

引用格式:刘祥柏,柳广弟,宋泽章,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组烃源岩沉积环境及形成机理[J].天然气地球科学,2022,33(12):2019-2042.

LIU Xiangbai, LIU Guangdi, SONG Zezhang, et al. The paleo-sedimentary environment and formation mechanism of the source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(12): 2019-2042.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2022.09.001

渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组烃源岩沉积环境及形成机理

刘祥柏^{1,2}, 柳广弟^{1,2}, 宋泽章^{1,2}, 姜文亚³, 王娜³

(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;

3. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280)

摘要: 烃源岩分布与其形成环境密切相关, 对油气分布具有重要影响。对烃源岩的评价及其形成环境的研究可为渤海湾盆地歧口凹陷下一步的勘探指明方向。从烃源岩发育特征和演化过程入手, 深入研究了歧口凹陷沙河街组烃源岩的地球化学特征、分布规律及形成机理。结果表明: 沙河街组烃源岩有机质丰度达到了中等—最好的级别, 有机碳含量整体呈现从沙三段(E_{s_3})到沙一下亚段($E_{s_1}^*$)到沙一上亚段($E_{s_1}^*$)先增大后减小的特征; 有机质类型为I型—III型, 且沙一上亚段、沙一中亚段以I型—II₁型有机质为主, 沙一下亚段、沙二段(E_{s_2})、沙三段I型—III型有机质均有分布, 反映沙河街组沉积期有机质来源为湖泊原生有机质和陆源有机质混源。沙河街组烃源岩在平面上的分布具有分布范围广、沉积厚度大的特征, 优质烃源岩在斜坡区更为发育。古气候研究结果表明, 在沙河街组沉积期, 该地区风化强度中等, 整体以温暖湿润的古气候条件为主, 有利于生物的发育。歧口凹陷沙河街组沉积期水体古盐度较大, 属于半咸水环境。古盐度与古气候之间没有明显的相关关系, 水体咸化的原因可能与海水入侵有关。古盐度和有机质含量的关系表明: 在低盐度阶段, 有机质含量随古盐度的升高而增大; 在高盐度阶段, 有机质含量随古盐度的升高而减小。根据微量元素比值和 C_{org} :P摩尔比值, 歧口凹陷沙河街组沉积期发育氧化—亚氧化的沉积环境, Pr/Ph值显示在 $E_{s_1}^*$ 间歇性发育强还原环境, 提高了有机质的保存条件。通过对沙河街组沉积期湖泊古生产力的恢复, 沙河街组沉积期歧口凹陷整体上为中—富营养湖泊, 板桥地区古生产力较低, 为贫—中营养湖泊。歧口凹陷整体相对较高的古生产力水平及较高的陆源有机质输入量为该地区有效烃源岩的形成提供了物质基础。在纵向上, 沙河街组沉积期古生产力水平具有 $E_{s_1} > E_{s_3} > E_{s_2}$ 的特征。古生产力条件是影响歧口凹陷沙河街组烃源岩形成的主要因素。由于斜坡区陆源有机质和水生有机质的双重贡献, 优质烃源岩更为发育。

关键词: 烃源岩; 古气候; 古盐度; 氧化还原条件; 古生产力; 歧口凹陷

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2022)12-2019-24

0 引言

渤海湾盆地是位于中国东部的重要含油气盆

地, 其油气成藏条件非常优越^[1-6]。位于渤海湾盆地的歧口凹陷属于新生代陆相断陷湖盆, 具有丰富的油气资源和广阔的勘探前景^[7-8]。随着研究的深入

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-09-07; 网络首发日期: 2022-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 41772127); 国家重点研发计划(编号: 2017YFC0603106)联合资助.

作者简介: 刘祥柏(1991-), 男, 江苏连云港人, 博士研究生, 主要从事石油地质和油气成藏综合研究. E-mail: xiangbai_liu@163.com.

通信作者: 柳广弟(1961-), 男, 天津蓟县人, 教授, 博士生导师, 主要从事石油地质综合研究及油气资源评价的教学与科研工作.

E-mail: lgd@cup.edu.cn.

和勘探程度的提高,歧口凹陷勘探领域逐渐向深层拓展。歧口凹陷歧探1井、歧深1井、歧深6井等已经获得工业油气流,这表明歧口凹陷具有极大的深层勘探潜力^[9-10]。歧口凹陷深层主要为沙河街组,该套地层是歧口凹陷的主力烃源岩层。随着油气勘探的深入和对有机质富集理论的研究发现,烃源岩,尤其是高有机质丰度的优质烃源岩对油气的形成具有控制作用。烃源岩的品质、规模、及其分布直接决定了油气田的大小和分布。但勘探实践表明,不同地区、不同层系的烃源岩在质量上和分布上具有很强的非均质性。前人对烃源岩形成机理的研究发现,烃源岩形成的过程,其本质是有机质富集和保存的过程。影响有机质富集和保存的因素主要包括在烃源岩形成过程中提供有机质的多少以及沉积水体的氧化还原条件^[11-14]。有机质的来源途径主要有湖盆原生有机质以及陆源输入的有机质,对于湖盆原生有机质通常用古生产力来表征^[15-18]。当前对歧口凹陷沙河街组烃源岩的研究报道不多,且主要集中在烃源岩的分级评价及分布上,对其沉积环境及形成机理的研究较少^[19-21],对歧口凹陷沙河街组烃源岩不同地区不同层段的地球化学特征、分布规律、形成机理方面的研究需要进一步深入,分析古湖泊环境与烃源岩发育的关系,深入研究烃源岩发育的控制因素,并对歧口凹陷烃源岩特征和空间分布进行表征,为未来油气勘探指明方向。与此同时,对烃源岩地球化学特征的评价还可以为研究油气生成、聚集成藏提供坚实的基础,对进一步选择有利的勘探方向具有重要的现实意义。因此,本文在利用地球化学方法对不同层系的烃源岩分别评价的基础上研究烃源岩的分布规律和沉积环境,并探究影响烃源岩形成的控制因素。

1 地质背景

歧口凹陷位于渤海湾盆地的腹地——黄骅坳陷的中北区,是渤海湾盆地内最大的富油气凹陷之一^[7-10]。歧口凹陷具有优越的油气成藏条件,富含丰富的油气资源,经过多年的勘探开发,其勘探程度处于较高水平,但其剩余资源仍然相当丰富,具有较大的勘探潜力^[20-24]。

研究区歧口凹陷是黄骅坳陷的次级构造单元(图1)。西南缘的沈青庄凸起和孔店凸起将黄骅坳陷南北分隔,西北边界是沧东断裂,与沧县隆起相接,南部地层上超到埕宁隆起之上,东部被沙垒田

凸起与渤中坳陷分隔,北部是汉沽断层,与燕山褶皱带相邻。歧口凹陷次级构造单元的划分主要包括中心地区的歧口主凹、北部的北塘次凹、西部的板桥次凹、西南部的歧北次凹和歧南次凹5个负向构造单元及其间的北塘斜坡区、板桥斜坡区、歧北斜坡区、歧南斜坡区和埕北断坡区。研究区裂谷活动自中生代开始,在早白垩世末期的燕山运动之后曾经历过总体抬升与剥蚀,在始新世以后经历过大规模强烈的裂谷活动。黄骅坳陷总体历经了中生代的初始开裂、古近纪的差异断陷和新近纪、第四纪的区域沉降3个阶段,基本上构成一个完整的裂谷构造旋回^[20-22]。

研究区新生代地层包括古近系沙河街组(Es)、东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm),第四系平原组(Qp)。

渐新世沙河街期,随着湖水的大规模入侵,沙河街组广泛超覆于前古近系不同时代地层之上,沉积特征受边界与内部同生断层控制。沙河街组是歧口凹陷最主要的勘探目的层系,尤其是2次最大水进期发育的沙三段(Es₃)和沙一段(Es₁)暗色泥岩,由于分布广,厚度大,是研究区最重要的生烃层系。沙二段(Es₂)沉积期经历过抬升与剥蚀,该时期暗色泥岩在分布上要远小于沙三段和沙一段。东营期处于湖盆萎缩阶段,为一套三角洲沉积。

研究区以沙河街组和东营组为主体,形成了沙河街组烃源岩、东营组烃源岩2套生烃层系,生烃层与纵向储集层及盖层形成了多套生储盖组合(图2)。北部燕山褶皱带、西部沧县隆起、南部埕宁隆起、东部沙垒田凸起是歧口凹陷沙河街组主要的盆外碎屑物源,孔店凸起、羊三木凸起、港西凸起是主要的盆内物源。北塘地区主要受到北部燕山褶皱带物源区的影响、同时会被西部沧县隆起物源区波及;板桥地区主要受到沧县隆起区的影响,发育近岸沉积;歧南—埕海地区主要受到南部埕宁隆起区物源的影响;歧北地区主要受盆内物源孔店凸起、羊三木凸起、港西凸起的影响;滨海地区及歧口主凹区受到西部沧县隆起和北部燕山褶皱带物源区的共同影响。

沙河街组沉积期主要发育滨浅湖区的扇三角洲和辫状河三角洲、半深湖—深湖区的远岸水下扇和浊积体及湖相碳酸岩沉积。沙三段沉积期,歧口主凹区、板桥凹陷中部、歧北凹陷发育深湖—半深湖相沉积。辫状河三角洲沉积主要发育在北塘凹

