

引用格式: 施辉, 李宗星, 杨元元, 等, 2022. 柴东欧南凹陷石炭系烃源岩有机质富集的影响因素 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 203–216. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021135

Citation: SHI H, LI Z X, YANG Y Y, et al., 2022. The factors influencing the enrichment of organic matters in the Carboniferous source rocks, Ounan depression, eastern Qaidam basin [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 203–216. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021135

柴东欧南凹陷石炭系烃源岩有机质富集的影响因素

施 辉^{1,2,3}, 李宗星¹, 杨元元¹, 彭 博¹, 胡俊杰¹, 方欣欣¹, 张 浩¹, 魏小洁¹
SHI Hui^{1,2,3}, LI Zongxing¹, YANG Yuanyuan¹, PENG Bo¹, HU Junjie¹, FANG Xinxin¹, ZHANG Hao¹,
WEI Xiaojie¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China*

The factors influencing the enrichment of organic matters in the Carboniferous source rocks, Ounan depression, eastern Qaidam basin

Abstract: The Ounan depression is a favorable structural unit for the Carboniferous hydrocarbon migration and accumulation, which demonstrates certain exploration potential. However, the organic matter enrichment mechanism is still unclear, which results in the absence of effective guidance for predicting the distribution of high-quality source rocks and restricts the process of oil and gas exploration. Based on geochemical analysis and XRD, SEM and other tests, the main factors influencing the enrichment of organic matters in Carboniferous source rocks have been identified through a comprehensive investigation into the aspects such as mineral composition, organic matter abundance, kerogen type, thermal evolution degree, formation environment, and the relationship between TOC and primary minerals. The results reveal that shales and carbonate source rocks have been developed in the Carboniferous, a large quantity at poor-medium level and a few at good or above level. They were deposited in the environment of intercontinental shelf with saline-water, arid-hot climate and weak oxidation and reduction. The dispersed organic matters are composed of mixed marine and terrestrial origins, which are overall in a “maturity-high maturity stage”. The Carboniferous clastic source rocks are mainly residual type III kerogen, but the extracted chloroform bitumen “A” is mainly derived from type II kerogen. TOC values increase with the growing of quartz minerals because the high-abundance source rocks are rich in siliceous biological fossils. The SiO₂ in the high-SiO₂ source rocks has been identified as biogenic, suggesting that the participation of siliceous organisms in the Carboniferous cause the enrichment of marine organic matters and greatly improve the primary productivity of the sediments. This study provide the basis for predicting the distribution of Carboniferous high-quality source rocks and the deployment of oil and gas resources in the study area.

Key words: biogenic silica; organic enrichment; high-quality source rock; Carboniferous; Ounan depression; Qaidam basin

摘 要: 柴达木盆地东部地区欧南凹陷是石炭系油气运聚成藏的有利构造单元, 具有一定勘探潜力, 但

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190107, DD20190094); 中国地质科学院基本科研业务费项目 (DZLXJK202006)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20190107, DD20190094) and Basic Research Fund of the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant No. DZLXJK202006)

第一作者简介: 施辉 (1983—), 男, 副研究员, 主要从事油气地质及成藏机理相关研究工作。E-mail: shui@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2021-10-09; **修回日期:** 2021-12-15; **责任编辑:** 范二平

对有机质富集机理认识不清导致对优质烃源岩分布的预测缺乏有效指导，制约了油气勘探进程。基于地球化学分析、XRD、SEM 等分析测试，对石炭系烃源岩矿物组分、有机质丰度、干酪根类型、热演化程度、形成环境、TOC 与主要矿物关系等进行了综合研究，明确了有机质富集的主要影响因素。结果表明：石炭系发育大量“差—中等”级别和少量“好”以上级别泥页岩和碳酸盐岩烃源岩，形成于咸水、干热、弱还原—弱氧化过渡带的海陆交互陆棚沉积环境；分散有机质由海相和陆相混源型生物有机质组成，整体处于“成熟—高成熟阶段”，烃源岩主要残留Ⅲ型干酪根，但抽提的氯仿沥青“A”主要来自于Ⅱ型干酪根；高丰度烃源岩 TOC 随石英矿物组分增大而升高，富含硅质微体生物化石，高硅烃源岩中硅质证实为生物成因，推测石炭纪硅质生物的参与引起海相生物有机质的富集并极大提高了沉积物初级生产力。研究认识为研究区石炭系优质烃源岩分布预测和下一步油气资源部署提供了依据。

关键词：生物硅质；有机质富集；优质烃源岩；石炭系；欧南凹陷；柴达木盆地

中图分类号：TE121 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616 (2022) 02-0203-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021135

0 引言

柴达木盆地是中国西部重要含油气盆地之一，目前油气勘探与开发主要集中在盆地西部古—新近系、北缘侏罗系和东部三湖地区第四系这 3 套含油气系统（付锁堂等，2016）。近年来，柴达木盆地东部（简称柴东）石炭系取得了油气资源调查的一系列进展性认识（马寅生等，2012；Li et al.，2014；刘成林等，2016；马立成等，2020），部署的钻井也获得了重要的油气发现（李宗星等，2019；彭博等，2020），预示该层系的油气资源前景较广阔，有望成为盆地未来油气勘探的接替领域。

柴东欧南凹陷石炭系的石油地质条件优越，成藏要素配置良好，是油气运聚成藏的有利次级构造单元（刘成林等，2021）。凹陷周缘地区广泛发育石炭系野外露头油苗，经油源对比研究确定石油来源于石炭系烃源岩（刘成林等，2012）。石炭系发育多套烃源岩层系，包括暗色泥/页岩、煤和泥灰岩 3 种岩性类型烃源岩（曹军等，2016；李军亮等，2016）。有机地球化学测试结果显示石炭系烃源岩有机质类型以腐殖型（Ⅲ型）为主，处于成熟—高成熟演化阶段，总体表现为“中等—好”评价级别的烃源岩，具有一定生烃潜力（李军亮等，2016）；烃源岩抽提物的生物化合物指标说明有机质具有陆相和海相混合来源的特点，堆积于海陆交汇的半深—深水和弱氧化—弱还原的沉积环境（Wang et al.，2018）。

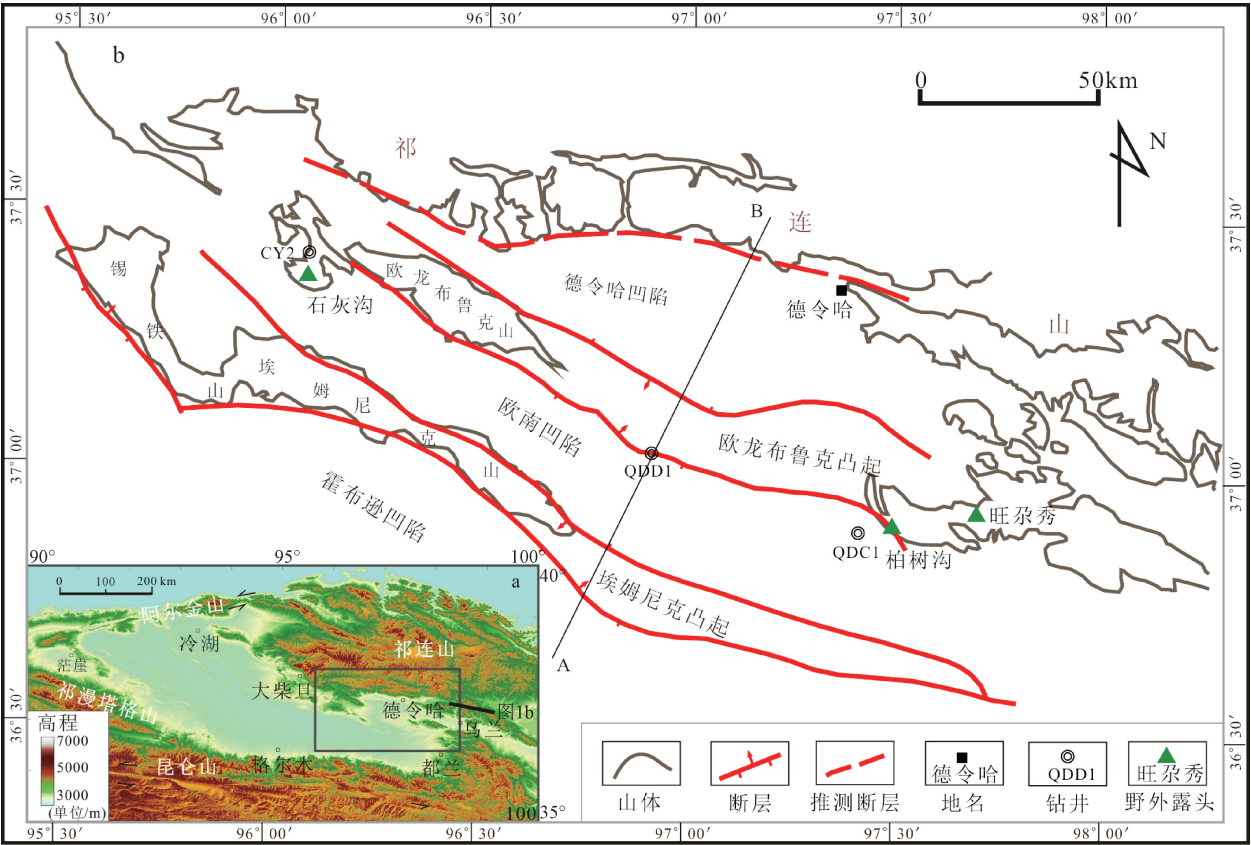
迄今，石炭系烃源岩类型、质量评价、生烃潜力等方面虽然取得了较统一的认识，但在优质

