

文章编号:1673-5005(2024)01-0091-13 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2024.01.010

鄂尔多斯盆地南缘长7烃源岩地球化学特征与沉积环境

王广利^{1,2}, 李阳阳^{1,2}, 王一帆^{1,2}, 高兴^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

摘要:鄂尔多斯盆地南缘出露多处典型长7段页岩剖面,为了加深该区域烃源岩的研究,对35个烃源岩样品开展有机碳含量测定、岩石热解分析、饱和烃气相色谱-质谱分析、微量元素含量测定等测试分析,研究其地球化学特征,分析其有机质来源及沉积环境。结果表明:暗色页岩发育于淡水和还原的半深湖—深湖环境,沉积期气候温暖湿润,适宜生物发育,Mo元素高度富集,指示湖泊富营养化,初级生产力高;物质来源为藻类等低等水生生物和陆地植物的混合来源,但藻类等低等水生生物是主要来源;源岩有机质高度富集,总有机碳(TOC)平均值为23.51%,高于陆相优质烃源岩的丰度标准;有机质以腐泥—混合型为主,生烃潜力 S_1+S_2 均值为112.93 mg/g,生烃潜力良好;岩石热解峰温及生物标志化合物参数,指示达到成熟热演化程度,具有勘探潜力。

关键词:鄂尔多斯盆地; 铜川地区; 有机地球化学特征; 烃源岩评价; 有机质来源; 沉积环境

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A

引用格式:王广利,李阳阳,王一帆,等. 鄂尔多斯盆地南缘长7烃源岩地球化学特征与沉积环境[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(1):91-103.

WANG Guangli, LI Yangyang, WANG Yifan, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Chang 7 source rocks, Southern Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(1):91-103.

Geochemical characteristics and sedimentary environment of Chang 7 source rocks, Southern Ordos Basin

WANG Guangli^{1,2}, LI Yangyang^{1,2}, WANG Yifan^{1,2}, GAO Xing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The study focused on the typical shale profiles of the Chang 7 member extensively exposed along the southern margin of the Ordos Basin. To gain insights into the formation of source rocks and the prevailing sedimentary environment, detailed geochemical analyses were conducted on 35 outcropped source rock samples collected from Tongchuan areas. These examinations include total organic carbon (TOC) analysis, rock-eval pyrolysis, GC-MS of saturated hydrocarbons, and trace elements analysis. The findings suggest that the organic-rich black shales were deposited within a semi-deep lacustrine environment characterized by freshwater and reducing bottom water conditions. The climate was warm and humid fostering the thriving of algae during the sedimentary period of Chang 7. The presence of highly enriched Mo elements indicated lake eutrophication and high primary productivity, with organic matter primarily contributed by algae. The source rocks are highly enriched in organic matter, with 23.51% of TOC and 112.93 mg/g of S_1+S_2 in average. Furthermore, the organic matter within the source rocks predominantly comprised a sapropelic-mixed type, indicative of substantial hydrocarbon generation potential. The peak temperature of rock-eval and biomarker ratios suggested that the source rock has reached the threshold of hydrocarbon generation, indicating promising exploration potential.

收稿日期:2023-02-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42072148)

第一作者及通信作者:王广利(1973-),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为油气与有机地球化学。E-mail:sdyxwgl@cup.edu.cn。

Keywords: Ordos Basin; Tongchuan area; organic geochemical characteristics; source rock evaluation; source of organic matter; sedimentary environment

鄂尔多斯盆地具有丰富的油气资源,也是中国最先开展石油勘探和开发工作的盆地之一。据国家资源部统计结果显示,2020年盆地油气新增探明地质储量分别超过1亿t与1000亿m³,已成为中国第一大油气生产盆地与第一大天然气产区^[1]。中生界三叠系延长组长7段是盆地的主要烃源岩层系,而其底部的长7₃亚段又是长7段中的主力生油层段。诸多学者已对鄂尔多斯盆地长7段烃源岩有机地球化学特征进行了大量研究,但研究主要集中在盆地中、北部区域,对盆地南缘烃源岩的研究相对较少。随着油气勘查的深入,该区油气资源也逐渐得到重视。笔者通过对铜川地区长7段烃源岩进行有机地球化学测试,明确该地区长7段烃源岩有机地球化学特征,分析其生烃潜力、有机质来源及其沉积环境,为研究区能源矿产勘查开发提供一定的帮助。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西缘,四周环山,属于大型的多旋回叠合型盆地,是中国第二大沉积盆地,也是第二大含油气盆地。盆地经过多期构造演化,最终形成现今东侧宽西侧窄、东侧缓西侧陡的构造形态,盆地内可进一步划分为伊陕斜坡、伊盟隆起、渭北隆起等6个二级构造单元(图1(a))^[2-3]。

在中生界时期,盆地受构造运动成为大型坳陷湖盆,主要源岩层段也在这一时期发育形成。在中生界发育形成的多套含油层组中,三叠系延长组是油气的主力源岩层。延长组自上而下划分为长1~长10等10个层系,是不同湖盆沉积时期的产物(图1(b))。长10~长7为湖进期,发育形成进积型湖泊—三角洲沉积相;从长6沉积期开始进入湖退期,发育进积型三角洲沉积相^[4]。长7段为湖盆期发展的鼎盛阶段,也是对延长组油源作出贡献最大的层段,其可细分为长7₃、长7₂和长7₁三个亚段。

铜川地区位于盆地南缘的渭北隆起之上(图1(a)),是沉积物稳定沉降区和南缘构造活动带之间的过渡区域,构造运动强烈,断层较发育。该区烃源岩主要为三叠系延长组长7段页岩,其资源品位好、含油率较高、分布稳定、资源量大,从2008年以来该地区累积探明地质储量超过5亿t,预测储量超过13亿t^[7]。研究区聂家河、淌泥河等处出露有典型的长7段地层剖面,实验样品即采集于此(图1(a))。淌泥河剖面位于宜君县哭泉乡与金锁关镇之间,海拔1315m。其地层倾角接近60°,地层倾向为NNE^[8],为长7₃亚段地层,剖面露头风化严重,正断层、逆断层均有发育;聂家河剖面位于耀州区瑶曲镇聂家河村附近,海拔1335m,剖面露头风化,断层发育。

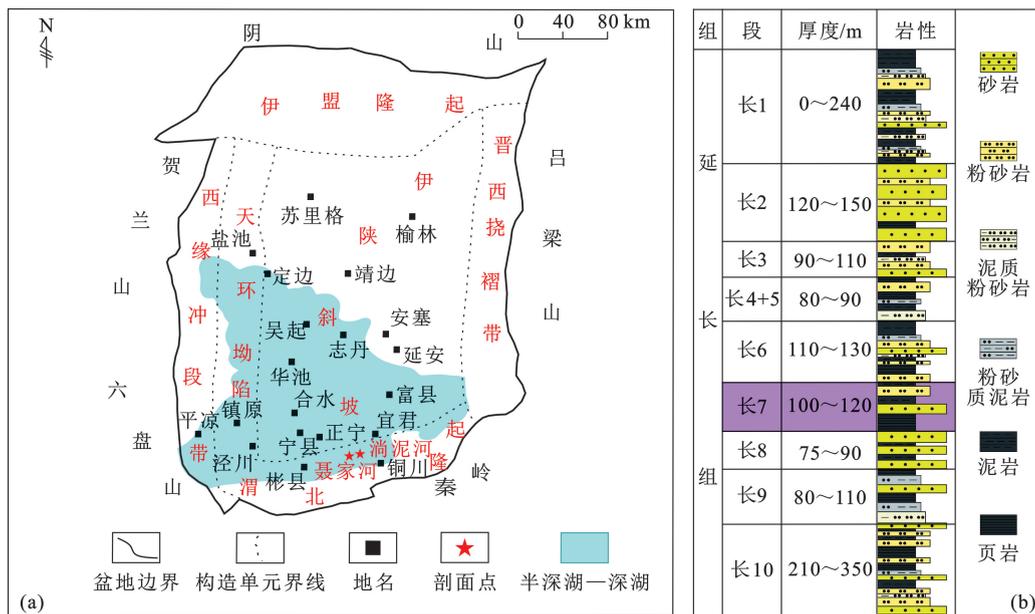


图1 盆地沉积构造与延长组地层柱状图(据文献[3]、[5]、[6],修改)

Fig.1 Basin sedimentary structure and stratigraphic columns of Yanchang Formation(After citation[3],[5],[6], modified)

