6.6, 平均为 4.4, 表明其处于相对活跃的构造环境; 而龙马溪组下段 ICV 值为 0.7~1.8, 平均为 1.1, 略 > 1, 指示了较为稳定的构造环境。

稀土元素球粒陨石标准化分配模式可以反映盆地物源区的性质, 一般情况下, 上地壳的稀土元素具有轻稀土元素富集, 重稀土元素含量稳定的特征^[37]。金珂村剖面五峰组-龙马溪组下段样品经球粒陨石标准化后, 显示为与上地壳相同的特征, 表明其母岩来源于上地壳。通常利用 La/Yb-REE 图解反映某些岩石大类的成因特征, 从而判断沉积物来源及物源区特征^[38]。La/Yb-REE 图解中, 五峰组样品落于沉积岩和碱性玄武岩区域(图 7), 表明其具有较为复杂的物源, 而龙马溪组下段则全部落于沉积岩区, 且非常集中, 反映了较为单一的物源。

根据前人研究, 上奥陶统五峰组顶部发生了地质历史时期非常重要的一次生物大灭绝事件, 该时期同样伴随着一系列的地质构造运动。特别是广西运动在华南地区的阶段性运动具有深远影响, 在扬子区表现为多次的升降运动, 呈现了一个反复性、多幕式的隆升和下降的地质过程, 其中又以宜昌上升作为广西运动在扬子板块的最初阶段, 宜昌上升发生于五峰组底部, 以龙马溪组黑色笔石页岩的沉积, 代表宜昌上升的终结^[39-41]。进入龙马溪组 ICV 值的突然减小则表明此阶段构造环境趋于稳定, 指示宜昌上升的终结, 代表广西运动阶段性的结束。

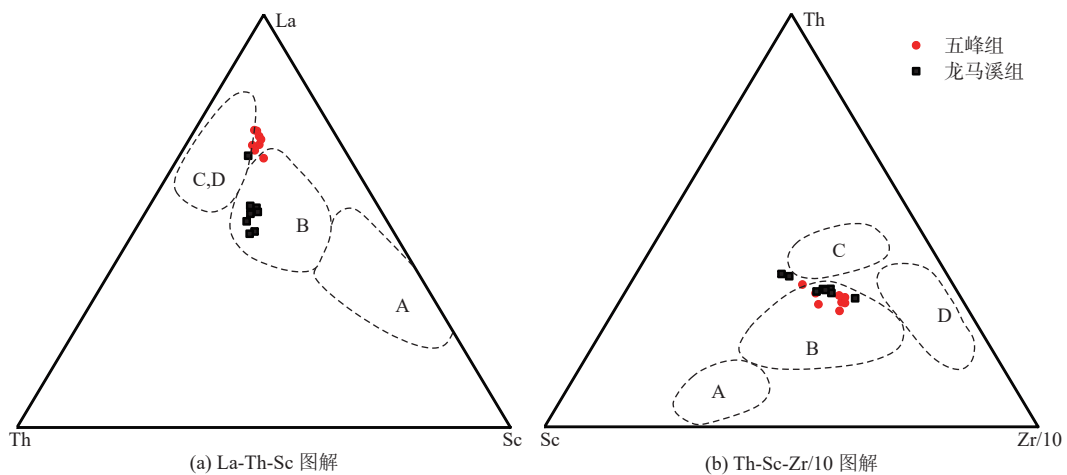
前人研究认为, 早古生代扬子板块从北东开始向华夏板块发生俯冲碰撞, 并发现碱性玄武岩及安山质凝灰岩, 证明了华南早古生代残留洋盆的存

表1 金珂村剖面五峰组-龙马溪组样品主量、微量元素分析测试结果

Table 1 Analytic results of major and trace elements of Wufeng Formation-Longmaxi Formation samples in the Jinkecun section

