



移动阅读

程锦翔, 邓敏, 杨贵来, 等, 2024. 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, 44(4): 840–853. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.12003

CHENG J X, DENG M, YANG G L, et al., 2024. Analysis of geochemical characteristics, provenance, and tectonic background of black shale in the Silurian Longmaxi Formation of the Mingsheng section in the Yanyuan area, Sichuan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(4): 840–853. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.12003

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

程锦翔^{1,2,3}, 邓敏^{1,2*}, 杨贵来^{1,2}, 余谦^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610218; 3. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 盐源地区早志留世沉积了以龙马溪组为代表的笔石页岩。本文选择盐源地区名胜剖面志留系龙马溪组的新鲜露头剖面, 系统采样并分析其主、微量元素和稀土元素在剖面垂向上的变化特征, 从地球化学特征角度, 探讨该时期物源特征及其构造环境。结果表明: 盐源地区名胜剖面龙马溪组以硅质页岩相(L1段, L3段和L4段)为主, 碳酸盐矿物在L2和L5段含量较高, 脆性矿物石英和长石在L2和L5段含量较少, 而黏土矿物含量自下而上呈明显增加趋势。名胜剖面龙马溪组沉积物具有镁铁质和长英质双重来源, 其中L3段和L4段为镁铁质或超镁铁质物源, 而L1段、L2段和L5段更多为长英质或长英质与镁铁质混合物源。源岩形成的构造背景为大陆边缘, 沉积物具有活动大陆边缘和被动大陆边缘的双重特征。物源组成的变化表明志留纪早期康滇古陆构成复杂。

关键词: 名胜剖面; 志留系; 龙马溪组; 泥页岩; 物源特征; 构造背景

中图分类号: P595

文献标识码: A

Analysis of geochemical characteristics, provenance, and tectonic background of black shale in the Silurian Longmaxi Formation of the Mingsheng section in the Yanyuan area, Sichuan Province

CHENG Jinxiang^{1,2,3}, DENG Min^{1,2*}, YANG Guilai^{1,2}, YU Qian^{1,2}

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610218, China; 3. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

收稿日期: 2022-12-26; 改回日期: 2023-07-18; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 程锦翔(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事沉积学及页岩气地质研究。E-mail: cjinxiang@mail.cgs.gov.cn

通信作者: 邓敏(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事沉积地质、石油地质、非常规油气方面的研究。E-mail: dengmin911@126.com

资助项目: 中国地质调查局项目“四川盆地东南缘煤层(系)气调查评价”(DD20242049), “四川盆地及周缘页岩气地质调查与评价”(DD20240046), “四川盆地油气资源潜力评价”(DD20242405), “自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室开放基金”(DGERA20231107)

Abstract: The graptolitic shales of the Longmaxi Formation were widely deposited during the Silurian transition in the Yanyuan area. This study selected fresh outcrops of the Silurian Longmaxi Formation at the Mingsheng section in the Yanyuan area, systematically sampled them, and analyzed the vertical variation characteristics of major, trace, and rare earth elements in the section. Moreover, this study discussed the perspective of geochemical characteristics, provenance characteristics, and tectonic environment of that period. Research results show that the Longmaxi Formation at the Mingsheng section in the Yanyuan area is predominantly siliciclastic shale facies (sections L1, L3, and L4), with higher carbonate mineral content in sections L2 and L5, and brittle minerals such as quartz and feldspar are less abundant in sections L2 and L5, while clay minerals show a significant increasing trend from bottom to top. The sediments of the Longmaxi Formation at the Mingsheng section have a dual source of mafic and felsic materials: sections L3 and L4 are of mafic or ultramafic provenance, while sections L1, L2, and L5 are more felsic or a mixture of felsic and mafic sources. The tectonic background of the source rock formation is continental margin, and the sediments exhibit dual characteristics of both active and passive continental margins. The variation in provenance indicates that the composition of the Kangdian paleocontinent was complex in the Early Silurian.

Key words: Mingsheng section; Silurian; Longmaxi Formation; shale; provenance; tectonic setting

0 前言

碎屑岩的化学成分被认为是推断沉积盆地构造环境的重要工具(Bhatia and Crook, 1986; Armstrong et al., 2004)。主要氧化物、某些微量元素和稀土元素可以作为源岩特征的可靠指标(Taylor and McLennan, 1985; Madhavaraju, 2015)。源区包含各种类型的火成岩,可以通过微量元素进行区分(Madhavaraju and Lee, 2010)。被动大陆边缘形成的沉积物经历了彻底的混合和均质化,导致主要氧化物和某些微量元素的成分接近均匀,而在活动大陆边缘沉积物中,这种再循环过程较少,从而产生未成熟沉积岩(Lee, 2009)。微量元素(Y、Th、Zr、Hf和Nb)在沉积过程中具有较低的活动性,被认为是可靠的物源解释指标(Holland, 1978; Kurtz et al., 2000)。La(富集于长英质岩石中)和Cr、Ni(富集于基性岩中)等不活动微量元素的浓度经常被用来解释来自不同构造环境(Cullers, 2000)的长英质和镁铁质岩石的分布。碎屑岩中微量元素比值、REE配分模式和Eu异常进一步提供了有关物源的有用信息(Cullers, 1995; Raza et al., 2012; 熊国庆等, 2021)。

盐源名胜志留系剖面位于“康滇地轴”之西,志留系存在完整的早志留世(Llandovery)和中志留世(Wenlock)的海相沉积(王成源, 2009)。该区龙马溪组地质研究成果主要针对沉积环境、矿物岩石特征、沉积相研究等方面(程锦翔等, 2022; 王正和等, 2018; 张茜等, 2017)。王正和等(2018)以宁蒭大槽子剖面为例,认为龙马溪组构造背景为活动大陆边缘,与康滇古陆以东的稳定大陆边缘背景不

同。张茜等(2017)对李子河剖面进行分析,认为其形成于大陆边缘海沉积环境。可见,相关研究尚局限于少数学者从沉积学及地球化学角度对该地区构造背景的探究,且都认为是大陆边缘环境(具体为活动大陆边缘还是被动大陆边缘存在差异),而对该区域龙马溪组沉积物源特征鲜有涉足。本文从盐源地区南缘名胜剖面志留系龙马溪组地球化学特征入手,通过对龙马溪组岩石组合特征分析,结合矿物学特征及元素地球化学特征,详细探讨康滇古陆西侧早志留世沉积物的物源特征;结合前人研究,简单分析其构造背景,为深入研究康滇古陆西侧沉积构造演化过程及古地理格局提供依据。

1 地质背景

康滇古陆位于扬子陆块的西南缘,广泛出露元古宙基底地层。老一辈地质学家如黄汲清(1954)称之为“康滇地轴”;郭文魁(1954)称之为“康滇古陆”(钟康惠等, 2004)。盐源地区位于康滇古陆西侧,属于盐源-丽江台缘坳陷(印支-燕山期)(唐若龙等, 1987)。该盆地主要由金河-箐河断裂和宁蒭断裂所围限(图 1a)。研究区内出露的沉积地层从老到新为震旦系至第四系,缺失侏罗系与白垩系,三叠系以下,除上二叠统玄武岩以外,均属海相沉积地层。

名胜剖面位于盐源地区南缘,龙马溪组厚 161.5 m,整体以黑色碳质硅质泥岩为主,夹碳质泥岩,碳质泥灰岩。笔石序列较完整,但未见奥陶系五峰组笔石,结合区域地质特征,认为盐源地区缺失上奥陶统,龙马溪组底部与奥陶系巧家组岩溶角

