



引文格式: 张晨博, 黄琦, 韩向义, 等. 上扬子地区盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩沉积环境及有机质富集机制[J]. 西北地质, xxxx, x(x): 1-16. DOI: 10.12401/j.nwg.2025042

Citation: ZHANG Chenbo, HUANG Qi, HAN Xiangyi, et al. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Mechanisms of the Dark Mudstone in the Lower Devonian Suotoushan Formation, Yanyuan Basin, Upper Yangtze Region[J]. Northwestern Geology, xxxx, x(x): 1-16. DOI: 10.12401/j.nwg.2025042

上扬子地区盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩沉积环境及有机质富集机制

张晨博^{1,2}, 黄琦³, 韩向义⁴, 李勇^{2,*}, 程锦翔⁵, 赵少泽¹, 陈剑⁶, 晏毅雯², 马瑞浚¹

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059; 3. 中国石油西南油气田公司开发事业部, 四川成都 610059; 4. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552; 5. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610218; 6. 北京源烃泰克科技有限公司, 四川成都 610041)

摘要: 盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩是上扬子地区页岩气勘探新层位, 研究该套页岩的沉积环境及有机质富集机制, 对于上扬子板块西缘非常规油气勘探具有重要意义。此次研究通过对岩石宏微观特征、矿物组分、元素地球化学和有机地球化学等的分析, 恢复了盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩沉积期的古气候、古生产力、古氧化还原条件及古盐度, 探讨了有机质富集机制。结果表明: 研究区缩头山组沉积于镶边台地环境之中, 可以识别出潟湖、礁坪、台地边缘、塌积斜坡及盆地五种沉积亚相。缩头山组泥岩 TOC 含量平均值为 1.86%, R_o 平均值为 1.15%, 有机质类型以 II₁ 和 II₂ 型为主, 脆性指数平均值为 64.41, 具有较好的页岩气生烃条件和可压裂性。缩头山组沉积期古气候温暖潮湿, 海底存在热液活动, 水体生产力较高, 底水为缺氧还原的环境, 水体盐度较低。研究认为: 研究区闭塞的潟湖环境、温暖潮湿的古气候、缺氧还原环境、低盐度水体及高古生产力等条件共同促进了缩头山组富有机质泥岩的发育。

关键词: 有机质富集; 下泥盆统; 缩头山组; 沉积环境; 盐源盆地

中图分类号: P588.22; TE122

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(XXXX)XX-XXXX-16

Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Mechanisms of the Dark Mudstone in the Lower Devonian Suotoushan Formation, Yanyuan Basin, Upper Yangtze Region

ZHANG Chenbo^{1,2}, HUANG Qi³, HAN Xiangyi⁴, LI Yong^{2,*}, CHENG Jinxiang⁵,
ZHAO Shaoze¹, CHEN Jian⁶, YAN Yiwen², MA Ruijun¹

(1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-03-24; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“上扬子地区晚奥陶世—早志留世沉积物孔隙水与海洋硫循环重建”(42202132); 国家自然科学基金专项项目“战略研究类: 前陆盆地动力学未来发展的挑战与机遇”(42342027); 中国地质调查局“四川盆地下古生界海相页岩气基础地质调查”(DD20160176)。

作者简介: 张晨博(1995-)男, 硕士研究生, 主要从事沉积地质学相关研究, E-mail: zcbplate@foxmail.com。

* 通讯作者: 李勇(1963-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与盆地动力学科研工作, E-mail: liy@cdu.edu.cn。

Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Development Division, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552; 5. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610059, Sichuan, China; 6. Beijing Yuanhenteck Technology Co, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The dark mudstone of the Suotoushan Formation in the Lower Devonian of the Yanyuan Basin represents a new stratigraphic horizon for shale gas exploration in the Upper Yangtze region. Investigating its sedimentary environment and organic matter enrichment mechanisms holds significant implications for unconventional oil and gas exploration along the western margin of the Upper Yangtze Plate. This study reconstructs the paleoclimate, paleoproductivity, paleo-redox conditions, and paleosalinity during the deposition of the Suotoushan Formation dark mudstone through analyses of rock macro/microscopic characteristics, mineral composition, elemental geochemistry, and organic geochemistry, while exploring organic matter enrichment mechanisms. Results indicate that the Suotoushan Formation was deposited in a rimmed platform environment, comprising five sedimentary subfacies: lagoon, reef flat, platform margin, collapsed slope, and basin. The mudstone exhibits favorable shale gas generation potential with an average TOC content of 1.86%, mean vitrinite reflectance (Ro) of 1.15%, dominant Type III and II2 organic matter, and high brittleness index averaging 64.41. During deposition, the basin experienced warm-humid paleoclimate, hydrothermal activity, high aquatic productivity, anoxic reducing bottom water, and low salinity conditions. The study concludes that the combined effects of restricted lagoon environment, warm-humid climate, anoxic conditions, low-salinity water, and elevated paleoproductivity collectively facilitated the development of organic-rich mudstone in the Suotoushan Formation.

Keywords: Organic matter enrichment; Lower Devonian; Suotoushan Formation; sedimentary environment; Yanyuan Basin

暗色泥页岩具有富含有机质的特点,其颗粒粒度小于 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ (姜在兴等, 2013),一般沉积在浅海陆棚、半深湖-深湖及潟湖等环境中,是潜在的烃源岩层或页岩油气产层。随着页岩油气勘探开发在世界范围内的持续推进,暗色泥页岩中有机质富集机制成为研究热点。暗色泥页岩中有机质的富集是多因素耦合的结果,有机质沉积速率、海平面变化、沉积水体表层初级生产力、水体氧化-还原条件、古盐度等多种因素都会对泥页岩的有机质富集产生重要影响(Stow et al., 2001; Sageman et al., 2003; Katz, 2005; Ghadeer et al., 2011; 黄永建等, 2005)。但是,各种因素对烃源岩中有机质富集的控制程度一直存在争议,对此,当前学者(Demaison and Moore, 1980; Gallego et al., 2007)将多种因素总结为生产力模式和保存模式。生产力模式讨论了初级生产力与藻类等生物密集的相关性,水体表层藻类、浮游生物的繁盛使初级生产力提高,同时增大了有机质向海底的输入通量,在高沉降速率下有机质在海底大量聚集,从而形成有机质的富集;而保存模式则认为封闭水体环境造成了缺氧还原条件,有机质的氧化消耗量被极大的降低,从而造成有机质的

富集。

盐源盆地具有较好的页岩气勘探潜力(张茜等, 2018; 王正和等, 2018; 余谦等, 2020; 方立羽, 2020; 邓敏等, 2020; 程锦翔等, 2024)。其中,张茜等(2018)讨论了盐源盆地龙马溪组黑色页岩硅质成因及沉积环境;王正和等(2018)讨论了盐源盆地的断裂体系及构造与岩浆活动对页岩气聚集的影响;余谦等(2020)讨论了盐源地区古生界富有机质泥页岩的沉积相特征;方立羽(2020)讨论了宁蒗盐源地区泥盆系泥页岩储层的有利层段优选;邓敏等(2020)讨论了盐源地区早泥盆世古地理特征;程锦翔等(2024)讨论了盐源地区龙马溪组黑色泥页岩的物源特征与构造背景。以上研究集中在志留系龙马溪组的沉积环境、构造背景、沉积相及其物源特征等方面,认为龙马溪组富有机质页岩沉积于开阔海陆棚相沉积环境,沉积期古气候干燥寒冷,物源以长英质及镁铁质火成岩为主。但是,对于泥盆系的研究仅限于早泥盆世古地理特征,对于研究区下泥盆统富有机质泥岩的沉积环境及有机质富集机制的研究相对较少。

针对上述问题,笔者利用岩石宏微观特征分析、

矿物组分分析、元素地球化学分析以及有机地球化学分析等方法,在分析缩头山组沉积相特征、暗色泥岩特征的基础上,恢复了暗色泥岩沉积古环境,讨论了有机质富集机制,以期对缩头山组暗色泥页岩的沉积环境和有机质富集机制有一个较为准确的认识。