| 样品编号 | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TFe ₂ O ₃ | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ | FeO | MnO | Fe ₂ O ₃ | ΣREE | LREE | HREE | LREE/ HREE | La _N / Yb _N | δEu | La | Ce |
|--------------|-------|-------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|-------|--------------------------------|--------|--------|-------|---------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| PM078-3-1YQ | 17.71 | 3.61 | 44.06 | 6.86 | 1.96 | 0.30 | 0.08 | 0.18 | 2.04 | 16.39 | 0.26 | 0.12 | 1.67 | 137.04 | 118.20 | 18.84 | 6.27 | 0.96 | 0.88 | 32.60 | 49.40 |
| PM078-3-2YQ | 18.44 | 2.92 | 46.94 | 5.06 | 2.30 | 0.23 | 0.08 | 0.16 | 1.50 | 16.54 | 0.25 | 0.10 | 2.02 | 117.86 | 99.35 | 18.51 | 5.37 | 0.81 | 0.87 | 26.80 | 41.20 |
| PM078-3-3YQ | 17.00 | 2.84 | 49.30 | 5.70 | 1.84 | 0.26 | 0.07 | 0.18 | 1.75 | 15.42 | 0.18 | 0.05 | 1.64 | 157.09 | 135.91 | 21.18 | 6.42 | 0.87 | 0.70 | 33.80 | 61.00 |
| PM078-3-4YQ | 16.25 | 2.38 | 49.84 | 6.33 | 2.06 | 0.32 | 0.08 | 0.25 | 1.90 | 14.17 | 0.32 | 0.04 | 1.70 | 136.56 | 119.81 | 16.75 | 7.15 | 1.12 | 0.78 | 30.40 | 53.30 |
| PM078-4-1YQ | 23.74 | 3.07 | 39.04 | 4.63 | 0.00 | 0.21 | 0.08 | 0.31 | 1.43 | 20.30 | 0.19 | 0.08 | 1.83 | 125.04 | 106.75 | 18.29 | 5.84 | 0.92 | 0.90 | 27.60 | 45.80 |
| PM078-4-2YQ | 20.33 | 3.62 | 38.70 | 6.24 | 0.00 | 0.32 | 0.11 | 1.10 | 1.48 | 18.52 | 0.40 | 0.05 | 2.35 | 150.18 | 128.04 | 22.14 | 5.78 | 0.78 | 0.79 | 35.00 | 55.00 |
| PM078-4-3YQ | 17.59 | 3.57 | 39.22 | 8.74 | 0.00 | 0.39 | 0.18 | 0.79 | 2.45 | 15.86 | 0.25 | 0.05 | 3.01 | 188.57 | 160.88 | 27.69 | 5.81 | 0.77 | 0.76 | 41.60 | 68.80 |
| PM078-4-4YQ | 21.26 | 2.44 | 39.94 | 7.21 | 0.00 | 0.37 | 0.17 | 0.49 | 2.09 | 17.36 | 0.18 | 0.06 | 2.69 | 150.58 | 129.97 | 20.61 | 6.31 | 0.97 | 0.89 | 35.00 | 54.60 |
| PM078-5-1YQ | 9.40 | 3.03 | 52.35 | 9.90 | 2.65 | 0.47 | 0.13 | 0.78 | 2.60 | 8.31 | 0.61 | 0.03 | 1.97 | 177.87 | 157.10 | 20.77 | 7.56 | 1.20 | 0.92 | 39.70 | 67.50 |
| PM078-6-1YQ | 0.36 | 2.24 | 64.50 | 16.00 | 3.86 | 0.70 | 0.10 | 0.56 | 4.36 | 0.44 | 0.27 | 0.01 | 3.56 | 178.58 | 162.06 | 16.52 | 9.81 | 1.25 | 0.92 | 36.80 | 75.20 |
| PM078-7-1YQ | 0.41 | 2.28 | 64.24 | 15.94 | 3.96 | 0.70 | 0.09 | 0.46 | 4.33 | 0.44 | 0.36 | 0.01 | 3.56 | 156.42 | 143.13 | 13.29 | 10.77 | 1.38 | 0.92 | 33.10 | 65.80 |
| PM078-9-1YQ | 5.78 | 2.71 | 54.87 | 16.17 | 4.97 | 0.68 | 0.09 | 0.80 | 4.18 | 4.42 | 2.35 | 0.03 | 2.35 | 135.69 | 120.73 | 14.96 | 8.07 | 1.06 | 0.95 | 26.00 | 54.00 |
| PM078-10-1YQ | 6.96 | 2.75 | 54.08 | 15.88 | 4.11 | 0.67 | 0.11 | 0.93 | 4.22 | 5.65 | 1.86 | 0.03 | 2.04 | 149.06 | 133.93 | 15.13 | 8.85 | 1.21 | 0.93 | 29.80 | 60.20 |
| PM078-11-1YQ | 8.38 | 2.46 | 52.62 | 15.64 | 4.06 | 0.66 | 0.10 | 0.86 | 4.16 | 6.43 | 1.77 | 0.03 | 2.09 | 139.89 | 124.66 | 15.23 | 8.19 | 1.07 | 0.93 | 26.50 | 55.90 |
