

宁高飞,曹涛涛,潘安阳,等.川南地区龙潭组泥页岩地球化学特征及其古环境意义——以兴文地区玉屏剖面为例[J].地球科学与环境学报,2025,47(6):1028-1046.

NING Gao-fei, CAO Tao-tao, PAN An-yang, et al. Geochemical Characteristics of Longtan Formation Mudstone and Shale in the Southern Sichuan, China and Their Paleoenvironmental Significance—Taking Yuping Section in Xingwen Area as an Example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2025, 47(6): 1028-1046.

DOI:10.19814/j.jese.2025.03015

# 川南地区龙潭组泥页岩地球化学特征 及其古环境意义

## ——以兴文地区玉屏剖面为例

宁高飞<sup>1</sup>, 曹涛涛<sup>1\*</sup>, 潘安阳<sup>2</sup>, 邓模<sup>2</sup>, 刘虎<sup>3</sup>, 曾嘉诚<sup>1</sup>, 陈焯<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126;

3. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川成都 610036)

**摘要:**中国南方二叠系龙潭组是海陆过渡相沉积的典型代表,广泛发育于四川盆地及周缘地区,其岩性以泥页岩、粉砂岩与煤层为主。前人对该层系的研究多集中于有机质丰度测定、类型划分及区域沉积相刻画,但是对于控制其有机质富集的关键古环境参数(如古气候、古盐度、氧化-还原条件等)的动态协同作用机制,以及在此背景下陆源有机质如何高效埋藏与保存,尚未形成系统性认识。为揭示川南地区上二叠统龙潭组泥页岩的源区属性、有机质富集机制及古环境演化特征,以四川兴文地区玉屏剖面为例,通过系统的野外地质调查和样品采集,结合有机地球化学、有机岩石学以及主量、微量和稀土元素等分析,系统表征了龙潭组沉积时期的源岩类型、古气候、古盐度和氧化-还原条件等关键古环境参数,揭示了龙潭组富有机质泥页岩的有机质特征与古环境演化过程,明确影响其有机质富集的关键地球化学控制因素。结果表明:四川兴文地区玉屏剖面龙潭组泥页岩总有机碳(TOC)较高(平均值为3.80%),有机显微组分以镜质组为主,干酪根类型为Ⅲ型,指示以陆源高等植物为主的倾气型烃源岩;源区以峨眉山高钛玄武岩为主,兼具花岗岩组分,其构造背景属于被动陆缘环境;化学蚀变指数(CIA)平均值为83.90,指示龙潭组泥页岩属于中等—高强度风化;Sr/Cu平均值为1.89, MgO/CaO平均值为1.99,反映兴文地区整体处于温暖湿润的古气候环境;Sr/Ba平均值为1.05, 100MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>平均值为3.76,指示湖泊水体为半咸水环境, Zr/Al值(平均值为 $8.25 \times 10^{-3}$ )与100Mn/Fe值(平均值为0.66)进一步证实近源浅水的沉积特征;V/(V+Ni)平均值(0.83)、Ni/Co平均值(4.77)与Ce<sub>anom</sub>平均值(0.04)共同指示弱还原—还原环境。综上所述,川南地区龙潭组富有机质泥页岩形成于温暖湿润气候下的半咸水海陆过渡环境;康滇古陆大火成岩省背景下,峨眉山高钛玄武岩经历强烈化学风化,产生大量细粒碎屑,同时高等植物繁茂,其残体得以快速搬运并埋藏于沉积盆地中;高沉积速率缩短了有机质与含氧水体的接触时间,弱还原—还原环境抑制有机质氧化分解,最终形成倾气型优质泥页岩。

**关键词:**元素地球化学;源岩;龙潭组;古气候;古盐度;氧化-还原条件;有机质;四川

**中图分类号:**TE122.2;P618.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2025)06-1028-19

收稿日期:2025-03-13;修回日期:2025-05-29 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

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);湖南省科技创新计划项目(2025RC3196)  
湖南省教育厅优秀青年基金项目(21B048);湖南省自然资源厅科研项目(20230149DZ)

\* 通信作者:曹涛涛(1987-),河南商丘人,教授,理学博士, E-mail:515165359@163.com.

# Geochemical Characteristics of Longtan Formation Mudstone and Shale in the Southern Sichuan, China and Their Paleoenvironmental Significance

—Taking Yuping Section in Xingwen Area as an Example

NING Gao-fei<sup>1</sup>, CAO Tao-tao<sup>1\*</sup>, PAN An-yang<sup>2</sup>, DENG Mo<sup>2</sup>, LIU Hu<sup>3</sup>,  
ZENG Jia-cheng<sup>1</sup>, CHEN Ye<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Wuxi 214126, Jiangsu, China; 3. Military-civil Integration Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610036, Sichuan, China)

**Abstract:** To investigate the provenance, organic matter enrichment mechanisms, and paleoenvironmental evolution of Upper Permian Longtan Formation mudstone and shale in southern Sichuan, the Yuping section in Xingwen area was selected as a case study; based on systematic field investigations, sampling, and integrated analyses, including organic geochemistry, organic petrology, and major, trace, and rare earth element measurements, key paleoenvironmental parameters (source rock type, paleoclimate, paleosalinity, and redox conditions) during the deposition of Longtan Formation were characterized; the organic matter characteristics and paleoenvironmental evolution of the organic-rich mudstone and shale were elucidated, and the primary geochemical controls on organic matter enrichment were identified. The results indicate that Longtan Formation mudstone and shale from Yuping section are characterized by relatively high total organic carbon (TOC), averaging 3.80%; the maceral composition is dominated by vitrinite, and kerogen is predominantly type III, suggesting a terrestrial higher plant origin and gas-prone source rock potential; the main provenance is attributed to high-Ti basalt from Emeishan large igneous province, with minor granitic input, consistent with an active continental margin setting; the average chemical index of alteration (CIA) of 83.90 reflects moderate to intense chemical weathering; paleoclimate proxies (averages of Sr/Cu and MgO/CaO ratios are 1.89 and 1.99) suggest generally warm and humid conditions; paleosalinity indicators (averages of Sr/Ba and 100MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios are 1.05 and 3.76) point to deposition in a brackish lacustrine environment; shallow-water, proximal deposition is supported by the average Zr/Al ratio ( $8.25 \times 10^{-3}$ ) and 100MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio (0.66); redox proxies (averages of V/(V+Ni) ratio, Ni/Co ratio and Ce<sub>anom</sub> are 0.83, 4.77 and 0.04) indicate weakly reducing to reducing conditions. In summary, the organic-rich mudstone and shale of Longtan Formation in the southern Sichuan are deposited in a brackish, marine-terrestrial transitional setting under warm and humid climatic conditions. Within the geological context of Kangdian paleocontinent large igneous province, intense chemical weathering of Emeishan high-Ti basalts produces abundant fine-grained detritus. Concurrently, dense vegetation contributes substantial terrestrial organic matter, which is rapidly transported and buried in the sedimentary basin. High sedimentation rates limit the exposure of organic matter to oxygenated waters, while weakly reducing to reducing conditions further suppress organic matter oxidation, ultimately leading to the formation of high-quality, gas-prone organic-rich mudstone and shale.

**Key words:** element geochemistry; source rock; Longtan Formation; paleoclimate; paleosalinity; redox condition; organic matter; Sichuan

## 0 引言

龙潭组是中国南方二叠系一套重要的海陆过渡相沉积地层,广泛分布于四川盆地及其周缘地区<sup>[1]</sup>。龙潭组岩性以泥页岩、粉砂岩和煤层为主,夹有少量灰岩和砂岩<sup>[2-3]</sup>,是中国南方地区最重要的烃源岩层系之一<sup>[4]</sup>。近年来,随着海相非常规页岩气资源勘探的不断发展,四川盆地五峰组—龙马溪组页岩层系取得重大突破,已在长宁、焦石坝、威远和泸州等地区实现了页岩气的商业化开发<sup>[5-9]</sup>。然而,相较于海相页岩气,海陆过渡相页岩气勘探与研究仍处于起步阶段,特别是四川盆地龙潭组页岩气的资源潜力及成藏机制仍有较多的科学问题尚未解决<sup>[10-11]</sup>。

前人针对四川盆地及周缘地区的龙潭组开展了大量研究,在地球化学特征与沉积环境方面取得了重要进展<sup>[12-14]</sup>。川南地区龙潭组泥页岩有机质丰度较高,总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)普遍大于2.0%,干酪根类型以Ⅲ型为主,展现出良好的生烃潜力<sup>[12]</sup>;沉积环境主要为潮坪—泻湖和三角洲前缘,且不同区段的水深、能量条件等因素存在显著的空间差异性<sup>[13]</sup>。马啸通过 Sr/Ba 值分析发现龙潭组沉积时期湖泊水体古盐度呈阶段性波动,受淡水输入与海水入侵等交替影响,指示了龙潭组沉积时期古环境变化的复杂性<sup>[14]</sup>。目前对龙潭组泥页岩的研究多侧重于有机质丰度的测定、类型划分以及区域沉积相带划分,然而对于有机质富集的具体机制尚未进行系统探讨。尽管学界普遍认为缺氧环境有利于有机质保存,但对于龙潭组沉积时期古气候、古盐度与氧化-还原条件的动态协同作用,以及它们是如何共同影响有机质富集的,目前研究还存在诸多不足,尚未形成系统性认识。这些问题的存在制约了对龙潭组泥页岩生烃潜力与分布规律的全面认识,也限制了海陆过渡相页岩气勘探的进一步突破。

基于此,本文选取四川兴文地区玉屏剖面龙潭组泥页岩为研究对象,通过详细的野外地质调查和样品采集,结合有机地球化学、有机岩石学以及主量、微量和稀土元素等分析,系统表征了龙潭组沉积时期的源岩类型、古气候、古盐度和氧化-还原条件等关键古环境参数,揭示了龙潭组富有机质泥页岩的有机质特征与古环境演化过程,明确了影响其有机质富集的关键地球化学控制因素,以为川南地区页岩气资源评价与勘探开发提供科学支撑。

## 1 区域地质背景

四川盆地作为中国重要的含油气盆地,其地质演化经历了多期构造运动的叠加与改造。晚二叠世龙潭组沉积时期,四川盆地处于扬子地块西北缘,受古特提斯洋闭合以及华南地块与华北地块碰撞的影响,盆地由被动大陆边缘逐渐向前陆盆地转换<sup>[15]</sup>。川南地区位于扬子地块西缘,其西紧邻川中隆起带,东接川鄂湘黔坳褶带,北与川东隔挡式褶皱带相接,构成了一个边界清晰、构造特征鲜明且规律性强的三角形构造域<sup>[16]</sup>。

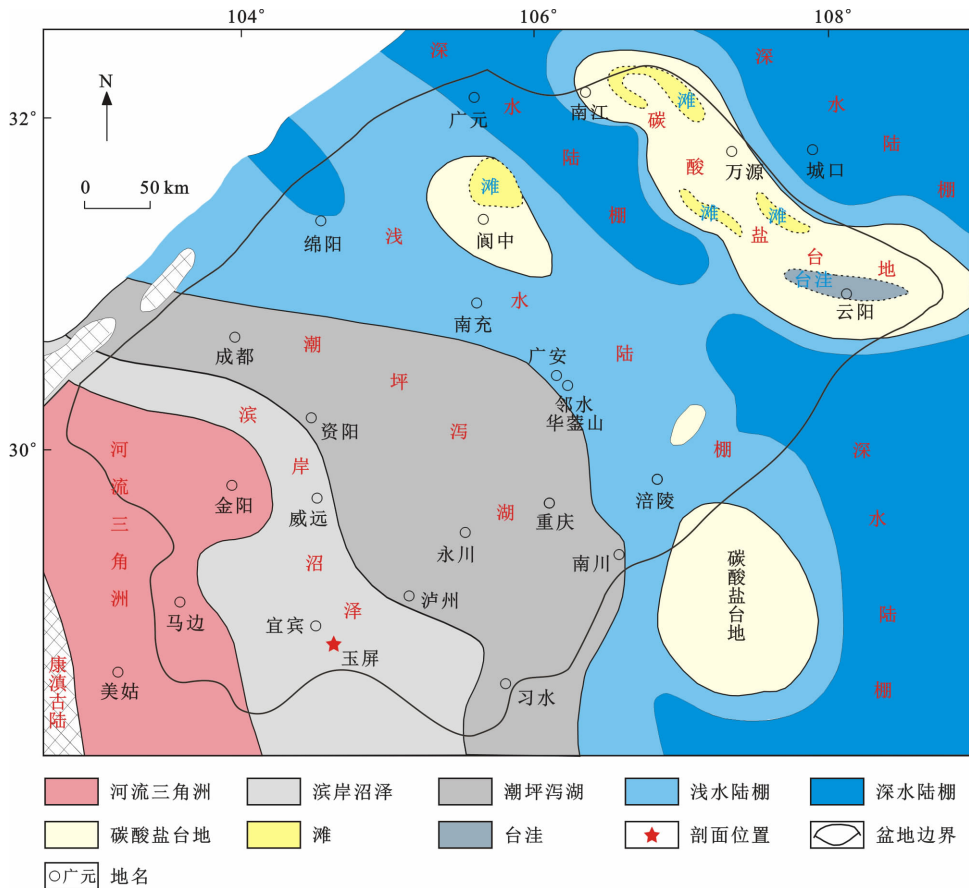
研究区位于四川省兴文县玉屏镇,实测剖面延伸约160 m,地层出露良好,主体地层在公路沿线均有清晰露头,仅少数路段被建筑遮盖。剖面自下至上依次为峨眉山玄武岩组、龙潭组和飞仙关组,均为不整合接触,层间界面清晰。其中,龙潭组主要形成于滨岸沼泽环境(图1),发育一套海陆过渡相含煤岩系,岩性以深灰色、黑色泥页岩为主,夹粉砂岩及薄煤层,泥页岩累计厚度约95 m。矿物成分中,黏土矿物含量(质量分数,下同)为40%~60%,硅质等脆性矿物含量较低;矿物经历了高热演化过程,总有机碳高,镜质体反射率( $R_o$ )普遍大于2.0%,处于过成熟阶段,以生成干气为主<sup>[17]</sup>。这些优越的地质条件为川南地区页岩气藏的形成奠定了坚实基础。