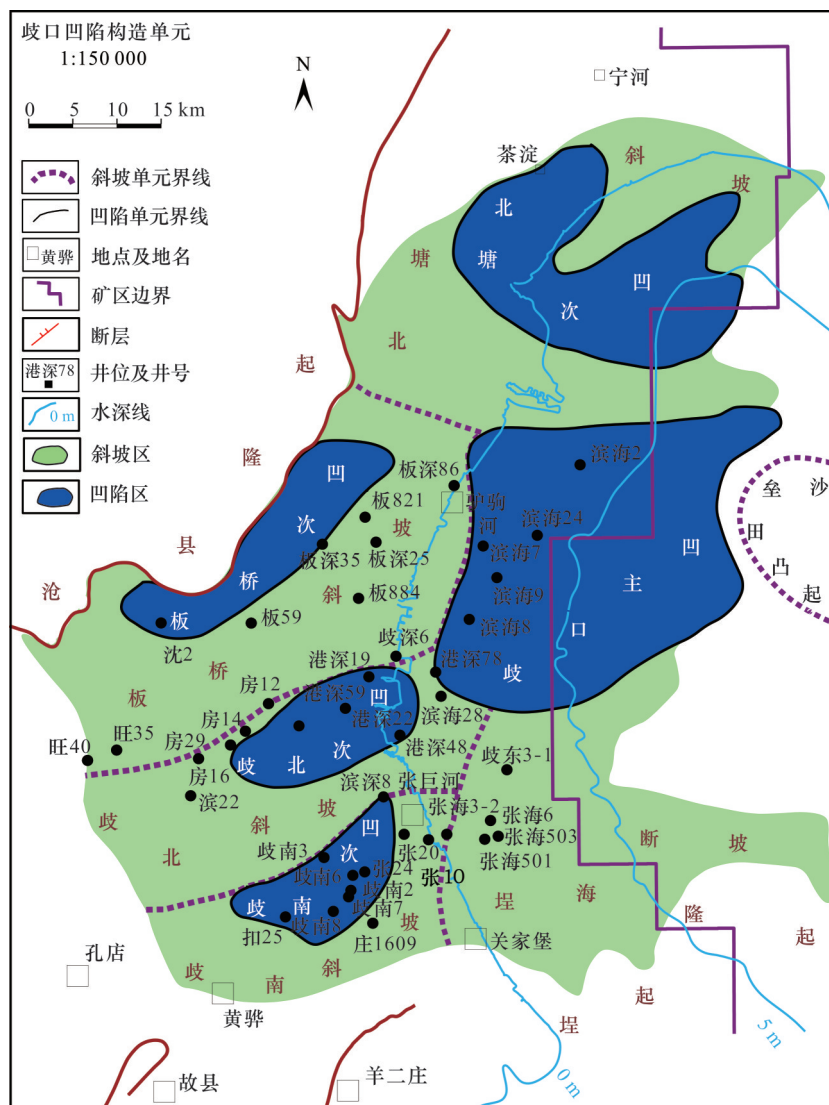


图1 歧口凹陷构造单元划分(据文献[20]编修)

Fig.1 Division of tectonic units in Qikou Sag(modified after Ref.[20])

陷区和埕北断坡区,前缘部分分别向南、向北延伸,至歧口主凹区演化为远岸水下扇。扇三角洲沉积主要发育在西部地区,向东延伸,至歧口主凹区演化为远岸水下扇[图3(a)]。沙二段沉积期,受盆地整体抬升影响,湖盆萎缩、水体变浅、分布面积减小,主要发育辫状河三角洲、扇三角洲和湖相沉积3种类型。沙一下亚段(E_{s1}^*)沉积期,歧口主凹区、板桥次凹中部、歧北次凹发育深湖一半深湖相沉积。辫状河三角洲沉积主要发育在北塘次凹区和埕北断坡区,前缘部分分别向南、向北延伸,至歧口主凹区演化为重力流水道沉积。西部靠近沧县隆起区发育扇三角洲沉积,向东演化为重力流沉积。碳酸盐岩滩坝沉积在西南缘地区广泛发育,明显区别于沙三段沉积期[图3(b)]。

2 实验样品及分析方法

本文研究选取歧口凹陷不同地区典型探井沙河街组不同层段的280块泥岩样品进行分析,所选样品在平面上主要发布于板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹、板桥斜坡区、歧北斜坡区、歧南斜坡区、埕海断坡区及邻近歧口主凹地区(井位见图1),纵向上基本涵盖了整个沙河街组。针对采集的样品,进行了总有机碳、岩石热解分析。对其中部分样品开展了氯仿沥青“A”和饱和烃色谱质谱等有机地球化学和主微量元素、碳酸盐碳、氧同位素分析、全岩及黏土矿物XRD分析等无机地球化学分析测试。其中主微量元素分析在核工业研究院分析完成,其他实验在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家

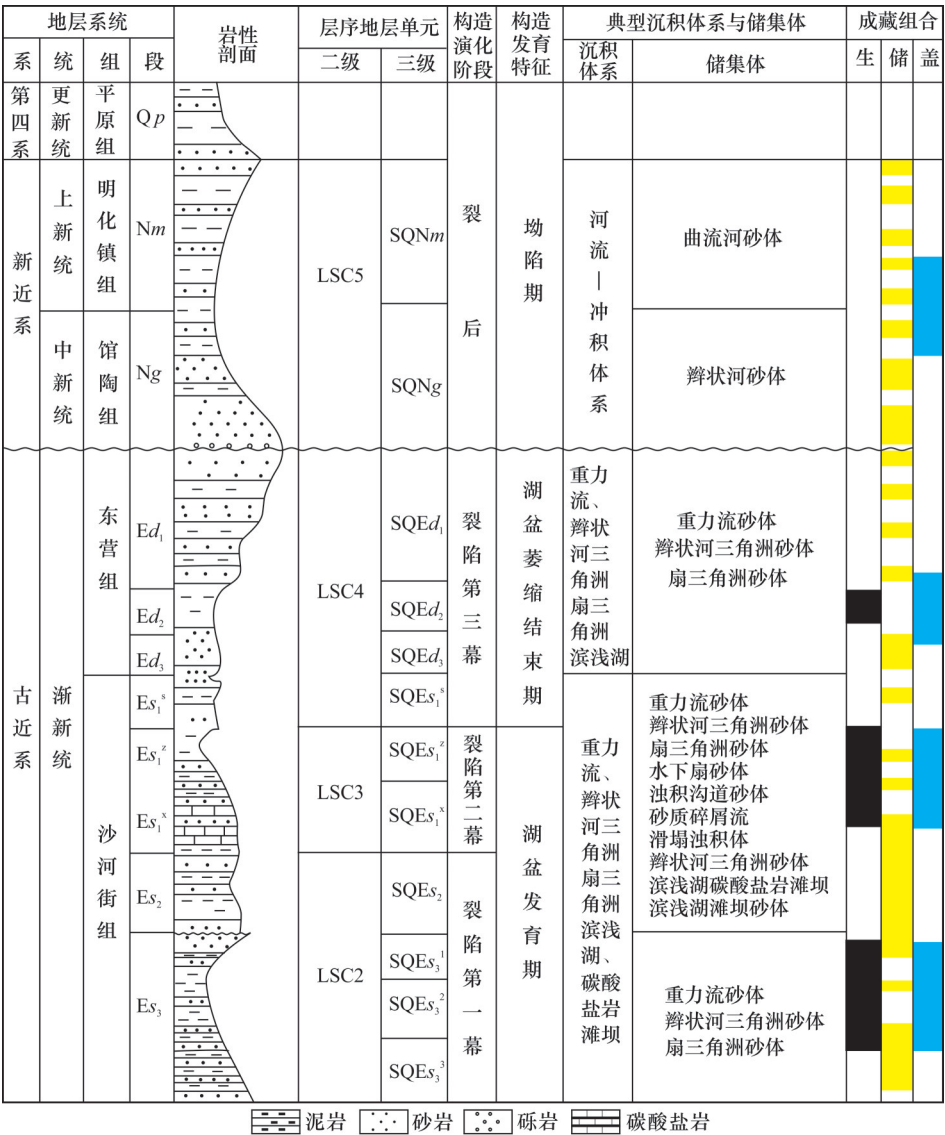


图2 歧口凹陷新生界层序地层格架与成藏组合(据文献[20]编修)

Fig.2 Cenozoic sequence stratigraphic framework and hydrocarbon accumulation association in Qikou Sag (modified after Ref.[20])

重点实验室完成。所有样品均粉碎至200目,总有机碳分析测试时称取0.1 g左右样品置于干锅中并用5%稀盐酸处理样品中的碳酸盐岩,滴加盐酸直至样品中不再产生气泡,然后用蒸馏水反复冲洗样品,除去样品中残留的稀盐酸。将样品置于80℃的干燥炉中烘干(12 h)后取出,放入碳硫测定仪(Leco CS-230)中测试。岩石热解分析使用仪器OGE-II型油气评价工作站完成。利用快速抽提仪完成了氯仿沥青“A”的抽提并在层析柱中对其族组成进行了分析。利用Agilent 7890-5975c气相色谱质谱联用仪对饱和烃进行了测试,测试使用HP-5MS弹性石英毛细柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),设定初始温度50℃,分别以20℃/min升温至

120℃、以4℃/min升至250℃、以3℃/min升至310℃并保持30 min;以氦气为载气、1 mL/min的恒定载气速度完成。主微量元素分析在核工业研究院完成,检测流程参照国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法 第14部分:氧化亚铁》(GB/T 14506.14—2010)。

3 烃源岩有机地球化学特征

有机质是油气生成的物质基础,有机质的丰度、类型、成熟度决定了烃源岩的质量^[25-26]。本文研究利用有机碳含量(TOC)、热解参数、饱和烃质谱质谱等有机地球化学方式对烃源岩进行研究。

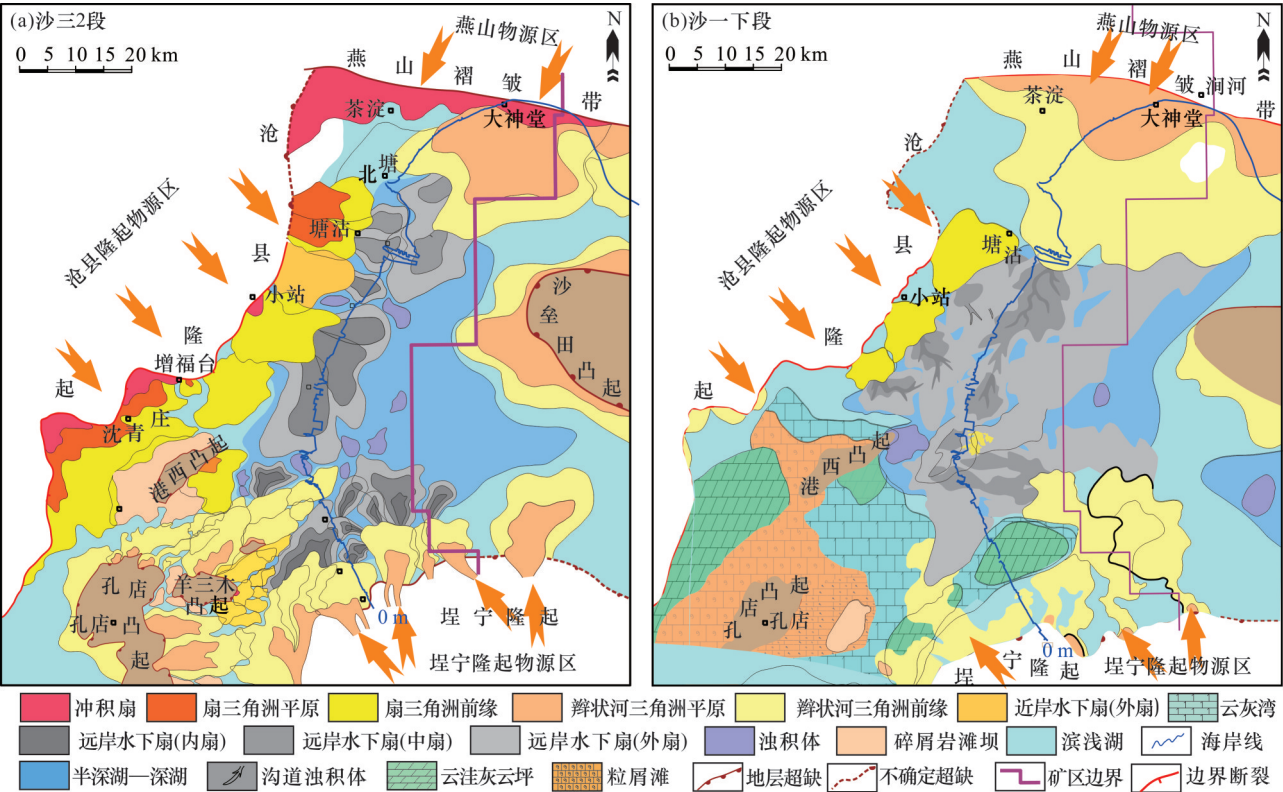


图3 歧口凹陷沉积体系(据文献[25]编修)

