



移动阅读

蒋杨, 弓虎军, 蒲仁海, 2024. 鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区延长组长9—长7段烃源岩地球化学特征及长8致密油源对比[J]. 沉积与特提斯地质, 44(3): 656–670. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.04001

JIANG Y, GONG H J, PU R H, 2024. Geochemical characteristics of source rocks in the Chang 9–Chang 7 members and their correlation with the tight oil sources of Chang 8 member in the Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 656–670. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.04001

鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区延长组长9—长7段烃源岩地球化学特征及长8致密油源对比

蒋 杨, 弓虎军, 蒲仁海

(西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 为评价鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区长9—长7段烃源岩品质, 探讨长8致密油油气来源问题, 通过TOC、氯仿沥青“A”、岩石热解参数、镜质体反射率、有机质显微组分、生物标记化合物、单体碳同位素等技术方法, 研究该区长9—长7段烃源岩生烃潜力、母质来源及沉积环境, 并对长8段原油样品进行地球化学分析及油源对比。结果表明: (1) 研究区主要发育长9、长8、长7三套暗色泥岩, 长9—长7段暗色泥岩有机质类型为II₁~II₂型; 其TOC含量为3.25%~7.92%, 生烃潜量为3.06~38.13 mg/g, 氯仿沥青“A”含量为0.18%~0.69%, 为最好烃源岩, 且均处于高成熟演化阶段。(2) 长9—长7段暗色泥岩样品形成于典型的淡水湖泊环境, 长9沉积期为氧化—亚氧化沉积环境, 长8沉积期为弱还原沉积环境, 长7沉积期为强还原沉积环境, 长9—长7段烃源岩母质来源为低等水生生物和陆源高等植物混源。(3) 研究区长8₁与长8₂原油为同一类原油, 长9—长7段烃源岩对长8致密油均有贡献, 其中以长7烃源岩为主。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 烃源岩评价; 生物标志化合物; 油源对比

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

Geochemical characteristics of source rocks in the Chang 9–Chang 7 members and their correlation with the tight oil sources of Chang 8 member in the Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin

JIANG Yang, GONG Hujun, PU Renhai

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In order to evaluate the quality of the source rocks in the Chang 9–Chang 7 members in the Ganquan-Fuxian area of the Ordos Basin and explore the hydrocarbon sources of the Chang 8 tight oil. The technical methods of TOC, chloroform asphalt "A", rock pyrolysis parameters, specular mass reflectance, organic matter microfraction, biomarker compounds, and monomeric carbon isotopes were used to study the hydrocarbon generation potential, parent material source, and sedimentary environment of the Chang 9–Chang 7 source rocks in this area. Geochemical analysis and oil-source correlation were performed on the Chang 8 crude oil samples. The results show that: (1) Three sets of dark mudstone mainly developed in the study area, specifically the Chang 9, Chang 8, and Chang 7. The organic matter types of the dark mudstone in the Chang 9–Chang 7 are Type II₁-II₂; the TOC content ranges from 3.25% to 7.92%, the hydrocarbon generation potential from 3.06 to 38.13 mg/g, and the chloroform asphalt "A" content from

收稿日期: 2023-01-29; 改回日期: 2023-04-21; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 万友利

作者简介: 蒋杨(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事有机化学和油气勘探的研究。E-mail: 453426376@qq.com

资助项目: 国家科技重大专项(2016ZX05050001)

0.18% to 0.69%, identifying them as the best source rocks, all in a high mature evolution stage. (2) The Chang 9–Chang 7 dark mudstone samples formed in a typical freshwater lake environment: the Chang 9 deposits under oxidation-suboxic conditions, the Chang 8 deposits under weak reduction conditions, and the Chang 7 deposits under strong reduction conditions, indicating that the organic matter of the Chang 9–Chang 7 source rocks is derived from a mixed source of lower aquatic organisms and terrestrial higher plants. (3) The Chang 8₁ and Chang 8₂ crude oils in the study area belong to the same type. The source rocks of the Chang 9–Chang 7 contribute significantly to the production of the Chang 8 tight oil, with the Chang 7 source rocks being the primary contributors.

Key words: Ordos Basin; source rock evaluation; biomarker compounds; oil-source correlation

0 引言

21世纪以来,非常规油气作为国家能源资源安全保障的重要部分,其勘探开发在世界范围取得了巨大突破,非常规油气对加大国家能源储量、缓解油气争端具有十分重要的战略意义(James et al., 1996; Andrews et al., 2013; Mauter et al., 2014; Estrada et al., 2016; Stueck et al., 2016)。截至2020年底,世界非常规石油产量已达 5.4×10^8 t,而致密油是非常规油气资源的重要组成部分,其占非常规油气储量的58%(王永诗等, 2021; 王作乾等, 2022; 黄程等, 2022)。2021年,我国非常规油气占全国累计探明油气储量的41%,非常规油气产量占油气总产量的20%,我国油气资源已进入常规和非常规并重的开发阶段(李哲等, 2022; 杨智等, 2022; 李国欣等, 2022)。正确认识致密油的成藏机理是指导致密油藏勘探的关键,油源对比对指示成藏机理具有至关重要的作用(王禹诺, 2018; 袁媛等, 2018)。

鄂尔多斯盆地延长组作为中国致密油的主要生产基地,其致密油预测资源总量为 30×10^8 t,长6、长7、长8油层组为主要的致密油勘探层位(李锦锋等, 2019; 黄彦杰等, 2020; 陈义国, 2021)。不同于仅发育延长组长7段张家滩页岩的区域,研究区内长9段李家畔页岩的存在使得该区长8油层组的油源问题长期存在争议(Pan et al., 2016; Liu J et al., 2019)。对于鄂尔多斯盆地长8的油源问题,前人做了许多研究工作,现今主要存在三种观点:①长7烃源岩主力供烃,长8、长9烃源岩为辅(骆垠山等, 2016; 杨亚南等, 2017; 崔景伟等, 2021; 朱必清等, 2022);②长8烃源岩为主,长9烃源岩为辅(张海林等, 2016);③长9烃源岩供烃为主(蔡劲等, 2014)。针对此问题,本文通过总有机碳含量测试、岩石热解分析、氯仿沥青“A”测定、干酪根显微组分鉴定、干酪根镜质组反射率测定、饱和烃气相色谱分析、单体碳同位素测定、生物标志物色

谱-质谱分析测试等方法,以甘泉—富县地区为研究对象,探讨长9—长7烃源岩地化特征和长8油源问题,以便为该区下一步致密油气勘探,特别是延长组深层石油勘探奠定地质基础。

1 区域地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部(图1a)。鄂尔多斯盆地是一个沉积稳定、构造简单的克拉通盆地,受印支运动的影响,研究区晚三叠世时期经历了一个完整的内陆湖盆沉积旋回,即“早期萌芽期—高峰期—湖盆消亡期”的演化过程,形成了厚度为1000~1500 m的延长组沉积,自下而上可划分为10个油层组(黄益旺等, 2019; 时保宏, 2021; 朱必清等, 2022)(图1c)。长9—长7段沉积时期是一个湖盆扩张的过程,展现出温暖潮湿的气候特征,主要发育深湖—半深湖相沉积(图1b)。长9—长8油层组主要为一套以湖相沉积为主的灰黑色、深灰色的中砂岩和粉砂岩,夹杂黑色泥岩与粉砂质泥岩,其中长9顶部发育李家畔页岩。长7油层组岩性主要为深灰色、灰黑色细砂岩与黑色泥、页岩的互层,泥质含量极高,其底部与中部有反映火山活动的凝灰岩沉积,底部发育张家滩页岩(陈义国, 2021)(图1c)。研究区三叠系延长组沉积期构造强度较弱,褶皱变形不发育,地层整合,且发育齐全,断裂活动不发育,为致密油的形成和保存创造了优越的地质条件,有利于大面积含油(张海林等, 2016)。到早白垩世,受燕山运动的影响,盆地发生了构造热事件。

2 样品采集与实验方法

2.1 实验样品

烃源岩样品主要来自3口钻井取心,分别取长9暗色泥岩样5块、长8暗色泥岩样品8块、长7的暗色泥岩样品6块进行总有机碳含量测试、岩石热解分析、氯仿沥青“A”测定、干酪根显微组

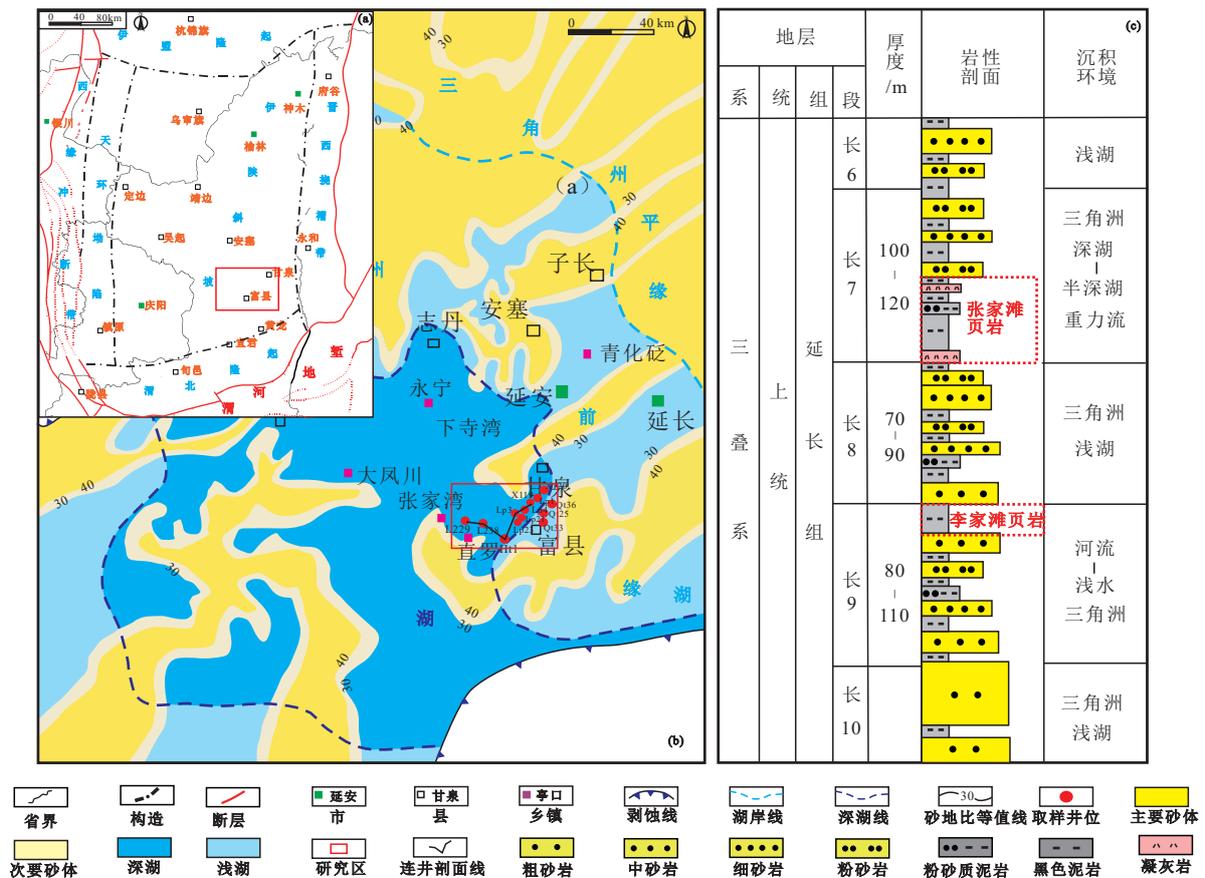


图1 研究区区域位置图(a)、长7沉积相平面展布图(b)及研究区岩性柱状图(c)

