

黑色页岩物源研究方法、存在问题及未来展望

——以川南地区五峰组-龙马溪组为例

祁 灵^{1,2}, 施振生^{1,2}, 王红岩^{2,3}, 周天琪^{1,2}, 李贵中^{1,2}, 赵 萌^{1,2}, 程 辉⁴, 程自豪⁴

[1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北 廊坊 065007; 3. 中国石油 国家卓越工程师学院, 北京 100096; 4. 中国石油 长城钻探工程有限公司 地质研究院, 辽宁 盘锦 124010]

摘要:黑色页岩物源研究有元素地球化学方法和矿物学方法等。元素地球化学方法利用主量元素、微量元素及稀土元素判别沉积物搬运-沉积过程、母岩性质和构造背景特征,矿物学方法则通过矿物组成及含量的变化识别源区位置及其搬运路径。目前,黑色页岩物源分析仅能指出潜在物源区性质,而源区具体位置、源区分布范围以及沉积物搬运路径尚未明确。以川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩为例,系统分析其物源特征:①通过主成分分析识别出活动性元素(Si, Al, Ca, Fe, Ba, Ta, Th和Zr)和不活动性元素(Ti, P, Na, Mn, Yb, Lu和Tm)。②源岩成分成熟度整体偏低,经历了低-中等程度的化学风化作用和温暖湿润的气候条件。沉积分选作用和再循环作用对源岩元素特征影响微弱。③母岩主要为长英质火成岩,源区构造背景以碰撞环境为主,部分来源裂谷环境。④沉积物物源以黔中-雪峰古隆起为主,乐山-龙女寺古隆起次之。其中宜203井区、长宁地区、泸州地区以及川南东北地区的沉积物主要来源于黔中-雪峰隆起,威远地区的威207井附近沉积物主要来源于乐山-龙女寺古隆起。物源分析中影响沉积岩主量元素、微量元素、矿物组分含量分布的因素多,需结合稳定同位素、高分辨率地球化学分析技术,多指标、多学科交叉研究,大数据分析手段才能全面了解黑色页岩的物源特征。

关键词:物源;元素地球化学;黑色页岩;五峰组;龙马溪组;川南地区

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Methodology for research on the provenance of black shales and its problems and prospects: A case study of the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

QI Ling^{1,2}, SHI Zhensheng^{1,2}, WANG Hongyan^{2,3}, ZHOU Tianqi^{1,2}, LI Guizhong^{1,2}, ZHAO Meng^{1,2},
CHENG Hui⁴, CHENG Zihao⁴

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. National Energy Shale Gas R & D (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China; 3. National Elite Institute of Engineering, CNPC, Beijing 100096, China; 4. Geology Research Institute, CNPC Greatwall Drilling Company, Liaoning, Shenyang 124010, China]

Abstract: The provenance of black shales is primarily investigated using elemental geochemistry and mineralogy. Specifically, elemental geochemical approaches are employed to analyze the process of sediment transport and deposition, as well as ascertain the nature of parent rocks and tectonic setting through the analysis of major and trace elements, and rare earth elements (REEs). Mineralogical techniques, on the other hand, serve to identify the locations of provenance areas and pathways of sediment transport by examining variations in mineral composition. The main limitation of this methodology is that it can only determine potential provenance areas, leaving their specific locations and extents, as well as sediment transport pathways unclear. This study focuses on the provenance of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations in the southern Sichuan Basin. The results indicate that the active elements and compounds in the shales include Si, Al, Ca, Fe, Ba, Ta, Th, and Zr and that the inactive elements and compounds encompass Ti, P, Na, Mn, Yb, Lu, and Tm. The parent rocks exhibit low compositional maturity overall, having

收稿日期:2024-06-25;修回日期:2024-11-14。

第一作者简介:祁灵(1990—),女,硕士、高级工程师,非常规油气地质。E-mail: qiling69@petrochina.com.cn。

通信作者简介:施振生(1976—),男,博士、高级工程师,细粒储层地质学。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技管理部基础前瞻项目(2021DJ1901)。

undergone low to moderate degrees of chemical weathering and transformation under warm and humid climatic conditions. In contrast, sedimentary sorting and recycling produce minimal impacts on variations in the elemental characteristics of the parent rocks. The parent rocks consist mainly of felsic igneous rocks, with tectonic setting dominated by a collision environment, followed by a rift environment locally. The sediment originates primarily from the Qianzhong-Xuefeng paleo-uplift, succeeded by the Leshan-Longnsvi paleo-uplift. Specifically, the sediment in well block Y203, the Changning and Luzhou areas, and the northeastern part of the southern Sichuan Basin is derived principally from the Qianzhong-Xuefeng paleo-uplift, while that near well W207 in the Weiyuan area originate primarily from the Leshan-Longnsvi paleo-uplift. Provenance analysis reveals multiple factors influencing the contents of major and trace elements, and mineral components in the sediment. Therefore, to accurately determine the provenance areas of shales and their distribution, it is necessary to integrate the stable isotope analysis, high-resolution geochemical techniques, multi-index, multidisciplinary study, and big data analytics.

Key words: provenance, elemental geochemistry, black shale, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin

引用格式:祁灵,施振生,王红岩,等. 黑色页岩物源研究方法、存在问题及未来展望——以川南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 62-77. DOI: 10. 11743/ogg20250105.

QI Ling, SHI Zhensheng, WANG Hongyan, et al. Methodology for research on the provenance of black shales and its problems and prospects: A case study of the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46 (1): 62-77. DOI: 10. 11743/ogg20250105.

黑色页岩是指颗粒粒径一般小于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的沉积物和沉积岩^[1]。由于黑色页岩具有总有机碳含量(TOC)高(多介于0.51%~25.73%,平均值2.90%)、沉积范围大(1万至几万 km^2)等特点,页岩中常油气富集^[2]。中国石油第四次资源评价结果显示,中国陆上页岩气地质资源量 $80.45 \times 10^{12}\ \text{m}^3$,海相页岩气可采资源量为 $8.82 \times 10^{12}\ \text{m}^3$,其中四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩气地质资源量约 $28.78 \times 10^{12}\ \text{m}^3$,可采资源量 $5.75 \times 10^{12}\ \text{m}^3$ ^[3-4]。截至2023年,川南地区建成中国最大页岩气生产基地,累计开钻井2481口,投产井1812口,年产量达 $152 \times 10^8\ \text{m}^3$,累计产气达 $730 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。五峰组-龙马溪组勘探目的层段集中于龙马溪组笔石带LM1—LM4,表现为高TOC、高有机质孔含量及高脆性矿物含量、高含气量等特征^[5-6]。奥陶纪—志留纪之交,是生物大灭绝期和赫南特冰川期,全球海平面大幅波动^[7]。志留纪早期,随着华夏板块扩张和华南大部分地区的隆升,华南古陆和海洋分布发生重大变化^[8]。强烈的构造和环境变化带来物源供给改变,导致该时期富有机质黑色页岩广泛分布。因此,对黑色页岩物源进行深入分析,对于揭示区域地质演化历程、指导油气勘探开发具有重要意义。

近年来,元素地球化学方法在剖析黑色页岩的物质来源和沉积环境方面发挥了重要作用。目前研究主要通过判别母岩性质和构造背景推断潜在物源区^[9-14],并未明确源区具体位置、范围及沉积碎屑搬运

路径。同时,在利用元素指标分析时存在不同元素指标适用范围不同及同一元素指标具有多解性等问题。此外,新技术、新方法的引入也需要实践来检验。本文以川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩为例,利用元素地球化学方法和矿物学方法系统地分析母岩性质、构造背景、源区位置及其搬运路径-沉积过程,同时探讨元素地球化学方法的应用效果和局限性。

1 地质概况与样品采集

川南地区位于上扬子地台西南缘,黑色页岩大面积连续分布,面积约为 $4 \times 10^4\ \text{km}^2$ 。上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组沉积时期,该地区北部发育乐山—龙女寺古隆起,南部发育黔中—雪峰古隆起。五峰组大套黑色页岩间夹多套薄层火山灰沉积层。观音桥段与下伏地层整合接触,岩性由介壳灰岩组成,富含赫南特贝动物群化石。龙马溪组与下伏观音桥段整合接触,其下部岩性主要由黑色、灰黑色薄层状页岩或块状页岩组成。其中LM1段上部岩性由灰绿色、黄绿色页岩组成,砂质含量随深度减小而增加,有时夹粉砂岩或泥质灰岩,具有TOC高、含气性好、纹层和微裂缝发育等特点,是目前页岩气勘探开发的优质页岩段。

本文研究层位为五峰组、观音桥组和龙马溪组,涉及17口钻井和8条剖面。选取其中16口井(Y103井、Y105井、Y101H3-8井、威207井、威231井、自205井、