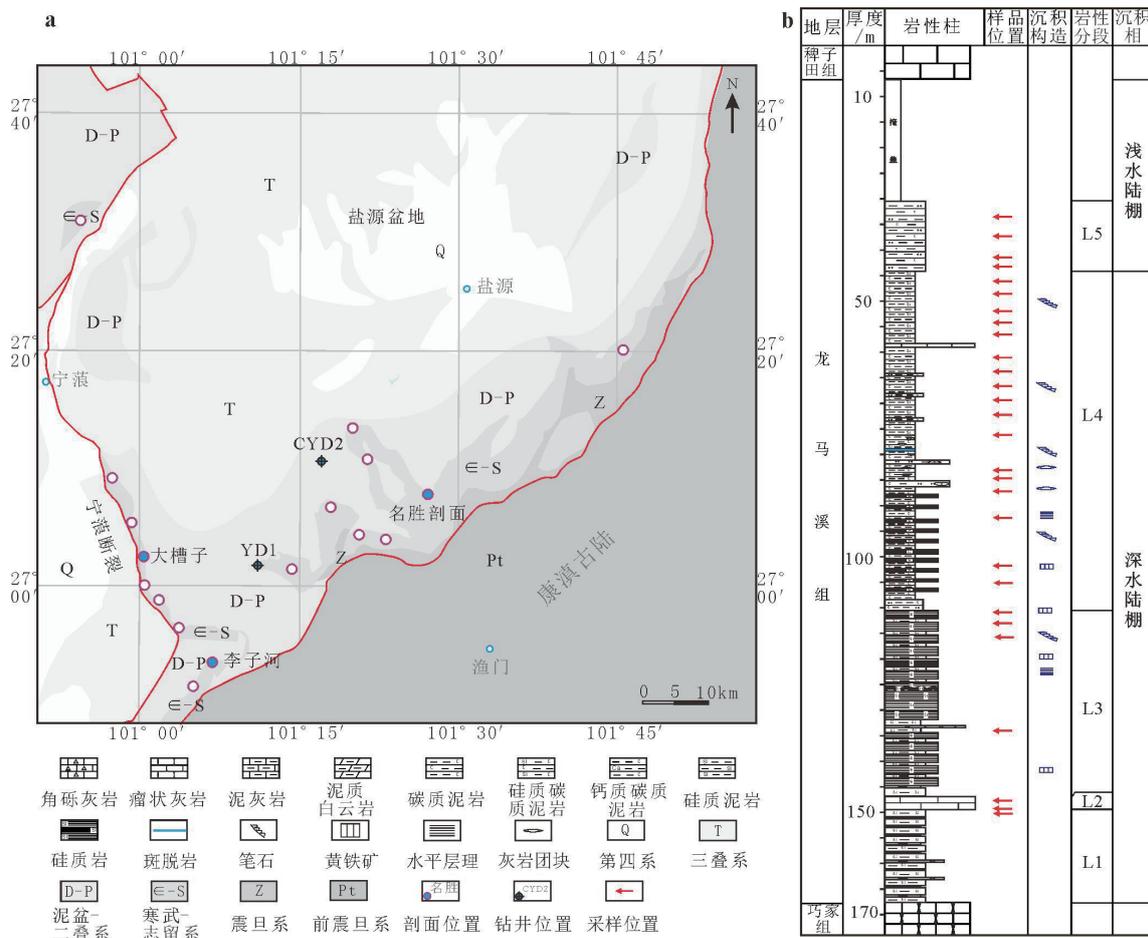


图1 盐源地区地质简图 (a) 及名胜剖面柱状图 (b)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yanyuan area (a), and stratigraphic column of the Mingsheng section (b)

砾灰岩平行不整合接触,上部则与志留系稗子田组瘤状灰岩整合接触。

依据岩性及地球化学特征差异,志留系龙马溪组可分为5段,从下到上依次为龙马溪组一段到五段(L1—L5)(图1b)。

龙马溪一段(L1段)位于龙马溪组底部,发育黑色碳质硅质泥页岩夹硅质岩,泥质结构,风化严重,风化面呈浅紫红色,黏土状。局部含粉砂质,不均匀分布。有机质含量较低,未见笔石。L2段位于龙马溪组下部,发育灰色泥灰岩,泥质结构,钙质含量较高(图2a, 2g),见石英碎屑颗粒。L3段位于龙马溪组中下部,发育黑色碳质硅质泥页岩夹硅质碳质泥岩,泥质结构,局部具贝壳状断口。局部含粉砂质,碎屑颗粒以石英为主,不均匀分布(图2b, 2h, 2i)。整体具有硅质含量高、笔石发育的特征。L4段位于龙马溪组中上部,发育黑色粉砂质碳质泥页岩夹少量含粉砂硅质碳质泥岩(图2c-d),具泥质、粉砂质泥质结构。局部含粉砂质,碎屑颗粒以

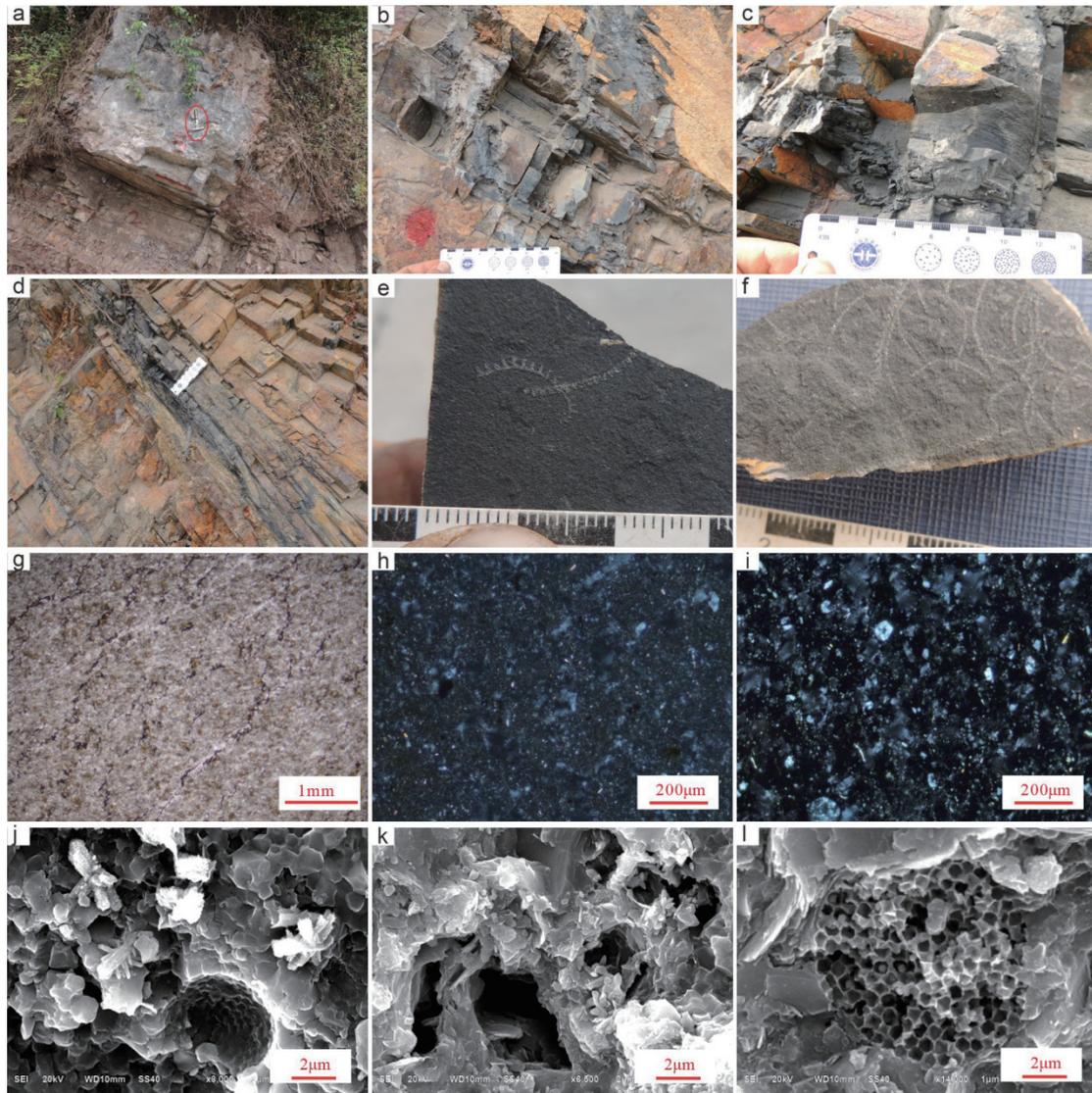
石英为主,向上粉砂质逐渐增多,见凝灰岩层,厚1~3 cm。呈砂质含量高,碳质含量较高、笔石较发育的特征(图2e-f)。L5段位于龙马溪组上部,发育黑色粉砂质碳质泥页岩夹深灰色粉砂质钙质碳质泥岩及深灰色粉砂质碳质泥灰岩,泥质、粉砂质泥质结构,钙质含量较高。粉砂质石英颗粒均匀分布,笔石较少,碎片状,具粉砂质结构,呈钙质含量高、碳质含量较低、笔石不发育,厚度小的特征。

优质烃源岩主要集中在龙马溪组下部(L3—L4),与康滇古陆东侧相比,龙马溪组底部硅质岩更加发育,富有机质层段厚度增加,富含微孔隙(图2j-l)。

2 样品测试与数据处理

2.1 样品测试方法

岩石样品采集自名胜剖面,采样时已尽量剥除风化表面,保证样品新鲜和足量。根据不同岩性进行非等间距采集,采样间距在1.7~8.5 m之间。主量元素、微量元素和稀土元素由自然资源部西南



a. 灰色泥晶灰岩, L2段; b. 黑色碳质硅质泥岩, L3段; c. 黑色粉砂质硅质碳质泥岩, L4段; d. 黑色粉砂质碳质泥岩, L4段; e. 黑色粉砂质硅质碳质泥岩中发育笔石, L4段; f. 黑色粉砂质硅质碳质泥岩中发育笔石, 风化为灰色, L4段; g. 含藻屑泥晶灰岩, L2段; h. 碳质硅质泥岩见燧石, L3段; i. 碳质硅质泥岩见燧石, 发育放射虫, L3段; j. 矿物溶蚀孔隙, 铸模孔隙, $0.056\sim 3.624\ \mu\text{m}$, L3段; k. 矿物溶蚀孔隙, $0.111\sim 3.548\ \mu\text{m}$, L3段; l. 矿物溶蚀孔隙, $0.053\sim 2.302\ \mu\text{m}$, L4段

图2 名胜剖面志留系龙马溪组特征

Fig. 2 Characteristics of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

矿产资源监督检测中心完成测试。主量元素用X荧光光谱法测试,测试方法和依据为《硅酸盐岩石化学分析方法第14部分:氧化亚铁量测定》(GB/T14506.14-2010),《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次成分量测定》(GB/T14506.28-2010)。微量和稀土元素分析用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试,测试方法和依据为《硅酸盐岩石化学分析方法第30部分:44个元素量测定》(GB/T14506.30-2010)。