烃源岩形成及分布等研究上仍需深入探索。明确优质烃源岩形成机制并揭示其分布规律是低勘探程度区带油气勘探部署的关键依据，认清影响有机质富集的地质因素是其中至关重要的环节。文章针对以上柴东欧南凹陷石炭系油气资源调查关注的科学问题和制约下一步油气勘探部署的实际问题，利用有机地球化学、元素地球化学、X 射线衍射（XRD）、扫描电镜（SEM）等测试方法，综合分析了烃源岩矿物组分、有机质丰度、干酪根类型、热演化程度、形成环境、TOC 与主要矿物关系等，确定了石炭系海相有机质富集的控制因素，为探讨石炭系优质烃源岩形成机制和预测高质量烃源岩分布提供了新的切入点。

1 地质概况

欧南凹陷位于柴达木盆地东部德令哈坳陷，呈北西—南东向展布，南、北方向分别以埃北和欧南断裂为界（图 1），与德令哈、霍布逊凹陷和欧龙布鲁克、埃姆尼克凸起等次级构造单元共同组成了“三凹夹两隆”构造格局（图 2）。

石炭纪沉积时期，研究区位于约 13.5°N 的低纬度地区（Wang et al.，2016），处于古特提斯洋持续扩张体制下向北倾斜的被动大陆边缘环境（孙娇鹏等，2017），依次发育下石炭统城墙沟组（C_{1ch}，对应维宪阶）和怀头他拉组（C_{1h}，对应谢尔普霍夫阶），以及上石炭统克鲁克组（C_{2k}，对应巴什基尔阶）与扎布萨尕秀组（C_{2zh}，可与太原组对比，对应晚石炭世卡西莫夫阶—早二叠世早期阿瑟尔阶）（青海省地质矿产局，1991）。欧



a—柴达木盆地高程图；b—柴东构造纲要图

图 1 柴达木盆地东部区域位置及构造分区

Fig. 1 Location and tectonic division of the eastern Qaidam basin

(a) Elevation map of the Qaidam basin; (b) Structural outline map of the eastern Qaidam basin

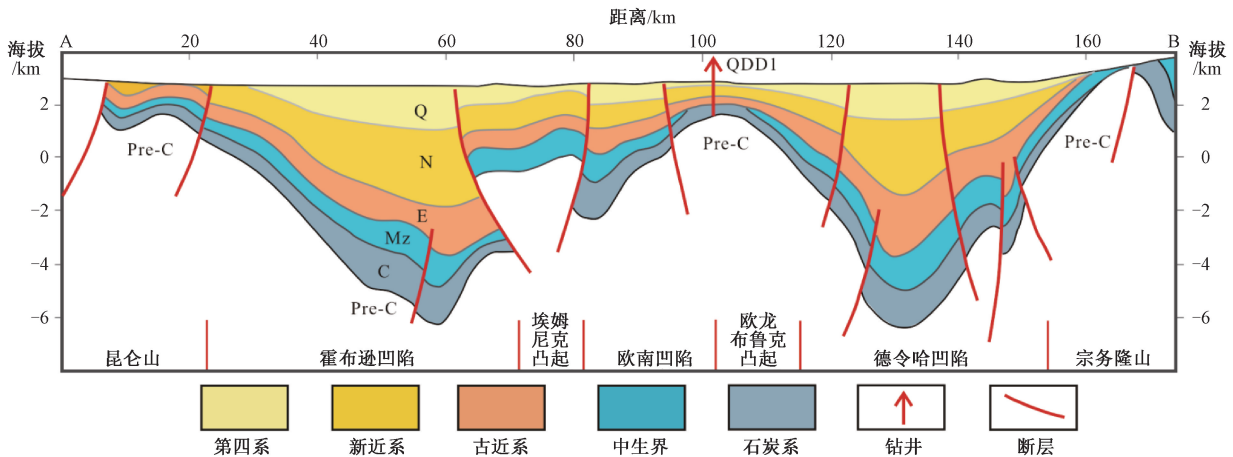


图 2 柴东地区南北向地质剖面 (AB 位置见图 1b)

Fig. 2 Geological section striking NS in the eastern Qaidam basin (The location of AB is shown in Fig. 1b)

南凹陷早石炭世 C_1h 以 (含生屑) 泥晶灰岩夹泥岩沉积为主, 晚石炭世 C_2k 则堆积灰岩、砂岩和煤频繁互层沉积物, 晚期 (C_2zh) 在海侵作用下过渡至

碳酸盐岩沉积环境, 总体表现出碎屑岩-碳酸盐岩混积的陆表海沉积层序 (牛永斌等, 2010; 魏小洁等, 2018), 组成较良好的生储盖组合 (图 3)。

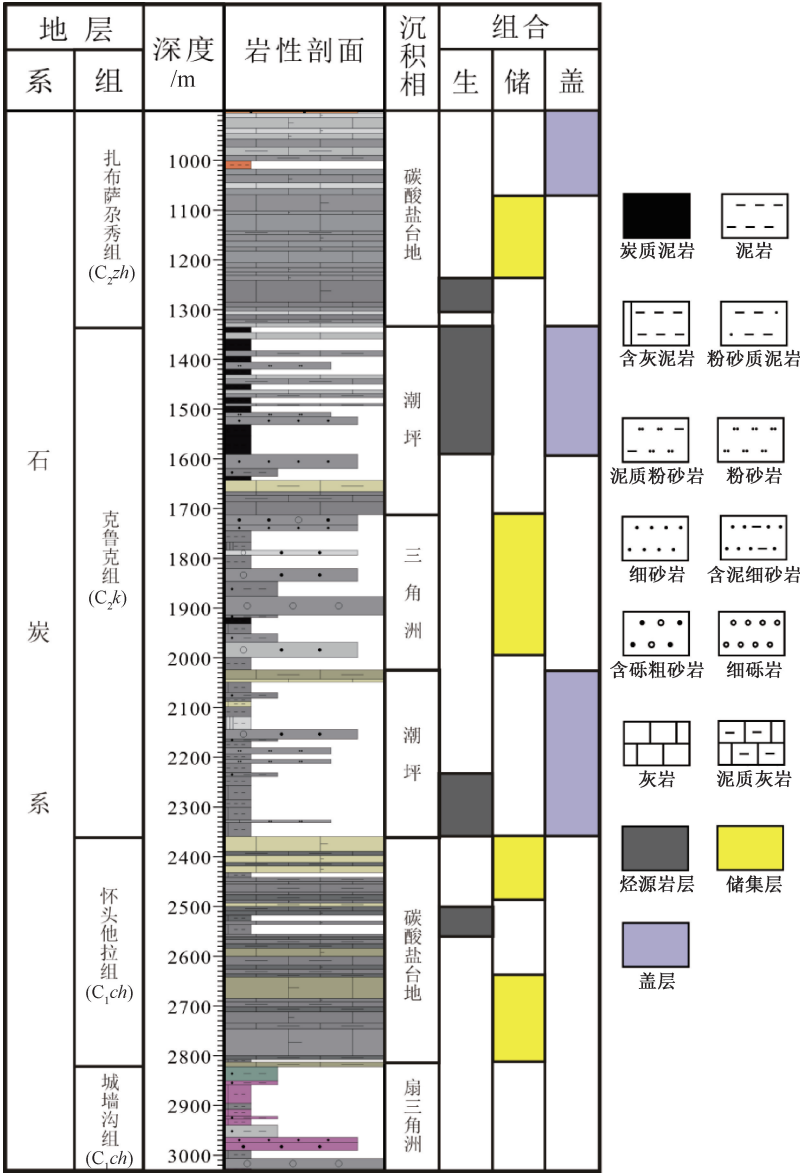


图3 柴东地区欧南凹陷石炭系岩性剖面及生储盖组合 (QDD1井)
Fig.3 Carboniferous stratigraphic column and source-reservoir-cap assemblages of the Ounan depression, eastern Qaidam basin (Well QDD1)

2 烃源岩特征

此次研究中统计分析的数据来源于欧南凹陷及周边地区柏树沟、旺尕秀、石灰沟等野外露头 (23 样次) 和 CY2、QDC1、QDD1 等关键钻井 (338 样次岩屑及岩芯, 埋深主要分布于 0~3500 m) 的石炭系烃源岩样品测试结果 (总共 361 样次)。

2.1 烃源岩岩性及组分

研究区石炭系 31 块烃源岩样品全岩 XRD 矿物组分测试结果显示 (表 1, 表 2): 烃源岩包括泥页岩和灰岩两种类型岩性, 泥页岩类烃源岩组分

以石英 (16.4%~88.3%, 均值 46.8%) 和黏土矿物 (9.0%~83.6%, 均值 42.3%) 为主, 其次为碳酸盐矿物 (0~34.4%, 均值 7.0%), 包括方解石 (0~21.8%, 均值 5.2%)、白云石 (0~18.2%, 均值 1.8%) 和菱铁矿 (个别样品含), 含少量斜长石和黄铁矿 (图 4a)。黏土矿物中高岭石组分约占全岩总质量的 16.5% (0~54.4%)、伊/蒙混层含量为 14.7% (0~32.8%)、伊利石组分约 7.9% (0~18.4%)、绿泥石约为 3.3% (0~26.0%) (图 4b)。

碳酸盐岩类烃源岩主要为石灰岩, 方解石含量约占岩石总重量的 72.9% (21.3%~99.0%),

表 1 欧南凹陷及周边野外露头和重点钻井石炭系烃源岩样品矿物组分

Table 1 Whole rock mineral compositions of the Carboniferous source rocks by XRD analysis, Ounan depression

