

川东地区龙潭组泥页岩地球化学特征及沉积环境

——以华蓥山剖面为例

游水凤^{1,2}, 柳汉丰², 庞新龙², 蔡婷婷², 曹涛涛³

(1. 江西应用技术职业学院自然资源部离子型稀土资源与环境重点实验室, 江西 赣州 341000; 2. 江西应用技术职业学院资源环境与珠宝学院, 江西 赣州 341000; 3. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为探讨川东地区上二叠统龙潭组泥页岩形成的沉积环境特征、主控因素和富有机质泥页岩形成模式, 以华蓥山剖面为研究对象, 开展了系统的有机岩石学、有机地球化学和元素地球化学等测试。结果表明, 研究区龙潭组泥页岩的物质来源复杂, $\text{Co/Th-La/Sc-La/Yb-}\Sigma\text{REE}$ 和 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{/TiO}_2$ 图解指示源岩主要为峨眉山高 Ti 玄武岩和中酸性火山岩; $\text{Th-Sc-Zr, Th-Co-Zr}$ 和 La-Th-Sc 图解表明龙潭组泥页岩物源区构造环境为被动大陆边缘环境。龙潭组泥页岩化学蚀变指数 CIA 平均值为 80.64, 属于中-高强度风化; Sr/Ca 值为 0.48~8.98, 平均值为 2.22, MgO/CaO 值为 0.62~52.58, 平均值为 14.36, 反映了龙潭组沉积期整体为温暖湿润的气候条件。 Sr/Ba 值为 0.37~1.86, $100\text{ MgO/Al}_2\text{O}_3$ 值为 3.27~5.45, 指示龙潭期为半咸水海陆过渡环境。 Zr/Al 平均值为 7.97×10^{-3} , 100 Mn/Fe 平均值为 0.68, 反映研究区龙潭组沉积水体较浅, 与浅水陆棚沉积背景一致。 V/(V+Ni) 值为 0.62~0.98, 平均值为 0.89, Ni/Co 值介于 0.47~13.81 之间, 平均值为 5.49, Ce_{anom} 平均值为 0.03, 综合判识龙潭组沉积水体以弱还原至还原环境为主。结合沉积环境、有机质特征及地质背景, 认为龙潭组富有机质泥页岩形成于温暖湿润的气候环境, 在强风化条件下, 高等植物死亡以后随玄武岩和中酸性火山岩风化形成的陆源碎屑进入沉积水体, 在快速沉积速率条件下高等植物迅速沉积埋藏得以有效保存, 最终形成陆相型优质泥页岩。

关键词: 龙潭组; 元素地球化学; 沉积环境; 形成模式; 川东地区

中图分类号: P6.2; P6.8.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0803-20

Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Longtan Formation shale in eastern Sichuan Basin: An example of Huayingshan section

YOU Shui-feng^{1,2}, LIU Han-feng², PANG Xin-long², CAI Ping-ting² and CAO Tao-tao³

(1. Key Laboratory of Ionic Rare Earth Resources and Environment, Ministry of Natural Resources, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Resources, Environment and Jewelry, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, China; 3. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to investigate the sedimentary environment, controlling factors and formation pattern of the shale of Longtan Formation of the Upper Permian in eastern Sichuan Basin, systematic tests of organic petrology, organic geochemistry and elemental geochemistry were conducted on the shale samples from Huayingshan profile as the

收稿日期: 2024-05-29; 接受日期: 2025-02-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472208); 湖南省自然科学基金项目(2024JJ5145); 江西省教育厅教改课题(JXJG-21-52-6); 湖南省自然资源厅科研项目(20230149DZ)

作者简介: 游水凤(1981-), 女, 副教授, 主要从事岩石矿物学研究, E-mail: 38645190@qq.com; 通讯作者: 曹涛涛(1987-), 男, 教授, 主要从事非常规油气地质与地球化学研究, E-mail: 515165359@163.com。

research object. The results indicated that the source rock of the Longtan Formation shale in the studied area is complex. Diagrams of Co/Th-La/Sc, La/Yb- Σ REE and $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ suggested that the source rocks of the Longtan Formation shales are mainly Emeishan basalt with high Ti content and intermediate acidic volcanic rocks. The trigonometric diagrams of Th-Sc-Zr, Th-Co-Zr and La-Th-Sc showed that the source rocks were mainly formed in the tectonic background of passive continental margin environment. The average chemical alteration index (CIA) of the Longtan Formation shale was 80.64, indicating moderate to high intensity weathering; the Sr/Cu values ranged from 0.48 to 8.08, with an average of 2.22, and the MgO/CaO values ranged from 0.62 to 52.58, with an average of 14.36, reflecting warm and humid climate condition during the sedimentation period of the Longtan Formation overall. The Sr/Ba values ranged from 0.37 to 1.86 and 100 MgO/ Al_2O_3 values ranged from 3.27 to 5.45, indicating a semi-saline transitional sedimentary environment. The mean value of Zr/Al was 7.97×10^{-3} and that of 100 Mn/Fe was 0.68, indicating that the sedimentary water in the Longtan period of the Huayingshan area was relatively shallow and was also consistent with the geological background of shallow continental shelf reported by previous studies. The V/(V+Ni) values ranged from 0.62 to 0.98, averaged 0.89, Ni/Co values ranged from 0.47 to 13.81, averaged 5.49, and Ce_{anom} values had averaged value of 0.03, suggesting that the sedimentary water of the Longtan Formation was mainly in a weakly reductive to reductive environment. In terms of sedimentary environment, organic matter characteristics and geological background, it could be inferred that the organic-rich shale of the Longtan Formation was formed in a warm and humid climate environment. In the background of strong weathering, after the death, the higher plants entered the water body accompanied with the numerous input of terrestrial debris formed by basalt and intermediate acidic volcanic rocks, and high plants rapidly deposited, buried, and effectively preserved under the background of the condition of rapid deposition, and finally that high-quantity source rock with inclined kerogen type was formed.

Key words: Longtan Formation; elemental geochemistry; sedimentary environment; sedimentary model; eastern Sichuan

Fund support: National Natural Science Foundation of China(42472208); Natural Science Foundation of Hunan Province(2024J5145); Education Reform Project of Jiangxi Provincial Department of Education(JXJG-21-52-6); Research Project of Hunan Provincial Department of Natural Resources (20230149DZ)

二叠系龙潭组是中国扬子地区一套海陆过渡环境下形成的优质烃源岩层系,也是中国南方古生界页岩气勘探的重要目标层系之一(曹涛涛等, 2023)。在四川盆地已经发现 200 多个天然气田或含气构造,多数气田的气源岩为龙潭组泥页岩(陈建平等, 2018)。近年来,随着海相五峰-龙马溪组页岩气的商业开采,海陆过渡相页岩气成为近年来勘探开发的关注点(董大忠等, 2021),特别是四川盆地二叠系龙潭组成为近年来海陆过渡相页岩气勘探的热点(翟常博等, 2021)。不少学者对川东地区龙潭组泥页岩的沉积特征、有机质富集、储层特征和含气性等开展了大量的研究工作,表明富有机质泥页岩连续厚度大、TOC 含量高、热演化程度适中、储集空间良好,具备页岩气形成的良好物质基础和富集成藏的地质条件(冯动军, 2023; 杨雨等, 2023; 杨跃明等, 2023)。初步估计四川盆地龙潭

组页岩气资源量为 $4.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,且已实施勘探的钻井含气量测试表明龙潭组泥页岩具有较高的含气量(赵培荣等, 2020; 何治亮等, 2021)。然而,不同于五峰-龙马溪组泥页岩,龙潭组页岩气含量在纵向上变化快,非均质性强,在横向上也存在显著差异性,这与龙潭组有机质组成及含量、岩相组合和沉积环境的变化密切相关,这些复杂的变化对龙潭组页岩气的有效勘探提出了挑战。

研究龙潭组泥页岩的物源及构造环境、形成时的古气候、古氧化-还原条件以及沉积过程和陆表风化与古气候的关系等,有助于还原四川盆地晚二叠世的古地理格局并阐释优质泥页岩的成因机制(曹清古等, 2013)。前人研究表明四川盆地及周缘地区龙潭组沉积期以温湿气候、弱还原环境为主,有利于有机质的聚集保存(周泽等, 2020)。也有研究表明龙潭组泥页岩中有机质组成以陆源高等植物为

主,但不同岩相中有机质的组成存在一定的差异(魏志福等, 2015),反映沉积微相的变化导致龙潭组有机质来源存在一定的差异。此外,四川盆地龙潭组泥页岩的物质来源研究也存在分歧。He 等(2007)对龙潭组底部的泥页岩开展研究,认为峨眉山大火山岩省的长英质岩石是主要的物质来源,刘天甲(2023)则认为龙潭组泥页岩的源岩主要是峨眉山玄武岩和长英质岩石。由于四川盆地龙潭组沉积环境复杂多变、岩性组合变化大,沉积特征和物质来源等比较复杂,泥页岩发育的沉积环境和物质来源及其对龙潭组有机质富集和油气资源形成的制约作用仍不十分清楚。因此,对龙潭组泥页岩开展全岩地球化学研究,有助于判断龙潭组的物源,恢复其沉积环境,还有助于理解龙潭组泥页岩的成因和形成模式。

基于上述问题,本文开展有机地球化学、有机岩石学和元素地球化学等测试,阐述了龙潭组泥页岩的物源属性、沉积构造背景以及风化强度、古气候古

环境特征等,探讨富有机质泥页岩形成模式,这对于深化上扬子地区二叠系龙潭组古地理格局的认识有重要意义,也为该地层能源资源的发现提供了重要的参考资料。

1 区域地质背景

中二叠世晚期,东吴运动导致扬子准台地中二叠世海盆沉积并继而抬升成陆,形成南西高、北东低的古地理格局(刘光祥等, 2015)。四川盆地中上二叠统呈假整合接触,上二叠统底部发育含煤地层。晚二叠世龙潭期四川盆地沉积相带由西南往东北向依次为河流三角洲—滨岸沼泽—湖沼—浅水陆棚—深水陆棚(图1),呈现明显的由陆至海的变化特征。研究地区位于华蓥市与邻水县之间,是川中平缓褶皱带与川东高陡褶皱带的自然分界线,构造上总体表现为一个南高北低的大单斜,向东受控于华蓥山大断裂,向西临近龙女寺构造,南面毗邻合川