2.2 数据处理

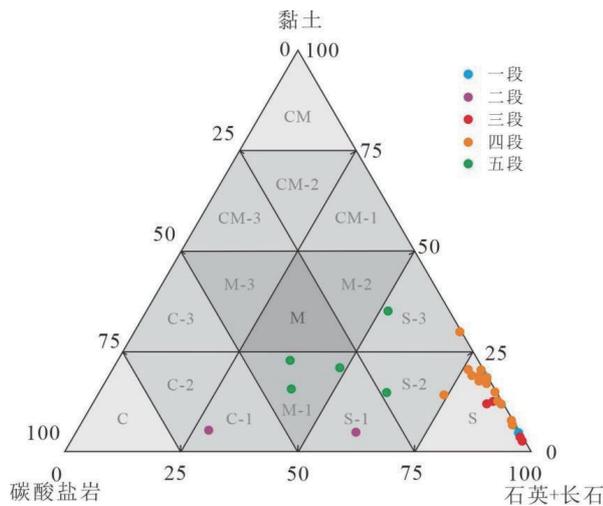
微量元素的富集系数(enrichment factor, EF)可用于快速评估样品中氧化还原敏感元素的富集程度,并抵消由碳酸盐和有机质引起的稀释效应。对于稀土元素分析及钕异常计算依据 Taylor and McLennan (1985),均选取球粒陨石标准化,球粒陨石数据来源于 Taylor et al. (1985)。文中运用 Bhatia F1-F2 函数构造环境判别图解,其中 F1 和 F2 计算公式依据 Bhatia et al. (1983)。

3 测试结果

对名胜剖面志留系龙马溪组 28 件岩石地球化学样品进行了测试,其中黑色碳质硅质泥岩样品为 26 件,碳酸盐岩样品 2 件,具体位置见图 1b。部分主、微量元素、稀土元素和有机碳分析及比值见附表 1*、附表 2*。

3.1 矿物学特征

X 衍射定量分析结果显示(图 3,附表 1*),岩石主要以碳酸盐矿物、石英和黏土矿物为主,碳酸盐矿物包括方解石和白云石,含量为 0%~65.1%,平均值为 8.82%;黏土矿物含量为 3.9%~34.3%,平均含量为 14.23%,自下而上,含量呈明显增加趋势;脆性矿物石英和长石含量为 27.8%~96.1%,平均值为 74.47%。碳酸盐矿物仅在 L2 和 L5 段含量丰富,其他层段含量较少且稳定;脆性矿物石英和长石在 L2 和 L5 段含量较少,其他层段含量较稳定。



硅质页岩相组合: S. 硅质页岩相, S-1. 含灰硅质页岩相, S-2. 混合硅质页岩相, S-3. 含黏土硅质页岩相; 灰质页岩相组合: C. 灰质页岩相, C-1. 含硅灰质页岩相, C-2. 混合灰质页岩相, C-3. 含黏土灰质页岩相; 黏土质页岩相组合: CM. 黏土质页岩相, CM-1. 含硅黏土质页岩相, CM-2. 混合黏土质页岩相, CM-3. 含灰黏土质页岩相; 混合质页岩相组合: M. 混合质页岩相, M-1. 含灰/硅混合质页岩相, M-2. 含黏土/硅混合质页岩相, M-3. 含黏土/灰混合质页岩相

图 3 名胜剖面龙马溪组页岩矿物组成三端元图解

Fig. 3 Ternary diagram showing the mineralogy compositions of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

根据页岩岩相划分方案(吴蓝宇等, 2016), 名胜剖面样品数据点多落入硅质页岩相区域中(S), 其中 L1 段, L3 段和 L4 段, 除了 Y14 和 Y16 之外的样品数据点均落入硅质页岩相区域(S), L2 段灰质含量高, 为含灰硅质页岩相(S-1)和含硅灰质页岩相(C-1); L5 段灰质及黏土含量较高, 多为含灰/硅混合质页岩相(M-1), 其他分别为混合硅质页岩相(S-2)和含黏土硅质页岩相(S-3)。L1 段, L3 段和 L4 段硅质页岩相矿物成分较纯且含黄铁矿, 表明其沉积环境为相对低能、缺氧的还原环境。至 L5 段灰质及黏土含量增加, 推测其沉积水体深度比硅质页岩相略浅, 沉积水动力环境相对略强(王志峰等, 2014)。

研究区在龙马溪期经历了不同幅度的海平面升降变化, 进而导致了岩性岩相的横向变化。L1 段海平面逐渐上升, 沉积相带向古陆方向靠近, 由细粒碎屑沉积迅速转变为碳酸盐岩(L2)沉积; 至 L3—L4 段, 较大规模的海退致使海平面迅速下降, 碳酸盐岩(L2)沉积迅速转变为细粒碎屑沉积; 至 L5 段, 随着海平面逐渐上升, 碳酸盐矿物含量逐渐增加, 细粒碎屑沉积逐渐转换为碳酸盐矿物与细粒碎屑混合沉积, 形成含灰/硅混合质页岩相(M-1)。L1—L5 段的岩性岩相变化较为稳定, 是稳定构造背景下的产物。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主要元素

名胜剖面主要元素分布不均, 变化范围大, 变化规律与岩性特征一致(图 4, 附表 1*)。剖面中 SiO_2 含量在 21.27%~93.51% 之间, 平均为 74.72%。L2 段为灰岩段, SiO_2 含量平均为 40.03%; L3 段至 L5 段平均 SiO_2 含量依次为 85.17%, 80.62% 和 53.19%; 总体而言, 剖面中 SiO_2 含量由 L3 到 L5 逐渐减少。剖面中 Al_2O_3 含量在 0.32%~19.41% 之间, 平均为 5.81%。 Al_2O_3 含量由 L1—L5 逐渐增多, 指示上部受陆源影响较大。剖面中 CaO 含量在 0.09%~42.07% 之间, 平均为 4.29%。CaO 含量在 L2 段受岩性控制而呈现异常高值, 除 L2 外, 由 L1—L5, CaO 含量逐渐增加。

SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 的含量由下而上逐渐增加, 但在 L2 段受岩性控制, SiO_2 和 Al_2O_3 为低值, CaO 为高值(图 4, 附表 1*), 表明 L2 段为沉积环境转换

*数据资料请联系编辑部或登录期刊官网 <https://www.cjyttdz.com.cn/> 获取。

阶段。

沉积物地球化学特征可反映沉积物来源、陆源输入和海洋生产力变化等众多信息。CaO 含量反映的是钙质有机体的生产量,其变化表明生产力的变化。SiO₂ 是沉积物中含量最多的物质,名胜剖面中,其平均含量为 74.72%。SiO₂ 可能同时为陆源及生物来源(Sun et al., 2008),其可以来自陆地,作为陆源沉积的一种标志(金秉福等, 2003),也可

能是海洋生物作用的结果(刘英俊, 1984)。海水中的硅藻、放射虫、含硅质海绵和珊瑚等有机体会从海水中吸收 SiO₂,被富集的 SiO₂ 会以骨骼和壳体等生物残骸形式被保存下来。Al 是海洋沉积物的主要化学组分之一,其地球化学行为比较稳定,一般不参与生物作用,主要赋存于铝硅酸盐碎屑矿物中,基本代表陆源物质,常被用来作为陆源组分的指示剂(Wei et al., 2008)。

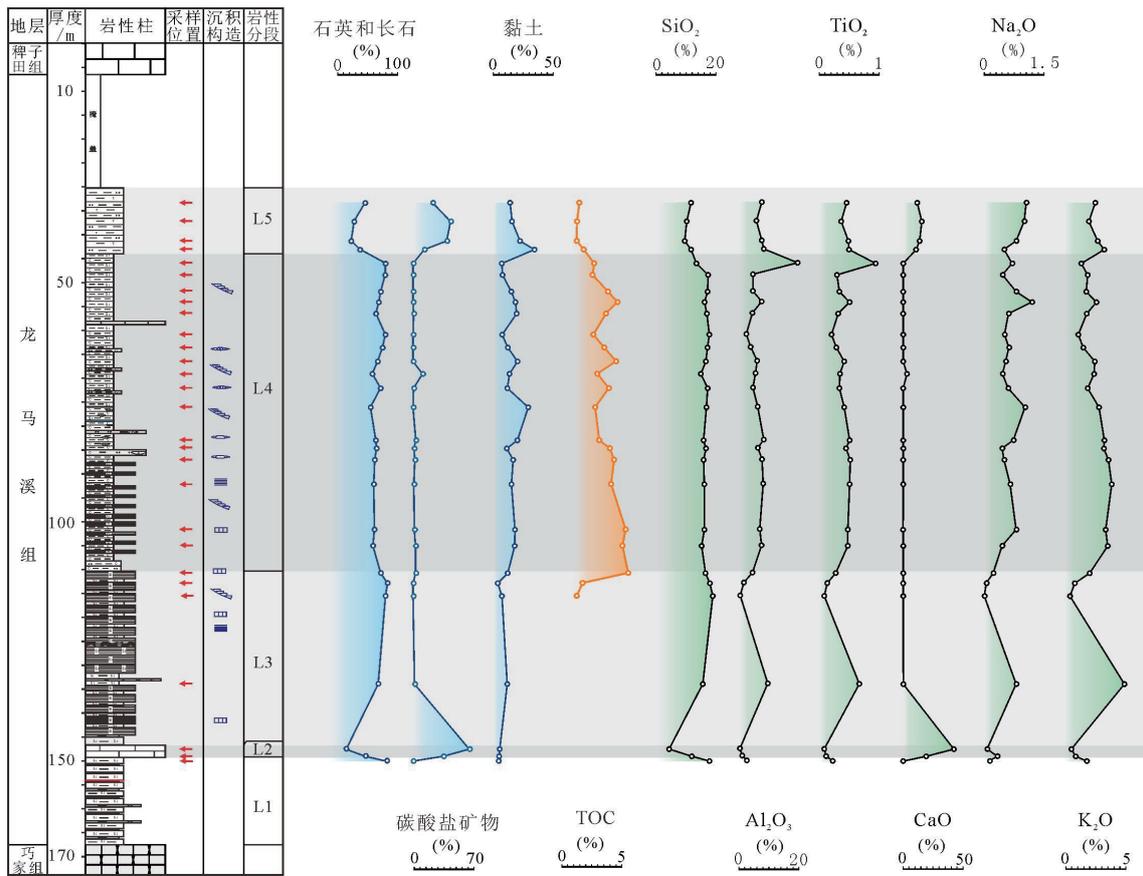


图 4 名胜剖面志留系龙马溪组地球化学指标的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of geochemical proxies of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