Fig.3 Sedimentary system of Qikou Sag(modified after Ref.[25])

3.1 有机质丰度

本文研究主要根据有机碳含量和生烃潜量,对沙河街组烃源岩进行有机质丰度评价,评价标准为 中国陆相烃源岩有机质丰度评价标准(表1)。根据对歧口凹陷沙河街组烃源岩有机质丰度统计(表2)发现:各层段有机质丰度差异较大,沙一上亚段(E_{s1}^s)、沙一中亚段(E_{s1}^z)、沙一下亚段(E_{s1}^x)、沙二段(E_{s2})和沙三段(E_{s3})的 TOC 平均含量分别为 1.47%、1.69%、1.97%、1.34%、1.46%,整体呈现从 E_{s3} 到 E_{s1}^s 到 E_{s1}^z 先增大后减小的特征。各层段生烃潜量在 E_{s1}^s 、 E_{s1}^z 、 E_{s1}^x 、 E_{s2} 和 E_{s3} 中的平均值分别为 6.71 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$ 、10.71 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$ 、17.04 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$ 、8.16 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$ 、6.65 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$,也具有和有机质丰度相同的变化趋势。从各层段烃源岩 TOC 含量和生烃潜量综合来看(图4), E_{s1}^s 、 E_{s1}^z 和 E_{s3} 烃源岩以中等—好烃源岩为主, E_{s1}^x 和 E_{s2} 差—最好烃源岩均有分布。总体来说, E_{s1}^x 烃源岩最好, E_{s1}^z 次之, E_{s1}^s 、 E_{s2} 、 E_{s3} 烃源岩略差。从各层段烃源岩氢指数(图5)来看, E_{s1}^x 烃源岩氢指数最高, E_{s1}^s 、 E_{s1}^z 和 E_{s2} 烃源岩次之, E_{s3} 烃源岩氢指数最低。

综上,研究区 E_{s1}^x 烃源岩最好,有机质丰度高、生烃潜力最大, E_{s1}^z 和 E_{s1}^s 烃源岩次之, E_{s2} 烃源岩略

差, E_{s3} 烃源岩相对更差。

表1 中国陆相烃源岩有机质丰度评价标准^[27]

Table 1 Evaluation criteria for organic matter abundance of continental source rocks in China^[27]

分类	TOC/%		$(S_1+S_2)/$ ($\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$)	
	咸水—超咸水	淡水—半咸水		
非生油岩	<0.2	<0.4	<0.5	
生油岩	差	0.2~0.4	0.4~0.6	0.5~2.0
	中等	0.4~0.6	0.6~1.0	2.0~6.0
	好	0.6~0.8	1.0~2.0	6.0~20.0
	最好	>0.8	>2.0	>20.0

3.2 有机质类型

不同类型的有机质生烃能力存在明显差别,因此有机质类型决定了有机质生烃演化的能力^[28-29]。岩石热解方法是目前评价有机质类型最常用的方法^[30]。歧口凹陷沙河街组烃源岩有机质最高热解峰值(T_{max})主要分布范围为 416~451 $^{\circ}\text{C}$,氢指数(I_{H})主要分布范围为 1.85~1 453.61 $\text{mg}_{\text{HC}}/\text{g}_{\text{TOC}}$ 。从 I_{H} — T_{max} 关系图^[26](图6)可以看出,沙河街组烃源岩有机质类型从 I 型到 III 型均有分布。 E_{s1}^s 和 E_{s1}^z 烃源岩有机质类型以 I 型和 II₁ 型为主, E_{s1}^x 、 E_{s2} 、 E_{s3} 有机质

表2 歧口凹陷沙河街组烃源岩有机质丰度统计

Table 2 Statistical table of organic matter abundance in source rocks of Shahejie Formation in Qikou Sag

层位	样品数	TOC/%			$S_2/(mg_{HC}/g_{TOC})$			$(S_1+S_2)/(mg_{HC}/g_{TOC})$		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
Es_1^s	33	0.57	2.38	1.47	0.03	15.15	6.20	0.17	16.23	6.71
Es_1^z	45	0.60	3.65	1.69	1.07	27.48	10.09	1.35	29.14	10.71
Es_1^x	90	0.20	5.45	1.97	0.01	61.86	16.00	0.02	63.98	17.04
Es_2	53	0.21	4.73	1.34	0.01	39.68	7.48	0.02	41.2	8.16
Es_3	38	0.23	5.17	1.46	0.04	32.23	5.77	0.04	34.04	6.65

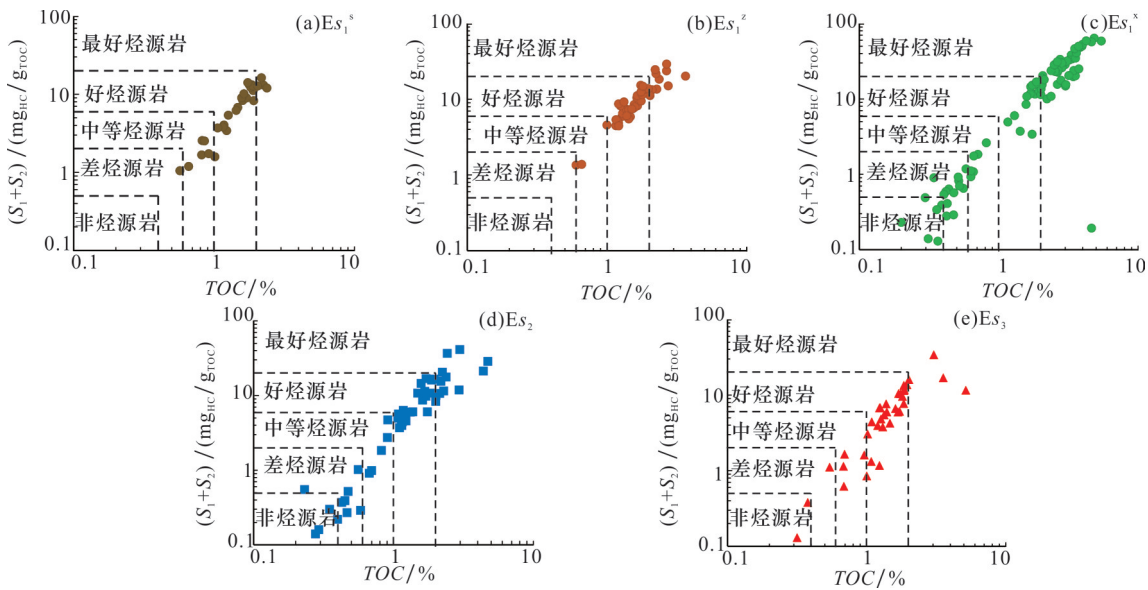


图4 歧口凹陷沙河街组烃源岩 S_1+S_2 与 TOC 关系 (坐标系为对数坐标)

Fig.4 Relationship between S_1+S_2 and TOC of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag (coordinate system is logarithmic coordinate)

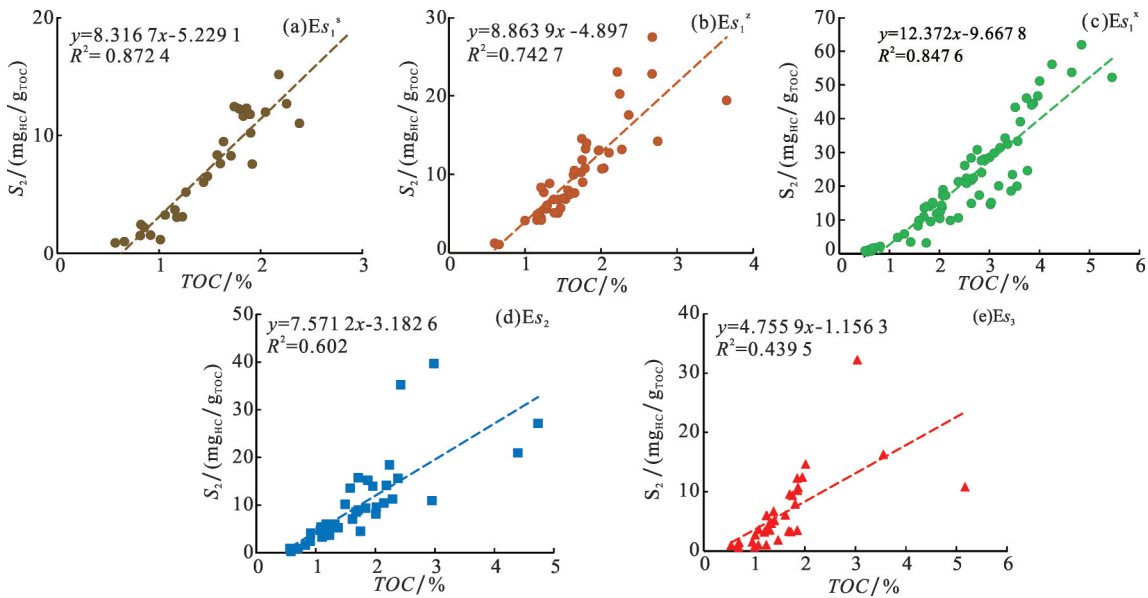
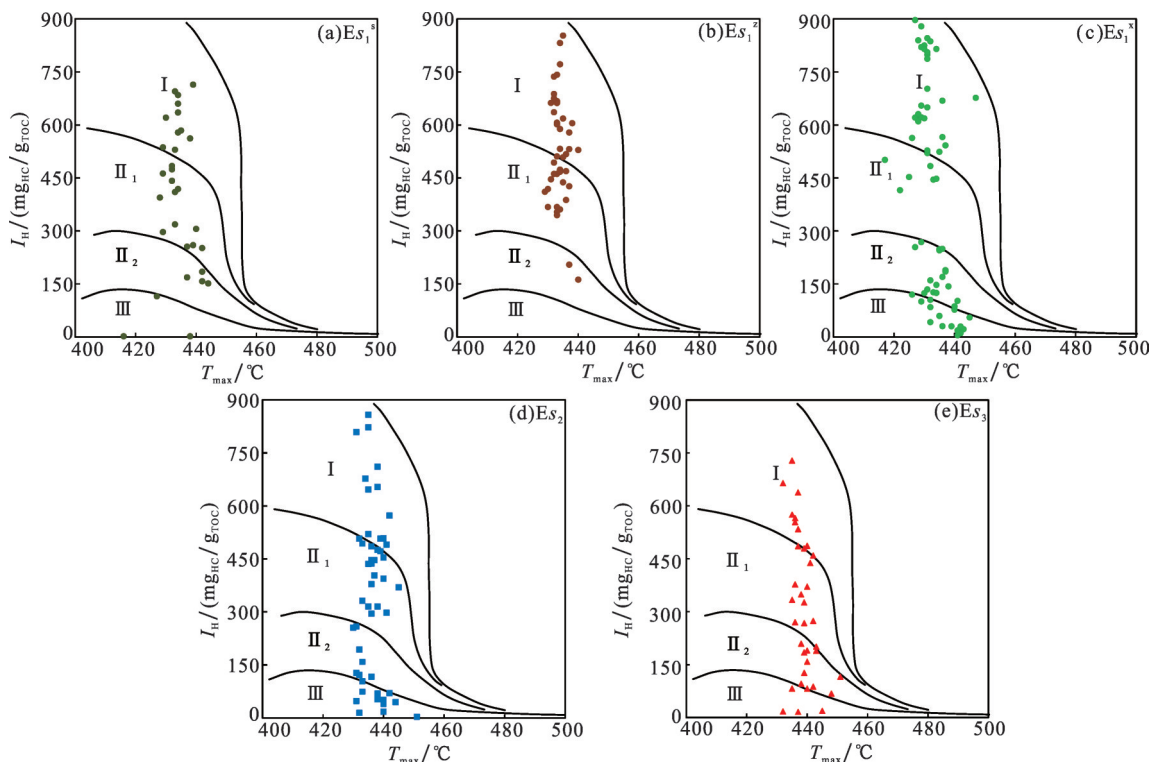