| PM078-13-1YQ | 6.43 | 2.84 | 55.94 | 14.85 | 4.49 | 0.64 | 0.09 | 0.92 | 3.88 | 5.31 | 2.07 | 0.03 | 2.19 | 166.70 | 150.72 | 15.98 | 9.43 | 1.35 | 0.94 | 33.80 | 67.80 |
| PM078-14-1YQ | 6.22 | 2.84 | 54.90 | 15.65 | 4.76 | 0.65 | 0.09 | 0.82 | 4.12 | 4.80 | 2.13 | 0.03 | 2.39 | 164.12 | 148.28 | 15.84 | 9.36 | 1.29 | 0.95 | 32.80 | 67.20 |
| 样品编号 | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | Ni | Co | Cu | Pb | W | As | Se | Cr |
| PM078-3-1YQ | 6.44 | 24.30 | 4.60 | 0.86 | 4.60 | 0.82 | 4.92 | 1.04 | 3.25 | 0.50 | 3.20 | 0.51 | 34.60 | 49.20 | 4.92 | 64.60 | 29.70 | 1.34 | 14.00 | 1.16 | 71.60 |
| PM078-3-2YQ | 5.38 | 21.00 | 4.16 | 0.81 | 4.56 | 0.80 | 4.85 | 1.03 | 3.17 | 0.48 | 3.13 | 0.49 | 37.10 | 52.40 | 4.94 | 46.60 | 40.20 | 1.55 | 18.80 | 1.48 | 47.80 |
| PM078-3-3YQ | 7.32 | 27.70 | 5.31 | 0.78 | 5.20 | 0.92 | 5.55 | 1.16 | 3.58 | 0.56 | 3.65 | 0.56 | 34.40 | 53.00 | 7.12 | 45.90 | 37.80 | 3.94 | 13.80 | 1.38 | 53.80 |
| PM078-3-4YQ | 6.40 | 24.40 | 4.56 | 0.75 | 4.46 | 0.76 | 4.48 | 0.92 | 2.76 | 0.41 | 2.56 | 0.40 | 29.60 | 61.00 | 8.08 | 57.00 | 41.60 | 1.40 | 15.40 | 1.71 | 61.00 |
| PM078-4-1YQ | 5.70 | 22.40 | 4.38 | 0.87 | 4.67 | 0.82 | 4.92 | 1.02 | 3.12 | 0.46 | 2.84 | 0.44 | 37.00 | 43.50 | 5.40 | 39.60 | 27.20 | 2.76 | 8.98 | 0.98 | 40.00 |
| PM078-4-2YQ | 6.83 | 25.60 | 4.80 | 0.81 | 4.84 | 0.90 | 5.62 | 1.22 | 3.99 | 0.64 | 4.25 | 0.68 | 40.60 | 84.00 | 7.48 | 45.00 | 28.10 | 2.04 | 13.60 | 3.46 | 45.30 |
| PM078-4-3YQ | 8.80 | 34.00 | 6.62 | 1.06 | 6.48 | 1.17 | 7.12 | 1.50 | 4.78 | 0.76 | 5.08 | 0.80 | 48.40 | 109.00 | 11.40 | 51.60 | 27.20 | 1.70 | 14.60 | 3.60 | 51.80 |
| PM078-4-4YQ | 7.10 | 27.20 | 5.09 | 0.98 | 5.22 | 0.90 | 5.38 | 1.14 | 3.50 | 0.53 | 3.40 | 0.54 | 42.50 | 65.60 | 7.21 | 33.00 | 21.40 | 5.02 | 14.00 | 2.32 | 43.40 |
| PM078-5-1YQ | 8.76 | 33.60 | 6.34 | 1.20 | 5.96 | 0.98 | 5.46 | 1.08 | 3.20 | 0.49 | 3.12 | 0.48 | 33.20 | 145.00 | 9.51 | 63.70 | 26.60 | 3.26 | 15.80 | 3.64 | 85.50 |
| PM078-6-1YQ | 9.28 | 34.10 | 5.68 | 1.00 | 4.58 | 0.73 | 4.09 | 0.84 | 2.64 | 0.42 | 2.78 | 0.44 | 26.20 | 39.00 | 7.17 | 23.00 | 21.60 | 3.38 | 11.20 | 1.38 | 87.80 |
| PM078-7-1YQ | 8.25 | 30.20 | 4.94 | 0.84 | 3.72 | 0.58 | 3.26 | 0.66 | 2.11 | 0.34 | 2.26 | 0.36 | 19.60 | 34.00 | 5.04 | 22.20 | 21.40 | 5.61 | 11.60 | 1.11 | 88.00 |
| PM078-9-1YQ | 7.08 | 27.50 | 5.19 | 0.96 | 4.34 | 0.70 | 3.86 | 0.74 | 2.28 | 0.36 | 2.32 | 0.36 | 22.00 | 40.20 | 13.00 | 26.60 | 22.70 | 10.80 | 6.02 | 0.54 | 81.40 |
| PM078-10-1YQ | 7.70 | 29.80 | 5.45 | 0.98 | 4.50 | 0.72 | 3.88 | 0.74 | 2.26 | 0.35 | 2.32 | 0.36 | 21.50 | 34.00 | 12.00 | 18.20 | 25.20 | 7.64 | 3.88 | 0.26 | 75.90 |
| PM078-11-1YQ | 7.24 | 28.60 | 5.44 | 0.98 | 4.46 | 0.72 | 3.96 | 0.76 | 2.27 | 0.36 | 2.34 | 0.36 | 21.50 | 37.70 | 11.90 | 20.90 | 23.20 | 7.00 | 4.55 | 0.28 | 74.80 |
| PM078-13-1YQ | 8.72 | 33.30 | 6.02 | 1.08 | 4.84 | 0.76 | 4.15 | 0.78 | 2.36 | 0.36 | 2.36 | 0.37 | 23.20 | 35.80 | 12.00 | 22.70 | 23.00 | 9.60 | 5.46 | 0.43 | 73.70 |