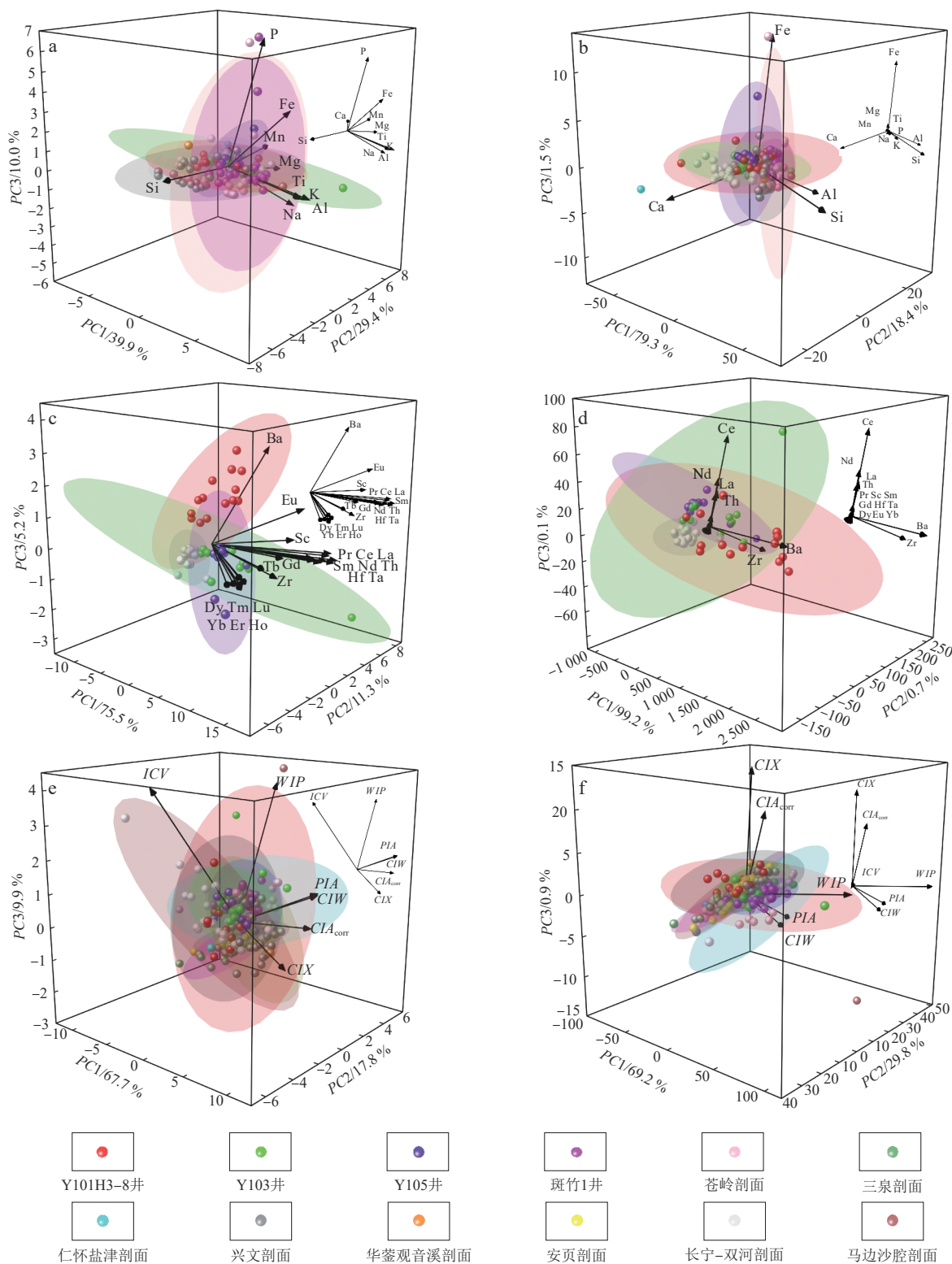


图2 四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩主量元素(a,b)、微量元素(c,d)及风化参数主成分分析(e,f)

Fig. 2 Principal component analysis (PCA) of major elements (a,b), trace elements (c,d), and weathering parameters (e,f) of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

(a, c and e为相关系数矩阵; b, d and f为协方差矩阵; PC1、PC2和PC3为三个主成分, 每个主成分后的百分比为其占页岩总成分的方差数; WIP为帕克风化指数; CIA为化学蚀变指数; CIA_{corr} 为未发生钾交代作用的泥质岩的CIA值; CIW为化学风化指数; PIA为斜长石蚀变指数; ICV为成分变异指数; CIX为修正化学蚀变指数; 斑竹1井、苍岭剖面、马边沙腔剖面、华蓥观音溪剖面、仁怀盐津剖面、安页剖面、三泉剖面和部分长宁双河剖面数据源自文献[15-19].)

Ba, Ta, Th 和 Zr, 不活动性元素主要为 Ti, P, Na, Mn, Yb, Lu 和 Tm。

2.2 风化作用及古气候条件

沉积物在搬运过程中会遭受各种物理、化学作用,尤其是化学风化作用。较常用的化学风化指标有帕克风化指数(WIP)、化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)、斜长石蚀变指数(PIA)、成分变异指数(ICV)和修正化学蚀变指数(CIX或 CIA_{corr})等(表1)。各化学风化指标适用条件有所差异,受物源岩性、沉积分选、沉积再循环、沉积区进一步风化作用和环境因素差异等不同因素控制,厘清化学风化指标的受控因素是正确评价化学风化强度的必要前提。利用化学风化指标评价源区化学风化情况时,为了避免使用单一化学风化指标导致的评价结果失真,引入了多个指标共同指示源区化学风化情况。

主成分分析相关系数矩阵图和协方差矩阵图显示,WIP贡献最为显著,ICV和CIX贡献最弱,CIA, CIA_{corr} ,PIA和CIW具有相似特征(图2e,f)。

WIP通过计算碱金属和碱土金属元素等活性组分在风化产物中所占的比例来评价硅酸盐岩的风化强度。计算过程中,不需要假定不活动性元素含量,适用于母岩化学组成均匀的基性、中性和酸性岩浆岩风化。WIP值随风化程度增强而变小,但对于风化程度高的岩石不灵敏,因为碱金属和碱土金属元素在强风化情况下所剩无几^[26-27]。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩WIP除马边沙腔剖面样品值为105.87之外,其余的分布范围为9.75~76.71,平均值为35.78。

ICV为风化过程容易迁移的元素含量之和与不易迁移的铝元素含量的比值。随着风化的不断进行,长石遭受风化逐渐转化为黏土矿物,ICV值也随之逐渐

降低,硅酸盐矿物具有比黏土矿物更高的ICV值,因此,ICV值可以表征矿物成分的成熟度。一般认为,若 $ICV>1$,表明细碎屑岩含很少黏土矿物,成分成熟度较低;若 $ICV\leq 1$,则表明细碎屑岩含较多黏土矿物成分,指示强烈的化学风化作用^[28]。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩ICV值在0.51~8.07,平均值为1.36,其中来自剖面的部分样品数据小于1,来自井的样品数据全部大于1,表明整体上源岩成分成熟度偏低。

CIX为含碎屑或自生方解石的沉积岩的风化程度,排除CaO的影响。CIX值随风化程度增强而增大。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩CIX分布范围为59.1~78.01,平均值为71.80。

CIA为无量纲数据,一般在50~100,用来定量表征硅酸盐矿物的风化度^[22]:

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

式中的氧化物分子式代表氧化物含量;CaO*仅为硅酸盐矿物中的CaO含量,不包括磷酸盐和碳酸盐矿物中的CaO^[22]。细粒沉积物在成岩过程中发生的钾交代作用会对源岩成分产生影响。因此,需要对CIA值进行钾交代作用校正,以获得源岩真实的风化程度,校正钾交代作用时参考Panahi(2000)^[29]提出的公式计算 CIA_{corr} 。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩风化参数 CIA_{corr} 与CIA值基本一致,分布范围均介于47.33~78.01,平均值为66.99,说明样品未受钾交代作用影响。CIA值可用A-CN-K三端元图来表示(图3a),3个端元分别为Al₂O₃含量(A),CaO*+Na₂O含量(CN)和K₂O含量(K)。若原始组分已知,则CIA值可通过样品距离CN-K边界的高度来确定。可以推断沉积物在搬运的过程中受化学风化作用的影响小,且物源区与沉积区具有类似的气候背景。随着研究的不断深入,人们发现CIA值对于古气候也有相应的指示^[34-35]。

表1 化学风化指标计算公式

Table 1 Chemical weathering indices and their calculation formula

风化指标	计算公式	参考文献
帕克风化指数(WIP)	$(2Na_2O/0.35 + MgO/0.9 + 2K_2O/0.25 + CaO^*/0.7) \times 100$	Parker(1970) ^[27]
化学蚀变指数(CIA)	$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$	Nesbitt和Young(1982) ^[22]
未发生钾交代作用的泥质岩CIA值(CIA_{corr})	$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O_{corr}) \times 100$ $K_2O_{corr} = [m \cdot Al_2O_3 + m \cdot (CaO^* + Na_2O)] / (1 - m)$, $m = K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$	Panahi(2000) ^[29]
化学风化指数(CIW)	$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100$	Harnois(1988) ^[30]
斜长石蚀变指数(PIA)	$(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O) \times 100$	Fedo等(1995) ^[31]
成分变异指数(ICV)	$(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$	Cox等(1995) ^[28]
修正化学蚀变指数(CIX)	$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O) \times 100$	Garzanti等(2014) ^[32]