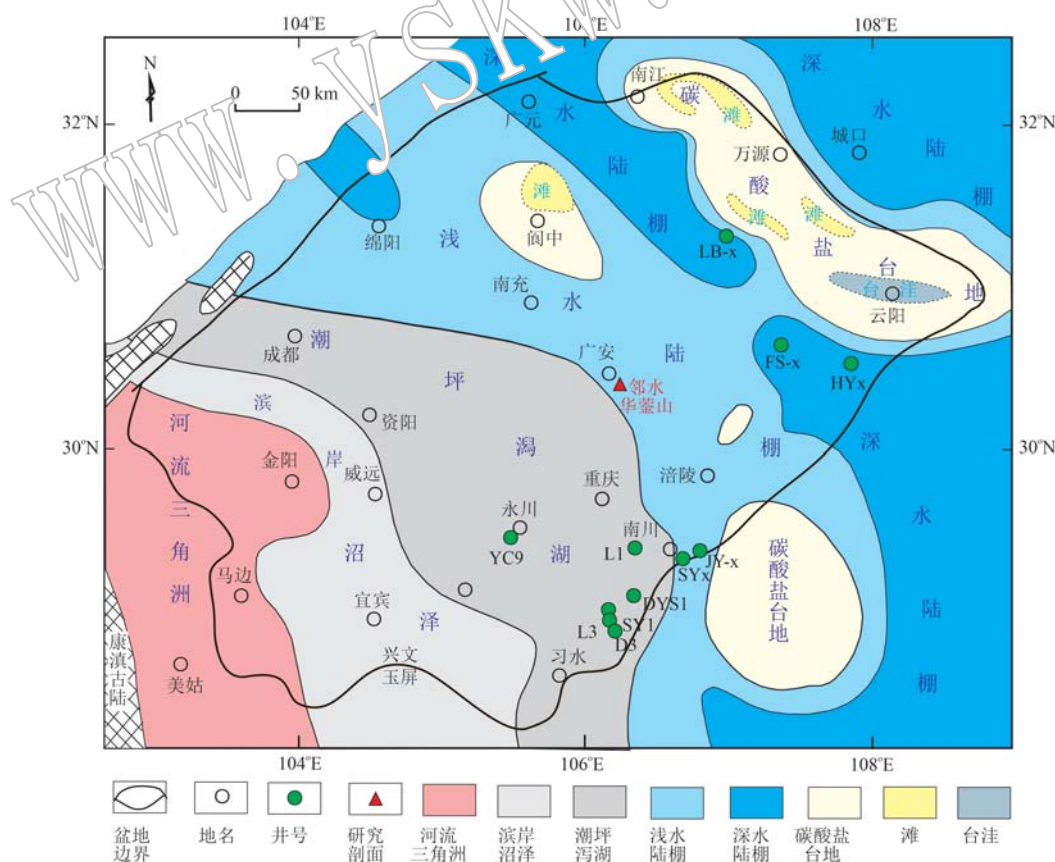


图1 四川盆地龙潭组沉积相展布特征[据曹涛涛等(2020)修改]

Fig. 1 Sedimentary facies distribution characteristics of Longtan Formation in Sichuan Basin (modified from Cao Taotao *et al.*, 2020)

构造,北部与营山构造相邻(李朋武, 2019)。研究区经历了多期复杂构造运动。晚古生代,华蓥山断裂以张性活动为主,二叠纪时期,玄武质岩浆沿华蓥山深度断裂的 NE-SW 趋势喷溢而出,溢流在华蓥山背部的核心地区,晚三叠世至白垩纪时期,江南雪峰隆起导致华蓥山断裂整体向西逆冲推覆(刘开鸾等, 2020)。在沉积演化过程中,由于喜马拉雅造山运动

的区域隆升和侵蚀,缺失了白垩纪至早更新世地层,发育有寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系和三叠系,二叠系—三叠系为主要出露地层。上二叠统龙潭组发育一套富有机质碎屑岩组合(图 2),泥页岩有机质丰度高,处于高演化阶段,有利于页岩气的生成和赋存,是川东地区页岩气勘探的重要目的层位之一。

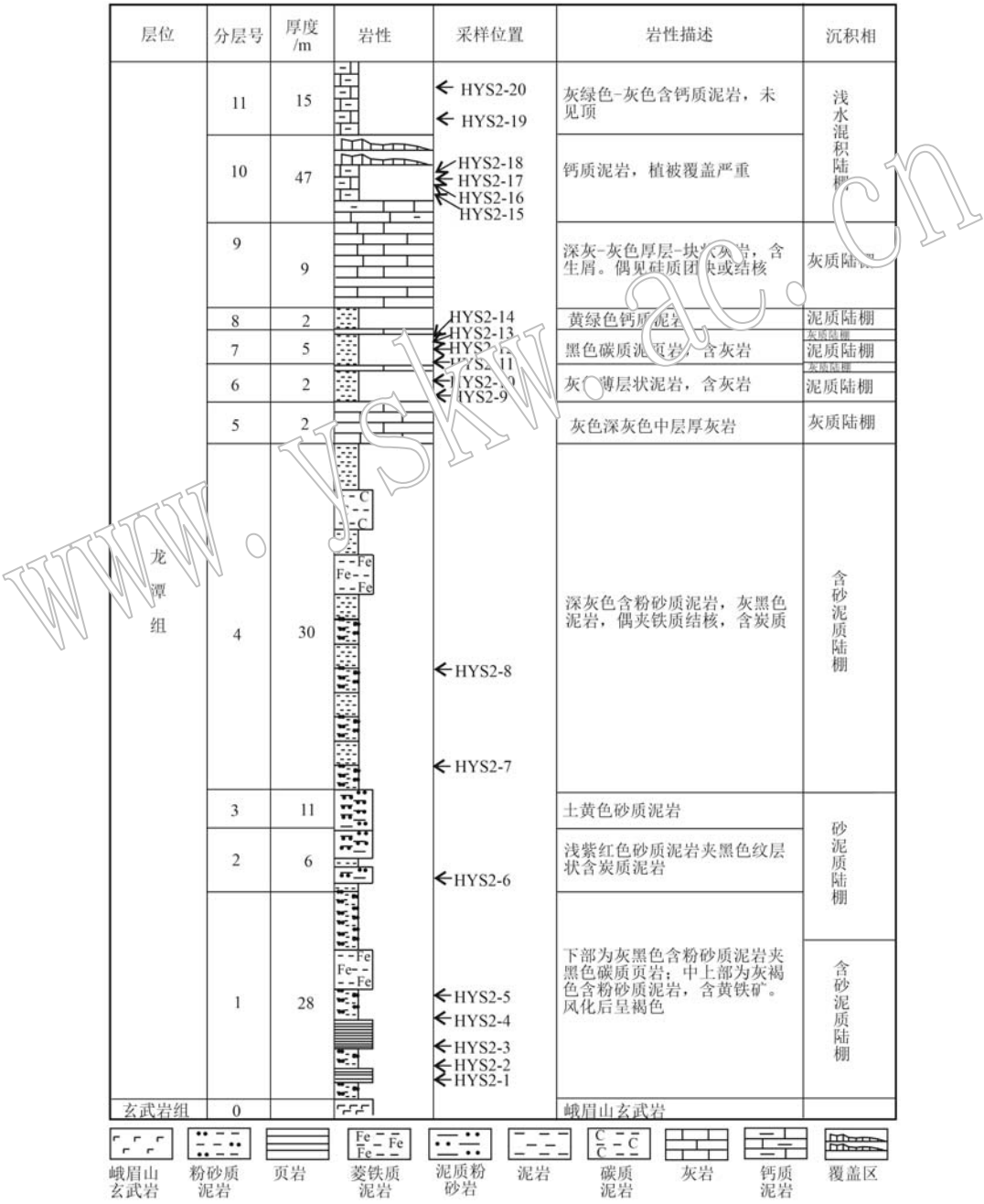


图 2 川东地区华蓥山剖面龙潭组岩性综合柱状图

Fig. 2 Lithological column of Longtan Formation in Huayingshan section, eastern Sichuan Basin

2 样品与实验

本次测试分析的20个样品均采自邻水县华蓥山剖面(图2),主要用于有机岩石学、有机质地球化学与元素地球化学测试。华蓥山地区龙潭组主体以

黑色碳质泥页岩和粉砂质泥岩为主,底部为风化后的紫红色泥岩(图3),富有机质泥页岩总体呈现单层厚度薄、频繁与泥质粉砂岩和砂岩互层的特征。文中所有测试均是在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室测试完成。



图3 川东地区华蓥山剖面龙潭组岩性组合特征

Fig. 3 Lithological characteristics of Longtan Formation in Huayingshan section, eastern Sichuan

a—黑色泥页岩与上覆薄层砂岩;b—灰黑色泥页岩中菱铁矿结核;c—灰黑色泥页岩;d—风化后形成的紫红色泥页岩

a—black shale and a thin layer of overlying sandstone; b—siderite nodules in gray-black shale; c—gray-black shale;

d—purplish-red shale formed after weathering

TOC 含量是在 LECO CS-230 碳硫分析仪上测试完成的,测试误差小于 3%。显微组分是在 MPV-3 型显微光度计上完成的,按照石油天然气行业标准《全岩光片显微组分测定方法》(SY/T 6414-1999),根据不同组分定量统计得出其质量分数。泥页岩经过干酪根制备后进行干酪根稳定碳同位素测试,测试仪器为 Delta V Advantage 稳定同位素质谱仪。测试前将岩石样品粉碎至小于 100 μm ,之后装入硼硅酸反应瓶中有序放置在 Gas Bench 前处理装置 70℃ 恒温样品盘中,仪器自动将排空针和进样针接入高纯氦气而排出空气,待样品与无水磷酸反应,萃

取二氧化碳并接入 Delta V Advantage 稳定同位素质谱仪测试。

泥页岩样品粉碎至粒径小于 100 μm ,烘干冷却至室温后称取 0.5 g 样品置于四氟乙烯烧杯中,加入 1 mL 去离子水湿润,用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 混合试剂分解后通过 VISTA MPX 型号电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS)测定金属元素(主量和微量元素)。稀土元素测试则采用过氧化钠熔融法分解样品,分析前样品用 HNO_3 溶解沉淀,后使用 X SERIES 2 型号电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,元素分析数据相对误差小于 5%。

3 测试结果

3.1 有机质特征

本次分析测试的 20 个泥页岩样品 TOC 含量介于 0.85%~4.62%之间,平均值为 2.57%(表 1)。从

分布规律来看,TOC 含量主要分布在 2%~4%之间,其次是 1%~2%和 4%~8%,少量样品的 TOC 含量低于 1%(图 4a)。由此可知,绝大多数泥页岩样品可以被划为非常好(2%<TOC<4%)和极好(TOC>4%)烃源岩。从垂向分布来看,TOC 含量具有显著的强非均质性(表 1),受频繁变化的沉积环境影响显著。

表 1 华蓥山地区龙潭组泥页岩有机地球化学和主量元素测试结果
Table 1 Test results of organic geochemistry and major elements of the Longtan Formation shale in Huayingshan section

样品号	深度/m	TOC	$\delta^{13}C_{org}/\text{‰}$	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂
HYS2-1	152.9	2.71	-22.9	19.00	0.10	2.40	3.68	0.84	0.006	0.62	2.63
HYS2-2	150.0	1.23	-	15.36	0.10	2.44	2.94	0.84	0.007	0.12	2.26
HYS2-3	148.0	2.26	-22.6	17.33	0.27	3.41	3.58	0.96	0.096	0.61	2.61
HYS2-4	146.0	1.77	-	11.79	0.11	16.97	1.43	0.39	0.12	0.09	1.41
HYS2-5	143.6	2.53	-22.4	18.26	0.12	2.26	3.15	0.66	0.06	0.22	2.93
HYS2-6	128.4	1.26	-	18.96	0.07	1.37	4.01	0.94	0.004	0.16	2.64
HYS2-7	109.6	2.50	-22	17.14	0.07	10.14	27	0.88	0.561	0.12	2.53
HYS2-8	106.4	0.85	-	17.24	1.14	5.66	2.7	0.70	0.088	0.61	3.09
HYS2-9	79.0	3.63	-23.4	16.19	0.02	4.64	2.6	0.70	0.007	0.16	1.35
HYS2-10	78.4	2.09	-22.4	16.97	0.13	5.9	3.23	0.75	0.005	0.22	2.42
HYS2-11	76.4	4.62	-22.6	17.6	0.02	3.80	3.18	0.80	0.002	0.17	2.36
HYS2-12	77.2	2.50	-	8.84	0.2	3.29	4.05	0.82	0.003	0.17	3.41
HYS2-13	74.4	1.85	-	15.34	0.15	2.55	3.35	0.73	0.003	0.127	2.67
HYS2-14	73.2	0.81	-	11.46	0.02	3.11	3.78	0.99	0.002	0.19	4.24
HYS2-15	60.4	3.1	-2.7	3.28	0.03	11.13	3.89	0.74	0.006	0.21	2.31
HYS2-16	72.2	1.25	-	18.93	0.04	3.79	3.98	0.78	0.00	0.32	3.12
HYS2-17	55.3	3.16	-22.1	16.28	0.06	4.92	3.22	0.76	0.002	0.37	2.32
HYS2-18	5.2	1.87	-	15.39	0.20	8.12	2.93	0.84	0.031	1.13	2.49
HYS2-19	9.2	4.02	-23	18.77	0.05	8.44	3.45	0.82	0.002	0.12	4.00
HYS2-20	5.2	2.46	-	21.73	0.11	3.67	3.60	0.78	0.002	0.16	3.75