| PM078-14-1YQ | 8.65 | 32.70 | 5.86 | 1.07 | 4.74 | 0.76 | 4.05 | 0.78 | 2.38 | 0.36 | 2.40 | 0.37 | 23.10 | 35.80 | 13.50 | 22.30 | 21.70 | 6.06 | 5.26 | 0.45 | 78.00 |
| 样品编号 | V | Ga | In | Tl | Rb | Cs | Th | Hf | Zr | Nb | Ta | U | Li | B | Sr | Cd | Ge | Sn | F | Ba | Sc |
| PM078-3-1YQ | 331 | 10.20 | 0.04 | 0.80 | 105 | 5.38 | 7.92 | 3.12 | 95.0 | 12.40 | 0.60 | 6.80 | 17.90 | 49.0 | 234.0 | 1.04 | 0.80 | 1.87 | 872 | 397 | 7.08 |
| PM078-3-2YQ | 204 | 8.14 | 0.03 | 0.89 | 77 | 3.78 | 5.94 | 2.06 | 60.4 | 5.70 | 0.43 | 8.13 | 14.20 | 34.1 | 370.0 | 0.89 | 0.68 | 1.51 | 631 | 292 | 5.26 |
| PM078-3-3YQ | 272 | 10.70 | 0.05 | 1.22 | 91 | 4.58 | 7.28 | 2.40 | 109.0 | 14.00 | 0.50 | 9.16 | 13.80 | 41.0 | 241.0 | 2.72 | 0.76 | 2.09 | 662 | 319 | 5.98 |
| PM078-3-4YQ | 313 | 10.40 | 0.04 | 1.34 | 97 | 5.00 | 8.05 | 2.82 | 116.0 | 12.20 | 0.66 | 8.98 | 15.00 | 43.8 | 224.0 | 1.00 | 0.76 | 1.76 | 728 | 354 | 6.02 |
| PM078-4-1YQ | 180 | 8.27 | 0.03 | 0.95 | 74 | 3.62 | 6.08 | 2.10 | 83.7 | 4.94 | 0.42 | 7.48 | 12.60 | 35.2 | 415.0 | 0.12 | 0.64 | 1.38 | 603 | 311 | 4.66 |
| PM078-4-2YQ | 152 | 10.40 | 0.05 | 3.12 | 73 | 3.64 | 7.85 | 3.30 | 128.0 | 14.90 | 0.64 | 9.01 | 10.80 | 35.2 | 261.0 | 4.04 | 0.74 | 1.94 | 610 | 290 | 7.32 |
| PM078-4-3YQ | 178 | 14.00 | 0.08 | 3.55 | 125 | 6.49 | 11.30 | 4.58 | 173.0 | 19.30 | 0.88 | 21.90 | 14.50 | 58.8 | 218.0 | 2.57 | 0.82 | 2.78 | 996 | 431 | 9.10 |
| PM078-4-4YQ | 87 | 11.60 | 0.04 | 0.99 | 107 | 5.52 | 9.34 | 3.70 | 128.0 | 12.80 | 0.75 | 6.04 | 14.60 | 54.5 | 312.0 | 0.28 | 0.81 | 2.15 | 803 | 388 | 9.34 |
| PM078-5-1YQ | 492 | 14.80 | 0.05 | 2.72 | 132 | 7.58 | 12.20 | 3.68 | 186.0 | 17.40 | 0.82 | 39.50 | 18.40 | 60.2 | 106.0 | 6.18 | 0.89 | 2.02 | 880 | 472 | 8.43 |
| PM078-6-1YQ | 140 | 22.20 | 0.09 | 1.73 | 226 | 13.90 | 17.20 | 4.68 | 148.0 | 19.40 | 1.46 | 5.72 | 32.80 | 101.0 | 31.8 | 0.18 | 1.43 | 3.60 | 1256 | 776 | 15.20 |
| PM078-7-1YQ | 140 | 20.80 | 0.08 | 1.50 | 214 | 13.60 | 15.90 | 4.56 | 127.0 | 18.70 | 1.40 | 5.28 | 35.20 | 112.0 | 29.5 | 0.12 | 1.40 | 3.70 | 1240 | 704 | 14.40 |
| PM078-9-1YQ | 100 | 19.60 | 0.08 | 1.26 | 182 | 11.60 | 15.40 | 3.87 | 182.0 | 19.60 | 1.22 | 3.50 | 46.80 | 96.4 | 88.9 | 0.08 | 1.54 | 3.72 | 1136 | 696 | 13.40 |
| PM078-10-1YQ | 87 | 20.20 | 0.07 | 1.15 | 209 | 12.60 | 17.00 | 4.26 | 210.0 | 20.00 | 1.30 | 3.06 | 44.40 | 100.0 | 94.3 | 0.07 | 1.54 | 3.88 | 1034 | 670 | 12.90 |
| PM078-11-1YQ | 91 | 19.80 | 0.07 | 1.16 | 212 | 11.90 | 16.60 | 3.94 | 198.0 | 19.60 | 1.28 | 2.92 | 43.60 | 105.0 | 102.0 | 0.12 | 1.49 | 3.82 | 1026 | 647 | 13.40 |
| PM078-13-1YQ | 89 | 19.60 | 0.07 | 1.16 | 198 | 11.20 | 16.30 | 4.08 | 211.0 | 19.40 | 1.22 | 3.76 | 47.00 | 87.2 | 102.0 | 0.10 | 1.54 | 3.52 | 944 | 650 | 12.90 |
| PM078-14-1YQ | 91 | 20.80 | 0.07 | 1.24 | 214 | 12.00 | 17.00 | 4.14 | 207.0 | 19.00 | 1.30 | 3.68 | 50.00 | 90.8 | 97.0 | 0.08 | 1.54 | 3.84 | 1046 | 654 | 13.60 |