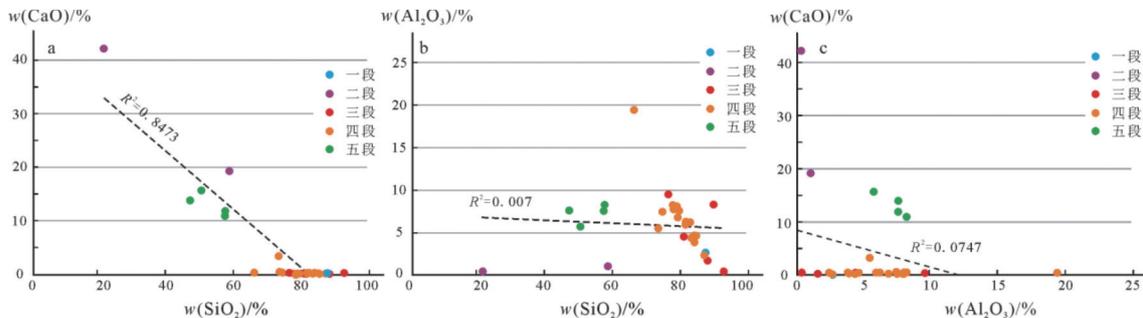


图 5 名胜剖面龙马溪组页岩 SiO₂、CaO 和 Al₂O₃ 含量相关关系图解

Fig. 5 Diagrams showing the correlation for the contents of SiO₂, CaO, and Al₂O₃ of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

名胜剖面中, SiO_2 与 CaO 含量的相关性相对较高($R^2=0.8473$)(图 5a), 与 Al_2O_3 的相关性较差($R^2=0.007$)(图 5b); 而 Al_2O_3 与 CaO 含量的相关性较差($R^2=0.0747$)(图 5c)。代表生物来源的 CaO 和 SiO_2 与代表陆源物质的 Al_2O_3 相关性差, 彼此相对独立, 推测 SiO_2 可能主要为生物来源。

3.2.2 微量元素

名胜剖面龙马溪组微量元素澳大利亚后太古代页岩(PAAS)标准化蛛网图显示(图 6), 龙马溪组大离子亲石元素 Sc、Sr 和 Cs 严重亏损, Nb 和 Ba 元素相对富集; 亲铁元素 V 相对富集, Co 和 Ni 元素严重亏损。垂向上, 志留系龙马溪组 L1 段至 L5 段, 由上向下, Ba 元素和 Nb 元素富集程度逐渐减小, V 元素主要富集于 L3 和 L4 段, 而在 L1、L2 和 L5 段则为亏损。各样品均显示出基本一致的曲线特征, 反映它们具有相同或相似的物质来源。

3.2.3 稀土元素

Nothdurft et al. (2004) 研究表明稀土元素(REE)在风化、迁移、沉积和成岩过程中具有很强的稳定性。通常将沉积岩中的稀土元素总量(ΣREE)作为陆地物质总量的一个指标, PAAS 的 ΣREE 值为 184.8×10^{-6} (Taylor et al., 1985), 沉积物或沉积岩中的 ΣREE 接近或高于该值时, 说明其微量元素主要由陆源碎屑提供; 当 ΣREE 远低于这个值, 说明它受陆源物质的影响较小(Nothdurft L D et al., 2004)。名胜剖面样品稀土元素总量, 除样品 Y4 之外, 其余均低于 PAAS 值(附表 2*), 表明样品 Y4 有陆源碎屑物质的加入。剖面中稀土元素总量 ΣREE 介于 $30.24 \times 10^{-6} \sim 261.18 \times 10^{-6}$, HREE 介于 $3.4 \times 10^{-6} \sim 26.65 \times 10^{-6}$, LREE 介于 $26.42 \times 10^{-6} \sim 234.53 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值介于 $6.47 \sim 14.97$, 平均值为 10.03 (附表 2*), 上述结果显示, 研究区轻、重稀土元素

分异明显, 轻稀土元素富集而重稀土元素亏损。

球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图显示研究区样品的稀土元素配分模式基本类似(图 7a-e): 曲线在 La—Sm 略陡, 在 Dy—Lu 较为平缓, 说明轻稀土元素富集、重稀土元素亏损; Eu 处出现一个“V”形, 存在明显 Eu 负异常(δEu 介于 $0.52 \sim 0.86$, 平均值为 0.64)(附表 2*)。这种特征在 L1—L5 段中均有体现, 说明物源较为一致, 物源区相对稳定。这些特点体现了典型沉积岩的稀土配分特征, 与活动大陆边缘和被动大陆边缘沉积岩的稀土配分模式较为相似(潘世乐等, 2021)。

4 讨论

4.1 分选及沉积再旋回

许多古老的沉积盆地接收火成岩来源的碎屑物质, 以及古老沉积岩再旋回的沉积物(Gaillardet et al., 1999)。古老沉积岩通常提供成熟沉积物(Weaver et al., 1989), 而与岛弧相关的火成岩衍生沉积物主要为未成熟沉积物(Cox et al., 1995)。ICV(index of compositional variability)成分变异指数通常用于判断沉积再循环作用对细粒碎屑岩成分的改变程度, 即风化过程容易迁移的元素之和与不易迁移的铝元素的比值, 其表达式为(Cox et al., 1995): $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$, 其中主要成分均指摩尔分数, CaO^* 为硅酸岩中的 CaO 。成岩矿物如长石、角闪石和辉石的 ICV 值 > 1 , 黏土矿物如伊利石、白云母和高岭石的 ICV 值 < 1 (Cox et al., 1995)。名胜剖面的 28 件样品, 除 Y20 之外, 其余样品 ICV 值均大于 1, 平均值为 2.48(附表 2*), 表明样品成分成熟度低, 源岩为首次沉积的沉积物, 并未受到再沉积作用的影响。

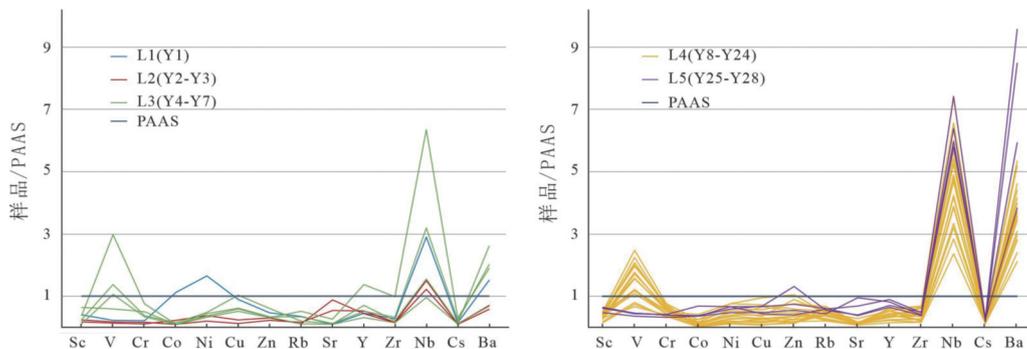


图 6 名胜剖面龙马溪组主要微量元素 PAAS 页岩标准化蛛网图

Fig. 6 PAAS-normalized spider diagrams for trace elements of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

沉积岩中化学成分分布主要取决于所含矿物的力学性质(Campos-Alvarez et al., 2007)。重矿物浓度及其微量元素被广泛用于确定沉积循环过程(McLennan S M et al., 1989)。Zr/Sc 比值则通过反映沉积再循环而被用于识别锆石富集(Hassan et al., 1982), 其中 Zr 在锆石矿物中强烈富集, 而 Sc 不富集, 但 Sc 一般保持物源特征(McLennan et al., 1989)。另一方面, Th/Sc 比值是判别火成岩分异的良好化学指标, 因为 Th 在火成岩体系中被认为是不相容元素, 而 Sc 通常是相容元素(McLennan et al., 1993)。那些由于沉积循环而在成分上趋于变化并富含 Zr 的样品可以使用 Th/Sc 和 Zr/Sc 交汇图加以区分(McLennan et al., 1993)。

名胜剖面大多数样品投点落在趋势线附近(图 8a), 表明成分变化很少或没有沉积循环作用。与上陆壳(UCC)类似, 部分样品具有较低的 Th/Sc 比值(五段), 这可能是由基性源岩造成的。沉积岩成分变化的这种趋势表明其沉积循环过程较弱, 是活动大陆边缘的典型特征(McLennan et al., 1993)。

可以采用 Al_2O_3 -Zr-TiO₂ 三元图来识别与沉积分选过程相关的分馏过程, 并区分成熟和不成熟沉

积物(Garcia et al., 1991)。结果显示, 名胜剖面样品少有或没有再循环作用, 除少数样品外(L2 段), 多数样品更靠近页岩端, 且倾向于辉长岩区, 表明这些样品与镁铁质成分更有亲和力(图 8b)。