Fig. 1 Location map of the study area (a), plane distribution map of the sedimentary facies of Chang 7 (b), and stratigraphic histogram of the study area (c)

分鉴定、干酪根镜质组反射率测定、饱和烃气相色谱分析、饱和烃单体碳同位素测定、生物标志物色谱-质谱分析测试等实验。原油样品为来自5口井的长8原油,对长8原油样品进行饱和烃单体碳同位素测定与生物标志物色谱-质谱分析测试,取样位置见图1b,样品深度见表1及表2。实验样品制备由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,实验测试由阿伯塔资环测试分析技术有限公司完成。

2.2 实验方法

总有机碳(TOC)分析测试所用仪器为LECO CS-200 碳硫分析仪,按照国标《沉积岩中总有机碳的测定》(GB/T 19145—2003)对岩石样品进行有机碳分析,检测条件:载气为0.27 MPa、纯度为99.5%的氧气,燃烧气体流速为2 L/min,分析气体流速为0.5 L/min,测试精度为0.5%;岩石热解分析所用仪器为OGE-分型油气评价工作站,按照国标《岩石热解分析》(GB/T 18602—2012)对岩石样品进行热解分析,检测条件为:高纯度氦气压力为

0.20~0.30 MPa,空气压力为0.30~0.40 MPa,氢气压力为0.20~0.30 MPa。干酪根显微组分鉴定采用AX10生物显微镜测定,按国家标准SY/T 5125—2014执行,样品采用湿的干酪根,用滴管吸取适量的丙三醇至干酪根样品中,搅拌混合均匀,用玻璃棒蘸取适量样品与载玻片上,涂抹均匀,盖上盖玻片,待完全晾干后于镜下观察。 R_o 是在样品碎样、油浸条件下采用Leica DM4500P偏光显微镜进行反射光测试,按照国家标准GB/T 6948—2008执行, R_o 值取50~100个测点的反射率的平均值,且在2小时后进行一次标样测定(惠沙沙等,2023)。

GC-MS分析具体步骤如下:将粉碎至100目的泥岩样品用索氏抽提法抽提72小时,并将可溶组分经正己烷沉淀沥青后,用层析柱(硅胶和氧化铝比例为3:2)进行分离,再用正己烷做重洗剂洗脱得到饱和烃部分。油样用正己烷沉淀沥青质后,再进行柱色层分离。分析流程按照国家标准GB/T 18606—2017进行,采用仪器为GCMS-QP 2010 SE

气质联用仪,该仪器色谱柱为HP-5MS弹性石英毛细管柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm);载气为99.99%的氦气,样品入口温度保持在280℃,进样速度为1 mL/min,传输线温度为300℃;采用EI(70 eV)电子轰击法,灯丝电流100 mA,离子源温度250℃。化合物定量评价是依据质谱—色谱图中特征性离子峰进行相关的计算完成(崔德艺,2023)。

饱和烃单体碳同位素使用仪器为Elementar

isoprime 100 稳定同位素质谱仪,按照国家标准GB/T 18340.2—2010对原油组分和干酪根样品进行同位素测试。

3 实验结果

3.1 有机质类型

通过对长9—长7段暗色泥岩样品的镜下观察,均检测到腐泥组、镜质组、壳质组、惰性组4类

表1 甘泉—富县地区长9—长7段暗色泥岩干酪根有机显微组分

Table 1 Kerogen organic macerals of the dark mudstone samples from Chang 9—Chang 7 in the Ganquan-Fuxian area

样品编号	层位	深度/m	腐泥组/%	壳质组/%	镜质组/%	惰性组/%	类型指数	类型
Ht1-1	长7	1 392.25±0.35	80	0	14	6	63.5	II ₁
Ht1-2	长7	1 396.25±0.2	82	0	14	4	67.5	II ₁
L229-1	长7	1 636.65	60	1	26	13	28	II ₂
L238-1	长8	1 634.96~1 635.25	84	0	10	6	70.5	II ₁
L238-2	长8	1 638.04~1 638.24	85	0	11	4	72.75	II ₁
Ht1-4	长8	1 529.19±0.25	85	0	9	6	72.25	II ₁
Ht1-5	长8	1 537.11±0.23	86	0	11	3	74.75	II ₁
Ht1-6	长9	1 549.95±0.25	84	0	12	4	71	II ₁
Ht1-7	长9	1 551.5±0.18	83	0	6	11	67.5	II ₁

表2 甘泉—富县地区长9—长7暗色泥岩有机地球化学测试数据

Table 2 Organic geochemistry data of the dark mudstone samples from Chang 9—Chang 7 in the Ganquan-Fuxian area

样品编号	层位	深度/m	TOC/%	氯仿沥青 “A”/%	生烃转化率/%	T _{max} /℃	S ₁ +S ₂ /(mg/g)	I _H /(mg/g)	R _o /%
Ht1-1	长7	1 392.25±0.35	5.33	0.18	3.29	467	11.13	100	1.33
Ht1-2	长7	1 396.25±0.2	4.36	0.19	4.47	462	12.55	117.73	1.4
Ht1-3	长7	1 398.08±0.2	4.92	/	/	/	/	/	1.38
Qt33	长7	1 499.43	5.62	0.69	/	440	9.63	115.21	1.21
L229-1	长7	1 636.65	4.7	0.67	14.31	456	9.2	122.22	1.36
L229-2	长7	1 636.05	4.67	/	/	/	/	0	1.35
Ht1-4	长8	1 529.19±0.25	3.61	0.57	15.75	460	5.64	164.88	1.42
Ht1-5	长8	1 537.11±0.23	3.71	0.53	14.42	463	5.7	117.25	1.48
L238-1	长8	1 634.96~1 635.25	4.03	0.5	12.29	462	5.63	108.68	1.47
L238-2	长8	1 638.04~1 638.24	4.23	/	/	/	/	/	1.62
X119	长8	1 639.5	3.25	0.45	/	462	3.06	132.25	1.26
L238-3	长8	1 640.99~1 641.13	3.62	/	/	/	/	/	1.46
L238-4	长8	1 667.78~1 667.97	3.51	/	/	/	/	/	1.46
L238-5	长8	1 671.02~1 671.81	3.51	0.58	16.64	461	5.62	263.07	/
X120	长9	1 501.6	7.26	0.53	/	459	22.61	123.12	1.22
Qt36	长9	1 625	5.32	0.55	/	461	38.13	135.31	1.2
Qt25	长9	1 407.3	7.56	0.51	/	453	26.98	126.59	1.15
Ht1-6	长9	1 549.95±0.25	7.52	0.44	5.81	466	8.78	188.93	1.3
Ht1-7	长9	1 551.5±0.18	7.92	0.42	5.3	467	8.61	92.55	1.32

注:“/”表示未进行实验。

常见的有机显微组分(表1)。长9段样品腐泥组百分比为83%~84%,镜质组为6%~12%,惰性组为4%~11%;长8段样品腐泥组百分比为84%~86%,镜质组为9%~11%,惰性组为3%~6%;长7段样品腐泥组所占百分比为60%~82%,镜质组为14%~26%,惰性组为6%~13%。

3.2 有机质丰度

长9暗色泥岩 TOC 含量为 5.32%~7.92%, 平均为 7.12%; 氯仿沥青“A”含量为 0.42%~0.55%, 平均为 0.49%; 生烃转化率为 5.30%~5.81%, 平均为 5.56%; 生烃潜力(S_1+S_2)为 8.61~21.02 mg/g, 平均为 21.02 mg/g(表2)。长8暗色泥岩 TOC 含量为 3.25%~4.23%, 平均为 3.77%; 氯仿沥青“A”的含量为 0.45%~0.57%, 平均为 0.51%; 生烃转化率为 12.29%~16.64%, 平均为 14.78%; 生烃潜力(S_1+S_2)为 3.06~5.70 mg/g, 平均为 5.01 mg/g。长7暗色泥岩 TOC 含量为 4.36%~5.62%, 平均为 4.93%; 氯仿沥青“A”含量为 0.18%~0.69%, 平均为 0.43%; 生烃转化率为 TOC 与氯仿沥青“A”的比值, 反映了生烃母质向烃类的转化程度, 其值为 3.29%~14.31%, 平均为 7.36%; 生烃潜力(S_1+S_2)

为 9.20~12.55 mg/g, 平均为 10.62 mg/g。

3.3 生物标志化合物

长9—长7段正构烷烃色谱图碳数范围基本分布在 $nC_{10} \sim nC_{35}$ 之间, 主峰碳分布在为 $nC_{17} \sim nC_{20}$ 之间(表3), 且多为前峰型(图2)。长9段 C_{21-}/C_{22+} 值为 3.74; 长8段的分布范围为 1.08~1.68, 平均值为 1.37; 长7段 C_{21-}/C_{22+} 的分布范围为 1.26~1.29, 平均为 1.28; 长9—长7段烃源岩样品 CPI 和 OEP 值均接近 1, 奇偶优势不明显, 这可能与长9—长7段烃源岩较高的成熟度相关。长9段 Pr/Ph 值为 1.33; 长8段 Pr/Ph 值范围为 0.59~1.33; 长7段 Pr/Ph 值分布范围为 0.73~0.79。