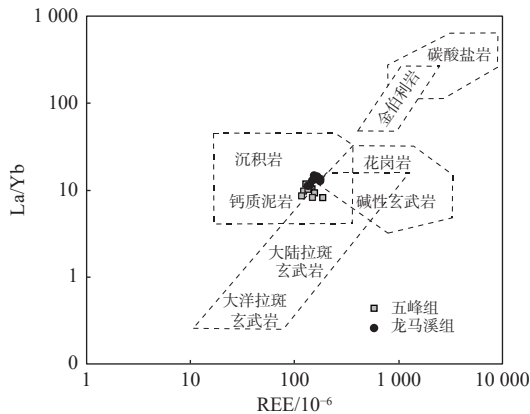
注: 常量元素的单位为%, 微量元素的单位为10⁻⁶。



底图引用文献 [33]; A-大洋岛弧; B-大陆岛弧; C-活动陆缘; D-被动陆缘

图 6 金珂村剖面五峰组和龙马溪组微量元素构造环境判别

Fig.6 Discrimination of tectonic setting for trace elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in the Jinkecun section



据文献 [37] 修改

图 7 金珂村剖面五峰组-龙马溪组下段样品 La/Yb-REE 图解

Fig.7 La/Yb-REE diagram of samples from the lower member of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Jinkecun section

在 [42]。王万能等 [17] 研究该时期斑脱岩认为, 晚奥陶世一早志留世扬子板块与华夏板块之间的俯冲碰撞存在构造背景转换, 是一个由弧-陆碰撞向陆-陆碰撞转变的过程, 五峰组活跃的构造环境(大陆岛弧)以及含有碱性玄武岩的物源则印证了该时期扬子板块与华夏板块强烈的构造运动, 同时伴随着快速的物质沉积, 揭示该时期二者还处于弧陆碰撞阶段, 并在龙马溪组进入了短暂的稳定期。

5 结论

(1)金珂村剖面五峰组和龙马溪组下段黑色岩系 Σ REE 总量不高, 均表现为轻稀土元素相对富集,

重稀土元素亏损的特征。Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素富集, Nb、Sr 及 Ti 等高场强元素亏损, Ce 和 Eu 表现为较弱的负异常。