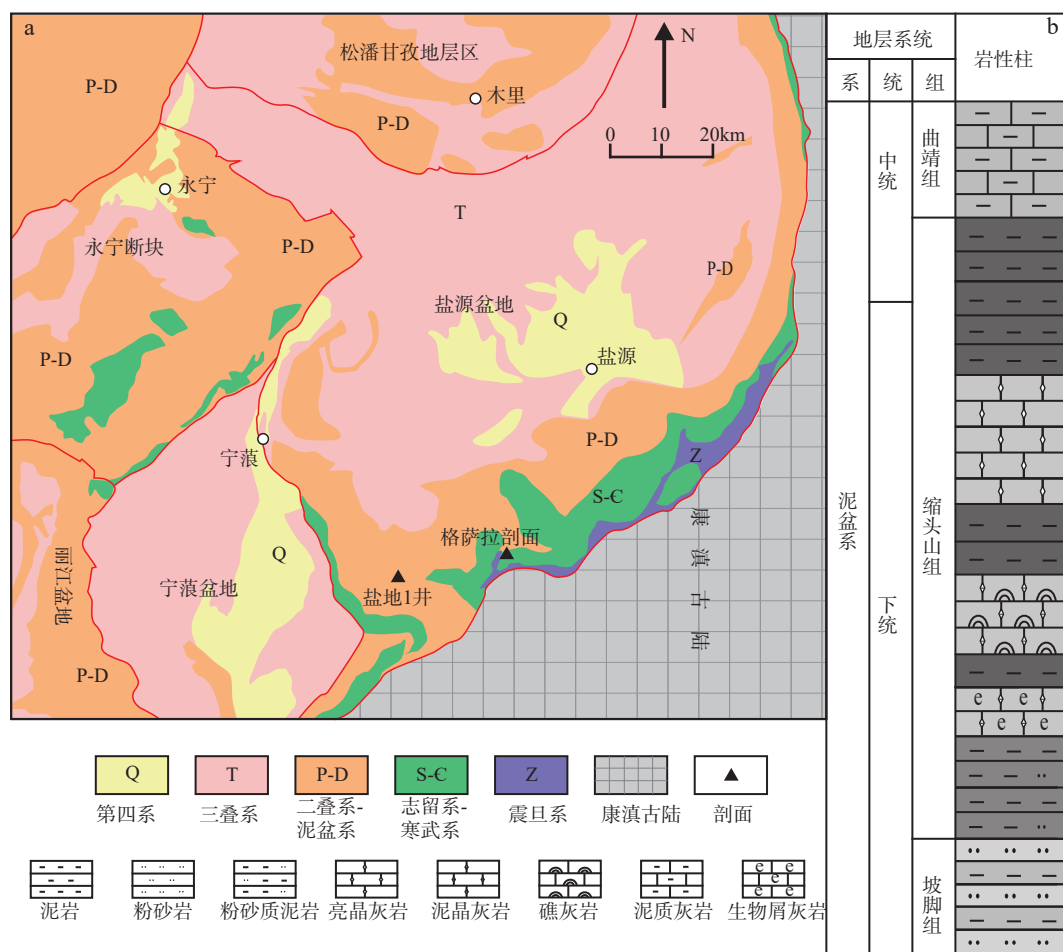
1 地质背景

盐源盆地位于扬子板块西南边界,处于龙门山-锦屏山前陆逆冲推覆构造带上的木里-盐源推覆带,其在泥盆纪时属于华南板块,为被动大陆边缘裂谷盆地,被夹在青藏特提斯构造域与扬子大陆板块构造域之间(钟康惠等,2004),属于盐源-丽江台缘坳陷(胡受权和郭文平,1995)。根据行政区划,研究区位于四川的西南部—云南的西北部,横跨四川省盐源县、云南省宁蒗县两个地区,盆地西南部为丽江盆地,东南部为

康滇古陆(图1)。本文采用马玉孝等(马玉孝等,2001)的地层划分方案,对盐源盆地南部的格萨拉剖面 and 盐地1井缩头山组进行了地层划分。缩头山组位于下泥盆统上部,主要由泥岩、粉砂质泥岩、泥晶灰岩、亮晶灰岩及生物礁灰岩组成,与上覆中泥盆统曲靖组泥质灰岩整合接触,与下伏下泥盆统坡脚组粉砂岩与泥岩整合接触(图1)。

2 缩头山组沉积相特征

前人研究表明,盐源盆地在早泥盆世为边缘海盆,其与康滇古陆形成了西海东陆的古地理格局,从东向西海水深度逐渐变大,从滨海过渡到浅海陆棚环境(马玉孝等,2001)。泥盆纪是古生代中碳酸盐生产作用规模最大的时代,该时期为生物礁生长发育的鼎盛时期且海洋生物极具多样性(Becker et al., 2020)。本



a.构造位置图(根据张茜等,2018 修编); b.下泥盆统缩头山组岩性柱状图

图1 盐源盆地构造位置图

Fig. 1 Tectonic Location Map of the Yanyuan Basin

文利用钻井岩芯及野外剖面资料,分析了缩头山组沉积相特征。

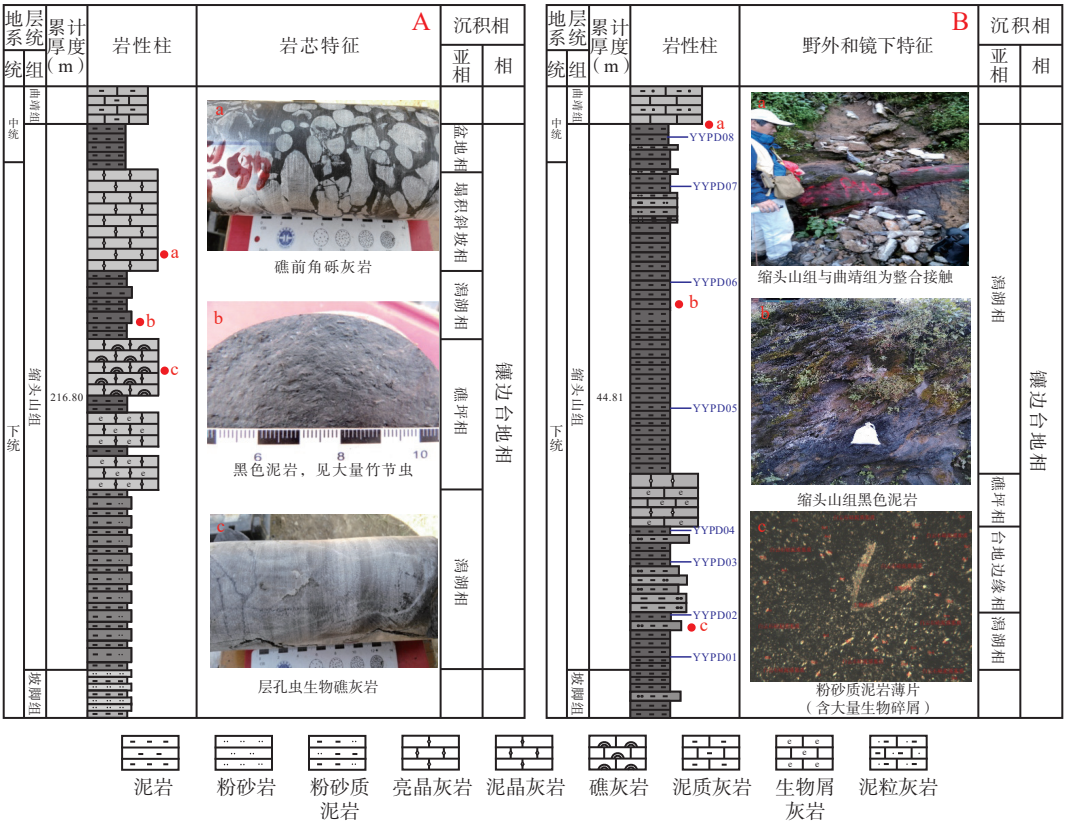
钻井资料来自盐地 1 井,该井位于盐边县温泉乡野麻地村,该井缩头山组厚度约 216.80 m,其底部暗色泥岩与坡脚组泥岩和浅灰色粉砂岩互层整合接触,顶部暗色泥岩与曲靖组泥质灰岩整合接触。缩头山组由灰黑色泥岩与粉砂质泥岩互层、亮晶灰岩、泥晶灰岩夹生物礁灰岩、黑色泥岩和泥晶生屑灰岩组成,层内可见大量生物礁、层孔虫等造礁生物化石。根据岩性特征,在缩头山组识别出潟湖、礁坪、塌积斜坡及盆地四种沉积亚相,均沉积于镶边台地环境之中。其中,潟湖相位于生物礁后,是局限低能的半封闭环境,主要沉积黑色泥岩与粉砂质泥岩,黑色泥岩中可见大量竹节虫化石;礁坪相主要沉积泥晶生屑灰岩、生物礁灰岩,生物礁灰岩中发育大量层孔虫生物化石;塌积斜坡相发育于斜坡带上,主要沉积亮晶灰岩,灰岩中可见大量角砾,角砾以棱角状-次棱角状为主,粒径约 1-4 cm 不等,角砾的分选、磨圆差,角砾主要来自台地边缘处的礁;盆地相主要为半深海的黑色泥岩

(图 2A)。

格萨拉剖面实测于盐边县格萨拉乡岩口村,该剖面缩头山组厚度约 44.81 m,其顶部暗色泥岩与曲靖组灰色泥粒灰岩整合接触,底部暗色泥岩与坡脚组黑色薄层泥岩夹粉砂质泥岩整合接触。缩头山组由黑色泥岩、黑色泥岩夹深灰色粉砂质泥岩、亮晶灰岩与生物屑灰岩互层和灰色薄层状粉砂质泥岩组成。根据岩性特征,判断格萨拉剖面缩头山组的沉积相包括礁坪、潟湖及台地边缘三种沉积亚相,均沉积于镶边台地环境之中。其中,台地边缘相主要沉积深灰色粉砂质泥岩及少量暗色泥岩;礁坪相主要沉积生物屑灰岩与亮晶灰岩;潟湖相主要沉积黑色泥岩及少量深灰色粉砂质泥岩,泥岩在镜下观察到大量生物碎屑(图 2B)。

3 暗色泥岩特征

本研究测试样品均采集自格萨拉剖面下泥盆统缩头山组,岩性以黑色泥岩、深灰色粉砂质泥岩、亮晶灰岩与生物屑灰岩为主,对其开展岩石宏微观特征



A.盐地 1 井综合柱状图; B.格萨拉剖面综合柱状图

图2 盐源盆地下泥盆统沉积相综合柱状图

Fig. 2 Composite Sedimentary Facies Column Chart of the Lower Devonian in the Yanyuan Basin

分析、矿物组分分析、元素地球化学分析和有机地球化学分析。

3.1 有机地球化学特征

从有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度三方面分析讨论缩头山组有机地球化学特征。研究区下泥盆统缩头山组暗色泥岩中 TOC 含量介于 0.59%-4.15% 之间, 均值为 1.86%。缩头山组暗色泥岩样品中腐泥组含量为 0%-65%, 惰质组含量为 3%-12%, 镜质组含量为 4%-18%, 富含壳质组含量为 28%-58%,

干酪根类型指数(HI)为 15.5-73, 以 II₁ 和 II₂ 型干酪根为主(曹庆英, 1985), 具有良好的生烃潜力。镜质组反射率(R_o)是表征有机质成熟度最基本、最可靠的地球化学指标(邹才能等, 2013), 缩头山组 R_o 值介于 1.13%-1.18% 之间, 平均值为 1.15%, 达到了成熟阶段。