注:CaO*为硅酸盐矿物中的CaO含量;氧化物分子式代表氧化物含量。

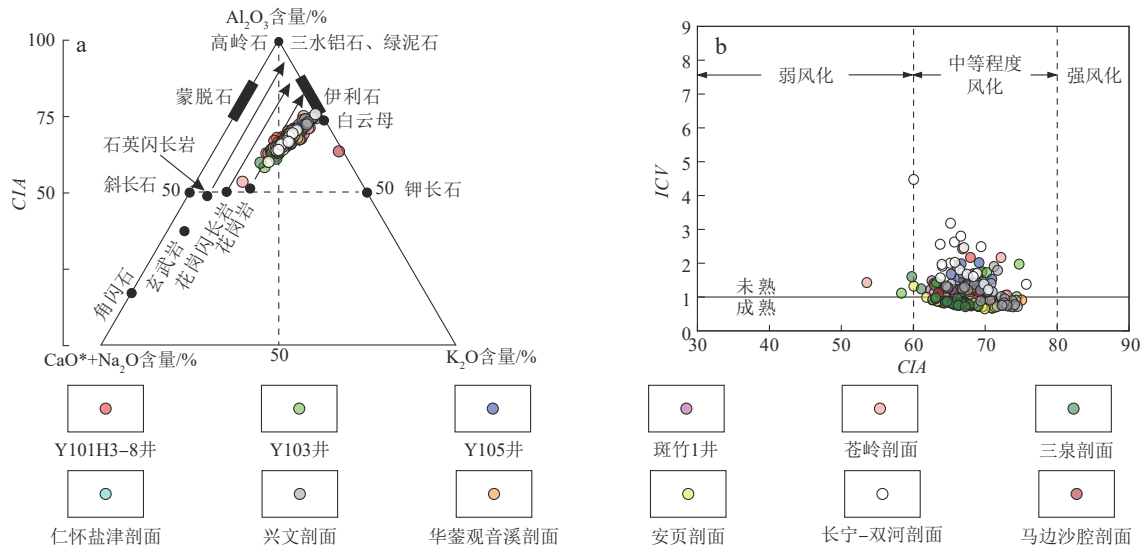


图3 四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩风化作用判别

Fig. 3 Discriminant diagrams for the weathering process of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

a. A-CN-K 三端元图(据文献[33]); b. IGV-CIA 关系图(据文献[32])

(CIA 为化学蚀变指数; IGV 为成分变异指数; CaO^* 为硅酸盐矿物中的 CaO 含量。)

CIA 值介于 50 ~ 60, 反映弱化学风化作用和寒冷干燥的气候条件, CIA 值介于 60 ~ 80, 反映中等程度的化学风化作用和温暖湿润的气候条件, CIA 值介于 80 ~ 100, 反映强化学风化作用和炎热潮湿的热带亚热带气候条件。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩 CIA 值分布在 50 ~ 80, 总体处于弱-中等强度的化学风化和温暖湿润的气候条件(图 3b)。

2.3 分选作用

风化物质通常会在牵引流(如河流、等深流)和重力流(如泥石流、浊流)的作用下发生搬运和迁移。搬运过程中主要发生物理(水动力分选)和化学(沉积分选)分异作用,从而改变沉积物的结构成熟度和成分成熟度。

水动力分选可造成某些重矿物(如锆石、榍石、独居石和磷灰石)的富集并导致元素迁移^[36-37]。某些元素可以被用来识别沉积物搬运过程中的重矿物聚集^[38-41]。例如, Zr 和 Hf 元素较多集中在较粗的沉积物中, 因为其中的锆石颗粒含量较高。同样, 稀土元素(REE)和 Th 元素的丰度可能取决于独居石、磷灰石、锆石或钛矿的堆积, 而 Co 和 Sc 元素含量则取决于某些铁钛氧化物和氧化镁矿物的堆积^[42]。如图 4 所示, La/Sm 与 Th(图 4b), Tb/Yb 与 Hf(图 4c)及 Ta/La 与 Ti(图 4d)之间的相关性非常弱(这里的元素符号代表元素含量), 说明重矿物富集对四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩的元素地球化学特征

没有显著影响, 即沉积分选作用对沉积物的成分无影响。

沉积分选产生了化学成分互补的页岩和砂岩。石英和锆石在沉积物粗粒部分的优先富集导致了 SiO_2 和 Al_2O_3 之间的强烈分馏, 以及 Zr 和 TiO_2 之间的分异。因此, 页岩的化学成分通常具有较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 和 TiO_2/Zr 比率, 而砂岩则具有相反的特征^[38]。砂岩的成分变化取决于其源岩的成熟度和分选过程的强度。这一结果可用于评估川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩成分, 在 Al-Ti-Zr 元素含量三端元图上样品基本落在图中间, 分布较为集中, 少数样品向顶点 Zr 偏移, 说明样品整体上未受到沉积分选作用的影响(图 4a)。

2.4 再循环作用

沉积再循环通常会造造成重矿物富集, 从而导致某些元素富集。McLennan 等(1993)^[21]提出可以使用 Th/Sc-Zr/Sc 元素含量比值二元图解评价沉积物的物源成分变化以及沉积再循环的影响(图 5)。锆石是 Zr 元素的主要赋存矿物, 且矿物的稳定性很强, 会随着沉积再循环作用而富集于沉积物中。Th 元素通常在酸性岩中赋存, 而 Sc 常赋存于基性岩石中, 故 Th/Sc 比值在沉积再循环作用下较少发生改变, 因而常被用做不同火成岩成分的分异程度指标^[21], 而 Zr/Sc 比值由于沉积再循环作用过程中锆石的富集而升高, 且不受后期热液稀释等作用影响, 因而是锆石富集的良好

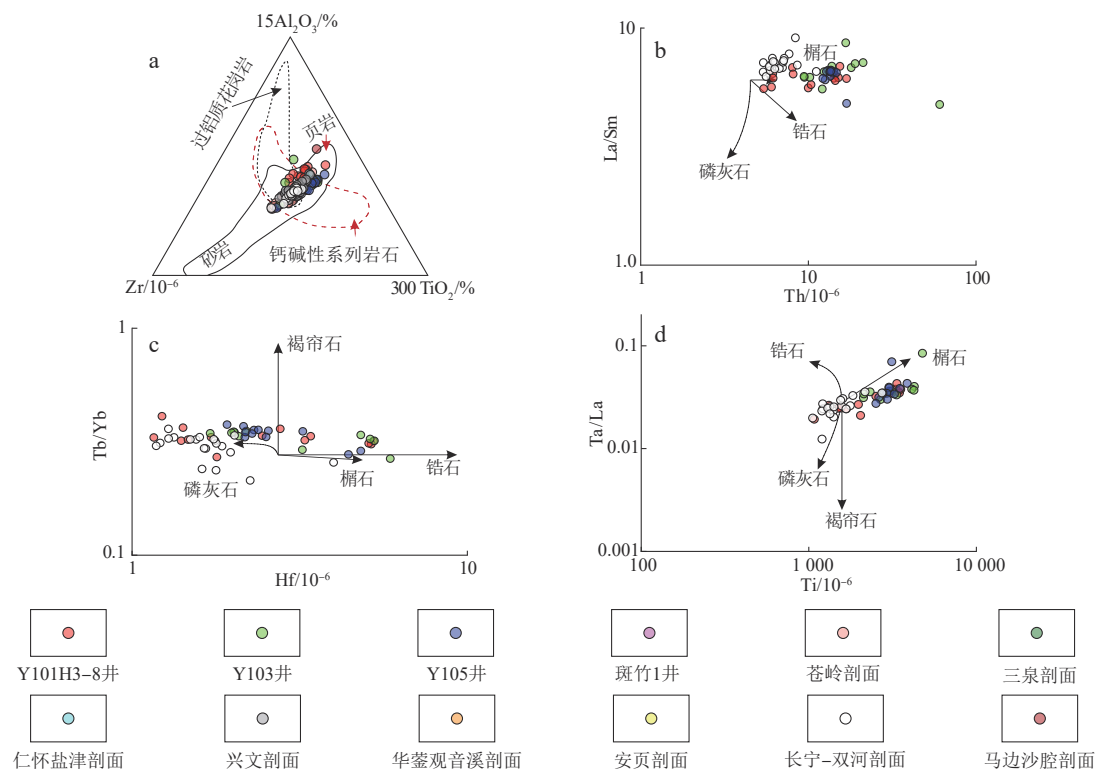


图4 四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩微量元素分选作用判别

Fig. 4 Discriminant diagrams for the sorting of trace elements in black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

a. Al-Ti-Zr 三端元图 (据文献[38]); b. La/Sm-Th; c. Tb/Yb-Hf; d. Ta/La-Ti 相关图 (据文献[39])

(元素符号代表元素含量; 氧化物分子式代表氧化物含量。)

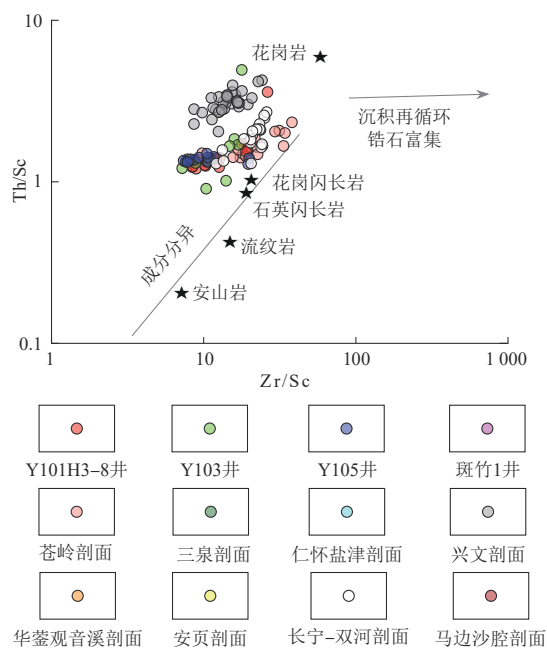


图5 四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩再循环作用判别 (据文献[21])