(2)上扬子西缘晚奥陶世五峰早期水体先加深成为厌氧环境; 五峰中期开始海平面逐渐下降, 在五峰晚期达到最低, 转为贫氧环境, 气温转凉; 进入龙马溪期, 气温迅速回暖, 水体急速上升变为厌氧环境。

(3)沉积速率揭示了五峰组自下而上由快-慢-快的沉积特征。进入龙马溪组再次变缓, 五峰组活跃的构造环境及较为复杂的物源是广西运动在上扬子西缘的响应, 龙马溪组下段稳定的构造环境及单一的物源则揭示了广西运动在该地区阶段性的结束。

参考文献:

- [1] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- [2] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution; an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [3] 代辉, 钟瑶, 熊璨, 等. 重庆云阳地区中侏罗世新田沟组底部细粒碎屑岩地球化学特征及意义 [J]. *矿物岩石*, 2021, 41(1): 32-43.
DAI H, ZHONG Y, XIONG C, et al. The geochemistry characteristics and significance of fine-grained clastic rocks from the Xintiangou Formation in Yunyang area, Chongqing[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(1): 32-43.
- [4] 王俊, 江武龙, 余雅兰, 等. 华北克拉通南缘中元古界熊耳群大古石组沉积环境: 来自地球化学的证据 [J]. *沉积学报*, 2025, 43(2): 423-438.

- WANG J, JIANG W L, YU Y L, et al. Depositional environment of the Dagushi Formation, Mesoproterozoic Xiong'er Group, southern North China Block: evidence from geochemical analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(2): 423-438.
- [5] 王玉满, 李新景, 董大忠, 等. 上扬子地区五峰组-龙马溪组优质页岩沉积主控因素 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 9-20.
- WANG Y M, LI J X, DONG D Z, et al. Main factors controlling the sedimentation of high-quality shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Upper Yangtze Region[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 9-20.
- [6] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组-龙马溪组为例 [J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 893-901.
- GUO X S, HU D F, WEN Z D, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 893-901.
- [7] 施振生, 王红岩, 林长木, 等. 威远-自贡地区五峰期-龙马溪期古地形及其对页岩储层品质的控制 [J]. *地层学杂志*, 2020, 44(2): 163-173.
- SHI Z S, WANG H Y, LIN C M, et al. Paleotopography of Weiyuan-Zigong area in Wufeng-Longmaxi stages and its effect on the quality of shale gas reservoir[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2020, 44(2): 163-173.
- [8] 王红岩, 郭伟, 梁峰, 等. 四川盆地威远页岩气田五峰组和龙马溪组黑色页岩生物地层特征与意义 [J]. *地层学杂志*, 2015, 39(3): 289-293.
- WANG H Y, GUO W, LIANG F, et al. Biostratigraphy characteristics and scientific meaning of the Wufeng and Longmaxi Formation black shales of the Weiyuan Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(3): 289-293.
- [9] 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 等. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义 [J]. *古地理学报*, 2014, 16(4): 427-440.
- MOU C L, GE X Y, XU X S, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(4): 427-440.
- [10] 梁兴, 张廷山, 舒红林, 等. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价 [J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 72-87.
- LIANG X, ZHANG T S, SHU H L, et al. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong National Shale Gas Demonstration area in the northern Yunnan-Guizhou[J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 72-87.
- [11] 张茜, 肖渊甫, 王晓飞, 等. 四川盆地西南缘龙马溪组泥岩地球化学特征及物源区和构造背景分析 [J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1393-1411.
- ZHANG Q, XIAO Y P, WANG X F, et al. Geochemistry of the Longmaxi Formation mudstones of the southwest Sichuan Basin: implications for provenance and source weathering[J]. *Geological Review*, 2020, 66(5): 1393-1411.
- [12] 张茜, 王剑, 余谦, 等. 康滇古陆西侧龙马溪组黑色页岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2017, 37(1): 97-107.
- ZHANG Q, WANG J, YU Q, et al. Black shales from the Longmaxi Formation in western Xikang-Yunnan ancient land: geochemistry and geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2017, 37(1): 97-107.
- [13] 秦何星, 陈雷, 卢畅, 等. 上扬子南缘五峰组-龙马溪组页岩地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示 [J]. *地质论评*, 2024, 70(4): 1314-1334.
- QIN H X, CHEN L, LU C, et al. Geochemical characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale in the southern margin of the Upper Yangtze area: implications for weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Geological Review*, 2024, 70(4): 1314-1334.
- [14] 何佳伟, 谢渊, 侯明才, 等. 川西南盐津地区志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义 [J]. *古地理学报*, 2021, 23(6): 1174-1191.
- HE J W, XIE Y, HOU M C, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Silurian Longmaxi Formation shale in Yanjin area, southwestern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 2021, 23(6): 1174-1191.
- [15] 程锦翔, 邓敏, 杨贵来, 等. 四川盐源地区名胜剖面志留系龙马溪组黑色泥页岩地球化学特征及物源构造背景分析 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2024, 44(4): 840-853.
- CHEN J X, DENG M, YANG G L, et al. Analysis of geochemical characteristics and provenance tectonic background of black shale in Silurian Longmaxi Formation of Mingsheng section in Yanyuan area, Sichuan Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024, 44(4): 840-853.
- [16] 牟传龙, 葛祥英, 余谦, 等. 川西南地区五峰-龙马溪组黑色页岩古气候及物源特征: 来自新地2井地球化学记录 [J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 835-854.
- MOU C L, GE X Y, YU Q, et al. Palaeoclimatology and provenance of black shales from Wufeng-Longmaxi Formations in southwestern Sichuan Province: from geochemical records of Well Xindi-2[J]. *Journal of Palaeogeography*. 2019, 21(5): 835-854.
- [17] 王万能, 潘江涛, 袁永盛, 等. 上扬子西缘早古生代斑脱岩来源及其对宜昌上升的指示意义 [J]. *岩石学报*, 2024, 40(7): 2135-2152.
- WANG W N, PAN J T, YUAN Y S, et al. The source of Early Paleozoic Bentonites in the western margin of the Upper Yangtze and its indicative significance for the Yichang Uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(7): 2135-2152.
- [18] 何龙. 四川盆地东南缘五峰组-龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- HE L. Organic matter enrichment and evolution of sedimentary environment of the Wufeng-Longmaxi Shale in southeastern margins of the Sichuan Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