图5 歧口凹陷沙河街组烃源岩 S_2 与 TOC 关系

Fig.5 Relationship between S_2 and TOC of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

图6 歧口凹陷沙河街组烃源岩 T_{\max} 与 I_H 关系Fig.6 Relationship between T_{\max} and I_H of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

类型包括了I型到III型。

3.3 有机质成熟度

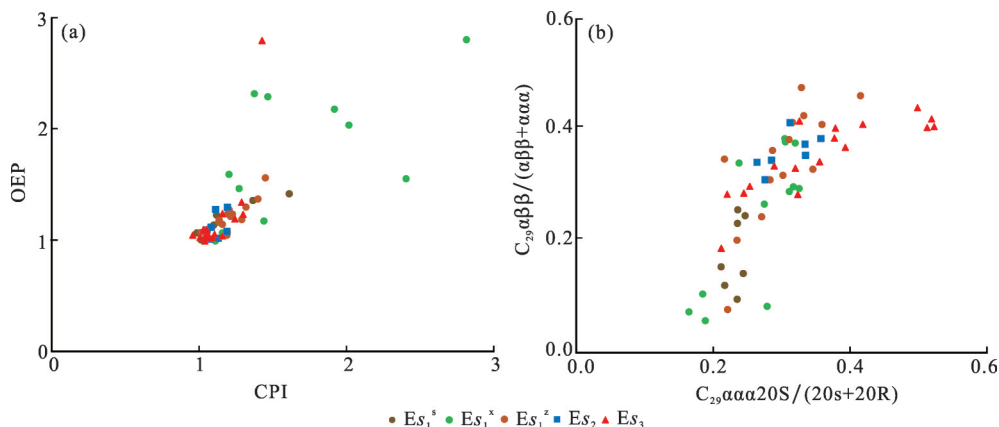
有机质成熟度反映了烃源岩有机质的热演化程度,本文研究主要应用岩石热解参数和饱和烃的生物标志化合物参数来评价烃源岩的有机质成熟度^[26-27,31]。 T_{\max} 的主要分布区间为430~450℃,处于低成熟—成熟的演化阶段。饱和烃气相色谱成熟度参数CPI(碳优势指数)值介于0.96~2.81之间, OEP(奇偶优势比)值介于0.99~2.80之间[图7(a)];

规则甾烷异构化参数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ 值介于0.06~0.48之间, $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 值介于0.16~0.52之间[图7(b)],表明歧口凹陷沙河街组烃源岩成熟度变化较大,从低成熟到成熟阶段均有分布,与热解参数反映的结论是一致的。

4 烃源岩生物标志物特征

4.1 正构烷烃

正构烷烃的分布和组成与有机质来源有关,高

图7 歧口凹陷沙河街组烃源岩 CPI-OEP(a)和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ - $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ (b)关系Fig.7 The relationship diagram between CPI and OEP (a), $C_{29}\alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ and $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ (b) of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

碳数($>C_{25}$)的正构烷烃多为陆源高等植物的演化产物,而低等水生生物的产物通常具有低碳数($<C_{20}$)的正构烷烃^[32-34]。歧口凹陷沙河街组烃源岩正构烷烃的碳数范围为 C_{11} — C_{35} ,其主峰碳以 C_{18} — C_{27} 为主,各层段烃源岩正构烷烃的分布模式以“单峰型”为主(图8)。 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 介于0.13~2.69之间,

平均值为0.75; $(C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$ 值主要介于0.68~8.47之间,平均值为2.37。正构烷烃轻重比较低,说明所选样品成熟度不高,低碳数分子与高碳数分子比值具有较大的分布范围和较高的平均值说明沙河街组烃源岩有机质来源是陆源有机质和水生生物,且低等水生生物占比较大。

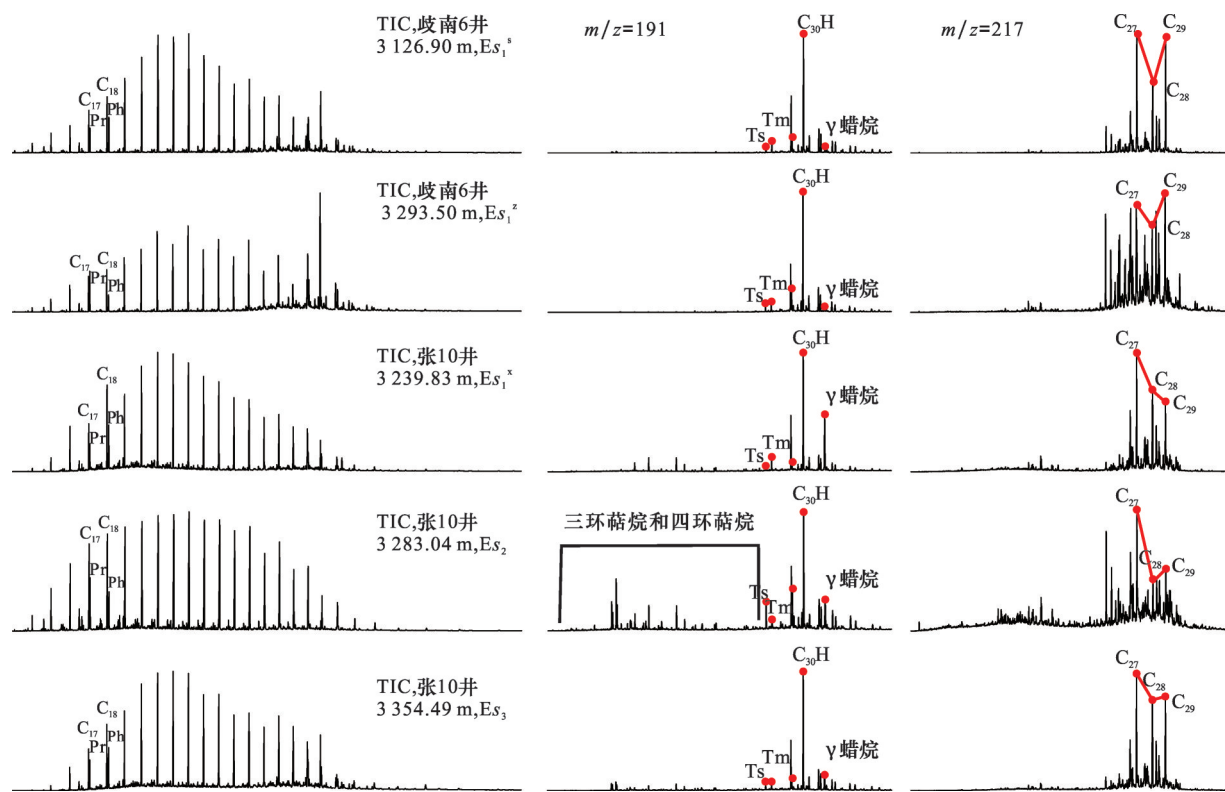


图8 歧口凹陷沙河街组烃源岩饱和烃色谱—质谱

Fig.8 Saturated hydrocarbon chromatography-mass spectrometry of Shahejie Formation source rocks in Qikou Sag

4.2 类异戊二烯烷烃

姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)分别是植醇在氧化条件和还原条件下形成的产物,因此常用姥鲛烷和植烷的分布特征反映沉积环境^[35-36]。沙河街组烃源岩Pr/Ph值分布在0.12~2.20之间,平均值为0.88,各层段之间具有明显差异。Pr/Ph值在 Es_1^s 、 Es_1^x 、 Es_1^s 、 Es_2 和 Es_3 中的平均值分别为0.77、1.25、0.52、0.85和0.89。总体来看, Es_1^x 烃源岩Pr/Ph值最低,明显是植烷占优势; Es_1^z 最高,基本上是姥鲛烷占优势; Es_1^s 、 Es_2 、 Es_3 基本持平,基本上是植烷占优势。沙河街组烃源岩Pr/Ph值自下而上呈现先减小至 Es_1^x 达到最小值,后逐渐增加,在 Es_1^z 达到最大值后又开始下降。