长9—长7段烃源岩三环萜烷 C_{20}/C_{23} 分布范围为 0.65~2.52, C_{24} 四环萜烷与 C_{26} 三环萜烷的比值为 0.41~1.26; 长9—长7段烃源岩 C_{27} 甾烷、 C_{28} 甾烷和 C_{29} 甾烷相对丰度分布范围分别为 26.26%~47.72%、17.17%~41.46% 及 28.27%~48.68%(表4)。

4 讨论

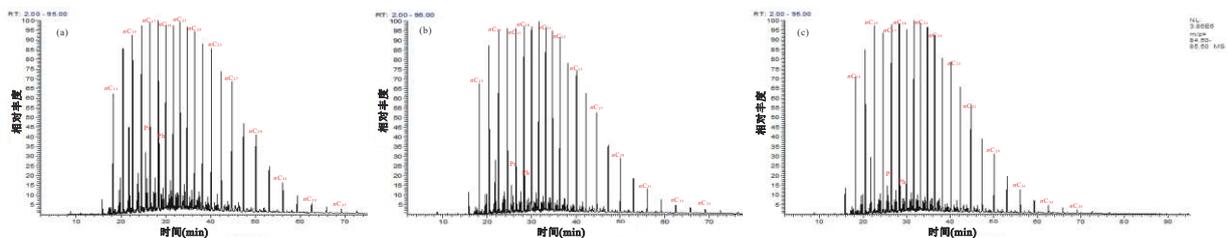
4.1 烃源岩评价

前已述及, 长9和长8烃源岩有机质类型为

表3 甘泉—富县地区延长组烃源岩正构烷烃与异戊间二烯类烷烃分布特征

Table 3 Distribution characteristics of *n*-alkanes and isoprene of source rocks in the Yanchang Formation of the Ganquan-Fuxian area

样品编号	层位	样品类型	主碳峰	碳数范围	OEP	CPI	$C_{21}+C_{22}/C_{28}+C_{29}$	C_{21-}/C_{22+}	Pr/Ph	Pr/ nC_{17}	Ph/ nC_{18}
Ht1-1	长7	泥岩	nC_{19}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	1.01	1.07	1.17	1.29	0.79	0.25	0.24
L229-1	长7	泥岩	nC_{20}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	0.98	1.05	1.21	1.26	0.73	0.15	0.33
L238-1	长8	泥岩	nC_{20}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	0.98	1.09	2.66	1.08	0.85	0.14	0.13
L238-2	长8	泥岩	nC_{20}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	0.93	1.05	2.82	1.11	0.59	0.11	0.17
Ht1-4	长8	泥岩	nC_{18}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	1.00	1.14	3.14	1.62	0.74	0.16	0.20
Ht1-5	长8	泥岩	nC_{17}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	1.00	1.12	3.44	1.68	1.33	0.12	0.11
Ht1-9	长9	泥岩	nC_{18}	$nC_{10} \sim nC_{35}$	1.01	1.09	5.16	3.74	1.33	0.11	0.10



(a) 长9段泥岩; (b) 长8段泥岩; (c) 长7段泥岩

图2 甘泉—富县地区延长组烃源岩饱和烃色谱图

Fig. 2 Saturated hydrocarbon chromatograms of source rocks in the Yanchang Formation of the Ganquan-Fuxian area

表4 甘泉—富县地区延长组烃源岩与原油甾、萜烷参数

Table 4 Source rocks and steroidal and terpene parameters of crude oil in the Yanchang Formation, Ganquan-Fuxian area

样品编号	层位	样品类型	A	B	C	D	E	F	G	H	I	规则甾烷相对含量		
												C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉
Lp3	长8	原油	0.06	0.87	0.57	0.57	0.51	0.16	0.45	0.58	0.23	44.72	24.99	30.29
Lp1	长8	原油	0.03	0.65	0.77	0.73	0.55	0.15	0.50	0.56	0.24	43.93	25.30	30.77
Lp4	长8	原油	0.30	0.79	0.80	0.70	0.60	0.22	0.39	0.54	0.34	44.04	24.64	31.32
Lp21	长8	原油	0.17	0.76	0.61	0.16	0.53	0.20	0.43	0.54	0.19	39.78	27.00	33.22
Lp23	长8	原油	0.05	0.78	0.69	0.68	0.45	0.21	0.41	0.57	0.26	42.90	21.70	30.00
L229-1	长7	泥岩	0.18	0.80	1.05	0.36	0.51	0.22	0.65	0.50	0.68	47.72	21.25	31.01
Ht1-1	长7	泥岩	0.10	1.71	0.84	0.57	0.52	0.22	0.29	0.49	0.47	44.53	24.32	31.15
Ht1-2	长7	泥岩	0.12	/	1.19	0.96	0.61	0.02	0.55	0.62	0.70	44.56	25.83	29.61
Qt33	长7	泥岩	0.15	0.80	0.69	0.66	0.50	0.03	0.52	0.54	0.56	38.99	27.90	33.11
L238-1	长8	泥岩	0.03	/	0.65	0.27	0.50	0.08	0.26	0.42	0.48	26.76	41.46	31.78
L238-2	长8	泥岩	0.33	1.17	0.92	0.24	0.49	0.22	0.31	0.50	0.39	32.87	18.46	48.68
Ht1-4	长8	泥岩	0.09	2.52	0.59	0.27	0.55	0.06	0.57	0.65	0.34	34.35	22.41	43.24
Ht1-5	长8	泥岩	0.24	2.28	0.41	0.20	0.53	0.04	0.37	0.62	0.36	35.59	27.25	37.16
X119	长8	泥岩	0.13	0.84	0.44	0.36	0.50	0.10	0.54	0.40	0.23	34.30	32.30	33.38
Ht1-6	长9	泥岩	0.51	/	0.45	0.14	0.64	0.08	0.48	0.57	0.38	46.43	24.70	28.27
Ht1-7	长9	泥岩	0.64	0.93	1.26	0.43	0.51	0.26	0.34	0.47	0.30	40.82	17.17	42.01
X120	长9	泥岩	0.24	0.92	0.52	0.17	0.51	0.04	0.47	0.51	0.36	36.51	33.26	30.23
Qt36	长9	泥岩	0.23	0.91	0.51	0.16	0.53	0.03	0.45	0.53	0.31	36.00	34.00	30.23
Qt25	长9	泥岩	0.21	0.91	0.50	0.18	0.52	0.04	0.52	0.42	0.33	38.00	34.00	31.00

注: A. Tm/Ts; B. C₂₀三环萜烷/C₂₃三环萜烷; C. C₂₄四环萜烷/C₂₆三环萜烷; D. 伽马蜡烷指数; E. C₃₁藿烷22S/(22S+22R); F. 孕甾烷/规则甾烷; G. $\alpha\alpha\alpha$ C₂₉20S/(20S+20R); H. C₂₉ $\beta\beta$ /($\beta\beta$ + $\alpha\alpha$); I. 重排甾烷/规则甾烷; “/”表示未检测出。

II₁型,长7烃源岩有机质类型为II₁~II₂型(表1)。制作T_{max}与I_H(hydrogen index)(图3a)关系图,研究区长9、长8烃源岩有机质类型为II₁~II₂型,长7烃源岩有机质类型为II₂型,虽然在T_{max}-I_H图版上体现出的有机质类型结果与干酪根显微鉴定结果略有差异,但总体说明长9—长7烃源岩是低等水生生物及部分高等植物的混合源。

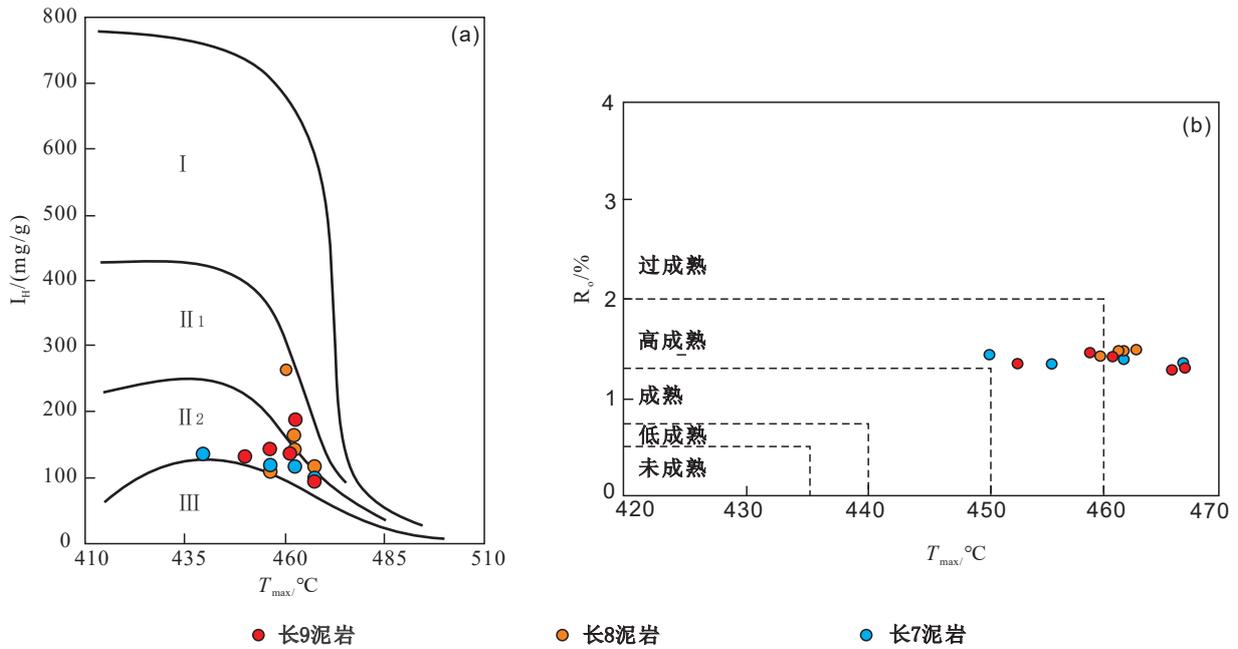
分别制作TOC与氯仿沥青“A”(图4a)、TOC与S₁+S₂(图4b)关系图,长9—长7烃源岩样品均落在最好烃源岩分区。发生于研究区的火山—热液活动及贯穿长9—长7油层组的缺氧事件为烃源岩提供了大量有机质及营养元素(Li et al., 2020; 张文正等, 2007; 赵俊兴等, 2008; 张文正等, 2009; 熊林芳等, 2015; 薛楠等, 2022)。火山活动形成的大量凝灰岩加剧了生物死亡并致使有机碳大量堆积从而利于烃源岩的形成,因此凝灰岩与烃源岩在展布形态上常常具备一定的相关性。火山喷发气体与火山灰中的营养物质融入湖盆水体,从而提高营养供给速度促进了底栖生物的勃发及藻华