## 2 样品采集及分析方法

本次研究在四川兴文地区玉屏剖面共采集20件泥页岩样品,主要用于开展有机质特征、矿物组成及元素地球化学测试。样品在剖面上的采集位置如图2所示。有机岩石学、有机地球化学、矿物组成与元素地球化学分析均在中国石化石油勘探开发研究院页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室完成。

矿物成分分析采用布鲁克公司(Bruker)生产的D8 ADVANCE型X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)仪完成。实验依据石油天然气行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2010)<sup>[18]</sup>进行。测试条件如下:X射线光源为铜靶( $CuK\alpha$ , 波长 $\lambda$ 为0.154 nm),工作电压和电流分别设置为40 kV和40 mA,扫描角度( $2\theta$ )为 $3^\circ\sim 85^\circ$ ,狭缝宽度为1 mm。样品制备过程中,岩石样品经粉碎、研磨后过200目筛,并按照标准要求制备定向片,以确保测试结果的准确性和可重复性。

总有机碳测定采用LECO CS-230碳硫分析仪,



图件引自文献[12],有所修改

图 1 川南地区龙潭组沉积相分布

Fig. 1 Sedimentary Facies Map of Longtan Formation in the Southern Sichuan

测试精度误差保持在 3% 以内。显微组分分析依据石油天然气行业标准《全岩光片显微组分鉴定及统计方法》(SY/T 6414—2014)<sup>[19]</sup>,在 MPV-3 型显微光度计上执行,通过定量统计不同组分分布情况确定其含量。泥页岩样品制备成干酪根后,使用 Delta V Advantage 稳定同位素质谱仪进行碳同位素测试。

金属元素(含主量与微量元素)测试需先将泥页岩样品粉碎至粒径小于 100 μm,烘干冷却后称取 0.5 g 置于四氟乙烯烧杯中,加入 1 mL 去离子水润湿,利用 HNO<sub>3</sub>+HF 混合试剂分解,随后通过 VISTA MPX 型电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)仪测定。稀土元素测试采用过氧化钠熔融法分解样品,分析前用 HNO<sub>3</sub> 溶解沉淀,使用 X SERIES 2 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪测定,所得元素分析数据相对误差小于 5%。

### 3 结果分析

#### 3.1 岩石矿物学特征

根据野外地质工作和以往的钻井资料,川南地

区龙潭组的岩性组合在垂向上可划分为 3 段:下段以泥质岩为主,夹煤层和粉砂岩;中段为灰色粉砂岩,夹泥质岩和煤层;上段为黄灰色砂岩,夹深灰色泥岩。

通过野外露头 and 岩石薄片观察(图 3),龙潭组烃源岩可划分为 3 类:①含粉砂含碳质泥岩,以灰黑色至深灰色为主,粒度较细,普遍发育水平层理,含少量粉砂,碳质颗粒较为丰富;②含碳质泥岩,整体较为均质,颜色较深,粉砂组分极少,有机质含量较高;③含碳质菱铁矿质泥岩,多呈灰黑色,富含碳质,常见菱铁矿集合体。

X 射线衍射分析(样品数为 15 个)表明,川南地区龙潭组泥页岩矿物组成具有显著非均质性(图 4)。黏土矿物为主要组分,含量为 52%~90%(平均值为 70%),脆性矿物组分(石英、长石及碳酸盐矿物等)总含量为 12%~65%(平均值为 29%),其中石英含量占脆性矿物总含量的 79.3%。碳酸盐矿物以方解石和白云石为主(含量为 5%~38%),菱铁矿局部富集(最高为 27%),重晶石呈微量分布(<3%)。基于矿物组构特征,本文采用矿物组构分法

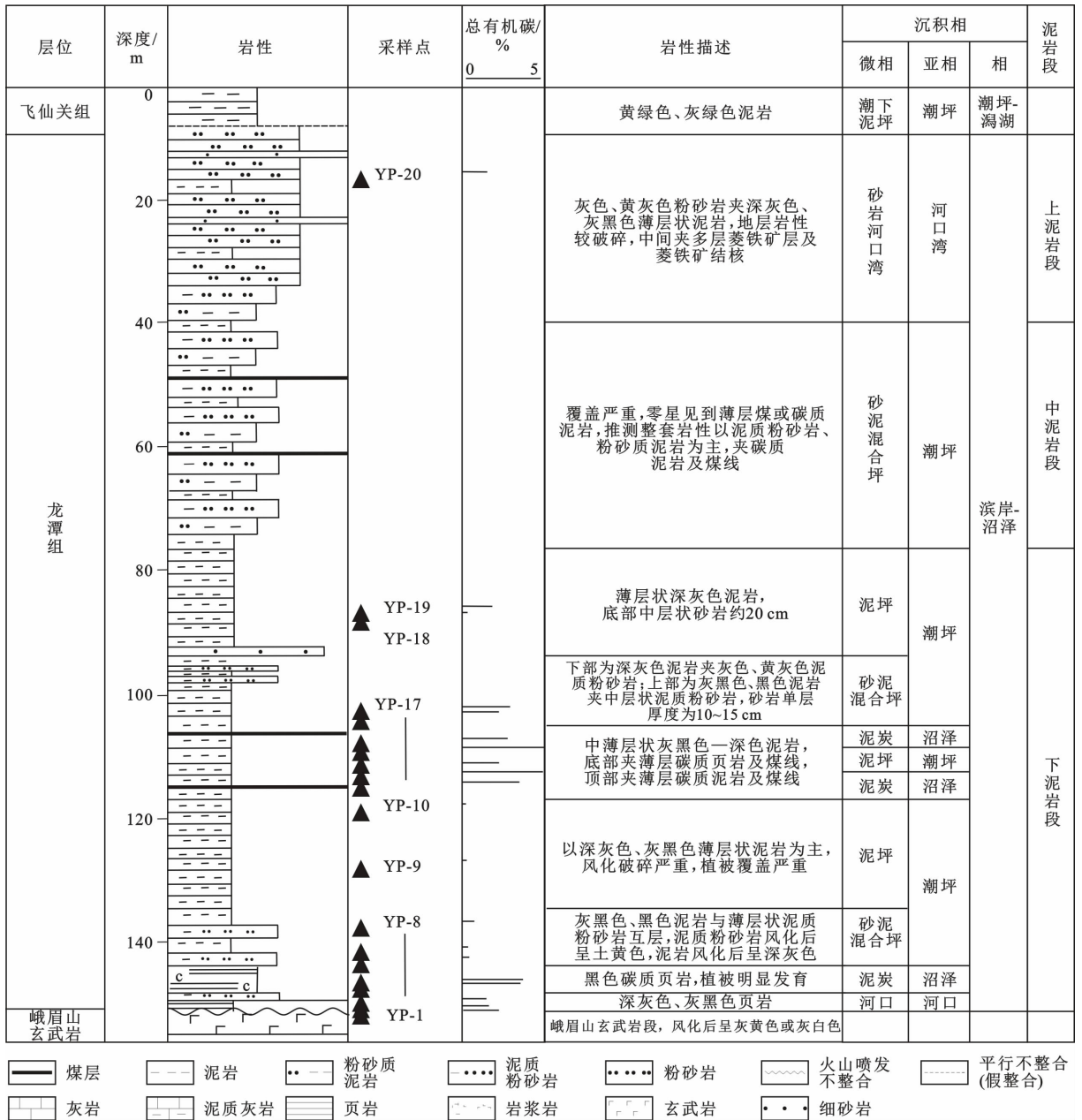


图2 兴文地区玉屏剖面龙潭组综合岩性柱状图

Fig. 2 Comprehensive Lithologic Column of Longtan Formation in Yuping Section of Xingwen Area

计算脆性指数( $I_{BI}$ )。其计算公式为

$$I_{BI} = \frac{w_{Qz} + w_{Car} + w_{Fels}}{w_{Qz} + w_{Car} + w_{Fels} + w_{Clay}} \quad (1)$$

式中: $w_{Qz}$ 为石英含量; $w_{Car}$ 为碳酸盐矿物含量; $w_{Fels}$ 为长石含量; $w_{Clay}$ 为黏土矿物含量<sup>[20]</sup>。

计算结果显示,脆性指数介于0.10~0.64(平均值为0.26),表明岩层整体可压裂性较差。

### 3.2 有机质特征

兴文地区玉屏剖面20件泥页岩样品的总有机碳为0.22%~31.08%,平均值为3.80%[图5(a)]。绝大多数样品的总有机碳为1%~4%,少部分样品

的总有机碳为0%~1%或4%~32%。

光学显微镜观察得到,龙潭组泥页岩中的有机显微组分以镜质组和惰质组为主(图6)。其中,镜质组含量为59.0%~97.2%,平均值为85.51%;惰质组含量为0%~31%,平均值为11.75%。其他有机显微组分在龙潭组泥页岩中的含量极少,不发育腐泥组,仅含有少量的壳质组和碎屑组[图5(b)],二者的含量平均值分别为2.5%和0.2%。