2 烃源岩地球化学特征

2.1 样品与试验

采集研究区烃源岩样品 35 块(图 2(a)),岩性均为暗色页岩,层位均为长 7 段页岩,采集时选择剥除表面风化层后的新鲜岩石并按 1 m 间隔采样。其

中在淌泥河露头剖面采集样品 15 块(图 2(b)、(c));在聂家河南侧露头剖面采集样品 9 块;聂家河北侧剖面采集样品 11 块(图 2(d))。试验包括岩石热解、总有机碳测定、族组分抽提分离及碳同位素测定、饱和烃与芳香烃气相色谱-质谱分析、微量元素测试,并选取典型样品进行热模拟试验。

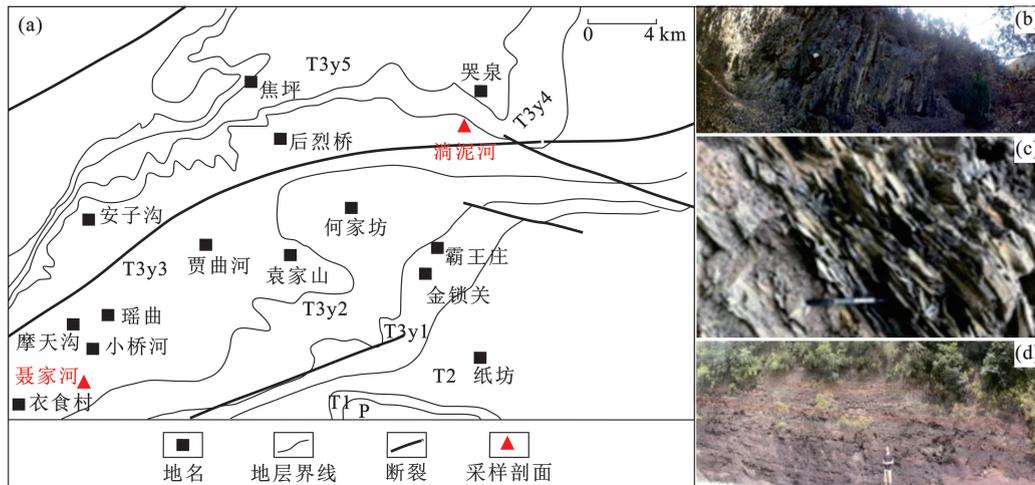


图 2 采样位置(据文献[9],修改)与淌泥河、聂家河野外露头剖面

Fig. 2 Sampling location (After citation[9], modified) and field outcrop profile of Tangnihe and Niejiahe

2.2 有机质丰度

研究区 3 个剖面烃源岩的测试分析结果显示,研究区有机质丰度的分布范围以及有机质的富集程度均存在一定的差异(表 1)。35 个样品 TOC 值介

于 9.67%~39.68%,平均值为 23.51%。TOC 分布范围在 20%~30%的样品数量最多为 13 个;其次是 TOC 分布在 10%~20%之间为 11 个;在 30%~40%之间为 9 个;TOC 小于 10%的样品最少为 2 个。整体来

表 1 暗色页岩地球化学测试数据

Table 1 Geochemical data of dark shales

样品	岩性	S ₁ / (mg·g ⁻¹)	S ₂ / (mg·g ⁻¹)	T _{max} / °C	TOC/ %	氯仿沥青“A”质 量分数/%	氢指数 I _H / (mg·g ⁻¹)	生烃潜 力指数	组分碳同位素/‰			
									饱和烃	芳香烃	非烃	沥青质
NJH-2	页岩	1.97	38.55	438	23.63	0.53	163.14	171.48	-32.51	-31.52	—	—
NJH-3	页岩	0.76	15.00	439	12.18	0.24	123.15	129.39	-32.36	-31.26	—	—
NJH-5	页岩	1.60	30.72	439	19.88	0.60	154.53	162.58	-32.95	-31.69	—	—
NJH-6	页岩	0.31	8.74	438	10.02	0.11	87.23	90.32	-34.43	-32.50	—	—
NJH-9	页岩	0.20	7.62	440	10.28	0.01	74.12	76.07	-30.44	-30.38	—	—
TNH-2	页岩	3.13	68.43	432	19.86	0.27	344.56	360.32	-34.85	-32.56	-31.36	-30.91
TNH-4	页岩	4.35	79.02	431	18.44	0.96	428.52	452.11	-34.06	-32.53	-31.15	-30.32
TNH-5	页岩	4.54	85.87	432	21.82	0.89	393.54	414.34	-34.70	-32.45	-31.00	-30.03
TNH-7	页岩	4.27	70.86	434	16.76	0.84	422.79	448.27	-34.83	-32.38	-30.68	-30.75
TNH-8	页岩	3.67	86.56	431	23.42	0.83	369.60	385.27	-34.98	-32.19	-30.40	-29.72
TNH-9	页岩	2.81	64.18	434	18.30	0.73	350.71	366.07	-34.87	-32.30	-29.94	-30.32
TNH-10	页岩	4.05	101.50	433	27.24	0.76	372.61	387.48	-33.69	-31.89	-30.43	-29.94
TNH-12	页岩	2.96	58.85	436	18.47	0.57	318.62	334.65	-33.25	-32.08	-31.19	-30.27
TNH-14	页岩	4.49	125.20	430	29.71	0.87	421.41	436.52	-33.49	-31.57	-29.95	-29.30
NJHN-2	页岩	8.85	197.57	431	32.57	1.06	606.59	633.76	-32.51	-31.38	-30.30	-29.45
NJHN-4	页岩	13.71	179.99	434	28.23	1.33	637.57	686.14	-32.47	-31.17	-30.30	-29.24
NJHN-5	页岩	17.67	190.27	431	33.91	1.26	561.11	613.22	-33.05	-31.02	-29.74	-28.72
NJHN-7	页岩	13.19	232.75	434	31.26	1.40	744.56	786.76	-32.95	-31.46	-30.28	-29.98
NJHN-8	页岩	19.95	252.39	433	39.68	2.00	636.06	686.34	-32.46	-31.16	-30.79	-29.55
NJHN-9	页岩	20.24	203.09	435	35.80	1.92	567.29	623.83	-32.78	-31.40	-30.53	-29.60

看,除两个样品外(两个样品分别为 9.67%、9.95%),其余 33 个样品 TOC 值均大于 10%(图 3(a)),有机碳含量非常高,源岩品质非常好。暗色页岩生烃潜量 S_1+S_2 值分布在 3.71~272.34 mg/g,平均值为 112.93 mg/g。生烃潜在 0~70 mg/g 的范围内的样品数最多为 11 个;在 70~140 mg/g 和

140~210 mg/g 的范围内样品数均为 10 个;210~280 mg/g 范围内只有 4 个(图 3(a))。氯仿沥青“A”质量分数的分布范围为 0.01%~2.0%,平均值为 0.81%。在 32 个源岩样品中,29 个样品含量大于 0.2%(其余 3 个分别为 0.01%、0.02%、0.11%),指示源岩生烃潜力大(图 3(a))。