4.2 物源分析

沉积物的地球化学成分倾向于反映源岩的成分, 因此常用来推断沉积物的物源(Raza et al., 2012)。沉积岩中 Al_2O_3/TiO_2 比值被认为是区分不同类型源岩的可靠工具(Garcia et al., 1994)。镁铁质源岩的比值通常较低(<8), 中性火成岩的比值在 $8\sim 21$ 之间, 长英质源岩的比值在 $21\sim 70$ 之间(Hayashi et al., 1997)。名胜剖面龙马溪组样品 Al_2O_3/TiO_2 值介于 $4.03\sim 20.80$ 之间(平均值 14.23), 反映其物源可能是镁铁质源岩—中性火成岩。

Rb/V-Sc/Nb-Zr/Zn 三元图可有效区分碎屑岩的可能来源(Sawant et al., 2017)。花岗岩来源的沉积物中 Rb 含量较高, 玄武岩来源的沉积物中 V 含量较高(Eynatten et al., 2016)。镁铁质来源的沉积物中 Sc 富集, 导致 Sc/Nb 比值增高, 在 Rb/V-Sc/Nb-Zr/Zn 三元图中定义基性端元。Sc/Nb 和 Rb/V 比值不受粒度分布的影响。Zn 独立地富集在细粒沉

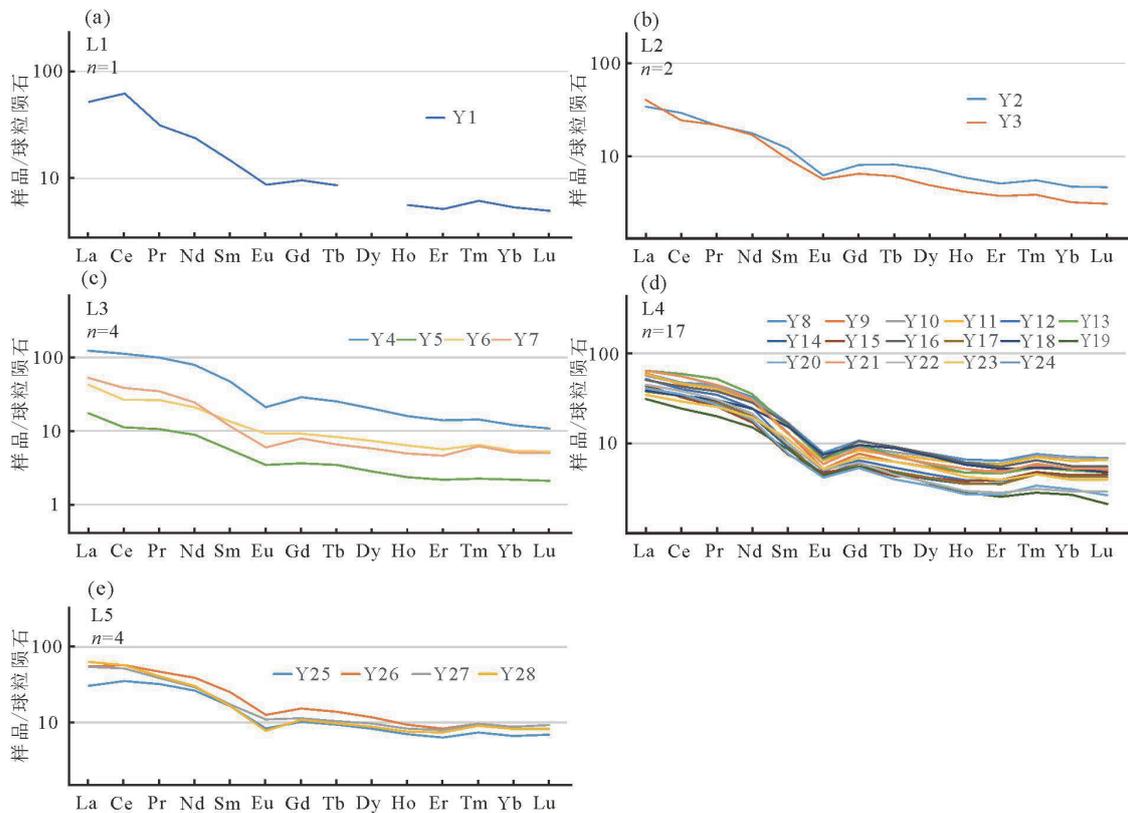


图 7 名胜剖面志留系龙马溪组球粒陨石标准化稀土元素配分型式

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

积物中, 而 Zr 在较粗的碎屑组分中较为丰富。因此, Zr/Zn 比值反映粒度对沉积物地球化学特征的影响, 该比值与粒度等沉积物地球化学特征呈正相关(Eynatten et al., 2016)。在 Rb/V–Sc/Nb–Zr/Zn 图解中, 玄武岩和流纹岩均存在不同的表现。玄武岩曲线平行于 Sc/Nb–Zr/Zn 段; 流纹岩曲线平行于 Rb/V–Zr/Zn 段。来自玄武岩源区的沉积物平行且靠近 Sc/Nb–Zr/Zn 段(图 9a), 来自花岗岩源区的沉积物平行并靠近 Rb/V–Zr/Zn 线。因此, Rb/V 端和 Sc/Nb 端代表长英质和基性端元物源。Sc/Nb 被 Eu/Eu* 替换, 类似于 Sc/Nb, 沉积物中 Eu/Eu* 的比值也可区分基性和长英质来源(Taylor et al., 1985)。两个三元图(图 9a-b)显示名胜剖面龙马溪组

沉积物来自两个物源区域, 其中 L3 段和 L4 段更靠近 Sc/Nb–Zr/Zn 段, 表明其多为镁铁质物源; 而龙马溪组 L1 段、L2 段和 L5 段更靠近 Rb/V–Zr/Zn 段, 表明其多为长英质物源或长英质镁铁质混合物源。

V–Ni–Th(×10) 三元图通过 Th(×10)、V 和 Ni 端区分长英质岩和镁铁质—超镁铁质沉积物的来源(Bracciali et al., 2007)。类似于 Th(×10), 沉积物中 La(×4) 替代 Th(×10) 的比值也可区分基性和长英质来源(Taylor et al., 1985)。图 10 显示, 名胜剖面龙马溪组沉积物来自两个物源区域, L3 段和 L4 段更靠近 V 端, 表明其多为超镁铁质物源; 而龙马溪组 L1 段、L2 段和 L5 段更靠近 Th(×10) 或 La(×4) 端,

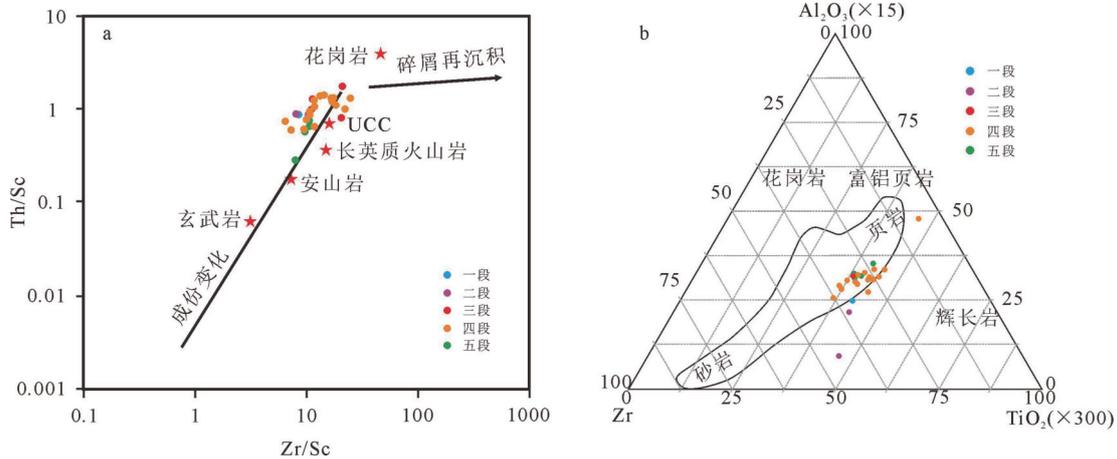
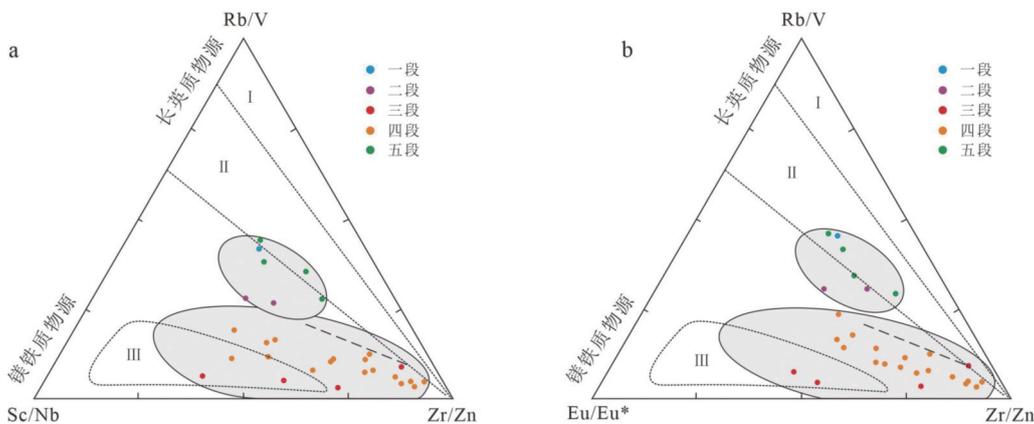