综上, 缩头山组暗色泥岩总有机碳含量较高, 有机质类型较好, 处于热裂解生气阶段, 具有生烃潜力。

表 1 岩石样品有机地球化学数据

Tab. 1 Organic geochemical data of rock samples

样品编号	TOC(%)	R _o (%)	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	TI	有机质类型
YYPD08	4.15	1.15	12	58	18	12	15.5	II ₂
YYPD07	1.55							
YYPD06	1.60	1.18	65	28	4	3	73	II ₁
YYPD05	0.59							
YYPD04	2.86	1.13	50	35	8	7	54.5	II ₁
YYPD03	1.45							
YYPD02	1.30							
YYPD01	1.34							

注: TI=(a*100+b*50-c*75-d*100)/100, 公式中a为腐泥组; b为壳质组; c为镜质组; d为惰质组。

3.2 矿物组分特征

对盐源盆地下泥盆统缩头山组 8 个样品进行 X 衍射全岩矿物组分测试, 结果见表 2。通过黏土矿物陆源供给的细粒物质, 是有机质沉淀的重要载体, 黏土矿物包含高岭石、蒙脱石、伊利石等, 主要为陆源沉积成因, 自生结晶程度较弱, 其中伊利石是碱性水介质背景下细粒沉积物沉淀的产物, 高岭石主要是在湿润的气候条件下, 由长石在酸性介质作用下经过淋滤作用形成的。泥岩组成颗粒以黏土级-粉砂级为主, 粒径小, 孔隙不发育, 黏土矿物转化的物理空间狭窄, 限制了埋藏阶段的结晶生长(姜在兴等, 2013)。缩头山组暗色泥岩矿物以长石、石英和黏土矿物为主, 黄铁矿和碳酸盐矿物含量相对较低(图 3)。其中, 长石含量介于 2.35%-76.65%, 平均值为 32.59%, 主要由钠长石、钙长石及正长石组成; 石英含量为 10.65%-40.64%, 平均值为 27.98%。黏土矿物主要由伊利石、高岭石以及蒙脱石构成, 其含量为 9.42%-53.04%, 平均值为 35.13%。碳酸盐矿物主要由方解石和白云石组成, 其含量介于 0.001%-19.14%, 平均值为 3.21%, 其中, 缩头山组上部碳酸盐矿物含量较高。从整体来看,

缩头山组暗色泥岩, 脆性矿物总含量介于 46.96%-90.58%, 平均值为 64.87%, 脆性矿物含量高, 以石英、长石和碳酸盐矿物等矿物为主。

泥页岩中石英、长石、方解石等脆性矿物含量越高, 储层脆性越强, 在外界压力下越容易产生网状裂缝(邹才能等, 2013)。因此, 储层脆性指数是影响页岩气勘探开发的重要参数(张晨晨等, 2016)。对于脆性指数的计算方法众多, 可达近 20 种评价方法(李庆辉等, 2012), 国内外尚未有统一标准, 但总体可区分为定性评价与定量评价两大类。定性评价是通过 XRD 矿物组分分析测定泥页岩中的矿物组分含量, 岩石矿物分为脆性矿物与黏土矿物, 泥岩中的脆性矿物包括硅酸盐矿物(石英、长石等)和碳酸盐岩矿物(方解石等), 脆性指数与单一矿物的相关性较差, 与石英、方解石含量呈正相关, 与斜长石、黏土矿物含量呈负相关; 脆性指数与组合矿物石英+方解石含量呈正相关, 相关性较好, 脆性矿物含量越高, 压裂所消耗能量越小, 因此使用脆性矿物在矿物总含量中的相对含量来判断脆性指数(Jin et al., 2014); 定量评价是根据岩石力学的角度来进行评价, 用弹性模量与泊松比分别

表 2 盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩矿物组成表
Tab. 2 Mineral Composition Table of Dark Mudstone in the Lower Devonian Series
Suotoushan Formation, Yanyuan Basin

样品编号	脆性矿物含量(%)							黏土矿物含量(%)			F/Q
	石英	钠长石	钙长石	方解石	正长石	白云石	黄铁矿	伊利石	高岭石	蒙脱石	
YYPD08	13.48	28.08	46.18	0.01	2.40	0.00	0.45	8.25	0.80	0.37	5.69
YYPD07	10.65	39.52	33.28	0.66	2.70	0.40	0.49	11.48	0.31	0.52	7.09
YYPD06	37.70	0.39	0.38	17.84	1.58	1.31	1.68	35.44	3.05	0.64	0.06
YYPD05	20.92	15.23	37.77	0.23	2.75	1.80	0.53	19.44	0.81	0.54	2.67
YYPD04	39.63	0.64	1.98	0.51	2.35	0.45	1.41	51.65	1.07	0.33	0.13
YYPD03	20.43	3.77	22.69	0.41	2.00	0.06	0.92	48.09	0.73	0.90	1.39
YYPD02	40.64	2.87	2.87	0.56	4.00	0.41	1.66	45.24	1.02	0.74	0.24
YYPD01	40.38	2.36	2.24	0.54	2.68	0.56	1.57	48.38	0.56	0.73	0.18

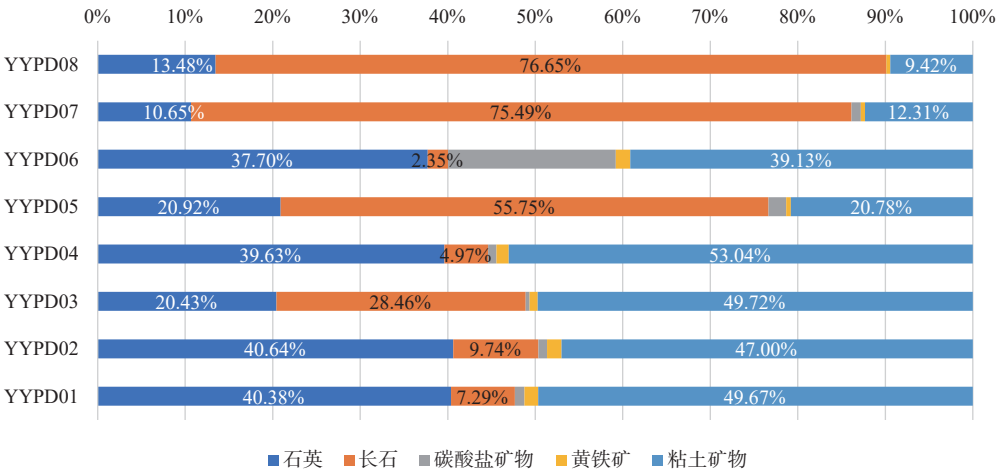


图3 缩头山组暗色泥岩矿物含量组成图
Fig. 3 Mineral Composition Diagram of Dark Mudstone in the Suotoushan Formation

取 0.5 的权值进行计算,但该方法对复杂应力条件下的脆性指数评价存在误差(Rickman et al., 2008)。近些年来在四川盆地页岩气勘探程度较高的筇竹寺组与五峰组-龙马溪组的脆性指数评价中,经过大量的应用验证,矿物分析法取得了很好地评价效果(邹才能等, 2013; 张晨晨等, 2016),因此,本文采用脆性矿物相对含量来计算泥岩的脆性指数。Jin (2014)提出了计算矿物脆性指数的方法,计算公式为

$$BI = \frac{Q + F + C}{Q + F + C + CL} \tag{1}$$

公式 1 中: BI 为脆性指数, Q、F 和 C 分别表示石英、长石和碳酸盐矿物等脆性矿物含量, CL 为黏土矿物含量。脆性指数计算结果显示,缩头山组暗色泥岩脆性指数介于 46.20-90.54,平均值为 64.41。

缩头山组矿物特征满足油气田开发所要求的脆性矿物含量大于 50%,符合商业开发的要求,具有充分的可压裂性(Curtis, 2002),脆性越高越利于油气的开发,缩头山组泥岩具有较好的脆性指数,具有成为页岩储层的潜力。

4 暗色泥岩沉积环境

古气候、热液活动、水体生产力条件、氧化还原条件及古盐度等沉积环境要素对暗色泥岩有机质的富集具有重要影响(邹才能等, 2013; 蔡媛等, 2022)。因此,利用矿物组分及元素地球化学数据分析了缩头山组暗色泥岩沉积期间古气候、古水体氧化还原条件、陆源碎屑输入、古盐度、热液活动及古生产力等环境

特征。

4.1 古气候

4.1.1 矿物含量分析法

泥岩中的矿物组成十分重要,其矿物组成特征对古气候和古环境恢复有很强的指示意义。石英和长石是沉积岩中常见的脆性矿物,石英的抗风化能力强,物理性质稳定,不易侵蚀,而长石抗风化能力远低于石英。泥岩中的长石常形成保存于干燥寒冷环境中,在温暖潮湿环境中易于风化侵蚀,因此,沉积岩中的长石与石英含量的比值(F/Q)可用来恢复古气候变化。Pettijohn 早在 1975 年就提出以 Q/F 表示矿物成熟度指数的方法,用来指示沉积岩中古气候变化程度,近些年来 F/Q 值已作为沉积岩化学风化指数的传统型替代指标(Wang and Miao, 2006),在深海钻探计划(DSDP)与大洋钻探计划(ODP)相关研究中多次应用 F/Q 值作为沉积岩风化指数及古气候变化的指标(Kuhn and Diekmann, 2002)。比值越小代表气候越温暖潮湿,比值越大代表气候越干燥寒冷(Wang and Miao, 2006)。缩头山组泥岩长石含量平均值为 32.59%,石英平均值为 27.98%,F/Q 比值在 0.06-7.09 之间,平均值为 2.18,缩头山组大部分为低值,仅在顶部比值升高(图 4),代表了沉积末期气候从温暖潮湿向干燥环境的转换,但比值整体为低值,指示沉积期主要为温暖潮湿环境。

