

川南地区下寒武统筇竹寺组页岩元素 地球化学特征及地质意义^{*}

王 圆^{1,2,4} 陈 雷^{1,2,4} 陈 鑫^{1,3} 熊 敏^{1,2,4}
廖崇杰^{1,2,4} 张祖友^{1,2,4} 韦凤洁^{1,2,4} 王高翔^{1,3}

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500
2 天然气地质四川省重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500
3 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院, 四川成都 610051
4 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 四川成都 610500

摘 要 上扬子地区筇竹寺组是目前页岩气勘探的重要层位。为重建川南地区下寒武统筇竹寺组沉积古环境, 本研究以 A1 井筇竹寺组页岩为研究对象, 通过主量、微量及稀土元素地球化学分析, 探究其沉积期风化强度、古气候特征、构造环境及物源特征。结果显示: 页岩中主量元素呈现出 TFe_2O_3 、 MgO 和 K_2O 富集, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 亏损; 微量元素中 Mo 和 Cd 表现出强烈富集, Sr 元素强烈亏损; 稀土元素标准化配分模式与上地壳极为相似, 呈现“V”型向右倾斜、轻稀土元素富集、重稀土元素平坦式分布、轻重稀土分异明显、Eu 负异常明显的特征; CIA 值 (48.16~69.36, 平均 64.03) 和 A-CN-K 图解指示物源区遭受中等强度化学风化作用, 指示沉积时期气候温暖、湿润; Th/Sc-Zr/Sc 二元图解指示页岩未经历多旋回沉积, 不具备沉积再循环特征; K_2O -Rb、 TiO_2 -Zr、Co/Th-La/Sc 和 Th/Sc-Zr/Sc 二元图解均指示其源岩为中酸性长英质火成岩; 综合特征主量元素构造判别图解及 ΣREE 分布特征 ($136.51 \times 10^{-6} \sim 297.68 \times 10^{-6}$, 平均 189.23×10^{-6} , 高于大陆上地壳) 指示其主体形成于被动大陆边缘。综合古气候条件、物源特征及构造背景, 推断川南地区下寒武统筇竹寺组页岩主体形成于被动大陆边缘, 沉积时期化学风化强度中等, 气候温暖湿润, 物源主要来自于康滇古陆的中酸性长英质火成岩, 沉积时受热液影响不大。

关键词 筇竹寺组 地球化学 风化作用 物源 构造背景 川南地区

第一作者简介 王圆, 女, 2002 年生, 硕士研究生, 主要从事非常规油气地质研究。E-mail: 17836061727@163.com。

通讯作者简介 陈雷, 男, 1985 年生, 教授, 主要从事非常规油气地质研究。E-mail: cl211@126.com。

中图分类号: P595; P534.41 **文献标志码:** A

Elemental geochemistry and geological significance of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin, China

WANG Yuan^{1,2,4} CHEN Lei^{1,2,4} CHEN Xin^{1,3} XIONG Min^{1,2,4}
LIAO Chongjie^{1,2,4} ZHANG Zuyou^{1,2,4} WEI Fengjie^{1,2,4} WANG Gaoxiang^{1,3}

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2 Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

^{*} 国家自然科学基金项目 (编号: 42372173) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42372173)]

收稿日期: 2025-08-03 改回日期: 2025-10-28

3 Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, China

4 Research Branch of Southwest Petroleum University, Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu 610500, China

Abstract The Qiongzhusi Formation in the Upper Yangtze Region is currently a key target for shale gas exploration. To reconstruct the sedimentary paleoenvironment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin, this study takes the Qiongzhusi Formation shales from Well A1 as the research object, and explores the weathering intensity, paleoclimatic characteristics, tectonic setting, and provenance features during their deposition through geochemical analyses of major elements, trace elements, and rare earth elements. The results reveal enrichment of TFe_2O_3 , MgO , and K_2O , and depletion of SiO_2 , Al_2O_3 , and Na_2O in major elements. Among trace elements, Mo and Cd are strongly enriched, whereas Sr is significantly depleted. The REE distribution patterns are comparable to those of the upper continental crust, showing a right-inclined “V” shape with LREE enrichment, flat HREE trends, distinct LREE-HREE fractionation, and notable negative Eu anomalies. CIA values range from 48.16 to 69.36 (average 64.03), and A-CN-K diagrams indicate moderate chemical weathering under a warm and humid climate. The Th/Sc-Zr/Sc plot suggests a first-cycle sedimentary origin for the shale, with no evidence for significant sedimentary recycling. Provenance diagrams ($\text{K}_2\text{O-Rb}$, TiO_2-Zr , Co/Th-La/Sc , and Th/Sc-Zr/Sc) consistently imply intermediate to acidic felsic igneous sources. Major element discrimination and REE abundances ($\sum\text{REE} = 136.51 \sim 297.68 \times 10^{-6}$, avg. 189.23×10^{-6} , higher than average continental crust) support a passive continental margin setting. Based on paleoclimatic conditions, provenance characteristics, and tectonic setting, it is inferred that the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan were deposited in a passive continental margin under a warm, humid climate with moderate chemical weathering, predominantly sourced from intermediate-acidic felsic igneous rocks of the Kangdian-Yunnan craton with negligible hydrothermal influence.

Key words Qiongzhusi Formation, geochemistry, weathering, provenance, tectonic setting, southern Sichuan Region

About the first author WANG Yuan, born in 2002, is a master degree candidate, and is mainly engaged in unconventional oil and gas geological research. E-mail: 17836061727@163.com.

About the corresponding author CHEN Lei, born in 1985, is a professor, and is mainly engaged in unconventional oil and gas geological research. E-mail: cl211@126.com.

0 引言

页岩气是一种清洁高效的低碳化石能源,其资源量巨大,目前已经发展成为中国地质研究和油气勘探的重点目标(Curtis, 2002; Jarvie *et al.*, 2007; 张金川等, 2008a; 邹才能等, 2010, 2024)。埃迪卡拉纪—寒武纪作为地质历史上生物演化和重大环境变化的关键时期之一,全球气候、海洋环境、构造演化与生物演化等发生了剧烈变化(朱光有等, 2020; 陈威振等, 2024)。四川盆地在埃迪卡拉纪至寒武纪过渡期形成了完整的海相地层序列,为揭示该关键过渡期的古海洋沉积环境变迁规律提供了理想的研究载体。五峰组—龙马溪组

已在四川盆地多个区块实现规模开发(张金川等, 2008b; 郭旭升, 2014; 马新华, 2018; 张成林等, 2021),筇竹寺组成为下一步极具潜力的海相页岩气勘探开发目标(梁峰等, 2022; 杨学锋等, 2025)。

碎屑沉积物的化学组成受到母岩成分、风化作用和成岩作用等多种因素的共同影响(Taylor and McLennan, 1985; 操应长等, 2018; 张茜等, 2020; 秦何星等, 2024)。页岩作为碎屑沉积岩的重要组成部分,相较于其他硅质碎屑岩类,能够更准确地反映地壳物质的平均化学组成(Qadrouh *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2023)。此外,这类岩石还

具有显著的地质记录功能，能够较好地保留母岩的原始属性及其经历的成岩演化过程（Chen *et al.*, 2022）。学者们发现通过系统分析页岩元素组成特征，能够有效推断母岩区的岩石类型及其形成时的构造背景（张茜等，2020；Chen *et al.*, 2022；王跃等，2022；Ma *et al.*, 2023）。页岩中稳定且溶解度低的元素的比值受到物源组成的影响（Roser and Korsch, 1988）。研究表明，以 Ti、Al 为代表的主量元素以及 Th、Cr、Zr、Hf 等微量元素，在风化、搬运、沉积及成岩等地质过程中基本保持原始组成特征（McLennan, 1989），不因外界环境改变而发生分异或仅呈现规律性变化并且在海水中的停留时间较短。因此，通过对其含量的系统分析，特别是通过单个元素或多个元素组合的判别方法，能够有效识别沉积岩的源区岩石类型及其形成时的构造环境（Terakado and Fujitani, 1998；Zhao *et al.*, 2016）。

前人对四川盆地及其周缘筇竹寺组地层开展了大量研究，主要包括页岩岩相与发育特征（刘忠宝等，2017；罗锦宇等，2023；郭彤楼等，2025）、层序充填和古环境演化模式（吴冬等，2023；陈威振等，2024）、页岩气富集条件与机制（刘忠宝等，2022；雍锐等，2024）、烃源岩评价及有利区优选等（杨威等，2012；魏国齐等，2022），由此取得了较为丰硕的成果（Zou *et al.*, 2014；谢武仁等，2022）。对于盆地及其周缘古环境也开展了一些研究，研究表明筇竹寺组在绵阳—长宁拉张槽内，中上部深水陆棚细粒沉积具有较高的生产力（李依林等，2022），而浅水陆棚沉积序列古生产力较低（赵建华等，2019）。下寒武统筇竹寺组整体上物源较为一致，岩性差异不大，沉积水体主要为还原环境，中—上部地层沉积时含氧量增加，过渡为贫氧—微氧化环境（曹婷婷等，2018）。然而对富有机质页岩系形成的沉积环境的认识仍存在一定分歧，一些学者认为筇竹寺沉积期极端温暖的气候加速了化学风化和陆源碎屑物质的输入，但主要是海底热液造就缺氧、富硅富铁的海洋环境（陈代钊等，2011），促进黑色岩系的形成和有机质的富集；另外一些学者则认为上扬子地区筇竹寺组黑色岩系主要与上升流和闭塞水体的强还原环境有关。古环境与地球化学分析结果尚不统一，对于沉积环境演化与氧化还原指标的认识亦存在较大分歧（Li *et al.*, 2018；朱光有等，2020；程建和郑伦

举，2020）。现有研究普遍认为早寒武世海洋环境呈现氧化分层现象，即表层水体处于氧化状态而深层水体则表现为缺氧或富氧状态，且深海区域可能已开始大规模氧化并且发生在寒武纪早期的生物大爆发事件，进一步证实了深层海水的氧化（Jin *et al.*, 2014；陈威振等，2024）。在此背景下四川盆地南部发育了以陆棚相沉积体系为主的筇竹寺组（程建和郑伦举，2020；陈威振等，2024）。但有些学者认为四川盆地南部筇竹寺组沉积期始终处于浅水—深水陆棚相沉积环境之中（程建和郑伦举，2020；陈威振等，2024）。总体而言，学者们对于川南地区筇竹寺组烃源岩发育规模、储集层特征、有机质富集机制和油气勘探与预测等方面已经取得了一系列认识（程建和郑伦举，2020；朱光有等，2020），利用地球化学分析方法，推断其沉积环境演化方面的研究较多，但仍存在较大分歧。基于此，本研究选取川南地区作为典型研究区域，通过系统分析 A1 井的主量、微量、稀土元素含量测试数据和有机质丰度测试数据，探讨研究区筇竹寺组页岩形成时的古气候特征、物源区性质和构造环境等，为后续页岩气勘探开发研究奠定一定理论基础。

1 地质背景

研究区位于四川省威远县附近，其现今构造坐落于四川盆地的川中平缓构造带与川西南低褶构造带之间。从古地理格局来看，该区域位于德阳—安岳裂陷槽的中段位置（杨学锋等，2025）（图 1-A）。四川盆地自震旦纪以来，以下陷接受沉积为主，在桐湾期上扬子地区整体抬升，四川盆地发育拉张断裂，灯影峡阶地层为海侵退积式的沉积序列，中国南方古陆地的范围减小，川西—川中地区发展成广阔的台地（刘宝珺和许效松，1994；马永生等，2009）。早寒武世初期，上扬子地区开始灯影组海退后的一次大的海侵，震旦系顶部灯影组地层遭受剥蚀，梅树村组和筇竹寺组地层沉积在灯影组岩溶古地貌之上（范海经等，2021）。早寒武世四川盆地在西侧古陆（泸定古陆、滇中古陆）和北侧古陆（摩天岭古陆、汉南古陆）包围下，总体为浅水陆棚的古地理环境。但四川盆地内西部—中部地区发育南北向绵阳—长宁陆棚内凹陷（范海经等，2021），凹陷内水深较大，发育深水陆棚。

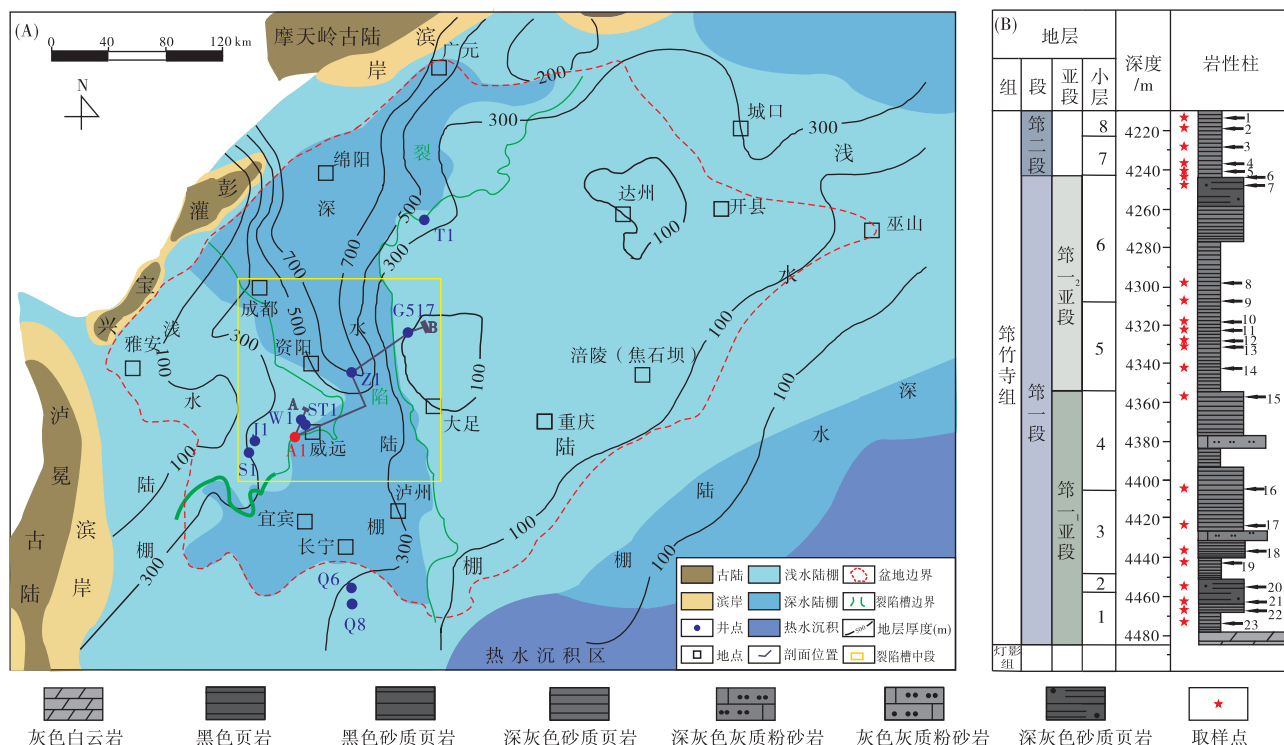


图 1 四川盆地及其周缘筇竹寺组沉积相图 (据杨学锋等, 2025, 有修改) (A) 和 A1 井岩性柱状图 (B)