龙潭组泥页岩的干酪根碳同位素值为-23.9‰~-22.3‰,同位素组成整体偏重,类型为Ⅲ型干酪根,呈现倾气型烃源岩的特征。根据Ⅲ型

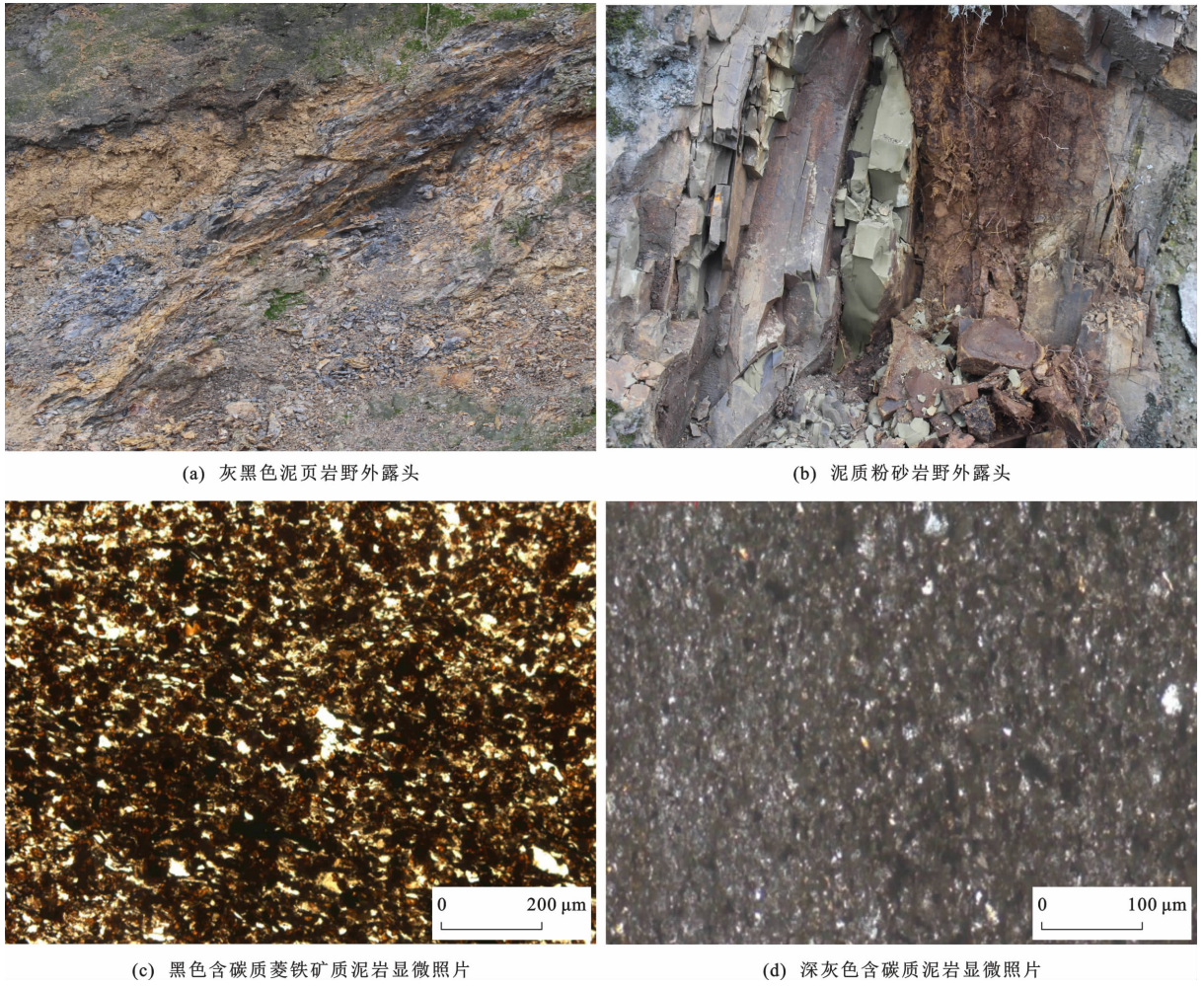


图 3 龙潭组野外露头及显微照片

Fig. 3 Field Photographs and Micrographs of Longtan Formation

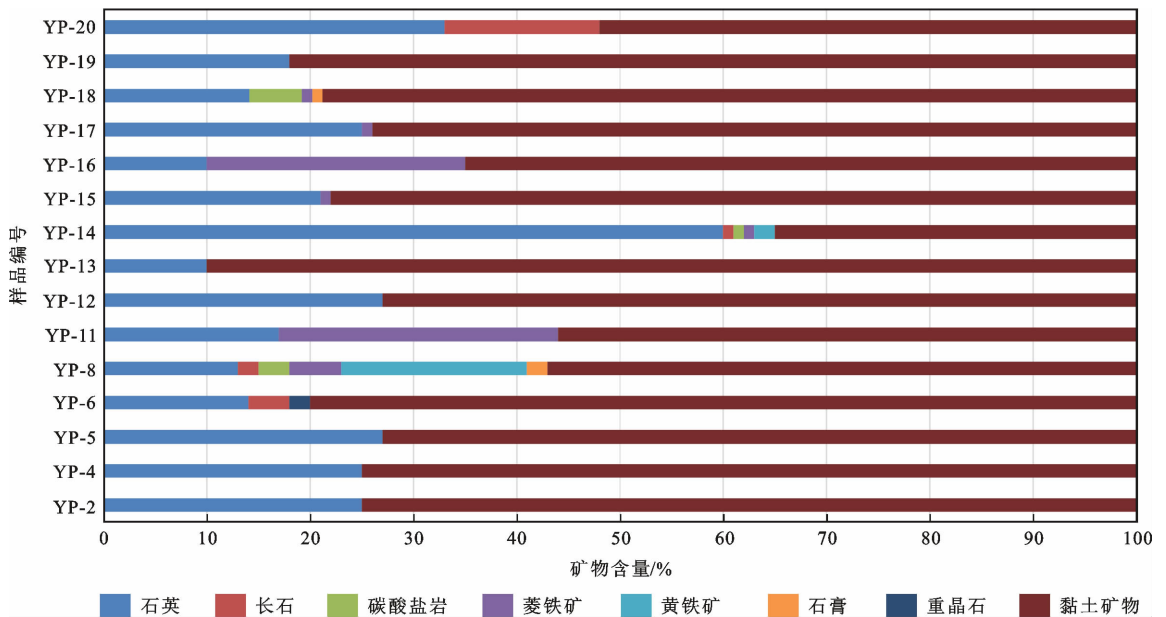


图 4 龙潭组泥页岩全岩矿物组成分布

Fig. 4 Whole-rock Mineral Composition Distribution of Longtan Formation Mudstone and Shale

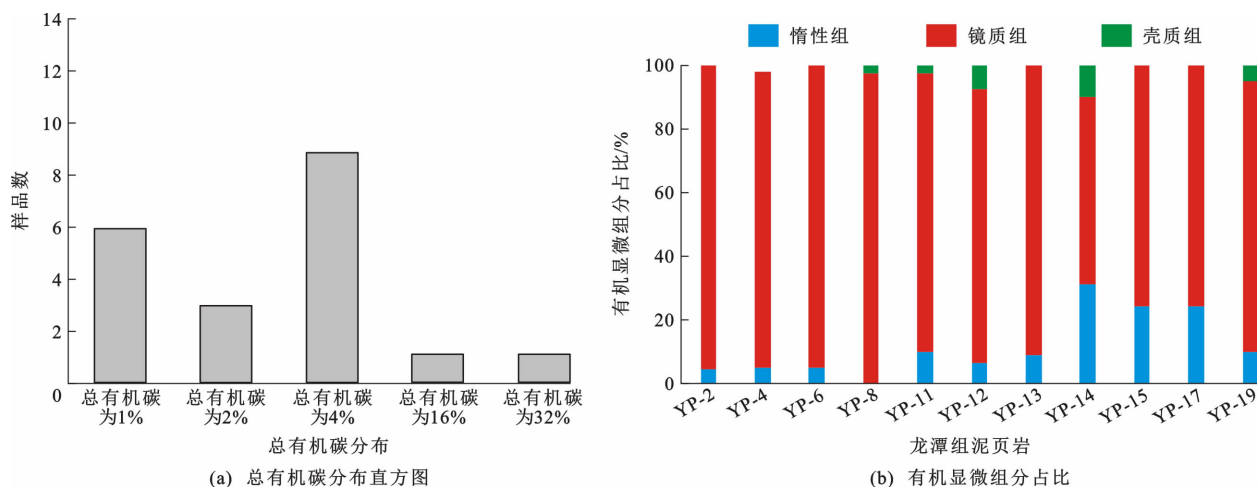


图5 龙潭组泥页岩有机质特征

Fig. 5 Organic Matter Characteristics of Longtan Formation Mudstone and Shale

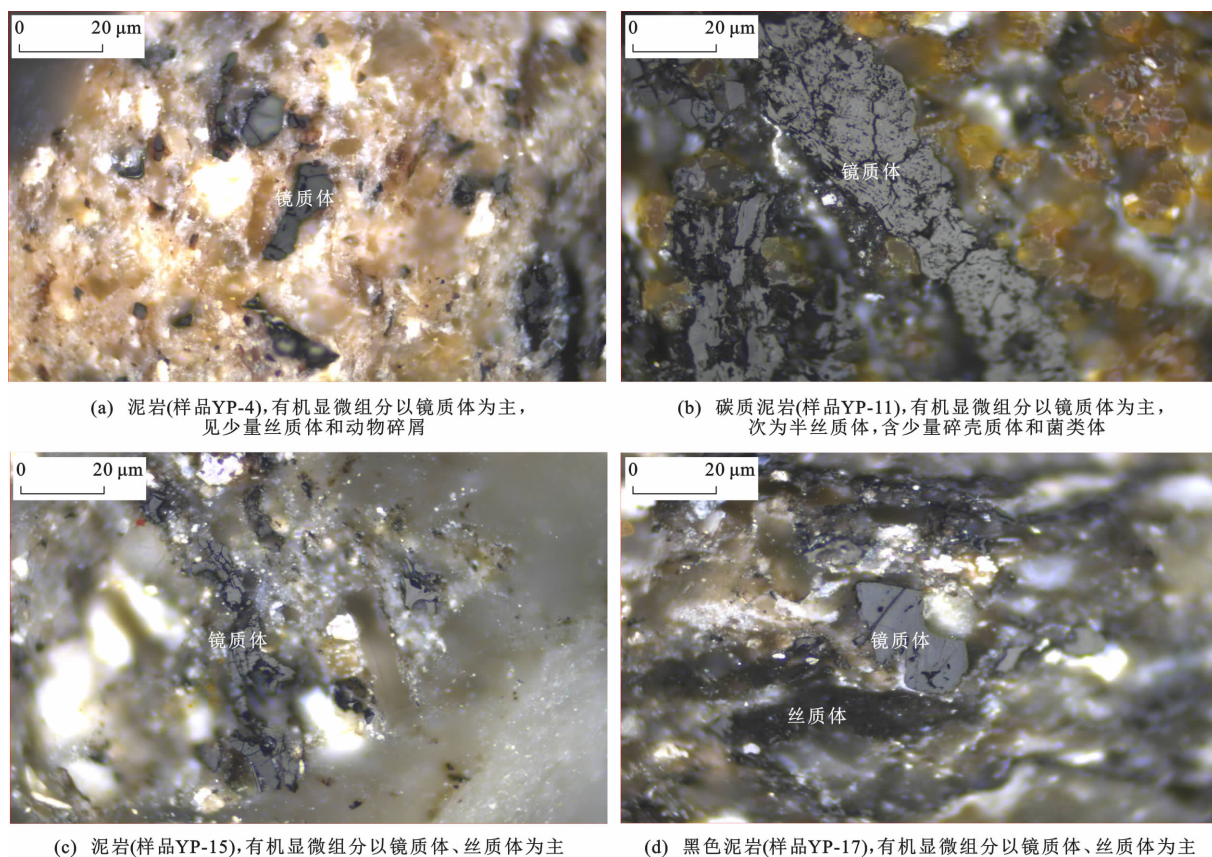


图6 龙潭组泥页岩有机显微组分照片

Fig. 6 Photographs of Organic Maceral Components of Longtan Formation Mudstone and Shale

有机质生烃演化模式,当镜质体反射率大于等于0.5%时,干酪根热降解作用直接进入生气阶段<sup>[21-22]</sup>。研究区龙潭组泥页岩镜质体反射率为1.07%~1.93%,平均值为1.58%,显著高于Ⅲ型干酪根生气门限,表明该泥页岩处于高成熟生气阶段。

### 3.3 主量元素特征

研究区龙潭组泥页岩的主量元素包括  $Al_2O_3$ 、

$Fe_2O_3$ 、 $TiO_2$  和  $K_2O$  等(表1)。其中,  $Al_2O_3$  含量为7.45%~20.86%,平均值为15.06%;  $Fe_2O_3$  含量为0.79%~46.95%,平均值为7.41%;  $TiO_2$  含量为0.49%~4.91%,平均值为3.29%;  $K_2O$  含量为0.24%~2.85%,平均值为1.37%。相较于上述成分,  $CaO$ 、 $MgO$ 、 $MnO$  和  $Na_2O$  等主量元素在泥页岩中的含量相对较低。其中,  $CaO$  平均含量为0.68%,  $MgO$  平均含量为0.59%,  $MnO$  平均含量为

表 1 龙潭组泥页岩主量元素分析结果

Table 1 Analysis Results of Major Element of Longtan Formation Mudstone and Shale

参数	YP-1	YP-2	YP-4	YP-5	YP-6	YP-8	YP-12	YP-13	YP-14	YP-17	YP-19	YP-20	样品平均值	PAAS
岩性	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	煤线	泥岩	煤线	黑色泥岩	灰黑色碳质泥岩	泥岩		
总有机碳/%	2.17	1.65	3.62	3.80	0.47	0.78	12.03	2.32	31.08	3.01	2.17	1.56	5.42	
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	20.86	18.24	12.51	13.95	14.99	8.19	14.91	18.60	7.45	16.93	18.47	15.67	15.06	18.80
w(CaO)/%	0.22	0.16	0.23	0.20	0.06	4.04	0.17	0.14	0.19	0.97	0.51	1.29	0.68	1.29
w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	0.79	1.48	0.76	1.06	1.25	46.95	1.25	1.26	3.02	4.56	14.54	11.97	7.41	7.18
w(K <sub>2</sub> O)/%	2.85	2.36	1.56	1.50	2.02	0.27	0.85	1.03	0.24	1.33	0.73	1.71	1.37	3.68
w(MgO)/%	0.52	0.46	0.29	0.31	0.28	0.14	0.33	0.40	0.22	0.72	1.49	1.94	0.59	2.19
w(MnO)/%	0.003	0.002	0.004	0.006	0.010	0.810	0.012	0.018	0.030	0.016	0.012	0.050	0.080	0.110
w(Na <sub>2</sub> O)/%	0.12	0.11	0.16	0.15	0.55	0.04	0.12	0.16	0.03	0.18	0.08	0.63	0.19	1.19
w(TiO <sub>2</sub> )/%	3.98	3.97	4.14	4.31	2.40	1.22	2.78	4.91	0.49	4.35	3.97	2.97	3.29	0.99