Fig. 5 Th/Sc-Zr/Sc discriminant diagram for the recycling of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin (after reference [21])

(元素符号代表元素含量。)

指标。因此, Th/Sc-Zr/Sc 关系图常被用来评估沉积再循环作用。当沉积物 Th/Sc 和 Zr/Sc 比值变化与“成分分异趋势”线近平行时, 重矿物分选作用影响最小; 当沉积物 Th/Sc 比值无明显变化, 同时 Zr/Sc 比值明显增大时, 重矿物分选作用影响显著 (图 5)。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩样品中点分布较集中, Zr/Sc 和 Th/Sc 比值分别介于 4.33 ~ 38.04 和 0.91 ~ 4.93, 主要落在成分分异趋势线上, 说明未明显受到沉积再循环作用的影响。

3 母岩性质

母岩的风化产物构成了沉积物的主要物质来源^[43]。由于源岩岩性的差异导致风化产物的差异, 不同岩性可以反映出母岩的特征及其风化和侵蚀程度^[44]。样品中主量、微量及稀土元素的种类和相对含量, 提供了源区岩石类型 (如火成岩、变质岩或沉积岩) 的重要信息。稀土元素由于与主量、微量元素之间的弱相关性使其在经历风化、分选和再循环过程后保持相对稳定, 因此可以用来确定沉积岩的来源。酸性岩石形成的沉积物或沉积岩通常含有高浓度的稀土元素并且有明显的负 Eu 异

常,而基性岩石形成的沉积物和沉积岩稀土元素含量较低且通常无显著的Eu异常或表现为正Eu异常。

川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩样品表现出中等偏高的稀土元素浓度($52.10 \times 10^{-6} \sim 353.07 \times 10^{-6}$; 平均值 129.41×10^{-6})和负Eu异常,表明沉积物的来源可能与酸性火成岩有关(图6)。沉积岩的富轻稀土元素(LREE)而贫重稀土元素(HREE)支持了这一结论。A-CN-K图显示,样品的源岩很可能是中性和酸性火成岩(图3a)。同样,La/Th-Hf关系显示,大多数样品位于或靠近长英质源区域(图7a)。基于 Al_2O_3 、 TiO_2 和Zr含量判别区分出3个属性区域:长英质、基性和中性火成岩。页岩样品的分布显示,沉积物主要来源于长英质火成岩(图7b,c)。

4 源区构造背景

源区构造背景不仅决定源岩的类型与分布,还影响沉积物的搬运、沉积及成岩过程。不同的构造背景会影响沉积盆地的形成与演化,进而影响物源区的性质和沉积物的组成。因此,深入理解构造背景对于揭示沉积岩的形成、演化及其地球化学特征具有重要意义^[45-47]。目前,许多研究记录了一些基于主量、微量元素浓度的判别函数图,用以解析未知沉积盆地的构造环境^[47-52]。Bhatia (1983)^[47]和 Korsch (1986)^[48-49]等人提出的以主量元素浓度为特征的构造环境判别图已被广泛用于解释沉积物所属的板块构造环境。然而,从图8a—d中无法明确区分源岩构造背景是大陆岛弧、

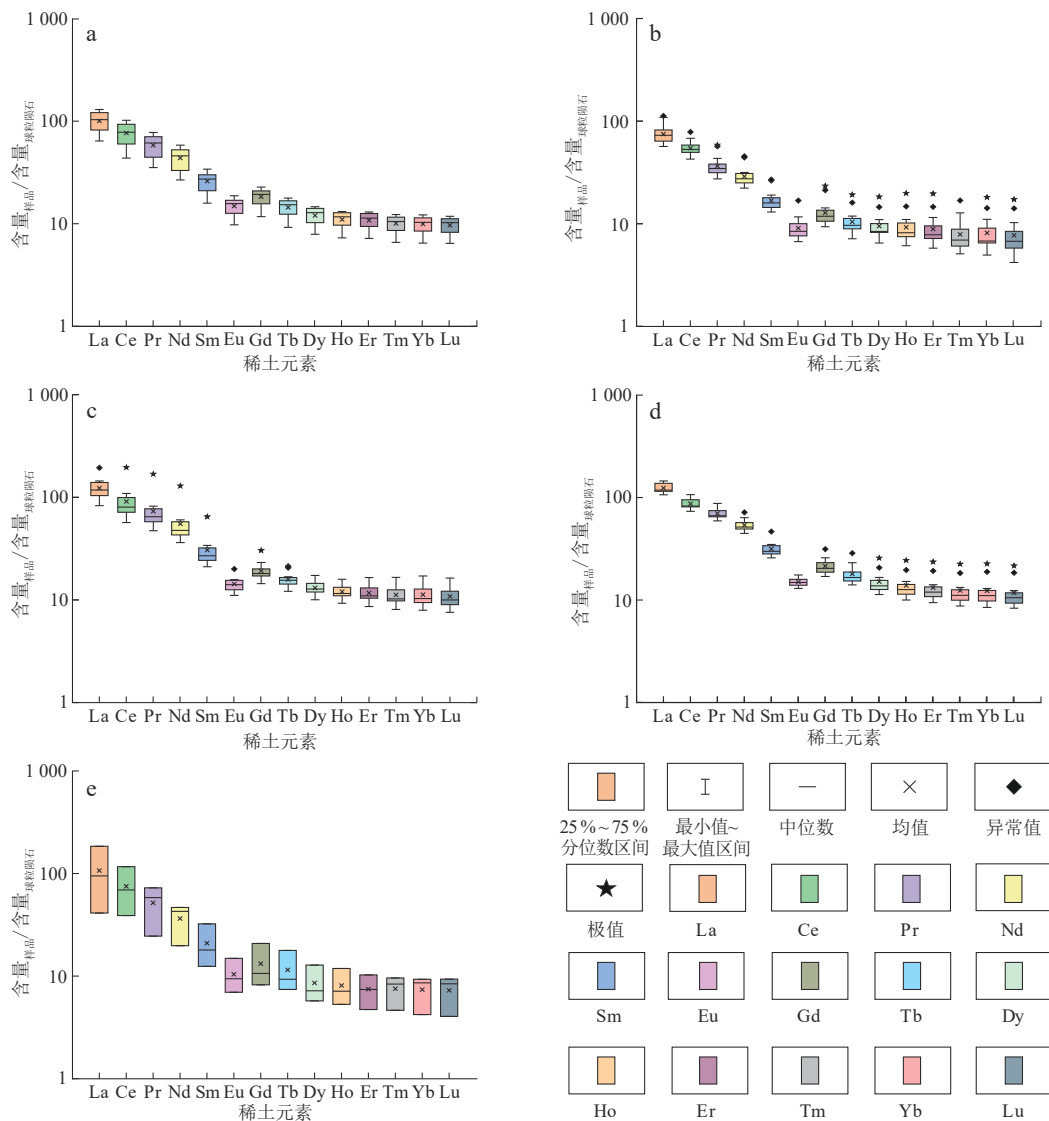


图6 四川盆地南部五峰组-龙马溪组黑色页岩的球粒陨石稀土元素标准化模式箱形图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

a. Y101H3-8井; b. 长宁-双河剖面; c. Y103井; d. Y105井; e. 其他剖面数据

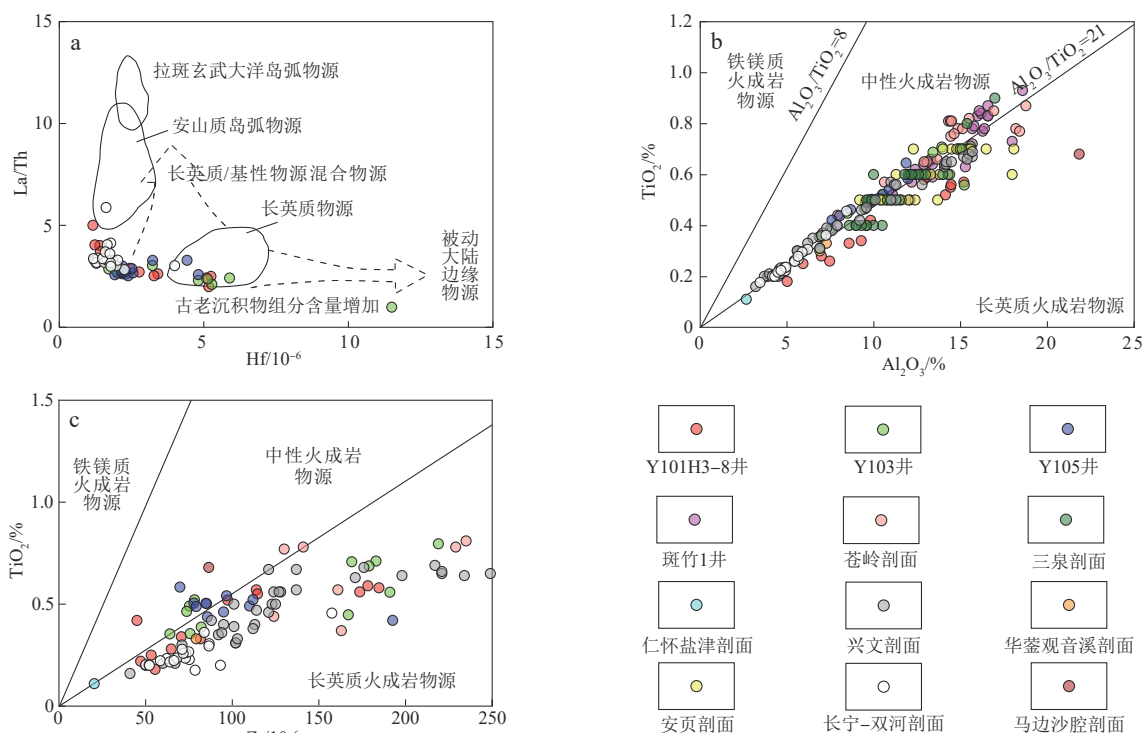


图7 川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩母岩性质判别

Fig. 7 Discriminant diagrams for the source composition of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

a. La/Th-Hf相关图(据文献[53]); b. TiO_2 - Al_2O_3 相关图; c. TiO_2 -Zr相关图(据文献[54])