Fig. 1 Sedimentary facies map of the Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and its surrounding areas

(modified after Yang *et al.*, 2025) (A) and lithologic column of Well A1 (B)

川西—川中地区陆棚内凹陷区是影响四川盆地早寒武世沉积的重要构造区域。筇竹寺组是在陆棚沉积环境下, 受海侵作用影响形成的广泛分布的海相页岩地层。川南地区筇竹寺组整体在裂陷槽内与下伏的下寒武统麦地坪组含磷地层呈整合接触, 在裂陷槽外与下伏的上震旦统灯影组白云岩呈不整合接触, 而均与上覆下寒武统沧浪铺组的砂质泥岩和泥质粉砂岩呈整合接触 (汪泽成等, 2020; 范海经等, 2021; 杨学锋等, 2025) (图 2)。筇竹寺组可以划分为第一段和第二段。其中, 第一段进一步细分为第一₁亚段 (包括 1~4 小层) 和第一₂亚段 (包括 5 小层和 6 小层) (杨学锋等, 2025)。第二段包括 7 小层和 8 小层 (图 1-B)。其中, 1、3、5、7 小层为富有机质页岩段 (杨学锋等, 2025), 也是本次研究的主要层段, 其余小层为粉砂质页岩段。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集与测试

本次研究系统采集了钻遇筇竹寺组页岩段的

A1 井 23 个岩心样品 (图 1-B)。针对该 23 个样品系统进行了主量、微量、稀土元素含量测试、有机质丰度测试。其中主量、微量和稀土元素利用 Element XR 高分辨电感耦合等离子体质谱仪进行测试, 主量元素根据 GB/T 21114-2019 标准, 微量和稀土元素根据 GB/T 14506.30-2010 标准, 测试误差均优于 5%。有机质丰度测试利用 CS-230 型号碳硫分析仪进行有机碳测试, 根据 CB/T 19145-2003 标准, 测试误差优于 2%。

2.2 研究方法

化学蚀变指数 (CIA) 是业界广泛应用于定量评价风化程度及古气候特征的指标。相关计算公式如下 (Nesbitt and Young, 1982):

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中: 氧化物的含量都是摩尔含量, CaO^* 指硅酸盐矿物中的 CaO , 在无法独立获得硅酸盐矿物中的 CaO 含量时, 要对 CaO 含量进行校正。 CaO^* 的间接计算公式如下 (McLennan, 1993):

$$CaO_{residual} = CaO - P_2O_5 \times 10/3 \quad (2)$$

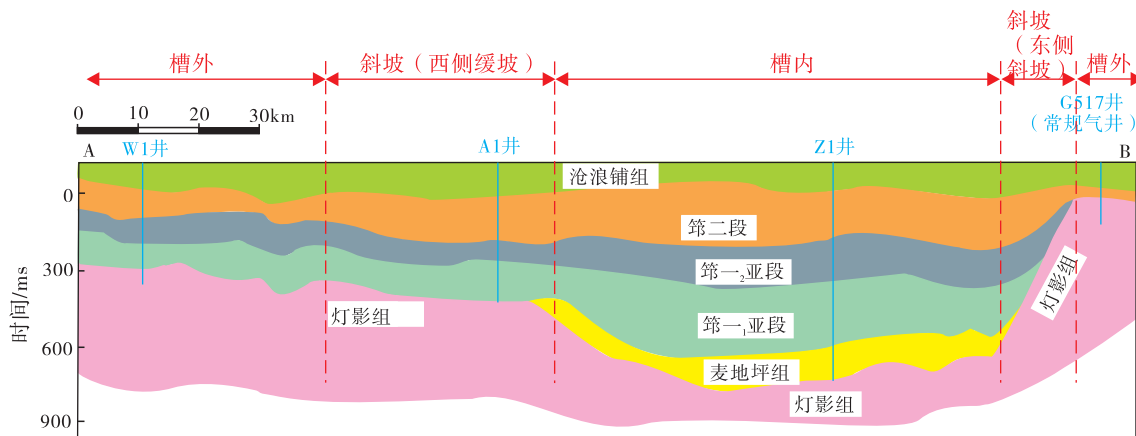


图 2 川南地区筇竹寺组古地貌示意图 (据杨学锋等, 2025, 有修改)

Fig. 2 Schematic diagram of the palaeogeomorphology of the Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin
(modified after Yang Xuefeng *et al.*, 2025)

根据计算后的 $\text{CaO}_{\text{residual}}$ 值与研究区样品的 Na_2O 、 CaO 值进行比较, 来确定 CaO^* 的值 (杨永祯等, 2024)。

然而成岩过程中存在着 K 的交代作用, 导致 K 含量的升高, CIA 值降低, 影响古气候恢复的准确性。因此, 为了计算无 K 交代作用下的 CIA 值, 本研究采用 Panahi 等 (2000) 提出的校正后的 CIA_{corr} 计算公式:

$$\text{CIA}_{\text{corr}} = \left[\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}_{\text{corr}})} \right] \times 100 \quad (3)$$

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}} = \left[m \times \text{Al}_2\text{O}_3 + m \times (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) \right] / (1 - m) \quad (4)$$

$$m = \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (5)$$

式中: 各成分均以摩尔数为单位, $\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}}$ 为消除 K 交代作用后岩石中 K_2O 的含量, m 为母岩中 K_2O 的占比, 本研究中 m 值的参考值为 0.10988919 (杨永祯等, 2024), 由此得到对研究区校正后的 CIA_{corr} 值。

2.3 测试结果

2.3.1 主量元素特征

川南地区筇竹寺组页岩 TOC 含量介于 0.11%~4.40% 之间, 平均值为 1.73%。筇竹寺组页岩样品 SiO_2 含量为 54.10%~67.52%, 平均为 60.63%, 表明页岩中富含硅质矿物; Al_2O_3 含量为 11.33%~16.45%, 平均值为 13.58% (表 1); TFe_2O_3 含量在 2.32%~7.92% 之间, 平均值为 5.12%, Fe 元素的富集可能与筇竹寺组页岩富含黄铁矿有关 (表

1)。碱性元素 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 和 MgO 含量的平均值分别为 2.22%、3.61%、3.10% 和 2.68%。 P_2O_5 、 TiO_2 和 MnO 的平均含量均小于 1.00%。将页岩样品主量元素与上地壳元素含量 (UCC) (Taylor and McLennan, 1985) 进行对比显示, TFe_2O_3 、 MgO 和 K_2O 等元素富集, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 等元素亏损 (表 1; 图 3-A)。

2.3.2 微量元素特征

通过对比研究区筇竹寺组页岩样品微量元素含量与 UCC 元素丰度 (Taylor and McLennan, 1985, 1995; McLennan, 2001) 可以看出, Mo 和 Cd 两种元素表现出强烈富集的特征; Ni、Zr 和 Th 等元素并未表现出明显的富集特征; Li、V、Cu 等元素表现出弱富集的特征; Be、Co 等元素呈现出弱亏损的特征; Sr 元素表现出强烈亏损的特征 (表 2; 图 3-B)。

2.3.3 稀土元素特征

纵向上, 研究区筇竹寺组页岩稀土元素 (Rare Earth Element, REE) 含量有一定的规律性 (图 4)。研究区筇竹寺组页岩稀土总量 ΣREE 介于 136.51×10^{-6} 至 297.68×10^{-6} 之间, 平均值为 189.23×10^{-6} (表 3), 大于大陆上地壳稀土元素总量, 表现为明显富集的特征。A1 井筇竹寺组黑色页岩样品的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值介于 4.07 至 13.58 之间, 平均值为 7.24 (表 3), 表明该区域页岩中轻稀土元素相对富集, 而重稀土元素则呈现亏损特征。

采用球粒陨石标准化方法对筇竹寺组页岩样品中的稀土元素 (REE) 含量进行归一化处理

表 1 川南地区筇竹寺组页岩主量元素含量 (%) 统计

Table 1 Statistics of major element contents (%) of the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	K ₂ O _{corr}	CIA _{corr}	TOC/%
1	60.88	13.28	4.91	1.82	2.69	4.39	3.36	0.28	0.08	0.58	2.29	63.64	0.76
2	56.99	15.66	6.55	1.56	3.47	3.06	4.13	0.21	0.08	0.77	2.42	71.14	0.81
3	55.64	14.79	5.73	1.67	3.37	4.74	3.79	0.53	0.08	0.68	2.40	67.71	1.49
4	56.01	16.45	6.08	1.50	3.71	2.96	4.34	0.30	0.08	0.75	2.46	73.52	0.66
5	66.32	13.13	4.05	2.70	2.32	2.39	3.02	0.34	0.05	0.82	2.11	68.45	0.40
6	57.9	11.94	3.69	2.68	2.16	8.71	2.61	0.34	0.14	0.80	2.74	47.91	0.25
7	67.52	12.11	3.53	2.80	2.06	3.29	2.66	0.34	0.08	0.80	2.11	63.21	0.39
8	62.05	14.32	5.45	2.26	2.88	2.10	3.43	0.21	0.05	0.77	2.22	70.84	0.98
9	62.24	14.19	5.23	2.49	2.84	2.29	3.28	0.23	0.05	0.78	2.25	69.37	0.91
10	63.46	13.47	4.40	2.62	2.24	2.63	3.28	0.25	0.05	0.77	2.21	67.06	1.28
11	63.48	12.77	4.58	2.90	1.96	2.28	2.89	0.37	0.05	0.88	2.07	67.96	2.35
12	62.24	13.47	5.38	2.60	2.45	1.82	3.16	0.37	0.04	0.88	2.06	71.94	2.63
13	62.22	12.45	5.22	3.07	1.92	2.70	2.75	0.39	0.05	0.78	2.09	65.48	2.82
14	61.53	13.60	5.69	2.78	2.47	2.07	3.18	0.28	0.04	0.87	2.16	69.04	2.82
15	61.11	13.43	7.09	2.66	2.52	2.01	2.98	0.23	0.05	0.82	2.14	68.95	1.50
16	62.20	14.30	5.96	2.63	2.85	1.50	3.51	0.25	0.04	0.83	2.17	72.36	1.39
17	61.98	14.83	5.45	2.37	2.72	1.20	3.90	0.28	0.04	0.82	2.16	75.50	1.10
18	60.83	11.33	4.73	1.95	2.64	3.65	3.14	0.21	0.07	0.63	2.01	62.09	3.64
19	55.76	15.91	7.92	1.95	3.17	0.94	4.90	0.23	0.03	0.87	2.23	78.52	3.45
20	62.22	11.96	2.32	2.36	3.03	5.83	3.87	0.30	0.08	0.63	2.36	55.57	0.11
21	60.49	13.30	5.52	1.77	2.64	2.22	4.38	0.23	0.04	0.70	2.04	71.63	2.50
22	57.31	14.19	4.91	1.00	2.88	1.51	5.70	0.25	0.03	0.63	1.96	79.64	3.22
23	54.10	11.37	3.29	1.01	2.67	7.02	4.67	2.27	0.05	0.55	1.46	85.48	4.4
平均含量	61.10	13.65	5.21	2.34	2.67	2.99	3.46	0.29	0.06	0.77	2.18	69.00	1.73
UCC	65.89	15.17	4.49	3.89	2.20	4.19	3.39	0.20	0.07	0.50	/	/	/
平均含量 /UCC	0.93	0.90	1.16	0.60	1.21	0.71	1.02	1.46	0.85	1.55	/	/	/

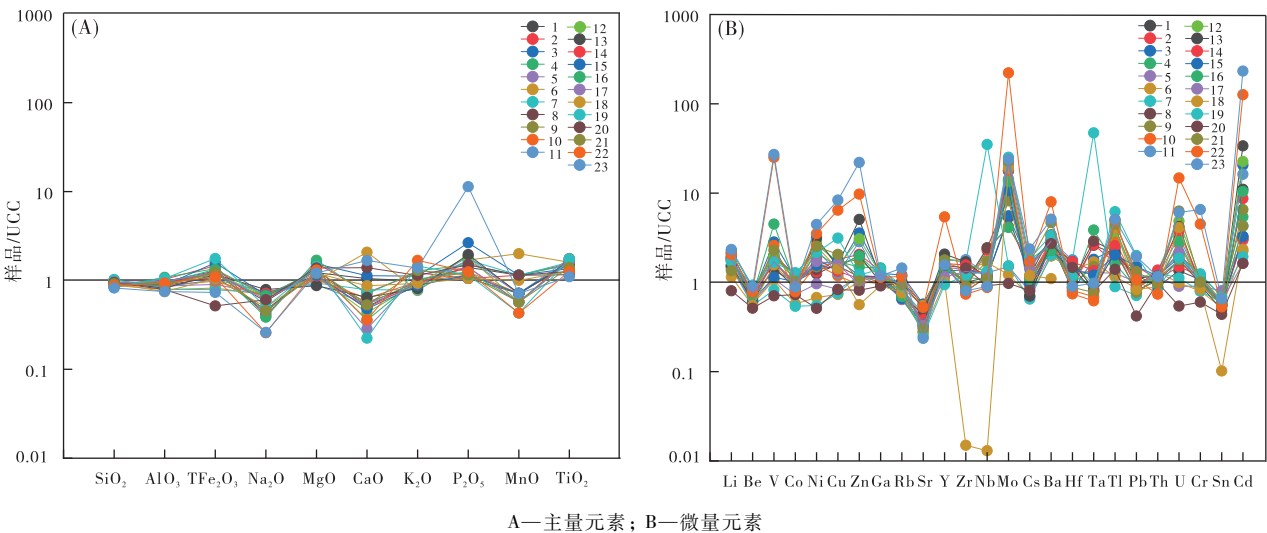


图 3 川南地区筇竹寺组页岩主量元素与微量元素 UCC 标准化蛛网图

Fig. 3 Spider diagrams of major and trace elements normalized to UCC for the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin

表 2 川南地区筇竹寺组页岩微量元素含量($\times 10^{-6}$)统计
Table 2 Statistics of trace element concentrations($\times 10^{-6}$) of the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin

样品编号	Li	Be	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cs	Ba	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	Cr	Sn	Cd
1	37.00	1.87	200.00	20.90	55.00	40.00	360.00	18.50	115.00	196.00	35.40	190.00	13.70	8.00	5.44	1871.00	5.53	2.60	1.56	20.60	9.49	3.79	90.60	3.04	3.31
2	42.80	2.23	215.00	20.60	57.40	45.30	146.00	22.80	93.10	123.00	33.30	161.00	27.50	6.33	7.19	1481.00	4.99	2.64	1.25	25.50	11.70	4.19	101.00	3.36	0.85
3	42.90	2.18	303.00	18.70	68.30	35.30	253.00	21.50	135.00	200.00	35.40	151.00	13.80	8.32	7.29	1624.00	4.64	1.81	1.78	19.10	12.80	5.85	96.50	3.20	2.02
4	45.30	2.58	215.00	20.00	115.00	42.90	105.00	24.70	93.80	125.00	32.30	170.00	29.30	6.18	8.16	1481.00	5.03	3.86	1.21	14.60	12.90	5.75	102.00	3.84	0.53
5	34.80	1.81	117.00	12.40	42.40	20.90	81.20	18.40	71.80	109.00	32.40	265.00	15.40	2.25	3.66	1157.00	7.75	1.29	0.95	17.20	12.20	2.53	77.20	4.43	0.29
6	29.60	1.71	114.00	9.76	29.80	18.30	72.40	16.40	96.80	193.00	36.40	267.00	20.00	1.83	3.24	1081.00	8.01	1.69	0.87	14.60	13.90	2.77	67.90	2.87	0.22
7	30.20	1.65	88.10	9.18	24.30	18.80	87.50	16.70	93.10	158.00	40.60	317.00	420.00	2.30	2.99	1111.00	10.40	47.30	0.67	12.10	13.70	3.13	67.60	3.30	0.42
8	37.20	2.17	144.00	17.20	61.00	38.10	82.30	19.70	81.00	115.00	31.50	193.00	29.10	13.80	5.16	1572.00	5.96	2.90	1.66	13.80	11.20	4.95	83.40	3.03	0.32
9	38.10	2.02	183.00	17.10	65.70	41.80	127.00	19.70	90.50	130.00	32.70	188.00	20.80	12.30	5.04	1546.00	5.60	1.50	1.86	13.10	11.90	4.97	89.40	3.25	0.64
10	31.00	1.89	277.00	13.30	69.40	29.70	66.50	18.70	93.80	145.00	33.60	153.00	13.90	21.50	4.14	1767.00	4.72	0.69	2.21	16.30	11.00	7.54	80.90	3.06	0.30
11	28.70	1.80	199.00	13.80	103.00	31.40	202.00	17.80	75.20	148.00	38.60	341.00	15.00	21.00	3.17	1650.00	10.20	0.82	1.86	16.20	12.60	9.13	86.80	3.03	1.59
12	37.90	2.21	207.00	18.30	130.00	38.20	218.00	21.10	87.80	128.00	41.30	310.00	15.90	26.70	4.81	1403.00	9.36	0.95	2.80	18.50	14.20	13.60	94.60	3.44	2.21
13	30.90	1.85	159.00	14.50	138.00	37.50	142.00	17.00	79.00	154.00	45.50	322.00	13.50	26.80	3.23	1429.00	9.89	0.84	1.61	19.00	12.60	11.80	78.90	2.72	1.08
14	37.50	2.09	178.00	16.40	80.90	33.20	78.10	19.60	81.40	134.00	35.80	297.00	14.20	26.60	4.67	1507.00	9.87	1.35	1.93	15.20	14.70	10.50	88.00	3.02	0.30
15	39.70	1.89	122.00	17.30	68.20	44.60	84.70	19.60	73.60	117.00	29.40	263.00	14.70	16.00	4.45	1254.00	8.10	1.21	1.52	25.70	12.60	5.32	90.40	3.11	0.32
16	35.10	2.13	481.00	16.60	93.30	38.00	141.00	20.30	77.70	97.70	30.80	219.00	12.70	20.20	4.95	1247.00	6.95	0.93	3.13	17.40	10.60	8.05	84.10	3.02	1.02
17	35.90	2.27	182.00	16.20	75.30	40.40	66.20	20.40	105.00	116.00	25.30	252.00	15.10	31.20	6.67	1598.00	<0.010	0.80	3.66	20.40	11.90	6.11	82.50	3.41	0.16
18	23.00	1.65	168.00	15.20	111.00	35.40	39.90	15.70	85.50	95.80	22.50	277	0.15	28.60	5.50	606.00	<0.010	<0.20	3.01	14.20	9.53	11.50	71.20	0.56	0.23
19	33.90	2.80	179.00	21.80	95.00	78.30	85.40	24.10	103.00	87.60	20.70	229.00	15.90	37.80	8.56	1845.00	6.86	0.92	4.64	34.00	9.26	5.22	106.00	3.80	0.19
20	16.10	1.54	75.70	12.40	22.50	20.70	57.90	15.50	111.00	180.00	34.10	275.00	11.00	1.46	3.73	1494.00	8.51	0.79	1.05	7.14	10.60	1.52	51.00	2.41	0.16
21	27.00	2.27	245.00	17.40	111.00	51.50	73.70	19.50	106.00	106.00	39.20	172.00	13.40	34.10	7.74	2573.00	5.11	0.77	3.37	22.50	10.30	17.60	85.80	3.16	0.42
22	41.00	2.38	2690.00	13.30	155.00	161.00	691.00	19.30	131.00	183.00	119.00	140.00	10.50	333.00	7.83	4393.00	4.31	0.62	3.76	18.10	7.89	41.40	382.00	2.92	12.40
23	46.70	2.69	2900.00	15.10	196.00	209.00	1563.00	20.10	162.00	82.70	34.50	153.00	10.80	36.00	10.90	2807.00	5.23	0.98	3.82	33.10	12.40	17.00	555.00	3.59	22.80
平均含量	34.88	2.07	419.21	15.98	85.54	50.01	209.73	19.44	97.48	135.82	37.40	218.73	33.32	31.40	5.59	1673.78	7.00	3.51	2.18	18.62	11.74	8.88	117.95	3.11	2.25
UCC	20.00	3.00	60.00	10.00	40.00	25.00	71.00	17.00	112.00	350.00	22.00	190.00	25.00	1.50	3.70	550.00	5.80	1.00	0.75	20.00	10.70	2.80	35.00	5.50	0.10
平均含量 /UCC	1.74	0.69	6.99	1.60	2.14	2.00	2.95	1.14	0.87	0.39	1.70	1.15	1.33	20.94	1.51	3.04	1.21	3.51	2.91	0.93	1.10	3.17	3.37	0.57	22.97

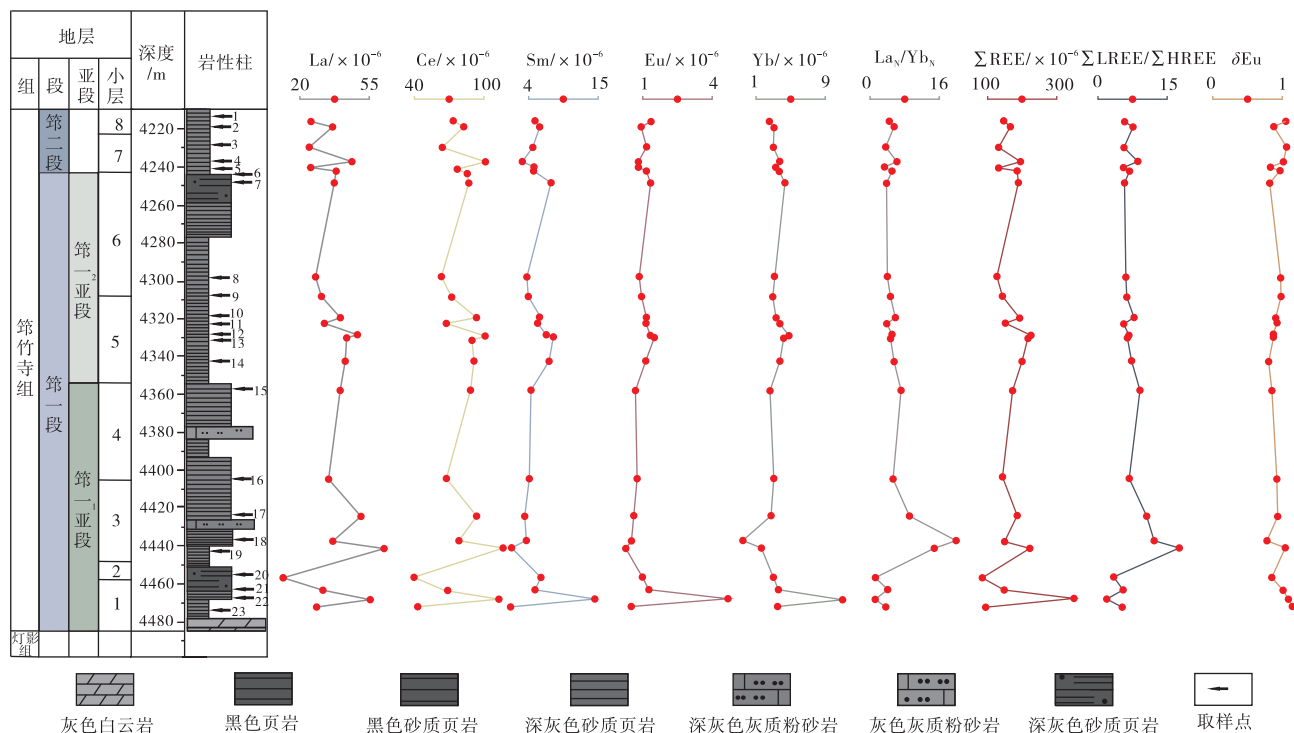


图 4 川南地区 A1 井筇竹寺组页岩稀土元素特征参数垂向变化序列图

Fig. 4 Vertical variation sequence diagram of rare earth element characteristic parameters in the Qiongzhusi Formation shale at Well A1, Southern Sichuan Basin

(图 5)。La_N/Yb_N 与形成环境有关, 在受陆源影响的环境中, 轻稀土元素富集比较明显 (La_N/Yb_N = 1.49~1.74), La_N/Yb_N 一般会随陆源碎屑输入的增多呈有规律的递增; 而在远洋或者深海盆地中, 轻稀土元素明显亏损 (La_N/Yb_N 在 0.70 左右), 洋中脊更低 (La_N/Yb_N 平均在 0.30 左右) (杜远生等, 2007; Bai *et al.*, 2015)。研究区筇竹寺组页岩 La_N/Yb_N 值介于 3.78~15.24 之间, 平均为 6.59, 反映其受物源影响较大。本次研究的重点层段 1、3、5 和 7 小层的 La_N/Yb_N 值分别为 4.55、11.97、6.15 和 5.96, 表明其均形成于大陆边缘环境, 1、5、7 小层沉积期水体相对较浅, 3 小层沉积期水体相对较深。δEu 值介于 0.68~0.90 之间, 平均为 0.77, 表现为负异常特征 (表 3)。川南地区筇竹寺组页岩样品的球粒陨石标准化配分模式曲线呈 V 型向右倾斜, 轻稀土元素富集, 重稀土元素平坦式分布, Eu 负异常特征明显 (图 5)。

3 讨论

3.1 沉积再循环与风化作用

在沉积过程中, Th/Sc 值具有较好的稳定性,

而 Zr/Sc 值则会在沉积旋回期间呈现增加的趋势, 这归因于锆石矿物的持续富集 (Qadrouh *et al.*, 2021)。因此, Th/Sc 与 Zr/Sc 二元图解 (McLennan *et al.*, 1993) 可用于沉积再循环和沉积物分选的评价, 当样品点平行于趋势线 1 分布时, Th/Sc 和 Zr/Sc 值呈现线性关系, 属于首次循环沉积产物, 其化学组成基本保持源岩特征, 未经历明显的分选和再旋回。反之, 若样品点分布符合趋势线 2 的特征, 表现为 Zr 元素显著富集, 则反映沉积物受到了分选和再旋回作用的影响, 属于再循环沉积产物。

川南筇竹寺组页岩样品中, 大部分样品点 Th/Sc 与 Zr/Sc 值呈现显著的正相关关系, 但有 1 个样品点偏离趋势线 (图 6)。这一比值变化特征与组分变化趋势线 1 基本吻合, 表明研究区页岩未经历多次沉积旋回的改造。A-CN-K 图解 (图 7-A) (Nesbitt and Young, 1984, 1989) 显示, 筇竹寺组页岩样品的化学风化趋势与 A-CN 线相交 (图 7-A), 并且 K 元素富集 (表 1), 表明研究区沉积岩在成岩期经历了钾的交代作用。交代作用使得岩石中钾含量增加, 进而导致化学蚀变指数