Pr/Ph值除了与沉积环境有关,还受到有机质来源及成熟度的影响。对于生油窗内的烃源岩来

说,高Pr/Ph值(>3.0)指示着氧化条件下的陆源有机质输入,低Pr/Ph值(<0.6)通常代表缺氧、超盐的还原环境^[32]。因此常用Pr/ n - C_{17} 值和Ph/ n - C_{18} 值来反映有机质的来源和沉积环境。歧口凹陷沙河街组烃源岩具有较低的Pr/ n - C_{17} 和Ph/ n - C_{18} 涵盖,从Pr/ n - C_{17} 与Ph/ n - C_{18} 交会图(图9)可以看出大部分样品分布于混源有机质半氧化半还原的过渡区域,有部分样品落在以水生生物为主要来源的还原环境区域,这和前文有机质类型从I型到III型均有分布反映的混源特征是一致的。

4.3 甾萜烷类生物标志物

沙河街组烃源岩抽提物中规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 、 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 的相对丰度变化较大,分布主要呈 $C_{27}>C_{28}<C_{29}$ 的“V”字型分布(图8),但也有部分样品呈 $C_{27}<C_{28}>C_{29}$ 的倒“V”字型分布。

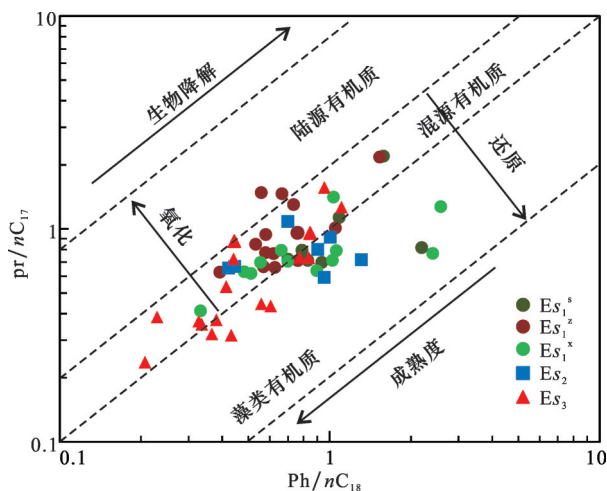


图9 歧口凹陷沙河街组烃源岩Pr/n-C₁₇与Ph/n-C₁₈关系

Fig.9 Relationship between Pr/n-C₁₇ and Ph/n-C₁₈ of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

$\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}/\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 值介于 0.37~2.29 之间,其平均值为 1.14,同样说明沙河街组样品主要有机质来源是陆源有机质和水生生物,在某些时期,湖相藻类贡献较大,导致 C_{28} 规则甾烷的含量相对更加丰富。 Σ 甾烷/ Σ 藿烷值介于 0.07~0.77 之间。从规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 、 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 三角图版(图 10)对有机质来源的表征也同样表明沙河街组烃源岩中有机母质的组成有细菌、浮游生物和高等植物,并伴有部分藻类、硅藻和苔藓。沙河街组烃源岩还含有一定数量的重排甾烷, C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 规则甾烷的比值在 0.01~0.67 之间,其平均值为 0.22,且绝大多数小于 0.40,这与前文所述烃源岩有机质处于低成熟—成熟阶段的结果是一致的。

沙河街组烃源岩抽提物中伽马蜡烷的含量变化较大,各层段之间具有明显差异。 ES_1^s 烃源岩伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷)介于 0.04~0.16 之间,其平均值为 0.09; ES_1^z 烃源岩伽马蜡烷指数介于 0.04~0.71 之间,其平均值为 0.17,且多数小于 0.20; ES_1^x 烃源岩伽马蜡烷指数介于 0.07~1.20 之间,其平均值为 0.42,且绝大多数大于 0.30; ES_2 烃源岩伽马蜡烷指数介于 0.12~0.64 之间,其平均值为 0.33,且多数大于 0.20; ES_3 烃源岩伽马蜡烷指数介于 0.06~0.32 之间,其平均值为 0.19,且多数小于 0.20。这说明沙河街组各层段烃源岩的沉积环境具有明显不同,自下而上(ES_3 — ES_1^s),从 ES_3 到 ES_1^x ,水体盐度具有明显增加的趋势,在 ES_1^x 达到峰值,随后开始逐渐下降,从 ES_1^x 到 ES_1^s ,水体盐度低于 ES_3 。根据 Pr/Ph—伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷相关关系图(图 11),我们发现伽

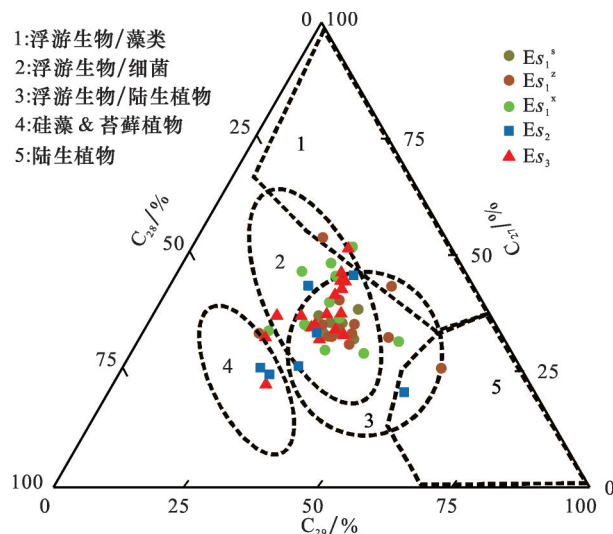


图 10 歧口凹陷沙河街组烃源岩规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 、 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ 和 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 三角分布图

Fig.10 Triangular diagram showing the distribution of regular steranes $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 、 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ and $\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ of the source rocks in the Shahejie Formation, Qikou Sag

马蜡烷/ C_{30} 藿烷与 Pr/Ph 之间具有明显的负相关关系,即水体盐度增大导致水体还原程度增加。

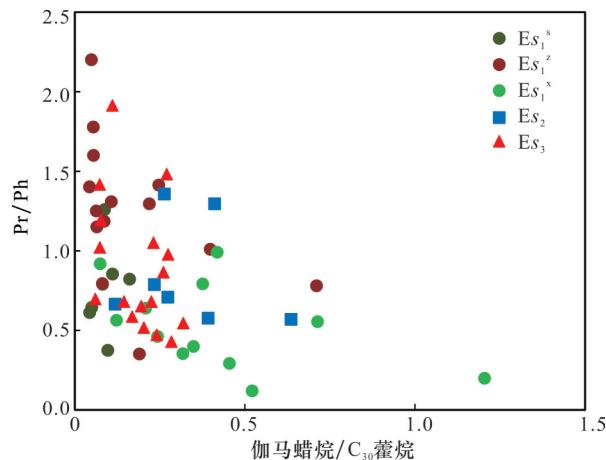


图 11 歧口凹陷沙河街组烃源岩 Pr/Ph 与伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷相关关系

Fig.11 Correlation diagram of Pr/Ph and gammacerane/ C_{30} hopane of source rocks in the Shahejie Formation, Qikou Sag

5 烃源岩无机地球化学特征及沉积环境

烃源岩中主微量元素含量及分布特征受到多种因素的影响,主要包括母岩化学性质、古气候、古环境、以及自身化学性质等,因此研究元素含量及其比值的变化对于研究烃源岩沉积期的古沉积环境具有重要意义^[37]。为了研究歧口凹陷沙河街组

烃源岩形成时的古沉积环境,我们对歧口凹陷沙河街组的20个烃源岩样品进行了主微量元素分析。

5.1 主微量元素特征

沙河街组烃源岩主量元素以 SiO_2 为主, Al_2O_3 含量次之, CaO 含量变化较大,其他元素含量整体较小。根据澳大利亚后太古代页岩(PAAS)的平均值^[38]标准化结果后,可以发现, CaO 含量明显高于

PAAS, MgO 和 P_2O_5 的含量也相对富集,这可能受当时的沉积环境的影响(图12)。

微量元素经过与PAAS的平均值标准化结果对比后发现(图13), Sr 和 Mo 明显异常富集, Ba 元素整体相对富集, Zn 、 Pb 、 U 元素变化较大,亏损和富集的均有分布。 V 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Ga 、 Th 、 Zr 、 Nb 、 Y 、 Li 元素整体处于亏损状态。

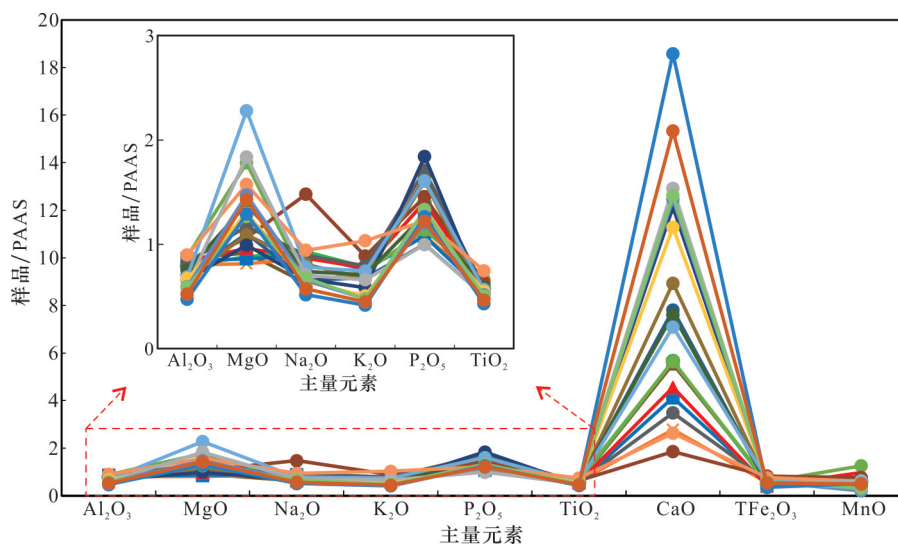


图12 歧口凹陷沙河街组烃源岩与PAAS主量元素含量对比

Fig.12 Comparison diagram of major element contents between PAAS and source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