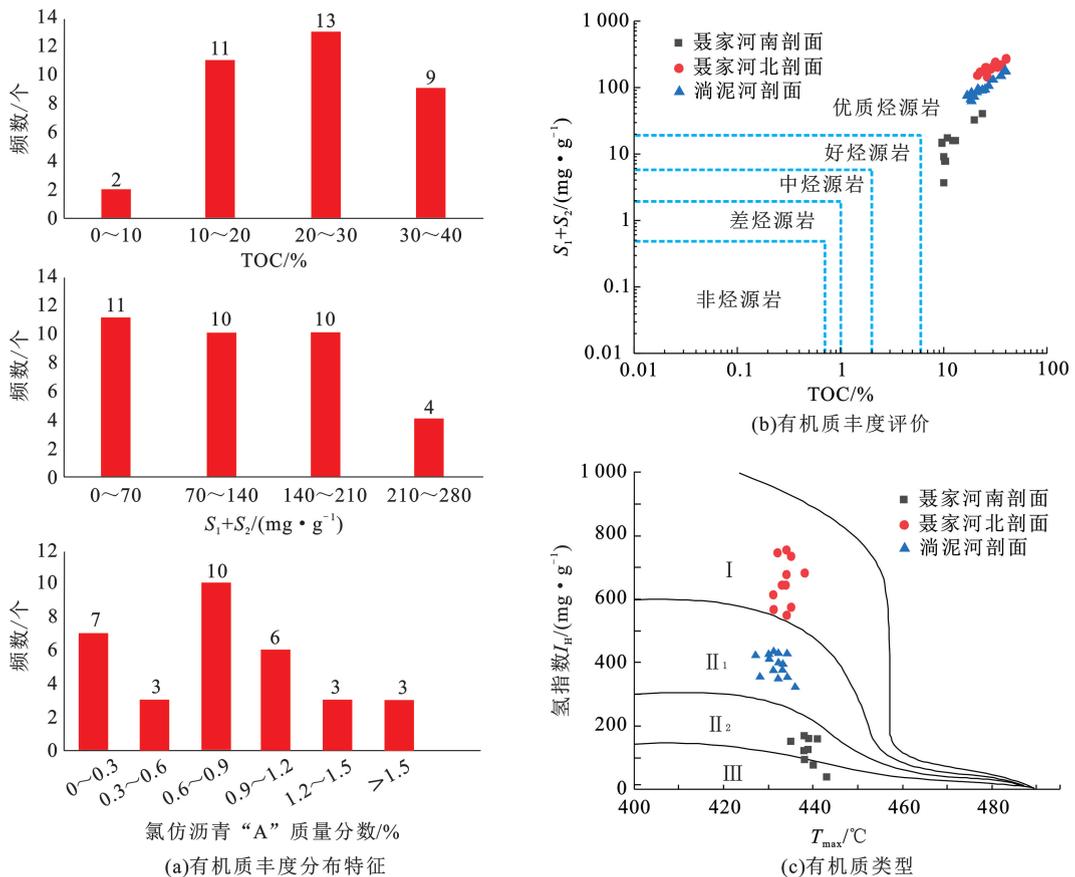


图 3 长 7 段暗色页岩有机质丰度分布特征、有机质丰度评价与有机质类型

Fig. 3 Organic matter abundance in dark shales and evaluation of organic matter abundance and organic matter type

对照烃源岩有机质丰度分级评价标准^[10],研究区 3 个剖面的样品烃源岩均达到了优质烃源岩的品质(图 3(b))。聂家河南侧剖面样品 TOC 为 9.67%~23.63%,平均值为 13.27%。生烃潜量为 3.71~40.52 mg/g,平均值为 17.5 mg/g;聂家河北侧剖面 TOC 为 21.01%~39.68%,平均值为 29.78%。生烃潜量为 145.18~272.34 mg/g,平均值为 204.12 mg/g;淌泥河剖面 TOC 为 16.76%~39.39%,均值为 25.06%。生烃潜量为 61.81~178.79 mg/g,均值为 103.3 mg/g。聂家河南北两侧露头剖面 TOC 含量出现较大差异,推测是由于研究区构造活动强烈,断层发育,使得现今聂家河剖面南北两侧地层出现错位,并非地质沉积过程中形成的对应层位。

2.3 有机质性质和类型

2.3.1 岩石热解参数

根据最高热解温度-氢指数有机质类型分析,聂家河北侧剖面样品烃源岩有机质类型为 I 型;淌泥河剖面烃源岩有机质类型为 II₁ 型;聂家河南侧剖面烃源岩有机质类型为 II₂-III 型(图 3(c))。有机质类型整体主要以 I-II 型为主,少数为 III 型,说明有机质来源较为复杂,暗色页岩有机质多来源于藻类等水生生物,部分来源于陆源高等植物。

2.3.2 可溶有机质含量及其族组成

聂家河南侧剖面样品氯仿沥青“A”质量分数为 0.01%~0.60%,平均值为 0.25%;聂家河北侧剖面氯仿沥青“A”质量分数为 0.81%~2.00%,平均值为 1.34%;淌泥河剖面氯仿沥青“A”质量分数为

0.27%~0.96%,平均值为 0.75%,这种差异,也反映了陆相有机质沉积的非均质性。聂家河北剖面烃源岩的氯仿沥青“*A*”族组成分析结果显示,饱和烃类组分含量最高,质量分数为 32.05%~54.67%,平均值为 41.97%;饱和烃与芳香烃比值介于 1.96~3.57,平均为 2.69。芳烃质量分数为 9.89%~19.96%,平均值为 15.96%;非烃质量分数介于 14.44%~36.00%,平均值为 22.39%;沥青质量分数为 15.56%~27.86%,平均为 19.67%,沥青质含量较高(图 4(a))。淌泥河剖面氯仿沥青“*A*”族组成分析结果显示,饱和烃类组分质量分数高,为 21.36%~55.30%,平均值为 44.50%;饱和烃与芳香烃比值介于 1.37~2.30,平均为 1.70。芳烃质量分数

为 12.37%~30.10%,平均值为 25.65%;非烃质量分数介于 14.29%~42.20%,平均值为 20.10%;沥青质量分数为 3.86%~24.07%,平均为 9.76%,沥青质含量较少(图 4(b))。聂家河南剖面氯仿沥青“*A*”族组成分析结果,饱和烃类组分质量分数为 34.58%~56.02%,平均值为 46.75%;饱和烃与芳香烃比值介于 3.24~6.95,平均为 4.51。芳烃质量分数为 7.68%~14.50%,平均值为 10.78%;非烃质量分数介于 32.64%~48.44%,平均值为 38.93%;沥青质量分数为 0.47%~8.75%,平均为 3.54%,非烃含量较高,沥青质含量较少(图 4(c))。综合来看,烃类组分含量较高,饱、芳比值大,反映有机质主要来源于藻类等水生生物,与前述判断较吻合。

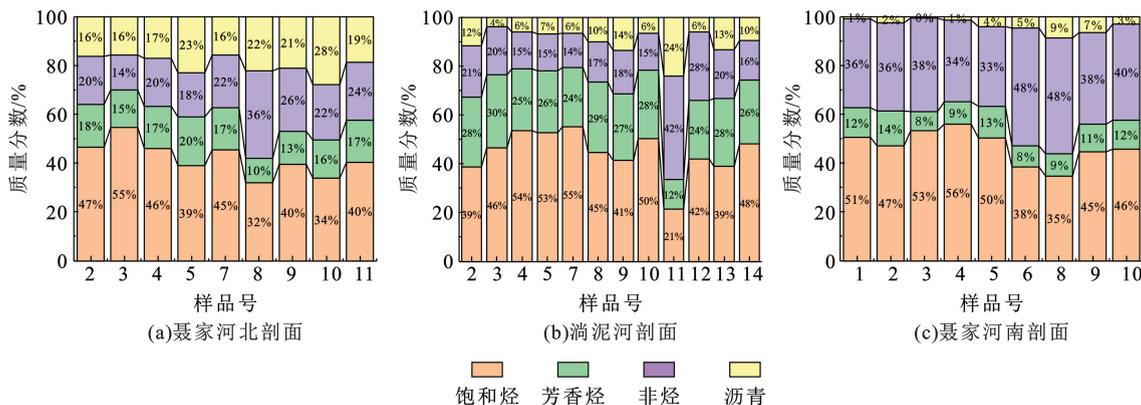


图 4 氯仿沥青“*A*”族组成特征

Fig. 4 Composition characteristics of chloroform asphalt "A" group

2.4 有机质成熟度

岩石最高热解温度和烃类生物标志化合物用来评价烃源岩的有机质成熟度。在研究区 35 个烃源岩样品中,去除两个异常值样品后,最大热解峰温值 T_{max} 为 430~443 °C,平均值为 435 °C。其中聂家河南侧剖面样品 T_{max} 为 435~443 °C,平均值为 439 °C;聂家河北侧剖面 T_{max} 为 431~438 °C,平均值为

434 °C;淌泥河剖面 T_{max} 为 430~436 °C,平均值为 432 °C。胡见义等^[11]对大量数据的统计研究认为,热解峰温值在 435 °C 时源岩进入开始生烃阶段,与 R_o 为 0.5% 相对应;435~440 °C 的范围内,烃源岩生成油气有限;温度高于 440 °C 时,油气能够大量产出。对照这一标准,研究区页岩整体已进入热成熟阶段。