-表示未检测。

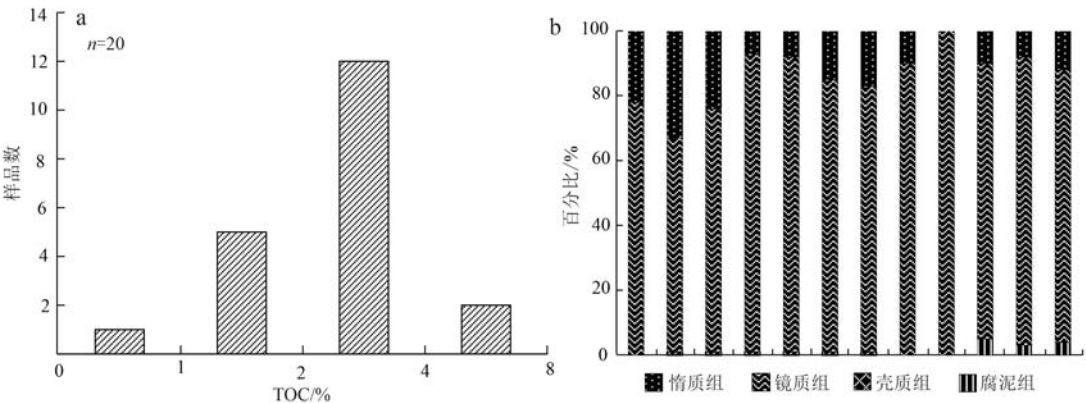


图 4 川东地区龙潭组泥页岩 TOC 分布频率图(a)和显微组分百分比图(b)

Fig. 4 Distribution frequency diagram of TOC content(a) and percentage of maceral compositions(b) of Longtan Formation shale in eastern Sichuan

对华蓥山剖面泥页岩显微组分进行镜下观察,发现有机质组成主要为镜质体和惰质体,镜质组和惰质组的含量分别为 66%~100%和 0~33%,平均值分别为 84.58%和 13.83%(图 4b)。此外,泥页岩样品中含有少量的腐泥组和壳质组,平均值分别为 1%和 0.5%。从显微照片上也可以看出,龙潭组泥页岩有机质组分以块状镜质体为主,其次是惰质组丝质

体(图 5)。干酪根碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)值分布范围为 -23.9‰ ~ -22‰ (表 1),同位素组成偏重,为典型的腐殖型干酪根。无论是干酪根碳同位素还是有机质显微组成,均显示华蓥山地区龙潭组泥页岩干酪根类型为Ⅲ型。总体而言,龙潭组泥页岩有机质主要来源于高等植物,生油潜力小,以生气为主(兰叶芳等, 2023)。

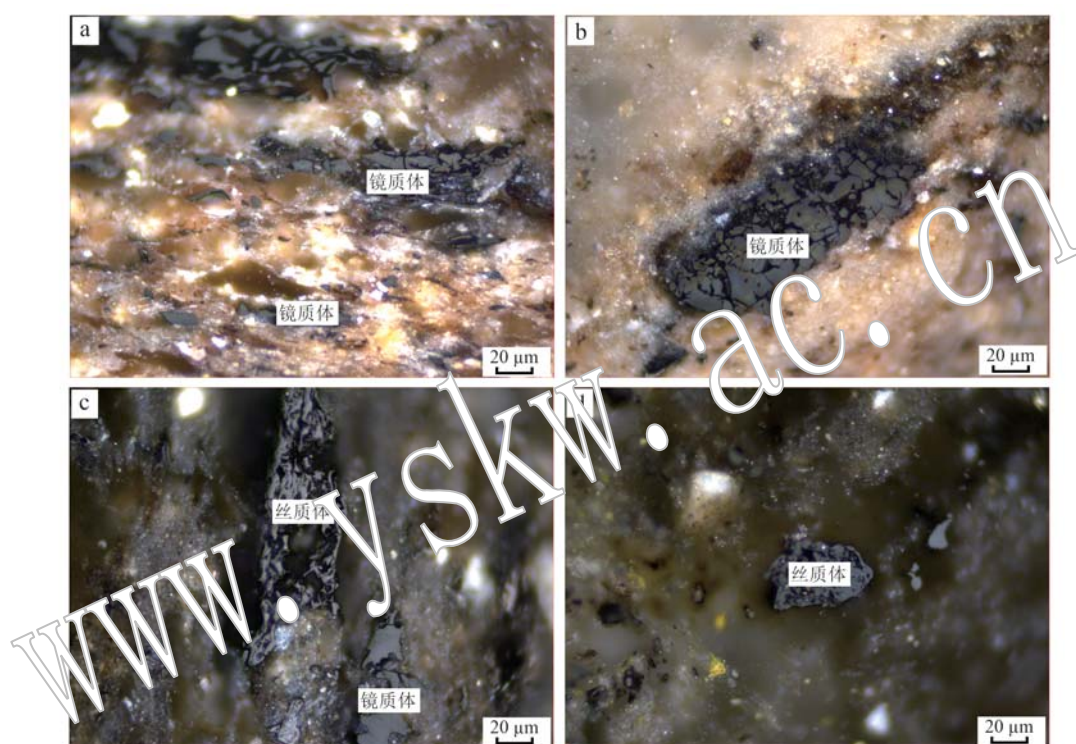


图 5 华蓥山地区龙潭组泥页岩显微组分照片

Fig. 5 Photos of maceral compositions in the Longtan Formation shales, Huayingshan area

3.2 主量元素特征

华蓥山地区龙潭组泥页岩主量元素变化较大(表 1), Al_2O_3 含量为 11.79%~21.73%, 平均 17.51%; Fe_2O_3 含量介于 1.37%~16.97%之间, 平均 5.48%; MgO 含量介于 0.39%~0.99%之间, 平均 0.79%; TiO_2 含量介于 1.35%~4.24%之间, 平均 2.73%; K_2O 含量介于 1.43%~4.05%之间, 平均 3.28%。其他主量元素如 Mn、Ca 和 Na 含量相对较低, MnO 、 CaO 和 Na_2O 的平均含量分别为 0.04%、0.14%和 0.30%。与 PAAS(澳大利亚后太古宙平均页岩)比较,大部分主量元素含量相对较低(Taylor and McLennan, 1985)。泥页岩中($\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$)含量为 2.31%~17.35%, 平均 6.26%, 表明样品中含有有

多的铁镁组分,主要来自菱铁矿的贡献。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值可以反映由常量元素控制的矿物状况,通常黏土矿物的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 小于 0.3(Cox *et al.*, 1995)。龙潭组泥页岩样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 0.12%~0.22%, 表明龙潭组泥页岩主量元素含量主要由黏土矿物含量控制。

3.3 微量元素特征

由于微量元素对沉积环境变化具有很强的敏感性,常常用来作为沉积环境的参数指标。对华蓥山地区龙潭组泥页岩进行了 Co、Cr、Ni 等微量元素进行测试,结果列于表 2。为减少陆源组分和碳酸盐等沉积物对自生微量元素的干扰,与澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)对比分析(McLennan, 1989),可以看

表 2 华蓥山地区龙潭组泥页岩部分微量元素测试结果

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Test results of partial trace elements of the Longtan Formation shale in the Huayingshan section

样品号	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	V	Zn	Zr	Th
HYS2-1	181.90	4.45	130.84	62.69	37.68	18.90	119.43	214.98	56.61	756.30	15.05
HYS2-2	86.55	2.66	154.26	30.47	38.29	22.07	86.06	293.16	54.65	513.27	10.53
HYS2-3	192.90	49.22	138.02	95.51	46.52	105.88	123.10	204.13	453.65	764.84	15.15
HYS2-4	75.25	9.69	80.64	120.42	45.32	62.71	70.18	103.76	142.85	538.64	9.75
HYS2-5	118.44	3.54	185.87	97.54	65.48	28.33	138.28	284.86	45.37	822.78	17.67
HYS2-6	109.48	0.95	117.93	22.41	41.81	9.82	181.11	226.88	6.74	1 310.94	24.28
HYS2-7	233.52	111.48	179.34	67.02	33.52	52.13	101.47	342.54	143.59	611.41	13.87
HYS2-8	252.27	82.61	197.96	124.72	28.76	67.55	304.81	679.53	125.98	654.23	12.14
HYS2-9	102.15	2.10	122.10	172.63	14.36	14.08	82.31	216.42	13.98	748.50	16.23
HYS2-10	121.40	1.81	124.81	26.66	36.47	5.52	193.78	228.02	8.41	1 072.86	20.28
HYS2-11	383.70	10.07	124.78	99.13	39.26	35.02	141.43	215.67	49.58	999.83	19.22
HYS2-12	114.06	2.99	207.87	64.05	34.05	14.57	152.19	421.53	34.10	804.57	16.24
HYS2-13	127.83	2.73	184.00	70.87	20.23	25.45	112.20	359.21	27.79	611.11	12.36
HYS2-14	91.21	10.62	312.68	39.58	32.38	24.63	109.19	468.27	36.99	571.19	11.41
HYS2-15	342.87	2.08	121.66	114.72	23.18	12.43	172.07	225.64	31.42	93.41	19.63
HYS2-16	274.48	3.58	164.54	217.55	26.23	49.38	139.57	59.30	25.58	757.56	15.95
HYS2-17	231.99	25.32	160.45	67.71	38.63	118.05	107.66	317.49	134.60	543.35	11.26
HYS2-18	247.35	5.65	181.42	54.47	30.92	12.11	52.59	301.71	30.15	386.50	7.59
HYS2-19	89.47	2.34	167.22	247.33	29.42	2.73	161.38	304.70	18.97	664.60	13.01
HYS2-20	140.26	4.97	183.70	201.53	57.18	35.18	249.23	381.79	37.56	646.79	12.06
平均值	175.85	16.94	162.01	99.85	35.98	21.38	145.19	310.98	73.98	739.03	14.68
PAAS	650	23	110	50	50	55	200	150	85	210	14.6

出大部分泥页岩样品具有相似的分布模式,反映其来源具有同源性,少量样品呈现异常值。多数泥页岩样品的 Ba、Co、Ni、Sr 和 Zn 等元素略有亏损,Cr、Cu、V、Zr 和 Th 等元素富集程度较高(图 6)。样品 HYS2-3、HYS2-7 和 HYS2-19 的 Co、Ni 和 Zn 呈现富集

的特征,这些微量金属元素是有机生物生长繁盛所需,其含量增加可能与该层段水体生产力的提高有关(刘全有等, 2024)。

3.4 稀土元素特征

对华蓥山地区龙潭组泥页岩样品进行稀土元素含量测试,相关结果列于表 3。稀土元素总量(ΣREE)总体较高,介于 $247.78\times10^{-6}\sim723.78\times10^{-6}$ 之间,平均值为 445.01×10^{-6} ,远高于球粒陨石(3.29×10^{-6})、北美页岩(173.21×10^{-6})和上地壳(146.4×10^{-6}) (Haskin and Haskin, 1966; Boynton, 1984; Taylor and McLennan, 1985),说明龙潭组泥页岩中稀土元素高度富集。轻稀土元素含量(LREE)为 $224.46\times10^{-6}\sim658.17\times10^{-6}$,平均值为 402.31×10^{-6} ;重稀土元素含量(HREE)为 $23.32\times10^{-6}\sim65.61\times10^{-6}$,平均值为 42.70×10^{-6} 。轻稀土和重稀土元素含量的比值(LREE/HREE)介于 7.85~11.01 之间,平均值为 9.41,呈显著的轻重稀土元素分馏特征。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值是用来反映轻重稀土元素分馏程度的参数,该值>1 时,为轻稀土元素富集,该值<1 时,为重稀土元素富集(Elderfield and Pagett, 1986)。研究区龙潭组泥页岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 7.48~13.84 之间,呈显著的轻稀土元素富集特征。