现象(Li et al., 2020; 张文正等, 2009)。火山灰覆盖湖泊表面,再加上大量的氧气被藻类的呼吸作用及遗体分解消耗,使得水体分层,底部形成缺氧还原环境,为有机质完整保存的关键因素(聂志阳, 2014; 薛楠等, 2022)。烃源岩高成熟度也与火山活动时较高的温度有关。而伴随着火山的热液活动不仅为湖水提供利于生物生长的热能、大量的营养元素和深源物质,如N、Cu、Fe、Mo和V等金属元素及CO₂、CH₄、H₂、NH₃等热液气体,而且还促进了地表水与地下水之间的对流和循环,使下层水中的养分通过对流交换到上层水,从而使大量的自养、异养微生物及宏体生物繁盛,实现古生产力的提高(张文正等, 2010; 焦鑫等, 2021)。

制作T_{max}与R_o关系图(图3b),长9—长7暗色泥岩处于高成熟—过成熟演化阶段。甾烷异构化参数 $\alpha\alpha\alpha$ C₂₉20S/(20S+20R)和C₂₉ $\beta\beta$ /($\beta\beta$ + $\alpha\alpha$)是衡量成熟度的重要指标,当两者分别达到终点平衡值0.52~0.55和0.67~0.71时,说明已到生油窗的中后期阶段(朱必清等, 2022; 王晓琳等, 2022)。

长7、长8、长9暗色泥岩 $\alpha\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 和 $C_{29} \beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值平均为 0.50 与 0.54, 0.41 与 0.52, 0.45 与 0.50(表 4), 表明长9—长7暗色泥岩为成熟—高成熟烃源岩。Tm/Ts 值与有机质成熟度有关, 通常认为其随成熟度增加而降低(赵靖舟

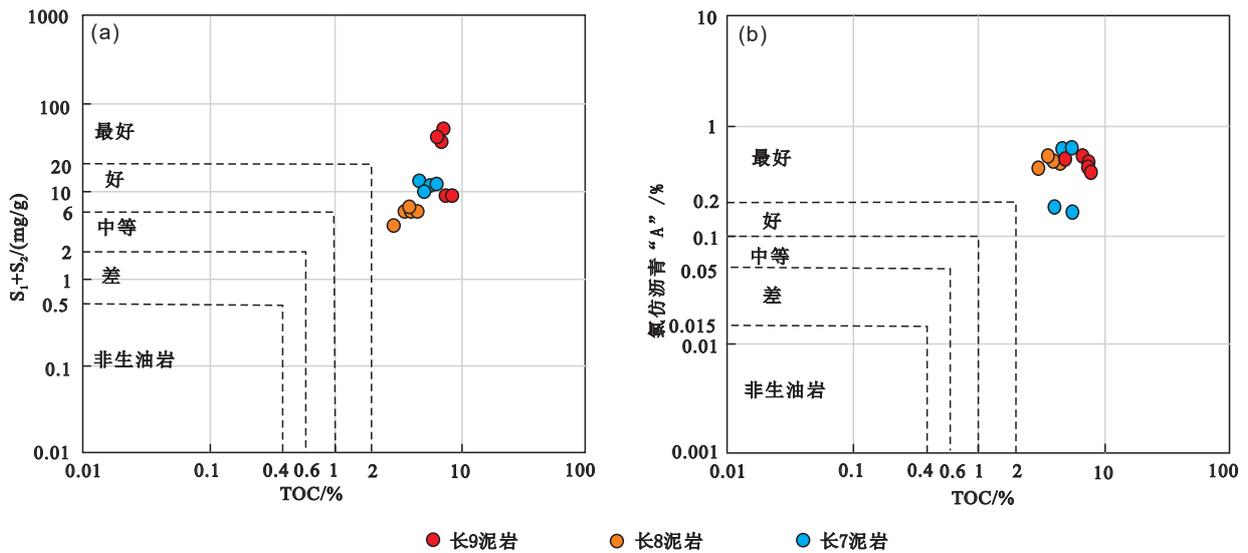
等, 2020)。研究区长9—长7泥岩 Tm/Ts 值为 0.03~0.64, 平均值为 0.23, 表明烃源岩已达到成熟阶段(表 4)。总体而言, 研究区长9—长7烃源岩有机质类型为 II₁~II₂ 型, 属于高成熟—过成熟的最好烃源岩。



(a) T_{max} 与 I_H 关系图; (b) T_{max} 与 R_o 关系图

图 3 延长组暗色泥岩 T_{max} 与 I_H 和 T_{max} 与 R_o 的关系图

Fig. 3 The relationship between T_{max} and I_H , T_{max} and R_o of dark mudstone in the Yanchang Formation



(a) TOC 与 S_1+S_2 关系图; (b) TOC 与氯仿沥青“ A ”关系图

图 4 延长组暗色泥岩 TOC 与 S_1+S_2 和 TOC 与氯仿沥青“ A ”关系图

Fig. 4 The relationship of TOC content with S_1+S_2 and chloroform asphalt "A" of dark mudstone in the Yanchang Formation

4.2 烃源岩生物环境

4.2.1 沉积环境特征

通常,高的 Pr/Ph 值(>3)指示氧化环境下陆源有机质的输入; Pr/Ph 值位于 1~3 之间指示氧化和亚氧化环境; Pr/Ph 值(<1)指示还原环境(杨亚南等, 2017; 董君妍, 2018)。长 9 烃源岩 Pr/Ph 值为 1.33, 指示亚氧化—氧化环境, 长 8 烃源岩 Pr/Ph 值平均为 0.88, 表明长 8 沉积于还原环境, 长 7 烃源岩 Pr/Ph 值平均值为 0.76, 指示强还原环境(表 3)。

Pr/nC₁₇ 值和 Ph/nC₁₈ 值受控于烃源岩类型、沉积环境和有机质的热演化程度, 一般成熟度越低, Pr/nC₁₇ 值和 Ph/nC₁₈ 值越高(杨亚南等, 2017)。在 Ph/nC₁₈-Pr/nC₁₇ 交会图中, 长 9—长 7 烃源岩均为混合相, 表明其母质类型为水生生物与陆源植物混合(图 5)。长 9—长 7 烃源岩样品 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 值具有向左下角低值趋近的变化趋势, 说明烃源岩成熟度随沉积深度加深而增加。

伽马蜡烷的富集与高盐度海相和盐湖相环境有关, 伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷)与古水体盐度成正比(韩载华等, 2020; 胡朝伟等, 2020)。研究区长 9—长 7 烃源岩伽马蜡烷含量较低, 分布范围为 0.13~1.04, 平均为 0.39, 说明水体盐度正常, 其生油母质形成于淡水湖泊沉积环境(表 4)。

孕甾烷(C₂₁)与升孕甾烷(C₂₂)常用来反映沉积水体含盐量的高低(黄彦杰等, 2020)。研究区长 9—长 7 烃源岩孕甾烷/规则甾烷比值分布在 0.02~0.26, 说明沉积水体含盐量低, 为淡水沉积环境。

4.2.2 生源输入特征

nC₂₃~nC₂₅ 与高等植物的输入有关, 而来源于低等水生生物的有机质一般具有 nC₁₅~nC₂₁ 优势。

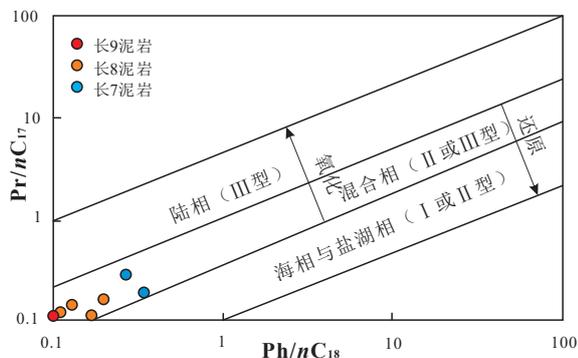


图 5 Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ 关系图 (据杨亚南等, 2017 修改)

Fig. 5 Cross plot of Pr/nC₁₇ vs. Ph/nC₁₈ (according to Yang et al., 2017)

因此, 通过 C₂₁-/C₂₂₊ 比值与 C₂₁+C₂₂/C₂₈+C₂₉ 比值可判断烃源岩有机质母质来源。长 9 烃源岩 C₂₁-/C₂₂₊ 比值为 3.74; 长 8 烃源岩的该比值分布范围为 1.08~1.68, 平均值为 1.37; 长 7 烃源岩 C₂₁-/C₂₂₊ 的分布范围为 1.17~1.21, 平均值为 1.28。长 9 烃源岩 C₂₁+C₂₂/C₂₈+C₂₉ 比值为 5.16; 长 8 为 2.66~3.44; 长 7 烃源岩 C₂₁+C₂₂/C₂₈+C₂₉ 比值分布范围为 1.17~1.21(表 3)。其分布具有明显的轻碳优势, 且随着沉积深度的加深, C₂₁-/C₂₂₊ 比值与 C₂₁+C₂₂/C₂₈+C₂₉ 比值也不断增大, 表明长 9—长 7 段烃源岩母质来源以水生微生物为主, 随着沉积深度的增大, 陆源植物输入比例增加。

一般情况下, C₂₇ 甾烷在低等水生生物和藻类中占优势, 而 C₂₉ 甾烷在高等植物中占优势, 因此 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 规则甾烷也可判断生源输入(黄彦杰等, 2020)。长 9—长 7 段烃源岩 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷分布均呈“L”型, 表明研究区烃源岩母质输入以浮游藻类为主, 含少量高等植物。长 9—长 8 沉积期普遍发育的深水重力流沉积与较浅的水深可能与高等植物来源有关(图 6)(杨亚南等, 2017)。