注:w(·)为元素或化合物含量。

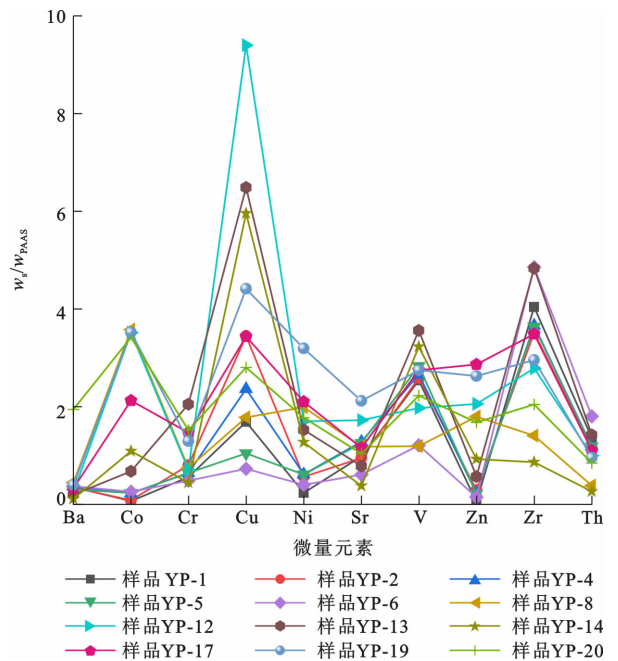
0.08%, Na<sub>2</sub>O 平均含量为 0.19%。与澳大利亚后太古宙平均页岩 (Post-Archean Australian Shale, PAAS)<sup>[23]</sup> 相比,本文中泥页岩样品的大部分主量元素含量相对较低且变化较大。此外,样品中 MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1.05%~47.09%, 平均值为 8.00%, 表明铁镁组分较为丰富。这主要与泥页岩中菱铁矿的广泛发育有关,沉积过程中菱铁矿的持续沉淀与局部富集提升了样品中 Fe 含量<sup>[24]</sup>。

### 3.4 微量元素特征

玉屏剖面龙潭组泥页岩的微量元素分析结果见表 2。样品中 Ba 含量为 (73.80~1 266.21) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 294.13 × 10<sup>-6</sup>; Co 含量为 (1.53~82.29) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 36.06 × 10<sup>-6</sup>; Cr 含量为 (49.42~225.76) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 104.29 × 10<sup>-6</sup>; Cu 含量为 (36.41~470.44) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 181.62 × 10<sup>-6</sup>; Ni 含量为 (12.91~175.76) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 73.30 × 10<sup>-6</sup>; Sr 含量为 (75.56~423.73) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 224.48 × 10<sup>-6</sup>; V 含量为 (178.94~534.84) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 369.08 × 10<sup>-6</sup>; Zn 含量为 (4.17~243.82) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 95.37 × 10<sup>-6</sup>; Zr 含量为 (181.85~1 019.82) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 666.87 × 10<sup>-6</sup>; Th 含量为 (3.89~26.33) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 15.40 × 10<sup>-6</sup>。与澳大利亚后太古宙平均页岩<sup>[25]</sup> 对比发现,玉屏剖面龙潭组泥页岩 Ba、Cr 等略有亏损,而 Co、Cu、Ni、Sr、V、Zr、Zn 和 Th 等富集程度较高(图 7)。

### 3.5 稀土元素特征

稀土元素因其化学性质相近,在地质作用过程中表现出系统的分异特征,故被广泛用于指示沉积岩的形成环境与物质来源<sup>[26-27]</sup>。玉屏剖面龙潭组泥



w<sub>s</sub> 为样品含量;w<sub>PAAS</sub>为澳大利亚后太古宙平均页岩含量

图 7 龙潭组泥页岩 PAAS 标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 PAAS-normalized Trace Element Spider Diagram of Longtan Formation Mudstone and Shale

页岩稀土元素总含量整体处于较高水平,为 (172.38~1 187.73) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 575.96 × 10<sup>-6</sup> (表 3),明显高于球粒陨石含量 (3.29 × 10<sup>-6</sup>)、北美页岩 (North American Shale Composite, NASC) 含量 (173.21 × 10<sup>-6</sup>) 及上地壳含量 (146.40 × 10<sup>-6</sup>) 等标准值<sup>[25]</sup>,表明龙潭组泥页岩具有显著的稀土元素富集特征。其中,轻稀土元素 (LREE) 总含量为 (155.50~1 087.52) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 519.05 × 10<sup>-6</sup>;重稀土元素 (HREE) 总含量为 (16.87~100.21) × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 56.91 × 10<sup>-6</sup>。

表2 龙潭组泥页岩部分微量元素分析结果

Table 2 Analysis Results of Some Trace Element of Longtan Formation Mudstone and Shale

参数	YP-1	YP-2	YP-4	YP-5	YP-6	YP-8	YP-12	YP-13	YP-14	YP-17	YP-19	YP-20	样品平均值	PAAS
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	233.41	225.01	238.81	204.00	244.45	289.60	159.98	126.86	73.80	211.80	255.63	1266.21	294.13	650.00
$w(\text{Co})/10^{-6}$	1.53	1.96	5.26	5.31	5.93	82.29	80.97	15.67	25.16	48.91	80.99	78.72	36.06	23.00
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	61.90	88.37	70.78	70.78	53.74	81.86	77.50	225.76	49.42	161.62	142.57	167.24	104.29	110.00
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	84.54	172.57	118.11	52.19	36.41	89.20	470.44	324.56	297.96	172.06	221.00	140.37	181.62	50.00
$w(\text{Li})/10^{-6}$	36.52	38.83	26.30	28.47	19.21	27.39	22.00	51.47	27.88	33.66	37.38	57.39	33.88	
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	12.91	31.19	33.90	33.69	21.95	109.37	93.51	84.10	69.91	115.62	175.76	97.67	73.30	55.00
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	196.61	189.50	256.58	251.50	121.70	236.95	345.13	156.79	75.56	232.00	423.73	207.73	224.48	200.00
$w(\text{V})/10^{-6}$	381.28	388.37	399.73	425.10	181.31	178.94	296.43	534.84	484.42	412.17	412.46	333.87	369.08	150.00
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	4.17	24.91	19.28	18.67	12.65	152.82	174.76	48.45	78.85	243.82	223.45	142.64	95.37	85.00
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	849.17	738.54	769.93	763.21	1019.82	295.99	585.68	1015.22	181.85	732.36	620.81	429.90	666.87	210.00
$w(\text{Th})/10^{-6}$	19.88	16.84	17.22	17.31	26.33	5.58	14.62	20.78	3.89	16.07	13.93	12.36	15.40	14.60

表3 龙潭组泥页岩稀土元素分析结果

Table 3 Analysis Results of Rare Earth Element of Longtan Formation Mudstone and Shale

参数	YP-1	YP-2	YP-4	YP-5	YP-6	YP-8	YP-12	YP-13	YP-14	YP-17	YP-19	YP-20	样品平均值	北美页岩	球粒陨石
$w(\text{La})/10^{-6}$	113.75	121.99	125.49	123.19	94.26	41.62	236.78	93.08	35.12	95.48	92.25	69.50	103.54	32.00	0.31
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	251.09	314.46	318.61	306.17	191.24	129.71	560.81	216.95	77.10	229.12	221.42	197.20	251.16	73.00	0.81
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	26.06	39.56	34.05	33.92	19.02	17.90	53.52	21.24	7.93	25.82	23.94	18.05	26.75	7.90	0.12
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	95.96	182.07	147.57	153.07	63.10	97.58	208.98	76.32	28.73	108.35	97.45	73.64	111.07	33.00	0.60
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	15.41	39.23	30.13	32.41	9.25	31.31	22.61	11.04	5.37	22.09	18.39	13.33	20.88	5.70	0.20
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	3.67	8.84	7.17	7.93	1.86	15.90	4.82	2.00	1.25	5.36	5.54	3.45	5.65	1.24	0.07
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	15.91	35.54	26.63	30.59	11.46	29.36	27.41	12.28	6.81	21.47	18.21	12.98	20.72	5.20	0.26
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	2.22	4.57	3.27	3.81	1.76	3.57	3.79	1.88	0.89	2.83	2.40	1.70	2.72	0.85	0.05
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	12.66	22.13	15.99	18.64	10.87	16.98	24.58	11.89	4.39	14.78	12.82	9.09	14.57	5.80	0.32
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	2.42	3.76	2.80	3.24	2.14	2.91	5.54	2.41	0.76	2.68	2.35	1.68	2.72	1.04	0.07
$w(\text{Er})/10^{-6}$	7.04	10.01	7.61	8.58	6.16	7.68	17.59	7.19	1.99	7.55	6.61	4.69	7.72	3.40	0.21
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.98	1.29	0.98	1.13	0.86	1.02	2.55	1.02	0.29	1.03	0.89	0.65	1.06	0.50	0.03
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	6.12	7.92	6.02	6.72	5.13	6.23	16.29	6.30	1.54	6.35	5.25	3.93	6.48	3.10	0.21
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.86	1.06	0.80	0.91	0.70	0.89	2.47	0.88	0.22	0.89	0.73	0.55	0.91	0.48	0.03
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	554.13	792.41	727.11	730.30	417.82	402.65	1187.73	464.48	172.38	543.80	508.24	410.45	575.96	173.21	3.29
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	505.94	706.14	663.03	656.68	378.73	334.02	1087.52	420.63	155.50	486.22	458.98	375.18	519.05	152.84	2.11
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	48.19	86.27	64.08	73.62	39.09	68.63	100.21	43.84	16.87	57.58	49.26	35.27	56.91	20.37	1.18
$\delta\text{Eu}$	0.76	0.77	0.83	0.82	0.59	1.71	0.63	0.56	0.67	0.80	0.98	0.85	0.83		
$\delta\text{Ce}$	1.10	1.08	1.16	1.13	1.08	1.13	1.19	1.16	1.10	1.10	1.12	1.33	1.14		
$\text{Ce}_{\text{anom}}$ 值	0.02	0.03	0.05	0.03	-0.01	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.11	0.04		

注： $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量； $w_{\text{LREE}}$ 为轻稀土元素总含量； $w_{\text{HREE}}$ 为重稀土元素总含量； $\delta\text{Eu}$ 为Eu异常； $\delta\text{Ce}$ 为Ce异常； $\text{Ce}_{\text{anom}}$ 值为Ce异常指数，其计算方法引自文献[28]。

轻、重稀土元素含量比值(LREE/HREE)平均值为9.21,显示轻、重稀土元素分异明显,整体具有轻稀土元素富集特征。

经北美页岩标准化(图8)与球粒陨石标准化(图9)后<sup>[29-30]</sup>,样品同样表现出轻稀土元素富集、重

稀土元素相对亏损的配分模式。 $\delta\text{Eu}$ 与 $\delta\text{Ce}$ 的平均值分别为0.83和1.14,整体表现为Eu负异常与Ce正异常,指示沉积环境以还原为主<sup>[31]</sup>。球粒陨石标准化稀土元素配分模式(图9)显示:样品YP-1、YP-2与YP-4曲线右倾且形态相似,反映其可能