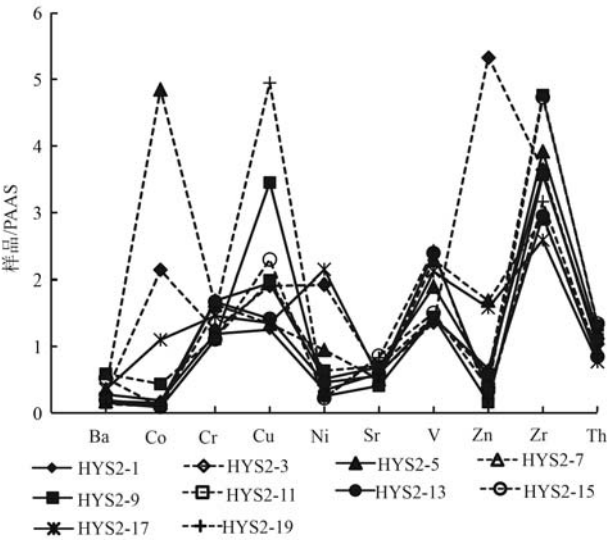


图 6 华蓥山地区龙潭组泥页岩微量元素 PAAS 标准化蛛网图

Fig. 6 PAAS standardized spider diagram of trace elements of the Longtan Formation shales in Huayingshan profile

$w_p/10^{-6}$

表3 华蓥山地区龙潭组泥页岩稀土元素测试结果
Table 3 Test results of rare earth elements of the Longtan Formation shale in Huayingshan section

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	δ Eu	δ Ce	Ce_{anom}
HYS2-1	78.59	178.39	18.14	66.78	11.54	2.44	12.14	1.85	11.11	2.17	6.52	0.97	6.23	0.89	397.76	355.88	41.88	0.67	1.13	0.02
HYS2-2	52.64	123.90	13.22	52.45	9.89	1.73	9.63	1.30	11.67	1.29	3.69	0.54	3.24	0.45	280.98	253.83	27.15	0.58	1.12	0.02
HYS2-3	86.97	198.88	21.24	82.07	14.55	2.77	14.53	2.13	12.57	2.45	7.21	1.06	6.53	0.91	453.87	406.48	47.39	0.62	1.10	0.01
HYS2-4	52.20	126.55	13.45	54.28	11.23	2.38	10.87	1.51	8.62	1.66	5.02	0.75	4.73	0.67	293.93	260.09	33.84	0.70	1.14	0.03
HYS2-5	88.80	209.03	21.80	84.14	15.27	3.16	15.50	2.22	12.36	2.32	6.69	0.97	6.08	0.85	469.19	422.20	46.99	0.67	1.13	0.03
HYS2-6	126.96	305.64	31.50	116.8	20.00	2.80	20.15	2.80	15.83	2.98	8.89	1.27	8.18	1.16	664.96	603.70	61.26	0.45	1.15	0.04
HYS2-7	62.46	149.90	16.85	68.86	13.81	2.39	12.74	1.76	9.55	1.75	5.09	0.74	4.54	0.64	351.08	314.27	36.81	0.59	1.10	0.01
HYS2-8	78.13	203.33	21.10	81.00	12.13	2.35	12.41	1.88	11.67	2.27	6.83	0.99	6.31	0.86	441.26	398.04	43.22	0.62	1.19	0.06
HYS2-9	119.54	293.67	33.61	131.84	22.03	2.35	18.57	2.54	14.06	2.64	8.80	1.12	7.10	0.95	657.82	603.04	54.78	0.38	1.10	0.02
HYS2-10	100.35	244.12	23.14	86.01	15.10	2.26	15.84	2.31	13.45	2.60	7.72	1.13	7.26	1.04	522.33	470.98	51.35	0.48	1.21	0.05
HYS2-11	108.56	268.11	25.97	95.69	16.64	2.53	16.73	2.28	12.72	2.40	7.62	1.00	6.42	0.88	566.95	517.50	49.45	0.49	1.20	0.06
HYS2-12	77.10	194.65	19.33	75.14	12.90	2.20	12.86	1.72	9.26	1.70	4.89	0.71	4.48	0.62	417.56	381.32	36.24	0.56	1.20	0.05
HYS2-13	61.21	144.98	15.32	58.66	10.11	1.77	10.14	1.35	7.35	1.36	4.01	0.61	3.78	0.53	321.18	292.05	29.13	0.57	1.13	0.03
HYS2-14	74.37	156.88	17.17	64.62	11.95	2.27	11.48	1.65	8.94	1.61	4.47	0.63	3.64	0.50	360.18	327.26	32.92	0.63	1.05	-0.01
HYS2-15	89.26	223.69	22.16	83.95	14.93	2.23	15.53	2.25	13.18	2.56	7.57	1.14	7.39	1.04	486.88	436.22	50.66	0.48	1.20	0.05
HYS2-16	76.95	177.28	18.39	68.67	11.22	1.95	11.29	1.53	8.42	1.56	4.60	0.68	4.31	0.63	387.48	354.46	33.02	0.56	1.12	0.02
HYS2-17	98.80	317.10	37.07	165.73	34.67	4.80	25.60	3.25	16.38	2.84	8.03	1.14	7.00	0.97	723.78	658.17	65.61	0.52	1.25	0.07
HYS2-18	47.73	108.86	11.85	46.49	7.98	1.55	7.77	1.11	6.21	1.15	3.29	0.49	2.85	0.41	247.78	224.46	23.32	0.64	1.09	0.01
HYS2-19	77.54	199.53	19.80	78.24	14.01	3.32	14.04	1.94	10.74	2.02	5.90	0.83	5.11	0.73	433.75	392.44	41.31	0.77	1.21	0.06
HYS2-20	70.34	169.94	20.52	88.92	19.53	4.57	17.79	2.32	12.10	2.19	6.17	0.86	5.43	0.76	421.44	373.82	47.62	0.80	1.07	-0.01
平均值	81.43	199.72	21.08	82.52	14.97	2.59	14.28	1.99	11.08	2.08	6.07	0.88	5.57	0.71	445.01	402.311	42.6975	0.58	1.15	0.03
北美页岩	32.00	73.00	7.90	33.00	5.70	1.24	5.20	0.85	5.80	1.04	3.40	0.50	3.16	0.48	173.21	152.84	20.37			
球粒陨石	0.31	0.81	0.12	0.60	0.20	0.07	0.26	0.05	0.32	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03	3.29	2.11	1.18			

δ Eu 和 δ Ce 值为球粒陨石稀土元素质量分数标准化值, δ Eu = $Eu/Eu^* = Eu_N/(Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, δ Ce = $Ce_N/(La_N \times Pr_N)^{1/2}$; Ce 异常 $Ce_{anom} = [3 Ce_N / (2 La_N + Nd_N)]$ 。

LREE/HREE 值和 $(La/Yb)_N$ 值均说明龙潭组泥页岩中存在显著的轻、重稀土元素分异现象。 δEu 值介于 0.38~0.80 之间,平均值为 0.58; δCe 值介于 1.05~1.25 之间,平均值为 1.15,表现出明显的 Eu 负异常和 Ce 正异常特征。

研究区龙潭组泥页岩样品经北美页岩标准化后 (Haskin and Haskin, 1966),其稀土元素配分模式如图 7a 所示。整体上看,配分图呈向右轻微下降的趋势,在元素 Gd 处表现出一定的波峰,反映了 Gd 元素相对较为富集的特征。Gd 元素的富集可能是其在

矿物晶格中含量较高、黏土矿物对其有较强的吸附作用所致(周圆圆等, 2016)。样品 HYS2-17 与其他样品相比具有更显著的轻稀土元素富集的特征,特别是 Sm 元素,可能与该层段受更多花岗岩类物源补给甚至长英质火山灰输入有关 (Li *et al.*, 2022)。对龙潭组泥页岩稀土元素进行球粒陨石标准化后,其配分模式如图 7b 所示,可以看出龙潭组泥页岩稀土元素曲线呈陡峭右倾 V 型,在 La~Eu 段形态很陡, Dy~Lu 段则较为平坦,呈波动状延伸。Eu 元素具有明显的波谷,代表 Eu 负异常,与 δEu 值相一致。

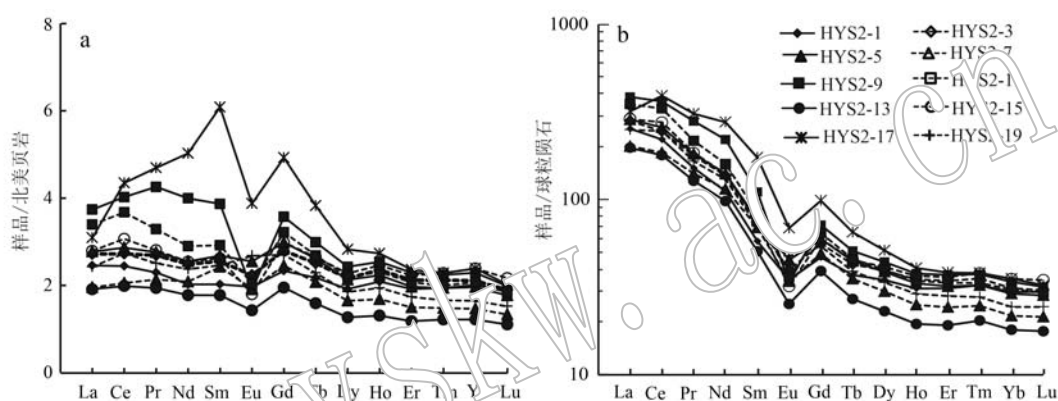


图7 华蓥山地区龙潭组泥页岩的北美页岩标准化(a)和球粒陨石标准化(b)后 REE 标准化配分模式

Fig. 7 North American shale standardized (a) and chondrite-standardized (b) REE patterns of the Longtan Formation shales in Huayingshan section

4 讨论

4.1 物源区岩石类型

元素地球化学特别是微量元素和稀土元素常被用来分析研究泥页岩的源岩形成时构造环境以及追溯物源区特征 (蔡观强等, 2006; 代辉等, 2021)。微量元素和稀土元素在沉积水体中停留时间相对短暂、活性较低,容易在风化搬运过程中被带出物源区,随后快速地进入到细粒沉积物中,因而在沉积作用过程中具有较强的抗迁移能力 (Condie *et al.*, 1992)。这些微量元素和稀土元素被转移到沉积物中仍能反映母岩的地球化学习性,如 La、Ce、Nd、Y 和 Th 等是分析沉积岩源岩的有效示踪元素 (Prudencio *et al.*, 1989; Crichton and Condie, 1993)。基于这些元素的特性,前人提出了一些地球化学图解用来判识沉积岩的源岩类型,如采用 Co/Th-La/Sc、Hf-La/Th 以及 La/Yb- ΣREE 图解来研究泥页岩的