C₂₃ 三环萜烷含量较高代表母质来源为藻类, C₁₉~C₂₁ 三环萜烷含量与陆生植物贡献有关(Hao et al., 2009; 赵靖舟等, 2020)。C₂₄ 四环萜烷可指示陆源有机质的贡献(包建平等, 2018; 朱必清等, 2022)。研究区长 9—长 7 段烃源岩三环萜烷 C₂₀/C₂₃ 比值分布范围为 0.65~2.52, 指示其母质来源为混合源; C₂₄ 四环萜烷与 C₂₆ 三环萜烷的比值为 0.41~1.26, 表明沉积环境为湖相沉积, 有机质类型为混合型(表 4)。

4.3 油源对比

4.3.1 单体碳同位素对比

原油或烃源岩的单体同位素相较生物标志化合物不容易受到温度、压力和生物降解的影响, 油源对比的结果更为准确(唐友军等, 2022)。因此单体同位素常用来对古沉积环境、母源及油源进行对比。同一烃源岩在不同温度下进行热解过程, 其生成的正构烷烃单体的碳同位素组成曲线表现出了明显的相似性, 而不同来源的烃类在单体碳同位素组成方面则呈现明显的差异。这表明, 在石油来源的对比中, 正构烷烃单体的碳同位素值曲线形状和数值都是非常重要的对比依据(廖玉宏等, 2007; 张瑞等, 2016)。

长 8₁ 原油 δ¹³C 分布在 -34.77‰~-32.33‰

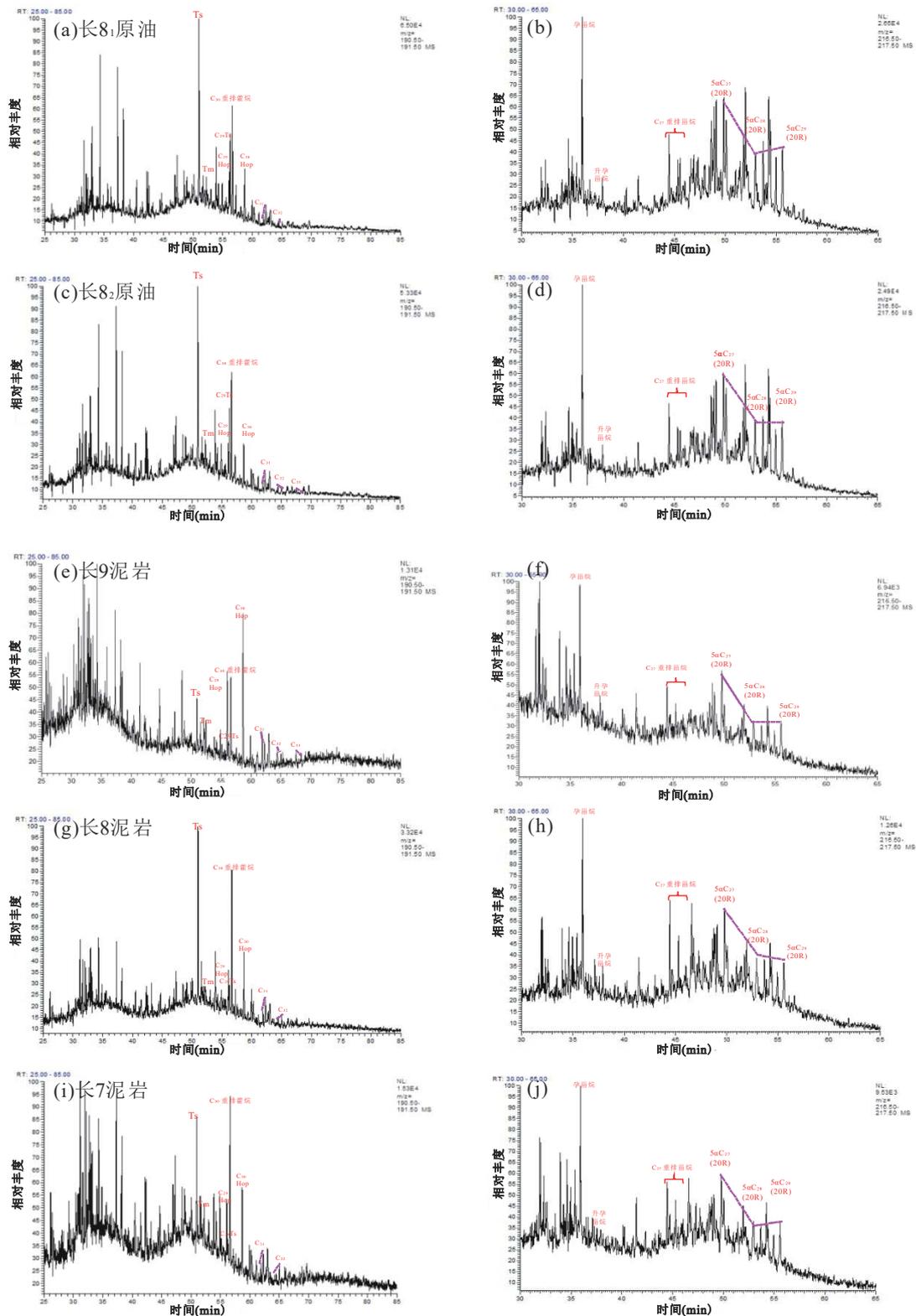


图6 甘泉—富县地区延长组烃源岩、原油萜烷、甾烷质量色谱图

Fig. 6 Quality chromatograms of source rocks, terpenes, and steranes of the Yanchang Formation in the Ganquan-Fuxian area

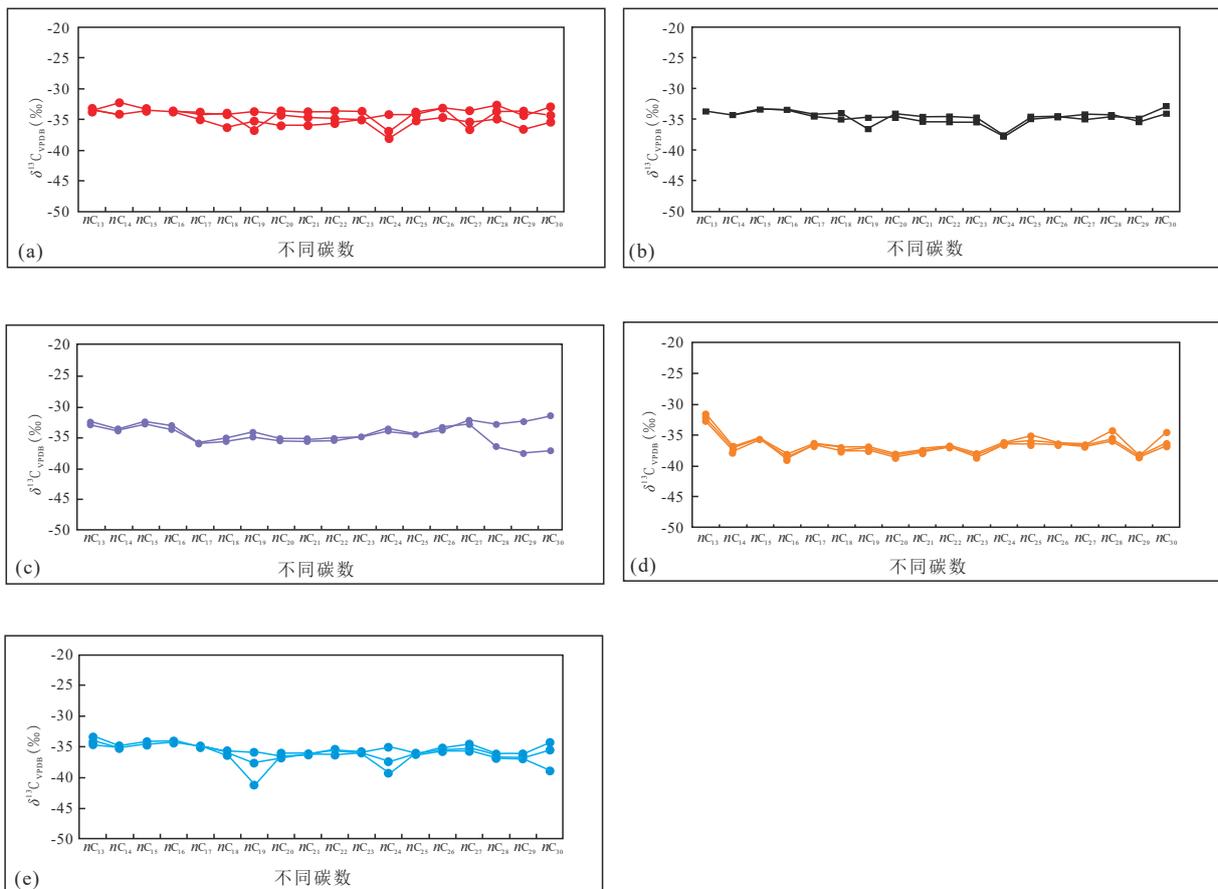
之间,长₈₂原油 $\delta^{13}\text{C}$ 分布介于 $-35.77\text{‰}\sim-32.26\text{‰}$ 之间,长₈₁原油与长₈₂原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布相近。长7暗色泥岩 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-41.25\text{‰}\sim-33.43\text{‰}$ 之间,平均值为 -35.81‰ ;长8暗色泥岩 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-39.02\text{‰}\sim-31.56\text{‰}$ 之间,平均值为 -36.76‰ ;长9暗色泥岩 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-37.63\text{‰}\sim-31.57\text{‰}$ 之间,平均值为 -34.38‰ (图7)。

长₈₁原油与长₈₂原油 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线趋势基本相同,且与长9烃源岩重合度较好。其次,长₈₁原油与长₈₂原油均以明显的 $n\text{C}_{19}$ 与 $n\text{C}_{24}$ 负异常为特征,这与长7烃源岩的特征相似; $n\text{C}_{29}$ 显示略微负异常,可能与长8烃源岩的影响有关。在 $\delta^{13}\text{C}$ 数值方面,长8原油单体 $\delta^{13}\text{C}$ 与长9烃源岩更为接近;在曲线形状方面,长8原油与长7烃源岩曲线更为相似。结合正构烷烃单体的碳同位素值曲线形状和数值两个依据,长7和长9烃源岩为长8原油的主要供烃来源,长8烃源岩为次要供烃来源。