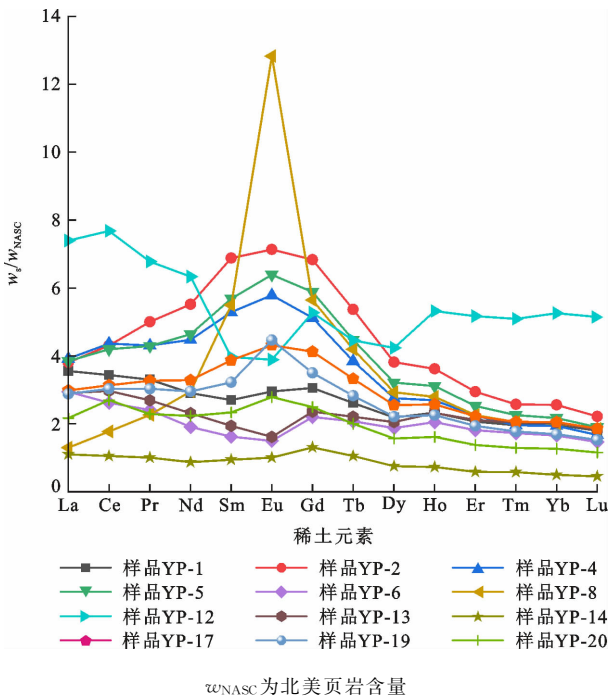


图 8 龙潭组泥页岩 NASC 标准化稀土元素配分模式

Fig. 8 NASC-normalized REE Pattern of Longtan Formation Mudstone and Shale

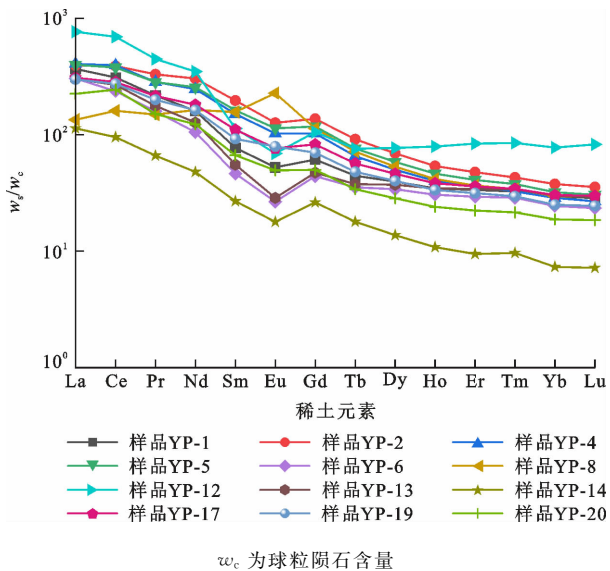


图 9 龙潭组泥页岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 9 Chondrite-normalized REE Pattern of Longtan Formation Mudstone and Shale

源自相似的沉积环境或经历了相似的成岩过程;而样品 YP-8 则呈现明显的 Eu 正异常,稀土元素配分模式显著区别于其他样品。

## 4 讨论

### 4.1 源区构造背景

在沉积岩源区构造背景分析中,前人常结合稀土元素与微量元素(例如 Co、Th、Zr、La、Sc 等)的组

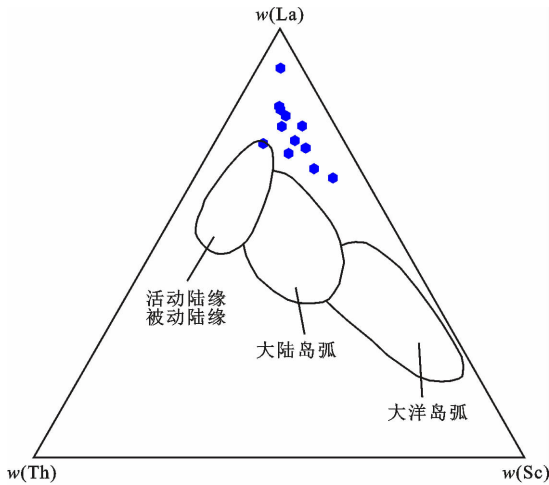
合特征及其判别参数进行判断。Bhatia 提出的 Th-Sc-Zr/10、La-Th-Sc 和 Th-Co-Zr/10 等构造环境判别图解<sup>[32]</sup>在源区构造背景研究领域得到广泛应用。研究区多数泥页岩样品分布在被动陆缘区域,但有少量样品落入被动陆缘与大陆岛弧或大洋岛弧的过渡区域(图 10)。结合区域构造演化背景,玉屏剖面位于扬子地块西缘,晚二叠世受东吴运动及峨眉山大火成岩省活动的共同影响,源区经历了多期构造事件叠加改造,表现出复杂的构造背景和源区混合特征<sup>[33]</sup>。这一现象与柏道远等提出的观点<sup>[34]</sup>一致,即被动陆缘沉积物可能继承多构造背景的原岩组分(如活动陆缘或岛弧物质),其地球化学特征常表现为多源混合属性。杨跃明等研究认为,峨眉山玄武岩喷发后,区域构造活动性显著减弱,逐渐演化为稳定的被动陆缘环境,为龙潭组海陆过渡相泥页岩的广泛沉积提供了构造条件<sup>[35]</sup>。综上所述,尽管龙潭组泥页岩的源区存在多源混合特征,但其主体构造背景仍属被动陆缘环境。

### 4.2 源区岩石类型

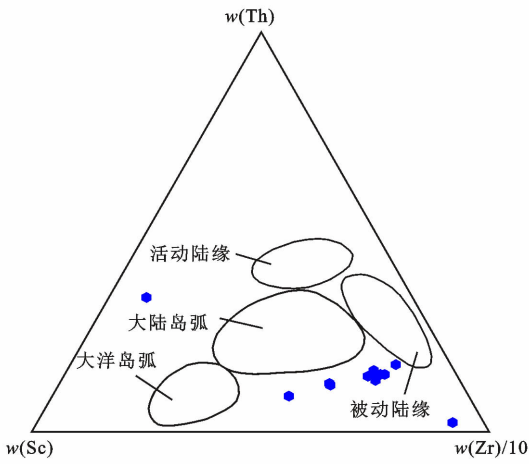
微量元素与稀土元素的地球化学分析是追溯泥页岩源区的重要手段。地质过程中,这些元素在沉积水体里的停留时间短暂,且化学活性较低,致使它们在风化搬运阶段能够迅速进入细粒沉积物之中,并展现出较强的抗迁移特性<sup>[36]</sup>。

由 La/Sc-Co/Th 图解及 REE-La/Yb 图解(图 11)可知<sup>[32,37]</sup>,研究区龙潭组泥页岩样品主要集中于花岗岩与玄武岩区域附近以及二者的交汇地带。另外,δEu 值作为判断母岩属性的关键参数之一,其呈现出的负异常(即 δEu 低于 1)特征与酸性火成岩(如花岗岩)所表现出的 Eu 负异常特征相吻合。在酸性岩浆结晶分异过程中,斜长石会优先结晶析出,并且在此过程中大量富集 Eu,导致残余岩浆出现 Eu 亏损的现象,形成了具有 Eu 负异常特征的岩石<sup>[38]</sup>。因此,泥页岩中 Eu 负异常特征暗示着其部分物源可能来源于花岗岩。综合分析来看,龙潭组泥页岩的源岩类型可能既包含玄武岩,也有花岗岩的贡献。

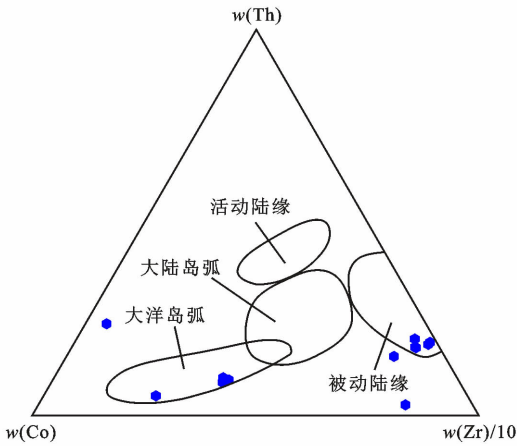
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值是判识源岩类型的另一个重要参数。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值小于 14 时指示铁镁质基性火山岩,而当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值为 14~28 时则大多指示长英质岩石<sup>[39]</sup>。龙潭组泥页岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值为 3.02~15.18,仅 1 个样品高于 14.00,故主要源岩类型为基性火山岩。研究区龙潭组泥页岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 图解<sup>[40]</sup>与峨眉山高钛玄武岩的



(a) La-Th-Sc图解



(b) Th-Sc-Zr/10图解



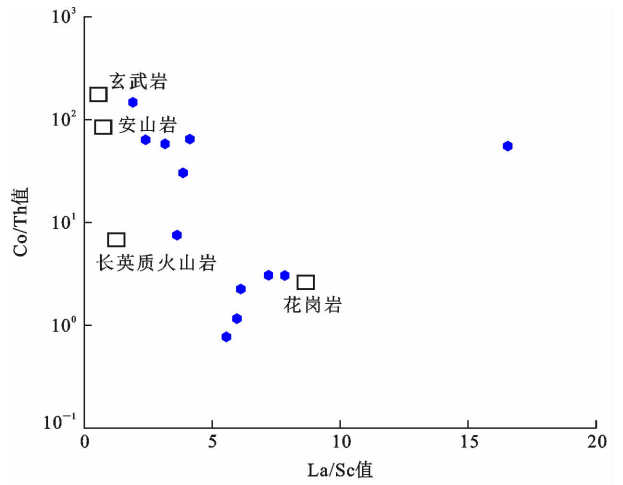
(c) Th-Co-Zr/10图解

底图引自文献[32],有所修改

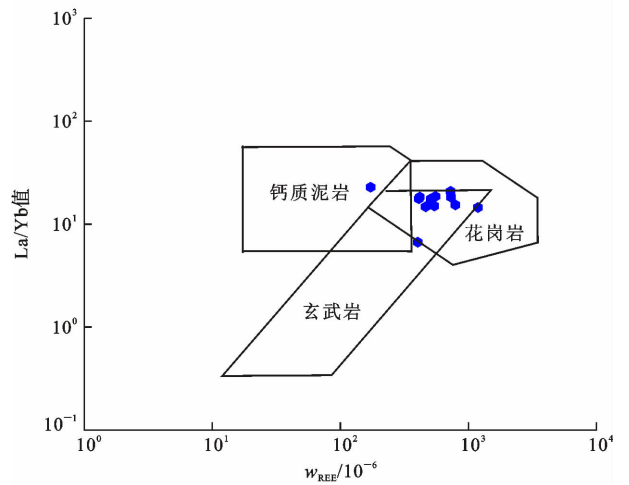
图 10 龙潭组泥页岩构造环境判别图解

Fig. 10 Discrimination Diagrams of Tectonic Environments of Longtan Formation Mudstone and Shale

分布位置高度吻合(图 12),进一步支持其主要源自峨眉山高钛玄武岩的认识。四川盆地中二叠世峨眉山玄武岩曾发生大规模喷发,盆地西南部出现隆升并伴随强剥蚀作用<sup>[41-42]</sup>,由此认为峨眉山玄武岩是



(a) La/Sc-Co/Th图解



(b) REE-La/Yb图解

图件引自文献[32]和[37],有所修改

图 11 龙潭组泥页岩源岩性质判别图解

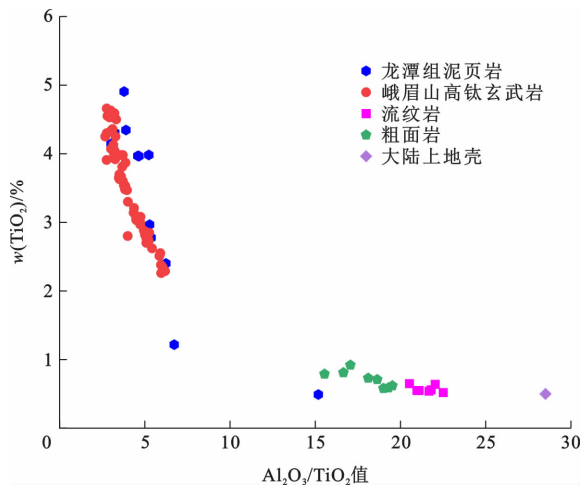
Fig. 11 Discrimination Diagrams of Source Rock Property of Longtan Formation Mudstone and Shale

川南地区龙潭组的主要源区,为该地区泥页岩的形成提供了重要的物质来源。综上所述,研究区龙潭组泥页岩的源区组成较为复杂,整体上以玄武岩为主,但同时也包含了一定比例的花岗岩。

### 4.3 沉积环境

#### 4.3.1 古风化与古气候

化学蚀变指数(Cheical Index of Alteration, CIA)是用于衡量岩石化学风化强度的重要量化指标。其计算公式详见文献[43]和[44]。根据化学蚀变指数分布范围,可定量评价源区风化强度。当化学蚀变指数超过 80 时,标志着源岩经历了高强度风化作用;当化学蚀变指数为 60~80 时,则表明源岩受到中等强度风化作用<sup>[45]</sup>。研究区龙潭组泥页岩样品的化学蚀变指数为 59.51~91.99(平均值为 83.90,样品数为 12 个)(图 13)。其中,样品 YP-8



图件引自文献[40],有所修改

图 12 龙潭组泥页岩  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-TiO}_2$  图解

Fig. 12 Diagram of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-TiO}_2$  of Longtan Formation Mudstone and Shale

(化学蚀变指数为 59.51)和样品 YP-20(化学蚀变指数为 74.98)分别属于弱和中等强度风化,其余 10 件样品的化学蚀变指数均大于 80,反映了龙潭组源岩经历了中等—高强度风化作用。从龙潭组底部向上,化学蚀变指数呈现“长时间稳定→显著降低→升高→降低”的变化趋势。总体来看,化学蚀变指数变化幅度较小,反映了中二叠世龙潭组沉积时期源区风化强度有一定的波动。