(元素符号代表元素含量;氧化物分子式代表氧化物含量。)

海洋岛弧、活动大陆边缘还是被动大陆边缘。然而, Verma(2005)^[55]等人评估认为以上构造判别图识别沉积物构造背景的成功率较低,因此提出两个基于主量元素比值的新的构造判别图。训练和测试集样本显示,基于这些图开展评价的成功率较高^[50]。新的判别图将源区分为高硅型[(SiO_2)_{adj} = 63% ~ 95%]和低硅型[(SiO_2)_{adj} = 35% ~ 63%],在3种构造环境之间进行区分,即岛弧(活跃火山作用)、大陆裂谷(扩张作用)和大陆碰撞(挤压作用)。利用判别图8e,f识别出大部分页岩样品来源于碰撞环境,少数页岩来源于裂谷环境。

5 源区位置及搬运路径

源区位置及搬运路径分析可通过地层厚度、主要矿物成分(如石英、黏土矿物、碳酸盐矿物)含量综合确定。地层厚度与该地区沉积可容空间、沉积速率和古环境等有关,通过区域地层分布范围及厚度变化来反映该地层沉积时的大地构造背景。川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩矿物成分主要为石英(平均含量37.7%)、黏土矿物(平均含量34.8%)和碳酸盐矿物(平均含量13.6%),次要矿物成分为长石(平均含量8.8%)和黄铁矿(平均含量5.1%)^[56]。页岩地层中的

石英与Si关系密切,黏土矿物组分主要包括蒙脱石和高岭石等,与Al元素相关,碳酸盐矿物中方解石和白云石与Ca元素密切相关^[57],因此利用岩石矿物组分进行源区位置和搬运路径分析具有良好可操作性。

根据16口井的钻井数据,绘出川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1的地层厚度图(图9a)。整体上LM1地层厚度分布在0.16 ~ 14.00 m,平均值为2.50 m,可划分为5个沉积单元:①沉积厚度受乐山龙女寺古隆起控制,沉积中心位于川南地区的东北部,向西北和东南两侧逐渐减薄。以王家1井一座3井一太和1井地区为例,王家1井位于南部斜坡高位,自西北向东南,地层厚度先增加后降低,3口井LM1厚度分别为0.20、14.00和2.50 m。②宜203井—宁219井附近LM1地层厚度大于2.00 m,处于地层厚度中心。③泸州地区LM1层厚度自南向北先增厚再减薄,Y101井区LM1层厚度普遍厚于泸211井(1.50 m)和黄203井(1.40 m)。④长宁地区YS128井LM1厚度2.35 m,处于地层厚度中心。⑤长宁地区Y103井和Y105井LM1厚度大于2.00 m(分别为4.52 m和5.48 m),处于地层厚度中心。

研究区石英主要为生物成因,其含量可以反映沉积时期的古水深^[56]。高石英含量指示沉积时期水体

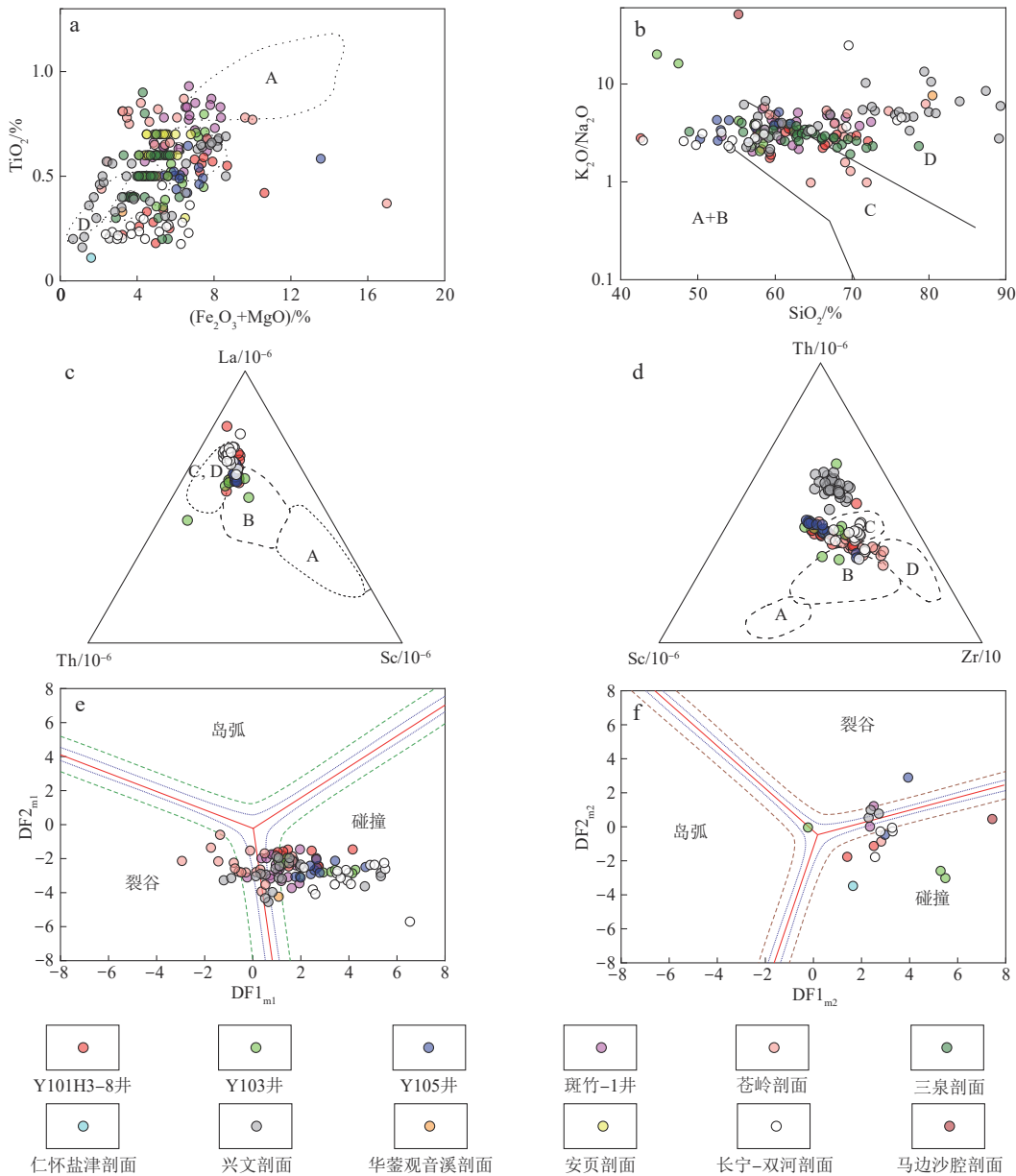


图8 川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩构造背景判别

Fig. 8 Discriminant diagrams for the tectonic setting of black shales in the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin

a. TiO_2 -($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)相关图(据文献[47]); b. $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ -Th相关图; c. La-Th-Sc三端元图; d. Th-Sc-Zr三端元图(据文献[48]); e. 不同构造背景(岛弧、裂谷与碰撞)下高硅质碎屑沉积物的判别函数与多维映射分析; f. 不同构造背景(岛弧、裂谷与碰撞)下低硅质碎屑沉积物的判别函数与多维映射分析(据文献[50])

[A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘; DF1_{m1} , DF2_{m1} -高硅质碎屑沉积物的判别函数(据文献[50]); DF1_{m2} , DF2_{m2} -低硅质碎屑沉积物的判别函数(据文献[50]); 元素符号代表元素含量; 氧化物分子式代表氧化物含量。]

较深。其富集区多属于深水洼地。根据16口钻井测井解释的石英含量数据,绘出川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1石英含量等值线图(图9b)。研究区石英含量处于33.9%~58.6%,平均值为47.6%,整体存在3大高值区。石英含量大于55%的区域分布于太和1井—黄203井—宁219井附近。石英含量在50%~55%的区域分布于Y101H3-8井—带—泸206