4.3.2 萜烷、甾烷生物标志化合物特征对比

研究区长8原油与长9—长7烃源岩的饱和烃色谱-质谱图特征较为一致, C_{30} 藿烷峰值较高, C_{30} 重排藿烷含量异常高, T_s 值远大于 T_m ,孕甾烷、升孕甾烷相对较高,三环萜烷含量高,原油与烃源岩伽马蜡烷含量基本相似,表明长9—长7烃源岩对长8油藏均有贡献。就甾烷生标特征而言,长8段原油与本地区长9—长7烃源岩的规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha\text{RC}_{27}\text{-C}_{28}\text{-C}_{29}$ 均呈以 C_{27} 甾烷明显优势为特征的“L”形,表明其母质来源为低等水生生物为主的混合源(图6)。

通过探区内长9—长7烃源岩以及长8原油的 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 $\text{C}_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 关系图可得:甘泉—富县地区长8段原油成熟度均大于0.4,表明长8段原油为成熟原油。另外,长9—长7烃源岩成熟度区域分布广泛,围绕原油样品点分布,且长7、长9烃源岩距离原油样品较近,长8烃



(a) 长₈₁原油饱和烃单体碳同位素分布; (b) 长₈₂原油饱和烃单体碳同位素分布; (c) 长9泥岩饱和烃单体碳同位素分布; (d) 长8泥岩饱和烃单体碳同位素分布; (e) 长7泥岩饱和烃单体碳同位素分布

图7 甘泉—富县地区原油与烃源岩正构烷烃单体碳同位素分布特征

Fig. 7 Monomeric carbon isotope distributions of *n*-alkanes in crude oil and source rocks in the Ganquan-Fuxian area

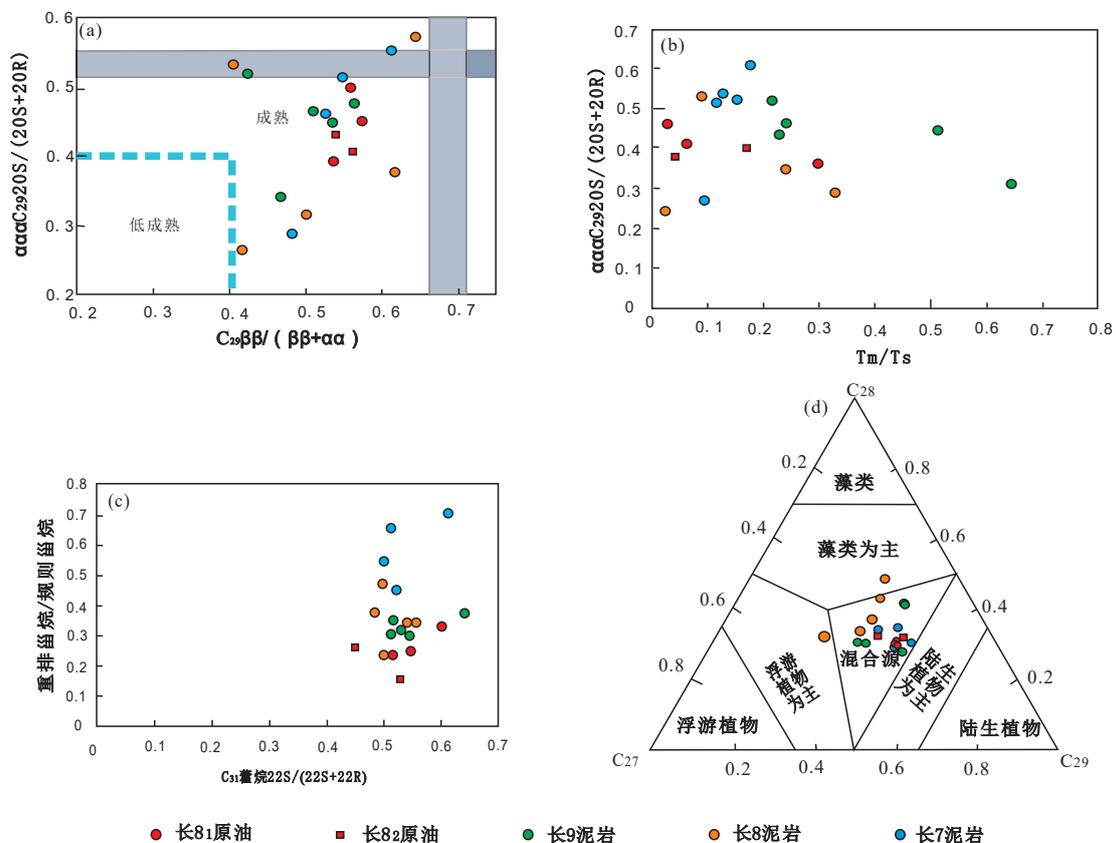
源岩距样品较远,表明研究区延长组长9—长7烃源岩均对长8原油有贡献,但长8烃源岩贡献较少(图8a)。

研究区长8₁、长8₂段原油重排甾烷/规则甾烷值分布在0.42~0.65,表明已达到成熟阶段,其投点相对集中,成熟度较为接近,表明长8₁、长8₂原油为同种类型(图8b, c)。规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha\text{RC}_{27}\text{-C}_{28}\text{-C}_{29}$ 三角图显示,研究区长9—长7烃源岩母质来源为混合源,且长7烃源岩母质类型与长8原油最为相似(图8d),长9次之,长8烃源岩母质类型与长8原油相差较大。

总体上,长8段原油数据点分布十分集中,说明其为单一性质的原油。长8段原油与长7烃源岩耦合度最好,长9次之。因此认为,研究区长8油藏以长7烃源岩供烃为主,长9烃源岩供烃为辅,长8烃源岩少量参与(图8)。

聚类分析是利用多维空间中样本间的距离,将相似的样本划分为相同的类别,而不相同的样本划

分为不同的类别。聚类分析是石油地质学中常用的一种方法,它是对不同类型的原油、烃源岩进行生物标志物参数的分析,从而将其划分为不同类型的聚类。该方法可以综合多个指标,区分不同类型的烃源岩的异同,可以为油气的勘探与开发提供依据。选取 Tm/Ts 、 C_{20} 三环萜烷/ C_{23} 三环萜烷、 C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷、伽马蜡烷指数、 C_{31} 藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 、孕甾烷/规则甾烷、 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 、 $\text{C}_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、重排甾烷/规则甾烷、 $\text{C}_{27}\sim\text{C}_{29}$ 甾烷相对含量、 C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷、 C_{30} 重排藿烷/ C_{29}TS 、升补身烷/补身烷、重排补身烷/补身烷等14个参数对所有样品进行聚类分析,结果如图9所示。表明长8₁原油与长8₂原油属于同一家族,且综合来说,长7烃源岩与长8原油距离系数最低,长9烃源岩距离系数略高于长7烃源岩,仅有两块长8烃源岩的样品与长8原油相关性较强,表明长8原油主要为长7烃源岩所贡献,长9烃源岩次之,长8烃源岩对长8原油仅少量供烃。



(a) 甾烷成熟度关系; (b) Tm/Ts 与 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 相关图; (c) 重排甾烷/规则甾烷与 C_{31} 藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 相关图; (d) $\text{C}_{27}\text{-C}_{28}\text{-C}_{29}$ 甾烷相对含量图

图8 长9—长7段烃源岩和原油样品生物标志化合物参数

Fig. 8 Biomarker compound parameters of source rocks and crude oil samples from Chang 9–Chang 7

甘泉—富县地区发育三套烃源岩,但三套烃源岩分布特点各有差异。长₉烃源岩在研究区内连续展布,厚度为10~15 m;长₈烃源岩在研究区断续分布,厚度为5~20 m,垂向上位于长₈段中部;长₇烃源岩连续性最好,厚度为15~35 m,在全区均匀分布。富县—甘泉地区长₉段—长₇段烃源岩受构造活动的控制,水下分流河道砂岩、滩坝砂岩交互分布,发育多套“源储一体式”与“源储相邻”的储层构型。研究表明,鄂尔多斯盆地三叠系延长组在长₄₊₅以下常常伴随着古超压现象的出现,而过剩压力则在长₇主力烃源岩段达到顶峰,此后向上和向下过剩压力逐渐减弱(陈荷立, 1990; 席胜利, 2004; 刘新社, 2008; 赵靖舟, 2012)。长₇烃源岩顶部无大面积砂体分布,因此生成的烃类物质在生排烃压力下向下运移,长₉烃源岩生成的石油在生烃增压以及浮力的推动下,过剩压力克服毛细管阻力,驱动向上(图10)。长₈烃源岩在生烃压力驱动下向上、下及侧向供烃。

5 结论

(1)甘泉—富县地区延长组长₉—长₇烃源岩的TOC含量分布范围为3.25%~7.92%,生烃潜量介于3.06~38.13 mg/g之间,氯仿沥青“A”含量

为0.18%~0.69%,有机质类型主要为II₁型和II₂型,处于高成熟演化阶段。研究区长₉—长₇暗色泥岩总体为最好烃源岩。

(2)研究区烃源岩形成于典型的内陆湖相淡水环境,不同层段沉积环境略有差异。长₉沉积期处于氧化和亚氧化环境,长₈与长₇沉积期处于还原环境,且长₇沉积期还原程度更高。长₉—长₇沉积期有机质来源主要为混源输入。

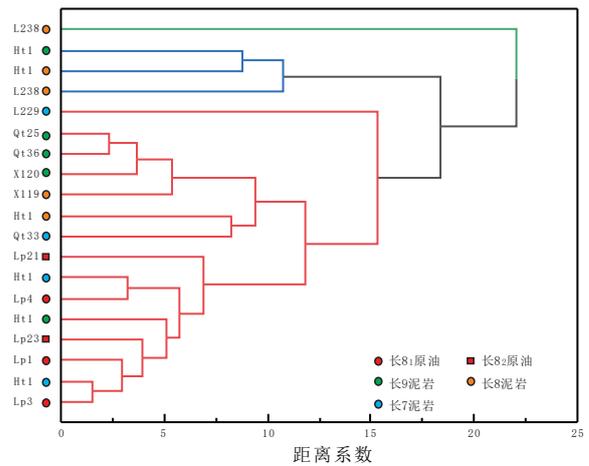


图9 甘泉—富县地区烃源岩与长₈原油聚类分析图
Fig. 9 Cluster analysis of source rocks and Chang 8 crude oil in the Ganquan-Fuxian area