$\text{Sr}/\text{Cu}$  值常用来表征古气候条件。 $\text{Sr}/\text{Cu}$  值为 1~5,指示温暖湿润气候; $\text{Sr}/\text{Cu}$  值为 5~10,指示半潮湿—半干燥气候; $\text{Sr}/\text{Cu}$  值大于 10,则反映干旱炎热气候<sup>[46]</sup>。研究区龙潭组泥页岩  $\text{Sr}/\text{Cu}$  值为 0.25~4.82,平均值为 1.89,均小于 5,指示龙潭组沉积时期整体处于温暖湿润的气候环境。此外, $\text{MgO}/\text{CaO}$  值变化亦可反映古气候变化。在无易溶性盐类(如钠盐、钾盐)显著影响的情况下,高  $\text{MgO}/\text{CaO}$  值指示干旱炎热气候(因蒸发作用增强, $\text{MgO}$  易沉积),而低  $\text{MgO}/\text{CaO}$  值则指示潮湿气候( $\text{CaO}$  更易沉积)<sup>[47]</sup>。研究区样品的  $\text{MgO}/\text{CaO}$  值为 0.03~4.66,平均值为 1.99,同样反映了龙潭组沉积时期为温暖湿润气候,与  $\text{Sr}/\text{Cu}$  值所反映的气候特征相一致。在垂向变化上, $\text{MgO}/\text{CaO}$  值自剖面底部向上呈现“升高→下降→升高→逐步降低”的波动趋势,整体幅度适中,说明研究期内源区风化强度和岩石输入类型存在一定变化,但未发生显著气候波动。

除了上述元素比值指标外,根据有机质特征也能对古气候进行推断。泥页岩中Ⅲ型有机质丰富充

分表明当时古植被生长茂盛,间接证实了气候湿润的特点。综合各项指标可以看出,玉屏剖面龙潭组泥页岩沉积时期为温暖湿润的气候环境。

#### 4.3.2 古盐度

$\text{Sr}/\text{Ba}$  值是常用的古盐度恢复指标参数。当  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值小于 0.6 时,反映水体处于陆相淡水环境;若  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值为 0.6~1.0,则反映水体处于半咸水环境;而  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值大于 1 则表明水体处于咸水环境<sup>[48-49]</sup>。研究区龙潭组泥页岩  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值为 0.16~2.16,平均值为 1.05。从龙潭组底部向上, $\text{Sr}/\text{Ba}$  值起初缓慢上升,随后迅速攀升至峰值,之后逐渐回落,至中间部分略有反弹,最终再次快速下降(图 13)。因此,龙潭组泥页岩形成时整体上处于半咸水环境,但存在从半咸水到咸水环境的波动。

海水中  $\text{Mg}^{2+}$  含量较高,且在沉积过程中迁移性较弱,故  $\text{MgO}$  常被用作指示沉积水体盐度的亲海性化学组分。相应地, $\text{Al}_2\text{O}_3$  在陆地岩石风化过程中具有较高稳定性,其含量与陆源碎屑输入密切相关,常作为反映亲陆性环境的重要地球化学指标<sup>[50]</sup>。在实际研究中,常采用  $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值来追溯古盐度的变化情况。 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值小于 1,指示淡水环境; $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值为 1~10,指示海陆过渡环境; $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值为 10~500,指示海洋环境; $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值大于 500,则指示陆表海环境<sup>[51]</sup>。研究区龙潭组泥页岩样品的  $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值为 1.68~12.37,平均值为 3.76。由图 13 可知,龙潭组  $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值先缓慢下降,后持续上升。因此,研究区龙潭组沉积时期处于海陆过渡环境,且在沉积中—晚期,水体盐度略微下降,整体上与半咸水的水体特征相符。

#### 4.3.3 古水深

Zr 主要赋存于锆石之中,在河流搬运过程中,因其自身化学性质稳定,表现出高度的稳定性且极难溶解。Al 则广泛存在于各类陆源碎屑矿物里,其更容易受到风化作用的影响。因此,Zr/Al 值的变化能够有效反映源区特性以及搬运过程中的水体变化情况。在近岸区域,陆源物质输入丰富,Al 含量相对较高,Zr/Al 值较低;在远岸区域,陆源物质输入量少,Al 含量随之降低,Zr 含量则相对富集,Zr/Al 值升高。因此,较高的 Zr/Al 值反映了所处的水体深度相对较深;反之,较低的 Zr/Al 值则对应着深度较浅的水体环境<sup>[52]</sup>。研究区龙潭组泥页岩 Zr/Al 值为  $(5.18\sim 11.63)\times 10^{-3}$ ,平均值为  $8.25\times 10^{-3}$ (图 14)。从垂向变化趋势来看,龙潭组 Zr/Al 值自

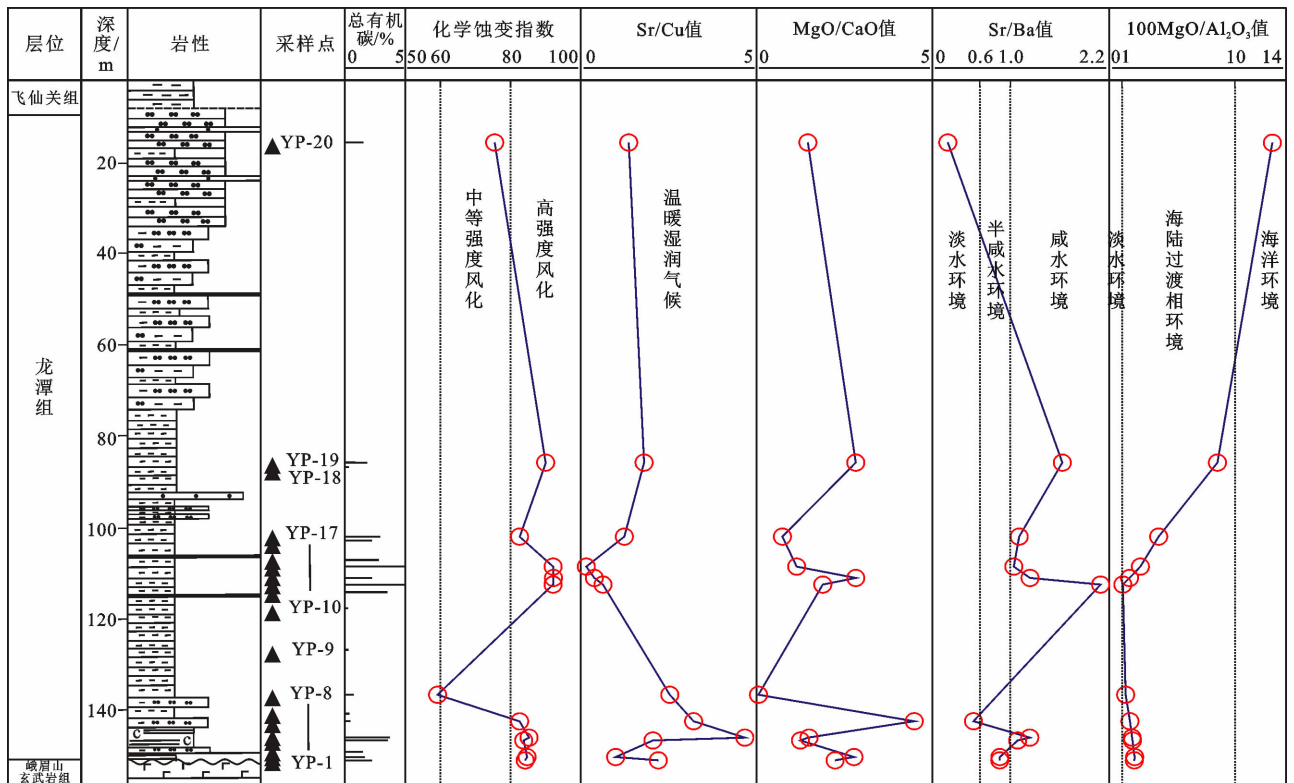


图 13 龙潭组古风化、古气候和古盐度地球化学指标垂向变化

Fig. 13 Vertical Variation Profiles of Geochemical Proxies for Paleoweathering, Paleoclimate and Paleosalinity in Longtan Formation

底部向上呈现“先缓慢上升,后显著下降”的特征,尽管局部存在小幅波动,但整体仍集中于低值区间( $<10 \times 10^{-3}$ )。结合上述规律可推断,龙潭组沉积时期泥页岩所处的水体深度相对较浅。

在浅水氧化环境中,较高的沉积速率促使铁的氧化物(如赤铁矿)快速沉淀并埋藏,抑制成岩过程中 $Fe^{3+}$ 的还原溶解,导致沉积物中Fe含量相对富集;而Mn因氧化形成的 $MnO_2$ 溶解度较高,且易受水动力扰动发生迁移,造成Mn相对亏损,因此Mn/Fe值较低<sup>[53]</sup>。在深水缺氧环境中, $Fe^{3+}$ 在早期成岩阶段被还原为 $Fe^{2+}$ 并随孔隙水迁出,导致Fe含量降低;若水体存在氧化-还原分层(如中层氧化、底层缺氧), $Mn^{2+}$ 可扩散至氧化界面重新氧化为 $MnO_2$ 沉淀,从而在沉积物中富集Mn,使得Mn/Fe值显著升高<sup>[54]</sup>。研究区龙潭组泥页岩样品的100Mn/Fe值为0.10~1.86,平均值为0.76。垂向演化特征显示,100Mn/Fe值自底部向上同样呈现“先逐渐上升,后显著下降”的特征(图14),与Zr/Al值的变化规律高度一致,进一步明确了研究区古水深相对较浅的特征。

#### 4.3.4 氧化-还原条件

前人研究提出了Ni/Co值、 $V/(V+Ni)$ 值及

$Ce_{anom}$ 值等参数用以判别古水体的氧化-还原状态。当水体分层明显且处于厌氧强还原环境时, $V/(V+Ni)$ 值大于0.84,Ni/Co值大于7, $V/Cr$ 值大于4.25;当水体分层不明显且处于贫氧亚还原环境时, $V/(V+Ni)$ 值介于0.60~0.84,Ni/Co值介于5~7, $V/Cr$ 值则介于2.00~4.25;富氧环境下, $V/(V+Ni)$ 值小于0.6,Ni/Co值小于5, $V/Cr$ 值小于2<sup>[55-57]</sup>。 $Ce_{anom}$ 值也是指示氧化-还原状态的重要指标之一<sup>[28]</sup>。当 $Ce_{anom}$ 值大于-0.1时,指示沉积环境为缺氧状态;当 $Ce_{anom}$ 值小于-0.1时,指示沉积环境为含氧状态<sup>[58]</sup>。

研究区龙潭组泥页岩样品的 $V/(V+Ni)$ 值介于0.62~0.97,平均值为0.83。其中,样品YP-1、YP-2、YP-4和YP-5出现明显峰值( $V/(V+Ni)$ 值大于0.90),而其余样品则随层位的升高呈阶梯式下降(0.62~0.84)(图14),表明龙潭组泥页岩整体形成于缺氧沉积环境。Ni/Co值介于1.24~15.91,平均值为4.77,具有显著的层控分布。其中,下部层段样品(YP-1~YP-5)的Ni/Co值普遍大于5.0,而上部层段样品(YP-6~YP-20)的Ni/Co值(除样品YP-13外)均小于5.0,反映沉积过程中的氧化环境逐渐增强。 $Ce_{anom}$ 值介于-0.01~0.11,平均值为