井—泸211井—Y203井—Y205井一带。其他地区石英含量均较低或很低,一般小于50%。

研究区黏土矿物主要为陆源黏土矿物,多分布于重力流发育区^[58],其含量可以反映沉积时期的古沉积碎屑搬运路径。根据16口钻井测井解释的黏土矿物含量,绘出川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1的黏土矿物含量等值线图(图9c)。从图中可以看出:研究

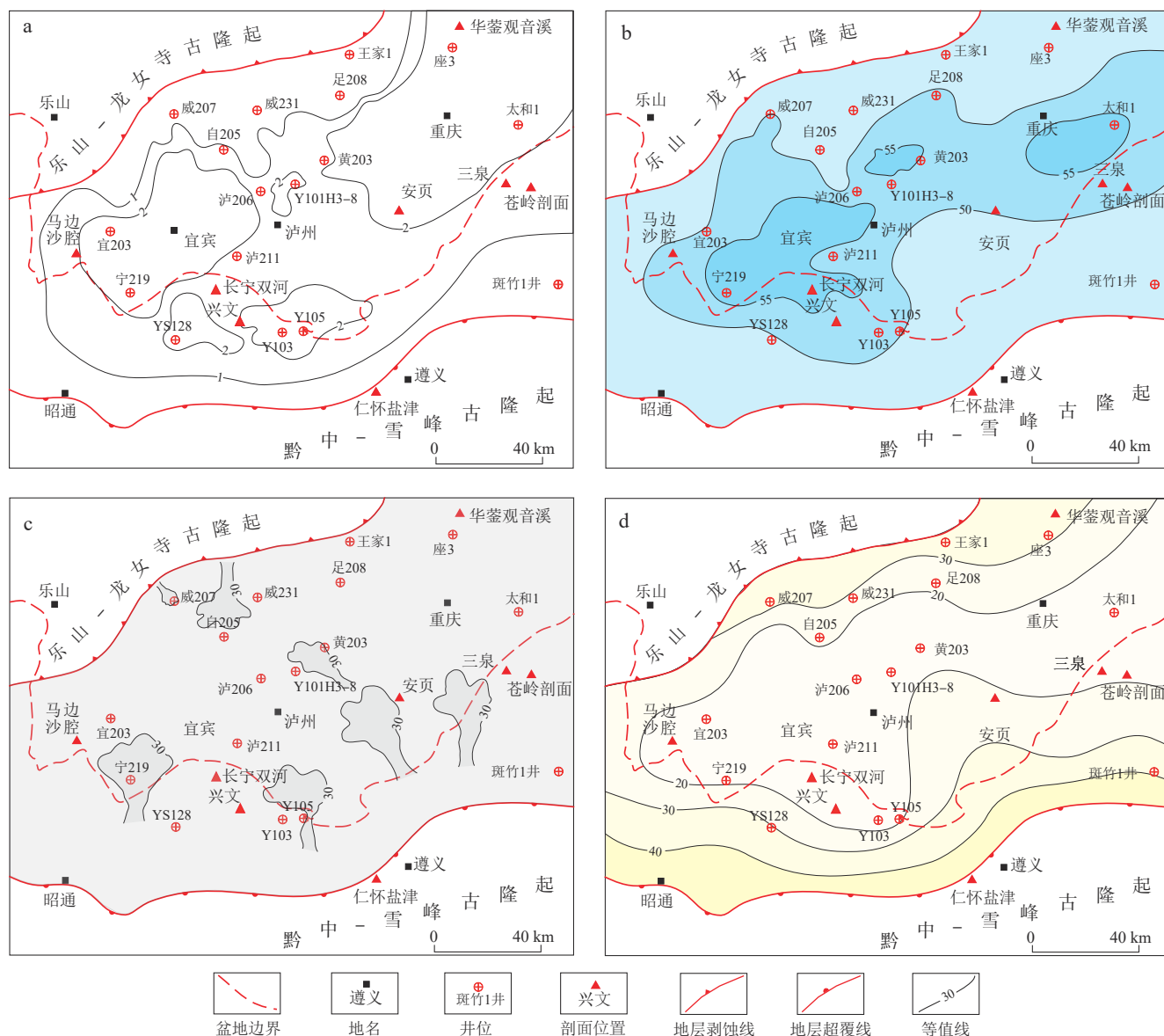


图9 川南地区五峰组-龙马溪组笔石带等值线图(据文献[58-59]修改)

Fig. 9 Contour plots of the Wufeng-Longmaxi formations, southern Sichuan Basin (modified after references [58-59])

a. LM1地层厚度(m); b. 石英含量(%); c. 黏土矿物含量(%); d. 碳酸盐矿物含量(%)

区黏土矿物含量处于20.6%~49.2%，整体较低。黏土矿物含量大于30%的区域有7个。以黏土矿物含量大于30%的区域为中心，绘出了7个黏土矿物含量高值区，这是确定川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1沉积碎屑搬运路径的重要依据，表明沉积时期在一定程度上受到陆源物质的影响。其他地区黏土矿物含量较低或很低，均小于30%，说明陆源物质影响较弱。

研究区碳酸盐矿物主要为原生成因，其含量能够反映沉积时期的古水深^[56]，远离物源区碳酸盐含量降低。根据16口井钻井测井解释的碳酸盐含量数据，绘出川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1的碳酸盐含

量等值线图(图9d)。可见，碳酸盐矿物含量介于12.7%~32.3%，平均值为22.7%。整体存在2个高值区和2个低值区。碳酸盐矿物含量大于30%的区域有2个，分布于乐山-龙女寺古隆起和黔中-雪峰古隆起边缘，碳酸盐矿物含量由东北向西南逐渐降低。碳酸盐矿物含量小于20%的区域集中在太和1井—黄203井—Y101H3-8井—泸206井—泸211井—宁219井附近，碳酸盐含量低值区呈北东-南西向分布。其他地区在该沉积时期水深在深水斜坡和深水洼地之间。

根据川南地区五峰组-龙马溪组笔石带LM1地层厚度、石英、黏土矿物、碳酸盐矿物含量综合确定该时

期沉积物源以黔中-雪峰古隆起为主,乐山-龙女寺古隆起补充。其中宜203井区、长宁地区、泸州地区以及川南东北地LM1沉积物主要来源于黔中-雪峰隆起,而威远地区威207井附近LM1沉积物主要来源于乐山-龙女寺古隆起。

6 存在问题及未来展望

6.1 存在问题

本文以川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩为例,详细解析了目前的黑色页岩物源分析方法及分析流程。目前研究仍存在以下问题:

1) 元素地球化学指标在风化作用和物源研究中常受到多种因素的干扰。这主要来源于风化过程、物源多样性、沉积环境和数据本身的相互影响,使得简单利用单一指标无法可靠地反映特定地质过程。*CIA*可能与母岩初始成分、风化强度、物源特性、粒度效应、沉积再循环以及局地气候(水文条件)等多种因素相关^[60-62]。*REE*用于物源研究时,水动力分选引起的粒度变化对稀土元素含量的影响大于岩性对其的影响,主要是由于沉积物形成时伴随的 *REE* 分馏所造成^[63-64]。*Si*、*Al*、*Na*和*K*等主量元素的含量比值可以有效区分母岩类型,但分选作用会干扰这一特征^[65-66]。*Th*和*Sc*元素含量在母岩中较为稳定,常用于构造背景判别,但区域地质背景的多样性可能影响物源判别的可靠性^[50]。此外,对母岩性质、构造背景的常用判别图版建立在经验公式和统计学方法基础之上,单一图版的表征未必准确,可能导致对结果的过度信赖^[55]。

2) 利用地层厚度、矿物成分分析源区位置及搬运路径存在一定的局限性。黑色页岩地层厚度受物源、可容空间、古环境、构造运动等多种因素控制。通常来说地层厚度大的地区就是该时期的沉积中心,但是受古海平面变化和后期构造变形影响使得沉积中心迁移,这对还原古地貌特征带来一定挑战。矿物成分常存在多种来源,可划分为陆源成因、生源成因、生物化学成因^[56]。不同成因矿物分布特征存在差异,陆源矿物组分含量及分布与距离物源远近成正相关。生源矿物组分含量及其分布与古水体深度、氧化还原条件、古生产力等相关^[56,67]。要精细确定源区搬运位置及搬运路径还需进一步厘定不同来源的矿物组分。此外,缺乏潜在源区样品数据信息可能对研究结果的准确性和可靠性产生影响。

6.2 研究展望

准确解读元素地球化学指标的复杂性,首先需要结合稳定同位素研究和多指标联合校正等方法,以减小单一指标可能带来的偏差,确保研究结果的科学性与可靠性。元素含量不仅受风化过程、物源组成和沉积环境的影响,还受到各类数据交互作用的综合作用。在这一背景下,金属稳定同位素分析技术能够帮助判断风化过程中元素的赋存状态和活动性,揭示有氧风化作用中元素的迁移过程^[68]。同时,数值模拟方法通过探讨沉积环境与风化过程的相互作用,可以构建多元素指标环境-风化-气候联合动态模型,从而揭示风化作用在时空上的分布规律^[69-70]。其次,结合人工智能,利用支持向量机(SVM)或随机森林(Random Forest)算法处理地质、气候和沉积数据,能够揭示不同因素对元素分布的复杂影响,并辅助构建更加精准的判别模式^[71-73]。通过大数据挖掘与机器学习从大量的元素地球化学数据中提取出潜在的规律,识别出各影响因素之间的关系,并在多维数据空间中有效筛选出关键变量,从而提高分析的准确性与可靠性^[74-75]。