序号	样品编号	取样点	岩性	层位	深度/ m	XRD 全岩矿物组成/%							
						石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	黏土矿物
1	SHG-1	石灰沟	泥岩	C ₁ h	—	30.3	—	—	—	—	—	—	69.7
2	SHG-2		灰岩	C ₁ h	—	24.1	—	—	51.4	—	—	—	24.5
3	SHG-3		泥岩	C ₂ k	—	40.4	—	1.9	—	—	—	—	57.7
4	SHG-4		页岩	C ₂ k	—	16.4	—	—	—	—	—	—	83.6
5	WGX-1	旺尕秀	页岩	C ₂ k	—	44.0	—	—	—	—	—	—	56.0
6	WGX-2		页岩	C ₂ k	—	51.9	—	—	—	—	—	—	48.1
7	BSG-1	柏树沟	页岩	C ₂ zh	—	57.0	—	—	—	—	—	—	43.0
8	BSG-2		页岩	C ₂ zh	—	42.0	—	—	54.5	—	—	—	3.5
9	BSG-3		泥岩	C ₂ zh	—	34.2	—	—	—	—	—	18.2	47.6
10	BSG-4		灰岩	C ₂ zh	—	5.1	—	—	94.4	—	—	—	0.5
11	BSG-5		灰岩	C ₂ k	—	3.9	—	—	96.0	—	—	—	0.1
12	BSG-6		灰岩	C ₂ k	—	10.2	—	—	89.3	—	—	—	0.5
13	BSG-7		灰岩	C ₂ k	—	23.9	—	2.2	52.5	8.3	—	—	13.1
14	BSG-8		灰岩	C ₂ zh	—	0.8	—	—	99.0	—	—	—	0.2
15	QDC-1	QDC1	泥岩	C ₂ k	3393.80	71.9	—	—	2.1	—	—	—	26.0
16	QDC-2		灰岩	C ₂ k	3395.20	6.0	—	—	88.1	4.8	—	—	1.1
17	QDC-3		灰岩	C ₂ k	3395.50	20.6	—	—	59.1	6.8	—	1.6	11.9
18	QDC-4		泥岩	C ₂ k	3398.80	34.6	—	—	21.8	4.3	—	2.8	36.5
19	QDC-5		泥岩	C ₂ k	3400.10	38.2	—	—	4.2	2.4	—	2.6	52.6
20	QDC-6		泥岩	C ₂ k	3401.40	35.6	—	—	—	—	—	2.6	61.8
21	CY2-1	CY2	泥岩	C ₂ k	657.43	67.4	—	—	—	8.9	—	—	23.7
22	CY2-2		泥岩	C ₂ k	923.90	48.2	—	—	16.2	18.2	—	—	17.4
23	CY2-3		泥岩	C ₂ k	950.20	50.6	—	2.2	—	—	15.6	—	31.6
24	CY2-4		灰岩	C ₂ k	958.50	19.3	—	—	21.3	16.1	28.1	—	15.2
25	CY2-5		灰岩	C ₂ k	992.30	7.3	—	—	90.5	2.0	—	—	0.2
26	CY2-6		泥岩	C ₂ k	1010.40	88.3	—	—	—	2.7	—	—	9.0
27	CY2-7		灰岩	C ₂ k	1031.70	4.4	—	—	95.3	—	—	—	0.3
28	CY2-8		泥岩	C ₂ k	1042.30	45.1	—	2.3	1.7	—	—	—	50.9
29	CY2-9		灰岩	C ₁ h	2381.40	11.9	2.2	—	35.0	15.3	—	—	35.6
30	CY2-10		灰岩	C ₁ h	2388.60	9.2	0.8	—	79.0	—	—	—	11.0
31	CY2-11		灰岩	C ₁ h	2400.30	1.9	—	—	88.6	9.0	—	—	0.5
均值			泥页岩			46.8	—	0.3	5.2	1.8	0.9	1.3	42.3
均值			灰岩			10.6	0.2	0.2	74.3	4.5	2.0	0.1	8.2

其次为石英（12.7%）、黏土矿物（8.9%）、白云石（4.2%）和极少量的钾长石、斜长石、黄铁矿或菱铁矿（表 1，图 4a）。碳酸盐岩的黏土矿物组分与泥页岩有所区别，伊利石（2.6%）和伊/蒙混层（2.5%）的含量相对较高，其次为高岭石（1.9%）、绿泥石（0.9%），见表 2、图 4b。值得注意的是，不论泥页岩还是碳酸盐岩烃源岩样品均含有相对较丰富的石英矿物组分（表 1）。

2.2 有机质丰度

柴东欧南凹陷及周边地区关键露头和钻孔的有机地球化学测试结果表明：石炭系烃源岩总有机碳（TOC）值分布于 0.09%~90.2% 之间（*N* = 361 样次，包括表 2 和部分煤岩样品），峰值约在 0.2%~1.0%（图 5）；石炭系烃源岩中氯仿沥青“A”含量约为 0.0015%~0.2%（均值 0.022%，

N = 99 样次，以钻孔样品为主），生烃潜量（*S*₁+*S*₂）分布于 0.02~10.82 mg/g 之间（均值 0.48 mg/g），见图 6。

根据烃源岩有机质丰度指标的评价（国家能源局，2020），不论从 TOC 指标和氯仿沥青“A”、生烃潜量等指标来看，研究区石炭系主要发育“差—中等”级别烃源岩，少量“好”级别以上烃源岩，总体而言石炭系烃源岩具有一定生烃潜力。

2.3 有机质类型及成熟度

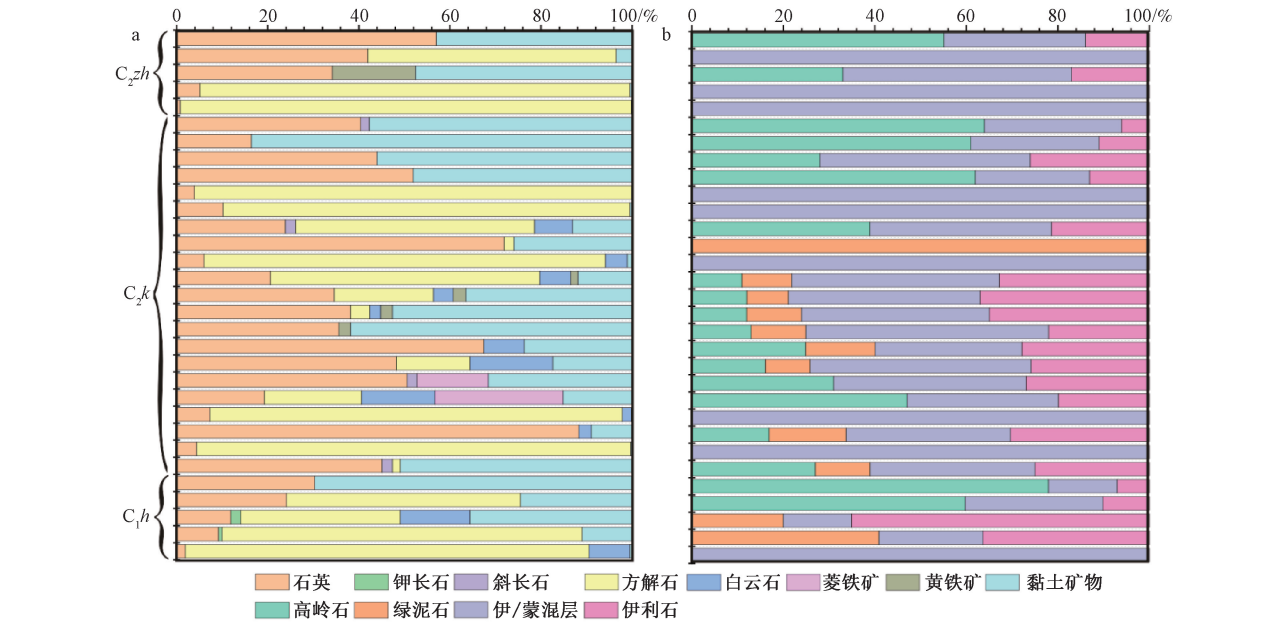
2.3.1 干酪根类型

显微镜下观察发现石炭系烃源岩样品中常见无结构镜质体，呈破碎颗粒状、块状（图 7a、7b）、或条带状沿页岩层理面分布（图 7c、7d），镜质体孔隙或裂缝中充填有固态原沥青或运移沥青（图 7c）；样品中也观察到少量丝质体或半丝质

表 2 欧南凹陷及周边石炭系烃源岩样品有机地化特征和黏土矿物组分

Table 2 Organic geochemistry characteristics and clay mineral compositions of the Carboniferous source rock samples, Ounan depression