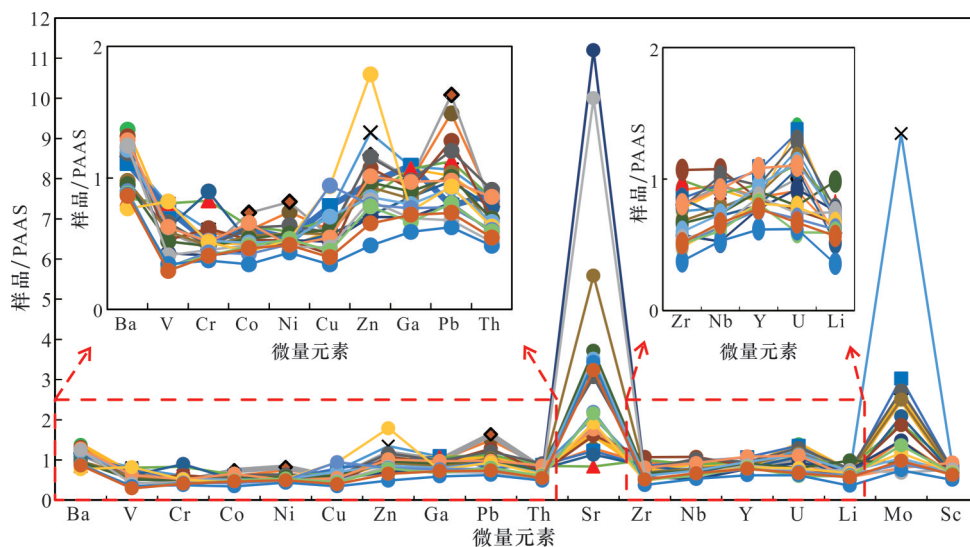


图13 歧口凹陷沙河街组烃源岩微量元素PAAS标准化图

Fig.13 PAAS standardization diagram of trace elements of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

5.2 古气候

沉积岩中微量元素 Sr/Cu 值常被当作反映古气候的指标^[39-41],但研究区 Sr 元素异常富集, Cu 元素明显亏损,导致 Sr/Cu 值明显偏大。故本次研究利用化学风化指数(CIA)来反映研究区样品遭受的化学风化强度。地壳的主要金属元素 Si 、 Al 、 Na 、 K 、

Ca 中 Al 较为稳定,但 Na 、 K 、 Ca 等碱金属元素极易流失,随着化学风化强度的逐渐增加, Al 的摩尔分数会逐渐升高^[42]。 CIA 的计算公式为:

$$\text{CIA} = \left\{ \frac{x(\text{Al}_2\text{O}_3)}{[x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{CaO}^*) + x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{K}_2\text{O})]} \right\} \times 100 \quad (1)$$

式中:CaO*代表硅酸盐中的CaO,不包含化学沉积的CaO,由于无法直接获取,通常根据以下校正公式对其进行校正^[43]:

$$\text{CaO}^* = \min \left[x(\text{CaO}) - x(\text{P}_2\text{O}_5) \times \frac{10}{3}, x(\text{Na}_2\text{O}) \right] \quad (2)$$

本文研究根据式(1)和式(2)对研究区样品化学风化指数进行了计算。结果表明,研究区样品CIA值介于68.64~79.74之间,平均值为75.79,反映了沙河街组烃源岩沉积前经历了中等化学风化强度作用,当时是温暖湿润的古气候条件。从A-CN-K图^[44-45](图14)可以看出,样品相对于理想化学风化趋势没有明显的向K端元的倾斜,表明后期加钾作用并不显著。

利用 $\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ ^[46]及Ga/Rb—

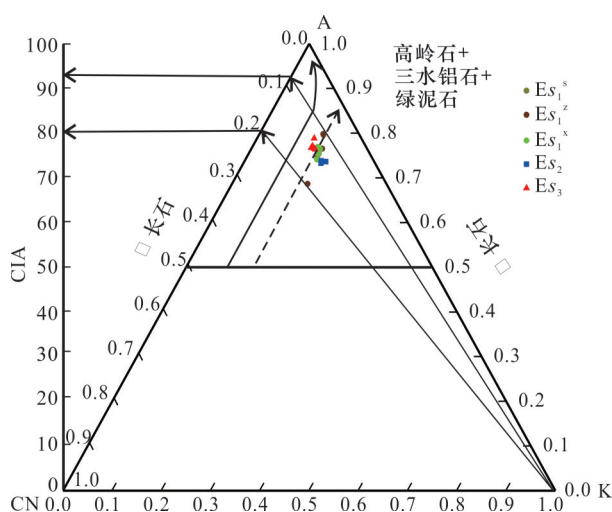


图14 歧口凹陷沙河街组烃源岩 A-CN-K图^[44-45]

Fig.14 A-CN-K diagram of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag^[44-45]

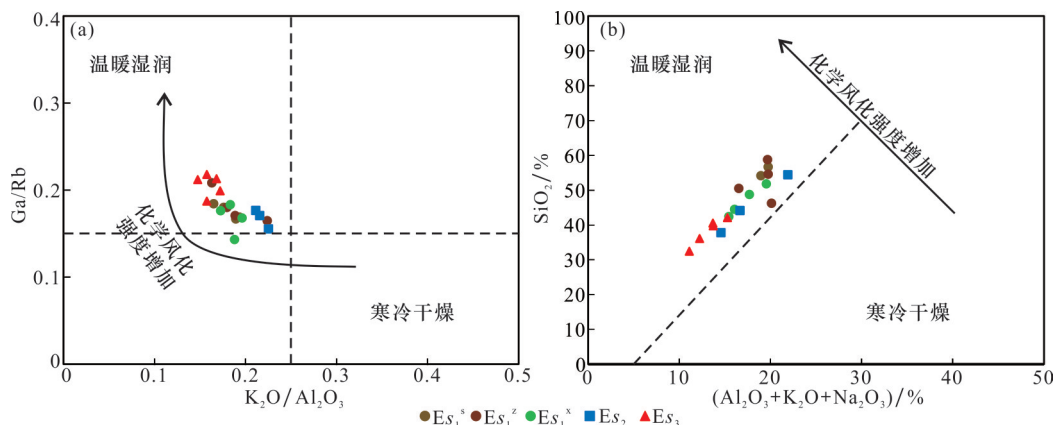


图15 歧口凹陷沙河街组烃源岩 $(\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和Ga/Rb, SiO_2 和 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 交会图

Fig.15 Crossplot of $(\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs Ga/Rb and SiO_2 vs $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ contents of the source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

$(\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ ^[47]交会图版也能反映沉积期的古气候变化。从图15也可以看出,沙河街组沉积期古气候也具有温暖湿润的整体特征。

5.3 古盐度

水体盐度也是湖泊的基本属性之一,恢复古盐度对恢复古沉积环境、研究烃源岩的形成具有重要意义^[48]。影响水体盐度的原因较多,有降水量、蒸发量、径流量等。降水量越大,水体盐度越低,蒸发量越大,水体盐度越高,河口地区陆表径流量越大,水体盐度越低。关于渤海湾盆地沙河街组沉积期是否受到海侵一直多有争议^[49]。前人^[50-63]通过发现海相化石、海相遗迹、有机地球化学(甲藻甾烷异构体和24-正丙基胆甾烷)和无机地球化学(溴氯系数、Th/U值、Sr/Ba值、锶同位素值等)方面的证据推测渤海湾盆地曾受到海侵的作用。通常断陷湖盆受到海水影响的直接结果是湖盆水体盐度会发生明显改变,因此,本文研究通过恢复研究区沙河街组沉积期的水体盐度,来说明歧口凹陷沙河街组沉积期是否受到海水入侵的影响。

水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着盐度的增大而增大,由于蒸发作用影响,水体中较轻的 ^{16}O 会被优先蒸发,假定水体温度相对不变的情况下,盐度的变化会导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化。KEITH等^[64]提出了可以用来划分海陆相的同位素系数(Z),其公式为:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (3)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均为PDB标准,海相灰岩的Z值大于120,淡水灰岩(湖相碳酸岩)的Z值小于120。

本文研究利用样品实测的碳氧同位素值计算了Z值(表3),发现所测样品Z值均大于120。结合

前人对歧口凹陷的研究成果,推测其可能受到海水的影响,所以导致了样品Z值偏大。

硼元素和镓元素具有相似的化学性质,不同沉积环境中,硼元素和镓元素的含量差别较大。在研究中发现,硼元素和镓元素含量受水体盐度影响较大,沉积水体中盐度越大,硼元素和镓元素含量越高。B/Ga值小于3的为淡水相,介于3.0~4.5之间的为半咸水相,大于4.5的为咸水相。锶元素和钡元素的含量和水体盐度有关,当水体盐度改变时,锶元素更容易发生迁移,随着水体盐度增大,钡会以硫酸钡的形式沉淀,进而造成锶元素含量升高, Sr/Ba值增大。一般认为Sr/Ba值小于0.6的为淡水环境、介于0.6~1.0之间的为半咸水环境,大于1.0的为咸水环境。因此,B/Ga值、Sr/Ba值常作为研究古盐度的指标被应用^[65-66]。此外,硼元素受到更多的研究,WALKER等^[67]根据硼元素的含量提出了“相当硼含量”指标来评价古盐度,COUCH^[68]的研究发现不同黏土矿物对硼元素的影响不同,并据此提出了对盐度进行定量恢复的方法,且得到了广泛应用。该方法定量恢复古盐度的公式为:

$$\log(B_k)=1.28\times\log(Sp)+0.11\tag{4}$$

$$B_k=\frac{B}{4X_i+2X_m+X_k}\tag{5}$$

式中:Sp为古盐度,‰;B为实测硼含量,10⁻⁶;X_i、X_m、X_k分别代表伊利石、蒙脱石、高岭石的相对含量。

本文研究利用样品实测的B含量及黏土矿物组成,根据上述公式对沙河街组沉积期的古盐度进行了定量恢复,并对不同层段古盐度(Sp)值及B/Ga值、Sr/Ba值进行了统计分析(表3)。

从B元素含量恢复的古盐度(Sp)结果可以看出,沙河街组烃源岩沉积的水进而环境整体盐度较高,Sp值介于4.84‰~10.16‰之间,平均值为7.31‰。根据对现代盐度的划分,将盐度低于1‰的称为淡水、介于1‰~30‰之间的称为半咸水,介于30‰~38‰之间的称为海水。另外,Es₃、Es₂、Es₁^x样品的Sr/Ba值、B/Ga值整体偏大。因此,歧口凹陷沙河街组沉积期水体属于半咸水的沉积环境,从各层段的Sp值可以看出,沙河街组沉积期,各层段之间水体盐度有一定的差异。从Es₃到Es₁^x到Es₁^s,水体整体经历了盐度先增加后降低的演化阶段。

5.4 氧化还原环境

沉积环境的氧化还原程度决定了有机质的保存条件,对有效烃源岩的形成具有重要影响^[69]。沉

表3 歧口凹陷沙河街组烃源岩碳氧同位素测试结果及古盐度指标统计

Table 3 Carbon and oxygen isotope test results and paleosalinity index of Shahejie Formation source rocks in Qikou Sag