图 8 名胜剖面龙马溪组碎屑岩 Th/Sc–Zr/Sc 图解 (a) 及 Al₂O₃(×15)–Zr–TiO₂(×300) 图解 (b)

Fig. 8 Th/Sc–Zr/Sc ratio plot (a) and Al₂O₃(×15)–Zr–TiO₂(×300) diagram (b) of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section



I: 二长花岗岩物源; II: 英云闪长岩花岗闪长岩物源; III: 辉长岩闪长岩物源; (数据来自 Eynatten et al., 2016)

图 9 名胜剖面龙马溪组 Rb/V–Sc/Nb–Zr/Zn 图解 (a) 和 Rb/V–Eu/Eu*–Zr/Zn 图解 (b)

Fig. 9 Ternary Rb/V–Sc/Nb–Zr/Zn (a) and Rb/V–Eu/Eu*–Zr/Zn (b) provenance discrimination diagrams of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

表明其多为长英质物源或长英质镁铁质混合物源。

McLennan et al. (1989)将 Th/Co 与 Zr/Co 图解用于区分源岩的长英质和镁铁质性质(McLennan et al., 1989)。图 11a 显示, 名胜剖面龙马溪组沉积物以镁铁质火山岩来源为主。

Totten et al. (2000) 使用 Th/Sc 比值来表征镁铁质和长英质来源。Th 为不相容元素, 富含于硅质岩中, Sc 是相容性元素, 富含于镁铁质岩中。Th/Sc 比值接近 1 是上陆壳(UCC)的典型特征, Th/Sc 比值接近 0.6 表明含有更多的镁铁质成分。如图 11b 所示, 名胜龙马溪组 L1 段至 L4 段多数样品的 Th/Sc 比值接近 1, 与上地壳成分接近, 少量样品的 Th/Sc 比值接近 0.6, 具有镁铁质成分; 而龙马溪组五段样品 Th/Sc 比值更接近 0.6, 具有镁铁质特征。整体具有上地壳成分与镁铁质成分混合的特征。

多个判别图解显示, 名胜剖面龙马溪组沉积物

具有镁铁质和长英质双重来源, 且以镁铁质火山岩为主。其中 L3 段和 L4 段为超镁铁质物源; 而 L1 段、L2 段和 L5 段更多为长英质物源或长英质镁铁质混合物源。

康滇构造带经历了从中元古代古岛弧褶皱带的形成, 新元古代裂谷盆地的产生, 加里东晚期的裂前台背斜隆起, 到海西-喜山早期大陆古裂谷带的发生、发展与消亡的演化历程(骆耀南等, 1982; 宁括步等, 2023; 邓奇等, 2023)。晚震旦世至早奥陶世表现为地壳差异运动微弱以及岩浆活动不明显(骆耀南等, 1982)。中奥陶世开始, 来自上地幔局部熔融的玄武岩浆底辟上升, 同时康滇轴部地带形成的基底断裂发生张性松弛事件。沿初始张裂带出现加里东晚期串珠状小型超基性岩体群的侵位活动, 出现一系列 Cu、Ni、Pt 矿化的小型超镁铁质岩体群(曾忻耕等, 1991), 说明上地幔物质开始

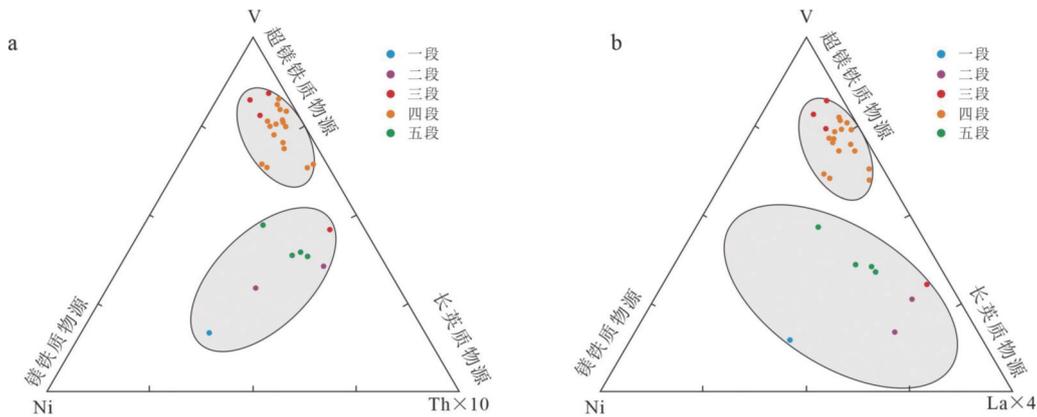


图 10 名胜剖面龙马溪组 V-Ni-Th($\times 10$) 三元图解 (a) 和 V-Ni-La($\times 4$) 三元图解 (b)

Fig. 10 Ternary V-Ni-Th($\times 10$) (a) and V-Ni-La($\times 4$) (b) provenance discrimination diagrams of the Silurian Longmaxi Formation in the Mingsheng section

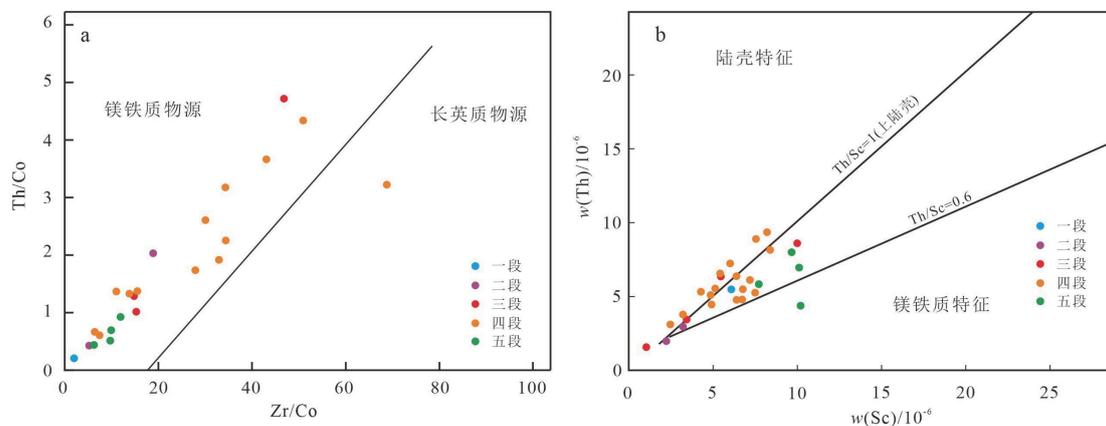


图 11 名胜剖面龙马溪组 Th/Co-Zr/Co 图解 (a) 及 Th-Sc 图解 (b) 指示物源特征

Fig. 11 Th/Co-Zr/Co plot (a) and Th-Sc plot (b) showing provenance characteristics

挤入(骆耀南等, 1982), 打破了长期以来相对平稳的地台发展状态, 引起了上地壳上隆作用, 康滇古陆开始隆升, 以致晚奥陶世地层在本区没有沉积(谢竦克等, 1959)。志留纪时, 康滇古陆持续隆升, 将志留纪海分隔为东西两侧。东侧升降频繁, 形成黑色页岩相、灰岩相、灰绿色、紫红色页岩相建造。西侧则处于相对平静状态, 连续沉积了相当厚的黑色页岩建造(谢竦克等, 1959)。

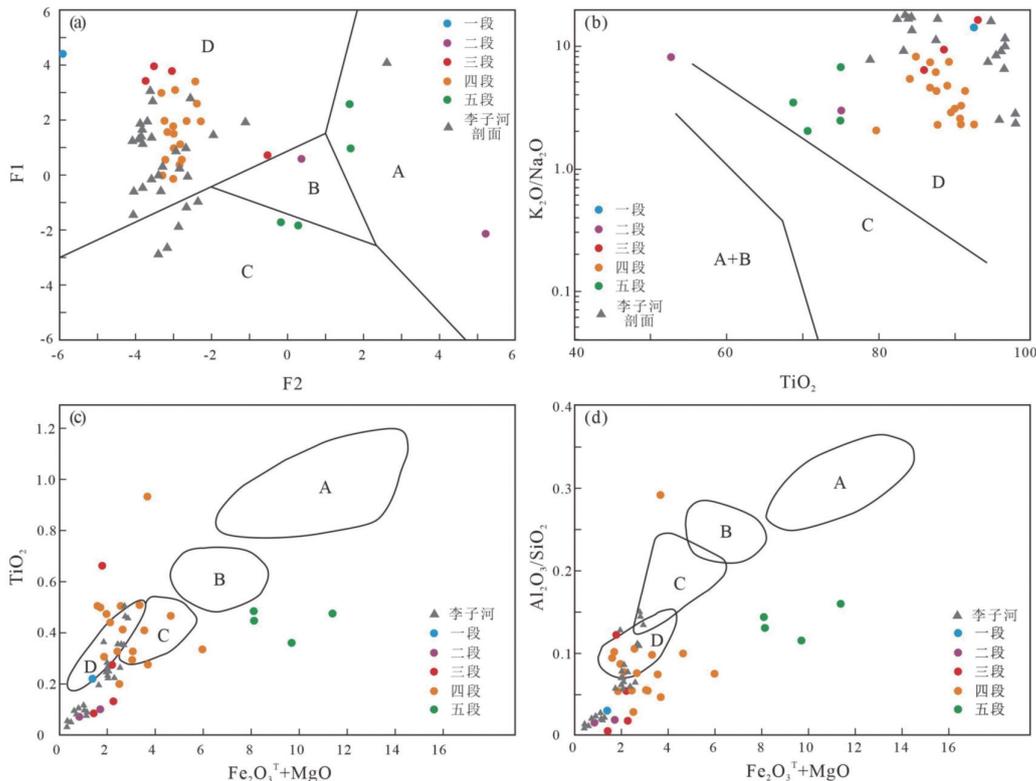
名胜龙马溪组剖面位于康滇古陆西侧, 其岩石学、矿物学及地球化学特征指示其沉积物源母岩主要为超基性岩类, 部分为长英质火成岩。推测早志留世沉积物源来自东侧康滇古陆, 此时康滇古陆初步隆升成陆, 陆内发育大量加里东晚期串珠状小型超基性岩体群(曾忻耕等, 1991)。因加里东升降运动导致中元古代盐边群局部出露(曾忻耕等, 1991), 而盐边群为一套来源于中酸性岛弧物质的碎屑沉积岩(杜利林等, 2013)。此时物源区的复杂性造成名胜剖面龙马溪组地球化学物源特征的