序号	样品编号	岩性	烃源岩测试/%			黏土矿物在全岩中的相对含量/%				
			TOC	氯仿沥青“A”	R _o	伊/蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	I/S 比
1	SHG-1	泥岩	7.44	0.1900	—	10.46	4.88	54.37	—	25
2	SHG-2	灰岩	0.57	0.0900	1.44	7.35	2.45	14.70	—	25
3	SHG-3	泥岩	12.96	0.5200	—	17.31	3.46	36.93	—	35
4	SHG-4	页岩	6.55	0.1600	—	23.41	9.20	51.00	—	20
5	WGX-1	页岩	17.21	—	1.08	25.76	14.56	15.68	—	25
6	WGX-2	页岩	21.17	—	—	12.03	6.25	29.82	—	20
7	BSG-1	页岩	22.73	0.0093	1.36	13.33	6.02	23.65	—	25
8	BSG-2	页岩	0.96	0.0027	1.24	3.50	—	—	—	—
9	BSG-3	泥岩	14.51	0.0142	1.63	23.80	8.09	15.71	—	25
10	BSG-4	灰岩	0.66	0.0014	1.47	0.50	—	—	—	—
11	BSG-5	灰岩	0.09	—	—	0.10	—	—	—	—
12	BSG-6	灰岩	0.15	—	—	0.50	—	—	—	—
13	BSG-7	灰岩	1.29	—	—	5.24	2.75	5.11	—	20
14	BSG-8	灰岩	0.17	—	1.30	0.20	—	—	—	—
15	QDC-1	泥岩	3.00	—	2.55	—	—	—	26.00	—
16	QDC-2	灰岩	1.45	—	—	1.10	—	—	—	—
17	QDC-3	灰岩	1.52	—	—	5.36	3.93	1.31	1.31	20
18	QDC-4	泥岩	2.81	—	—	15.33	13.51	4.38	3.29	20
19	QDC-5	泥岩	0.73	—	—	21.57	18.41	6.31	6.31	20
20	QDC-6	泥岩	1.30	—	2.57	32.75	13.60	8.03	7.42	25
21	CY2-1	泥岩	2.53	—	1.30	7.58	6.64	5.93	3.56	25
22	CY2-2	泥岩	2.06	—	1.37	8.35	4.52	2.78	1.74	20
23	CY2-3	泥岩	16.52	—	1.46	13.27	8.53	9.80	—	20
24	CY2-4	灰岩	0.28	—	—	5.02	3.04	7.14	—	15
25	CY2-5	灰岩	0.17	—	1.39	0.20	—	—	—	—
26	CY2-6	泥岩	27.83	—	—	3.24	2.70	1.53	1.53	15
27	CY2-7	灰岩	3.40	—	1.52	0.30	—	—	—	—
28	CY2-8	泥岩	8.72	—	—	18.32	12.73	13.74	6.11	20
29	CY2-9	灰岩	0.51	—	—	5.34	23.14	—	7.12	10
30	CY2-10	灰岩	0.45	—	1.79	2.53	3.96	—	4.51	15
31	CY2-11	灰岩	0.39	—	—	0.50	—	—	—	—
均值		泥页岩	9.94	0.15	—	14.7	7.8	16.5	3.3	—
均值		灰岩	0.79	0.05	—	2.5	2.8	2.0	0.9	—



a—XRD 全岩矿物含量；b—黏土矿物相对含量

图 4 石炭系烃源岩矿物组分

Fig. 4 Compositions of the Carboniferous source rocks

(a) Contents of whole rock minerals by XRD analysis; (b) Relative contents of clay-minerals

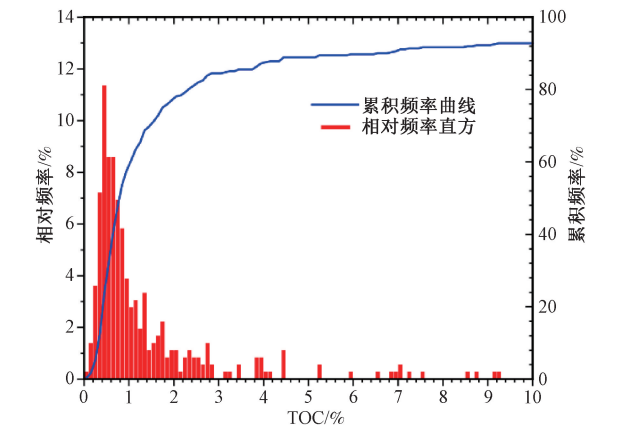


图 5 石炭系烃源岩 TOC 分布直方图

Fig. 5 Histogram of TOC for the Carboniferous source rocks

体惰质组分 (图 7a、7b)。镜检结果显示研究区石炭系烃源岩中含大量镜质体, 少量惰质体和微量腐泥干酪根组分, 判定其主要残留腐殖型 (Ⅲ型) 干酪根。

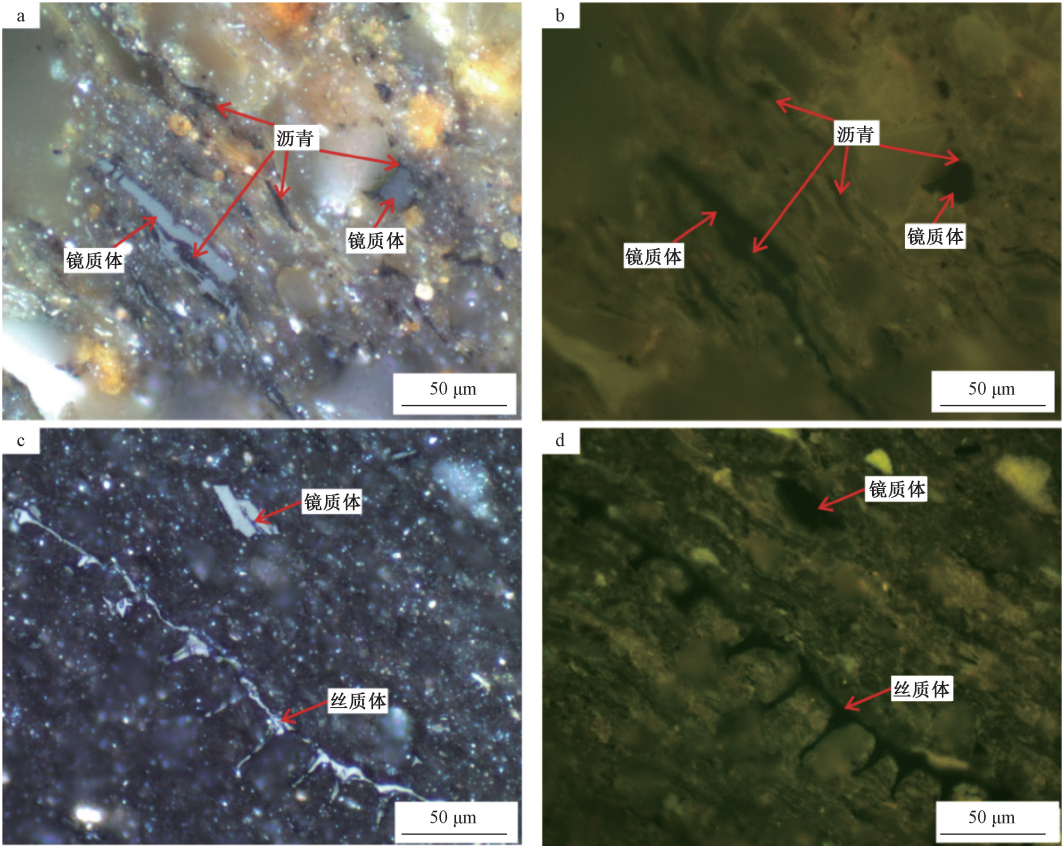


图 7 石炭系烃源岩干酪根镜下照片

Fig. 7 Photomicrographs of the Carboniferous kerogens

较高热演化程度 (Tissot and Welte, 1984), 通过 $T_{\max}$ -HI (氢指数) 图版对此类样品有机质类型的判别失效, 少量低 $T_{\max}$ ($<450\text{ }^{\circ}\text{C}$) 烃源岩样品中

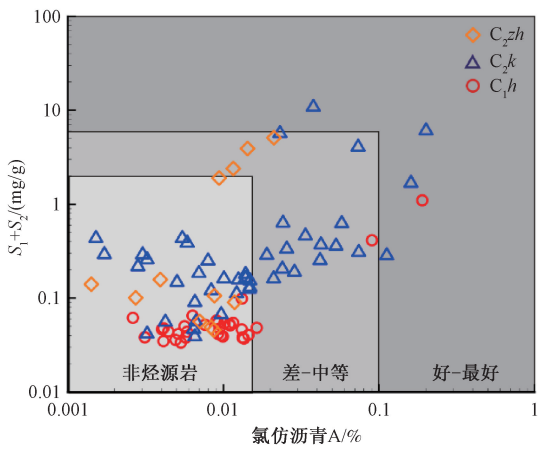


图 6 石炭系烃源岩氯仿沥青 “A” 及生烃潜量

Fig. 6 Plot of chloroform bitumen “A” and “ S_1+S_2 ” for the Carboniferous source rocks

岩石热解测试结果显示 ($N=60$ 样次): 石炭系烃源岩样品的最高热解峰温 ($T_{\max}$) 普遍高于 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明大部分岩石样品中的分散有机质处于