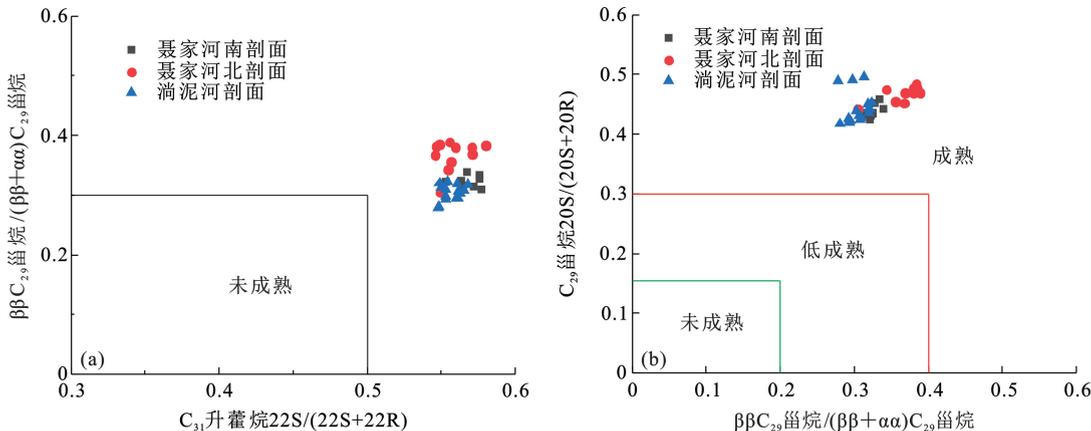


图 5 有机质成熟度评价

Fig. 5 Maturity evaluation of organic matter

与热演化程度有关的生物标志化合物也能反映烃源岩的成熟度。由甲基菲指数换算得到的样品等效镜质组反射率为最大为 0.67%, 最小为 0.45%, 平均值为 0.59%; 正构烷烃 CPI 值分布范围为 1.07~1.17, 平均为 1.12, 接近于 1.2; $C_{30}M/C_{30}H$ 的分布范围为 0.13~0.16, 平均值为 0.14, 接近于 0.15; C_{31} 藿烷 22S/(22S+22R) 分布范围为 0.55~

0.58, 平均为 0.56, C_{32} 藿烷 22S/(22S+22R) 分布范围为 0.54~0.61, 平均为 0.58; $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 20S/(20S+20R) 分布范围为 0.42~0.50, 平均为 0.45, C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 分布范围为 0.28~0.39, 平均为 0.33(图 5)。各项地球化学参数均反映研究区长 7 段暗色页岩有机质已进入成熟阶段(表 2)^[12-15]。

表 2 烃源岩生物标志物特征参数

Table 2 Biomarker parameters of source rocks

编号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n
NJH-2	0.57	0.20	0.38	1.13	2.12	2.91	0.58	0.04	0.14	0.56	0.57	0.32	0.44	—
NJH-3	0.58	0.24	0.45	1.16	1.76	2.64	0.54	0.04	0.13	0.58	0.60	0.33	0.45	—
NJH-5	0.59	0.20	0.37	1.15	1.69	2.51	0.56	0.03	0.14	0.57	0.56	0.31	0.43	—
NJH-6	0.55	0.28	0.46	1.15	1.03	2.75	0.61	0.04	0.14	0.58	0.60	0.31	0.43	—
NJH-9	0.59	0.17	0.28	1.13	1.55	3.23	0.67	0.03	0.14	0.55	0.59	0.32	0.43	—
TNH-2	0.68	0.36	0.51	1.15	1.41	3.11	0.52	0.05	0.16	0.56	0.60	0.30	0.44	5.07
TNH-4	0.67	0.38	0.59	1.11	1.46	2.52	0.56	0.04	0.14	0.57	0.57	0.31	0.42	3.70
TNH-5	0.67	0.34	0.53	1.10	1.53	2.51	0.57	0.05	0.15	0.57	0.60	0.32	0.45	5.20
TNH-7	0.70	0.48	0.66	1.11	0.95	1.94	0.57	0.04	0.15	0.56	0.60	0.32	0.44	2.93
TNH-8	0.73	0.28	0.41	1.14	2.01	3.64	0.55	0.04	0.15	0.56	0.60	0.31	0.43	3.76
TNH-9	0.73	0.34	0.47	1.14	1.79	3.41	0.56	0.04	0.14	0.55	0.60	0.29	0.43	2.18
TNH-10	0.75	0.34	0.46	1.15	1.50	3.10	0.56	0.04	0.15	0.56	0.60	0.29	0.42	3.30
TNH-12	0.74	0.25	0.37	1.10	2.58	3.51	0.57	0.04	0.14	0.55	0.60	0.28	0.42	2.48
TNH-14	0.73	0.25	0.37	1.13	2.03	2.95	0.58	0.04	0.16	0.55	0.60	0.32	0.44	5.01
NJHN-2	0.65	0.23	0.38	1.12	1.65	2.56	0.62	0.03	0.16	0.56	0.54	0.38	0.48	—
NJHN-4	0.63	0.29	0.51	1.13	1.28	1.93	0.62	0.03	0.15	0.57	0.56	0.37	0.47	—
NJHN-5	0.64	0.20	0.36	1.13	1.84	3.02	0.62	0.04	0.15	0.55	0.59	0.38	0.48	—
NJHN-7	0.65	0.22	0.38	1.10	1.56	2.54	0.63	0.03	0.15	0.56	0.58	0.36	0.45	—
NJHN-8	0.65	0.21	0.35	1.14	1.51	3.15	0.62	0.03	0.14	0.55	0.58	0.34	0.47	—
NJHN-9	0.64	0.19	0.32	1.11	1.68	2.92	0.64	0.04	0.14	0.55	0.56	0.30	0.44	—

注: a-Pr/Ph; b-Pr/ nC_{17} ; c-Ph/ nC_{18} ; d-CPI; e- $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$; f- $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$; g- R_c ; h-Gr/ C_{30} 藿烷; i- $C_{30}M/C_{30}H$; j- C_{31} 藿烷 22S/(22S+22R); k- C_{32} 藿烷 22S/(22S+22R); l- $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha) C_{29}20R$ 甾烷; m- $\alpha\alpha\alpha 20SC_{29}/20(S+R) C_{29}$ 甾烷; n-AIR, 即芳基类异戊二烯(C_{13-17})/(C_{18-22})的比值。

2.5 有机质来源

2.5.1 正构烷烃与甾烷分布特征

聂家河南剖面正构烷烃的碳数分布为 $nC_{12} \sim nC_{35}$, 主峰碳以 nC_{17} 为主, 为前高单峰型; CPI 值介于 1.13~1.17, 平均为 1.15, 奇偶优势不明显; $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 为 1.03~2.12, 平均值为 1.58; $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$ 为 2.38~3.61, 平均值为 2.89(图 6(a)), 显示低碳数的正构烷烃相对质量占优势, 说明藻类、浮游生物等水生生物对母质的来源贡献最大。聂家河北剖面正构烷烃的碳数分布为 $nC_{12} \sim nC_{35}$, 除一个样品主峰碳数为 nC_{19} 外, 其余样品主峰碳均为 nC_{17} , 为前高单峰型; CPI 值为 1.09~1.14, 平均为 1.12, 奇偶优势不明显; $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 为 0.98~2.24, 平均值为 1.58; $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$ 为 1.86~3.49, 平均值为 2.70(图 6(b))。淌泥河剖面烃源岩正构烷烃特征与聂家河剖面相似, 正构烷烃的碳数分布为 $nC_{12} \sim nC_{35}$, 主峰碳多为 nC_{17} 、 nC_{19} ; CPI 值介于 1.07~1.15, 平均为 1.12, 奇偶优势同样不明显;

$\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 为 1.03~2.12, 平均值为 1.66; nC_{21-22}/nC_{28-29} 为 1.94~5.42, 平均值为 3.13(图 6(c))。

也有学者用 TAR 的比值来表征母质来源是水生还是陆源^[16], 其原理与上述一致, 即陆源输入的有机质富集相对质量重的烷烃, 水生则与之相反。聂家河南剖面样品的比值介于 0.28~0.60, 平均为 0.40; 聂家河北剖面样品的比值介于 0.22~0.62, 平均为 0.36; 淌泥河剖面样品比值介于 0.22~0.66, 平均为 0.38, 指示结果与上述一致。

规则甾烷系列化合物也能够用来判断有机质的母质类型。前人^[17-18]研究认为 C_{27} 甾烷通常来源于低等水生生物和藻类, C_{29} 甾烷可以来源于藻类和高等植物。聂家河南侧剖面样品 C_{27} 甾烷与 C_{29} 甾烷的比值为 0.49~0.76, 平均为 0.58; C_{28} 甾烷与 C_{29} 甾烷的比值为 0.51~0.67, 平均为 0.58, 其 C_{27} — C_{28} — C_{29} 甾烷的分布型式表现为 $C_{28} < C_{27} < C_{29}$ 的不对称“V 字型”(图 6(a)); 聂家河北侧剖面样品 C_{27} 甾烷与 C_{29} 甾烷的比值为 0.49~0.67, 平均为