表 3 川南地区筇竹寺组页岩稀土元素含量 (×10⁻⁶) 统计

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE/ ΣHREE	δEu
1	30.10	72.40	7.85	30.70	6.83	1.81	6.17	1.08	6.18	35.40	1.19	4.01	0.55	3.51	0.58	172.96	6.43	0.84
2	36.80	77.70	9.17	31.60	7.21	1.57	5.37	0.91	5.67	33.30	1.19	3.64	0.59	3.84	0.64	185.90	7.51	0.74
3	29.60	66.60	7.87	29.30	6.59	1.71	5.42	0.98	6.18	35.40	1.25	3.75	0.59	3.79	0.60	164.23	6.28	0.85
4	42.70	89.00	9.80	32.60	5.59	1.49	5.34	0.88	5.44	32.30	1.17	3.75	0.62	4.22	0.67	203.27	8.20	0.82
5	30.00	65.50	8.18	30.00	6.71	1.48	5.68	0.94	5.87	32.40	1.21	3.75	0.60	3.96	0.67	164.55	6.26	0.71
6	37.80	83.10	9.35	35.10	6.68	1.70	6.36	1.08	6.45	36.40	1.34	3.95	0.63	4.16	0.67	198.37	7.05	0.79
7	37.30	80.30	9.62	35.00	8.33	1.80	7.00	1.14	7.07	40.60	1.42	4.41	0.69	4.60	0.74	199.42	6.37	0.70
8	31.50	66.10	7.94	28.30	6.00	1.50	5.26	0.86	5.47	31.50	1.14	3.58	0.58	3.83	0.61	162.67	6.63	0.80
9	33.40	71.30	8.30	29.90	6.15	1.56	5.62	0.99	5.79	32.70	1.20	3.75	0.57	3.76	0.63	172.92	6.75	0.80
10	39.20	84.60	10.20	36.50	7.21	1.70	6.36	0.98	5.95	33.60	1.21	3.72	0.60	3.99	0.64	202.86	7.65	0.75
11	34.20	68.70	8.39	32.60	7.04	1.68	6.19	1.05	6.27	38.60	1.29	3.88	0.63	4.24	0.69	176.85	6.30	0.76
12	44.40	91.60	10.80	38.70	7.90	1.80	6.87	1.15	7.20	41.30	1.52	4.67	0.75	4.91	0.81	223.08	7.00	0.73
13	41.00	86.40	10.60	39.90	8.57	1.91	7.16	1.24	7.38	45.50	1.52	4.57	0.73	4.55	0.74	216.27	6.75	0.73
14	40.70	83.10	10.10	36.30	8.14	1.68	6.26	1.01	6.42	35.80	1.31	4.03	0.66	4.25	0.72	204.68	7.30	0.69
15	39.00	81.10	9.45	32.10	6.39	1.40	5.14	0.86	5.04	29.40	1.06	3.31	0.53	3.54	0.59	189.51	8.44	0.72
16	35.60	68.50	8.88	30.00	6.22	1.47	5.40	0.85	5.33	30.80	1.13	3.64	0.59	3.79	0.59	171.99	7.07	0.76
17	45.40	84.40	9.90	30.90	5.78	1.37	4.88	0.76	4.64	25.30	0.99	3.13	0.53	3.59	0.59	196.86	9.30	0.77
18	36.80	75.20	8.81	31.90	5.97	1.29	5.45	0.76	4.21	22.50	0.81	2.17	0.30	1.63	0.23	175.53	10.28	0.68
19	52.60	98.80	11.60	36.50	4.49	1.15	3.71	0.54	3.73	20.70	0.79	2.51	0.42	2.93	0.48	220.25	13.58	0.84
20	21.60	51.50	6.54	25.10	7.34	1.59	5.82	0.99	6.08	34.10	1.22	3.75	0.58	3.79	0.61	136.51	4.98	0.72
21	33.90	69.10	8.41	30.70	6.78	1.76	6.07	1.07	6.51	39.20	1.37	3.93	0.63	4.11	0.66	175.00	6.19	0.82
22	48.30	96.10	15.30	62.80	12.60	3.84	14.30	2.68	16.50	119.00	3.56	10.30	1.49	8.63	1.28	297.68	4.07	0.87
23	31.80	53.50	6.74	23.10	4.44	1.31	4.31	0.71	4.85	34.50	1.12	3.63	0.61	4.04	0.66	140.82	6.07	0.90
平均含量	37.12	76.72	9.30	33.46	6.91	1.68	6.09	1.02	6.27	37.40	1.30	3.99	0.63	4.07	0.66	189.23	7.24	0.77
UCC	30.00	64.00	7.10	26.00	4.50	0.88	3.80	0.64	3.50	22.00	0.80	2.30	0.33	2.20	0.32	/	/	/
平均含量 /UCC	1.24	1.20	1.31	1.29	1.54	1.91	1.60	1.60	1.79	1.70	1.63	1.74	1.91	1.85	2.05	/	/	/

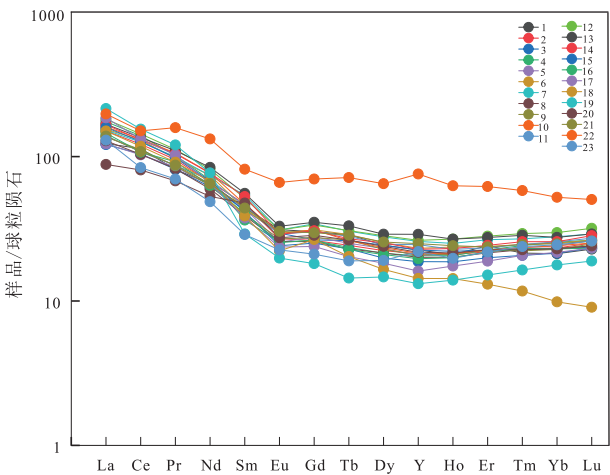


图 5 川南地区筇竹寺组页岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (球粒陨石的数据来自于 Evensen *et al.*, 1978)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element(REE) patterns for shales from the Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin (normalization values after Evensen *et al.*, 1978)

(CIA) 的降低。对 K₂O 含量进行公式校正 (公式 1-5), 结果显示, 样品点的分布趋势与 A-CN 边界线基本保持平行 (图 7-B)。筇竹寺组页岩样品在 A-CN-K 三元图解中的分布特征 (图 7-B) 表明其经历了中等强度的化学风化作用。说明斜长石相较于钾长石基本上已经完全被风化, Na 因强烈的化学风化作用而大量淋失, 钠元素相较于钾元素更易遭受风化 (郭若舜等, 2018)。根据前人研究 (Sheldon, 2006; Algeo *et al.*, 2011), 化学风化作用的增强主要受控于温度升高、酸沉降增加以及成土反应速率加快, 或是这些因素共同作用的结果。页岩样品与花岗闪长岩的风化趋势一致, 少量样品分布在安山岩和花岗闪长岩之间 (图 7-B), 初步表明川南地区筇竹寺组页岩的沉积源岩可能是长英质岩类或者安山岩类。

杨永祯等 (2024) 研究认为康滇古陆东缘筇

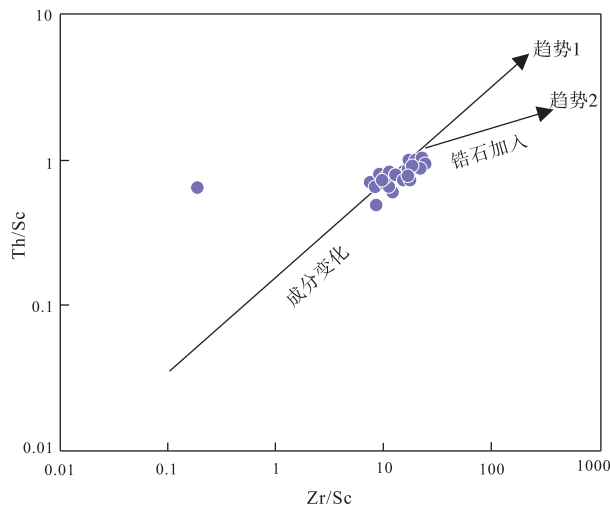


图 6 川南地区筇竹寺组页岩 Th/Sc-Zr/Sc 二元图解
(底图据 McLennan *et al.*, 1993)

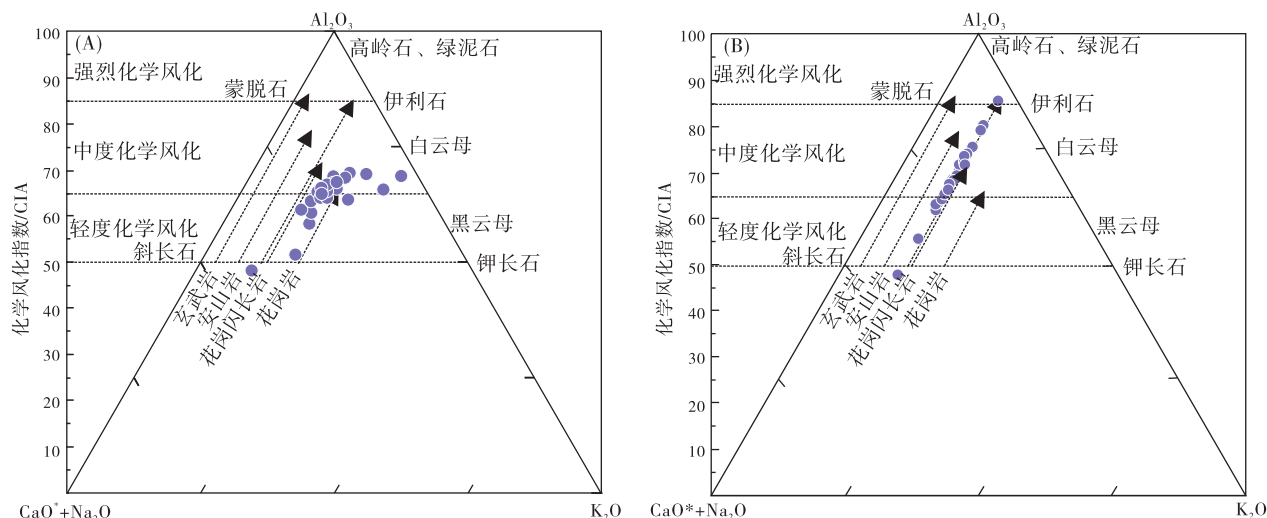
Fig. 6 Th/Sc-Zr/Sc bivariate plot for provenance analysis of the Qiongzhusi Formation shales, southern Sichuan Basin (after McLennan *et al.*, 1993).

竹寺组沉积岩沉积期经历了强烈的化学风化, 并且沉积岩成分主要受源岩成分控制, 而不是沉积物质的循环改造 (杨永祯等, 2024)。本研究的结论与前人研究结论一致, 但本研究以川南地区为研究区, 利用 A-CN-K 图解和微量元素、稀土元素特征参数, 确定研究区页岩未经历多期旋回的改造, 经历了中等强度的化学风化作用。

3.2 古气候条件

CIA 值可以用来反映古气候条件。前人研究认为, 较低的 CIA 值 (<60) 表明与寒冷和干旱条件有关的较弱的化学风化气候, 中等 CIA 值 ($60 \sim 80$) 表明中等程度的化学风化可能与温暖和潮湿的气候有关, 高 CIA 值 (>80) 表明与炎热和潮湿的气候有关的强烈化学风化气候 (Nesbitt and Young, 1982; Fedo *et al.*, 1995)。铝 (Al) 主要富集于细粒层状硅酸盐黏土矿物中, 其形成与硅酸盐化学风化有关 (Penman *et al.*, 2020)。钛 (Ti) 通常存在于重矿物 (即金红石) 中, 通过风成通道进入海洋环境 (Yarincik *et al.*, 2000)。Ti/Al 值可作为古气候重建的独立指标 (Zhang *et al.*, 2021)。高 Ti/Al 值通常表明风沙输入或风强度增强以及干旱气候 (Beckmann *et al.*, 2005)。同时, 温室背景下的 Ti/Al 值与 UCC 相似 (0.05), 因为风成输入较低 (Yarincik *et al.*, 2000)。沉积岩的微量元素含量和某些元素的比值已在判断沉积环境中得到广泛应用。喜干型元素 (Sr) 和喜湿型元素 (Cu) 的比值可以反映古气候特征, $Sr/Cu < 10$ 指示温湿气候, $Sr/Cu > 10$ 指示干热气候 (莱尔曼, 1989)。

研究区筇竹寺组 CIA 值介于 48.16~69.36 之间, 平均值为 64.03, 其中 2 小层 CIA 平均值为



A—校正前的 A-CN-K 图解; B—校正后的 A-CN-K 图解。图中虚线代表理想的分化趋势

图 7 川南地区筇竹寺组页岩 A-CN-K 图解 (底图 Nesbitt and Young, 1984, 1989)

Fig. 7 A-CN-K ternary diagram of the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan
(base map modified from Nesbitt and Young, 1984, 1989)

57.78, 其余层段 CIA 平均值均大于 60, 表明除了 2 小层沉积期为寒冷和干旱的较弱的化学风化气候, 其余层段均为中等化学风化作用背景下的温暖湿润型气候。Ti/Al 值介于 0.05~0.07 之间, 平均值为 0.06, 与 UCC 相似, 表明其为温暖湿润型气候。研究区 23 个样品 Sr/Cu 值在 0.40~10.55 之间, 平均值为 3.99, 结果显示大部分小于 10, 仅个别值大于 10, 反映出川南地区筇竹寺组沉积期温湿的古气候。喜干型元素 Sr 元素表现出强烈亏损, 其含量为 135.82×10^{-6} , 明显低于上地壳的含量 (350.00×10^{-6}), Sr 的亏损与其沉积水体环境有关, 表明川南地区筇竹寺组在沉积时期整体处于相对湿润的气候环境。综上所述, 川南筇竹寺组沉积时期古气候背景为温暖湿润的气候, 物源区呈中等风化强度。

刘慧萍等 (2025) 研究认为, 川北地区寒武系筇竹寺组沉积期古气候背景为温暖湿润, 物源区呈中等风化强度。杨永祯等 (2024) 研究认为乌龙村剖面筇竹寺组沉积期古气候条件为亚热带温暖湿润气候。程涌等 (2024) 利用稀土元素特征, 确定滇东会泽地区筇竹寺沉积期间总体为温暖潮湿的气候特征。研究结论与前人一致, 但本研究区为川南地区, 利用研究区样品的 CIA 值及其他主、微量元素特征参数, 揭示了川南筇竹寺组沉积时期古气候背景为温暖湿润的气候, 物源区呈中等风化强度。