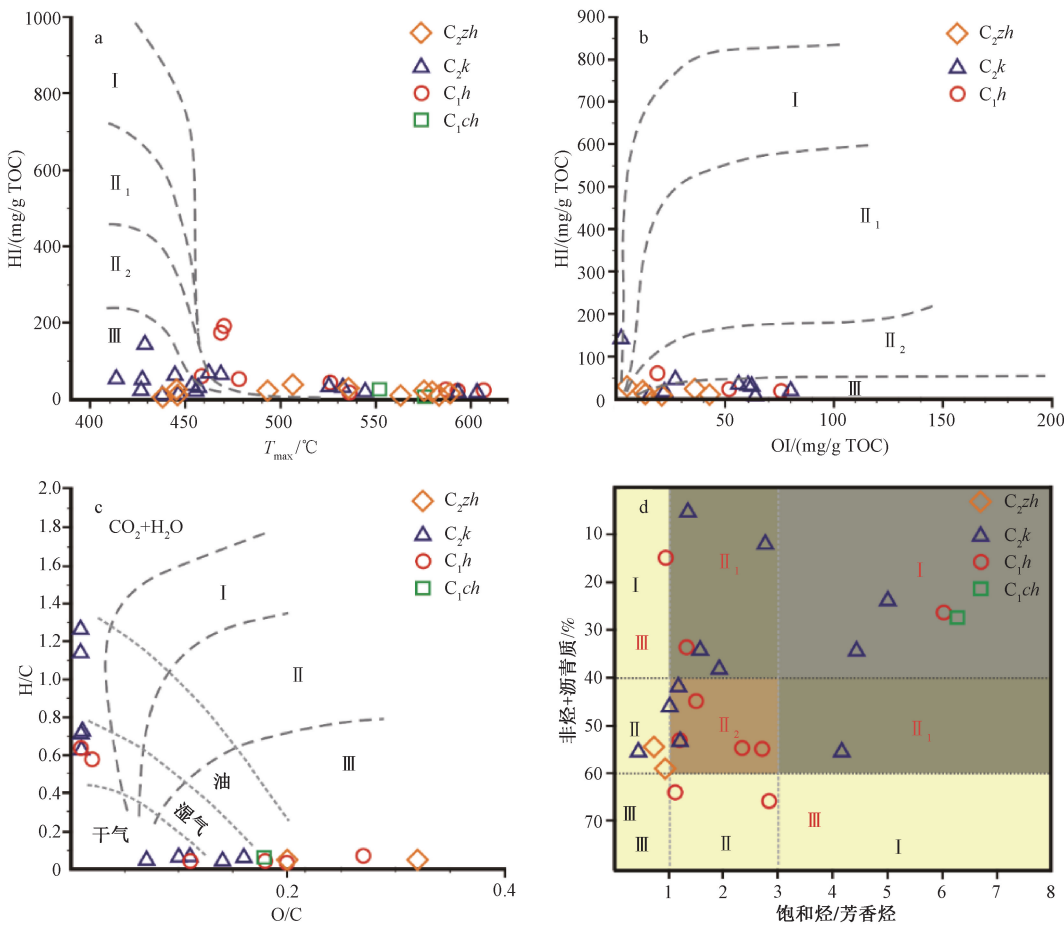
有机质类型为Ⅲ型 (图 8a); OI (氧指数) -HI 图版 (图 8b) 与 O/C (氧/碳原子比) -H/C (氢/碳原子比) 范氏图 (图 8c) 的判识结果也显示石

炭系烃源岩主要发育Ⅲ型为主的干酪根。

石炭系烃源岩可溶有机质氯仿沥青“A”族组分($N=99$ 样次)中饱和烃/芳香烃比值分布于 $0.44\sim6.29$ (均值 2.31),而非烃与沥青质组分含量总和约 $5.35\%\sim65.32\%$ (均值 41.13%),根据烃源岩可溶有机质特征划分有机质类型标准(国家能源局,2020),表明烃源岩样品中可溶有机质

(氯仿沥青“A”)的生烃母质类型主要为Ⅱ型和少Ⅲ型或Ⅰ型干酪根(图8d)。

以上分析说明:研究区石炭系烃源岩主要残留陆相高等植物生物为主体的腐殖型(Ⅲ型)干酪根,而烃源岩的抽提可溶有机质却具有低等水生生物(Ⅱ型和少量Ⅰ型,腐泥型)为生烃母质的特征。



a— $T_{\max}$ 与 HI 图版; b—OI 与 HI 图版; c—O/C 与 H/C 图版; d—抽提物饱和烃/芳香烃比与非烃及沥青质含量图版

图8 石炭系烃源岩干酪根类型图解

Fig. 8 Plots of kerogen types for the Carboniferous source rocks

(a) Plot of $T_{\max}$ vs. hydrogen index (HI); (b) Plot of oxygen index (OI) vs. hydrogen index (HI); (c) Plot of O/C vs. H/C; (d) Plot of saturated/aromatic component ratios vs. contents of resin and bitumen

2.3.2 有机质成熟度

研究区石炭系烃源岩有机质整体处于成熟—高成熟热演化阶段。石炭系钻井岩心和野外露头烃源岩样品有机质的镜质体反射率(R_0)主要分布于 $1.08\%\sim2.57\%$ ($N=16$ 样次;图9),均值为 1.58% ,表明石炭系烃源岩热演化程度较高(王利等,2019),处于高成熟轻质油—凝析油—湿气生烃阶段,这与CY2井 C_2k 组所产湿气和少量凝析油

的压裂试油结果相一致(李宗星等,2019)。

欧南凹陷石炭系烃源岩的干酪根兼具低等水生生物与高等植物的混合生物有机质来源,有机质的热演化已经进入高一过成熟阶段,说明倾油型低等水生生物为主的腐泥型干酪根已经历了生油窗($R_0=0.5\%\sim1.2\%$;Tissot and Welte, 1984),液态烃的大规模生成与排出过程也解释了凹陷周缘出现丰富油(沥青)砂出露的现象(马寅生等,

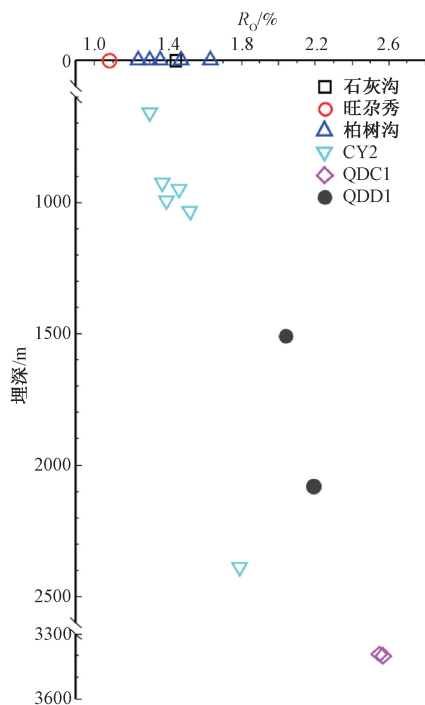


图 9 石炭系烃源岩埋深- R_0 剖面 (QDD1 井 R_0 数据来源于刘奎等 (2020))

Fig. 9 Plot of kerogen R_0 vs. burial depth for the Carboniferous source rocks (R_0 data of Well QDD1 is from Liu et al., 2020)

2012)。倾气型的腐殖型干酪根已经进入生气高峰 (R_0 平均值 $>1.5\%$)，较高热演化背景及气侵作用是导致石炭系烃源岩中氯仿沥青“A”含量和生烃潜能总体偏低的重要原因。

3 烃源岩沉积环境

Wang et al. (2018) 根据 CY2 井 C_2k 烃源岩有机质的 Ph/nC_{18} 、 Pr/nC_{17} 、 Pr/Ph 和 C_{29}/C_{27} 等生物标志化合物特征认为有机质形成于海-陆交互陆棚沉积环境，由陆源和海源生物有机质所组成。此次研究主要利用欧南凹陷及周边地区石炭系烃源岩样品元素地球化学测试结果 ($N=31$ 样次)，综合判定研究区烃源岩主要形成于半咸—咸水、干热、弱还原—弱氧化过渡带的海陆交互陆棚沉积环境，与 CY2 钻井烃源岩样品有机地化指标所判定的结果基本一致。

3.1 古盐度

Sr/Ba 比值是区别陆相和海相沉积的常用参数， Sr 和 Ba 元素的化学性质相似，与海水混合后易与海水中丰富的 SO_4^{2-} 离子反应生成 $SrSO_4$ 和 $BaSO_4$ ，但 $BaSO_4$ 的溶解度相对较低。一般而言，

Sr/Ba 值小于 0.6 反映淡水沉积，0.6~1.0 之间代表半咸水相，海相沉积物该比值大于 1.0 (Wei and Algeo, 2020)。另外， B/Ga 比值亦是指示古盐度的辅助指标，沉积水体盐度随 B/Ga 增大而升高 (Remírez and Algeo, 2020)。

研究区石炭系烃源岩样品 Sr/Ba 值分布于 0.31~52.76 (均值 7.79)， B/Ga 值约为 0.01~3.18 (均值 0.53)，说明沉积古水体盐度整体为咸(海)水，仅 C_2k 组部分样品反映半咸水水体环境 (图 10)，石炭纪沉积古水体盐度整体处于半咸—咸水状态。

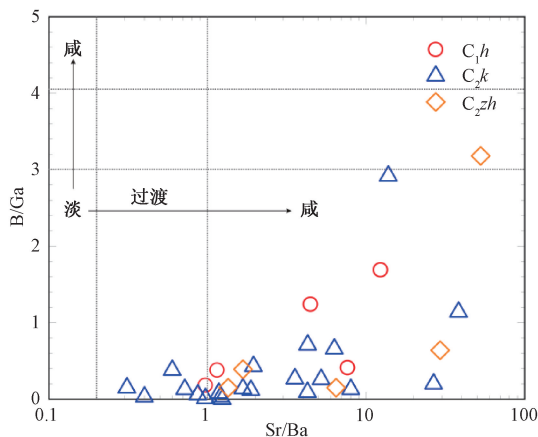


图 10 石炭系烃源岩沉积水体盐度环境

Fig. 10 Depositional aqueous salinity for the Carboniferous source rocks

3.2 古气候

潮湿气候条件下 Fe 元素容易以 $Fe(OH)_3$ 沉淀在沉积中，而 Mn 元素的富集与暖干气候有关， Fe/Mn 比值反映了湿度变化 (Song et al., 2019)； Sr/Cu 比值变化与温度关系密切，该值大于 10 指示炎热环境，而比值范围 1~10 之间则代表了相对温暖的沉积环境 (Fu et al., 2015)。

石炭系烃源岩 Fe/Mn 值约为 6.36~475.84 (均值 112.14)， Sr/Cu 值在 1.68~82.02 之间变化 (均值 23.47)，见图 11；基于以上判定原则，尽管研究区石炭纪气候变化较频繁，但整体仍表现为“干热”的沉积环境。