复杂性, 即 L1、L2 段和 L5 段表现为长英质物源, 可能为前震旦系地层盐边群; 而 L3 和 L4 段表现为超镁铁质物源, 可能为加里东晚期小型超基性岩体群。这种物源的变化表明志留纪早期康滇古陆构成复杂。

4.3 构造背景分析

大地构造背景的差异直接影响主量元素、微量元素分布状态(Bhatia et al., 1982)。Bhatia et al. (1983)最早提出了碎屑岩形成的大地构造环境判别函数及构造环境判别图解; Roser 和 Korsch (1986)认为具有相似地球化学特征的细碎屑岩, 有着相同的物源和沉积构造背景。因此, 利用这些元素的特征或其相关性可以识别出名胜剖面龙马溪组形成时的古构造背景。

在碎屑岩主量元素 F1-F2 函数构造环境判别图(图 12a)中, 相邻李子河剖面龙马溪组(张茜, 2017)和名胜剖面龙马溪组样品多数落在被动大陆区域内; K_2O/Na_2O-TiO_2 图解中(图 12b), 几乎所有



a. F1-F2 函数构造环境判别图 (Bhatia, 1983); b. K_2O/Na_2O-TiO_2 图解 (Roser and Korsch, 1986); c. $TiO_2-Fe_2O_3^T+MgO$ 图解; d. $Al_2O_3/SiO_2-Fe_2O_3^T+MgO$ 图解 (Bhatia, 1983)。A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动陆缘; D—被动陆缘。李子河剖面数据来自张茜, 2017

图 12 名胜剖面龙马溪组沉积构造背景判别图

Fig. 12 Discrimination diagrams of major and trace elements for tectonic setting of the Longmaxi Formation in the Mingsheng section

样品数据点都落在被动陆缘区域;在 $TiO_2-Fe_2O_3^T+MgO$ 和 $Al_2O_3/SiO_2-Fe_2O_3^T+MgO$ 图解($Fe_2O_3^T$ 代表全铁含量,即 Fe_2O_3+FeO) (图 12c-d) 中,样品点分布较为分散,部分落在被动大陆边缘,部分落入活动大陆边缘及大陆岛弧附近区域,识别出较为复杂的构造背景,这有可能与元素活动性较强,识图能力较弱有关 (Tawfik et al., 2015)。加之前人在研究物源区构造背景时发现,以被动大陆边缘为主要物源的岩石通常包含较多的活动大陆边缘和/或大陆岛弧的地球化学信息 (柏道远等, 2007)。因此本文基于岩石地球化学特征结合区域地质背景,认为名胜剖面龙马溪组沉积具有活动大陆边缘和被动大陆边缘的特征。

Bhatia et al. (1986) 对不同构造环境下的稀土元素特征进行分类。未切割的岩浆弧具有稀土元素总量低,轻稀土元素弱富集以及基本无 Eu 负异常的特征,为大洋岛弧源区类型;切割的岩浆弧具有稀土元素总量较高,轻稀土元素中等富集以及弱的 Eu 异常的特征,为大陆岛弧源区类型;活动大陆边缘和被动大陆边缘源区且具有稀土元素总量高、轻稀土元素富集以及较为明显的 Eu 负异常。

名胜剖面龙马溪组稀土元素总量较高、轻稀土元素富集以及具有较为明显的 Eu 负异常,且元素特征值与活动大陆边缘和被动大陆边缘背景下的稀土元素特征值最为相似,表明物源具备活动大陆边缘和被动大陆边缘的双重特征。

始于中奥陶世的康滇古陆上隆作用,延续至海西早期时,随着上地壳物质的大量上涌以及壳下玄武岩枕状体的堆积而愈演愈剧,古陆隆起范围空前扩大。于是,盐源-丽江边缘海随之逐渐张开,康滇古陆西缘由此成了锯齿状张裂的被动大陆边缘 (骆耀南等, 1982)。

因此,志留纪早期,康滇古陆西缘为被动大陆边缘,沉积物具有被动大陆边缘特征。康滇古陆的隆升为其西缘盐源-丽江海源源不断地提供了物质,其提供的物源既有来自岛弧物质形成的碎屑岩 (盐边群) 也有来深部的基性岩,因而具有活动大陆边缘的特征。总体而言,志留纪早期龙马溪组沉积于大陆边缘构造环境,沉积物具有活动大陆边缘和被动大陆边缘的双重特征。

5 结论

(1) 盐源地区名胜剖面龙马溪组自下而上可分

为 5 段 (L1—L5), 以硅质页岩相 (L1 段, L3 段和 L4 段) 为主, 含灰/硅混合质页岩相 (L5 段) 及含灰硅质和含硅灰质页岩相 (L2 段) 较少。至 L5 段灰质及黏土含量增加, 推测其沉积水体深度比硅质页岩相略浅, 沉积水动力环境相对略强。

(2) 名胜剖面龙马溪组物源具有镁铁质和长英质双重来源, 且以镁铁质火山岩为主。其中 L3 段和 L4 段为超镁铁质物源; 而 L1 段、L2 段和 L5 段更多为长英质物源或长英质镁铁质混合物源。这种物源的变化表明志留纪早期, 康滇古陆构成复杂。

(3) 名胜剖面龙马溪组稀土元素总量较高、轻稀土元素富集以及较为明显的 Eu 负异常, 与活动大陆边缘和被动大陆边缘背景下的稀土元素特征最为相似; 结合剖面主量元素函数构造环境判别图解, 认为名胜剖面志留纪早期龙马溪组沉积于大陆边缘构造环境, 沉积物具有活动大陆边缘和被动大陆边缘的双重特征。

致谢: 本文相关研究获得了中国地质调查局四川盆地东南缘煤层 (系) 气调查评价 (DD2024 2049), 四川盆地及周缘页岩气地质调查与评价 (DD20240046) 和四川盆地油气资源潜力评价 (DD20242405) 项目的支持。审稿人提出了建设性的修改意见, 为本文增色不少, 在此致以由衷感谢。

References

- Armstrong-Altrin J S, Lee Y I, Verma S P, et al., 2004. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting [J]. *Sed. Res.*, 74: 285–297.
- Bhatia M R, 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *Journal of Geology*, 91 (4): 611–627.
- Bhatia M R, Crook K A W, 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 92 (2): 181–193.
- Bai D Y, Zhou L, Wang X H, et al., 2007. Geochemistry of Nanhuan–Cambrian sandstones in southeastern Hunan, and its constraints on Neoproterozoic–Early Paleozoic tectonic setting of south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (6): 755–771 (in Chinese with English abstract).
- Bracciali L, Marroni M, Luca P, et al., 2007. Geochemistry and petrography of western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): From source areas to configuration of margins [M]. *Geological Society of America*.