3.3 物源分析

在碎屑岩形成过程中, 铝、钛和锆等主量元素具有较强的稳定性, 不受风化、搬运及成岩作用的影响, 比如其氧化物 (如 Al_2O_3 、 TiO_2 和 ZrO_2) 在低温溶液中不易溶解, 其比值与源岩具有显著的相关性, 因此常被用于碎屑岩的物源区属性研究 (Hayashi *et al.*, 1997)。有些稳定性较高的微量元素和稀土元素能够有效保存源岩的地球化学特征, 因此常被用来判别物源类型 (郭望等, 2020)。 TiO_2 与 Zr 的比值 (TiO_2/Zr) 是推断源岩组成的重要地球化学参数, 基性火成岩通常富含 TiO_2 , 而长英质火成岩则富集 Zr 元素 (Tao *et al.*, 2017)。不同岩性的 TiO_2/Zr 值存在明显差异, 镁铁质岩石、中间型岩石和长英质火成岩的 TiO_2/Zr 值分别是大于 200、55 至 200 之间和小于 55 (Hayashi *et al.*, 1997)。此外, 分析稀土元素配分模式和

Eu、Ce 等元素的异常情况, 可作为源岩确定的重要依据 (Kasanzu *et al.*, 2008)。

川南筇竹寺组页岩样品的测试数据显示, 其 $\text{K}_2\text{O}/\text{Rb}$ 值的平均值为 375.22。样品点在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Rb}$ 二元图解中集中分布在中酸性成分区域 (图 8-A), 说明研究区页岩的母岩成分主要来源于中酸性岩石。在 TiO_2-Zr 二元图解中 (图 8-B), 除了 1 个样品点落入基性火成岩区域, 其余样品点都落入长英质火成岩区域, 说明页岩物源主要是偏酸性的长英质火成岩类。川南地区筇竹寺组页岩样品的 TiO_2/Zr 值在 22.91~50.33 之间, 平均值为 35.33, 反映出长英质火成岩的特征。川南地区筇竹寺组页岩的 Co/Th 值较低 (平均值为 1.40), La/Sc 值较高 (平均值为 2.48), 符合中酸性岩的特征 (Floyd and Leveridge, 1987)。样品点在 Co/Th-La/Sc 二元图解中 (图 8-C) 的分布特征, 表明页岩源岩主要是长英质火山岩类。利用前人建立的 Th/Sc-Zr/Sc 双变量判别图版进行投点, 所有样品点集中分布在安山岩与长英质火成岩之间 (图 8-D)。研究表明, 长英质和中性火成岩通常具有较高的轻稀土总量与重稀土总量比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$), 表现为轻稀土元素相对富集而重稀土元素相对亏损的特征; 而基性火成岩表现出相反的特征 (Roddaz *et al.*, 2006)。如稀土元素球粒陨石标准化配分模式曲线所示 (图 5), 研究区筇竹寺组页岩样品的轻稀土富集、重稀土亏损, 表明其源岩为长英质和中性火成岩。基于主量元素、微量元素及稀土元素的地球化学综合分析, 结果表明川南筇竹寺组页岩源岩主要为中酸性的长英质火成岩。

前人研究表明, 川南地区早寒武世主要供源古陆为康滇古陆 (吴冬等, 2023)。康滇古陆广泛发育 1500~1700 Ma 中元古代地层, 元古界之上的地层因遭受剥蚀或沉积缺失, 现今已不存在。楚雄地区典型的元古代地层有东川群、会理群以及汤丹群, 发育大量的凝灰岩、灰色凝灰质板岩、浊流成因的灰色块状变凝灰质砾岩与含砾凝灰质砂岩、球粒玄武岩以及花岗岩。东川群、会理群以及汤丹群被认为是古元古代末期康滇地区陆内裂谷拉张事件和扬子陆块周缘中元古代末期 Rodinia 汇聚过程的产物 (王奖臻等, 2012; 王生伟等, 2013; 宋昊等, 2015; 刘军平等, 2020; 刘建清等, 2021)。

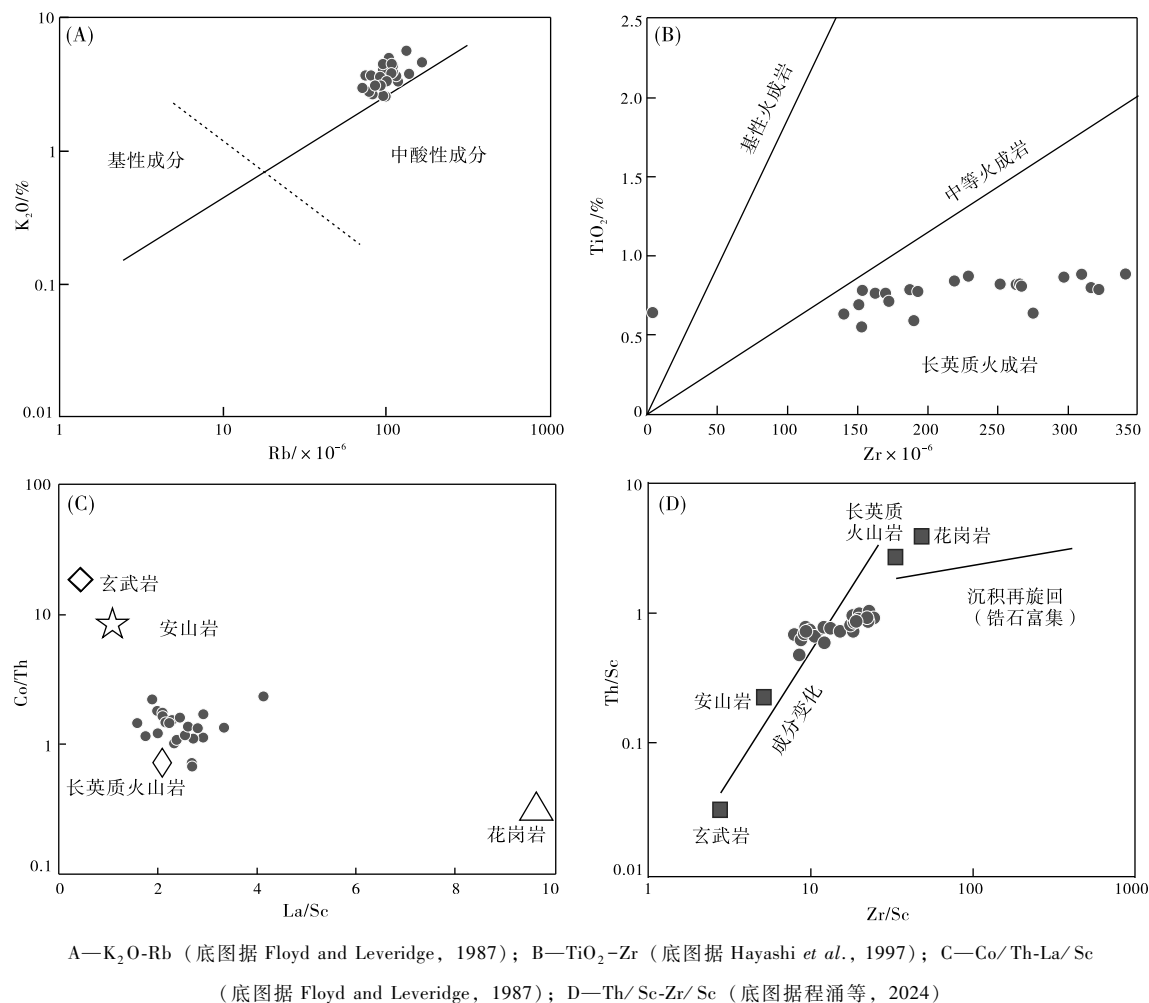


图 8 川南地区筇竹寺组源岩属性判别图解

Fig. 8 Provenance discrimination diagrams for the Qiongzhusi Formation shales, southern Sichuan Basin

因此基于筇竹寺组沉积岩物源示踪以及上述分析来看, 康滇古陆石英沉积物源区的 (长英质基岩) 东川群、会理群和汤丹群很有可能为川南地区筇竹寺组沉积提供砂泥岩, 其中沉积岩 K_2O 含量较高可能来自花岗岩和凝灰岩的代入, 基性岩的混入可能是来自源区的球状玄武岩 (刘建清等, 2021)。综上, 筇竹寺组沉积岩主要来自康滇古陆东川群、会理群和汤丹群中的花岗岩和富含长英质矿物的沉积岩等上地壳长英质岩石, 存在基岩混入。杨永祯等 (2024) 研究认为, 康滇古陆东缘筇竹寺组沉积岩主要来自康滇古陆元古界东川群、会理群和汤丹群的上地壳长英质岩石。程涌等 (2024) 通过综合分析 δEu 、 δCe 、 ΣREE 及其他地球化学参数, 推断滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系母岩主要为长英质岩石 (程涌等, 2024)。本研究的结论与前人

研究结论一致, 但本研究主要利用主量元素、微量元素和稀土元素特征参数分析的方法, 揭示川南地区筇竹寺组页岩源岩主要为来自康滇古陆中酸性的长英质火成岩。

3.4 构造背景判别

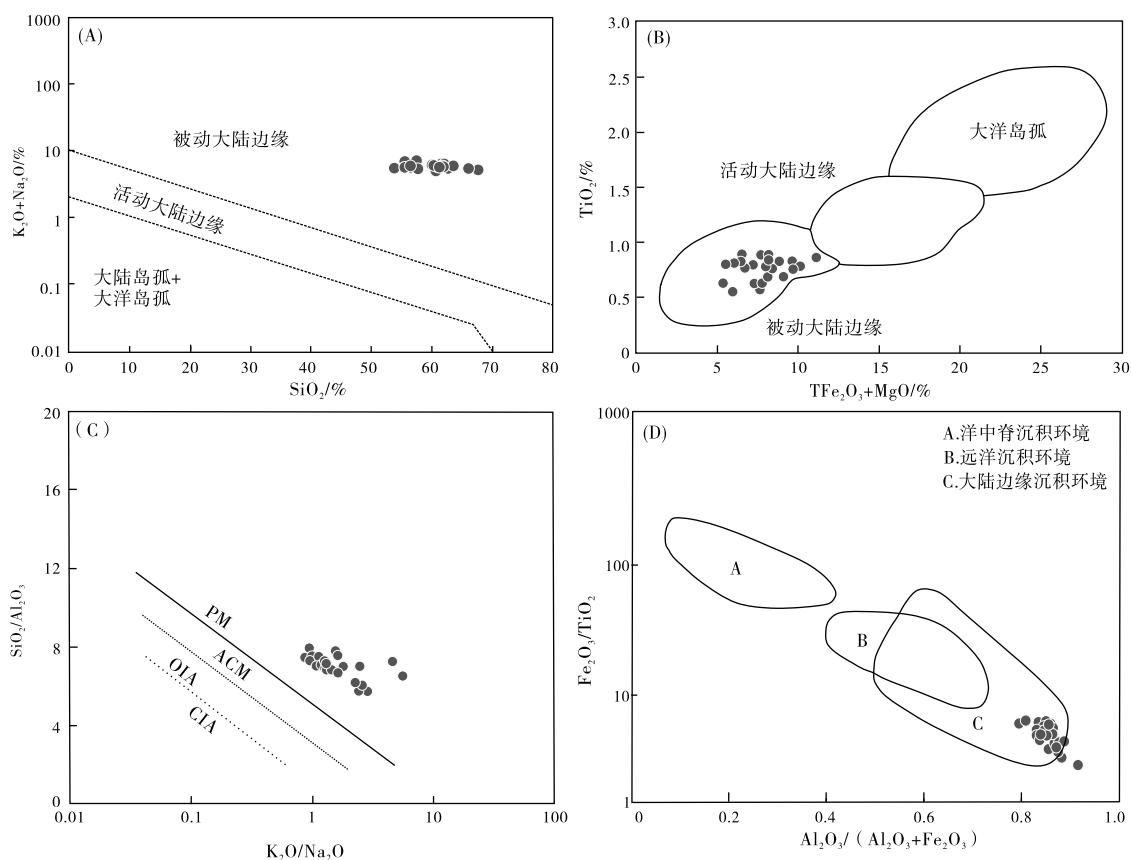
前人研究发现微量元素和稀土元素 (如 La 、 Sc 和 Cr 等元素), 在一定程度上记录了沉积活动中构造活动变化的情况, 可用于推断沉积盆地的构造演化历史 (Floyd and Leveridge, 1987)。Bhatia 和 Crook (1986) 总结出不同构造背景下沉积岩的 REE 分布特征 (表 4), 可依据对比结果综合判断出最为接近的构造背景。此外, 主量元素及其氧化物的比值是确定物源区构造背景的重要手段 (Maynard *et al.*, 1982)。

根据 Roser 和 Korsch (1986) 提出的 $K_2O +$

表 4 川南地区筇竹寺组页岩样品与不同构造背景沉积盆地沉积岩地球化学特征参数对比
(据 Bhatia, 1985; Bhatia and Crook, 1986)

Table 4 Comparative geochemical parameters of the Qiongzhusi Formation shales (southern Sichuan Basin) versus sedimentary rocks from various tectonic settings (data from Bhatia, 1985; Bhatia and Crook, 1986)

构造背景	La/ 10^{-6}	Ce/ 10^{-6}	Σ REE/ 10^{-6}	LREE/HREE	La/Yb	Sc/Cr	δ Eu
大洋岛弧	8.7 $\pm$ 2.5	19 $\pm$ 3.7	58 $\pm$ 10	3.8 $\pm$ 0.9	4.2 $\pm$ 1.3	0.57 $\pm$ 0.16	1.04 $\pm$ 0.11
大陆岛弧	24.4 $\pm$ 2.3	59 $\pm$ 8.2	146 $\pm$ 20	7.7 $\pm$ 1.7	11 $\pm$ 3.6	0.32 $\pm$ 0.06	0.79 $\pm$ 0.13
活动大陆边缘	33 $\pm$ 4.5	78	186	9.1	12.5	0.30 $\pm$ 0.02	0.60
被动大陆边缘	33.5 $\pm$ 5.8	85	210	8.5	15.9	0.16 $\pm$ 0.02	0.56
本文平均值	37.12	76.72	189.23	7.24	9.76	0.17	0.77