3.3 氧化—还原条件

Fe 存在两种价态，对氧化还原反应较敏感； $Fe^{2+}/Fe^{3+} \gg 1$ 为还原环境， $Fe^{2+}/Fe^{3+} > 1$ 为弱还原环境， $Fe^{2+}/Fe^{3+} < 1$ 为弱氧化环境， $Fe^{2+}/Fe^{3+} \ll 1$ 为氧化环境 (Robinson and Sahota, 2000)。古海洋水体呈分层特性， $V/(V+Ni)$ 比值在 0.6~0.8 范

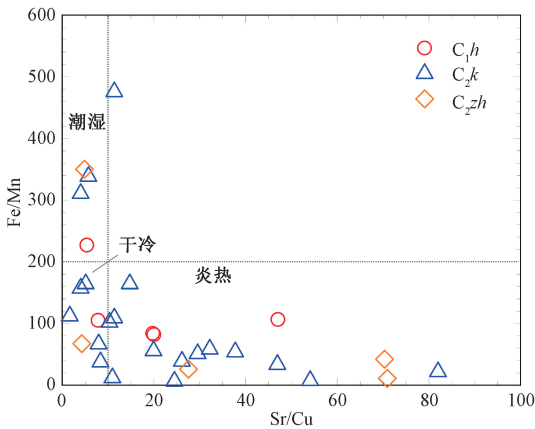


图 11 石炭系烃源岩沉积古气候

Fig. 11 Depositional paleo-climate for the Carboniferous source rocks

围指示弱氧化—弱还原过渡状态，小于 0.6 为偏氧化条件，而大于 0.8 为深水还原相（Hatch and Leventhal, 1992）。

石炭系烃源岩 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值分布于 0.16~19.06（均值为 4.35），个别样品 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值高达 300； $V/(V+Ni)$ 比值分布区间在 0.40~0.92（均值 0.71），见图 12，总体处于弱还原—弱氧化过渡带内，与烃源岩有机质生物标志化合物所指示的海—陆交互陆棚沉积环境相一致。

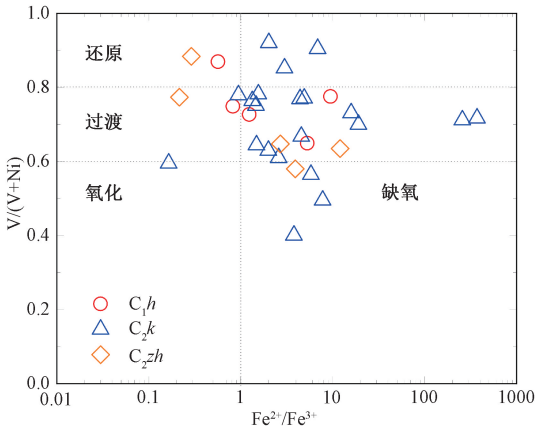


图 12 石炭系烃源岩沉积氧化—还原状态

Fig. 12 Depositional redox state for the Carboniferous source rocks

4 烃源岩有机质富集

4.1 有机质富集与矿物组分关系

4.1.1 石英矿物组分

研究区石炭系烃源岩矿物组分特征表现为相

对富集石英矿物（平均含量为 47.1%），根据总有机碳（TOC）与全岩 XRD 石英矿物含量的关系（图 13），高有机质丰度（TOC>5%）烃源岩样品总有机碳含量与石英矿物含量之间呈一定正相关关系，而低有机质丰度（TOC<5%）与石英矿物并无明显相关性，说明石炭系烃源岩发育两套不同来源的生物有机质。

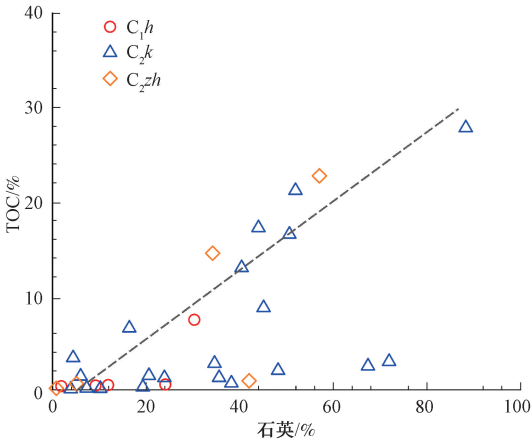


图 13 石炭系烃源岩 TOC 与石英含量的关系

Fig. 13 Plot of TOC vs. quartz mineral for the Carboniferous source rocks

石炭系烃源岩主要残留陆相高等植物生物为主体的腐殖型（Ⅲ型）干酪根（图 7），而烃源岩的抽提可溶有机质却具有低等水生生物（Ⅱ型和少量Ⅰ型，腐泥型）为生烃母质的特征（图 8），结合元素地球化学反映出明确的海陆交互陆沉积环境（图 12），推测石炭系烃源岩发育海相（Ⅱ型干酪根为主）和陆相（Ⅲ型干酪根为主）混源型生物有机质。石炭系高丰度烃源岩 TOC 随石英矿物组分增大而升高，该现象与扬子地区古生界海相页岩所呈现的 TOC—石英含量关系相似（Liu et al., 2019; Khan et al., 2019），反映高丰度（TOC>5%）烃源岩主要富集海相生物有机质，且海相生物数量受到石英（SiO₂）矿物的深刻影响，而低丰度（TOC<5%）烃源岩的沉积有机质受陆相高等植物供给控制，与石英矿物含量大小无明显相关性。

4.1.2 其他矿物组分

黏土和碳酸盐矿物是石炭系烃源岩除石英以外最重要的矿物组分，平均含量分别占到 44.7% 和 12.3%。烃源岩有机质丰度（TOC）与黏土（图 14）、碳酸盐矿物（图 15）组分含量的分析结果显示有机质的赋存与黏土和碳酸盐矿物之间无

显著关系, 表明烃源岩中黏土和碳酸盐矿物对生物有机质富集的控制作用较弱。

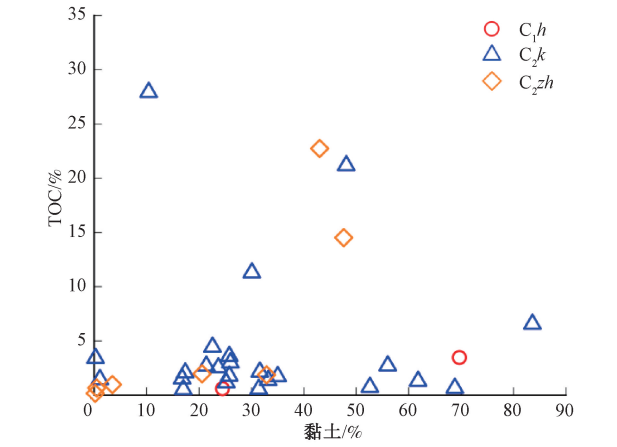


图 14 石炭系烃源岩 TOC 与黏土矿物关系
Fig. 14 Plot of TOC vs. clay-mineral for the Carboniferous source rocks

4.2 石英与有机质赋存关系

显微镜下观察发现, 石炭系泥质烃源岩样品

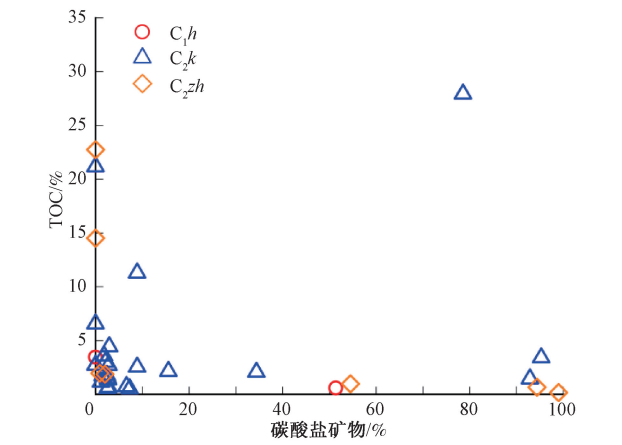
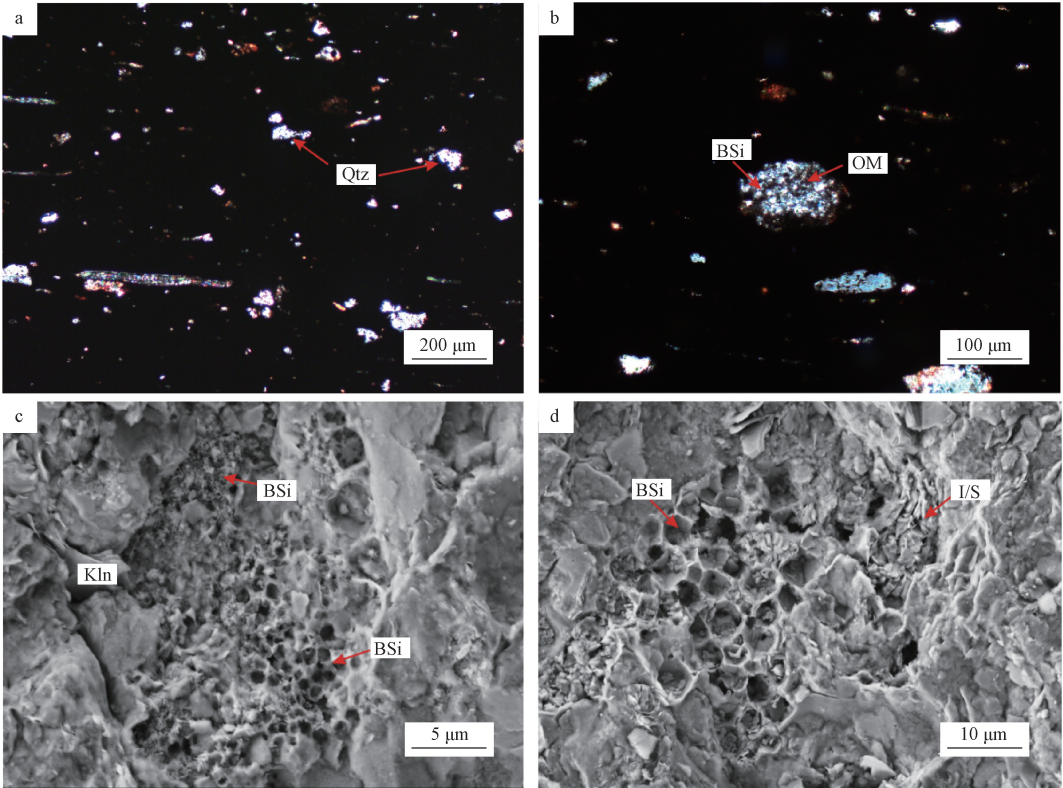