4.1.2 地化元素比值法

古气候对沉积物中微量元素的富集与分异具有显著控制作用,不同气候条件通过影响元素溶解性及迁移能力,形成特定的地球化学组合特征。研究表明,

微量元素可依据古气候响应差异划分为喜湿型(如 Cu)和喜干型(如 Sr)两类:前者在湿润气候下因化学风化增强而富集,后者则更易在干旱条件下滞留沉积,因此 Sr/Cu 值常用于古气候的重建,当 $1 < \text{Sr/Cu} < 10$ 时,表示温暖湿润的古气候,当 $10 < \text{Sr/Cu}$ 时,表示干燥炎热的气候(Dal et al., 2012)。研究区缩头山组 Sr/Cu 介于 1.12-34.29 之间,大部分为小于 10 的低值,仅在顶部比值升高(图 4),指示沉积末期气候从温暖湿润向干燥环境的转变,这与上述矿物含量分析法结果一致,两种方法的交叉验证,表明缩头山组沉积期整体为温暖湿润的古环境。

4.2 氧化-还原条件

4.2.1 地球化学指标

古水体的氧化还原条件对有机质的保存条件有着重要控制作用,微量元素 V、U、Cr、Co、Th、Ni 对氧化还原环境较为敏感,运用氧化还原敏感元素的比值可分析暗色泥岩沉积过程中的水体氧化还原条件(Algeo et al., 2011)。当 $\text{Ni/Co} > 7$ 代表缺氧水体环境,当 $5 < \text{Ni/Co} < 7$ 代表贫氧水体环境,当 $\text{Ni/Co} < 5$ 代表氧化水体环境;当 $\text{U/Th} > 1.25$ 代表缺氧水体环境,当 $0.75 < \text{U/Th} < 1.25$ 代表贫氧水体环境,当 $\text{U/Th} < 0.75$ 代表氧化水体;当 $\text{V/Cr} > 4.25$ 代表缺氧水体环境,当 $2 < \text{V/Cr} < 4.5$ 代表贫氧水体环境,当 $\text{V/Cr} < 2$ 代表氧化水体环境;当 $\text{V/Sc} > 9.1$ 代表缺氧水体环境,当 $\text{V/Sc} < 9.1$ 代表氧化水体环境;当 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) > 0.6$ 代表缺氧水体环境,当 $0.46 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.6$ 代表贫氧水体环境,当 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.46$ 代表氧化水体环境(Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994;

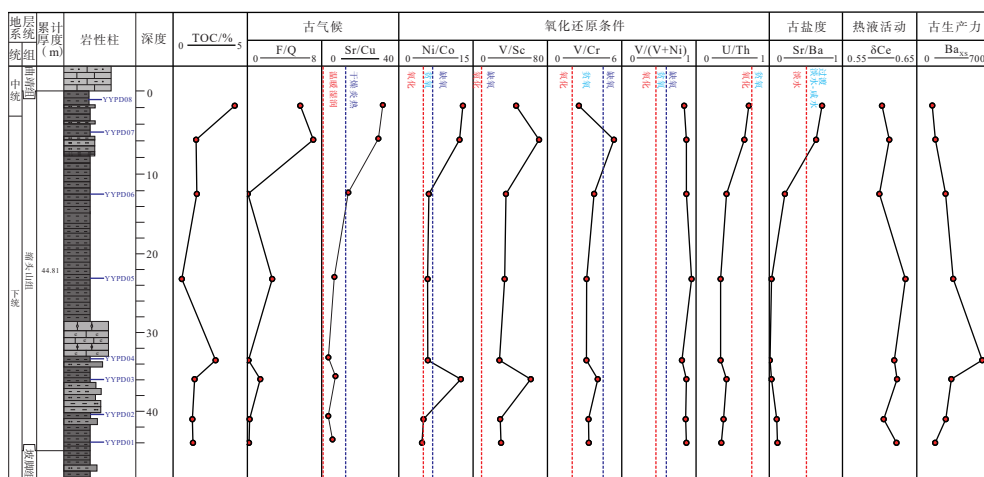


图4 缩头山组沉积环境指标纵向变化图

Fig. 4 Vertical Variation Chart of Depositional Environment Indicators in the Suotoushan Formation

Kimura and Watanabe, 2001; Algeo and Maynard, 2004)。 (表 3), 综合判断缩头山组暗色泥岩沉积过程中的氧化还原条件。

本文利用 Ni/Co、U/Th、V/Cr、V/Sc 和 V/(V+Ni) 指标

表 3 盐源盆地下泥盆统缩头山组暗色泥岩地球化学数据

Tab. 3 Geochemical Data of Dark Mudstone in the Suotoushan Formation, Lower Devonian Series, Yanyuan Basin

检测编号	YYPD01	YYPD02	YYPD03	YYPD04	YYPD05	YYPD06	YYPD07	YYPD08
Li	62.93	55.83	35.24	56.52	51.17	44.38	24.40	19.84
Be	2.74	2.41	3.95	3.13	2.58	2.43	2.05	1.84
Sc	13.77	13.62	17.77	14.57	11.17	12.40	9.34	9.56
Ti	3 865.34	3 500.74	4 468.26	4 054.68	3 975.99	3 133.77	2 044.95	1 995.73
V	414.17	396.44	1 103.22	412.60	379.10	438.29	663.47	442.49
Cr	123.84	119.58	272.06	130.84	120.06	116.18	123.63	174.08
Mn	523.26	605.08	231.09	494.55	112.23	433.63	201.33	195.40
Co	13.42	13.37	13.00	16.42	4.04	10.50	8.08	6.74
Ni	62.96	66.70	162.68	96.24	23.51	63.70	99.07	87.25
Cu	59.60	55.53	91.68	69.09	23.50	46.44	38.34	33.91
Zn	258.18	212.51	551.09	271.19	101.25	750.79	366.79	176.46
Ga	21.42	20.46	25.59	23.23	22.29	19.31	12.72	12.51
Ge	2.08	1.97	2.32	2.30	2.07	2.36	1.29	1.33
As	17.88	16.98	27.63	18.41	11.09	14.08	13.63	6.50
Rb	166.79	158.98	184.33	177.74	168.95	144.22	87.69	86.08
Sr	221.95	304.58	102.96	82.60	113.91	617.90	1 210.95	1 162.57
Y	40.94	41.08	54.50	42.83	23.88	35.79	26.64	30.67
Zr	111.16	105.87	122.77	115.76	115.31	94.60	60.81	79.35
Nb	14.18	13.08	15.44	14.73	14.34	11.89	7.72	7.86
Ba	2 099.45	3 061.34	3 691.45	6 556.00	3 814.28	3 002.82	1 928.27	1 627.57
La	48.92	47.24	58.13	52.37	50.77	43.93	28.06	28.98
Ce	77.39	74.68	87.15	82.00	76.33	65.72	42.69	42.57
Pr	10.66	10.26	12.13	11.31	9.80	9.28	5.88	5.88
Nd	43.01	41.45	49.50	45.73	35.45	37.55	23.85	23.90
Sm	7.74	7.50	8.94	8.13	4.15	6.70	4.15	4.32
Eu	1.39	1.36	1.58	1.31	0.67	1.18	0.78	0.78
Gd	7.13	7.12	8.60	7.55	3.20	6.08	3.91	4.13
Tb	1.11	1.10	1.30	1.16	0.51	0.95	0.61	0.65
Dy	7.07	6.95	8.37	7.20	3.54	5.89	3.81	4.29
Ho	1.42	1.42	1.72	1.47	0.81	1.21	0.81	0.90
Er	4.15	4.09	5.06	4.28	2.61	3.56	2.40	2.70
Tm	0.62	0.60	0.74	0.63	0.42	0.52	0.35	0.42
Yb	3.85	3.82	4.69	3.92	2.85	3.37	2.21	2.52
Lu	0.59	0.59	0.74	0.61	0.45	0.50	0.34	0.41
Hf	4.05	3.84	4.28	4.24	4.17	3.48	2.03	2.44

续表 3

检测编号	YYPD01	YYPD02	YYPD03	YYPD04	YYPD05	YYPD06	YYPD07	YYPD08
Ta	1.05	0.98	1.15	1.07	1.06	0.87	0.54	0.56
W	1.76	1.64	1.90	1.86	1.82	1.57	0.80	0.92
Tl	1.76	1.72	1.63	1.93	1.91	1.45	0.89	0.59
Pb	22.85	21.91	25.70	24.93	24.23	19.63	11.19	9.46
Bi	0.41	0.38	0.48	0.44	0.41	0.33	0.23	0.23
Th	16.36	15.17	17.45	17.05	13.57	14.08	8.79	8.71
U	5.53	5.67	7.09	5.65	4.42	5.78	5.68	6.15
TOC	1.34	1.30	1.45	2.86	0.59	1.60	1.55	4.15
Ni/Co	4.69	4.99	12.52	5.86	5.82	6.06	12.26	12.94
Sr/Cu	3.72	1.12	5.49	1.20	4.85	13.30	31.58	34.29
V/Sc	30.09	29.10	62.08	28.32	33.95	35.35	71.00	46.30
V/Cr	3.34	3.32	4.06	3.15	3.16	3.77	5.37	2.54
V/(V+Ni)	0.87	0.86	0.87	0.81	0.94	0.87	0.87	0.84
U/Th	0.34	0.37	0.41	0.33	0.33	0.41	0.65	0.71
Ba _{xs}	1 674.27	2 676.26	3 199.94	6 109.99	3 376.92	2 658.11	1 703.33	1 408.04
F/Q	0.18	0.24	1.39	0.13	2.67	0.06	7.09	5.69
Sr/Ba	0.11	0.10	0.03	0.01	0.03	0.21	0.63	0.71
δCe	0.62	0.61	0.62	0.62	0.63	0.60	0.61	0.60