成因和源岩特征 (Floyd and Leveridge, 1987)。

从 Co/Th-La/Sc 图解 (图 8a) 可以看出,华蓥山地区龙潭组泥页岩样品接近玄武岩与长英质火山岩分布区域。La/Yb- ΣREE 数据点也均分布于花岗岩与玄武岩的叠合区域 (图 8b)。这些特征均反映了研究区泥页岩的源岩为玄武岩和中酸性火山岩 (长英质火山岩和花岗岩)。研究区泥页岩的稀土元素配分模式与高钛玄武岩极其相似,也指示样品的稀土元素继承了峨眉山玄武岩的稀土元素分馏特征 (袁民汕等, 2021)。有学者指出 δEu 值是母岩判断的重要参数之一 (Taylor and McLennan, 1985)。研究区龙潭组泥页岩样品的 δEu 值为 0.37~0.79,总体具有中等的 Eu 负异常,与峨眉山玄武岩存在一定的差异,反映了沉积物源的来源多重性。在中酸性火山岩风化形成的沉积岩中,一般具有明显的负 Eu 异常,而玄武岩等基性火山岩风化形成的沉积岩中,则无 Eu 或具有微弱的 Eu 负异常 (刘英俊等, 1986)。因此,推测其物源除玄武岩外,还有部分中

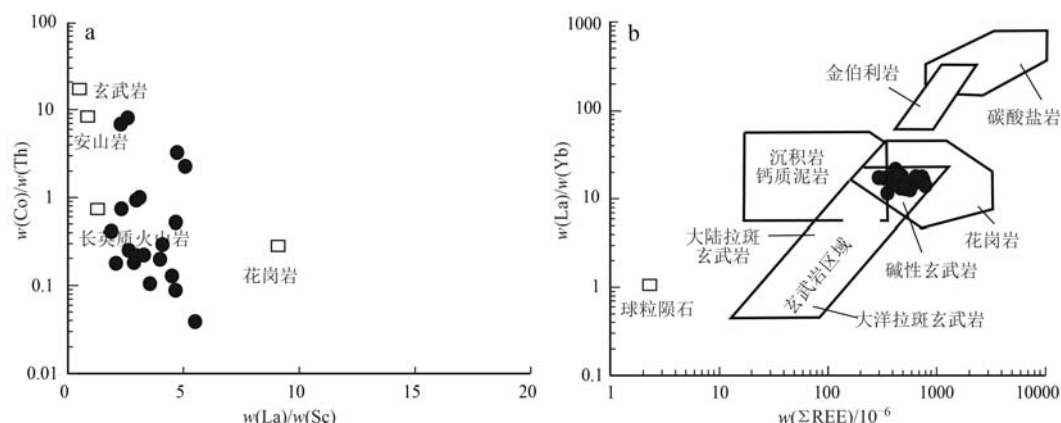


图8 华蓥山地区龙潭组源岩的 Co/Th-La/Sc (a) 和 La/Yb-ΣREE(b) 物源判别图解[底图据 Bhatia (1985) 和 Gu 等 (2002) 修改]

Fig. 8 Co/Th-La/Sc (a) and La/Yb-ΣREE(b) identification diagrams of source rock properties of Longtan Formation in Huayingshan section (diagrams were modified from Bhatia, 1985 and Gu *et al.*, 2002)

酸性火山岩的贡献(郝雪峰等, 2024)。

主量元素 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值也是源岩类型判别的重要指标之一。当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值小于 14 时, 指示源岩为铁镁质基性火山岩; 当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值处于 14~28 时, 指示源岩为长英质岩石(侯明才等, 2016)。华蓥山地区龙潭组泥页岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值为 4.70~11.95, 均低于 14, 说明源岩主要为基性火山岩。研究区龙潭组泥页岩的 TiO_2 - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 散点图与峨眉山高 Ti 玄武岩分布位置非常接近(图 9a)。此外, 泥页岩显微照片中可以看出其物质组成中含有大量的黏土组分、一定的火山岩组分, 包括蚀变灰岩岩屑和火山岩屑等(图 9b、9c), 且 TiO_2 含量为

1.35%~4.24%, 明显不属大陆上地壳组成。这些特征都指示了峨眉山玄武岩风化剥蚀产物可能为钛元素的富集提供了物质来源, 研究区龙潭组泥页岩样品继承了峨眉山玄武岩的钛高含量背景(张航飞等, 2021)。

结合图 8 和图 9, 研究区龙潭组泥页岩的物源不能单一地判断为峨眉山玄武岩, 中酸性火山岩也提供了一定的贡献。四川盆地中二叠世峨眉山玄武岩的大规模喷发, 面积超过 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 到中二叠世晚期还有粗面岩和流纹岩等长英质火山岩喷发, 面积超过 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ (郝雪峰等, 2024)。上述元素反映的龙潭组泥页岩物质来源的特征, 与峨眉山大火山

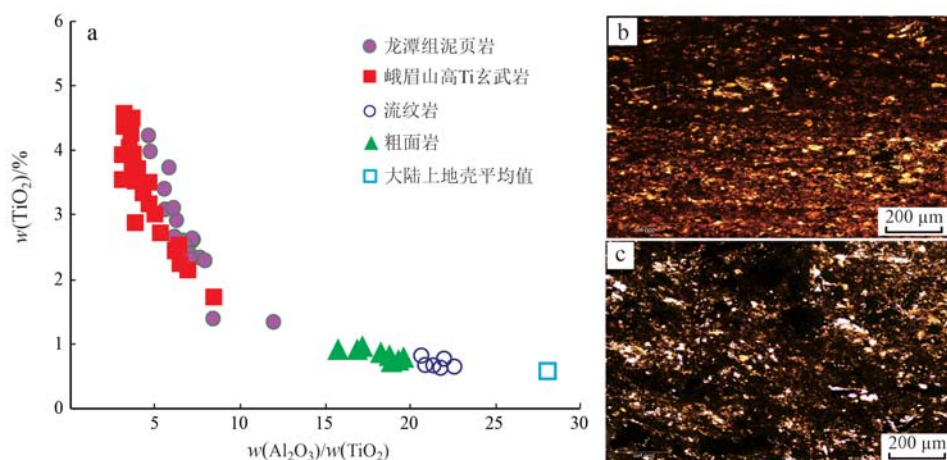


图9 华蓥山地区龙潭组泥页岩 TiO_2 - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解[a, 其他岩石数据引自于鑫等(2017)]和岩矿显微照片(b、c)

Fig. 9 Diagram of TiO_2 - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (a, other rock data cited from Yu Xin *et al.*, 2017) and microscopic photographs (b, c) of the Longtan Formation shales in Huayingshan section

岩省的火成岩岩性既有玄武岩也包含中酸性火山岩等组成是吻合的。因此,综合区域地质构造演化、地层接触关系及元素地球化学特征,研究区龙潭组泥页岩物质来源是晚二叠世峨眉山大火山省的玄武岩和中酸性火山岩。岩浆喷发形成的温室气候及酸雨导致玄武岩和中酸性火山岩强烈风化,形成的碎屑物质被搬运沉积在附近盆地,为含煤岩系龙潭组提供了物质基础,泥页岩中黏土矿物和碱性成分明显增加(Dai *et al.*, 2003),这也与前人研究的晚二叠世后期的陆相、海陆过渡相及海相沉积物质来源于峨眉山玄武岩和中酸性火山岩的观点(罗香建等, 2019; 陈聪等, 2022)基本一致。

4.2 构造背景

沉积岩物源区的构造背景可以根据活动性不强的稀土元素或微量元素(如 La、Th、Sc、Zr)的组合特征来判别分析(赵振华, 2007)。Bhatia(1985)建立了 Th-Sc-Zr、La-Th-Sc 以及 Th-Co-Zr 等构造环境判别图解是目前常用的研究方法。根据研究区龙潭

组泥页岩微量元素和稀土元素含量,绘制了 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr 和 Th-Co-Zr(图 10)三角图解,用来判别龙潭组泥页岩物源区构造背景。从 La-Th-Sc(图 10a)和 Th-Sc-Zr(图 10b)三角图中可以看出龙潭组泥页岩的物源区接近于大陆岛弧和被动大陆边缘环境,但不能明显地看出物源区的具体构造环境。从 Th-Co-Zr 图(图 10c)中则可以看出多数泥页岩样品分布在被动大陆边缘范围内,少量几个样品向岛弧方向延伸。前人研究也认为以被动大陆边缘为主要物源的岩石中通常包含较多活动大陆边缘或大陆岛弧的地球化学信息(柏道远等, 2007)。刘天甲(2023)研究表明在峨眉山大火成岩省的内带区域大量岩浆喷涌到地表,覆盖在康滇古陆原先隆起之上,来自康滇古陆的峨眉山玄武岩和中酸性火山岩风化碎屑物质通过运输沉积在华蓥山地区,形成龙潭组陆源碎屑沉积。因此,基于岩石地球化学特征并结合区域地质特征认为龙潭组泥页岩物源区的构造背景为被动大陆边缘背景。

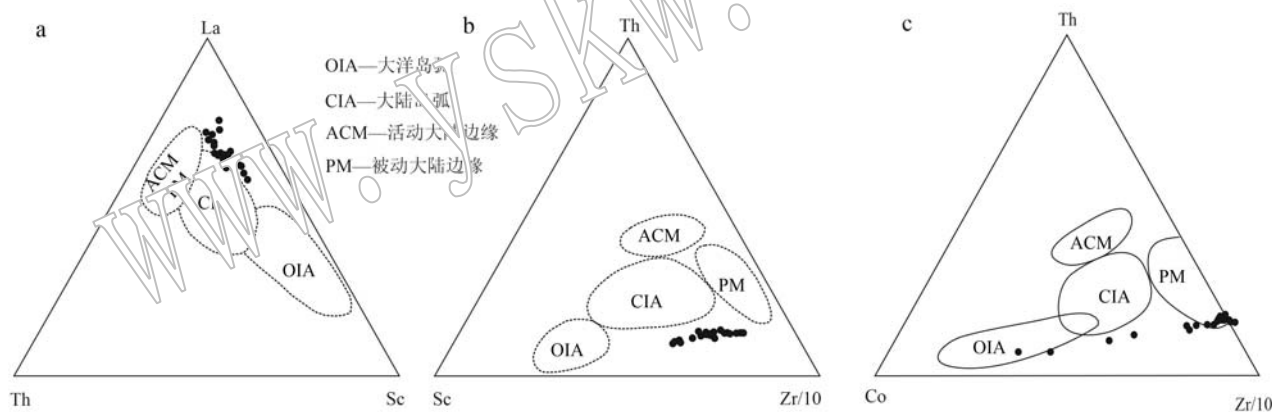


图 10 华蓥山地区龙潭组泥页岩物源区的 La-Th-Sc(a)、Th-Sc-Zr(b)和 Th-Co-Zr(c)构造判别图解[底图据 Bhatia(1985)修改]

Fig. 10 Structural identification diagrams of La-Th-Sc(a), Th-Sc-Zr(b) and Th-Co-Zr(c) of the Longtan Formation shales in Huayingshan section (modified from Bhatia, 1985)

4.3 沉积环境特征及意义

4.3.1 古风化与古气候

化学蚀变指数 $CIA = 100 \text{ Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 其中 CaO^* 仅指硅酸盐中的 Ca, 是常用来反映源岩风化程度的化学指标之一, 其计算方法见 Bock 等(1998)。研究表明源岩风化程度与风化蚀变指数 CIA 之间存在很好的正相关性(周圆圆等, 2016), 所以 CIA 值是研究源岩古风化与古气候条件变化的关键参数之一。

当 CIA 值 > 80, 表明源岩遭受了强烈风化作用;

60 < CIA < 80 时, 表明源岩遭受中等强度风化(Nesbitt and Young, 1982)。研究区龙潭组泥页岩样品的 CIA 值介于 74.03~86.45 之间, 平均值为 80.64, 反映了龙潭组泥页岩的源岩经历了中等强度-高强度化学风化作用(图 11)。从图 11 中还可以看出, 从龙潭组底部向上, CIA 呈先升高、后轻微降低并长时间平稳、然后再降低、最后再升高的变化趋势。总体上看, CIA 指数变化幅度较小, 反映了中二叠世龙潭期物源区风化程度存在有一定的波动。