图 15 石炭系烃源岩 TOC 与碳酸盐矿物关系
Fig. 15 Plot of TOC vs. carbonate-mineral for the Carboniferous source rock

除黏土矿物、有机质 (OM) 和隐晶质矿物外, 还发育大量粒径为 1~100 μm 的硅质生屑颗粒, 呈圆球状或似球状且顺层状定向分布 (图 16a); 单个硅质生屑颗粒内可见规则化生物腔体, 腔体内充填生物有机质 (图 16b)。



Qtz—石英; OM—有机质; BSi—生物硅; Kln—高岭石; I/S—伊/蒙混层
a—泥岩, C_{2zh}, 柏树沟剖面; b—泥岩, C_{2k}, QDC-1, 3580 m; c—泥岩, C_{2k}, 石灰沟剖面; d—泥岩, C_{2k}, QDC-1, 3580 m

图 16 石炭系泥质烃源岩镜下照片

Fig. 16 Photomicrographs of the Carboniferous source rocks

(a) Mudstone, C_{2zh}, outcrop Baishugou; (b) Mudstone, C_{2k}, Well QDC-1, 3580 m; (c) Mudstone, C_{2k}, outcrop Shihuigou; (d) Mudstone, C_{2k}, Well QDC-1, 3580 m

Qtz—Quartz; OM—Organic matter; BSi—Biogenic silica; Kln—Kaolinite; I/S—Illite/Smectite mixed clay

硅质生屑是放射虫、海绵、硅藻及硅鞭毛藻等海洋浮游硅质生物残骸所组成，又称为生物硅 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)，原始成分多为蛋白石，成岩过程中逐渐从蛋白石 A (无定形) 演化成蛋白石 CT (无序形)、玉髓 (隐晶)、燧石 (微晶石英) 等 (臧家业等, 2020)。据统计 (Tréguer and De La Rocha, 2013)，硅质生物供给海洋约 50% 以上的初级生产力，在边缘海-近岸地区该比例高达 75%，是海洋初级生产力的重要来源。

扫描电镜 (SEM) 下显示石炭系泥质烃源岩中富含放射虫微体化石 (图 16c、16d)，中心囊和格子壳 (网格状) 内常半充填有机质，说明有机质赋存和富集应该受到硅质生物的影响。

4.3 硅质成因

海相泥页岩中硅质 (SiO_2) 一般具有陆源、热液和生物共 3 种来源 (Hesse, 1989)，热液沉积区沉积物 Fe、Mn 元素较富集，而反映陆源物质的 Al、Ti 元素含量相对变小。纯热水来源硅质沉积物 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值约为 0.01，而纯远洋生物硅沉积的相关元素比值增到 0.60，基于此通过 Al-Fe-Mn 三角成因判别图解是有效识别热液成因硅质和生物成因硅质的有效方法 (Adachi et al., 1986)。文中挑选了全岩 XRD 石英矿物含量大于 50% 的石炭系硅质烃源岩样品 ($N=10$ 样次)，利用 Al-Fe-Mn 三角成因判别图解 (图 17) 发现这些硅质泥/页岩样品中 SiO_2 主要为生物成因，说明柴东地区欧南凹陷及其周缘地区石炭系海-陆交互陆棚相泥页岩或碳酸盐岩烃源岩中发育生物成因硅

质及相对应的海洋生物有机质。

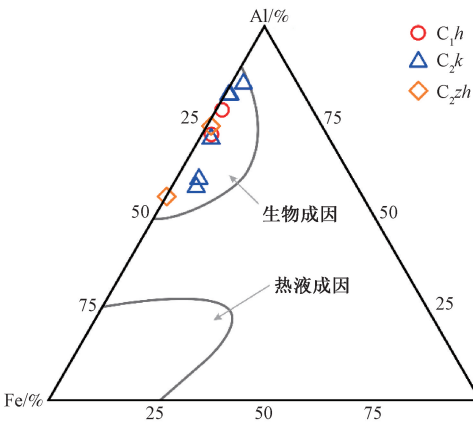


图 17 石炭系高 SiO_2 烃源岩样品硅质来源 Al-Fe-Mn 三角成因判别图解

Fig. 17 Al-Fe-Mn ternary plot of the Carboniferous source rocks with high SiO_2

根据孙娇鹏等 (2017) 研究认识，石炭纪时期，欧南凹陷处于宗务隆裂陷槽 (向北) 和柴达木古陆 (向南) 之间，形成“南山-北海”的古地理格局，受到柴达木古陆陆源碎屑供给和宗务隆海槽自北向南海侵超覆的影响。南边古陆不仅向凹陷及周边提供陆源碎屑物质，还供给陆源高等植物沉积有机质；北边海槽的海洋硅质生物残骸或富硅洋流通过上升流被输入至欧南凹陷，堆积了海洋低等水生物沉积有机质 (图 18)。海洋硅质生物 (放射虫为主，图 16c、16d) 的参与显著提高了石炭系沉积物初级生产力，是石炭系泥页岩富集海相生物有机质的重要影响因素。

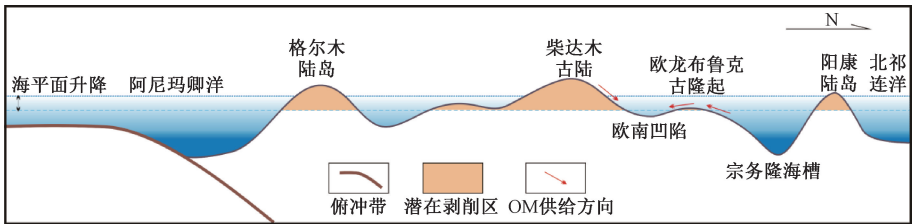


图 18 欧南凹陷石炭纪大地构造背景及古地理示意简图

Fig. 18 Schematic diagram showing the Carboniferous tectonic setting and paleogeography

由于柴东欧南凹陷及周边地区石炭系为海-陆过渡型沉积物，靠近古陆附近的 (粉砂质) 泥页岩虽然石英矿物含量较高 ($>50\%$)，但可能富含陆源石英颗粒，有机质含量 (TOC 值) 相对较低；受海洋硅质生物活动影响较大的区域不仅石英矿物含量高 (生物硅)，有机质丰度也高 (图 13)。

石炭纪是全球重要聚煤期，发育典型混合海

洋和陆地生物有机质的烃源岩，以 I 和 II 型干酪根为主的海相有机质生烃效率和潜力显著高于以 III 型干酪根为主体的陆相有机质 (秦建中等, 2009; Gross et al., 2015)。海洋硅质生物的繁盛与 Si 输入源、海洋地形、水介质条件、气候温度、生物活动等诸多因素相关，Si 是维持海洋硅质壳体浮游生物群落的必需营养元素，Si 输入源及输

送路径对硅质生物的生长繁盛起到关键影响作用(臧家业等, 2020)。基于此认识, 明确石炭纪柴东欧南凹陷的 Si 输入源(陆地、大气和热液)可能是认识石炭系海相有机质富集规律并预测优质烃源岩分布的关键突破口, 对石炭系区域性油气勘探具有一定指导意义。

5 结论

(1) 柴达木盆地东部欧南凹陷及周缘地区石炭系主要发育“差—中等”级别和少量“好”级别以上泥页岩和碳酸盐岩烃源岩(TOC 峰值 0.2%~1.0%), 泥页岩烃源岩富石英矿物组分; 石炭系烃源岩干酪根整体处于“成熟—高成熟阶段”(R₀ 均值 1.58%), 残留Ⅲ型干酪根, 烃源岩抽提的氯仿沥青“A”主要来自于Ⅱ型干酪根。

(2) 研究区石炭系烃源岩形成于咸水、干热、弱还原—弱氧化过渡带的海陆交互陆棚沉积环境, 分散有机质由海相(Ⅱ型干酪根为主)和陆相(Ⅲ型干酪根为主)混源型生物有机质组成, 高丰度(TOC>5%)烃源岩有机质丰度随石英矿物组分增大而升高。

(3) 研究区石炭系泥质烃源岩中富含硅质生物化石(放射虫等), 生物腔体内充填有机质, 高硅质(SiO₂>50%)烃源岩中硅质为生物成因, 推测石炭纪硅质生物的参与引起海相生物有机质的富集并极大提高了沉积物初级生产力。

(4) Si 是维持海洋硅质壳体浮游生物群落的必需营养元素, 以研究区石炭纪 Si 输入源及输送路径为突破口可能是认识石炭系海相有机质富集规律并预测优质烃源岩分布的有效途径, 对石炭系区域性油气勘探具有一定指导意义。

References

ADACHI M, YAMAMOTO K, SUGISAKI R, 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. *Sedimentary Geology*, 47 (1-2): 125-148.