缩头山组暗色泥岩 Ni/Co 值介于 4.69-12.94 之间, 平均值为 8.14, 指示缩头山组沉积于贫氧-缺氧环境; V/Cr 值介于 2.54-5.37 之间, 平均值为 3.59, 指示缩头山组沉积于贫氧环境; U/Th 值介于 0.33-0.71 之间, 平均值为 0.44, 由底部向上部逐渐增大(图 4), 指示缩头山组沉积于氧化环境, 缺氧条件逐渐增强; V/Sc 值介于 28.32-71.00 之间, 平均值为 42.02, 指示缩头山组沉积于缺氧环境; V/(V+Ni)值介于 0.81-0.94 之间, 平均值为 0.87, 指示缩头山组沉积于缺氧环境(图 5)。综上, 研究区缩头山组暗色泥岩沉积时的底水以缺氧环境为主, 对有机质的保存富集有利。

4.2.2 黄铁矿特征

黄铁矿是古海洋中金属硫化物的重要载体, 沉积岩中草莓状黄铁矿的形态、分布状况以及粒度大小等特征均可指示沉积时期古水体的氧化还原条件(常晓琳等, 2020)。在缺氧硫化环境中, 黄铁矿形成于氧化还原界面处, 水体交换活动强烈, 硫酸盐通过还原作用下形成的硫化氢上浮, 黄铁矿受到重力作用下沉, 由于形成时间短且沉降快, 草莓状黄铁矿中的粒度较小(3.0 μm~6.0 μm), 分布较为集中, 该环境有利于有机质的保存; 在氧化或贫氧条件水体中, 氧化还原界

面位于沉积物之下, 水体较为安静、滞留, 古水体中硫化氢和亚铁离子供应缓慢, 草莓状黄铁矿形成时间较长, 因此该环境中草莓状黄铁矿中的粒度较大且大小不均一(5.0 μm~10.0 μm), 分布较为分散, 该环境不利于有机质的保存(梁超等, 2024)。本研究通过扫描电镜对缩头山组泥岩样品进行观察分析, 发现样品中草莓状黄铁矿发育(图 6), 且粒径多分布在 3.7 μm~5.7 μm 之间, 部分粒径较小的在 2.5 μm 左右, 通过黄铁矿的草莓状结构及其粒径大小, 判断研究区缩头山组沉积期古水体为缺氧硫化环境, 有机质保存条件较好。

4.3 陆源碎屑输入

陆源碎屑输入是影响沉积物中有机质富集的重要因素, Ti 和 Zr 元素主要来源于陆源, 留存于黏土矿物和重矿物中, 通过降雨等搬运从而进入古水体, 并且该 2 种元素化学性质相对稳定, 在搬运、沉积过程中不易受到风化作用和成岩作用的影响, 因此常借助 Ti 及 Zr 元素含量指示陆源输入程度的强弱, Ti 和 Zr 元素的值越高, 表明陆源碎屑物质输入量越多(Algeo et al., 2011)。缩头山组样品中 Ti 含量介于 1 995.73-4 468.26 μg/g, 平均值为 0.34 μg/g; Zr 含量介于 60.81-

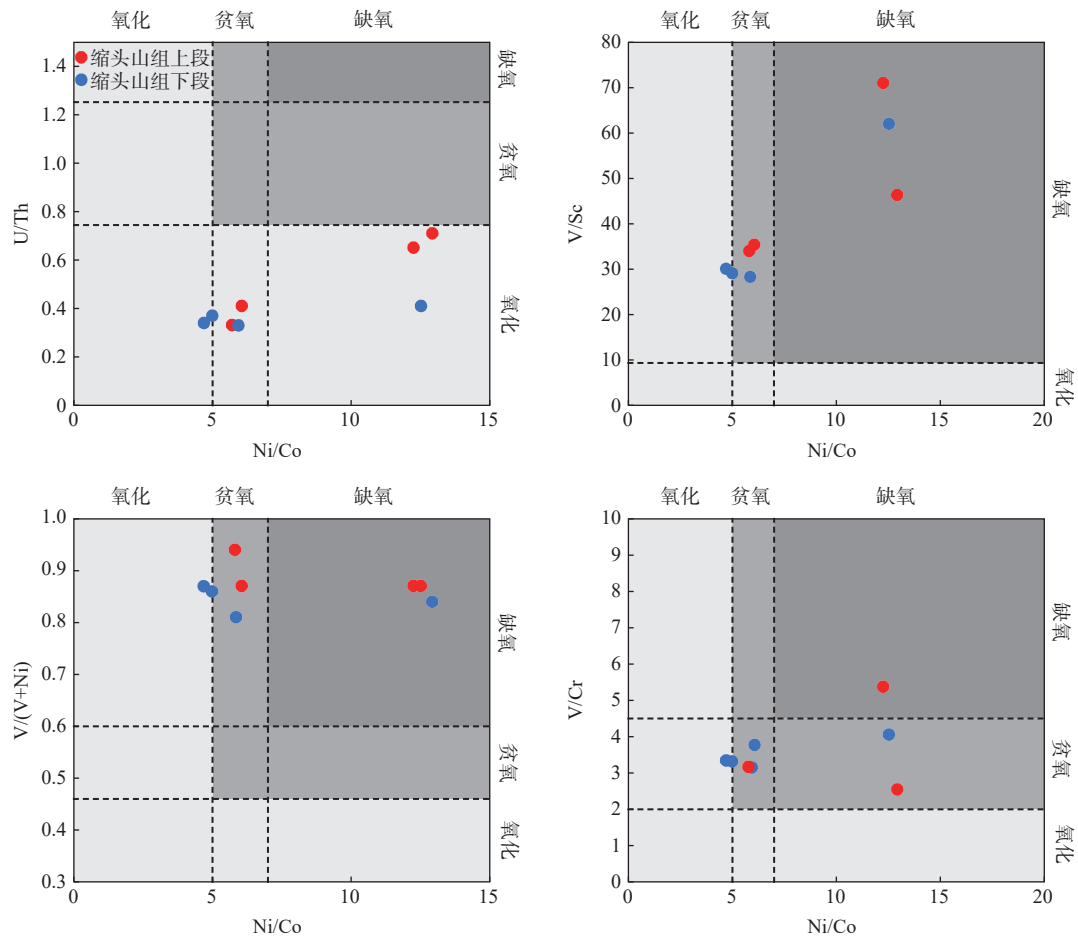


图5 缩头山组沉积期氧化还原条件

Fig. 5 Redox Conditions during the Depositional Period of the Suotoushan Formation

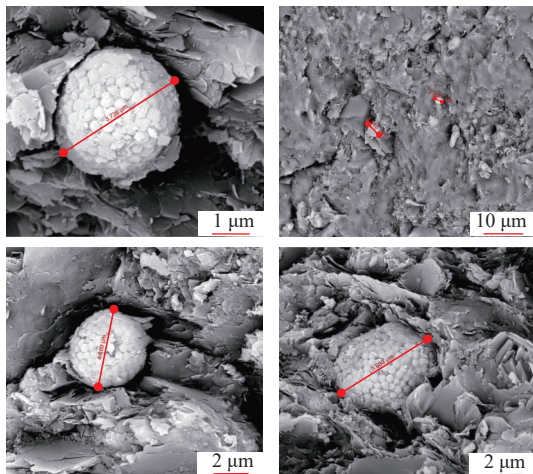


图6 缩头山组暗色泥岩黄铁矿形态

Fig. 6 Pyrite Morphology in Dark Mudstone of the Suotoushan Formation

122.77 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 100.70 $\mu\text{g/g}$ (表 3)。结果表明缩头山组沉积期陆源碎屑输入量大, 为古水体带来丰富的营养物质, 促进了古生产力的提高。

4.4 古盐度

古盐度的不同会使古水体产生分层, 底层的水体易于形成缺氧还原环境, 对机质的沉积保存为有利环境, 因此判断古盐度指标对有机质的保存与富集有重要意义。Sr 与 Ba 是两个化学性质相似的元素, 而 Sr 的迁移能力比 Ba 强, 因此在不同的水体环境中, 两个元素的比值有所不同, 通过 Sr 元素丰度与 Sr/Ba 比值来判断缩头山组暗色泥岩沉积期的古盐度, 当 $\text{Sr}(10^{-6}) < 300$ 指示淡水沉积环境, $300 < \text{Sr}(10^{-6}) < 500$ 指示淡水-咸水过渡沉积环境, $500 < \text{Sr}(10^{-6})$ 指示咸水沉积环境; 当 $\text{Sr/Ba} < 0.5$ 指示淡水沉积环境, $0.5 < \text{Sr/Ba} < 1.0$ 指示淡水-咸水过渡沉积环境, $\text{Sr/Ba} > 1.0$ 指示咸水沉积环境(李浩等, 2017; Zhang et al., 2017)。研究区样品 $\text{Sr}(10^{-6})$ 介于 82.60-1210.95, 平均值为 477.18, 缩头山组底部与中部皆为淡水沉积环境, 到顶部过渡到咸水沉积环境; Sr/Ba 比值为 0.01-0.71, 平均值为 0.23(表 4), 指示低盐度的淡水沉积环