0.58; C_{28} 甾烷与 C_{29} 甾烷的比值为 0.57~0.77, 平均为 0.66, 其 C_{27} — C_{28} — C_{29} 甾烷的构型表现为 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 的直线型(图 6(b)); 淌泥河剖面烃源岩 C_{27} 甾烷与 C_{29} 甾烷的比值分布范围为 0.47~0.79, 平均为 0.58; C_{28} 甾烷与 C_{29} 甾烷的分布范围为 0.52~0.84, 平均为 0.70, 其 C_{27} — C_{28} — C_{29} 甾烷的构型表现为 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$ 的直线型(图 6(c))。在 3 个剖面中, C_{29} 规则甾烷相对优势、 C_{27} 规则甾

烷相对劣势, 但因 C_{29} 规则甾烷相对含量并不是很高, 推测研究区可能有少部分的高等植物来源, 这也与离子流分布图中显示存在少部分高碳数的特征相吻合, 结合规则甾烷三角图分布情况(图 7)、正构烷烃分布特征以及后续的组分碳同位素值, 可知对于研究区烃源岩而言, 藻类与浮游生物等低等水生生物是源岩母质的主要供给源, 同时陆源输入也是沉积有机质来源的一部分。

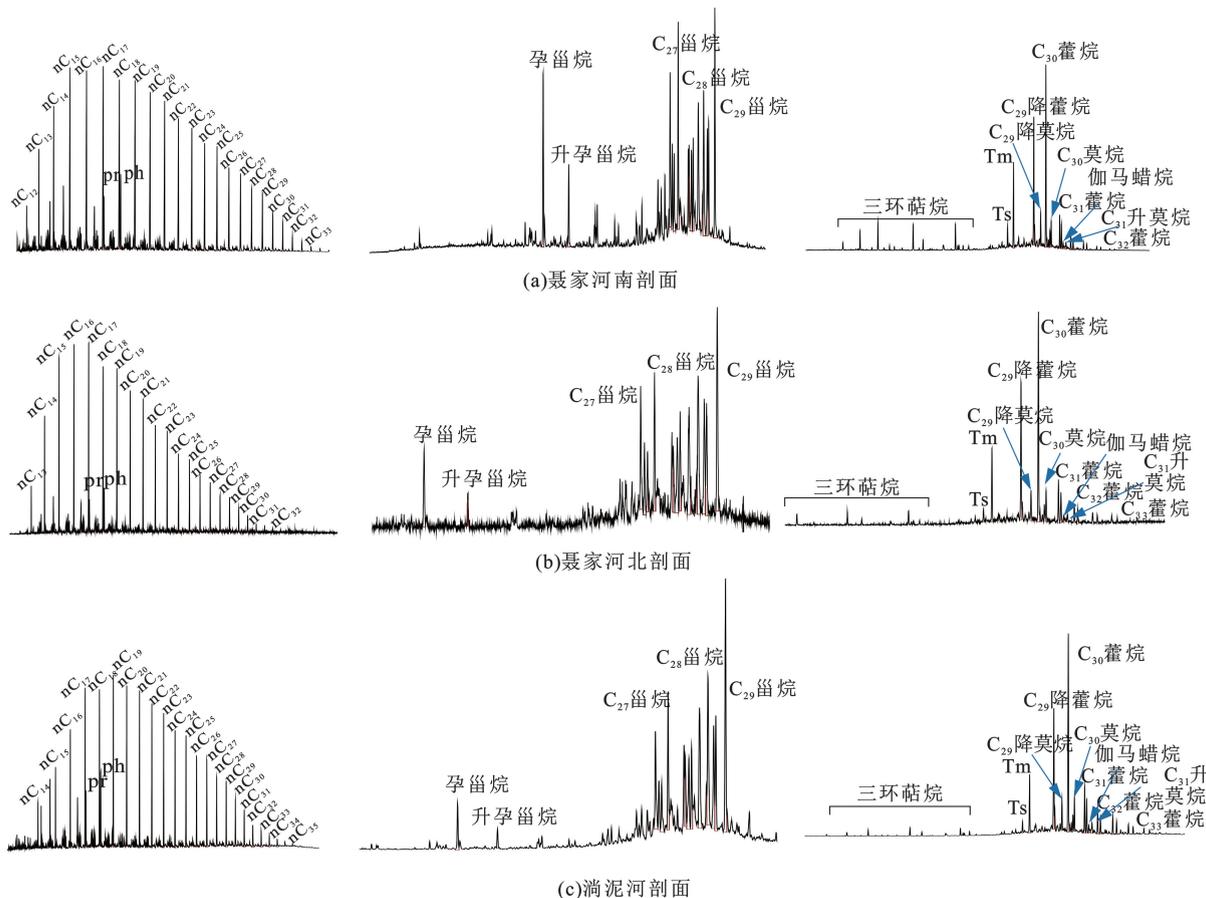


图 6 饱和烃分布特征

Fig. 6 Characteristics of saturated hydrocarbon

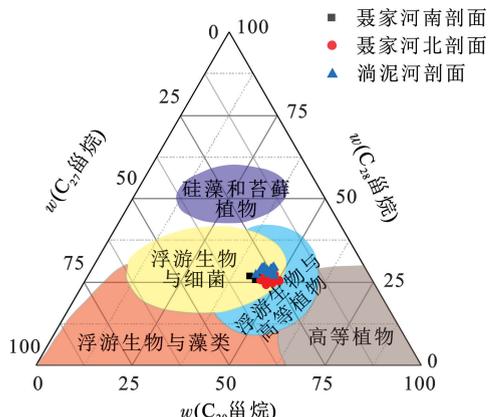


图 7 规则甾烷含量三角图

Fig. 7 Triangulation of regular sterane content

2.5.2 组分碳同位素特征

生源母质对于烃源岩的有机质碳同位素也具有一定的影响。碳同位素在地质作用过程较稳定, 且生物体是其主要的来源, 因此常被应用于生源区分等多个方面研究^[19]。一般来说, 有机质的族组分碳同位素表现为饱和烃最轻, 沥青质最重, 芳香烃与非烃的 $\delta^{13}C$ 介于两者之间。研究区淌泥河剖面样品饱和烃组分 $\delta^{13}C$ 为 $-34.98\text{‰} \sim -33.25\text{‰}$, 平均为 -34.20‰ ; 芳烃组分 $\delta^{13}C$ 为 $-32.75\text{‰} \sim -31.50\text{‰}$, 平均为 -32.18‰ ; 非烃组分 $\delta^{13}C$ 为 $-31.36\text{‰} \sim -29.94\text{‰}$, 平均为 -30.62‰ ; 沥青质组分 $\delta^{13}C$ 为 $-30.91\text{‰} \sim -29.30\text{‰}$, 平均为 -30.15‰ (图 8); 聂家河北剖面样品饱和烃组分 $\delta^{13}C$ 为 $-33.23\text{‰} \sim$

-32.44‰, 平均为 -32.81‰; 芳烃组分 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -31.78‰~ -31.02‰, 平均为 -31.33‰; 非烃组分 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -30.87‰~ -29.74‰, 平均为 -30.39‰; 沥青质组分 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -30.10‰~ -28.72‰, 平均为 -29.59‰ (图 8); 对聂家河南剖面样品只进行了饱和烃组分与芳香烃组分碳同位素测试, 前者的分布范围为 -34.43‰~ -30.44‰, 平均为 -32.54‰; 后者的分布范围为 -32.50‰~ -30.38‰, 平均为 -31.47‰。可以看出, 两个剖面碳同位素类型曲线一致, 反映它们生源较为一致, 有机质碳同位素值基本均小于 -29‰, 指示母质来源以藻类等低等水生生物为主; 同位素值存在差异, 淌泥河剖面黑色页岩样品较聂家河剖面饱和烃组分 $\delta^{13}\text{C}$ 相差 1.39‰, 芳烃组分 $\delta^{13}\text{C}$ 相差 0.85‰, 可能预示着沉积环境上的变化^[20-21]。