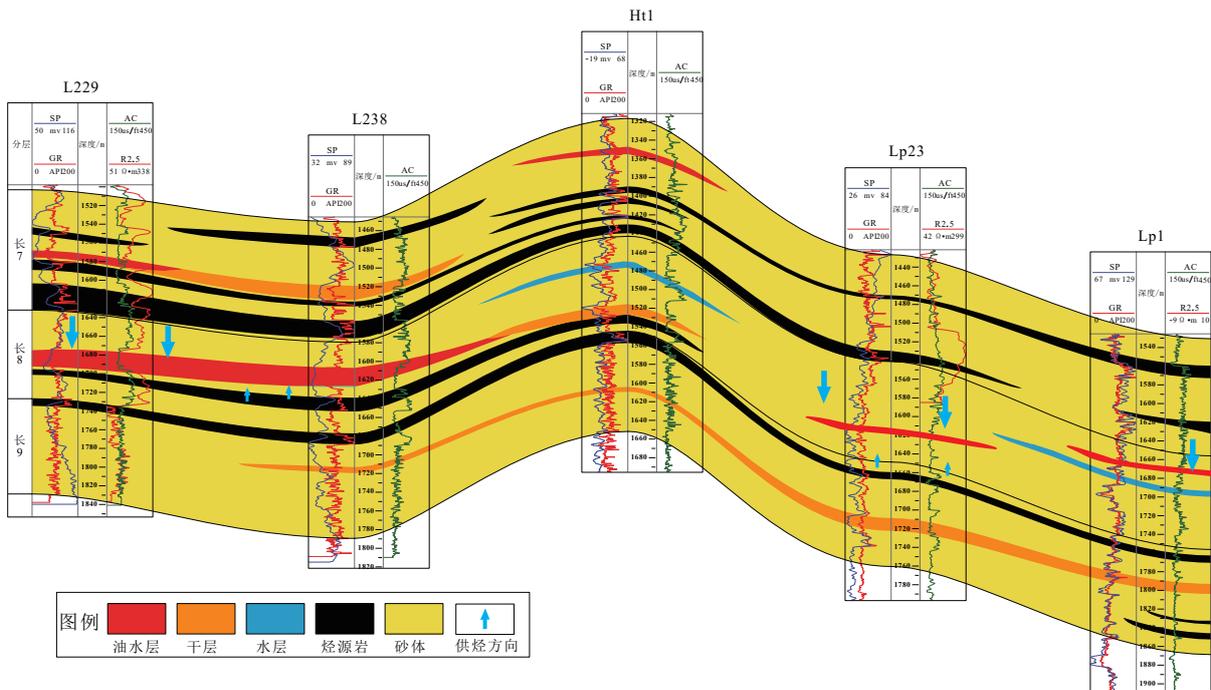


图10 油藏剖面示意图
Fig. 10 Reservoir profile diagram

(3)甘泉—富县地区延长组长 8_1 、长 8_2 原油属于同一类型原油,长 9 、长 8 及长 7 暗色泥岩对长 8 原油均有贡献;以长 7 烃源岩贡献为主,长 9 烃源岩次之,长 8 烃源岩少量供烃。

References

- Andrews I J, 2013. The Carboniferous Bowl and Shale Gas Study: Geology and Resource Estimation [R]. London: British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change.
- Bao J P, Zhu C S, Chen X W, et al., 2018. C_{24} tetracyclic terpanes and their origin in crude oils and source rocks from the Zhu 1 Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geochimica*, 47(2): 122 – 133 (in Chinese with English abstract).
- Cai J, Wang G C, Zhang Z, 2018. Oil source correlation of Chang 8 reservoir in Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 34(4): 68 – 74 (in Chinese with English abstract).
- Cui D Y, Xin H G, Zhang Y D, et al., 2023. Geochemical characteristics and shale oil significance of Chang 7_3 sub-member mud shale in Ningxian area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(2): 210–225 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y G, He Y H, Wang C, et al., 2021. Genesis and accumulation patterns of unconventional oil reservoir in Member 8 of Triassic Yanchang Formation: a case study of the western Ganquan area, southeastern Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42 (10) : 1270 – 1286 (in Chinese with English abstract).
- Chen H L, Liu Y, Song G C, 1990. Study on Underground fluid pressure distribution and hydrocarbon migration and accumulation conditions of Yanchang Formation in Shaanxi-Gansu-Ning Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, (4) : 8 – 16 (in Chinese with English abstract).
- Cui J W, Zhang Z Y, Liu J L, et al., 2021. Hydrocarbon generation and expulsion quantification and hydrocarbon accumulation contribution of multiple source beds in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 32 (10) : 1514 – 1531 (in Chinese with English abstract).
- Dong J Y, 2018. Study on Biomarkers of source rocks in Southwest Chang 7, Ordos Basin [M]. Southwest Petroleum University (in Chinese with English abstract).
- Estrada J M, 2016. Bhamidimarri R. A review of the issues and treatment options for waste water from shale gas extraction By hydraulic fracturing[J]. *Fuel*, 182: 292 – 303.
- Han Z H, Zhao J Z, Meng X G, et al., 2020. Discovery and geochemical characteristics of source rocks of Chang 7 Member in the eastern "margin" of the Triassic lacustrine Basin, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42 (6) : 991 – 1000 (in Chinese with English abstract).
- Hao F, Zhou X, Zhu Y, et al., 2009. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 93(8): 1015 – 1037.
- Hu C W, Hu G, Zhang X H, et al., 2020. Stratification, sedimentary environment and hydrocarbon generation potential evaluation of upper Maokou Formation black rock series in northwestern Sichuan[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42 (2) : 202 – 214 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y J, Gen J K, Bai Y B, et al., 2020. Geochemical characteristics and oil source correlation of Chang 6 and 7 Member of Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42 (2) : 281 – 288 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y W, 2019. Research on favorable reservoir of lower Yanchang Formation in Fuxian exploration area, Ordos Basin[M]. China University of Petroleum (East China) (in Chinese with English abstract).
- Hang C, Huo L R, Wu C H, et al., 2022. Progress and prospect of CO₂ resource utilization based on unconventional oil and gas development[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 9 (1) : 1 – 9 (in Chinese with English abstract).
- Hui S S, Pang J Q, Liu G D, et al., 2022. Characteristics of Paleogene Source Rocks and Fine Oil-source Correlation in Liaohe Western Depression[J]. *Earth Science*, 48 (8) : 3081 – 3098 (in Chinese with English abstract).
- James M C, 1996. Using coarse ground bentonite to plug and abandoned holes[J]. *Water Well Journal*, 50: 44.
- Jiao X, Liu Y Q, Zhou B W, et al., 2021. Research progress on coupling relationship between volcanic-hydrothermal deep source materials and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23 (4) : 789 – 809 (in Chinese with English abstract).
- Li J F, Yang L R, Zhang F B, et al., 2009. Main controlling factors and "sweet spot" model of tight oil enrichment in Yanchang 8 Member of Xiasiwan Oilfield[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 9 (6) : 1 – 9 (in Chinese with English abstract).
- Li Q, Wu S, Xia D, et al., 2020. Major and trace element geochemistry of the lacustrine organic-rich shales from the Upper Triassic Chang 7 Member in the southwestern Ordos Basin, China: Implications for paleoenvironment and organic matter accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 852 – 867.
- Li G X, Lei Z D, Dong W H, et al., 2022. Progress, Challenges and Prospects of unconventional oil and gas development of petrochina[J]. *China Petroleum Exploration*, 27 (1) : 1 – 11 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, 2022. "Three barrels of oil" stabilize oil and increase gas end secure energy security rice bowl [N]. *China Business*, 2022-10-24 (D04) (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Liu K, Liu C, 2019. Quantitative evaluation of gas generation from the Upper Paleozoic coal, mudstone and limestone source rocks in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 178: 224 – 241.
- Liu X S, Xi S L, Hang D J, et al., 2008. Dynamic conditions of secondary migration of Mesozoic petroleum in Ordos Basin Petroleum[J]. *Exploration and Development*, (2) : 143 – 147 (in Chinese with English abstract).
- Liao Y H, Geng A S, Liu D H, et al., 2007. Carbon isotope fractionation induced by maturity in the process of coal hydrocarbon generation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, (6) : 583 – 588 (in Chinese with English abstract).