境。从古盐度指标的纵向变化来看(图 4), 缩头山组底部与中部皆为淡水沉积环境, 到顶部时变化到淡水-咸水过渡沉积环境, 古水体盐度逐渐增大, 两种指标指示的纵向变化相吻合。结合上文对古气候变化的分析, 缩头山组沉积初期与中期气候温暖湿润, 降雨通过地表径流带来了大量有机质碎屑的输入, 到了缩头山组沉积末期古气候从温暖湿润向干冷转变, 降雨逐渐减少, 陆源输入量变少, 淡水输入量减少, 导致海水盐度提高。前人研究表明, 上扬子地区在早泥盆世位于低纬度的热带至亚热带区, 古纬度为 6.9°S (张世红等, 2001), 结合古盐度分析, 可以判断盐源盆地在缩头山组沉积期主要为温暖潮湿的气候环境, 降水较多。进一步, 结合沉积相分析的结果, 判断研究区在缩头山组沉积期是一个淡化潟湖, 因此, 推断该地区受河流及陆源物质的影响较大。

4.5 热液活动

缩头山组沉积环境的分析主要是基于地球化学元素参数, 因此, 需要对元素数据及其可靠性进行判断, 分析元素浓度是否受热液活动的影响, 提高特征元素参数判别出的沉积环境才具有可靠性。热液活动对海洋中生物的繁盛有着积极影响, 大量研究证明热液活动沉积形成的烃源岩中 Ba、Cu、Zn 和 V 等元素明显富集, 这是因为海底热液活动带来的大量营养元素(张文正等, 2010; Zhang et al., 2018), 从微量元素标准化配分图(图 7a)中可见 Ba、Zn 和 V 等特征元素明显富集, 符合热液活动沉积的元素特征。由于稀土元素在化学性质上的相似性和系统差异性, 可被用作热液活动的判别标志(Yao et al., 2014), δCe 在沉积作

用中可作为指示热液活动的指标, 热液活动下的沉积物具有明显的负异常, 可通过稀土元素的标准化配分模式特征(图 7b)以及 Ce 元素的异常来判断沉积期的热液活动。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 均值为 1.32, 表明岩石样品轻重稀土的分异程度低, LREE/HREE 均值为 0.67, 重稀土元素较轻重稀土元素富集, 标准化配分曲线略微左倾, 本研究中 δCe 平均值为 0.62, 呈现出明显负异常, 符合缩头山组沉积期受到热液活动影响的特征。热液中相对富集 Zn 元素与 Ni 元素, 亏损 Co 元素, 因此利用 Ni-Co-Zn 三角图解来判断热液活动的影响, 由三角图解结果(图 8)可知, 研究区岩石样品投图在热液沉积区域, 说明缩头山组沉积期有受到热液活动影响。热液活动可为古海洋中生物的发育繁盛提供了 Ba、Cu 和硝酸盐等丰富的营养物质, 在一定程度上促进了古生产力的提高, 从而有利于缩头山组有机质的富集。

4.6 古生产力

古生产力是指古海洋生物在单位面积、单位时间内所产生有机物总量(Pedersen and Calvert, 1990)。在最近数十年的研究中, Ba 是用来指示古生产力的重要元素指标之一, 因为生源钡的含量与有机质丰度呈较强相关性, Ba 元素通常以重晶石(BaSO_4)的形式保存在沉积物中, 且沉积物中钡的含量与生物生产力呈正相关性, 在高初级生产力的地区, 生源钡(Ba_{xs})的含量约在 $1\,000\text{--}5\,000\,\mu\text{g/g}$ 之间(Algeo et al., 2011; Schoepfer et al., 2015)。 Ba_{xs} 的计算公式如下:

$$\text{Ba}_{\text{xs}} = \text{Ba}_{\text{total}} - [\text{Ti}_{\text{sample}} \times (\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{shale}}] \quad (2)$$

公式 2 中, Ba_{total} 为所测样品中的 Ba 含量, $\text{Ti}_{\text{sample}}$

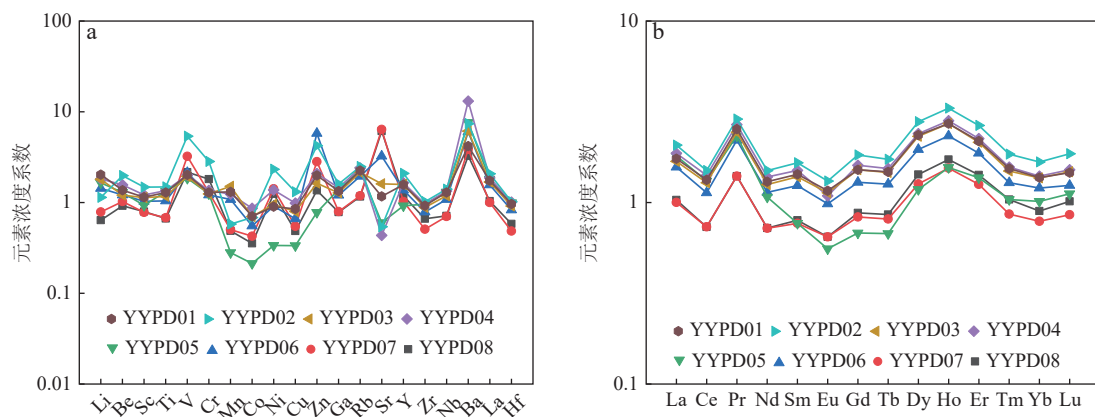
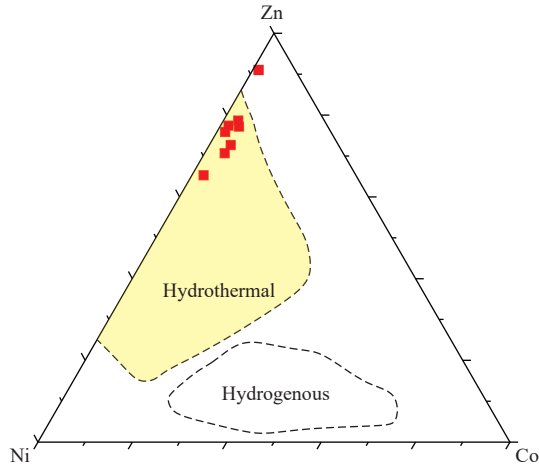


图7 岩石样品微量元素配分图(a)与稀土元素配分图(b) (世界黑色页岩标准值据 Ketris and Yudovich, 2009)

Fig. 7 Trace Element (a) and Rare Earth Element (b) Distribution Patterns in Rock Samples (Standardized values for global black shales are based on Ketris and Yudovich, 2009)



Hydrogenous 代表自生沉积物, Hydrothermal 代表热液作用

图8 研究区缩头山组泥岩 Ni-Co-Zn 三角图解

(据 Choi and Hariya, 1992 修编)

Fig. 8 Ni-Co-Zn Triangular Diagram of Mudstone from the Suotoushan Formation in the Study Area (modified from Choi and Hariya, 1992)

为所测样品中的 Ti 含量; $(Ba/Ti)_{shale}$ 表示平均页岩中的 Ba/Ti 比值, 平均页岩为后太古宙澳大利亚页岩 PAAS 值, 其 Ba/Ti 值为 0.11 (Taylor and McLennan, 1985)。通过计算, 缩头山组暗色泥岩 Ba_{xs} 含量介于 1 408.04-6 109.99 $\mu g/g$ 之间, 平均值为 2 850.86 $\mu g/g$ (表 3), 指示盐源盆地在缩头山组暗色泥岩沉积期的海洋初级生产力与靠近赤道的太平洋地区相近, 表明该地区古水体在早泥盆世具有较高的古生产力, 为有机质的富集

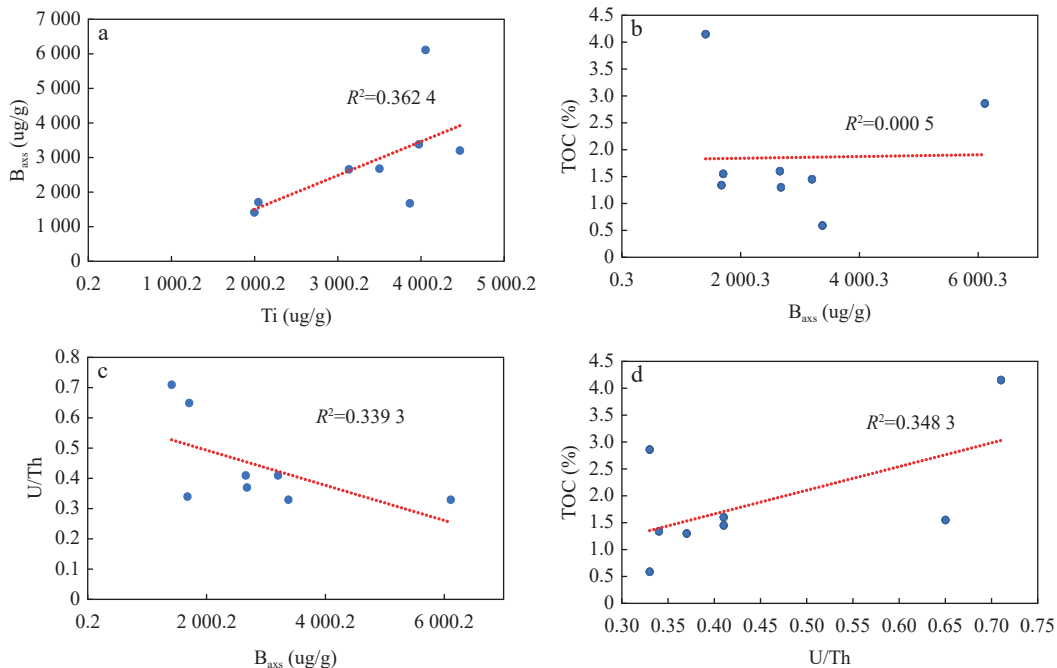
奠定了物质基础。

5 暗色泥岩有机质富集机制

有机质的富集是一个复杂的、连续的过程, 受控于多种因素, 与气候突变及构造运动等多种地质事件密切相关 (潘松圻等, 2021)。因此, 在沉积环境恢复的基础上, 结合古地理特征, 从古生产力、保存条件、稀释作用、热液作用 4 个方面来探讨缩头山组暗色泥岩有机质富集机制。