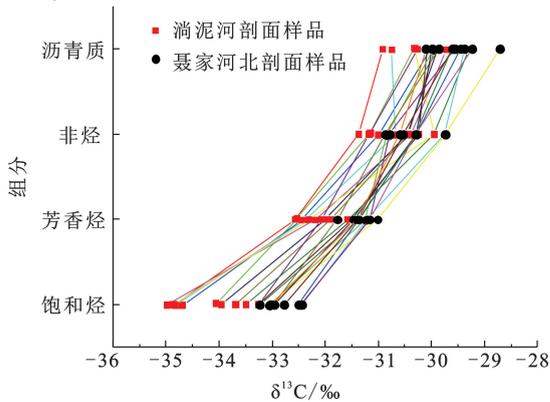


图 8 组分碳同位素特征

Fig. 8 Carbon isotope characteristics of source rock components

2.6 生烃潜力与排烃能力

前人研究表明, 有机质含量高的烃源岩其具有的生烃能力更强, 油气产出能力也更大^[22]。研究区

源岩的 Mo 元素高度富集, 分布范围为 44.19~133.43 $\mu\text{g/g}$, 平均含量约为 95.84 $\mu\text{g/g}$, 反映沉积时期湖泊富营养化, 初级生产力高, 结合前述烃源岩 TOC 及生烃潜力 S_1+S_2 值, 可知研究区烃源岩生烃能力良好。通过建立生烃剖面系列与烃源岩热模拟试验相结合的方式研究样品烃源岩的排烃能力。选择淌泥河剖面样品 (TNH-15) 进行热模拟生烃试验, 生烃热模拟试验是在温度和压力共控的条件下进行, 根据试验模拟的埋深, 设定地层压力 (流体压力), 并按正常压力系数 (0.9~1.2, 基准值为 1.0) 设定其浮动范围, 同时考虑静岩压力, 使对地层压力场的模拟更加准确, 试验一共设置 6 个试验温度点, 分别为 285、315、345、375、405、435 $^{\circ}\text{C}$, 具体试验条件见表 3。在每一温度的模拟试验结束后, 收集到的气体产物为气态烃, 排出到容器中的油及其清洗得到的油为排出油, 从热模拟后的固体残渣中抽提得到的可溶有机质称为滞留油, 排出油及滞留油的总和称为总油, 总油与气态烃的总和为总烃。研究区样品烃源岩的 TOC、生烃潜力 S_1+S_2 、产率指数、生烃潜力指数、 S_1/TOC 、 S_2/TOC 与 T_{max} 的变化趋势比较接近, 即先随 T_{max} 增加而逐渐增大, 达到一定值后, 随 T_{max} 的增加而逐渐减小 (图 9(a))。根据判断原则可知, 生烃潜力指数与成熟度具有先升后降的“两段式”关系, 先升后降的临界点为进入排烃门限的标志点。研究区样品生烃潜力指数主要分布在 37.22~786.76 mg/g , 平均值为 423.39 mg/g , 存在拐点, 且拐点 T_{max} 值约为 433 $^{\circ}\text{C}$, 结合热模拟试验结果 (图 9(b)), 研究区烃源岩已经达到排烃门限, 具备排烃能力, 指示很好的勘探潜力。

表 3 热模拟试验条件

Table 3 Thermal simulation experimental conditions

试验样品	分析号	进样量/ g	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	深度/ m	岩石密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	静岩压力/ MPa	流体压力/ MPa	恒温时间/ h
TNH-15	1	70	285	2984.8	2.4	80.44	29.25	48
	2	70	315	3506.4	2.4	94.50	34.36	48
	3	55	345	4114.7	2.4	110.89	40.32	48
	4	50	375	4640.0	2.4	125.05	45.47	48
	5	50	405	5113.9	2.4	137.82	50.12	48
	6	50	435	5559.7	2.4	149.83	50.83	48

3 烃源岩沉积环境

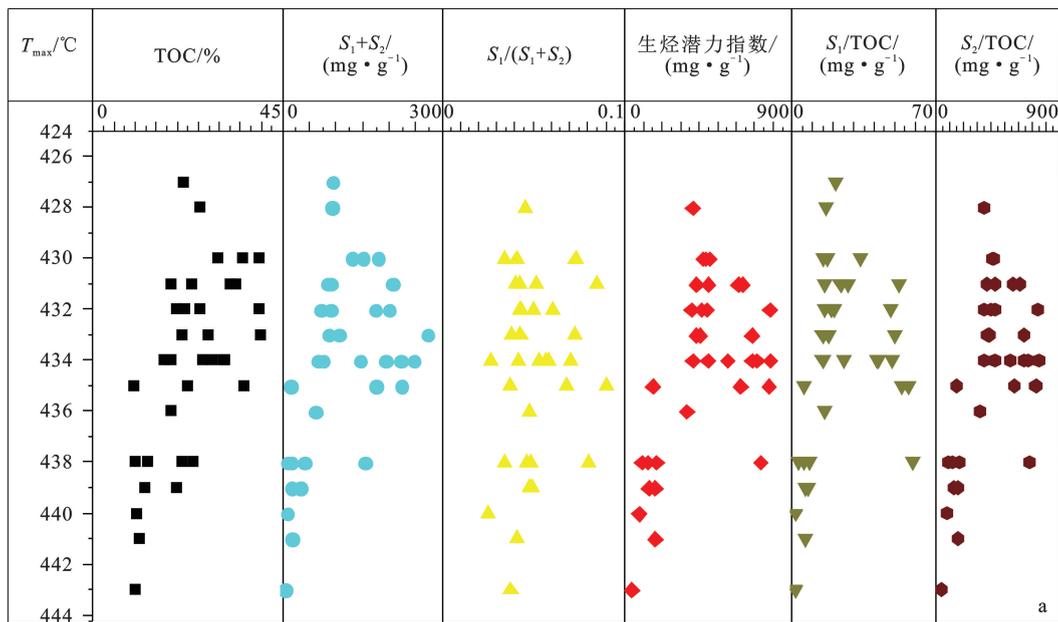
3.1 水体氧化还原性

姥鲛烷 (Pr)、植烷 (Ph) 具有结构上的相对稳定性, 因此常用来作为指示沉积环境的标志化合物。二者为类异戊二烯烷烃在不同环境条件下的产物,

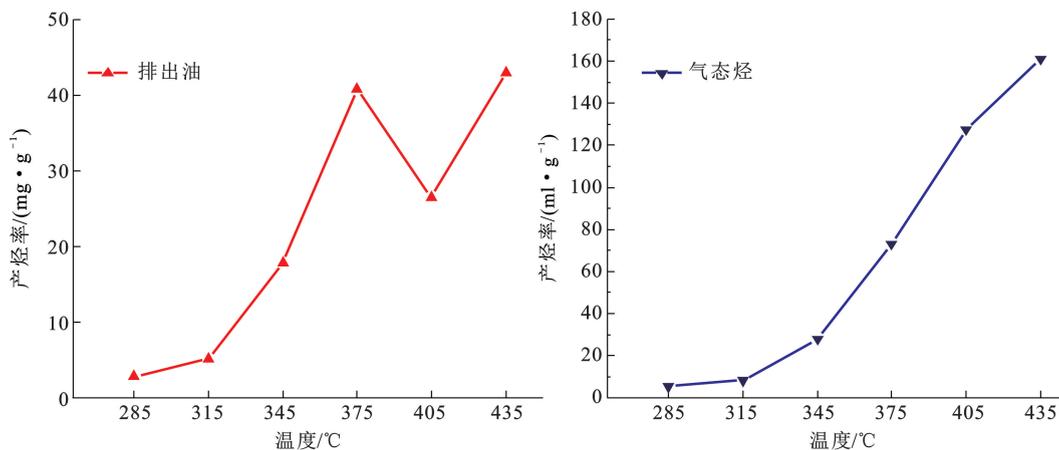
在还原环境下多形成植烷, 在氧化环境下多形成姥鲛烷^[23]。研究区聂家河南侧剖面样品 Pr/Ph 比值最大为 0.61, 最小为 0.55; Pr/ $n\text{C}_{17}$ 最大为 0.28, 最小为 0.17, 均值为 0.23; Ph/ $n\text{C}_{18}$ 最大为 0.46, 最小为 0.28, 均值为 0.40。聂家河北侧剖面样品 Pr/Ph 比值最大为 0.65, 最小为 0.60; Pr/ $n\text{C}_{17}$ 最大为