- [19] 陈旭, 张元动, 樊隽轩, 等. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1617-1626.
CHEN X, ZHANG Y D, FAN J X, et al. Onset of the Kwangsi-an orogeny as evidenced by biofacies and lithofacies[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(10): 1592-1600.
- [20] 陈旭, 樊隽轩, 陈清, 等. 论广西运动的阶段性 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 842-850.
CHEN X, FAN J X, CHEN Q, et al. Toward a stepwise Kwangsi-an orogeny[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(3): 379-387.
- [21] LI Y F, ZHANG T W, SHEN B J, et al. Carbon and sulfur isotope variations through the Upper Ordovician and Lower Silurian of South China linked to volcanism[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 567: 110285.
- [22] 李建青, 方朝刚, 吴通, 等. 江苏句容地区五峰组-高家边组泥页岩稀土元素特征及沉积环境 [J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1516-1527.
LI J Q, FANG C G, WU T, et al. Characteristics of REE and sedimentary environment of mud shale in Wufeng Formation-Gaojiabian Formation in Jurong area, Jiangsu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1516-1527.
- [23] 张春明, 姜在兴, 郭英海, 等. 川东南-黔北地区龙马溪组地球化学特征与古环境恢复 [J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 124-130.
ZHANG C M, JIANG Z X, GUO H Y, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironment reconstruction of the Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and Northern Guizhou[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 124-130.
- [24] 毛瑞勇, 张杰, 冷济高, 等. 岑巩页岩气区块牛蹄塘组黑色页岩稀土元素地球化学特征及沉积环境分析 [J]. 矿物岩石, 2016, 36(4): 66-73.
MAO R Y, ZHANG J, LENG J G, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements and depositional environments of the Niutitang Formation black shale in Cengong Shale Gas Block[J]. Mineralogy and Petrology, 2016, 36(4): 66-73.
- [25] 李琪琪, 蓝宝锋, 李刚权, 等. 黔中隆起北缘五峰-龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3172-3188.
LI Q Q, LAN B F, LI G Q, et al. Element geochemical characteristics and their geological significance of Wufeng-Longmaxi Formation shales in north margin of the Central Guizhou Uplift[J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3172-3188.
- [26] LEWAN M D, MAYNARD J B. Factors controlling enrichment of vanadium and nickel in the bitumen of organic sedimentary rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(12): 2547-2560.
- [27] 冯洪真, 俞剑华, 方一亭, 等. Ce_{anom} 对古海洋氧化还原条件相对变化的另一种可能解释 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 1997, 33(3): 80-86.
FENG H Z, YU J H, FANG Y T, et al. Another possible interpretation of Ce_{anom} for relative changes in paleo-oceanic redox conditions[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1997, 33(3): 80-86.
- [28] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation[J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.
- [29] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [30] 王换玲. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2021.
WANG H L. Carbon and oxygen isotopic characteristics and paleoenvironmental significance of Majiagou Formation carbonate rocks, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [31] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-93.
- [32] WANG Z G, YU X Y, ZHAO Z H, et al. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-93.
- [33] TENGER, LIU W H, XU Y C, et al. Comprehensive geochemical identification of highly evolved marine carbonate rocks as hydrocarbon-source rocks as exemplified by the Ordos Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2006, 49(4): 384-396.
- [34] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 181-193.
- [35] ROSER B P, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5): 635-650.
- [36] CULLERS R L, PODKOVOYROV V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. Precambrian Research, 2000, 104(1/2): 77-93.
- [37] 张学敏, 岳琼申. 地球化学方法在化学风化作用和物源判别中的应用综述 [J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(1): 41-58.
ZHANG X M, YUE Q S. Review of the application of element and isotopic geochemistry in chemical weathering and provenance[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2018, 34(1): 41-58.
- [38] 王欣欣, 郑荣才, 闫国强, 等. 基于稀土元素地球化学特征的泥岩沉积环境及物源分析: 以鄂尔多斯盆地陇东地区长 9 油层组泥岩为例 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1387-1394.
WANG X X, ZHENG R C, YAN G Q, et al. The mudstone sedimentary environment and provenance analysis based on the geochemical evidence of rare earth elements: take Chang 9 Oil-bearing Layer on Longdong area of Ordos Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1387-1394.
- [39] ALLEGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38(1): 1-25.
- [40] 陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 等. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升 [J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1052-1056.
CHEN X, RONG J Y, ZHOU Z Y, et al. The central Guizhou