陆源物质输入指标 Ti 与古生产力指标 Ba_{xs} 呈现出明显的正相关性, 相关系数 (R^2) 为 0.362 4 (图 9A), 因此, 推断盐源盆地缩头山组在温暖潮湿气候的影响下, 降水较多, 陆源物质输入带来大量的营养物质, 并利于表层水与底层水的上下沟通, 促进了营养物质的循环, 造成浮游生物和底栖生物大量繁殖, 从而使水体初级生产力提高, 为暗色泥岩富集有机质提供了充足的物质来源, 有机质向水体底部的输入通量增大。TOC 含量与古生产力指标 Ba_{xs} 的相关性较弱 (图 9B), 相关系数 (R^2) 为 0.000 5, 分析结果说明高古生产力仅为缩头山组暗色泥岩有机质富集的重要前提条件, 高古生产力促进了水体缺氧还原环境的形成, 底层水体的缺氧还原环境有利于有机质的保存与富集。

古生产力指标 Ba_{xs} 与氧化-还原条件指标 U/Th 呈较强的负相关性, 相关系数 (R^2) 为 0.339 3 (图 9C), 由此推断较高的水体生产力造成生物的大量繁盛及死



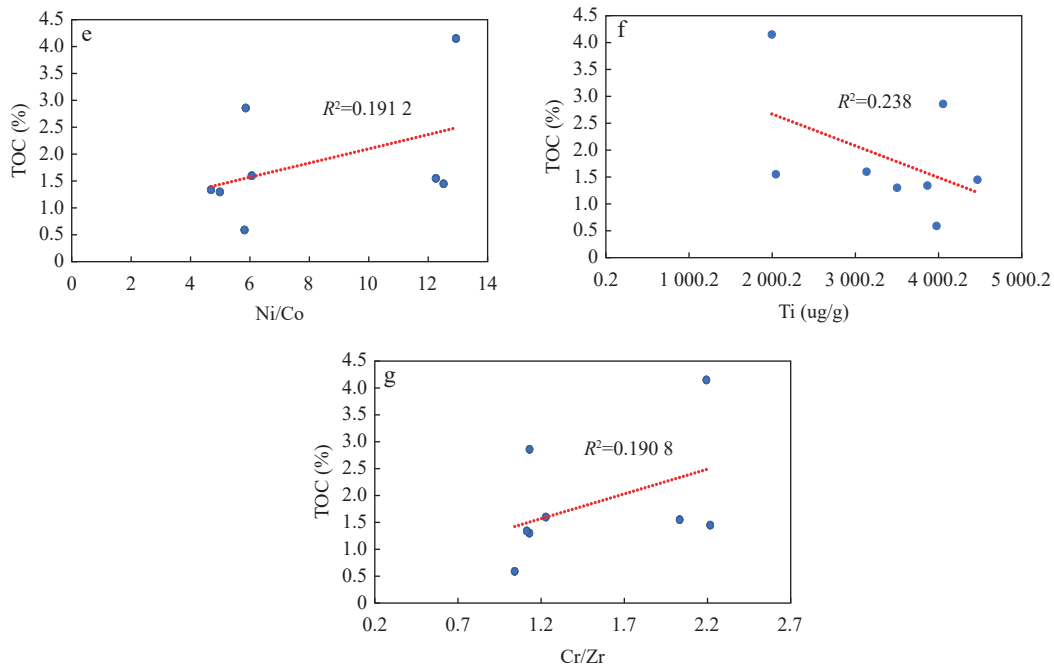


图9 缩头山组暗色泥岩各项指标相关性图

Fig. 9 Correlation Diagram of Various Parameters in Dark Mudstone from the Suotoushan Formation

亡,生物残骸的降解消耗着底水的氧气,会促进底层水体形成缺氧的环境,对有机质的保存十分有利。此外,缩头山组暗色泥岩沉积于潟湖之中,受生物礁的阻隔,潟湖中的水体相对安静、低能,受洋流作用影响小,也有利于水体底部形成缺氧-还原的环境,从而为有机质保存的提供了有利环境。TOC 含量与氧化-还原条件指标 U/Th 值、Ni/Co 值的相关性偏低(图 9D, E),相关系数(R^2)仅为 0.3483 和 0.1912,结合沉积期较高的古生产力,本研究认为古海洋中高生产力造成的生物繁盛,产生了大量有机质沉降,有机质在沉降过程中的大量分解造成了缺氧环境的形成,同时,海相泥岩矿物中的草莓状黄铁矿也证明了缩头山组沉积期的滞留水体下,硫酸盐细菌通过还原作用对氧组分的消耗造成的缺氧水体环境。因此,缺氧还原条件对 TOC 含量影响相对较小,并非研究区有机质富集的主控因素。

TOC 含量与陆源输入指标 Ti 呈负相关性(图 9F),相关系数(R^2)为 0.238,推断大量的陆源物质的输入,一方面促进水体生产力的提高,加快了水体沉积速率,另一方面,也稀释了沉积物中的有机质,使有机质含量降低。

Cr/Zr 值是表征热液输入强度的有效指标(Marchig et al., 1982; Zhang et al., 2018),通过相关性分析可知,TOC 含量与 Cr/Zr 值呈微弱的正相关关系(图 9G),相

关系数(R^2)为 0.1908,相关性较低。热液活动通过带来大量的热能与营养元素,促进古海洋中的生物活动与微生物的发育,提高了古海洋的生产力,一定程度上有利于富有机质岩系的发育,但 TOC 含量与 Cr/Zr 值的较低相关性也表明,热液活动对有机质富集的贡献可能受到陆源输入等其他因素的影响,在有机质富集中作用有限。

综上所述,盐源盆地在缩头山时期气候温暖潮湿,降雨较多,大量的降雨给古水体带来了丰富的陆源营养物质,与此同时,热液活动也为古水体带来热能与营养物质,在两者共同作用下古海洋中生物发育繁盛,极大提高了水体生产力,但大量陆源物质的输入也一定程度上稀释了有机质含量。繁盛的海洋生物带来了大量的有机质沉降,生物的残骸降解不断消耗着底层水体的氧气;同时,研究区为局限、滞留、低能的低盐度潟湖环境,由生物礁与周围水体相隔离,潟湖中的水体较为安静,水动力条件为静水环境,只有零星的流水和扰动,利于细粒泥质岩的沉积,两者共同促成了缺氧还原的水体环境,对有机质的埋藏与保存十分有利,从而形成缩头山组富有机质泥岩。因此,大量的陆源输入与海底热液活动共同促成了水体较高的生产力,是沉积物中大量有机质的来源,而潟湖环境及较高的水体生产力促进了缺氧还原环境的形成,有利于有机质的埋藏与保存(图 10)。

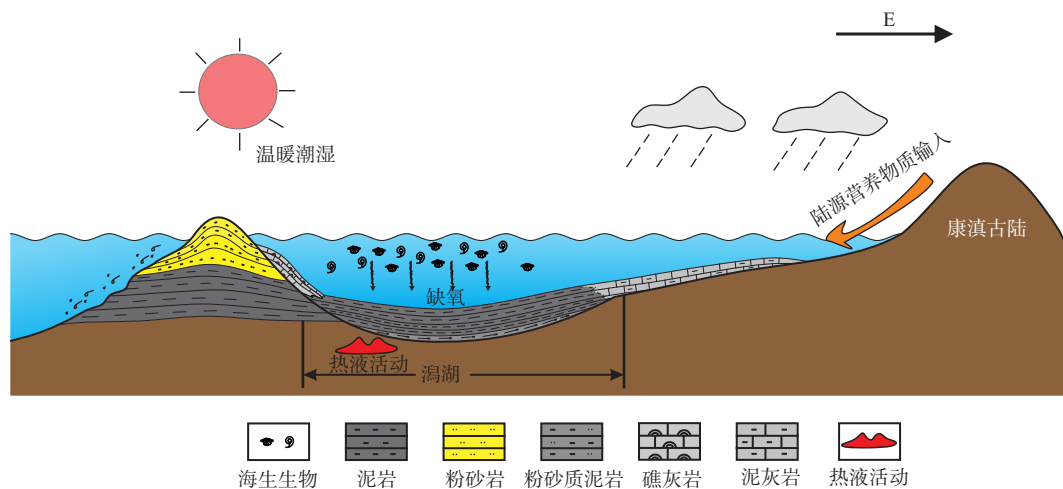


图10 缩头山组富有机质暗色泥岩沉积模式

Fig. 10 Sedimentary model of organic-rich dark mudstone in Suotoushan Formation

6 结论

(1) 盐源盆地下泥盆统缩头山组岩性主要为暗色泥岩、粉砂质泥岩、亮晶灰岩、泥晶灰岩与生物礁灰岩。沉积相为镶边台地相, 共包含潟湖、礁坪、台地边缘、塌积斜坡及盆地五种沉积亚相, 暗色泥岩沉积于潟湖环境。

缩头山组暗色泥岩 TOC 含量平均值为 1.86%, Ro 平均值为 1.15%, 有机质以 II₁ 和 II₂ 型为主, 处于热裂解生气阶段。缩头山组暗色泥岩脆性矿物平均值为 64.8%, 脆性指数平均值为 64.41。

(2) 研究区下泥盆统缩头山组泥岩沉积时期古气候温暖潮湿, 沉积水体为缺氧还原的底水环境, 陆源碎屑物质输入量大, 古水体具有盐度低及生产力高的特点。

(3) 大量的陆源输入与海底热液活动共同促成了水体较高的生产力, 是沉积物中大量有机质的来源。潟湖环境及较高的水体生产力促进了缺氧还原环境的形成。两者共同促进了有机质的富集。

致谢: 感谢两位匿名审稿人提出的意见与建议, 使本文的质量得到了极大地提高。感谢成都理工大学徐川讲师与赵亮博士在论文修改过程中的建议与讨论。

参考文献(References):

Algeo T J, Kuwahara Kiyoko, Sano Hiroyoshi, et al. Spatial vari-

ation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011(1-2): 65-83.