0.32, 最小为 0.19, 均值为 0.24; Ph/nC_{18} 最大为 0.56, 最小为 0.32, 均值为 0.42。淌泥河剖面样品 Pr/Ph 比值介于 0.55~0.75; Pr/nC_{17} 最大为 0.48, 最小为 0.22, 均值为 0.33; Ph/nC_{18} 最大为 0.66, 最小为 0.35, 均值为 0.48。通常以植烷与姥鲛烷比值

为 1 时作为环境区分的界线, 即比值小于 1 时, 指示还原环境, 比值大于 1 时, 指示氧化环境。 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相关图(图 10) 也可用来分析烃源岩原始沉积时的水体性质。研究区样品沉积时的环境为缺氧、还原环境。



(a) 烃源岩生烃剖面



(b) 热模拟生烃

图 9 烃源岩生烃剖面与热模拟生烃

Fig. 9 Hydrocarbon generation profile and thermal simulation of hydrocarbon generation

β -胡萝卜素也能够表征有机质沉积时水体所处的环境, 其是一种全饱和的 C_{40} 双环烷, 主要由胡萝卜素转化而来, 而胡萝卜素多在强还原环境下保存并富集, 因此常作为强还原水体分层的厌氧沉积环境的生物标志物来指示沉积环境^[24], 在聂家河北剖面、聂家河南剖面、淌泥河剖面样品中均检测到该化合物的存在, 指示研究区有机质沉积时为强还原湖相沉积环境。

前人认为芳基类异戊二烯烃主要来源于硫细菌类的绿硫细菌, 在中盐到高盐的强还原富硫水体环境多有报道^[25]。故芳基类异戊二烯烃的存在可以用来指示沉积环境为海相强还原及湖相富硫的水体分层上部为强还原环境。研究区聂家河北剖面检测到少量的该化合物, 淌泥河剖面烃源岩中含量较多, nC_{13-17}/nC_{18-22} 比值为 0.93~5.20, 平均值为 3.35, 指示水体分层且水体的上部为富硫的还原环境。

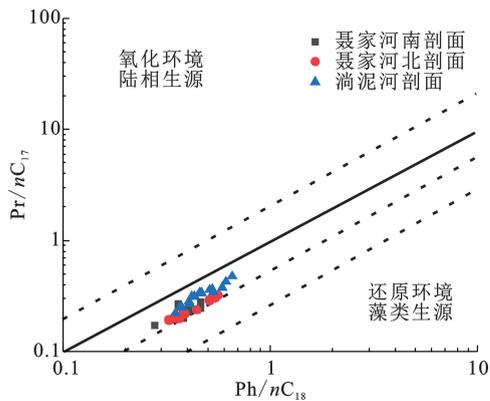


图 10 Pr/nC₁₇ 及 Ph/nC₁₈ 交汇图

Fig. 10 Intersection diagram of Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈

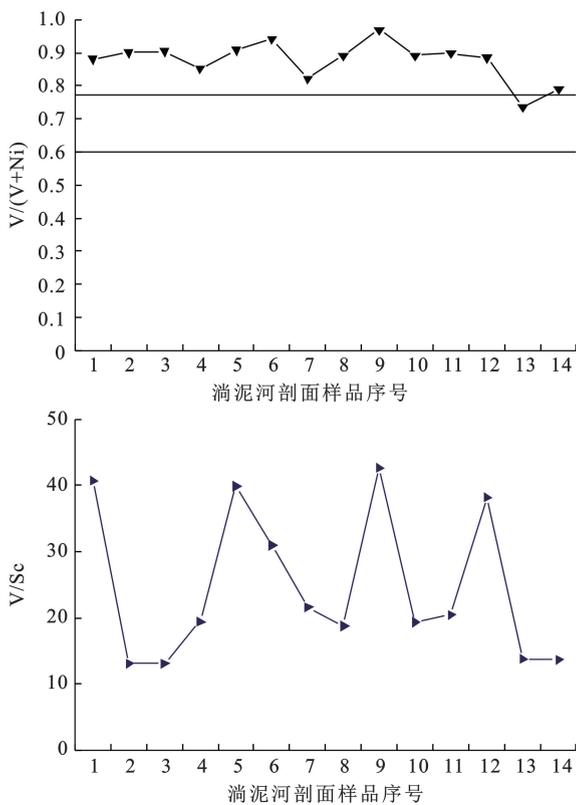
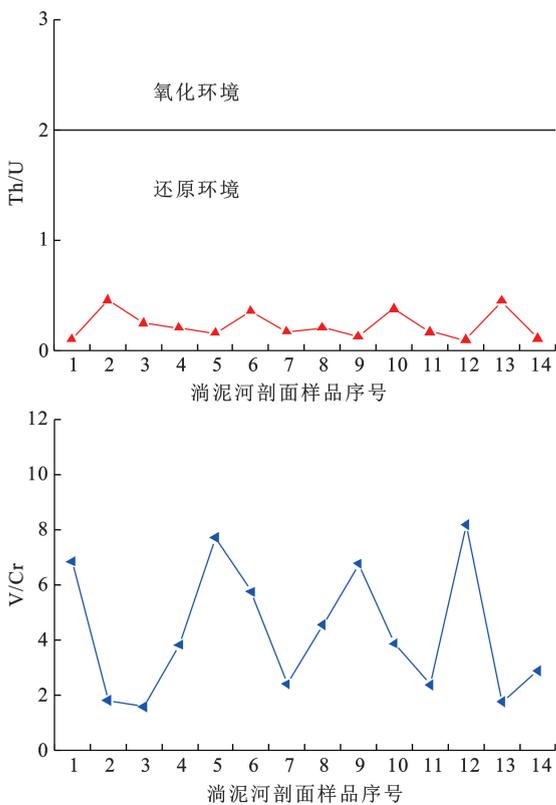


图 11 微量元素指示的氧化还原条件

Fig. 11 Redox conditions indicated by trace elements

在研究区 3 个剖面样品里均检测到了伽马蜡烷,聂家河南剖面样品的伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/C₃₀H)值介于 0.03~0.04 之间;聂家河北剖面样品的伽马蜡烷指数介于 0.02~0.05 之间;淌泥河剖面样品的伽马蜡烷指数介于 0.03~0.05 之间,表明在有机质沉积期间,水体为盐度很低的淡水环境(图 12(a))。淌泥河剖面样品 Sr/Ba 元素比为 0.11~0.61,平均值为 0.24,小于 0.5,指示水体盐度低(图 12(b))。综合来看,研究区烃源岩沉积时盐度较低,或沉积时水体为淡水环境。

淌泥河剖面样品实测 Th/U 比值为 0.10~0.46,平均值为 0.23,远小于 2,指示缺氧环境;V/Cr 比值最小为 1.58,最大为 8.17,平均值为 4.31,V/V+Ni 比值最小为 13.10,最大为 42.68,平均值为 24.69,V/Cr 与 V/V+Ni 的较高比值反映缺氧;V/(V+Ni) 比值为 0.74~0.97,平均值为 0.88,大于 0.77,反映为强还原环境^[26-27](图 11)。

3.2 古盐度与古气候

关于水体盐度的研究,学者常用伽马蜡烷指数进行判识,淡水水体中伽马蜡烷的含量较低,当其含量较高时,则指示水体的盐度较高^[28]。同时,其又可作为指示水体分层的标志物^[29]。

微量元素含量常用于古气候的研究,常用的指示指标为 Sr/Cu 比值、Rb/Sr 比值等。其原理在于,湿润的气候条件与干旱的气候条件分别富集不同的元素,前者富集 Fe、Mn、Cr、V、Ni、Co 等元素,后者富集 Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 等元素^[30]。对淌泥河剖面 14 个样品进行微量元素测试,结果显示 Sr/Cu 元素比值介于 0.55~2.91 之间,平均值为 1.43,小于 5;Rb/Sr 元素比值最小为 0.33,最大为 1.21,平均值为 0.82(图 12(c)、(d)),指示研究区长 7 段沉积期为温暖湿润气候。