编号	深度/m	层位	δ ¹³ C/‰ (VPDB)	δ ¹⁸ O/‰ (VPDB)	Z值	Sr/ Ba	B/ Ga	Sp
1	3 033.22	Es ₁ ^s	4.44	-5.06	134	0.55	2.71	7.48
2	3 065.35	Es ₁ ^s	4.06	-5.29	133	0.32	2.50	6.55
3	3 123.00	Es ₁ ^s	2.57	-5.33	130	0.46	2.37	6.24
4	3 127.50	Es ₁ ^s	3.23	-6.92	130	0.37	2.39	7.21
5	3 254.23	Es ₁ ^z	1.23	-6.82	126	0.34	2.73	7.59
6	3 293.50	Es ₁ ^z	1.45	-4.77	128	0.30	3.95	9.61
7	3 365.10	Es ₁ ^z	2.20	-5.60	129	0.37	3.11	6.76
8	3 508.59	Es ₁ ^z	7.53	-2.99	141	0.38	3.35	7.63
9	1 767.40	Es ₁ ^x	1.47	-4.37	128	0.79	3.75	10.16
10	1 770.83	Es ₁ ^x	2.31	-4.40	130	1.76	3.86	9.10
11	1 785.23	Es ₁ ^x	3.11	-3.37	132	2.77	4.61	7.37
12	1 789.65	Es ₁ ^x	1.48	-4.41	128	1.20	4.31	8.91
13	3 305.50	Es ₂	3.05	-8.87	129	0.89	3.53	7.19
14	3 382.00	Es ₂	-2.23	-10.01	118	0.42	3.11	7.49
15	2 899.00	Es ₂	1.40	-9.09	126	2.47	5.07	7.91
16	3 515.50	Es ₃	1.22	-9.41	125	0.77	3.06	6.30
17	3 518.50	Es ₃	1.24	-9.43	125	0.75	2.88	6.14
18	3 521.00	Es ₃	2.04	-9.35	127	0.75	3.53	6.30
19	3 658.00	Es ₃	1.95	-10.17	126	1.21	2.80	4.84
20	3 662.00	Es ₃	1.79	-10.02	126	1.15	2.67	5.44

积物中一些微量元素的含量变化对氧化还原程度有较好的响应,因此众多学者利用微量元素的浓度及其相关比值来表征沉积环境的氧化还原程度(表4)^[70]。近年来,有机碳/总磷(C_{org}:P)摩尔比值也被证明是有效的氧化还原指标,并得到广泛应用^[71]。藻类是海洋环境中浮游生物的主要类型,其C_{org}:P摩尔比值约为106:1^[72]。根据对现代海洋沉积物中C_{org}:P值和现代海洋底水环境氧化还原程度的研究,ALGEO等^[71]认为当C_{org}:P值小于40:1时,主要发育氧化—亚氧化环境;当C_{org}:P值高于150:1或200:1时主要发育还原环境;当C_{org}:P值介于75:

表4 沉积环境评价指标(据文献[70])

Table 4 Evaluation index of sedimentary environment (according to Ref.[70])

氧化还 原条件	评价指标				
	V/Cr	Ni/Co	V/(V+Ni)	U/Th	Cu/Zn
还原	>4.25	>7.0	>0.84	>1.25	<0.21
亚氧化	2.0~4.25	5.0~7.0	0.60~0.84	0.75~1.25	0.21~0.63
氧化	<2.0	<5.0	<0.60	<0.75	>0.63

1和130:1之间时主要发育亚氧化并间歇性还原的环境中。

根据沙河街组烃源岩主微量元素的测试结果及沉积环境氧化还原程度的相关评价指标,绘制了沙河街组烃源岩各层段氧化还原指标相关图(图16)。从各指标综合来看,歧口凹陷沙河街组沉

积期,氧化—亚氧化环境是其主要沉积环境。

5.5 古生产力

目前,用于定量评价古生产力的方法只有有机碳法。SUESS等^[73]针对有机质主要来源于海相的表浅层水体中的沉积有机质进行了研究,并提出了如下公式:

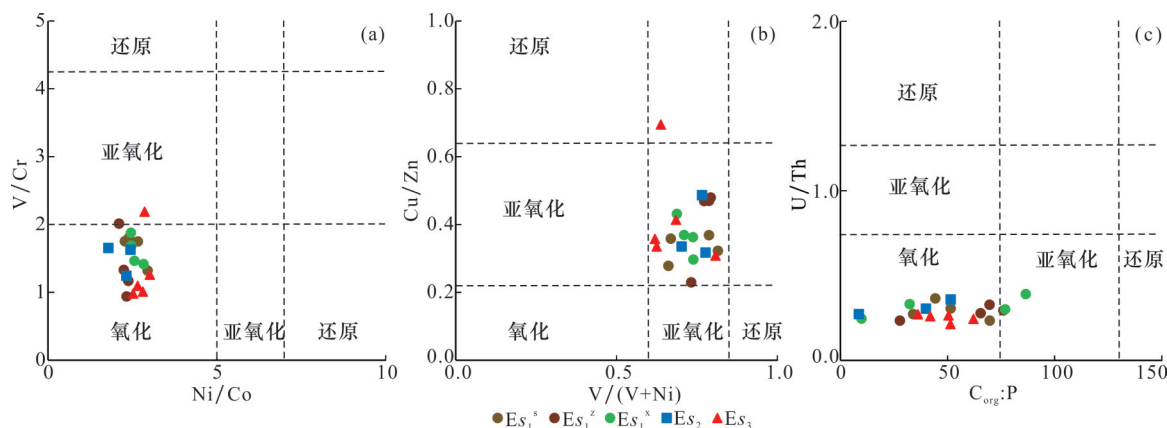


图16 歧口凹陷沙河街组烃源岩氧化还原指标相关图

Fig.16 Correlation diagram of REDOX index of Shahejie Formation source rocks in Qikou Sag

$$R = \frac{C \times \rho \times (1 - \varphi)}{0.0030 \times S^{0.30}} \quad (6)$$

式中: R 为古生产力, $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; ρ 为干沉积物密度, g/cm^3 ; C 为有机碳含量(干重),%; S 为沉积速率, cm/ka ; φ 为孔隙度,%。

李守军等^[15,17]、刘惠民等^[16]根据对我国云南的滇池、洱海和抚仙湖三大湖相湖泊的研究提出了适用于陆相湖泊的公式,并在对东营凹陷沙一段沉积期的湖泊古生产力进行研究后,对原公式进行改进得到了如下公式:

$$R = 237.5297 \times C \times \rho \times (1 - \varphi) \times S^{0.3778} \quad (7)$$

式中:参数意义同式(6)。

有机质在湖泊和海洋中的沉积,具有不同的赋存状态和来源,但他们受相同的埋藏和保存机理控制。虽然李守军等^[15,17]据此在对陆相湖泊研究时对原公式进行了改进,却也没有对陆源输入有机质造成的影响进行讨论,但是陆源有机质输入较多是湖相盆地的重要特征,因此本文首先讨论了有机质的来源。根据前文对有机质类型的研究,沙河街组烃源岩有机质来源具有混源的特征。前人^[32]研究认为, C_{29} 规则甾烷、 C_{27} 规则甾烷分别来源于陆源高等植物和水生生物,因此可以根据 C_{27} — C_{28} — C_{29} 规则甾烷的相对含量表征有机质的来源。图17反映了沙河街组烃源岩中有机质的来源为低等水生生物

和陆源高等植物。

为了剔除陆源碎屑有机质的影响,统计了 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷的相对含量,并绘制了 C_{29} 规则甾烷在各层段中的含量分布图(图18),从图中可以发现,虽然 C_{29} 规则甾烷的相对含量变化较大,分布范围为6.01%~89.34%,平均值为38.25%,但是 C_{29} 规则甾烷的主要分布区间是30%~50%。根据不同层段烃源岩数据的统计发现, Es_1^x 中 C_{29} 规则甾烷的平均相对含量较低,为34.17%,其他各层段平均含量接近,介于39.58%~40.43%之间,各层段中 C_{29} 规则甾烷的分布情况也基本相同。因此,首先根据 C_{29} 规则甾烷在各层段中的平均含量表征陆源有机质的相对含量,校正过有机碳数据后计算湖泊的古生产力。KELTS^[74]根据营养程度将现代湖泊划分为超富营养湖、富营养湖、中营养湖、贫营养湖,其古生产力大小分别为大于1000 $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、介于350~1000 $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间、介于200~350 $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间、小于200 $\text{g}_\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

根据前文研究,歧口凹陷沙河街组沉积期整体沉积环境为氧化—亚氧化环境。由于氧化—亚氧化环境中存在着有机质的降解,现存的有机质必然少于初始生产的有机质,利用残余有机碳恢复的湖泊古生产力必然小于初始古生产力。

本文研究选取歧口凹陷不同地区的典型探井,

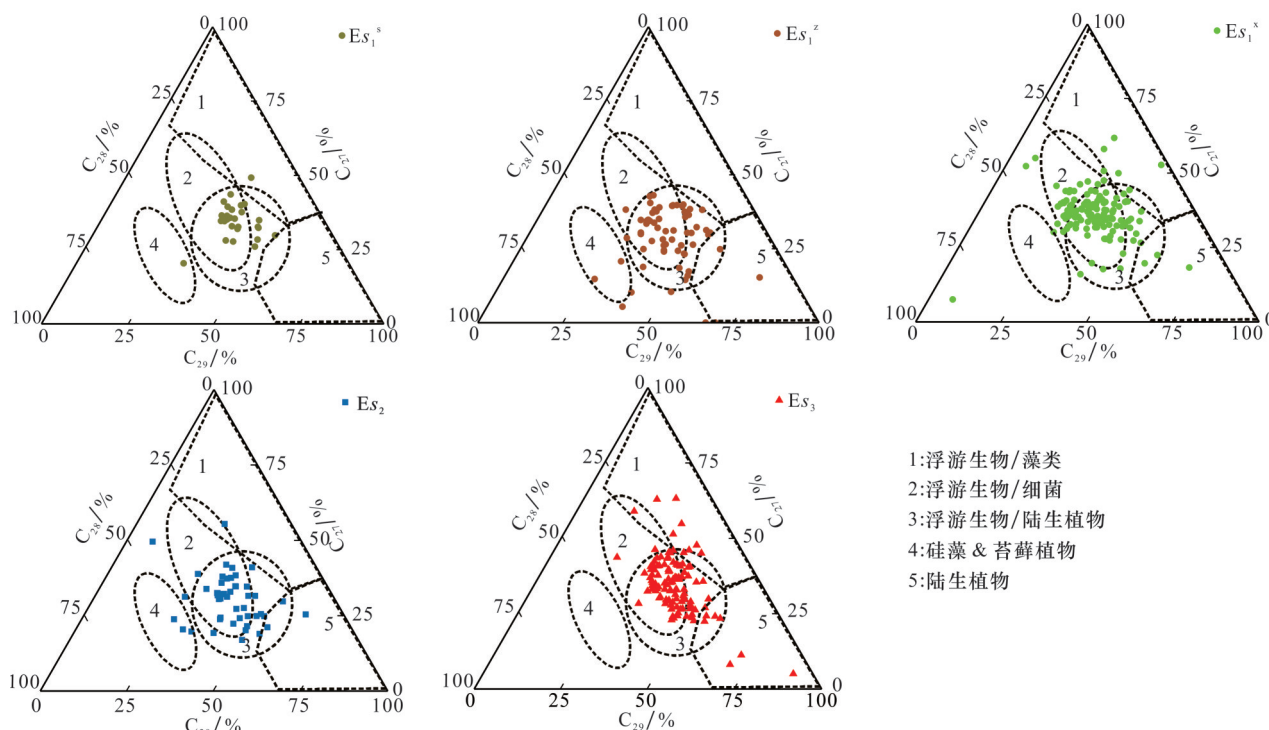


图 17 歧口凹陷沙河街组烃源岩 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}-\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}-\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 规则甾烷三角图