CAO J, LIU C L, MA Y S, et al., 2016. Geochemical characteristics and genesis of shale gas for Carboniferous marine-continental transitional facies coal measure strata in Eastern Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (5): 158-166. (in Chinese with English abstract)

FU S T, MA D D, CHEN Y, et al., 2016. New advance of petroleum and gas exploration in Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (S1): 1-10. (in Chinese with English abstract)

FU X G, JIAN W, CHEN W B, et al., 2015. Organic accumulation in

lacustrine rift basin: constraints from mineralogical and multiple geochemical proxies [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104 (2): 495-511.

GROSS D, SACHSENHOFER R F, BECHTEL A, et al., 2015. Organic geochemistry of Mississippian shales (Bowland Shale Formation) in central Britain: implications for depositional environment, source rock and gas shale potential [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 1-21.

HATCH J R, LEVENTHAL J S, 1992. 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*, 99 (1-3): 65-82.

HESSE R, 1989. Silica diagenesis: origin of inorganic and replacement cherts [J]. *Earth-Science Reviews*, 26 (1-3): 253-284.

KHAN M Z, FENG Q L, ZHANG K, et al., 2019. Biogenic silica and organic carbon fluxes provide evidence of enhanced marine productivity in the Upper Ordovician-Lower Silurian of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534: 109278.

LI J L, LIU Z Q, XIAO Y J, et al., 2016. Shale gas formation conditions and potential area selection in Carboniferous strata in eastern Qaidam Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 35 (2-3): 312-320. (in Chinese with English abstract)

LI Y J, SUN Y L, ZHAO Y, et al., 2014. Prospects of Carboniferous shale gas exploitation in the eastern Qaidam basin [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 88 (2): 620-634.

LI Z X, PENG B, MA Y S, et al., 2019. Progress of Carboniferous oil and gas survey in Qaidam Basin [J]. *Geological Survey of China*, 6 (4): 79-87. (in Chinese with English abstract)

LIU C L, MA Y S, ZHOU G, et al., 2012. Evidence for the Carboniferous hydrocarbon generation in Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (6): 925-931. (in Chinese with English abstract)

LIU C L, ZHANG X, YANG Y Y, et al., 2016. Carboniferous shale gas system evaluation for the Delingha depression in Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (5): 135-145. (in Chinese with English abstract)

LIU C L, ZHANG Y, YANG C H, et al., 2021. Marine frontier basin petroleum resources assessment: A case study of the Carboniferous of the Delingha Depression, Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 28 (1): 295-307. (in Chinese with English abstract)

LIU G H, ZHAI G Y, ZOU C N, et al., 2019. A comparative discussion of the evidence for biogenic silica in Wufeng-Longmaxi siliceous shale reservoir in the Sichuan basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 70-87.

LIU K, LI Z X, SHI X B, et al., 2020. Late Hercynian-Indosinian denudation and uplift history in the eastern Qaidam Basin: constraints from multiple thermometric indicators and sedimentary evidences [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63 (4): 1403-1421. (in Chinese with English abstract)

MA L C, JIANG W, XIAO Z X, et al., 2020. Discussion on the depositional timing of the Zhabusagaxiu formation in the eastern Qaidam Basin, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 961-972. (in Chinese with English abstract)

MA Y S, YIN C M, LIU C L, et al., 2012. The progress of Carboniferous oil and gas investigation and assessment in Qaidam Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33 (2): 135-144. (in Chinese with English abstract)

National Energy Administration, 2020. *Geochemical method for source*

rock evaluation; SY/T 5735-2019 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)

NIU Y B, ZHONG J H, DUAN H L, et al., 2010. Relationship between Carboniferous sedimentary facies and source rock in Qaidam Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28 (1): 140-149. (in Chinese with English abstract)

PENG B, ZHANG H, YANG S H, et al., 2020. Logging characterization of Carboniferous fractured-vuggy karst reservoirs in the eastern Qaidam Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 923-931. (in Chinese with English abstract)

Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House.

QIN J Z, TENDER, FU X D, 2009. Study of forming condition on marine excellent source rocks and its evaluation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 31 (4): 366-372, 378. (in Chinese with English abstract)

REMÍREZ M N, ALGEO T J, 2020. Paleosalinity determination in ancient epicontinental seas: a case study of the T-OAE in the Cleveland Basin (UK) [J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103072.

ROBINSON S G, SAHOTA J T S, 2000. Rock-magnetic characterization of early, redoxomorphic diagenesis in turbiditic sediments from the Madeira Abyssal Plain [J]. *Sedimentology*, 47 (2): 367-394.

SONG Y, LI S F, HU S Z, 2019. Warm-humid paleoclimate control of salinized lacustrine organic-rich shale deposition in the Oligocene Hetaoyuan Formation of the Biyang Depression, East China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 202: 69-84.

SUN J P, CHEN S Y, PENG Y, et al., 2017. Late Carboniferous mountain-basin framework of Northeastern Qaidam area [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 41 (4): 10-17. (in Chinese with English abstract)

TISSOT B P, WELTE D H, 1984. *Petroleum Formation and Occurrence* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

TRÉGUER P J, DE LA ROCHA C L, 2013. The world ocean silica cycle [J]. *Annual Review of Marine Science*, 5 (1): 477-501.

WANG B, ZHANG G W, LI S Z, et al., 2016. Early Carboniferous paleomagnetic results from the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau and their implications [J]. *Gondwana Research*, 36: 57-64.

WANG G C, SUN M, GAO S F, et al., 2018. The origin, type and hydrocarbon generation potential of organic matter in a marine-continental transitional facies shale succession (Qaidam Basin, China) [J]. *Scientific Reports*, 8 (1): 6568.

WANG L, LI Z X, LIU C L, et al., 2019. The Carboniferous source rock maturity evolution in the Delingha depression in the Qaidam Basin, northwest China [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (3): 370-381. (in Chinese with English abstract)

WEI W, ALGEO T J, 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341-366.

WEI X J, MA Y S, LI Z X, et al., 2018. High-frequency alternations

and driving mechanisms of elastic-carbonate successions in the Upper Carboniferous, northern Qaidam Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20 (3): 409-422. (in Chinese with English abstract)

ZANG J Y, WANG H, LIU J, et al., 2020. The research progress in biogenic silica composition and its impact on silica cycle [J]. *Advances in Marine Science*, 38 (1): 11-20. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹军, 刘成林, 马寅生, 等, 2016. 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页岩气地球化学特征及成因 [J]. *地学前缘*, 23 (5): 158-166.

付锁堂, 马达德, 陈琰, 等, 2016. 柴达木盆地油气勘探新进展 [J]. *石油学报*, 37 (S1): 1-10.

国家能源局, 2020. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735-2019 [S]. 北京: 石油工业出版社.

李军亮, 柳忠泉, 肖永军, 等, 2016. 柴达木盆地东部地区石炭系泥页岩生烃条件及选区 [J]. *地质通报*, 35 (2-3): 312-320.

李宗星, 彭博, 马寅生, 等, 2019. 柴达木盆地石炭系油气调查最新进展 [J]. *中国地质调查*, 6 (4): 79-87.

刘成林, 马寅生, 周刚, 等, 2012. 柴达木盆地石炭系生烃证据 [J]. *石油学报*, 33 (6): 925-931.

刘成林, 张旭, 杨元元, 等, 2016. 柴达木盆地德令哈坳陷石炭系页岩气系统评价 [J]. *地学前缘*, 23 (5): 135-145.

刘成林, 张禹, 杨晟颖, 等, 2021. 海相低勘探程度地区油气资源评价: 以柴达木盆地德令哈坳陷石炭系为例 [J]. *地学前缘*, 28 (1): 295-307.

刘奎, 李宗星, 施小斌, 等, 2020. 柴达木盆地东部晚海西-印支期剥蚀量与隆升历史: 多种古温标与沉积学证据的制约 [J]. *地球物理学报*, 63 (4): 1403-1421.

马立成, 江万, 肖宙轩, 等, 2020. 柴达木盆地东部扎布萨尕秀组的时代归属讨论 [J]. *地质力学学报*, 26 (6): 961-972.

马寅生, 尹成明, 刘成林, 等, 2012. 柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展 [J]. *地球学报*, 33 (2): 135-144.

牛永斌, 钟建华, 段宏亮, 等, 2010. 柴达木盆地石炭系沉积相及其与烃源岩的关系 [J]. *沉积学报*, 28 (1): 140-149.

彭博, 张浩, 杨晟颖, 等, 2020. 柴达木盆地东部石炭系古岩溶缝洞单元测井响应 [J]. *地质力学学报*, 26 (6): 923-931.

青海省地质矿产局, 1991. 青海省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.

秦建中, 腾格尔, 付小东, 2009. 海相优质烃源层评价与形成条件研究 [J]. *石油实验地质*, 31 (4): 366-372, 378.

孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等, 2017. 柴达木东北部晚石炭世盆山格局研究 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 41 (4): 10-17.

王利, 李宗星, 刘成林, 等, 2019. 柴达木盆地德令哈坳陷石炭系烃源岩成熟度演化史 [J]. *地质力学学报*, 25 (3): 370-381.

魏小洁, 马寅生, 李宗星, 等, 2018. 柴达木盆地北缘上石炭统碎屑岩: 碳酸盐岩高频转换过程及驱动机制 [J]. *古地理学报*, 20 (3): 409-422.

臧家业, 王昊, 刘军, 等, 2020. 生物硅组成及对硅循环影响的研究进展 [J]. *海洋科学进展*, 38 (1): 11-20.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