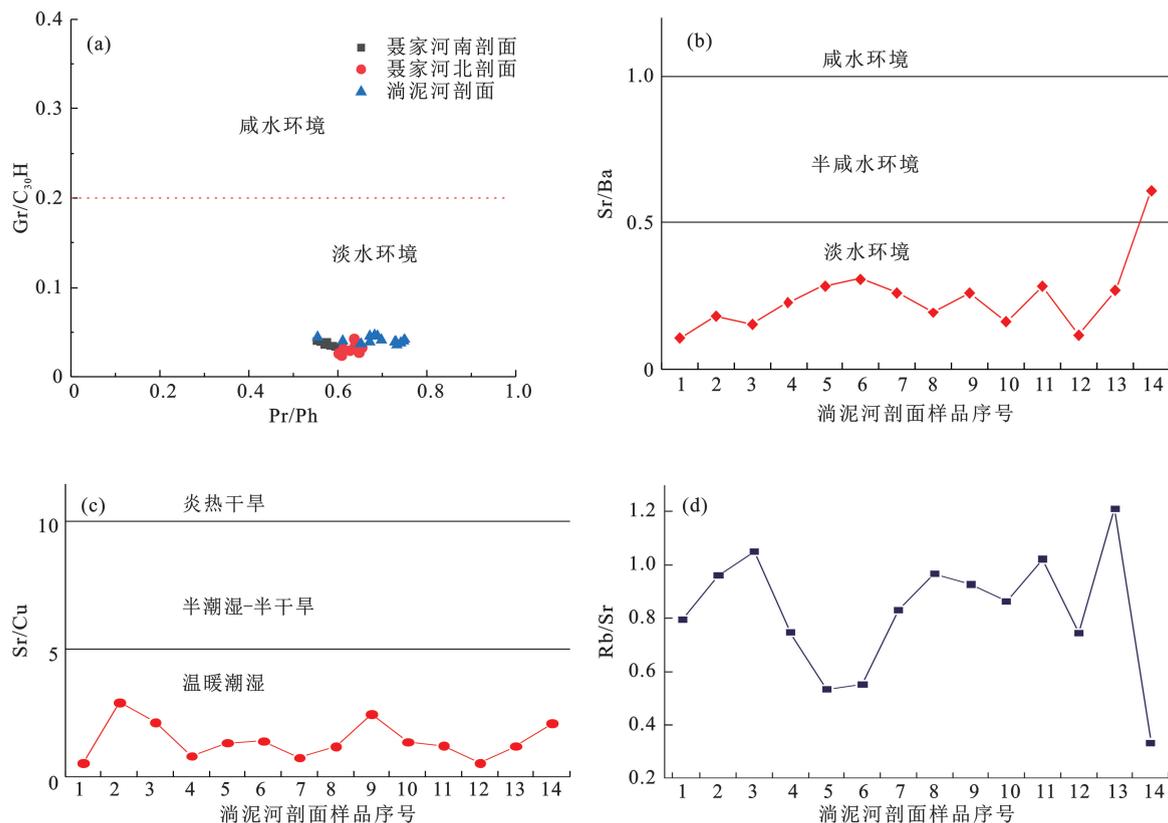


图 12 古盐度与古气候

Fig. 12 Paleo-salinity and paleo-climate

4 结束语

通过对盆地南缘出露的长 7 黑色页岩地球化学分析和研究,表明铜川地区长 7 段烃源岩发育形成于淡水和还原的半深湖—深湖环境,沉积期气候温暖湿润,适宜生物发育,物质来源为藻类等低等水生生物和陆地植物的混合来源,但藻类等低等水生生物是主要来源,Mo 元素高度富集,指示湖泊富营养化,初级生产力极高。长 7 段暗色页岩有机质丰度高,TOC 平均值为 23.51%,高于陆相优质烃源岩的丰度标准;源岩有机质以腐泥—混合型为主,生烃潜量 S_1+S_2 平均值为 112.93 mg/g,生烃潜力很大;烃源岩岩石热解峰温及生物标志化合物参数表明源岩达到了成熟程度,具有勘探开发潜力。

参考文献:

[1] 付金华,董国栋,周新平,等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.

[2] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 36-37.
[3] 付金华,李士祥,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946.
FU Jinhua, LI Shixiang, XU Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946.
[4] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, N-W China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
[5] 郑瑞峰,李志鹏,曾文人,等. 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩生烃活化能分布及其对页岩原位转化的启发[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 197-209.
ZHENG Ruihui, LI Zhipeng, ZENG Wenren, et al. Controlling factors of activation energy distribution of the Chang 7 shale and its enlightenment to in-situ conversion

- of shale, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(1):197-209.
- [6] 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2):254-263.
YANG Hua, DOU Weitan, LIU Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2):254-263.
- [7] 王喆, 陈清敏, 杨文博, 等. 鄂尔多斯盆地铜川地区油页岩特征及资源评价[J]. *非常规油气*, 2016, 3(4):32-39.
WANG Zhe, CHEN Qingmin, YANG Wenbo, et al. Characteristics and resource evaluation for oil shale in Tongchuan Area of Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2016, 3(4):32-39.
- [8] 赵俊峰, 刘池洋, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组长7段剖面及其油气地质意义[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1):233-245.
ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, ZHANG Dongdong, et al. Description and its hydrocarbon geological implications of outcrop sections of Triassic Chang-7 Member in southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1):233-245.
- [9] 樊婷婷, 柳益群, 周鼎武, 等. 鄂尔多斯南缘长7油页岩中钙质结核成因探讨[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3):932-944.
FAN Tingting, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Genesis of calcareous concretions in Chang 7 Oil Shale, Southern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3):932-944.
- [10] 石油地质勘探专业标准化委员会. SY/T 5735-2019, 烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京:石油工业出版社, 2019:2-3.
- [11] 胡见义, 黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1991:200-206.
- [12] RADKE M, WELTE D H, WILLSCH H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin:relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1):1-10.
- [13] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(1):77-95.
- [14] KOLACZKOWSKA E, SLOUGUI N E, WATT D S, et al. Thermodynamic stability of various alkylated, dealkylated and rearranged 17 α - and 17 β -hopane isomers using molecular mechanics calculations[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(4):1033-1038.
- [15] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. Cambridge, MASS, UK: the Press Syndicate of the University of Cambridge, 2005:20-200.
- [16] 李志强, 杨波, 王军, 等. 南黄海盆地中-新生界湖相烃源岩地球化学特征及生烃史[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2):419-431.
LI Zhiqiang, YANG Bo, WANG Jun, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of Mesozoic-Cenozoic lacustrine source rocks in the South Yellow Sea Basin, offshore eastern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2):419-431.
- [17] HUANG W Y, MEINSCHEN W G. Sterols as ecological indicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5):739-745.
- [18] 陈治军, 文志刚, 刘护创, 等. 二连盆地伊和乌苏凹陷烃源岩地球化学特征与生烃潜力[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(1):34-43.
CHEN Zhijun, WEN Zhigang, LIU Huchuang, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of source rocks in Yihewusu Sag, Eolian Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(1):34-43.
- [19] STAHL W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(2):121-149.
- [20] STAHL W J. Source rock-crude oil correlation by isotopic type-curves[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(10):1573-1577.
- [21] GALIMOV E M. Isotope organic geochemistry[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(10):1200-1262.
- [22] 陈建平, 孙永革, 钟宁宁, 等. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J]. *地质学报*, 2014, 88(11):2005-2032.
CHEN Jianping, SUN Yongge, ZHONG Ningning, et al. The efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within geological frame[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11):2005-2032.
- [23] SHANMUGAM G. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8):1241-1254.
- [24] 蒋助生. 克拉玛依原油中的类胡萝卜烷及其地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 1983(2):151-159.
JIANG Zhusheng. Perhydro carotenes in Karamay crude

- oil and their geochemical characteristics[J]. *Oil & Gas Geology*, 1983(2):151-159.
- [25] SUMMONS R E, POWELL T G. Identification of aryl isoprenoids in source rocks and crude oils: biological markers for the green sulphur bacteria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987,51(3):557-566.
- [26] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994,111(1/2/3/4):111-129.
- [27] 王鹏万,邹辰,李娴静,等. 滇黔北地区筇竹寺组元素地球化学特征及古环境意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021,45(2):51-62.
WANG Pengwan, ZOU Chen, LI Xianjing, et al. Geochemical characteristics of element Qiongzhusi Group in Dianqianbei area and paleoenvironmental significance [J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2021,45(2):51-62.
- [28] PETERS K E, MOLDOWAN J M. *The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments* [M]. New Jersey:Prentice Hall,1993:88.
- [29] 张立平,黄第藩,廖志勤. 伽马蜡烷:水体分层的地球化学标志[J]. *沉积学报*, 1999(1):136-140.
ZHANG Liping, HUANG Difan, LIAO Zhiqin. Gam-macerane: geochemical indicator of water column stratification [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999(1):136-140.
- [30] WORASH G. Geochemistry provenance and tectonic setting of the Adigrat sandstone northern Ethiopia [J]. *J Afr Earth Sci*, 2002,35:185-198.

(编辑 修荣荣)