A— $K_2O+Na_2O-SiO_2$ 二元图解 (底图据 Roser and Korsch, 1986); B— $TiO_2-TFe_2O_3+MgO$ (底图据 Bhatia, 1983); C— $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 二元图解 (底图据 Maynard *et al.*, 1982); D— $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-Fe_2O_3/TiO_2$ 判别图解 (底图据 Boström *et al.*, 1973)。PM: 被动大陆边缘; ACM: 活动大陆边缘; OIA: 大洋岛弧; CIA: 大陆岛弧

图 9 川南地区筇竹寺组页岩物源区构造背景主量元素判别图解

Fig. 9 Major element discrimination diagrams for tectonic setting of provenance area of the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin

Na_2O-SiO_2 构造背景判别图 (图 9-A)、Bhatia (1983) 提出的 $TiO_2-TFe_2O_3+MgO$ 构造判别图解 (图 9-B)、Maynard 等 (1982) 提出的 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 双变量判别图解 (图 9-C) 和 Boström 等 (1973) 提出的 $(Al_2O_3)/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-Fe_2O_3/TiO_2$

双变量判别图 (图 9-D), 4 个不同的判别图, 结果均显示筇竹寺组沉积岩源区构造背景为被动大陆边缘环境。源岩若处于被动大陆边缘, 稀土元素特征主要表征为轻稀土富集, Eu 为负异常的特征; 若处于活动大陆边缘其主要成分为火山

岩, 分异程度较低, 表现重稀土富集, 无 Eu 亏损的特征 (Bhatia, 1985)。川南地区筇竹寺组页岩稀土元素总量 ΣREE 介于 $136.51 \times 10^{-6} \sim 297.68 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 189.23×10^{-6} , 与活动大陆边缘和被动大陆边缘都较为接近; LREE/HREE 平均值为 7.24, δEu 的平均值为 0.77 (表 4), 表现出轻稀土明显富集且 Eu 负异常的特征, 指示构造背景为被动大陆边缘 (表 4)。综合分析, 认为川南地区筇竹寺组页岩的沉积物源区的构造背景为被动大陆边缘。

久凯等 (2012) 研究认为, 早寒武世上扬子地区, 盆地类型主要有克拉通盆地、克拉通边缘盆地和被动大陆边缘盆地, 整体表现为古斜坡的背景 (久凯等, 2012)。刘建清等 (2021) 对康滇古陆东缘锌厂沟剖面沉积岩进行了地球化学特征的分析, 确定康滇古陆东缘筇竹寺组沉积岩主要形成于大陆边缘环境。杨永祯等 (2024) 利用主量元素进行分析, 确定滇东地区早寒武世筇竹寺组沉积岩主要形成于被动大陆边缘环境; 但通过微量元素分析, 得出的结论是物源区位于大陆岛弧构造背景。这是因为, 被动大陆边缘物源的复杂性以及样品未经多旋回沉积, 沉积岩保留了源岩形成时的大陆岛弧微量元素特征 (杨世文等, 2016; 杨永祯等, 2024), 以及热液作用带来了微量元素并通过上升洋流在被动大陆边缘陆棚环境中沉积下来。程涌等 (2024) 通过对稀土元素特征参数的对比, 确定滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系的构造背景为大陆岛弧环境。

扬子地区自新元古代青白口纪以来, 一直处于 Rodinia 大陆西北边缘的位置, 扬子地区广泛发育裂谷。震旦纪以后, 扬子地区盆地原型由裂谷盆地向被动陆源拗陷或克拉通内裂陷型盆地演变, 直到早古生代晚期 Gondwana 大陆聚合之前, 扬子地区一直处于被动大陆边缘的板块构造背景 (鲁国, 2021), 这与本研究得出的早寒武世筇竹寺组沉积岩形成于被动大陆边缘的结论一致。另外在筇竹寺组沉积期, 上扬子地区发生的构造运动是兴凯运动 II 幕, 构造运动性质以拉张裂陷为主要特征 (李伟等, 2015), 拉张持续到华南陆块与东冈瓦纳的碰撞中逐渐结束 (王志伟等, 2023), 这也与被动大陆边缘的特征相符合。因此在川南地区筇竹寺组沉积期, 构造背景为 Rodinia 大陆发生裂解形成的

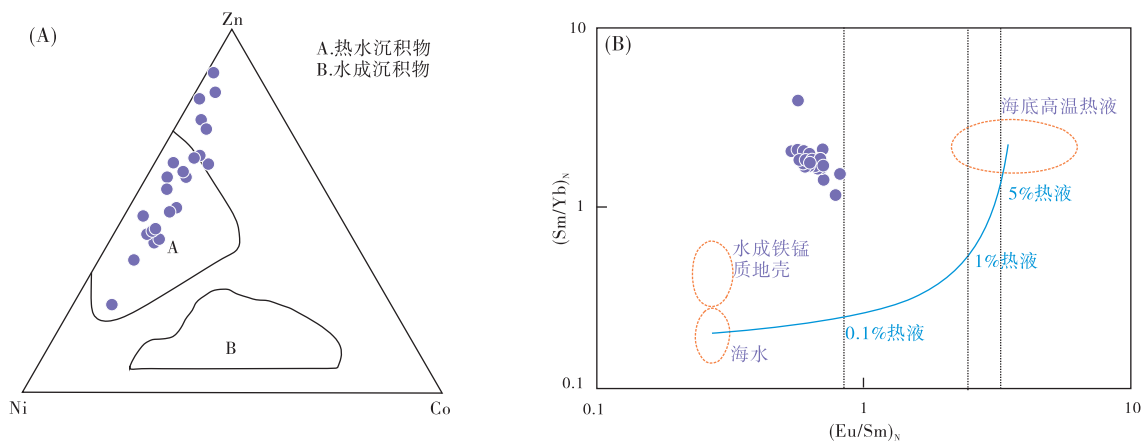
被动大陆边缘环境, 受兴凯运动影响, 上扬子地区局部区域进一步裂解并沉降导致海侵 (李伟等, 2015)。本研究采用主量元素进行构造背景的判别, 研究结论与前人一致, 川南地区早寒武世筇竹寺组沉积岩主要形成于被动大陆边缘的构造背景环境。

3.5 热液作用

海底热液对页岩沉积具有重要影响 (Yu *et al.*, 2009)。海底热液活动可以通过 Ba/Sr 、 Co/Zn 值来判别。 $\text{Zn}-\text{Ni}-\text{Co}$ 三角图可作为判断热液影响的方法之一 (侯东壮等, 2019)。在判断受热液影响的沉积物距离热液活动中心远近时, $\Sigma\text{REE}/\text{Fe}$ 值可作为有效指标, 该比值越大, 距离热液活动中心就越远, 反之则越近 (Olivarez and Owen, 1989)。海水中海底热液的贡献量可通过 $(\text{Eu}/\text{Sm})_{\text{N}} - (\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 二元图解 (Alexander *et al.*, 2008) 进行判断。研究表明, 海底热液活动通常表现为显著的铕 (Eu) 正异常, Eu 正异常程度可作为评估高温热液贡献量的重要依据 (Bau and Dulski, 1999)。

通常受海底热液影响的沉积物 Ba/Sr 值大于 1, 正常海相沉积物的 Ba/Sr 值小于 1 (Peter and Scott, 1988)。研究区筇竹寺组页岩的 Ba/Sr 值介于 5.60~33.94, 普遍大于 1, 表明其沉积时受到海底热液影响。铁锰结核等正常沉积形成的岩石 Co/Zn 值一般在 2.5 左右, 热液成因的沉积物中 Co/Zn 值约为 0.15 (张茜等, 2018)。研究区筇竹寺组页岩的 Co/Zn 值介于 0.01~0.38, 平均为 0.15, 同样反映存在热液活动。样品点在 $\text{Zn}-\text{Ni}-\text{Co}$ 三角图中, 主要落在热水沉积物区域及其附近, 进一步反映热液活动的存在 (图 10-A)。研究区筇竹寺组页岩的 $\Sigma\text{REE}/\text{Fe}$ 值介于 $382.08 \times 10^{-4} \sim 867.87 \times 10^{-4}$ 之间, 平均为 555.73×10^{-4} , 说明研究区筇竹寺组页岩沉积时离热液活动中心较远。研究区筇竹寺组页岩样品点在 $(\text{Eu}/\text{Sm})_{\text{N}} - (\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 二元图解中接近于水成铁锰质地壳与海水 (图 10-B), 表明在原始溶液中海底热液的占比尚不足 0.1%。此研究区样品均表现为 Eu 负异常进一步说明原始溶液中海底热液组分较少, 对页岩沉积影响极小, 推测其为远离热液活动中心的远端沉积 (张茜等, 2018)。

上扬子地区的川南、湘黔等地区在早寒武世向



A—Zn-Ni-Co 三角图 (底图据 Choi and Hariya, 1992); B— $(Eu/Sm)_N - (Sm/Yb)_N$ (底图据 Alexander *et al.*, 2008)

图 10 川南地区筇竹寺组页岩热液作用判别图解

Fig. 10 Discrimination diagram of hydrothermal processes for the Qiongzhusi Formation shales in southern Sichuan Basin

南开口, 与华南洋 (早期热水) 相通, 形成热水深水陆棚区 (苏奎等, 2009)。Wang 等 (2012) 研究表明, 在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡期华南海南西部扬子台地边缘带, 在张性构造背景下, 深部富硅热液沿深切基底的断裂向上运移, 在台一盆转换带直接形成硅质岩。程涌等 (2024) 研究认为, 滇东会泽地区筇竹寺组沉积岩受到了富金属热水作用的轻微影响 (程涌等, 2024)。本研究结论与前人研究结论一致, 早寒武世筇竹寺组在上扬子地区存在热液活动影响, 但早寒武世热液活动主要分布于在上扬子地区东南缘 (赵建华等, 2019), 故川南地区受热液影响不大。

3.6 沉积模式

海陆分布格局和构造运动共同决定了风化产物的来源, 这些因素共同影响沉积环境和沉积相的分布。四川盆地处于上扬子稳定克拉通西北缘, 在早寒武世时期被西侧康滇古陆和北侧古陆 (摩天岭古陆、汉南古陆) 所包围。早寒武世康滇古陆为四川盆地及其周缘提供显著且持续的碎屑供给 (吴冬等, 2023)。康滇地区自古元古代至新元古代期间, 经历了多期岩浆活动, 其中新元古代时期的岩浆活动更为显著 (朱利岗, 2019)。新元古代时期, 扬子陆块西南缘的岩浆活动分布更为广泛, 持续时间更长 (920~740 Ma)。这一时期的岩浆岩以中酸性为主, 同时伴有基性至超基性岩体和岩脉。川南地区筇竹寺组沉积期, 构造背景为 Rodinia 大陆发生裂解形成的被动大陆边缘环境, 受兴

凯运动影响, 上扬子地区局部区域进一步裂解并沉降导致海侵 (李伟等, 2015)。四川盆地在早寒武世广泛海侵的背景下总体为浅水陆棚的古地理环境。

筇竹寺组沉积期, 川南地区处于上扬子西北缘的局限海盆, 沉积水体较深, 整体处于缺氧还原环境, 利于有机质的保存。该时期气候温暖湿润, 康滇古陆长英质岩石风化提供丰富的陆源碎屑供给。同时盆地断裂活动诱发热液活动携带一定量的 Pb、Zn 和 Cu 等金属元素上涌。热液活动参与海洋中生物的生命活动, 可以为海洋生物的发育提供物质基础并提高古生产力。此外, 热液活动为川南地区下寒武统筇竹寺组黑色页岩提供了必要的物质基础和保存条件, 有利于形成优质烃源岩。在较还原条件下, 陆源碎屑、有机质和一些金属硫化物共同沉积形成了黑色岩系。

4 结论

通过研究川南地区下寒武统筇竹寺组页岩的主量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征, 得到以下几点认识:

1) 川南地区筇竹寺组页岩主量、微量和稀土元素含量与大陆上地壳平均值相比较, 主量元素分析表明 TFe_2O_3 、MgO 和 K_2O 富集, 而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 及 CaO 则相对亏损; 微量元素 Mo 和 Cd 强烈富集, Sr 则表现出强烈亏损; 稀土元素配分模式呈现典型的右倾“V”字型分布, 表现为轻

稀土元素明显富集、重稀土元素相对亏损的分异特征,并伴有 Eu 负异常。

2) Th/Sc-Zr/Sc 二元图解分析结果表明,研究区沉积岩成分主要受控于母岩成分,而非沉积再循环作用的影响。校正后的 CIA 值表明川南地区筇竹寺组沉积岩经历了中等强度的化学风化作用,沉积岩源区处于温暖湿润的气候条件。主量、微量、稀土元素的物源和构造背景图解,指示页岩沉积物的物源主要来自于康滇古陆的中酸性的长英质火成岩,源岩形成时的沉积构造背景主要为被动大陆边缘环境。

3) 利用前人建立的 Zn-Ni-Co 三角图和 $(\text{Eu}/\text{Sm})_{\text{N}} - (\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 二元图解进行投点,显示原始溶液中海底热液组分较少,对页岩沉积影响极小,推测其为远离热液活动中心的远端沉积。

参考文献 (References)