Algeo T J, Maynard JB. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. *Chemical Geology*, 2004(3-4): 289-318.

Becker R T, Marshall J E A, Da Silva A C, et al. The devonian period[M]//Geologic time scale 2020. Elsevier, 2020: 733-810.

Choi J H, Hariya Y. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan[J]. *Economic Geology*, 1992, 87(5): 1265-1274.

Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.

Dal C J, Mietto P, Newton R J, et al. Discovery of a major negative $\delta^{13}\text{C}$ spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts[J]. *Geology*, 2012, 40(1): 79-82.

Demaison G. J. Moore G. T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *Organic Geochemistry*, 1980(1): 9-31.

Gallego-Torres D, Martinez-Ruiz F, Paytan A, et al. Pliocene-Holocene evolution of depositional conditions in the eastern Mediterranean: Role of anoxia vs. productivity at time of sapropel deposition[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007(2-4): 424-439.

Ghadeer, Samer G. Macquaker, Joe H S. Sediment transport processes in an ancient mud-dominated succession: a comparison of processes operating in marine offshore settings and anoxic basinal environments[J]. *Journal Of The Geological Society*, 2011(5): 1121-1132.

Hatch J. R, Leventhal J. S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1): 65-82.

- Jin X C, Shah Subhash N, Roegiers, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs - An integrated petrophysics and geomechanics approach[C]. 2014: 153-166.
- Jones B, Manning D. A. C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994(1-4): 111-129.
- Katz B J. Controlling Factors on Source Rock Development—A Review of Productivity, Preservation, and Sedimentation Rate[M]. 2005.
- Ketris M P, Yudovich Y E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals[J]. *International journal of coal geology*, 2009, 78(2): 135-148.
- Kimura H, Watanabe Y. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Geology*, 2001(11): 995-998.
- Kuhn G, Diekmann B. Late Quaternary variability of ocean circulation in the southeastern South Atlantic inferred from the terrigenous sediment record of a drift deposit in the southern Cape Basin (ODP Site 1089)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 182(3-4): 287-303.
- Marchig V, Gundlach H, Möller P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments[J]. *Marine Geology*, 1982, 50(3): 241-256.
- Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition?. SPE, 2008: SPE-115258-MS.
- Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, et al. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin[J]. *Chemical Geology*, 2003(1-4): 229-273.
- Schoepfer Shane D, Shen Jun, Wei Hengye, et al. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 23-52.
- Stow DAV, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001(4): 491-498.
- Pedersen T. F.; S. E. Calvert. Anoxia vs productivity; what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks?[J]. *AAPG bulletin*, 1990, Vol. 74(4): 454-466.
- Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution. An evaluation of the geochemical record preserved in sedimentary Rocks[M]. Oxford: lackwell Scientific Publishers, 1985.
- Wang X L, Miao X D. Weathering history indicated by the luminescence emissions in Chinese loess and paleosol[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(13/14): 1719-1726.
- Yao C Y, Ma D S, Ding H F, et al. Trace elements and stable isotopic geochemistry of an Early Cambrian chert-phosphorite unit from the lower Yurtus Formation of the Sugetbrak section in the Tarim Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57: 454-464.
- Zhang S H, Liu C Y, Liang H, et al. Paleoenvironmental conditions, organic matter accumulation, and unconventional hydrocarbon potential for the Permian Lucaogou Formation organic-rich rocks in Santanghu Basin, NW China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 44-60.
- Zhang X G, Lin C Y, Zahid M A, et al. Paleosalinity and water body type of Eocene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 469-478.
- 蔡媛, 孔祥鑫, 姜在兴, 等. 潜江凹陷古近系盐间地层沉积环境与有机质富集——以潜江组三段下亚段 10 号韵律为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(5): 605-616+636.
- Cai Y, Kong X X, Jiang Z X et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment of Paleogene inter-salt strata in Qianjiang sag: a case study from 10th rhythmite of the Lower Member 3 of Qianjiang Formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 605-616+636.
- 曹庆英. 透射光下干酪根显微组分鉴定及类型划分[J]. *石油勘探与开发*, 1985(5): 14-23+81-88.
- Cao Q Y. Identification Of Micro components And Types of Kerogen Under Transmitted Light[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1985(5): 14-23+81-88.
- 常晓琳, 黄元耕, 陈中强, 等. 沉积地层中草莓状黄铁矿分析方法及其在古海洋学上的应用[J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 150-165.
- Chang X L, Huang Y G, Chen Z Q et al. The microscopic analysis of pyrite framboids and application in paleo-oceanography[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 150-165.
- 程锦翔, 邓敏, 杨贵来, 等. 四川盐源地区名胜剖面志留系龙马溪组黑色泥页岩地球化学特征及物源构造背景分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2024, 44(4): 840-853.
- Cheng J X, Deng M, Yang G L, et al. Analysis of geochemical characteristics and provenance tectonic background of black shale in Silurian Longmaxi Formation of Mingsheng section in Yanyuanarea, Sichuan Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024, 44(4): 840-853.
- 邓敏, 程锦翔, 王正和, 等. 盐源-宁蒭地区早泥盆世古地理特征及油气潜力分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020(4): 25-35.
- Deng M, Cheng J X, Wang Z H, et al. A study on paleogeography of the Early Devonian and potential of hydrocarbon resources in Yanyuan-Ninglang area, southwest of China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020(4): 25-35.
- 方立羽. 宁蒭盐源地区云宁地 1 井泥盆系储层特征研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2020.

- Fang L Y. Study on Reservoir Characteristics of Devonian of Well 1, Ninglang, Yunnan Province in Ninglang Yanyuan Region[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- 胡受权, 郭文平. 云南宁蒗地区菱形构造格局及其联合构造型式[J]. 矿物岩石, 1995, 15(4): 93-99.
- Hu S Q, Guo W P. Rhombohedral Structure Framework And Its Junction Structure Style In Ninglang Area Of Yunnan[J]. Mineralogy and Petrology, 1995, 15(4): 93-99.
- 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. 地学前缘, 2005(2): 163-170.
- Huang Y J, Wang C S, Wang Y L. Progress in the study of proxies of pale ocean productivity[J]. Earth Science Frontiers, 2005(2): 163-170.
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
- Jiang Z X, Liang C, Wu J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydro carbon bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786.
- Li H, Lu J L, Li R L, et al. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1774-1786.
- 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680-1685.
- Li Q H, Chen M, Jin Y, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.
- 梁超, 籍士超, 操应长, 等. 深水页岩黄铁矿特征、形成及意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(02): 327-359.
- Liang C, Ji S C, Cao Y C, et al. Characteristics, origins, and significance of pyrites in deep-water shales. Science China Earth Sciences, 2024, 54(02): 327-359.
- 马玉孝, 刘家铎, 王洪峰, 等. 攀枝花地质[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.
- Ma Y X, Liu J D, Wang H F, et al. Geology of the Panzhihua Region[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001.
- 潘松圻, 邹才能, 李勇, 等. 重大生物事件与化石能源形成演化——兼论地球系统框架下能源学发展[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 498-509.
- Pan S Q, Zou C N, Li Y, et al. Major biological events and fossil energy formation: On the development of energy science under the earth system framework[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 498-509.
- 王正和, 邓敏, 程锦翔, 等. 康滇古陆西侧断裂及岩浆活动对油气保存条件的影响: 以盐源盆地为例[J]. 地球科学, 2018, 第 43 卷 (10): 3616-3624.
- Wang Z, Deng M, Cheng J, et al. Influence of Fault and Magmatism on Oil and Gas Preservation Condition, to the West of Kangdian Ancient Continent: Taking Yanyuan Basin as an Example[J]. Earth Science, 2018, 64(3): 610-622.
- 余谦, 程锦翔, 张海全, 等. 盐源地区古生界页岩气地质条件分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(3): 118-128.
- Yu Q, Cheng J X, Zhang H Q, et al. Analysis of shale gas geological conditions of Paleozoic in Yanyuan area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(3): 118-128.
- 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩脆性评价与“甜点层”预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 51-60.
- Zhang C C, Wang Y M, Dong D Z, et al. Evaluation of the Wufeng—Longmaxi shale brittleness and prediction of "sweet spot layers" in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 51-60.
- 张茜, 王剑, 余谦, 等. 扬子地台西缘盐源盆地下志留统龙马溪组黑色页岩硅质成因及沉积环境[J]. 地质论评, 2018, 64(3): 610-622.
- Zhang Q, Wang J, Yu Q, et al. The Silicon Source and Sedimentary Environment of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Yanyuan Basin, Western Edge of the Yangtze Platform[J]. Geological Review, 2018, 64(3): 610-622.
- 张世红, 朱鸿, 孟小红. 扬子地块泥盆纪—石炭纪古地磁新结果及其古地理意义[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 303-313.
- Zhang S H, Zhu H, Meng X H. New Paleomagnetic Results from the Devonian-Carboniferous Successions in the Southern Yangtze Block and Their Paleogeographic Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 303-313.
- 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 424-429.
- Zhang W Z, Yang H, Xie L Q, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.
- 钟康惠, 刘肇昌, 施央等. 盐源—丽江构造带是新生代陆内造山带[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 36-43.
- Zhong K H, Liu Z C, Shi Y, et al. Yanyuan-Lijiang Tectonic Zone: A Cenozoic Intracontinental Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 36-43.
- 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 地质出版社, 2013.
- Zou C N, Tao S Z, Hou L H, et al. Unconventional oil and gas geology[M]. Geological Publishing Co, 2013.