Sr/Cu 值是古气候表征的重要参数指标之一,

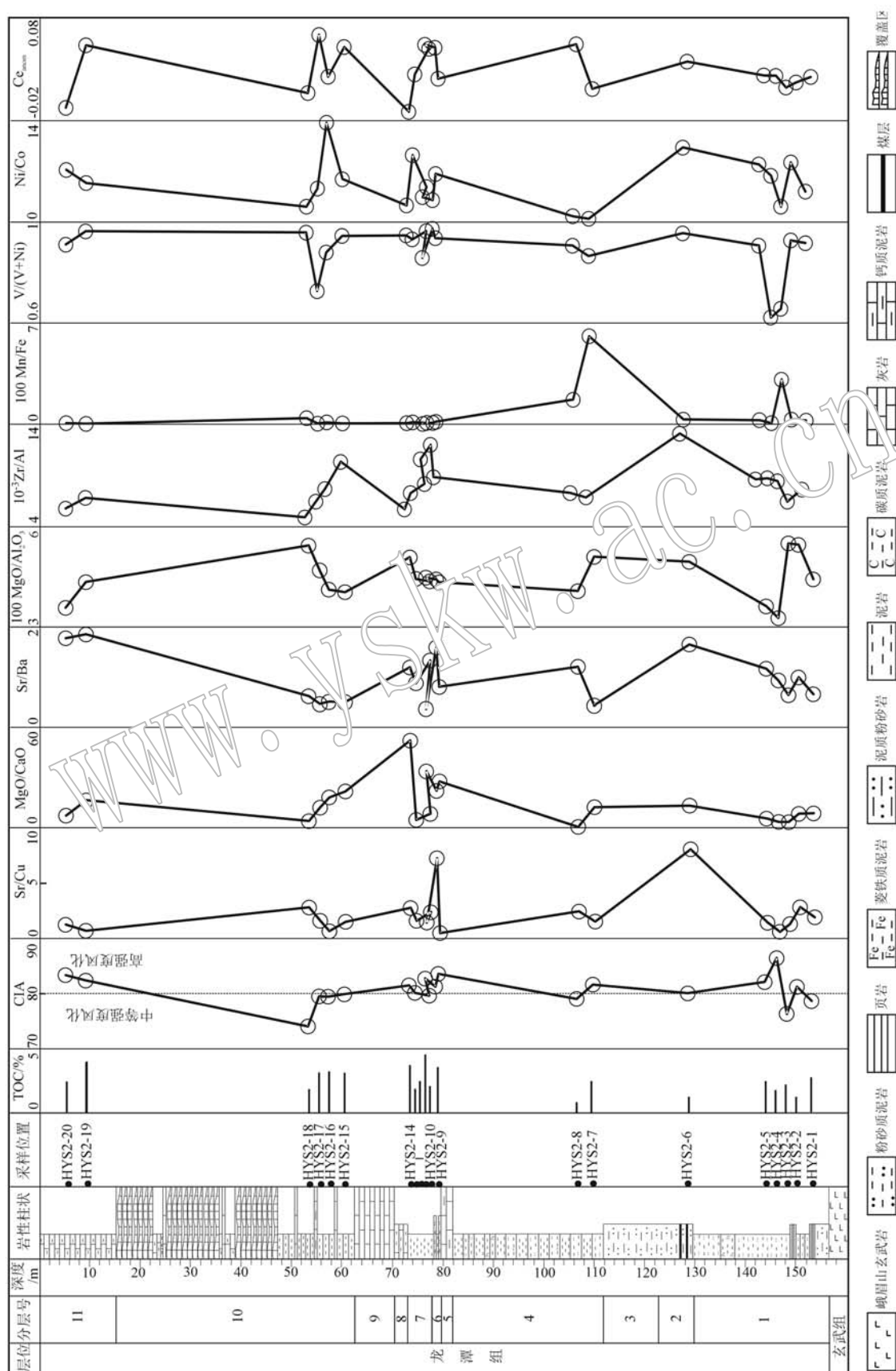


图 11 华蓥山地区龙潭组沉积环境参数变化柱状图
Fig. 11 Column chart of changes in sedimentary environment parameters of Longtan Formation in Huayingshan area

Sr/Cu 值在 1~10 之间表明泥页岩形成于温暖湿润的气候条件, Sr/Cu>10 则反映干旱炎热的气候条件 (Tribovillard *et al.*, 2006; 刘海燕等, 2025)。研究区龙潭组泥页岩样品的 Sr/Cu 值为 0.48~8.08, 均低于 10, 平均值为 2.22。在龙潭组底部, Sr/Cu 值较低, 向上呈先升高、后降低的趋势, 随后除在局部存在异常高值外, 其他层段保持低值状态, 总体上看, 研究区龙潭期整体处于较为温暖湿润的气候条件, 在局部(如 1 小层顶部 6 小层)干旱炎热程度有所增加。主量元素 MgO/CaO 值也常用来表征古气候条件的变化特征, MgO/CaO 值较高时, 指示干热气候条件, MgO/CaO 值较低时, 指示潮湿气候条件。若 K 和 Na 参与沉积, 则 MgO/CaO 值指标的运用会发生倒转, 也就是说, 在 K 和 Na 盐存在的情况下, MgO/CaO 值较高时, 反映潮湿的气候条件, MgO/CaO 值较低时, 则反映为干热的气候条件(于海洋等, 2021)。研究区龙潭组泥页岩 K₂O 含量介于 1.43%~4.05% 之间, 平均值为 3.28% (表 1), K⁺ 在沉积过程中参与度高。在这种情况下, 高 MgO/CaO 值指示潮湿气候, 低 MgO/CaO 值指示干燥气候。研究区龙潭组泥页岩样品的 MgO/CaO 值为 0.62~52.58, 平均值为 14.36, 较高的 MgO/CaO 值也反映研究区龙潭组沉积期整体为温暖湿润的气候条件。从底部至顶部, MgO/CaO 值呈现先增加后降低的特征, 反映龙潭期古气候由干旱炎热向温暖湿润再向干旱炎热变化的趋势, 与 Sr/Cu 值存在一定的差异, 但二者均反映了研究区龙潭期整体为温暖湿润的古气候特征。

4.3.2 古盐度

Sr/Ba 值是水体古盐度恢复重建的参数指标之一, 由于其变化的灵敏性, 常用来反映和恢复沉积水体古盐度特征。一般情况下, Sr/Ba<0.5 指示陆相淡水环境, 0.5<Sr/Ba<1 反映为半咸水环境, Sr/Ba>1 为咸水环境 (Panahi *et al.*, 2000)。研究区龙潭组泥页岩样品的 Sr/Ba 值为 0.37~1.86 (图 11), 平均值为 0.98, 整体上处于半咸水环境。从底部至顶部, Sr/Ba 值经历了先增加、后轻微降低、再增加的过程, 反映了沉积水体盐度的波动变化, 特别是在龙潭期末, 水体咸度增大, 与 MgO/CaO 值反映的古气候向干旱炎热化的趋势相一致。泥页岩中 Mg 和 Al 的含量对沉积环境也具有重要的指示意义, 前人根据 MgO 的亲海性和 Al₂O₃ 的亲陆性, 建立了古盐度的计算公式: $m = 100 \text{ MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (王随继等, 1997)。

沉积水体由淡水向海水演变时, m 值会随之增加。当 $m<1$ 时, 指示淡水沉积环境; 当 $1<m<10$ 时, 指示海陆过渡相沉积环境; $10<m<500$ 指示海洋沉积环境; 当 $m>500$ 时, 指示陆表海沉积环境 (石军等, 2018)。研究区龙潭组泥页岩样品 m 值介于 3.27~5.45, 平均值为 4.49, 反映了龙潭组沉积期为海陆过渡沉积环境。从底部至顶部, m 值的变化经历了先降低、后增加、再轻微降低的过程, 反映了沉积水体的盐度有轻微波动, 但总体上仍为半咸水环境, 与 Sr/Ba 值、MgO/CaO 值和浅水陆棚环境情况吻合。

4.3.3 古水深

沉积过程中的分异作用导致某些元素随着离岸的远近而发生变化, 通过分析这些元素的变化 (肖富强等, 2020), 来判断沉积时的古水深, 常用的指标有 Zr/Al 值和 Mn/Fe 值 (徐浪波等, 2023)。Zr/Al 值大小能够指示陆源组分的搬运距离和沉积水体深度变化情况, Zr/Al 值越小, 表示离岸越远, 水体越深 (贾福福等, 2020)。100 Mn/Fe 值也是陆源组分离岸远近的指标参数, 随着水深的增加而增加 (唐勇等, 2022)。如图 11 所示, 研究区龙潭组泥页岩样品的 Zr/Al 值为 4.74×10^{-3} ~ 13.06×10^{-3} , 平均值为 7.97×10^{-3} , 反映此时的水体相对较浅。泥页岩样品的 100 Mn/Fe 值 0.03~6.12, 平均值为 0.68, 同样反映整体水体较浅、与 Zr/Al 值反映结果相一致。此外, 研究区龙潭组泥页岩的有机显微组分以镜质组和惰质组为主, 仅含少量的腐泥组和壳质组 (图 4b), 也验证了沉积时期的水体较浅、有机质以陆源高等植物输入为主的特征, 水生浮游生物对有机质的贡献很小。

4.3.4 氧化还原条件

沉积水体的氧化还原状态主要是利用微量元素和稀土元素的含量或比值进行判识。前人在研究泥质岩形成古氧化还原条件时, 认为 Ni/Co、V/(V+Ni) 和 Ce_{anom} 是相对可靠的参数指标, 总结了一套用于判断沉积物沉积时水体氧化-还原条件的微量元素判别指标 (Algeo and Liu, 2020)。在水体分层明显的缺氧强还原环境, 通常表现为 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})>0.84$, $\text{Ni}/\text{Co}>7$, $\text{V}/\text{Cr}>4.25$; 在水体分层不强的贫氧亚还原环境, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 为 0.6~0.84, $5<\text{Ni}/\text{Co}<7$, $2<\text{V}/\text{Cr}<4.25$; 在富氧环境下, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})<0.6$, $\text{Ni}/\text{Co}<5$, $\text{V}/\text{Cr}<2$ (Jones and Manning, 1994)。 Ce 异常指数 Ce_{anom} 也常常用来表征氧化还原条件, 其计算公式参考 Taylor 和 McLennan (1985), Ce_{anom} 值大于

-0.1 反映为缺氧条件, Ce_{anom} 小于 -0.1 则表示为含氧条件(周寿等, 2024)。

图 11 显示研究区龙潭组泥页岩样品的 $V/(V+Ni)$ 值为 0.62~0.98, 平均 0.89, 反映了研究区龙潭组泥页岩沉积时水体整体为缺氧环境, 局部为弱还原环境; Ni/Co 值为 0.47~13.81, 平均 5.49, 指示贫氧弱还原环境; Ce_{anom} 值为 -0.01~0.06 之间, 平均为 0.03, 同样表明了龙潭组沉积期主要为缺氧环境。各指标参数之间反映的氧化还原条件存在一定的差异, 但均表明了龙潭组沉积期古水体为弱还原-还原环境, 早期为弱还原环境, 至中晚期向还原环境转变, 至龙潭末期, 再转变为弱还原环境。