- 曹婷婷,徐思煌,王约. 2018. 川东北下寒武统筇竹寺组稀土元素特征及其地质意义:以南江杨坝剖面为例. 石油实验地质, 40(5): 716-723. [Cao T T, Xu S H, Wang Y. 2018. Characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northeastern Sichuan Basin and its geological implications: a case study of Yangba section, Nanjiang. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(5): 716-723]
- 操应长,徐琦松,王健. 2018. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展. 地学前缘, 25(4): 116-131. [Cao Y C, Xu Q S, Wang J. 2018. Progress in “source-to-sink” system research. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 116-131]
- 陈代钊,汪建国,严德天,韦恒叶,遇昊,王清晨. 2011. 扬子地区古生代主要烃源岩有机质富集的环境动力学机制与差异. 地质科学, 46(1): 5-26. [Chen D Z, Wang J G, Yan D T, Wei H Y, Yu H, Wang Q C. 2011. Environmental dynamics of organic accumulation for the principal Paleozoic source rocks on Yangtze block. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 46(1): 5-26]
- 陈威振,田景春,林小兵,梁庆韶,杨燕茹,王兴. 2024. 川西南下寒武统麦地坪组—筇竹寺组元素地球化学特征及其古环境意义:以 JS1 井为例. 沉积学报, 42(5): 1784-1798. [Chen W Z, Tian J C, Lin X B, Liang Q Y, Yang Y R, Wang X. 2024. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi Formations in Southwestern Sichuan Basin: a case study of well JS1. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(5): 1784-1798]
- 程建,郑伦举. 2020. 川南地区金页 1 井早寒武世烃源岩沉积地球化学特征. 石油与天然气地质, 41(4): 800-810. [Cheng J, Zheng L J. 2020. Sedimentary geochemical characteristics of the Early Cambrian source rocks in Well Jinye 1 in southern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 800-810]
- 程涌,文义明,聂琪,罗开,张金梁,和东浩,刘洋,伍伟. 2024. 滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系古环境、物源及构造背景:来自稀土元素地球化学的指示. 矿物岩石, 44(4): 58-70. [Cheng Y, Wen Y M, Nie Q, Luo K, Zhang J L, He D H, Liu Y, Wu W. 2024. Paleoenvironmental, provenance, and tectonic setting of the Qiongzhusi Formation black shale series in Huize area, eastern Yunnan: insights from rare earth element geochemistry. *Mineralogy and Petrology*, 44(4): 58-70]
- 杜远生,朱杰,顾松竹,徐亚军,杨江海. 2007. 北祁连造山带寒武系—奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示. 中国科学(D 辑), (10): 1314-1329. [Du Y S, Zhu J, Gu S Z, Xu Y J, Yang J H. 2007. Sedimentary geochemical characteristics of Cambrian-Ordovician siliceous rocks in North Qilian orogenic belt and its enlightenment to multi-island ocean. *Science in China (Series D)*, (10): 1314-1329]
- 范海经,邓虎成,伏美燕,刘四兵,余翰泽,李依林. 2021. 四川盆地下寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应. 沉积学报, 39(4): 1004-1019. [Fan H J, Deng H C, Fu M Y, Liu S B, Yu H Z, Li Y L. 2021. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to construction. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 1004-1019]
- 郭若舜,叶思源,何磊,赵俐红. 2018. 全新世以来辽河三角洲地区的化学风化及其对气候变化的响应. 海洋科学, 42(9): 38-50. [Guo R S, Ye S Y, He L, Zhao L H. 2018. Chemical weathering and its implications regarding climate changes in the Liaohe Delta since the Holocene. *Marine Sciences*, 42(9): 38-50]
- 郭彤楼,邓虎成,赵爽,魏力民,何建华. 2025. 四川盆地寒武系筇竹寺组新类型页岩气形成机理与勘探突破. 石油勘探与开发, 52(1): 57-69. [Guo T L, Deng H C, Zhao S, Wei L M, He J H. 2025. Formation mechanisms and exploration breakthroughs of new type of shale gas in Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 57-69]
- 郭望,张卫刚,李玉宏,雷迅,李永红,陈刚,张云鹏,陈磊,徐学敏. 2020. 柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征:对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义. 沉积学报, 38(3): 676-686. [Guo W, Zhang W G, Li Y H, Lei X, Li Y H, Chen G, Zhang Y P, Chen L, Xu X M. 2020. Geochemistry of 7 member shale of the dameigou formation in the northern Qaidam Basin, China: significance and implication for provenance and source weathering in the late Middle Jurassic. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(3): 676-686]
- 郭旭升. 2014. 南海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识. 地质学报, 88(7): 1209-1218. [Guo X S. 2014. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China: understanding from the Longmaxi Formation Shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1209-1218]
- 侯东壮,吴湘滨,邓鑫楠. 2019. 贵州铜仁地区 9 门冲组黑色页岩地球化学特征及成岩环境研究. 地质与勘探, 55(3): 779-788.

- [Hou D Z, Wu X B, Deng X N. 2019. Geochemical characteristics and diagenetic setting of the Jiumenchong Formation black shale in the Tongren Area of Guizhou Province. *Geology and Exploration*, 55(3): 779–788]
- 久凯, 丁文龙, 黄文辉, 张金川, 曾维特. 2012. 上扬子地区下寒武统海相富有机质页岩形成环境与主控因素分析. *现代地质*, 26(3): 547–554. [Jiu K, Ding W L, Huang W H, Zhang J C, Zeng W T. 2012. Formation environment and controlling factors of organic-rich shale of Lower Cambrian in Upper Yangtze Region. *Geoscience*, 26(3): 547–554]
- 莱尔曼. 1989. 湖泊的化学地质学和物理学. 北京: 地质出版社, 370. [Lerman A. 1989. *The Lacustrine Chemistry' Geology and Physics*. Beijing: Geological Publishing House, 370]
- 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 张宝民, 周慧. 2015. 四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用. *石油学报*, 36(5): 546–556, 563. [Li W, Liu J J, Deng S H, Zhang B M, Zhou H. 2015. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 36(5): 546–556, 563]
- 李依林, 伏美燕, 邓虎成, 刘四兵, 胥旺, 吴冬. 2022. 滨岸闭塞环境中有机质富集模式: 以川西南峨边葛村剖面筇竹寺组为例. *天然气地球科学*, 33(4): 588–604. [Li Y L, Fu M Y, Deng H C, Liu S B, Xu W, Wu D. 2022. The enrichment model of organic matter in the coastal detention environment: case study of the Qiongzhusi Formation in the Gecun section of Ebian in southwestern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(4): 588–604]
- 梁峰, 姜巍, 戴赟, 陈禹, 罗超, 张琴, 佟恺林, 胡曦, 卢斌. 2022. 四川盆地威远—资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力. *天然气地球科学*, 33(5): 755–763. [Liang F, Jiang W, Dai Y, Chen Y, Luo C, Zhang Q, Tong K L, Hu X, Lu B. 2022. Enrichment law and resource potential of shale gas of Qiongzhusi Formation in Weiyuan-Ziyang areas, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 755–763]
- 刘宝珊, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社. [Liu B J, Xu X S. 1994. *Atlas of Lithofacies and Paleogeography of Southern China*. Beijing: Science Press]
- 刘慧萍, 戎佳, 刘自亮, 高波, 张明何, 杨琪航, 王佳乐, 游浪. 2025. 四川盆地广元北部寒武系筇竹寺组元素地球化学特征及地质意义. *天然气地球科学*, 36(5): 936–952. [Liu H P, Rong J, Liu Z L, Gao B, Zhang M H, Yang Q H, Wang J L, You L. 2025. Element geochemical characteristics and geological significance of the Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Guangyuan, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(5): 936–952]
- 刘建清, 何利, 何平, 冉敬, 何佳伟, 陈凤霖. 2021. 康滇古陆东缘筇竹寺组地球化学特征及意义: 以云南省昭通市昭阳区锌厂沟剖面为例. *沉积学报*, 39(5): 1305–1319. [Liu J Q, He L, He P, Ran J, He J W, Chen F L. 2021. Geochemical characteristics and significance of the Qiongzhusi Formation on the eastern margin of the Ancient Kangding-Yunnan Land: taking the Xinchanggou section of Zhaoyang district, Zhaotong city, Yunnan Province as an example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(5): 1305–1319]
- 刘军平, 孙柏东, 王晓峰, 刘伟, 马进华, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃烨. 2020. 滇中禄丰地区中元古代早期球状玄武岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义. *地质论评*, 66(1): 35–51. [Liu J P, Sun B D, Wang X F, Liu W, Ma J H, Guan X Q, Song D H, Lü B Y. 2020. The zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of the spherical basalt in the early Mesoproterozoic in Lufeng area central Yunnan. *Geological Review*, 66(1): 35–51]
- 刘忠宝, 高波, 张钰莹, 杜伟, 冯动军, 聂海宽. 2017. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征. *石油勘探与开发*, 44(1): 21–31. [Liu Z B, Gao B, Zhang Y Y, Du W, Feng D J, Nie H K. 2017. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 21–31]
- 刘忠宝, 王鹏威, 聂海宽, 李鹏, 李倩文. 2022. 中上扬子地区寒武系页岩气富集条件及有利区优选. *中南大学学报(自然科学版)*, 53(9): 3694–3707. [Liu Z B, Wang P W, Nie H K, Li P, Li Q W. 2022. Enrichment conditions and favorable prospecting targets of Cambrian shale gas in Middle–Upper Yangtze. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(9): 3694–3707]
- 鲁国. 2021. 四川盆地震旦—寒武纪关键构造期构造—沉积响应. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Lu G. 2021. *Tectonic-sedimentary response in the key tectonic period of the Sinian-Cambrian in the Sichuan Basin*. Masteral dissertation of China University of Geosciences]
- 罗锦宇, 祝海华, 梁兴, 张介辉, 张廷山, 闵华军, 张喜, 邹辰, 李军君. 2023. 滇黔北坳陷寒武系筇竹寺组岩相古地理特征与优质页岩展布. *沉积学报*, 41(4): 1257–1270. [Luo J Y, Zhu H H, Liang X, Zhang J H, Zhang T S, Min H J, Zhang X, Zou C, Li J J. 2023. Lithofacies paleogeography and distribution of high-quality shale of the Cambrian qiongzhusi formation in the Dianqianbei depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(4): 1257–1270]
- 马新华. 2018. 四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索. *天然气工业*, 38(10): 1–10. [Ma X H. 2018. Enrichment laws and scale effective development of shale gas in the southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(10): 1–10]
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方层序地层与古地理(精). 北京: 科学出版社, 603. [Ma Y S, Chen H D, Wang G L. 2009. *Sequence Stratigraphy and Paleogeography (Fine) in Southern China*. Beijing: Science Press, 603]
- 秦何星, 陈雷, 卢畅, 胡月, 熊敏, 谭秀成, 计玉冰, 陈鑫, 王高翔. 2024. 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. *地质论评*, 70(4): 1314–1334. [Qin H X, Chen L, Lu C, Hu Y, Xiong M, Tan X C, Ji Y B, Chen X, Wang G X. 2024. Geochemical characteristics of the Wufeng–Longmaxi Formations shale in the southern margin of the Upper Yangtze area: implications for weathering, provenance and tectonic setting. *Geological Review*, 70(4): 1314–1334]
- 宋昊, 倪师军, 张成江, 徐争启, 宋世伟, 汪德文. 2015. 康滇地轴基底

- IOCG 铜铁矿床中岩浆岩的成矿及找矿指示意义. 矿物学报, 35(S1): 156–157. [Song H, Ni S J, Zhang C J, Xu Z Q, Song S W, Wang D W. 2015. Mineralization and mineralization indication of magmatic rocks in IOCG copper and iron ore deposit in the basement of Kangdianaxial. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 156–157]
- 苏奎, 金振奎, 杜宏宇, 董晓东, 张伟, 张卫丹, 陈英. 2009. 中上扬子地区早寒武世梅树村期岩相古地理. 科技导报, 27(10): 26–31. [Su K, Jin Z K, Du H Y, Dong X D, Zhang W, Zhang W D, Chen Y. 2009. Lithofacies Palaeogeography of the Meishucun age in the middle and Upper Yangtze Region. *Science & Technology Review*, 27(10): 26–31]
- 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 刘静江, 马奎, 李文正, 谢武仁, 江青春, 翟秀芬, 石书缘, 李琦. 2020. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义. 石油勘探与开发, 47(5): 884–897. [Wang Z C, Jiang H, Chen Z Y, Liu J J, Ma K, Li W Z, Xie W R, Jiang Q C, Zhai X F, Shi S Y, Li Q. 2020. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle-upper Yangtze region, South China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 884–897]
- 王奖臻, 李泽琴, 黄从俊. 2012. 康滇地轴元古代重大地质事件与拉拉 IOCG 矿床成矿响应. 地球科学进展, 27(10): 1074–1079. [Wang J Z, Li Z Q, Huang C J. 2012. The main geological events of the Kangdian Proterozoic Eon and response from to the La-La IOCG Deposit. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1074–1079]
- 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 周邦国, 郭阳, 蒋小芳, 朱华平, 孙志明, 罗茂金, 马东, 沈战武, 张海. 2013. 会东菜园子花岗岩的年龄、地球化学: 扬子地台西缘格林威尔造山运动的机制探讨. 地质学报, 87(1): 55–70. [Wang S W, Liao Z W, Sun X M, Zhou B G, Guo Y, Jiang X F, Zhu H P, Sun Z M, Luo M J, Ma D, Shen Z W, Zhang H. 2013. Age and geochemistry of the Caiyuanzi granite in Sichuan, SW China: mechanism of the Grenvillian orogenic movement in the western margin of Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 55–70]
- 王跃, 桂和荣, 苏尚国, 周奇明, 李俊, 张雅楠. 2022. 滇黔北五峰组—龙马溪组页岩沉积环境和古气候地球化学特征. 沉积学报, 40(3): 653–666. [Wang Y, Gui H R, Su S G, Zhou Q M, Li J, Zhang Y N. 2022. Sedimentary environment and paleoclimate geochemical characteristics of shale in the Wufeng and Longmaxi Formations, northern Yunan-Guizhou area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 653–666]
- 王志伟, 钟怡江, 刘磊, 陈洪德, 王兴龙, 陈安清. 2023. 鄂西—渝东地区早寒武世克拉通内裂陷演化及对古地理格局的控制. 沉积学报, 41(4): 1110–1123. [Wang Z W, Zhong Y J, Liu L, Chen H D, Wang X L, Chen A Q. 2023. Evolution of early Cambrian intracraton rift and its influence on the paleogeographical pattern, Western Hubei-Eastern Chongqing. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(4): 1110–1123]
- 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 苏楠, 谢增业, 曾富英, 马石玉, 金惠, 王志宏, 朱秋影, 郝翠果, 王小丹. 2022. 克拉通内裂陷及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践: 以四川盆地震旦系—寒武系为例. 石油勘探与开发, 49(3): 465–477. [Wei G Q, Yang W, Xie W R, Su N, Xie Z Y, Zeng F Y, Ma S Y, Jin H, Wang Z H, Zhu Q Y, Hao C G, Wang X D. 2022. Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift: taking the Sinian-Cambrian of Sichuan Basin as an example. *Petroleum Exploration and Development*, 49(3): 465–477]
- 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 曹凯旋, 董晓霞, 赵勇, 魏力民, 王同, 马若龙. 2023. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组—筇竹寺组层序充填和演化模式. 石油与天然气地质, 44(3): 764–777. [Wu D, Deng H C, Xiong L, Cao K X, Dong X X, Zhao Y, Wei L M, Wang T, Ma R L. 2023. Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and on its periphery. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 764–777]
- 谢武仁, 姜华, 马石玉, 汪泽成, 郝涛, 付小东, 苏楠, 李文正, 武赛军, 王小丹, 黎荣. 2022. 四川盆地德阳—安岳裂陷晚震旦世—早寒武世沉积演化特征与有利勘探方向. 天然气地球科学, 33(8): 1240–1250. [Xie W R, Jiang H, Ma S Y, Wang Z C, Hao T, Fu X D, Su N, Li W Z, Wu S J, Wang X D, Li R. 2022. Sedimentary evolution characteristics and favorable exploration directions of Deyang-Anyue Rift within the Sichuan Basin in Late Sinian-Early Cambrian. *Natural Gas Geoscience*, 33(8): 1240–1250]
- 杨世文, 楼法生, 杨坤光, 张芳荣, 凌国卿, 曹员兵. 2016. 江西南部震旦—寒武纪寻乌岩组变沉积岩地球化学特征及构造意义. 中国地质, 43(1): 349–364. [Yang S W, Lou F S, Yang K G, Zhang F R, Ling G Q, Cao Y B. 2016. The geochemical characteristics and tectonic significance of metasedimentary rocks in Sinian-Cambrian Xunwu rock group, southern Jiangxi Province. *Geology in China*, 43(1): 349–364]
- 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 刘满仓, 曾富英, 谢增业, 金惠. 2012. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带. 石油学报, 33(S2): 21–34. [Yang W, Xie W R, Wei G Q, Liu M C, Zeng F Y, Xie Z Y, Jin H. 2012. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(S2): 21–34]
- 杨学锋, 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 罗超, 陈玉龙, 施振生, 谢圣阳, 任春昱, 陈鑫, 周天琪, 谢睿. 2025. 川南地区筇竹寺组页岩气藏特征及勘探启示. 天然气地球科学, 36(1): 13–24. [Yang X F, Zhang C L, Zhao S X, Zhang J, Luo C, Chen Y L, Shi Z S, Xie S Y, Ren C Y, Chen X, Zhou T Q, Xie R. 2025. Characteristics of shale gas reservoir and enlightenment of exploration in Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 13–24]
- 杨永祯, 郭岭, 方泽鑫, 徐凯, 张寰萌, 师宇翔, 武芳芳, 陶威. 2024. 康滇古陆东缘筇竹寺组沉积物源的风化特征: 以云南省楚雄市武定县乌龙村剖面为例. 沉积学报, 42(1): 324–341. [Yang Y Z, Guo L, Fang Z X, Xu K, Zhang H M, Shi Y X, Wu F F, Tao W. 2024. Weathering characteristics of sedimentary source area of Qiongzhusi Formation, eastern margin of ancient Kangding-Yunnan Land:

- case study of the Wulongcun section of Wuding district, Chuxiong city, Yunnan Province, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(1): 324–341]
- 雍锐, 石学文, 罗超, 钟可塑, 吴伟, 郑马嘉, 杨雨然, 李彦佑, 徐亮, 朱逸青, 何一凡, 陈丽清, 于魏铭. 2024. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气“槽—隆”富集规律及勘探前景. *石油勘探与开发*, 51(6): 1211–1226. [Yong R, Shi X W, Luo C, Zhong K S, Wu W, Zheng M J, Yang Y R, Li Y Y, Xu L, Zhu Y Q, He Y F, Chen L Q, Yu W M. 2024. Aulacogen-uplift enrichment pattern and exploration prospect of Cambrian Qiongzhusi Formation shale gas in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1211–1226]
- 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 常程, 夏自强, 曹埒焰, 田冲, 冯江荣, 方圆, 周翊. 2021. 川南地区深层页岩气富集条件差异分析与启示. *天然气地球科学*, 32(2): 248–261. [Zhang C L, Zhao S X, Zhang J, Chang C, Xia Z Q, Cao L Y, Tian C, Feng J R, Fang Y, Zhou X. 2021. Analysis and enlightenment of the difference of enrichment conditions for deep shale gas in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(2): 248–261]
- 张金川, 徐波, 聂海宽, 汪宗余, 林拓, 姜生玲, 宋晓微, 张琴, 王广源, 张培先. 2008a. 中国页岩气资源勘探潜力. *天然气工业*, 28(6): 136–140. [Zhang J C, Xu B, Nie H K, Wang Z Y, Lin T, Jiang S L, Song X W, Zhang Q, Wang G Y, Zhang P X. 2008a. Exploration potential of shale gas resources in China. *Natural Gas Industry*, 28(6): 136–140]
- 张金川, 聂海宽, 徐波, 姜生玲, 张培先. 2008b. 四川盆地页岩气成藏地质条件. *天然气工业*, 28(2): 151–156. [Zhang J C, Nie H K, Xu B, Jiang S L, Zhang P X. 2008b. Geological conditions of shale gas accumulation in Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 28(2): 151–156]
- 张茜, 余谦, 王剑, 肖渊甫, 程锦翔, 赵安坤, 张彬. 2018. 应用 ICP-MS 研究川西南龙马溪组泥页岩稀土元素特征及沉积环境. *岩矿测试*, 37(2): 217–224. [Zhang Q, Yu Q, Wang J, Xiao Y F, Cheng J X, Zhao A K, Zhang B. 2018. Application of ICP-MS to study the rare earth element characteristics and sedimentary environment of black shale in the Longmaxi Formation in the Southwestern Sichuan Basin. *Rock and Mineral Analysis*, 37(2): 217–224]
- 张茜, 肖渊甫, 王晓飞, 余谦, 王剑, 赵安坤, 门玉澎, 周业鑫. 2020. 四川盆地西南缘龙马溪组泥页岩地球化学特征及物源区和构造背景分析. *地质论评*, 66(5): 1393–1411. [Zhang Q, Xiao Y F, Wang X F, Yu Q, Wang J, Zhao A K, Men Y P, Zhou Y X. 2020. Geochemistry of the Longmaxi Formation mudstones of the southwest Sichuan Basin: implications for provenance and source weathering. *Geological Review*, 66(5): 1393–1411]
- 赵建华, 金之钧, 林畅松, 刘光祥, 刘可禹, 刘忠宝, 张钰莹. 2019. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境. *石油与天然气地质*, 40(4): 701–715. [Zhao J H, Jin Z J, Lin C S, Liu G X, Liu K Y, Liu Z B, Zhang Y Y. 2019. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 701–715]
- 朱光有, 赵坤, 李婷婷, 付小东, 张志遥, 陈志勇, 王鹏举. 2020. 中国华南地区下寒武统烃源岩沉积环境、发育模式与分布预测. *石油学报*, 41(12): 1567–1586. [Zhu G Y, Zhao K, Li T T, Fu X D, Zhang Z Y, Chen Z Y, Wang P J. 2020. Sedimentary environment, development model and distribution prediction of Lower Cambrian source rocks in South China. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1567–1586]
- 朱利岗. 2019. 云南武定地区铁—铜—金—铀—稀土矿成矿作用与成矿动力学. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Zhu L G. 2019. The ore genesis and geodynamic setting of the Fe-Cu-Au-U-REE deposits in the Wuding region, Yunnan Province, SW China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. *石油勘探与开发*, 37(6): 641–653. [Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H, Cheng K M. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641–653]
- 邹才能, 董大忠, 熊伟, 傅国友, 赵群, 刘雯, 孔维亮, 张琴, 蔡光银, 王玉满, 梁峰, 刘翰林, 邱振. 2024. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策. *石油与天然气地质*, 45(2): 309–326. [Zou C N, Dong D Z, Xiong W, Fu G Y, Zhao Q, Liu W, Kong W L, Zhang Q, Cai G Y, Wang Y M, Liang F, Liu H L, Qiu Z. 2024. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 309–326]
- Alexander B W, Bau M, Andersson P, Dulski P. 2008. Continently-derived solutes in shallow Archean seawater: rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2): 378–394.
- Algeo T J, Chen Z Q, Fraiser M L, Twitchett R J. 2011. Terrestrial-marine teleconnections in the collapse and rebuilding of Early Triassic marine ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(1–2): 1–11.
- Bai Y Y, Liu Z J, Sun P C, Liu R, Hu X F, Zhao H Q, Xu Y B. 2015. Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale-and coal-bearing layers of the Meihe Basin, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 89–101.
- Bau M, Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155(1–2): 77–90.
- Beckmann B, Flügel S, Hofmann P, Schulz M, Wagner T. 2005. Orbital forcing of Cretaceous river discharge in tropical Africa and ocean response. *Nature*, 437(7056): 241–244.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleo-

- zoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45(1-2): 97-113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193.
- Boström K, Kraemer T, Gartner S. 1973. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments. *Chemical Geology*, 11(2): 123-148.
- Chen L, Zhang B M, Jiang S, Chen X H, Zhang G T, Zhang J Y, Wei W, Lu Y B, Chen P, Lin W B, Liu Z H. 2022. Provenance, source weathering, and tectonic setting of the lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the Middle Yangtze area, China. *Marine and Petroleum Geology*, 139: 105584.
- Choi J H, Hariya Y. 1992. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan. *Economic Geology*, 87(5): 1265-1274.
- Curtis J B. 2002. Fractured shale-gas systems. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921-1938.
- Evensen N M, Hamilton P J, O'Nions R K. 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8): 1199-1212.
- Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921-924.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, Ohmoto H. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475-499.
- Jin C S, Li C, Peng X F, Cui H, Shi W, Zhang Z H, Luo G M, Xie S C. 2014. Spatiotemporal variability of ocean chemistry in the early Cambrian, South China. *Science China Earth Sciences*, 57(4): 579-591.
- Kasanu C, Maboko M A H, Many S. 2008. Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group, NE Tanzania: implications for provenance and source rock weathering. *Precambrian Research*, 164(3-4): 201-213.
- Li J, Tang S H, Zhang S H, Xi Z D, Yang N, Yang G Q, Li L, Li Y P. 2018. Paleo-environmental conditions of the Early Cambrian Niutiantang Formation in the Fenggang area, the southwestern margin of the Yangtze Platform, southern China: evidence from major elements, trace elements and other proxies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 159: 81-97.
- Ma Y, Yang H Z, Ma Y Y, Wang Y P, Wu W Z, An N, Tian S F, Ma L, Fu D L. 2023. Geochemical characteristics of shales from Upper Carboniferous Yanghugou formation in Weiningbeishan area, China: implication for provenance, source weathering and tectonic setting. *Marine and Petroleum Geology*, 149: 106082.
- Maynard J B, Valloni R, Yu H S. 1982. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 10(1): 551-561.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169-200.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4): 2000GC000109.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of America Special Papers*, 284: 21-40.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715-717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2): 129-147.
- Olivarez A M, Owen R M. 1989. REE/Fe variations in hydrothermal sediments: implications for the REE content of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(3): 757-762.
- Panahi A, Young G M, Rainbird R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199-2220.
- Penman D E, Caves Rugenstein J K, Ibarra D E, Winnick M J. 2020. Silicate weathering as a feedback and forcing in Earth's climate and carbon cycle. *Earth-Science Reviews*, 209: 103298.
- Peter J M, Scott S D. 1988. Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of sea-floor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *Canadian Mineralogist*, 26(3): 567-587.
- Qadrouh A N, Alajmi M S, Alotaibi A M, Baioumy H, Almalki M A, Alyousif M M, Ahmed Salim A M, Bin Rogaiib A M. 2021. Mineralogical and geochemical imprints to determine the provenance, depositional environment, and tectonic setting of the Early Silurian source rock of the Qusaiba shale, Saudi Arabia. *Marine and Petroleum Geology*, 130: 105131.
- Roddaz M, Viers J, Brusset S, Baby P, Boucayrand C, Hérail G. 2006.

- Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments. *Chemical Geology*, 226(1-2): 31-65.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635-650.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1-2): 119-139.
- Sheldon N D. 2006. Abrupt chemical weathering increase across the Permian - Triassic boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231(3-4): 315-321.
- Tao S, Xu Y B, Tang D Z, Xu H, Li S, Chen S D, Liu W B, Cui Y, Gou M F. 2017. Geochemistry of the Shitoumei oil shale in the Santanghu Basin, Northwest China: implications for paleoclimate conditions, weathering, provenance and tectonic setting. *International Journal of Coal Geology*, 184: 42-56.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. *Geological Magazine*, 122(6): 673-674.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- Terakado Y, Fujitani T. 1998. Behavior of the rare earth elements and other trace elements during interactions between acidic hydrothermal solutions and silicic volcanic rocks, southwestern Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1903-1917.
- Wang J G, Chen D Z, Wang D, Yan D T, Zhou X Q, Wang Q C. 2012. Petrology and geochemistry of chert on the marginal zone of Yangtze Platform, western Hunan, South China, during the Ediacaran-Cambrian transition. *Sedimentology*, 59(3): 809-829.
- Yarincik K M, Murray R W, Peterson L C. 2000. Climatically sensitive eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578000 years: Results from Al/Ti and K/Al. *Paleoceanography*, 15(2): 210-228.
- Yu B S, Dong H L, Widom E, Chen J Q, Lin C S. 2009. Geochemistry of basal Cambrian black shales and cherts from the Northern Tarim Basin, Northwest China: implications for depositional setting and tectonic history. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 418-436.
- Zhang G J, Chen D Z, Huang K J, Liu M, Huang T Y, Yeasmin R, Fu Y. 2021. Dramatic attenuation of continental weathering during the Ediacaran-Cambrian transition: implications for the climatic-oceanic-biological co-evolution. *Global and Planetary Change*, 203: 103518.
- Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Geng Y K, Wen X, Yan C N. 2016. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 163: 52-71.
- Zou C N, Wei G Q, Xu C C, Du J H, Xie Z Y, Wang Z C, Hou L H, Yang C, Li J, Yang W. 2014. Geochemistry of the sinian-Cambrian gas system in the Sichuan Basin, China. *Organic Geochemistry*, 74: 13-21.

(责任编辑 李新坡)