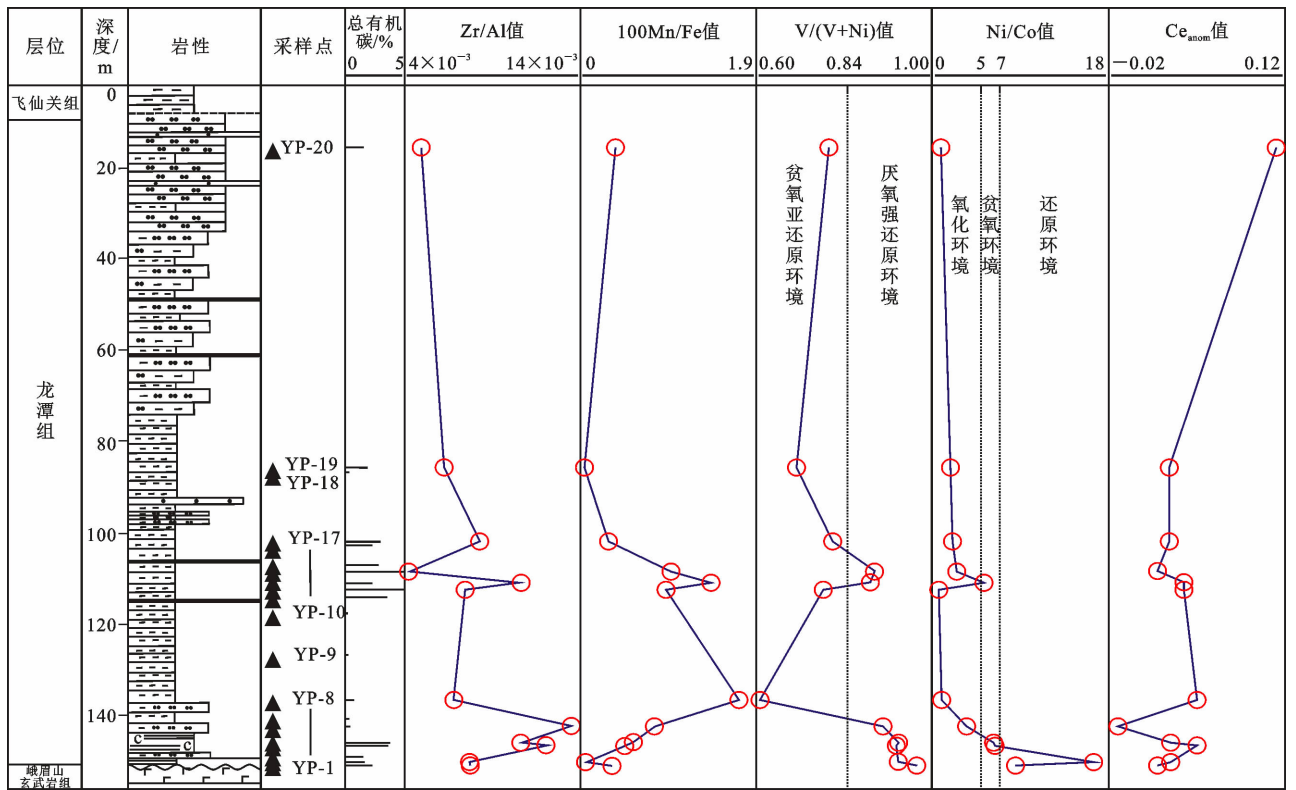


图 14 龙潭组古水深与氧化-还原条件地球化学指标垂向变化

Fig. 14 Vertical Variation Profiles of Geochemical Proxies for Paleowater Depth and Redox Conditions of Longtan Formation

0.04, 其中 81% 的样品分布在 0.02~0.05 的稳定区间。尽管各项指标反映的氧化-还原状态存在细微差异, 但总体均指向龙潭组古水体的缺氧沉积环境。垂向上, 龙潭组沉积早期以强还原环境为主, 至沉积后期则逐渐过渡为氧化-缺氧交替环境。总体上, 还原环境抑制了有机质的氧化分解, 进而促进了有机质的富集与保存, 是形成优质泥页岩的关键控制因素之一<sup>[59]</sup>。

### 5 富有机质泥页岩成因

川南地区龙潭组富有机质泥页岩的形成受控于源区供给、沉积环境与埋藏保存的协同作用。其成因与保存机制可系统归纳为: 龙潭组泥页岩的有机显微组分以镜质组(陆源高等植物残体)为主, 惰质组次之, 干酪根类型为 III 型, 表明有机质主体来源于陆生高等植物碎屑。Sr/Cu 值介于 0.25~4.82 (平均值为 1.89), MgO/CaO 值介于 0.03~4.66 (平均值为 1.99), Sr/Cu 值和 MgO/CaO 值均指示该沉积时期古气候为温暖湿润型, 为植被繁盛提供了有利条件。化学蚀变指数平均值达 83.9, 表明在这一气候背景下, 沉积源区经历了中等-高强度风化与剥蚀作用。强烈的风化过程加速了玄武岩与花岗岩等基岩矿物的分解, 由此为盆地持续输送了大量陆源

碎屑及植物有机质。

龙潭组发育于滨岸沼泽环境。Sr/Ba 值(平均值为 1.05)与 100MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值(平均值为 3.76)共同显示, 水体呈现半咸水特征, 盐度波动显著。浑浊水体与盐度变化抑制了浮游藻类光合作用及水生生物群落的稳定性, 导致水生初级生产力偏低, 有机质以陆源高等植物碎屑为主<sup>[60-61]</sup>。

扬子地块西南缘的断陷-隆起复式盆地为泥页岩沉积提供了构造基础。二叠纪末期, 峨眉山大火成岩省大规模玄武岩喷发与剥蚀作用加剧地形坡度, 促进火山碎屑与有机质通过短距离搬运快速入盆<sup>[62-63]</sup>。高沉积速率显著缩短有机质在氧化环境的暴露时间, 减少降解损失。尽管地球化学指标指示沉积环境整体为弱还原-还原状态, 但总有机碳与氧化-还原参数相关性较弱, 表明有机质保存效率更依赖于快速埋藏, 而非水体缺氧程度<sup>[64]</sup>。

### 6 结 语

本文针对川南兴文地区玉屏剖面龙潭组泥页岩开展系统的有机地球化学、有机岩石学和元素地球化学分析, 明确了有机质特征, 探讨了古环境意义及富有机质泥页岩成因机制。

(1)龙潭组泥页岩的总有机碳较高,成熟度适中,有机显微组分以镜质组和惰质组为主,干酪根碳同位素组成偏重,为典型的Ⅲ型干酪根;龙潭组泥页岩具有良好的生气潜力。

(2)龙潭组泥页岩的源岩类型主要为峨眉山高钛玄武岩,伴有一定比例的花岗岩;源区构造背景整体属于被动陆缘环境。

(3)龙潭组泥页岩主要形成于半咸水海陆过渡环境。沉积时期古盐度受海水与淡水输入共同影响,呈阶段性波动,中—晚期盐度趋于降低。温暖湿润的气候条件驱动源区高强度风化作用,促进陆源碎屑及有机质快速输运至沉积区。弱还原—还原的沉积环境结合高沉积速率,有效抑制了有机质氧化分解,最终形成倾气型优质泥页岩。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 郭旭升,胡东风,刘若冰,等. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018,38(10):11-18.  
GUO Xu-sheng, HU Dong-feng, LIU Ruo-bing, et al. Geological Conditions and Exploration Potential of Permian Marine-continent Transitional Facies Shale Gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(10):11-18.
- [2] 董大忠,邱振,张磊夫,等. 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, 2021, 39(1):29-45.  
DONG Da-zhong, QIU Zhen, ZHANG Lei-fu, et al. Progress on Sedimentology of Transitional Facies Shales and New Discoveries of Shale Gas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021,39(1):29-45.
- [3] 刘虎,曹涛涛,戚明辉,等. 四川盆地东部华蓥山地区龙潭组页岩气储层特征[J]. 天然气地球科学, 2019,30(1):11-26.  
LIU Hu, CAO Tao-tao, QI Ming-hui, et al. Reservoir Characteristics of Longtan Formation Shale Gas in Huayingshan Area, Eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019,30(1):11-26.
- [4] 赵培荣,高波,郭战峰,等. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2020,42(3):335-344.  
ZHAO Pei-rong, GAO Bo, GUO Zhan-feng, et al. Exploration Potential of Marine-continental Transitional and Deep-water Shelf Shale Gas in Upper Permian, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(3):335-344.
- [5] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014,34(6):9-16.  
GUO Xu-sheng, LI Yu-ping, LIU Ruo-bing, et al. Characteristics and Controlling Factors of Micro Pore Structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):9-16.
- [6] 郭旭升,胡东风,文治东,等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素:以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014,41(3):893-901.  
GUO Xu-sheng, HU Dong-feng, WEN Zhi-dong, et al. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity in Marine Shale Gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and Its Periphery: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba Area[J]. Geology in China, 2014,41(3):893-901.
- [7] 武瑾,郭为,郭伟,等. 深层海相页岩气立体开发“甜点”岩相及其成因机制:以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段—二段为例[J]. 石油学报, 2024, 45(8):1219-1233.  
WU Jin, GUO Wei, GUO Wei, et al. Sweet Spot Lithofacies and Its Genesis Mechanism for Stereoscopic Development of Deep Marine Shale: A Case Study of the First Submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou Area, Southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024,45(8):1219-1233.
- [8] 马新华,谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(1):161-169.  
MA Xin-hua, XIE Jun. The Progress and Prospects of Shale Gas Exploration and Exploitation in Southern Sichuan Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(1):161-169.
- [9] 张博,曹涛涛,王庆涛,等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩储层含气性特征及其影响因素[J]. 天然气地球科学, 2023,34(8):1412-1424.  
ZHANG Bo, CAO Tao-tao, WANG Qing-tao, et al. Reservoir Gas-bearing Characteristics and Their Controlling Factors of Wufeng-Longmaxi Formations in Northern Guizhou[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(8):1412-1424.
- [10] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等. 四川盆地东南部南川地区发现二叠系龙潭组页岩气[J]. 中国地质, 2023, 50(3):965-966.  
HE Gui-song, HE Xi-peng, GAO Yu-qiao, et al. Discovery of Shale Gas of Permian Longtan Formation in Nanchuan Area, Southeast Sichuan Basin[J]. Geology

- in China, 2023, 50(3): 965-966.
- [11] 曹涛涛, 宋之光, 罗厚勇, 等. 下扬子地区二叠系海陆过渡相页岩孔隙体系特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1332-1345.
- CAO Tao-tao, SONG Zhi-guang, LUO Hou-yong, et al. Pore System Characteristics of Permian Transitional Shale Reservoir in the Lower Yangtze Region, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1332-1345.
- [12] 曹涛涛, 曹清古, 刘 虎, 等. 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, 2020, 45(4): 1445-1456.
- CAO Tao-tao, CAO Qing-gu, LIU Hu, et al. Geochemical Characteristics and Adsorption Capacity of Marine-continental Transitional Mudrock in Eastern Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1445-1456.
- [13] 张吉振, 李贤庆, 王 刚, 等. 四川盆地南部上二叠统龙潭组页岩气储集层矿物组成特征及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 957-965.
- ZHANG Ji-zhen, LI Xian-qing, WANG Gang, et al. Mineral Compositions of Upper Permian Longtan Formation Shale in Southern Sichuan Basin and Its Significance for Gas Reservoir[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 957-965.
- [14] 马 啸. 黔西地区龙潭组泥页岩储层精细表征[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- MA Xiao. Fine Characterization of Shale Reservoir of Longtan Formation in Western Guizhou[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [15] 李龙龙, 罗开平, 刘 栩, 等. 晚古生代构造-沉积分异对四川盆地二叠系多类型气藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 60-71.
- LI Long-long, LUO Kai-ping, LIU Xu, et al. Controlling Effect of Late Paleozoic Tectonic and Sedimentary Differentiation on Multi-type Gas Reservoirs in Permian, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 60-71.
- [16] 曹涛涛, 邓 模, 刘 虎, 等. 川南—黔北地区龙潭组页岩气成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 6-12.
- CAO Tao-tao, DENG Mo, LIU Hu, et al. Shale Gas Accumulation Condition Analysis of Longtan Formation in Southern Sichuan-northern Guizhou[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 6-12.
- [17] 张吉振, 李贤庆, 王 元, 等. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征: 以四川盆地南部龙潭组为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1871-1878.
- ZHANG Ji-zhen, LI Xian-qing, WANG Yuan, et al. Accumulation Conditions and Reservoir Characteristics of Marine-terrigenous Facies Coal Measures Shale Gas from Longtan Formation in South Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1871-1878.
- [18] SY/T 5163—2010, 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法[S].
- SY/T 5163—2010, Analysis Method for Clay Minerals and Ordinary Non-clay Minerals in Sedimentary Rocks by the X-ray Diffraction[S].
- [19] SY/T 6414—2014, 全岩光片显微组分鉴定及统计方法[S].
- SY/T 6414—2014, Maceral Identification and Statistical Methods on Polished Surfaces of Whole Rocks[S].
- [20] 原 园, 姜振学, 喻 宸, 等. 柴北缘中侏罗统湖相泥页岩储层矿物组成与脆性特征[J]. 高校地质学报, 2015, 21(1): 117-123.
- YUAN Yuan, JIANG Zhen-xue, YU Chen, et al. Mineral Compositions and Brittleness of the Middle Jurassic Lacustrine Shale Reservoir in Northern Qaidam Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(1): 117-123.
- [21] 林腊梅, 张金川, 刘锦霞, 等. 页岩气勘探目标层段优选[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 259-263.
- LIN La-mei, ZHANG Jin-chuan, LIU Jin-xia, et al. Favorable Depth Zone Selection for Shale Gas Prospecting[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 259-263.
- [22] 曹涛涛, 刘光祥, 曹清古, 等. 有机显微组成对泥页岩有机孔发育的影响: 以川东地区海陆过渡相龙潭组泥页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 40-53.
- CAO Tao-tao, LIU Guang-xiang, CAO Qing-gu, et al. Influence of Maceral Composition on Organic Pore Development in Shale: A Case Study of Transitional Longtan Formation Shale in Eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 40-53.
- [23] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [24] 徐宏杰, 桑树勋, 杨景芬, 等. 黔北龙潭组菱铁质泥岩解吸气来源及元素背景[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1817-1826.
- XU Hong-jie, SANG Shu-xun, YANG Jing-fen, et al. Source and Element Background of Desorbed Gas