- and Yi-chang uplifts, Upper Yangtze Region, between Ordovician and Silurian[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(18): 1580-1584.
- [40] 陈旭, 陈清, 甄勇毅, 等. 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(6): 1198-1206.
- CHEN X, CHEN Q, ZHEN Y Y, et al. Circumjacent distribution pattern of the Lungmachie graptolitic black shale (Early Silurian) on the Yichang Uplift and its peripheral region[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(9): 1195-1203.
- [41] 王铎, 戎嘉余, 唐鹏, 等. 华南古生代中期地层界面的特征与大地构造意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(2): 218-240.
- WANG Y, RONG J Y, TANG P, et al. Characteristics of major hiatus in Middle Paleozoic rocks of South China and their significance of geotectonics[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(2): 218-240.
- [42] 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 X F, WANG Z Q, GONG J H, 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.

Geochemical characteristics of the black rock series in the Wufeng-Longmaxi Formations on the western margin of the Upper Yangtze and the sedimentology and tectonic implications

WANG Wanneng, PANG Zhanji, LI Jinwang, LI Wenhui, YUAN Yongsheng,
WU Liang*, ZHANG Yaotang, LI Suoming, ZHAO Jianbo

(Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming 650100, China)

Abstract: The black rock series of Wufeng Formation and Longmaxi Formation are widely deposited from Late Ordovician to Early Silurian in the western margin of the upper Yangtze region. However, systematic studies on their sedimentology and tectonic background are scarce. In-depth studies on the geochemistry of samples from Wufeng Formation and the lower part of Longmaxi Formation in the Jinkecun section of Junlian County, Sichuan Province were conducted. Results show that the average $\sigma \Sigma \text{REE}$ of Wufeng Formation in the section is 145.37×10^{-6} , and that of the lower part of Longmaxi Formation is 158.54×10^{-6} . Both are characterized by the relative enrichment of light rare earth elements and the loss of heavy rare earth elements. The enrichment of large-ion lithophile elements such as Rb, Th and U, and the loss of high-field strength elements such as Nb, Sr and Ti. Ce and Eu show weak negative anomalies. During the deposition period of Wufeng Formation, the water body first deepened and then shallowed, resulting in redox changes from hypoxic to anaerobic, and then to hypoxic condition again. When it entered the deposition period of Longmaxi Formation, the climate quickly warmed up, and the water body deepened and turned into a hypoxic environment again. The sedimentary characteristics of first accelerating and then slowing down from bottom to top and its relatively complex provenance of the Wufeng Formation reflect that the Wufeng Stage of the Late Ordovician was in an island arc environment during the arc-continent collision stage of the Yangtze Plate subduction and collision with Cathaysia Plate. It turned into a stable tectonic environment in the Longmaxi period. The single provenance also indicates that the Guangxi Movement in this area has ended in stages.

Key words: western margin of Upper Yangtze Region; Wufeng Formation; Longmaxi Formation; geochemistry; tectonic setting