在研究源区位置及搬运路径时,需聚焦高分辨率地球化学分析技术和多学科交叉研究。高分辨率分析技术,如激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)和纳米二次离子质谱(NanoSIMS),可以在微观尺度上进行元素分布成像分析,揭示沉积物的空间分布特征,为源区和搬运路径的研究提供重要支持,并为页岩气资源勘探提供精确的物质循环与演化信息。同时,多学科交叉研究,特别是地球物理学、地层学和古生物学的结合,将成为未来的重要发展方向。通过地震记录标定地形坡折分布,并结合古生物地层对比和沉积层厚度展布特征,可恢复古地貌^[76]并分析其对潜在物源区和沉积物搬运路径的影响。这将有助于明确沉积物有机质的来源、矿化过程及地质驱动因素^[77-79],揭示源区的复杂性及其对沉积环境的控制作用,进而优化含气页岩的识别和勘探。

7 结论

1) 借助主量元素、微量元素和稀土元素地球化学方法可以分析黑色页岩的物源。以川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩为例,沉积物搬运-沉积过程分析表明整体上源岩成分成熟度偏低,经历了低-中等程度的化学风化作用和温暖湿润的气候条件,未受到明显的分选作用和沉积再循环作用的影响。母岩性质主

要为长英质火成岩,源区主要为碰撞环境,少数为裂谷环境。

2) 黑色页岩物源矿物学分析方法主要是通过矿物成分含量的变化特征识别源区位置及其搬运路径。如,川南地区五峰组-龙马溪组笔石带 LM1 地层厚度、石英、黏土矿物、碳酸盐矿物含量综合确定该时期沉积物源以黔中-雪峰古隆起为主,乐山-龙女寺古隆起为补充。其中宜 203 井区、长宁地区、泸州地区以及川南东北地 LM1 沉积物主要来源于黔中-雪峰隆起,而威远地区威 207 井附近 LM1 沉积物主要来源于乐山-龙女寺古隆起。

3) 物源分析中沉积物主量元素、微量元素、矿物组分含量的影响因素较多,建议结合稳定同位素、高分辨率地球化学分析技术,联合多指标、多学科交叉研究和大数据分析手段,全面地剖析黑色页岩的物源特征。

致谢:中国石油西南油气田分公司岩心库提供了观察和描述岩心的机会,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 施振生, 张亚雄, 曾番惠, 等. 海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义[J]. 古地理学报, 2025, 27(1): 32-54.
SHI Zhensheng, ZHANG Yaxiong, ZENG Fanhui, et al. Main sedimentary structure types of marine fine-grained terrigenous clastic rocks and their significance for shale gas [J]. Journal of Palaeogeography, 2025, 27(1): 32-54.
- [2] 施振生, 周天琪. 海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 910-928.
SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi. Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 910-928.
- [3] 马新华, 张晓伟, 熊伟, 等. 中国页岩气发展前景及挑战[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 491-501.
MA Xinhua, ZHANG Xiaowei, XIONG Wei, et al. Prospects and challenges of shale gas development in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 491-501.
- [4] 王红岩, 周尚文, 赵群, 等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1430-1441.
WANG Hongyan, ZHOU Shangwen, ZHAO Qun, et al. Enrichment characteristics, exploration and exploitation progress, and prospects of deep shale gas in the southern Sichuan Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1430-1441.
- [5] 施振生, 周天琪, 孙莎莎, 等. 川南地区海相细粒储层研究与页岩气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2024, 1-231.
SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, SUN Shasha, et al. Research on marine fine-grained reservoirs and shale gas exploration in Southern Sichuan Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2024, 1-231.
- [6] SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, WANG Hongyan, et al. Depositional structures and their reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi shale in Southern Sichuan Basin China [J]. Energies, 2022, 15, 1618.
- [7] JOHNSON M E. Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events [J]. GFF, 2006, 128(2): 115-121.
- [8] CHEN Xu, FAN Junxuan, CHEN Qing, et al. Toward a stepwise Kwangsi Orogeny [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(3): 379-387.
- [9] DING Meng, LI Yifan, FAN Tailiang, et al. Geochemistry of the lower Silurian black shales from the upper Yangtze platform, South China: Implications for paleoclimate, provenance, and tectonic setting [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 242: 105493.
- [10] SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Mineralogy and geochemistry of the Upper Ordovician and Lower Silurian Wufeng-Longmaxi shale on the Yangtze platform, South China: Implications for provenance analysis and shale gas sweet-spot interval [J]. Minerals, 2022, 12(10): 1190.
- [11] MEN Xin, MOU Chuanlong, GE Xiangying. Changes in palaeoclimate and palaeoenvironment in the Upper Yangtze area (South China) during the Ordovician-Silurian transition [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 13186.
- [12] 牟传龙, 葛祥英, 余谦, 等. 川西南地区五峰-龙马溪组黑色页岩古气候及物源特征: 来自新地 2 井地球化学记录 [J]. 古地理学报, 2019, 21(5): 835-854.
MOU Chuanlong, GE Xiangying, YU Qian, et al. Palaeoclimatology and provenance of black shales from Wufeng-Longmaxi formations in southwestern Sichuan Province: From geochemical records of Well Xindi-2 [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(5): 835-854.
- [13] 彭浩, 陈雷, 胡云鹏, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩物源及构造环境分析 [J]. 高校地质学报, 2024, 30(2): 231-240.
PENG Hao, CHEN Lei, HU Yunpeng, et al. Provenance and tectonic setting analysis of the Wufeng-Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin and its surrounding area [J]. Geological Journal of China Universities, 2024, 30(2): 231-240.
- [14] QI Ling, WANG Hongyan, SHI Zhensheng, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the deeply buried Wufeng-Longmaxi shale in the southern Sichuan Basin, China: Implications for provenance and tectonic setting [J]. Minerals, 2023, 13(12): 1502.
- [15] LI Xinwei, LI Chao, JIANG Xiaojun, et al. High-resolution Re-Os isotope stratigraphy, and geochemical fingerprints identification of Late Ordovician-Early Silurian strata in northern Guizhou, China: Implications for LOME and environmental changes [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 243: 104497.
- [16] CHEN Chao, MU Chuanlong, ZHOU Kenken, et al. The geochemical characteristics and factors controlling the organic

- matter accumulation of the Late Ordovician-Early Silurian black shale in the Upper Yangtze Basin, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 159–175.
- [17] 刘冯斌. 四川盆地上奥陶统宝塔—临湘组地球化学特征与岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- LIU Fengbin. Geochemical characteristics and lithofacies paleogeography of the Upper Ordovician Baota-Linxiang Formation in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [18] 何龙. 四川盆地东南缘五峰组—龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
- HE Long. Organic matter enrichment and evolution of sedimentary environment of the Wufeng-Longmaxi shale in southeastern margins of the Sichuan Basin [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [19] 李艳芳. 上扬子地区晚奥陶世—早志留世页岩地球化学特征、有机质富集及古环境意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- LI Yanfang. Geochemical characteristics and organic matter accumulation of Late Ordovician-Early Silurian shale in the Upper Yangtze platform, and implications for paleoenvironment [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [20] 周锡强, 陈代钊, 刘牧, 等. 中国沉积学发展战略: 沉积地球化学研究现状与展望[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1293–1316.
- ZHOU Xiqiang, CHEN Daizhao, LIU Mu, et al. The future of sedimentology in China: A review and perspective of sedimentary geochemistry [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35 (6) : 1293–1316.
- [21] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [M]//JOHANSSON M J, BASU A. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Boulder: Geological Society of America, 1993: 21–40.
- [22] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [23] DICKINSON W R, SUCZEK C A. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164–2182.
- [24] GARZANTI E, ANDÒ S, VEZZOLI G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277 (3/4): 422–432.
- [25] GARZANTI E, PADOAN M, SETTI M, et al. Weathering geochemistry and Sr-Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 14 (2): 292–316.
- [26] ESWARAN H, STOOPS G, DE PAEPE P. A contribution to the study of soil formation on Isla Santa Cruz, Galapagos [J]. *Pedologie*, 1973, 23(2): 100–122.
- [27] PARKER A. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(6): 501–504.
- [28] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [29] PANAHI A, YOUNG G M, RAINBIRD R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199–2220.
- [30] HARNOIS L. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988(55): 319–322.
- [31] FEDO C M, WAYNE NESBITT H, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921–924.
- [32] GARZANTI E, PADOAN M, SETTI M, et al. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa)[J]. *Chemical Geology*, 2014, 366: 61–74.
- [33] TAYLOR S R, MCCLENNAN S M. *The continental crust: Its composition and evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985.
- [34] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523–1534.
- [35] YOUNG G M, WAYNE NESBITT H. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: A chemostratigraphic approach [J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111(2): 264–274.
- [36] CULLERS R L, BASU A, SUTTNER L J. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 1988, 70(4): 335–348.
- [37] MCLENNAN S M, TAYLOR S R, MCCULLOCH M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7): 2015–2050.
- [38] GARCIA D, FONTEILLES M, MOUTTE J. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr and the genesis of strongly peraluminous granites [J]. *The Journal of Geology*, 1994, 102 (4): 411–422.
- [39] FLÈCHE M R, CAMIRÉ G. Geochemistry and provenance of metasedimentary rocks from the Archean Golden Pond sequence (Casa Berardi mining district, Abitibi subprovince) [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1996, 33(5): 676–690.
- [40] LI Qiugen, LIU Shuwen, HAN Baofu, et al. Geochemistry of metasedimentary rocks of the Proterozoic Xingxingxia complex: Implications for provenance and tectonic setting of the eastern segment of the Central Tianshan Tectonic Zone, northwestern China [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2005, 42 (3) : 287–306.
- [41] LI Qiugen, LIU Shuwen, WANG Zongqi, et al. Contrasting