4.3.5 龙潭组沉积环境

通过上述对华蓥山地区龙潭组泥页岩地球化学参数指标的分析, 得出了龙潭组泥页岩地球化学特征的沉积环境特征, 即泥页岩形成时的古气候、古盐度、古水深和氧化还原条件。华蓥山地区龙潭组泥页岩 Sr/Ba 值普遍高于 0.5, m 值为 3.27~5.45, 反映当时沉积环境主要为半咸水环境, 整个龙潭期有微波动趋势。 Sr/Cu 值均低于 10, 平均为 2.22, MgO/CaO 值平均值为 14.36, 反映了温暖湿润的气候环境, 向顶部有轻微干热气候演化的趋势。 $V/(Ni+V)$ 、 Ni/Co 和 Ce_{anom} 值指示沉积水体为弱还原至还原环境, Fe_2O_3/Al_2O_3 和 $100 Mn/Fe$ 值反映龙潭期盆地沉积水体较为浅, 整个龙潭时期古气候和沉积水体深浅存在微弱变化。从露头剖面和沉积相来看, 华蓥山地区温暖湿润的气候条件和浅水陆棚水体有利于高等植物的生长和繁盛, 缺氧的沉积水体特别

是泥质陆棚环境有利于有机质的保存。

4.4 富有机质页岩形成模式

富有机质泥页岩形成受控于多种物理化学过程, 包括源岩风化程度、保存条件、有机质稀释及它们之间的相互作用。有机质的来源和富集与古气候条件、初级生产力和陆源输入有关, 有机质的保存则与氧化还原环境和沉积速率等因素相关 (Hofmann *et al.*, 2000; Algeo *et al.*, 2013)。基于对富有机质页岩形成的沉积环境特征研究, 本文构建了川东华蓥山地区龙潭组泥页岩形成模式(图 12)。康滇大陆大火山岩省在构造抬升背景下, 西南部的峨眉山玄武岩及中酸性火山岩成为盆地的主要物源区, 强风化作用使玄武岩和中酸性火山岩风化形成高碎屑流, 在地表径流下搬运至沉积盆地。龙潭期为温暖湿润的气候环境, 有利于高等植物的生长和繁盛, 大量高等植物死亡以后随着碎屑物质一起沉降至湖泊水体中, 且加速了高等植物的掩埋过程, 使大量的陆源有机质得以保存, 高等植物残骸构成沉积有机质的主要来源。沉积过程中水体富含有机质, 湖泊的初级生产力并不高, 浮游水生生物对有机质的供应较少, 进一步论证了大量的有机质主要来自高等植物。由于具有较高的沉积速率, 当丰富的有机质进入水体中, 有机物的快速沉积缩短了与弱含氧水体的接触时间, 保证了有机质的保存, 为有机质的富集提供了较好的保存条件, 促使龙潭组形成一套倾气型富有机质泥页岩。从前文中可以看出, TOC 含量并未与古气候参数、古盐度参数和氧化还原参数呈协同变化的趋势, 尽管湖泊水体呈弱还原-还原状

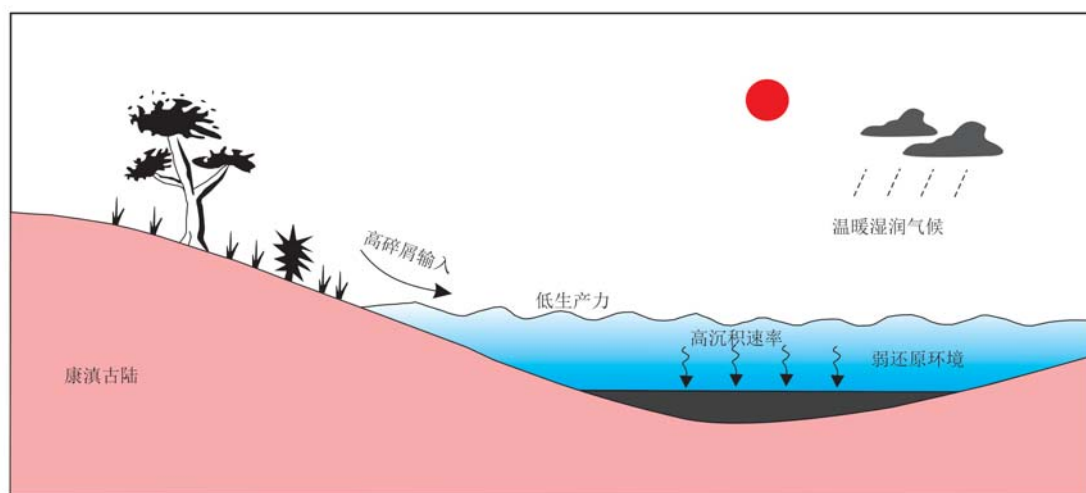


图 12 川东地区龙潭组富有机质页岩形成模式

Fig. 12 Organic-rich shale formation model of Longtan Formation in eastern Sichuan Basin

态, TOC 含量未随还原程度增加而明显增加。因此, 古气候条件、古氧化还原条件和古生产力对富有机质泥页岩的形成不构成主要控制因素, 陆源碎屑的大量快速输入是有机质保存富集和富有机质泥页岩形成的关键因素。

5 结论

本文以川东地区华蓥山剖面龙潭组泥页岩为研究对象, 进行了有机岩石学、有机地球化学、元素地球化学测试, 并对富有机质泥页岩形成的沉积环境进行了分析和研究, 得出以下几点结论:

(1) 研究区龙潭组泥页岩地球化学特征表明其源岩组成比较复杂, 主要为峨眉山高钛玄武岩以及长英质火山岩和花岗岩等酸性火山岩; 龙潭组源区的构造背景为被动大陆边缘环境。

(2) 研究区龙潭组沉积期风化程度较为强烈, 属于中-高强度风化; 龙潭期为温暖湿润的气候条件, 沉积水体为半咸水环境, 水体整体较浅, 泥页岩形成于弱还原-还原环境。

(3) 综合沉积环境、有机质特征和区域地质背景, 认为龙潭组富有机质泥页岩形成于温暖湿润的气候条件下, 高等植物输入是有机质主要来源, 在陆源碎屑输入和快速沉积背景下有机质迅速沉积埋藏和保存, 形成了典型倾气型优质泥页岩。

致谢 衷心感谢审稿专家和编辑提出的建设性修改意见, 感谢项目组同事在野外工作和稿件写作过程中的支持和帮助。

References

- Algeo T J, Henderson C M, Tong J N, *et al.* 2013. Plankton and productivity during the Permian-Triassic boundary crisis: An analysis of organic carbon fluxes[J]. *Global and Planetary Change*, 105: 52~67.
- Algeo T J and Liu J S. 2020. A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis[J]. *Chemical Geology*, 540: 119549.
- Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, *et al.* 2007. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the early Yanshanian peraluminous granites in the Chuankou region, Hengyang, Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(2): 49~59 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1~2): 97~113.
- Bock B, McLennan S M and Hanson G N. 1998. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in new England[J]. *Sedimentology*, 45(4): 635~655.
- Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in geochemistry*, 2(2): 63~114.
- Cai Guanqiang, Guo Feng, Liu Xiantai, *et al.* 2006. Clastic sediment geochemistry: Implications for provenance and tectonic setting and its influential factors[J]. *Earth and Environment*, 34(4): 75~83 (in Chinese with English abstract).
- Cao Qinggu, Liu Guangxiang, Zhang Changjiang, *et al.* 2013. Sedimentary environment and controlling on source rocks during late Permian in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(1): 36~41 (in Chinese with English abstract).
- Cao Taotao, Cao Qinggu, Liu Hu, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and adsorption capacity of marine-continental transitional mudrock in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(4): 1445~1456 (in Chinese with English abstract).
- Cao Taotao, Deng Mo, Xiao Juanyi, *et al.* 2023. Reservoir characteristics of marine-continental transitional shale and gas-bearing mechanism: Understanding based on comparison with marine shale reservoir[J]. *Natural Gas Science*, 34(1): 122~139 (in Chinese with English abstract).
- Chen Cong, Lin Liangbiao, Yu Yu, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and paleo-environmental significance of Longtan Formation in Well CLD1 in southern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(2): 225~238 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jianping, Li Wei, Ni Yunyan, *et al.* 2018. The Permian source rocks in the Sichuan Basin and its natural gas exploration potential (Part 2): Geochemical characteristics of source rocks and latent capacity of natural gas resources[J]. *Natural Gas Industry*, 38(6): 33~45 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C, Noll P D and Conway C M. 1992. Geochemical and detrital mode evidence for two sources of Early Proterozoic sedimentary rocks from the Tonto Basin Supergroup, central Arizona[J]. *Sedimentary Geology*, 77(1~2): 51~76.
- Cox R, Lowe D R and Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry

- in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2 919~2 940.
- Crichton J G and Condie K C. 1993. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming[J]. *Journal of Geology*, 101(3): 319~332.
- Dai Hui, Zhong Yao, Xiong Can, *et al.* 2021. The geochemistry characteristics and significance of fine-grained clastic rocks from the Xintiangou Formation in Yunyang County, Chongqing[J]. *Mineralogy and Petrology*, 41(1): 32~43 (in Chinese with English abstract).
- Dai S F, Ren D Y, Hou X Q, *et al.* 2003. Geochemical and mineralogical anomalies of the Late Permian coal in the Zhijin coalfield of southwest China and their volcanic origin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 55(2~4): 117~138.
- Dong Dazhong, Qiu Zhen, Zhang Leifu, *et al.* 2021. Progress on sedimentary of transitional facies shales and new discoveries of shale gas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 29~45 (in Chinese with English abstract).
- Elderfield H and Pagett R. 1986. Rare earth elements in turbidites: Variations with redox conditions and depositional environment[J]. *Science of The Total Environment*, 49: 175~187.
- Feng Dongjun. 2023. Sweet spot assessment and its significance for the marine-continental transitional shale gas of Permian Longtan Fm. in southeastern Sichuan basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 778~788 (in Chinese with English abstract).
- Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531~542.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, *et al.* 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393~407.
- Gun Minshan, Cai Guosheng, Zeng Daoguo, *et al.* 2021. Discovery and significance of the Sc-Nb-REE-enriched zone in the paleocrust of weathering atop the Permian Emeishan basalt in the western Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(S1): 531~547 (in Chinese with English abstract).
- Hao Xuefeng, Tang Yi, Pan Meng, *et al.* 2024. Enrichment characteristics and occurrence state of lithium in claystones of Upper Permian Longtan Formation in Xingwen area, southern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1 403~1 420 (in Chinese with English abstract).
- Haskin M A and Haskin L A. 1966. Rare earths in European shales: A redetermination[J]. *Science*, 154(3 748): 507~509.
- He B, Xu Y G, Huang X L, *et al.* 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3~4): 306~323.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Li Shuangjian, *et al.* 2021. Differential occurrence of shale gas in the Permian Longtan Formation of Upper region constrained by plate tectonics in the Tethyan domain[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann P, Ricken W, Schwark L, *et al.* 2000. Carbon-sulfur-iron relationships and $\delta^{13}\text{C}$ of organic matter for late Albia sedimentary rocks from the North Atlantic Ocean: Palaeoceanographic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 163(3~4): 97~113.
- Hou Mingcai, Jiang Wenjiang, Ni Shijun, *et al.* 2016. Geochemical characteristics of the Lower and Middle Jurassic clastic rocks in the southern margin of the Yili Basin, Xinjiang and its constraints on provenance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3 337~3 361 (in Chinese with English abstract).
- Jia Fufu, Sha Longbin, Li Dongling, *et al.* 2020. Review of research on quaternary paleoceanography of the Siberian Arctic Seas[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 32(2): 250~263 (in Chinese with English abstract).
- Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of Palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111(1~4): 111~129.
- Lan Yefang, Ren Chuanjian, Pan Shihui, *et al.* 2023. Characteristics and evaluation of marine-terrestrial transitional source rocks in the Longtan Formation in the Dafang area, Northwest Guizhou[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(6): 852~867 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengwu. 2019. Carboniferous Natural Gas Accumulation Conditions and Favorable Exploration Zone Prediction in Huaying West Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Pan S Q, Ning S Z, *et al.* 2022. Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(7): 1 211~1 228.
- Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, *et al.* 2015. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Si-

- chuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 381~387 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haiyan, Liu Xingzhou, Cai Guogang, *et al.* 2025. Sedimentary geochemical environment restoration of Yixian Formation and Jiufotang Formation in the northern part of Naiman sag and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 44(2): 325~344 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kailuan, Yang Shuai, Chen Hongde, *et al.* 2020. Characteristics and evolution of Permian volcanic rocks in Huayingshan area, eastern Sichuan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 40(1): 37~49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Quanyou, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, *et al.* 2024. Organic-inorganic interactions in the Earth's multi-spheres and resources effects [J]. *Natural Gas Geoscience*, 35(5): 741~762 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tianjia. 2023. Study on Provenance Tracing of Detrital Materials from Lower Permian to Middle Triassic in Huayingshan Area, Sichuan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, *et al.* 2006. *Elementary Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1~216 (in Chinese).
- Luo Xiangjian, Lu Shufan, Lu Xiangjiang, *et al.* 2019. Geochemical characteristics and provenance analysis of the upper Permian Longtan formation of the coal measure stratum in Guizhou: Evidences from the qianpudi well No. 1[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(1): 130~136 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 21(1): 169~200.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715~717.
- Panahi A, Young G M and 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[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199~2220.
- Prudêncio M I, Figueiredo M O and Cabral J M P. 1989. Rare earth distribution and its correlation with clay mineralogy in the clay-sized fraction of Cretaceous and Pliocene sediments (central Portugal) [J]. *Clay Minerals*, 24(1): 67~74.
- Shi Jun, Zou Yanrong, Yu Jiang, *et al.* 2018. Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China[J]. *Natural Gas Geology*, 29(8): 1138~1150 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yong, Zheng Menglin, Wang Xiatian, *et al.* 2022. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 677~692 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 312.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, *et al.* 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 232(1~2): 12~32.
- Wang Suiji, Ren Mingda, Huang Xinzhen, *et al.* 1997. The transverse distributive regularity and its controlling factors of clay minerals in Tertiary System, Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 157~167 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhifu, Wang Yongli, and Chenjun, *et al.* 2015. Geochemical characteristics of source rock from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(8): 1613~1618 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Fuqiang, Zhang Shuanglong and Qi Xiong. 2020. Elemental geochemical indication of sedimentary environment in Wujiaping period of Pingle depression area[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 43(3): 231~239 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yinbo, Bi Caiqin, Sun Pingchang, *et al.* 2023. Characteristics, genesis and metallogenic model of shallow-lake oil shale in the Tuanyushan area of Qaidam Basin: A case study of the well QCD-2[J]. *Geology and Exploration*, 59(5): 1103~1116 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yu, Wen Long, Zhan Weiyun, *et al.* 2023. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2045~2069 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Zhang Shaomin, Jin Tao, *et al.* 2023. Characteristics and exploration potential of shale reservoirs of Permian Longtan Formation in southern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 35(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haiyang, Suo Yanhui, Du Xiaodong, *et al.* 2021. Oligocene-Miocene provenance and paleoclimate of the Pearl River Mouth Basin: A case study of the Eastern Yangjiang Sag[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1): 53~63+69~73 (in Chinese with English abstract).

- Yu Xin, Yang Jianghai, Liu Jianzhong, *et al.* 2017. Provenance of the Late Permian Longtan Formation in SW Guizhou Province and implication for reconstruction of regional sedimentation and paleogeography [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1 374~1 385 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Changbo, Deng Mo, Cao Qinggu, *et al.* 2021. Basic characteristics and exploration potential of shale gas in Longtan Formation of Upper Permian in eastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 921~932(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hangfei, Wen Jun, Zhu Helin, *et al.* 2021. Geochemical characteristics and genesis of REE enrichment beds at the bottom of the Upper Permian Xuanwei Formation in Muchuan area, Sichuan Basin [J]. *Mineralogy and Petrology*, 41(2): 14~37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Peirong, Gao Bo, Guo Zhanfeng, *et al.* 2020. Exploration potential of marine-continental transitional and deep-water shelf shale gas in Upper Permian, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(3): 335~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2007. How to use the trace element diagram to determine tectonic settings[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 92~103 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qian, Mi Yuchuan, Zhao Yong, *et al.* 2024. Geochemical characteristics of the Yaichang phosphatic shale deposit in western margin of the Yangtze Block and its indications of the phosphorus-forming environment[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(5): 1 119~1 138 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yuanyuan, Qiu Nansheng, Teng Ge'er, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and the geological significance of oil shales from the Youganwo Formation, Maoming Basin, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1 270~1 279 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ze, Mu Xiwei, Wang Lingxia, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and significance of mudstone of the Longtan Formation in Yueliangtian Mining Area, western Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 37(1): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- 性、构造环境和影响因素[J]. *地球与环境*, 34(4): 75~83.
- 曹清古, 刘光祥, 张长江, 等. 2013. 四川盆地晚二叠世龙潭组沉积环境及其源控作用分析[J]. *石油实验地质*, 35(1): 36~41.
- 曹涛涛, 曹清古, 刘虎, 等. 2020. 川东地区海陆过渡相泥页岩地球化学特征及吸附性能[J]. *煤炭学报*, 45(4): 1 445~1 456.
- 曹涛涛, 邓模, 肖娟宜, 等. 2023. 海陆过渡相页岩储层特征及含气赋存机理——基于与海相页岩储层对比的认识[J]. *天然气地球科学*, 34(1): 122~139.
- 陈聪, 林良彪, 余瑜, 等. 2022. 四川盆地南部 CLD1 井龙潭组地球化学特征及古环境意义[J]. *成都理工大学(自然科学版)*, 49(2): 225~238.
- 陈建平, 李伟, 倪云燕, 等. 2018. 四川盆地二叠系烃源岩及其天然气勘探潜力(二)——烃源岩地球化学特征与天然气资源潜力[J]. *天然气工业*, 38(6): 33~41.
- 代辉, 钟摇, 熊琛, 等. 2021. 重庆云阳地区中侏罗世新田沟组底部细粒碎屑岩地球化学特征及意义[J]. *矿物岩石*, 41(1): 32~43.
- 董大忠, 邱振, 张磊夫, 等. 2021. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现[J]. *沉积学报*, 39(1): 29~45.
- 冯动军. 2023. 川东南二叠系龙潭组海-陆过渡相页岩气甜点评价及意义[J]. *石油与天然气地质*, 44(3): 778~788.
- 袁民汕, 蔡国盛, 曾道国, 等. 2021. 贵州西部二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳钨-铌-稀土矿化富集层的发现与意义[J]. *矿物学报*, 41(Z1): 531~547.
- 郝雪峰, 唐屹, 潘蒙, 等. 2024. 川南兴文地区上二叠统龙潭组黏土岩锂的富集特征及赋存状态[J]. *地质学报*, 98(5): 1 403~1 420.
- 何治亮, 聂海宽, 李双建, 等. 2021. 特提斯域板块构造约束下上扬子地区二叠系龙潭组页岩气的差异性赋存[J]. *石油与天然气地质*, 42(1): 1~15.
- 侯明才, 江文剑, 倪师军, 等. 2016. 伊犁盆地南缘中下侏罗统碎屑岩地球化学特征及对物源制约[J]. *地质学报*, 90(12): 3 337~3 361.
- 贾福福, 沙龙滨, 李冬玲, 等. 2020. 西伯利亚极地海域第四纪以来古海洋环境研究进展[J]. *极地研究*, 32(2): 250~263.
- 兰叶芳, 任传建, 潘士辉, 等. 2023. 黔西北大方地区龙潭组海陆过渡相烃源岩特征及评价[J]. *岩石矿物学杂志*, 42(6): 852~867.
- 李朋武. 2019. 华蓥西地区石炭系天然气成藏条件及有利勘探区带预测[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 2015. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 36(3): 481~487.

附中文参考文献

- 柏道远, 汪永清, 王先辉, 等. 2007. 湖南衡阳燕山早期川口过铝花岗岩地球化学特征、成因与构造环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 27(2): 49~59.
- 蔡观强, 郭锋, 刘显太, 等. 2006. 碎屑沉积物地球化学: 物源属

- 刘开鸾, 杨 帅, 陈洪德, 等. 2020. 川东华蓥山地区二叠纪火山岩特征及演化过程[J]. 矿物岩石, 40(1): 37~49.
- 刘海燕, 刘兴周, 蔡国刚, 等. 2025. 奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组沉积-地球化学环境恢复及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 44(2): 325~344.
- 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 2024. 地球多层圈有机-无机相互作用的资源效应[J]. 天然气地球科学, 35(5): 741~762.
- 刘天甲. 2023. 四川华蓥山地区下二叠统-中三叠统碎屑物质物源示踪研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1986. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~216.
- 罗香建, 卢树藩, 杜胜江, 等. 2019. 贵州上二叠统龙潭组煤系地层地球化学特征及物源分析: 来自黔普地1井的证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 130~136.
- 石 军, 邹艳荣, 余 江, 等. 2018. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组高有机碳页岩发育的古环境[J]. 天然气地球科学, 29(8): 1 138~1 150.
- 唐 勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷八城组烃源岩沉积古环境[J]. 天然气地球科学, 33(5): 677~692.
- 王随继, 任明达, 黄杏珍, 等. 1997. 柴达木盆地第三系粘土矿物横向分布规律及控制因素研究[J]. 沉积学报, 15(3): 157~157.
- 魏志福, 王永莉, 吴陈君, 等. 2015. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征及对有机质来源和沉积环境的指示意义[J]. 天然气地球科学, 26(6): 1 613~1 618.
- 肖富强, 章双龙, 补 星. 2020. 萍乐拗陷地区吴家坪期沉积环境的元素地球化学指标[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 43(3): 231~239.
- 徐银波, 毕彩芹, 孙平昌, 等. 2023. 柴达木盆地团鱼山地区浅湖油页岩特征、成因及成矿模式-以青柴地2井为例[J]. 地质与勘探, 59(3): 1 103~1 116.
- 杨 雨, 文 龙, 周 刚, 等. 2023. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 44(12): 2 045~2 069.
- 杨跃明, 张少敏, 金 涛, 等. 2023. 川南地区二叠系龙潭组页岩储层特征及勘探潜力[J]. 岩性油气藏, 35(1): 1~11.
- 于海洋, 索艳慧, 杜晓东, 等. 2021. 珠江口盆地渐-中新世古气候及物源特征: 以阳江东凹为例[J]. 大地构造与成矿学, 45(1): 53~63, 69~73.
- 于 鑫, 杨江海, 刘建中, 等. 2017. 黔西南晚二叠世龙潭组物源分析及区域沉积古地理重建[J]. 地质学报, 91(6): 1 374~1 385.
- 翟常博, 邓 模, 曹清古, 等. 2021. 川东地区上二叠统龙潭组泥页岩基本特征及页岩气勘探潜力[J]. 石油实验地质, 43(6): 921~932.
- 张航飞, 文 俊, 竹合林, 等. 2021. 四川沐川地区上二叠统宣威组底部稀土富集层地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石, 41(2): 24~37.
- 赵培荣, 高 洪, 马战峰, 等. 2020. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 42(3): 335~344.
- 赵振华. 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 31(1): 92~103.
- 周 骞, 米云川, 赵 勇, 等. 2024. 扬子西缘羊场磷铁矿地球化学特征及其对成磷环境的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 43(5): 1 119~1 138.
- 周圆圆, 邱楠生, 腾格尔, 等. 2016. 茂名油柑窝组油页岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1 270~1 279.
- 周 泽, 慕熙玮, 汪凌霞. 2020. 黔西月亮田矿区龙潭组泥岩地球化学特征及指示意义[J]. 贵州地质, 37(1): 24~30.