- Campos-Alvarez N O, Roser B P, 2007. Geochemistry of black shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: source weathering, provenance, and tectonic setting[J]. *South Am. Earth Sci.*, 23: 271 – 289.
- Cheng J X, Deng M, Wang Z H, et al., 2022. Paleo-marine redox conditions and development model of high-quality source rocks of the Early Silurian on the West side of Kangdian Oldland: A case study of CYD2 well in Yanyuan area[J]. *Geological Bulletin of China*, 41 (10): 1813 – 1828 (in Chinese with English abstract).
- Cox R, Lowe D R, 1995. Cullers R L, The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59 (14): 2919 – 2940.
- Cullers R L, 1995. The controls on the major-element and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains Region, Colorado, USA[J]. *Chem. Geol.*, 123: 107 – 131.
- Cullers R L, 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, U. S. A.: implications for provenance and metamorphic studies[J]. *Lithos*, 51: 181 – 203.
- Deng Q, Cui X Z, Wang Z J, et al., 2023. New understanding of the tectonic evolution of the northern margin of Yangtze Block: Constraints from the geochronology and geochemistry of the Huashan Group[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (1): 212 – 225 (in Chinese with English abstract).
- Du L L, Guo J H, Geng Y S, et al., 2013. Age and tectonic setting of the Yanbian Group in the southwestern Yangtze Block: Constraints from clastic sedimentary rocks. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (2): 641 – 672 (in Chinese with English abstract).
- Dulski P, 1994. Interferences of oxide, hydroxide and chloride analyte species in the determination of rare earth elements in geological samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 350: 194 – 203.
- Eynatten H V, Tolosana-Delgado R, Karius V, et al., 2016. Sediment generation in humid Mediterranean setting: Grain-size and source-rock control on sediment geochemistry and mineralogy (Sila Massif, Calabria) [J]. *Sedimentary Geology*, 336: 68 – 80.
- Gaillardet J, Dupré B, Allègre C J, 1999. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 4037 – 4051.
- Garcia D, Coelho J, Perrin M, 1991. Fractionation between TiO₂ and Zr as a measure of sorting within shale and sandstone series (Northern Portugal) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 3 (2): 401 – 414.
- Garcia D, Fontelles M and Moutte, et al., 1994. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr and the genesis of strongly peraluminous granites[J]. *Geol.*, 102: 411 – 422.
- Hassan S, Ishiga H, Roser B P, et al., 1999. Geochemistry of Permian-Triassic shales in the Salt Range, Pakistan: implications for provenance and tectonism at the Gondwana margin[J]. *Chemical Geology*, 158 (3): 293 – 314.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland, et al., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 4115 – 4137.
- Holland, H., 1978. The geochemistry of atmosphere and oceans[M]. New York: John Wiley & Sons .
- Jin B F, Lin Z H, Ji F W, 2003. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance[J]. *Advances in Marine Science*, 21 (1): 99 – 106 (in Chinese with English abstract).
- Jin C T, 1982. Summary of the stratigraphy of the southwestern region china (Silurian) [R]. Chengdu: Chengdu Geology and Mineral Research Center, Ministry of Geology and Mineral Resources: 53 – 70 (in Chinese with English abstract).
- Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A, et al., 2000. Refractory element mobility in volcanic soils[J]. *Geology*, 28: 683 – 686.
- Lee Y I, 2009. Geochemistry of shales of the Upper Cretaceous Hayang Group, SE Korea: Implications for provenance and source weathering at an active continental margin[J]. *Sed. Geol.*, 215: 1 – 12.
- Liu Y J, 1984. Elemental geochemistry[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd.: 6 – 40.
- Luo Y N, 1983. The evolution of paleoplates in the Kang-Dian tectonic zone[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 22 (3): 93 – 102 (in Chinese with English abstract).
- Madhavaraju J, C M González-León, Lee Y I, et al., 2010. Geochemistry of the mural formation (Aptian-Albian) of the bisbee group, northern Sonora, Mexico[J]. *Cre. Res.*, 31: 400 – 414.
- McLennan S M, 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21 (1): 169 – 200.
- McLennan S M, 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2: 10 – 21.
- McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]. Geological Society of America.
- Ning K B, Deng Q, Cui X Z, et al., 2024. Zircon U-Pb age and stratigraphic significance of the tuff from the lowermost Liantuo Formation in the Dahongshan area of the northern Yangtze Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 43 (2/3): 363 – 375 (in Chinese with English abstract).
- Nothdurft L D, Webb G E, Kamber B S, 2004. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, western Australia: Confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (2): 263 – 283.
- Pan S L, Jiang Y, Kang J, et al., 2021. Analysis of paleoclimate and source of the upper section, Lower Ganhaigou Formation, Lenghu No. 7 Region, north Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39 (5): 1292 – 1304 (in Chinese with English abstract).
- Raza M, Ahmad A H M, et al., 2012. Geochemistry and detrital modes of Proterozoic sedimentary rocks, Bayana Basin, north Delhi fold belt: Implications for provenance and source-area weathering[J]. *International Geology Review*, 54 (1): 111 – 129.
- Roser B P, Korsch R J, 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *Journal of Geology*, 94 (5): 635 – 650.
- Sawant S S, Kumar K V, Balaran V, et al., 2017. Geochemistry and genesis of craton-derived sediments from active continental margins:

- Insights from the Mizoram Foreland Basin, NE India[J]. *Chemical Geology*, 13–32.
- Sun Y, Wu F, Clemens S C, et al., 2008. Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle[J]. *Chemical Geology*, 257 (3-4): 240–246.
- Tang R L, 1987. Tectonic features of the Muli-Yanyuan thrust and the metallogenic relationship between gold, copper and lead-zinc[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 7 (2): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Tawfik H A, Ghandour I M, Wataru M, et al., 2015. Petrography and geochemistry of the siliciclastic Araba Formation (Cambrian), east Sinai, Egypt: Implications for provenance, tectonic setting and source weathering[J]. *Geological Magazine*, 154 (1): 1–23.
- Taylor S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell.
- Taylor S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: Its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. Blackwell Scientific Pub, 42: 196–197.
- Totten M W, Hanan M A, Weaver B L, 2000. Beyond whole-rock geochemistry of shales: The importance of assessing mineralogical controls for revealing tectonic discriminants of multiple sediment sources for the Ouachita Mountain flysch deposits[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112 (7): 1012–1022.
- Wang Z H, Zhang H Q, Cheng J X, et al., 2020. Red-black transitional characteristics of the Silurian Longmaxi Formation in the west of the Kangdian Ancient Land: taking Dacaozi outcrop of Ninglang as an example[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25 (2): 97–107 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z F, Zhang Y F, Liang X L, et al., 2014. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 35 (4): 623–632 (in Chinese with English abstract).
- Wu L Y, Hu D F, Lu Y C, et al., 2016. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (2): 189–197 (in Chinese with English abstract).
- Weaver C E, 1989. Clays, Muds, and Shales: Development in Sedimentology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1-210
- Wei G J, Liu Y, Li X, et al., 2008. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea[J]. *Geochemical Journal*, 37 (5): 593–602.
- Xie D K, 1959. On the tectonic history of the Kam-Yunnan Axis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 39 (2): 101–116 (in Chinese with English abstract).
- Xiong G Q, Liu C L, Dong G M, et al., 2021. A study of element geochemistry of mudstones of upper Ordovician Wufeng Formation and lower Silurian Longmaxi Formation in southern Daba Mountain[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (3): 398–417 (in Chinese with English abstract).
- Zeng X G, 1991. Minerals and mineralization conditions along the western edge of the Kangdian geosyncline[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 11 (4): 269–275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang J, Yu Q, et al., 2017. Black shales from the Longmaxi Formation in western Xikang-Yunnan ancient land: Geochemistry and geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37 (1): 97–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhong K H, Liu Z C, Shi Y, et al., 2004. Yanyuan-Lijiang tectonic zone: A Cenozoic intracontinental orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 36–43 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 周亮, 王先辉, 等, 2007. 湘东南南华系-寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代-早古生代构造背景的制约[J]. *地质学报*, 81 (6): 755–771.
- 程锦翔, 邓敏, 王正和, 2022. 康滇古陆西侧早志留世古海洋氧化-还原环境及优质烃源岩发育模式——以盐源地区CYD2井为例[J]. *地质通报*, 41 (10): 1813–1828.
- 邓奇, 崔晓庄, 汪正江, 等, 2023. 扬子陆块北缘构造演化新认识: 来自原花山群年代学和地球化学的制约[J]. *沉积与特提斯地质*, 43 (1): 212–225.
- 杜利林, 郭敬辉, 耿元生, 等, 2013. 扬子西南缘盐边群时代及构造环境: 来自碎屑沉积岩的约束[J]. *岩石学报*, 29 (2): 641–672.
- 金秉福, 林振宏, 季福武, 2003. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. *海洋科学进展*, 21 (1): 99–106.
- 金淳泰, 1982. 西南地区地层总结志留系[R]. 成都: 地质部成都地质矿产研究: 53–70.
- 刘英俊, 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 6–40.
- 骆耀南, 1983. 康滇构造带的古板块历史演化[J]. *四川地质学报*, 22 (3): 93–102.
- 宁括步, 邓奇, 崔晓庄, 等, 2024. 扬子陆块北缘大洪山地区莲沱组底部凝灰岩锆石 U-Pb 定年及其地层学意义[J]. *地质通报*, 43 (2/3): 363–375.
- 潘世乐, 蒋赞, 康健, 等, 2021. 柴北缘冷湖七号下干柴沟组上段古气候及物源分析[J]. *沉积学报*, 39 (5): 1292–1304.
- 唐若龙, 1987. 木里-盐源推覆构造特征与金铜、铅锌的成矿关系[J]. *四川地质学报*, 7 (2): 5–11.
- 王正和, 张海全, 程锦翔, 等, 2020. 康滇古陆西侧志留系龙马溪组红-黑转换特征——以宁蒭大槽子剖面为例[J]. *海相油气地质*, 25 (2): 97–107.
- 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等, 2014. 四川盆地五峰组-龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. *石油学报*, 35 (4): 623–632.
- 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等, 2016. 四川盆地涪陵气田五峰组-龙马溪组页岩优势岩相[J]. *石油勘探与开发*, 43 (2): 189–197.
- 谢奕克, 1959. 康滇地轴的地质构造史[J]. *地质学报*, 39 (2): 101–116.
- 熊国庆, 刘春来, 董国明, 等, 2021. 南大巴山上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组泥岩元素地球化学特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (3): 398–417.
- 曾忻耕, 1991. 康滇地轴西缘的矿产与成矿条件[J]. *四川地质学报*, 11 (4): 269–275.
- 张茜, 王剑, 余谦, 等, 2017. 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*, 37 (1): 97–107.
- 钟康惠, 刘肇昌, 施央, 等, 2004. 盐源-丽江构造带是新生代陆内造山带[J]. *地质学报*, 78 (1): 36–43.