- provenance of Late Archean metasedimentary rocks from the Wutai Complex, North China Craton: detrital zircon U-Pb, whole-rock Sm-Nd isotopic, and geochemical data[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, 97(3): 443-458.
- [42] CRICHTON J G, CONDIE K C. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(3): 319-332.
- [43] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1994: 13-23.
- FENG Zengzhao. *Sedimentary petrology*[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 13-23.
- [44] CARACCILO L. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 209: 103226.
- [45] BHATIA M R, TAYLOR S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1/4): 115-125.
- [46] VALLONI R E, MAYNARD J B. Detrital modes of recent deep-sea sands and their relation to tectonic setting: A first approximation[J]. *Sedimentology*, 1981, 28(1): 75-83.
- [47] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- [48] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [49] ROSER B P, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- [50] VERMA S P, ARMSTRONG-ALTRIN J S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins[J]. *Chemical Geology*, 2013, 355: 117-133.
- [51] VERMA S P, DÍAZ-GONZÁLEZ L, ARMSTRONG-ALTRIN J S. Application of a new computer program for tectonic discrimination of Cambrian to Holocene clastic sediments[J]. *Earth Science Informatics*, 2016, 9(2): 151-165.
- [52] YAN Detian, CHEN Daizhao, WANG Qingchen, et al. Predominance of stratified anoxic Yangtze Sea interrupted by short-term oxygenation during the Ordo-Silurian transition[J]. *Chemical Geology*, 2012, 291: 69-78.
- [53] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [54] CHEN Weizhen, TIAN Jingchun, LIN Xiaobing, et al. Climate fluctuations during the Ordovician-Silurian transition period in South China: Implications for paleoenvironmental evolution and organic matter enrichment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 613: 111411.
- [55] ARMSTRONG-ALTRIN J S, VERMA S P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 177(1/2): 115-129.
- [56] 施振生, 周天琪, 郭伟, 等. 海相页岩定量古地理编图及深水陆棚沉积微相划分——以川南泸州地区五峰组—龙马溪组龙—1⁴小层为例[J]. *沉积学报*, 2022, 40(6): 1728-1744.
- SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, GUO Wei, et al. Quantitative paleogeographic mapping and sedimentary microfacies division in a deep-water marine shale shelf: Case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1728-1744.
- [57] 童广勤, 陈林, 李培军, 等. 基于地层元素测井的鄂西宜昌地区下寒武统水井沱组页岩储层参数评价[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(3): 553-562.
- TONG Guangqin, CHEN Lin, LI Peijun, et al. The evaluation for parameters of shale reservoir within the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the Yichang area of the western Hubei based on the stratigraphic element logging[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(3): 553-562.
- [58] 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式——以川南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 51-64.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 51-64.
- [59] 王红岩, 施振生, 周天琪, 等. 海相黑色页岩甜点类型、特征及页岩气勘探意义——以四川盆地南部五峰组—龙马溪组为例[J]. *天然气工业*, 2023, 43(10): 1-13.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, et al. Types and characteristics of sweet spots of marine black shale and significance for shale gas exploration: A case study of Wufeng-Longmaxi in southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(10): 1-13.
- [60] BOUCHEZ J, VON BLANCKENBURG F, SCHUESSLER J A. Modeling novel stable isotope ratios in the weathering zone[J]. *American Journal of Science*, 2013, 313(4): 267-308.
- [61] GUO Yulong, YANG Shouye, SU Ni, et al. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 227: 48-63.
- [62] LIU Jianbao, CHEN Jianhui, SELVARAJ K, et al. Chemical weathering over the last 1200 years recorded in the sediments of Gonghai Lake, Lvliang mountains, North China: A high-resolution proxy of past climate[J]. *Boreas*, 2014, 43(4): 914-923.
- [63] LUČIĆ M, VDOVIĆ N, BAČIĆ N, et al. Disentangling the influence of lithology and non-provenance factors on the geochemistry of rare earth elements: A study of fine-grained

- sediments from the Sava River headwaters (Slovenia, Croatia) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(11): 3704–3716.
- [64] 张学敏, 岳琼申. 地球化学方法在化学风化作用和物源判别中的应用综述[J]. *华南地质与矿产*, 2018, 34(1): 41–58. ZHANG Xuemin, YUE Qiongshen. Review of the application of element and isotopic geochemistry in chemical weathering and provenance [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(1): 41–58.
- [65] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119–139.
- [66] OHTA T. Geochemistry of Jurassic to earliest Cretaceous deposits in the Nagato Basin, SW Japan: Implication of factor analysis to sorting effects and provenance signatures [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1/4): 159–180.
- [67] 施振生, 周天琪. 海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 910–928. SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi. Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 910–928.
- [68] QI Yuhua, GONG Yingzeng, WU Fei, et al. Coupled variations in V-Fe abundances and isotope compositions in latosols: Implications for V mobilization during chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 320: 26–40.
- [69] 林承焰, 陈柄屹, 任丽华, 等. 沉积数值模拟研究现状及实例[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2756–2773. LIN Chengyan, CHEN Bingyi, REN Lihua, et al. A review of depositional numerical simulation and a case study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2756–2773.
- [70] 乔璐璐, 史经昊, 高飞, 等. 我国陆架泥质区沉积动力数值模拟研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 155–166. QIAO Lulu, SHI Jinghao, GAO Fei, et al. Numerical simulation of sediment dynamic processes for mud areas on the east china sea continental shelves: A review [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 155–166.
- [71] 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 等. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. *地球学报*, 2020, 41(2): 309–319. LI Cangbai, XIAO Keyan, LI Nan, et al. A comparative study of support vector machine, random forest and artificial neural network machine learning algorithms in geochemical anomaly information extraction [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2020, 41(2): 309–319.
- [72] 周统, 邱昆峰, 王瑀, 等. 磷灰石 Eu/Y–Ce: 基于大数据的源区类型判别新图解[J]. *岩石学报*, 2022, 38(1): 291–299. ZHOU Tong, QIU Kunfeng, WANG Yu, et al. Apatite Eu/Y–Ce discrimination diagram: A big data based approach for provenance classification [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(1): 291–299.
- [73] 王瑀, 邱昆峰, 侯照亮, 等. 石英 Ti/Ge–P: 基于机器学习的矿床类型判别新图解[J]. *岩石学报*, 2022, 38(1): 281–290. WANG Yu, QIU Kunfeng, HOU Zhaoliang, et al. Quartz Ti/Ge–P discrimination diagram: A machine learning based approach for deposit classification [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(1): 281–290.
- [74] 周永章, 张良均, 张奥多, 等. 地球科学大数据挖掘与机器学习[M]. 广州: 中山大学出版社, 2018: 44–203. ZHOU Yongzhang, ZHANG Liangjun, ZHANG Aoduo, et al. Big data mining & machine learning in geoscience [M]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 2018: 44–203.
- [75] 刘彦锋, 段太忠, 黄渊, 等. 沉积过程模拟驱动下的深度学习地质建模方法[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 226–237. LIU Yanfeng, DUAN Taizhong, HUANG Yuan, et al. Deep learning-based geological modeling driven by sedimentary process simulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 226–237.
- [76] 施振生, 袁渊, 赵群, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积期古地貌及含气页岩特征[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1969–1985. SHI Zhensheng, YUAN Yuan, ZHAO Qun, et al. Paleogeomorphology and oil-bearing shale characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1969–1985.
- [77] 王华建, 柳宇柯, 王晓梅, 等. 松辽盆地青山口组页岩有机质的源–汇过程与地质驱动因素[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(2): 306–318. WANG Huajian, LIU Yuke, WANG Xiaomei, et al. The source and sink process and its geological driving factors of shale organic matter in the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(2): 306–318.
- [78] 熊亮, 董晓霞, 魏力民, 等. 川西南井研—犍为地区筇竹寺组沉积古环境与有机质富集机制[J/OL]. *天然气地球科学*: 1–22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20240621.1342.002.html>. XIONG Liang, DONG Xiaoxia, WEI Limin, et al. Sedimentary paleoenvironment and organic matter enrichment mechanism of the Qiongzhusi Formation in Jingyan–Qianwei area, southwest Sichuan [J/OL]. *Natural Gas Geoscience*: 1–22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20240621.1342.002.html>.
- [79] 邹才能, 龚剑明, 王红岩, 等. 笔石生物演化与地层年代标定在页岩气勘探开发中的重大意义[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(1): 1–6. ZOU Caineng, GONG Jianming, WANG Hongyan, et al. Importance of graptolite evolution and biostratigraphic calibration on shale gas exploration [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(1): 1–6.