- Luo G S, Zhang S N, Luo X M, et al., 2016. Biomarker characteristics and oil-source correlation of the Yanchang crude oil in Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Science & Technology Review*, 34 (2) : 129 – 134 (in Chinese with English abstract).
- Mauter M S, Alvarez P J J, Burton A, et al., 2014. Regional variation in water-related impacts of shale gas development and Implications for emerging international plays[J]. *Environmental Science & Technology*, 48 (8) : 298 – 306.
- Nie Z Y, Huang Q H, Xi D P, et al., 2014. Characteristics of biomarkers in source rocks of Well Songke 1, Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 21 (2) : 265 – 274 (in Chinese with English abstract).
- Pan S, Horsfield B, Zou C, et al., 2016. Upper Permian Junggar and Upper Triassic Ordos lacustrine source rocks in Northwest and Central China: Organic geochemistry, petroleum potential and predicted organofacies[J]. *International Journal of Coal Geology*, 158: 90 – 106.
- Shi B H, Qin X Y, Zhang C L, et al., 2021. Differential reservoir formation factors of the 6th member of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42 (5) : 1112 – 1123 (in Chinese with English abstract).
- Stueck H, Houseknecht D, Franke D, et al., 2016. Shale-gas assessment: Comparison of gas-in-place versus performance-based approaches[J]. *Natural Resources Research*, 25 (3) : 315 – 329.
- Tang Y J, Zhang X Y, Ji C J, et al., 2022. Crude oil source of granulated dolomite paleo-reservoir from the Jurassic strata in the South Qiangtang Basin: Evidence from carbon isotopes of aromatic compounds and monomeric hydrocarbons[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 19 (2) : 1 – 11 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y N, 2018. Coupled relationship between diagenesis and accumulation formation in tight reservoirs in Xin'anbian Oilfield in Ordos Basin[D]. *Geology of China University (Beijing)* (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Zhang X L, Wang X, et al., 2022. Source rock evaluation and oil-source correlation of Chang 7 and 9 Member of Yanchang Formation in Zaoyuan exploration area, Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52 (3) : 840 – 854 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y S, Gao Y, Fang Z W, 2021. Characteristics and classification of pore throat structure of Paleogene tight reservoirs in Jiyang Depression[J]. *Petroleum exploration and development*, 48 (2) : 266 – 278 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z Q, Fan Z F, Zhang X Y, et al., 2022. Global oil and gas development status, situation and enlightenment in 2021[J]. *Petroleum exploration and development*, 49 (5) : 1045 – 1060 (in Chinese with English abstract).
- Xiong L F, Liu C Y, Qiu X W, et al., 2015. Late Triassic tectonic activity and its influence on the development of high-quality source rocks in Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 34(2): 109 – 114+ 136 (in Chinese with English abstract).
- Xue N, Shao X Z, Zhu G Y, et al., 2023. Geochemical characteristics and formation environment of source rocks of Triassic Chang 7 Member in Pingliang North Area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 35(3): 51 – 65 (in Chinese with English abstract).
- Xi S L, Liu X, Wang T, 2004. Analysis of Mesozoic petroleum migration in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 26 (3) : 229 – 235. 827 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y N, Zhou S X, Liu J, et al., 2017. Geochemical characteristics and oil-source correlation of Yanchang Formation in the southern margin of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 28: 550 – 565 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Zou C N, 2022. Orderly "symbiotic enrichment" of conventional and unconventional oil and gas — discussion on theory and technology of conventional and unconventional petroleum geology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (5) : 1635 – 1653 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Y, Du K F, Ge Y J, et al., 2018. Geochemical characteristics of Chang 7 source rocks in Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Lithologic reservoirs*[J]. *Lithologic Reservoirs*, 30(1): 39 – 45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H L, 2016. Comprehensive study of Triassic Chang 8 tight oil Reservoir in Fuxian exploration area, Ordos Basin [M]. *Northwestern University* (in Chinese with English abstract).
- Zhang R, 2016. Carboniferous - Permian oil source correlation and accumulation model in the eastern Fukang Depression, Junggar Basin[D]. *China University of Petroleum (East China)* (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Z, Yang H, Fu S T, et al., 2007. Development mechanism of Chang 9₁ lacustrine source rocks in Ordos Basin[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 37: 33 – 38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Z, Yang H, Xue L Q, et al., 2010. Sublacustrine hot water activity and its influence on the development of high-quality source rocks: A case study of Chang 7 source rock in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(4): 424 – 429 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Z, Yang H, Peng P A, et al., 2009. Influence of Late Triassic volcanic activity on the development of Chang 7 high-quality source rocks in Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 38(6): 573 – 582 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J Z, Meng X G, Han Z H, 2020. Near-source accumulation: Geochemical evidence of crude oil from the 6th Member of Yanchang Formation in the eastern margin of lacustrine basin of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 41(12): 1513 – 1526 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J Z, Bai Y B, Cao Q, et al., 2012. Reservoir-forming model of large oil fields with quasi-continuous low permeability and tight sandstone in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 33 (6) : 811 – 827 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J X, Chen H D, Fu S T, et al., 2008. Several important event deposits and their hydrocarbon accumulation relationships in Yanchang Formation, southern Ordos Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 28 (3) : 90 – 95 (in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q, Chen S J, Bai Y J, et al., 2022. Geochemical characteristics and source of oil of Chang 8 Member of Yanchang Formation in Ganquan area, Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 36 (2) : 742 – 754 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包建平, 朱翠山, 陈希文, 等, 2018. 珠江口盆地珠一坳陷原油和烃源岩中 C_{24} 四环萜烷及其成因[J]. *地球化学*, 47(2): 122-133.
- 蔡劲, 王桂成, 张震, 2014. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长 8 油藏油源对比研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 34(4): 68-74.
- 崔德艺, 辛红刚, 张亚东, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地宁县地区长 7₂ 亚段泥页岩地球化学特征及页岩油意义[J]. *天然气地球科学*, 34(2): 210-225.
- 陈义国, 贺永红, 王超, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组 8 段非常规油藏成因与成藏模式——以盆地东南部甘泉西区为例[J]. *石油学报*, 42(10): 1270-1286.
- 陈荷立, 刘勇, 宋国初, 1990. 陕甘宁盆地延长组地下流体压力分布及油气运聚条件研究[J]. *石油学报*, (4): 8-16.
- 崔景伟, 张忠义, 刘建良, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地延长组多烃源层生排烃定量及成藏贡献厘定[J]. *天然气地球科学*, 32(10): 1514-1531.
- 董君妍, 2018. 鄂尔多斯盆地长 7 西南部烃源岩生物标志化合物特征研究[M]. 西南石油大学.
- 韩载华, 赵靖舟, 孟选刚, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地三叠纪湖盆东部“边缘”长 7 段烃源岩的发现及其地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 42(6): 991-1000.
- 胡朝伟, 胡广, 张玺华, 等, 2020. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价[J]. *石油实验地质*, 42(2): 202-214.
- 黄彦杰, 耿继坤, 白玉彬, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长 6、长 7 段原油地球化学特征及油源对比[J]. *石油实验地质*, 42(2): 281-288.
- 黄益旺, 2019. 鄂尔多斯盆地富县探区延长组下组合有利储层研究[M]. 中国石油大学(华东).
- 黄程, 霍丽如, 吴辰泓, 等, 2022. 基于非常规油气开发的 CO_2 资源化利用技术进展及前景[J]. *非常规油气*, 9(1): 1-9.
- 惠沙沙, 庞雄奇, 柳广弟, 等, 2022. 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩特征及油源精细对比[J]. *地球科学*, 48(8): 3081-3098.
- 焦鑫, 柳益群, 周鼎武, 等, 2021. 湖相烃源岩中的火山—热液深源物质与油气生成耦合关系研究进展[J]. *古地理学报*, 23(4): 789-809.
- 李锦锋, 杨连如, 张凤博, 等, 2019. 下寺湾油田延长组长 8 段致密油富集主控因素及“甜点”模式[J]. *油气藏评价与开发*, 9(6): 1-9.
- 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等, 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J]. *中国石油勘探*, 27(1): 1-11.
- 李哲, 2022. “三桶油”稳油增气端牢能源安全饭碗[N]. *中国经营报*, 2022-10-24(D04).
- 刘新社, 席胜利, 黄道军, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移动力条件[J]. *石油勘探与开发*, (2): 143-147.
- 廖玉宏, 耿安松, 刘德汉, 等, 2007. 煤生烃过程中成熟度引起的碳同位素分馏效应[J]. *石油实验地质*, (6): 583-588.
- 骆垠山, 张哨楠, 罗小明, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组原油生物标志物特征及油源对比[J]. *科技导报*, 34(2): 129-134.
- 聂志阳, 黄清华, 席党鹏, 等, 2014. 松辽盆地松科 1 井烃源岩生物标志化合物特征[J]. *地学前缘*, 21(2): 265-274.
- 时保宏, 秦馨雨, 张才利, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组 6 段油藏差异成藏因素[J]. *石油与天然气地质*, 42(5): 1112-1123.
- 唐友军, 张欣越, 季长军, 等, 2022. 南羌塘盆地侏罗系砂糖状白云岩古油藏油源研究——来自芳烃化合物和单体烃碳同位素的证据[J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 19(2): 1-11.
- 王禹诺, 2018. 鄂尔多斯盆地新安边油田致密储层成岩演化与成藏耦合关系[D]. 中国地质大学(北京).
- 王晓琳, 张小莉, 王祥, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地枣园探区延长组长 7 段和长 9 段烃源岩评价及油源对比[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 52(3): 840-854.
- 王永诗, 高阳, 方正伟, 2021. 济阳坳陷古近系致密储集层孔喉结构特征与分类评价[J]. *石油勘探与开发*, 48(2): 266-278.
- 王作乾, 范子菲, 张兴阳, 等, 2022. 2021 年全球油气开发现状、形势及启示[J]. *石油勘探与开发*, 49(5): 1045-1060.
- 熊林芳, 刘池阳, 邱欣卫, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地晚三叠世构造活动及对优质烃源岩发育的影响[J]. *地质科技情报*, 34(2): 109-114+136.
- 薛楠, 邵晓州, 朱光有, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地平凉北地区三叠系长 7 段烃源岩地球化学特征及形成环境[J]. *岩性油气藏*, 35(3): 51-65.
- 席胜利, 刘新社, 王涛, 2004. 鄂尔多斯盆地中生界石油运移特征分析[J]. *石油实验地质*, 26(3): 229-235. 827.
- 杨亚南, 周世新, 李靖, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地南缘延长组烃源岩地球化学特征及油源对比[J]. *天然气地球科学*, 28: 550-565.
- 杨智, 邹才能, 2022. 论常规—非常规油气有序“共生富集”——兼论常规—非常规油气地质学理论技术[J]. *地质学报*, 96(5): 1635-1653.
- 袁媛, 杜克锋, 葛云锦, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区长 7 烃源岩地球化学特征[J]. *岩性油气藏*, 30(1): 39-45.
- 张海林, 2016. 鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组长 8 致密油层综合研究[M]. 西北大学.
- 张瑞, 2016. 准噶尔盆地阜康凹陷东部地区石炭系—二叠系油源对比与成藏模式[D]. 中国石油大学(华东).
- 张文正, 杨华, 傅锁堂, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地长 9₁ 湖相优质烃源岩的发育机制探讨[J]. *中国科学: D 辑*, 37: 33-38.
- 张文正, 杨华, 解丽琴, 等, 2010. 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*, 37(4): 424-429.
- 张文正, 杨华, 彭平安, 等, 2009. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响[J]. *地球化学*, 38(6): 573-582.
- 赵靖舟, 孟选刚, 韩载华, 2020. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地延长组湖盆东部“边缘”延长组 6 段原油的地球化学证据[J]. *石油学报*, 41(12): 1513-1526.
- 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透—致密砂岩大油田成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 33(6): 811-827.
- 赵俊兴, 陈洪德, 付锁堂, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地南部延长组中几个重要事件沉积及其油气聚集关系[J]. *矿物岩石*, 28(3): 90-95.
- 朱必清, 陈世加, 白艳军, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长 8 段原油地球化学特征及来源[J]. *现代地质*, 36(2): 742-754.