- from the Siderite-bearing Mudstone in Northern Guizhou Province [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1817-1826.
- [25] 甄 甄, 陈树旺, 郑月娟, 等. 内蒙古阿鲁科尔沁旗陶海营子剖面林西组地球化学特征及其对物源-构造背景的制约[J]. *中国地质*, 2018, 45(5): 1011-1022.  
ZHEN Zhen, CHEN Shu-wang, ZHENG Yue-juan, et al. Geochemical Characteristics of Linxi Formation Along Taohaiyingzi Section in Arhorqin Banner, Inner Mongolia, and the Constraint on the Provenances and the Tectonic Settings[J]. *Geology in China*, 2018, 45(5): 1011-1022.
- [26] 戢兴忠, 李 楠, 张 闯, 等. 勉略构造带硅质岩元素地球化学特征及其形成环境[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2619-2630.  
JI Xing-zhong, LI Nan, ZHANG Chuang, et al. Elemental Geochemistry Characteristics and Forming Environment of Cherts in the Mianlue Tectonic Zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2619-2630.
- [27] 罗香建, 卢树藩, 杜胜江, 等. 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*, 2019, 38(1): 130-136.  
LUO Xiang-jian, LU Shu-fan, DU Sheng-jiang, et al. 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*, 2019, 38(1): 130-136.
- [28] BRUMSACK H J. The Trace Metal Content of Recent Organic Carbon-rich Sediments: Implications for Cretaceous Black Shale Formation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232 (2/3/4): 344-361.
- [29] HASKIN M A, HASKIN L A. Rare Earths in European Shales: A Redetermination [J]. *Science*, 1966, 154: 507-511.
- [30] 郑方顺, 宋国学. 铕异常在地质学中的应用[J]. *岩石学报*, 2023, 39(9): 2832-2856.  
ZHENG Fang-shun, SONG Guo-xue. Application of Eu Anomaly in Geology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(9): 2832-2856.
- [31] 静禹钱, 雷 闯, 刘克栋, 等. 南堡凹陷古近系沙河街组沉积环境和物源: 来自微量和稀土元素地球化学的证据[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 350-359.  
JING Yu-qian, LEI Chuang, LIU Ke-dong, et al. Deposition Environment and Provenance of the Palaeogene Shahejie Formation in Nanpu Sag: Evidences from Trace and Rare Earth Element Geochemistry [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 350-359.
- [32] BHATIA M R. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [33] 杨鹏成, 杨 光, 陈新伟, 等. 峨眉山大火成岩省对四川盆地油气储层的控制作用研究[J]. *地质科学*, 2022, 57(1): 100-114.  
YANG Peng-cheng, YANG Guang, CHEN Xin-wei, et al. The Control of Emeishan Large Igneous Province on Oil and Gas Reservoir in the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(1): 100-114.
- [34] 柏道远, 汪永清, 王先辉, 等. 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*, 2007, 27(2): 49-59.  
BAI Dao-yuan, WANG Yong-qing, WANG Xian-hui, et al. Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Setting of the Early Yanshanian Peraluminous Granites in the Chuankou Region, Hengyang, Hunan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(2): 49-59.
- [35] 杨跃明, 张少敏, 金 涛, 等. 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*, 2023, 35(1): 1-11.  
YANG Yue-ming, ZHANG Shao-min, JIN Tao, et al. Characteristics and Exploration Potential of Shale Reservoirs of Permian Longtan Formation in Southern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(1): 1-11.
- [36] CONDIE K C, NOLL JR P D, CONWAY C M. Geochemical and Detrital Model Evidence for Two Sources of Early Proterozoic Sedimentary Rocks from the Tonto Basin Supergroup, Central Arizona [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 77(1/2): 51-76.
- [37] GU X X, LIU J M, ZHENG M H, et al. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393-407.
- [38] 顾枫华, 章永梅, 彭义伟, 等. 新疆西天山阔库确科铁铜矿区成矿岩体地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2017, 37(1/2): 196-217.  
GU Feng-hua, ZHANG Yong-mei, PENG Yi-wei, et al. Geochemistry, Chronology and Geological Significance of Kuokuqueke Granite in the West Tianshan Mountain, Xinjiang Autonomous Region, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(1/2): 196-217.

- [39] 侯明才,江文剑,倪师军,等.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,2016,90(12):3337-3351.  
HOU Ming-cai,JIANG Wen-jian,NI Shi-jun, et al. Geochemical Characteristic 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,2016,90(12):3337-3351.
- [40] 于鑫,杨江海,刘建中,等.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,2017,91(6):1374-1385.  
YU Xin,YANG Jiang-hai,LIU Jian-zhong, et al. Provenance of the Late Permian Longtan Formation in SW Guizhou Province and Implication for Reconstruction of Regional Sedimentation and Paleogeography[J].Acta Geologica Sinica,2017,91(6):1374-1385.
- [41] 刘天甲.四川华蓥山地区下二叠统一—中三叠统碎屑物质物源示踪研究[D].北京:中国地质大学,2023.  
LIU Tian-jia. The Provenance of the Clastic Materials from the Lower Permian to Middle Triassic in the Huayingshan Region,Sichuan[D]. Beijing:China University of Geosciences,2023.
- [42] 张茜,肖渊甫,王晓飞,等.四川盆地西南缘龙马溪组泥岩地球化学特征及物源区和构造背景分析[J].地质论评,2020,66(5):1393-1411.  
ZHANG Qian,XIAO Yuan-fu,WANG Xiao-fei, et al. Geochemistry of the Longmaxi Formation Mudstones of the Longmaxi Formation Mudstones of the Southwest Sichuan Basin; Implications for Provenance and Source Weathering[J]. Geological Review, 2020, 66(5):1393-1411.
- [43] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. Nature,1982,299:715-717.
- [44] 赵占仑,温小浩,汤连生,等.化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨[J].沉积学报,2018,36(2):343-353.  
ZHAO Zhan-lun,WEN Xiao-hao,TANG Lian-sheng, et al. Applicability of Chemical Alteration Index to Indication of Paleoclimate Change by Different Sedimentary Facies[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2018,36(2):343-353.
- [45] 陈聪,林良彪,余瑜,等.四川盆地南部CLD1井龙潭组地球化学特征及古环境意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(2):225-238.  
CHEN Cong,LIN Liang-biao,YU Yu, et al. 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),2022,49(2):225-238.
- [46] 范玉海,屈红军,王辉,等.微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用:以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J].中国地质,2012,39(2):382-389.  
FAN Yu-hai,QU Hong-jun,WANG Hui, et al. The Application of Trace Elements Analysis to Identifying Sedimentary Media Environment: A Case Study of Late Triassic Strata in the Middle Part of Western Ordos Basin[J]. Geology in China,2012,39(2):382-389.
- [47] 于海洋,索艳慧,杜晓东,等.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,2021,45(1):53-63.  
YU Hai-yang,SUO Yan-hui,DU Xiao-dong, et al. Oligocene-Miocene Provenance and Paleoclimate of the Pearl River Mouth Basin: A Case Study of the Eastern Yangjiang Sag[J]. Geotectonica et Metallogenia,2021,45(1):53-63.
- [48] 林景昱,褚庆忠,韩森伟,等.基于 Logistic 回归分析的古盐度判别指标研究[J].矿物岩石地球化学通报,2023,42(2):380-388.  
LIN Jing-yu,CHU Qing-zhong,HAN Sen-wei, et al. Application of Logistic Regression Analysis on Paleosalinity Discriminant Indicators[J]. Bulletin of Mineralogy,Petrology and Geochemistry,2023,42(2):380-388.
- [49] 曹涛涛,刘虎,肖娟宜,等.茂名盆地油柑窝组油页岩古环境恢复与有机质聚集机制[J].地球科学,2024,49(4):1367-1384.  
CAO Tao-tao,LIU Hu,XIAO Juan-yi, et al. Paleoenvironmental Reconstruction and Organic Matter Accumulation Mechanism for Youganwo Formation Oil Shale in Maoming Basin[J]. Earth Science,2024,49(4):1367-1384.
- [50] 官少军,秦志亮,叶思源,等.黄河三角洲 ZK5 钻孔沉积物地球化学特征及其沉积环境[J].沉积学报,2014,32(5):855-862.  
GONG Shao-jun,QIN Zhi-liang,YE Si-yuan, et al. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of ZK5 Core Sediments in Yellow River Delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2014,32(5):855-862.
- [51] 王随继,任明达,黄杏珍,等.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,1997,15(3):155-159.  
WANG Sui-ji,REN Ming-da,HUANG Xing-zhen,

- et al. The Transverse Distributive Regularity and Its Controlling Factors of Clay Minerals in Tertiary System, Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3):155-159.
- [52] 贾福福, 沙龙滨, 李冬玲, 等. 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*, 2020, 32(2):250-263.  
JIA Fu-fu, SHA Long-bin, LI Dong-ling, et al. Review of Research on Quaternary Paleooceanography of the Siberian Arctic Seas[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2020, 32(2):250-263.
- [53] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Geochemistry of Recent Oxic and Anoxic Marine Sediments: Implications for the Geological Record[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1/2):67-88.
- [54] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2):12-32.
- [55] ALGEO T J, LIU J S. A Re-assessment of Elemental Proxies for Paleoredox Analysis[J]. *Chemical Geology*, 2020, 540(5):119549.
- [56] 唐 勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷凤城组烃源岩沉积古环境[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(5):677-692.  
TANG Yong, ZHENG Meng-lin, WANG Xia-tian, et al. Sedimentary Paleoenvironment of Source Rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(5):677-692.
- [57] 曹光耀, 刘 宇, 周小琳, 等. 川西南地区五峰组—龙马溪组沉积环境及有机质富集模式[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(5):1227-1245.  
CAO Guang-yao, LIU Yu, ZHOU Xiao-lin, et al. Sedimentary Environment and Accumulation Pattern of Organic Matter in Wufeng-Longmaxi Formations in the Southwestern Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(5):1227-1245.
- [58] 周 骞, 米云川, 赵 勇, 等. 扬子西缘羊场磷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*, 2024, 43(5):1119-1138.  
ZHOU Qian, MI Yun-chuan, ZHAO Yong, et al. Geochemical Characteristics of the Yangchang Phosphate Deposit in Western Margin of the Yangtze Block and Its Indications of the Phosphorus-forming Environment[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2024, 43(5):1119-1138.
- [59] 王鹏万, 张 磊, 李 昌, 等. 黑色页岩氧化-还原条件与有机质富集机制: 以昭通页岩气示范区 A 井五峰组—龙马溪组下段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5):933-943.  
WANG Peng-wan, ZHANG Lei, LI Chang, et al. Redox Conditions and Organic Enrichment Mechanisms of Black Shale: A Case from the Wufeng-Lower Longmaxi Formations in Well A in Zhaotong Shale Gas Demonstration Area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5):933-943.
- [60] ZHANG M T, HU M Y, CAI Q S, et al. Controlling Factors of Organic Matter Enrichment in Marine-continental Transitional Shale: A Case Study of the Upper Permian Longtan Formation, Northern Guizhou, China[J]. *Minerals*, 2024, 14(6):540.
- [61] 游水凤, 柳汉丰, 庞新龙, 等. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 2025, 44(4):803-822.  
YOU Shui-feng, LIU Han-feng, PANG Xin-long, et al. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of the Longtan Formation Shale in Eastern Sichuan Basin: An example of Huayingshan Section [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2025, 44(4):803-822.
- [62] 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 等. 中国南方二叠纪岩相古地理[J]. *沉积学报*, 1996, 14(2):3-12.  
FENG Zeng-zhao, YANG Yu-qing, JIN Zhen-kui, et al. Lithofacies Paleogeography of the Permian of South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(2):3-12.
- [63] SHEN J, LEI Y, ALGEO T J, et al. Volcanic Effects on Microplankton During the Permian-Triassic Transition(Shangsi and Xinmin, South China)[J]. *Palaios*, 2013, 28(8):552-567.
- [64] 曹涛涛, 邓 模, 肖娟宜, 等. 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*, 2023, 34(1):122-139.  
CAO Tao-tao, DENG Mo, XIAO Juan-yi, et al. Reservoir Characteristics of Marine-continental Transitional Shale and Gas-bearing Mechanism: Understanding Based on Comparison with Marine Shale Reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(1):122-139.