Fig.17 Ternary diagram of $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}-\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}-\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ regular steranes in source rocks of Shahejie Formation, Qikou Sag

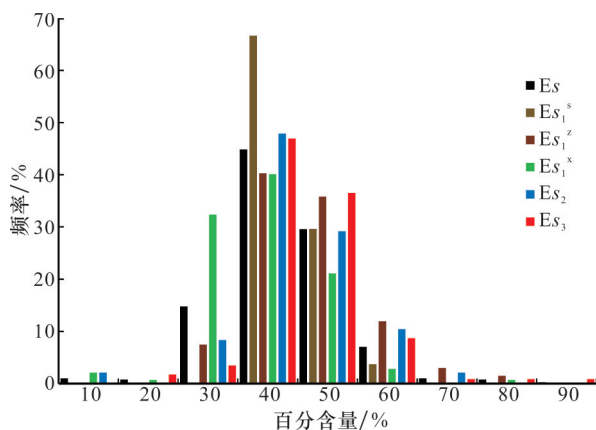


图 18 歧口凹陷沙河街组烃源岩 C_{29} 规则甾烷含量分布

Fig.18 The distribution map of C_{29} regular steranes in source rocks of Shahejie Formation, Qikou Sag

根据式(6)进行了古生产力的定量计算。结果显示,歧口凹陷沙河街组沉积期,古生产力介于 $33.82 \sim 1510.34 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,平均值为 $337.17 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,整体处于中—富营养水平。不同层段沉积期,湖泊古生产力变化较大, E_{s3} 和 E_{s2} 沉积期,湖泊古生产力平均值分别为 $267.77 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $229.50 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,处于中营养水平; E_{s1}^x 、 E_{s1}^z 和 E_{s1}^s 古生产力平均值分别为 $392.97 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $521.86 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $320.69 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,整体处于富营养水平,高于 E_{s3} 和 E_{s2} 沉积期,且 E_{s1}^z

沉积期古生产力达到最大值。

为了研究歧口凹陷沙河街组沉积期湖泊古生产力的变化规律,绘制了不同地区典型探井的古生产力纵向分布图(图19)。

纵向上看,各层系古生产力存在明显差别。板深35井,整体古生产力水平较低,处于贫营养水平,在 E_{s3} 底部古生产力水平相对较高,可以达到中营养水平,至 E_{s3} 中部有减小的趋势,到 E_{s3} 上部古生产力短暂增长,达到了中营养水平。到 E_{s2} 和 E_{s1}^x 沉积期,古生产力又有回落,直至 E_{s1}^z 后,古生产力水平又有一个短暂增长期,到 E_{s1}^z 上部及进入 E_{s1}^s 后,又开始减小。板深5-1井古生产力整体水平略高于板深35井,自下而上先增大后减小,在 E_{s3} 上部以及 E_{s1}^x 和 E_{s1}^z ,基本上长期处于中营养水平, E_{s1}^s 又回落至贫营养水平。港深48井和港深78井, E_{s2} 和 E_{s1}^x 基本处于中营养—富营养水平,且 E_{s1}^x 古生产力水平明显高于 E_{s2} 。在 E_{s1}^x 顶部开始迅速增长,可以达到富营养水平, E_{s1}^z 整体古生产力水平最高,长期处于富营养水平,甚至有段时期可以达到超富营养水平。在 E_{s1}^z 后期古生产力水平开始降低。歧南2井和歧南3井,自下而上,古生产力水平整体上先增加后减小,在 E_{s1}^z 中部达到古生产力最大值,其后逐渐

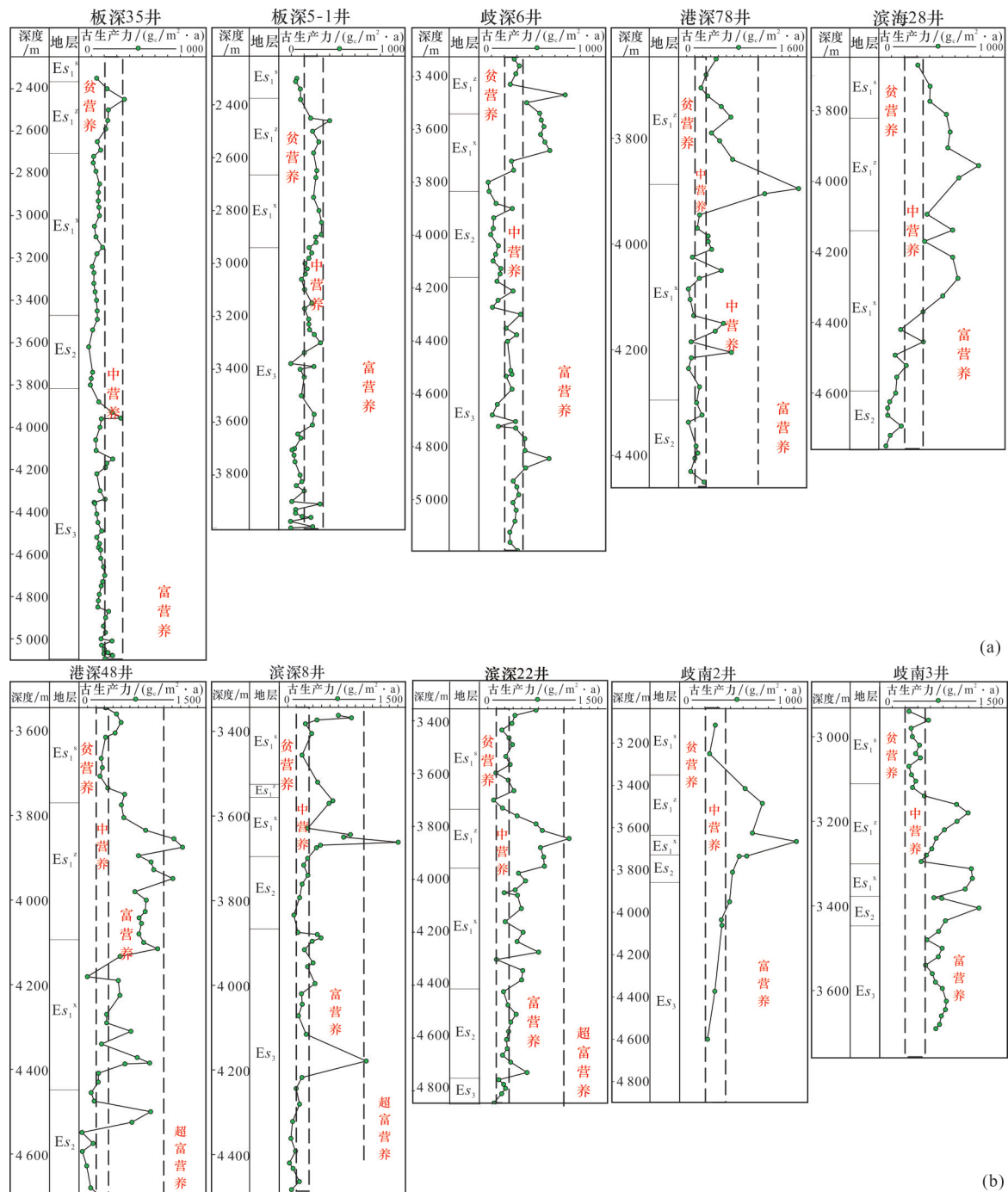


图 19 歧口凹陷典型探井沙河街组古生产力纵向分布图

Fig.19 Longitudinal distribution of palaeoproductivity of Shahejie Formation in typical wells, Qikou Sag

减小,整体处于富营养水平。统观其他各井,不难发现,沙河街组沉积期 Es_3 — Es_2 古生产力水平有所降低,进入 Es_1^x 后开始增长,经历过一个先增长后降低的轮回后,进入 Es_1^z 后,古生产力又有所增长,达到峰值后,开始回落,直至 Es_1^s 后期,又有增长趋势。

另外,根据各探井在平面区域上的位置,还可以发现板桥次凹深凹区(板深35井)古生产力水平明显低于其他地区,其古生产力整体处于贫营养水

平,仅在斜坡区(板深5-1井)的 Es_3 上部、 Es_1^z 和 Es_1^x 可以达到中营养水平。歧南次凹(歧南2井和歧南3井)和歧北次凹(港深48井和港深78井;滨深8井和滨深22井)的古生产力水平相对较高,其中歧北次凹古生产力最大值可以达到 $1510.38 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,达到超富营养的水平。

分别对比靠近陆源输入区的港深48井和靠近歧口主凹区的滨海28井的古生产力水平,港深48

井 E_{s1}^2 段平均古生产力为 $805.68\text{ g}_c/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 滨海 28 井 E_{s1}^2 段平均古生产力为 $580.82\text{ g}_c/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 靠近物源区的古生产力水平明显高于湖盆中央区。靠近物源区, 陆源碎屑输入可以带来大量的营养物质, 有利于生物的发育, 提高了古生产力的水平。

6 烃源岩分布规律及沉积环境对烃源岩发育的影响

6.1 烃源岩分布规律

本研究通过对前人分析资料的整理, 选取实

测 TOC 较多的井, 分别过滨 22 井—滨深 22 井—歧深 6 井—滨海 9 井—滨海 24 井做沙河街组烃源岩的连井剖面图(图 20)。从图 20 中可以明显看出沙河街组烃源岩在纵向上和横向上的分布都有很强的非均质性。整体来看, 自下而上, 烃源岩有机含量具有先减小后增大的趋势, E_{s1}^x 烃源岩有机质含量最高, 与上述研究结果是一致的。平面上, 从斜坡区向深凹区, 即从西南缘地区向东北地区, 沙河街组烃源岩横向连续性较好, 且有机质含量具有明显减小的趋势。虽然斜坡区烃源岩埋深浅, 有机质热

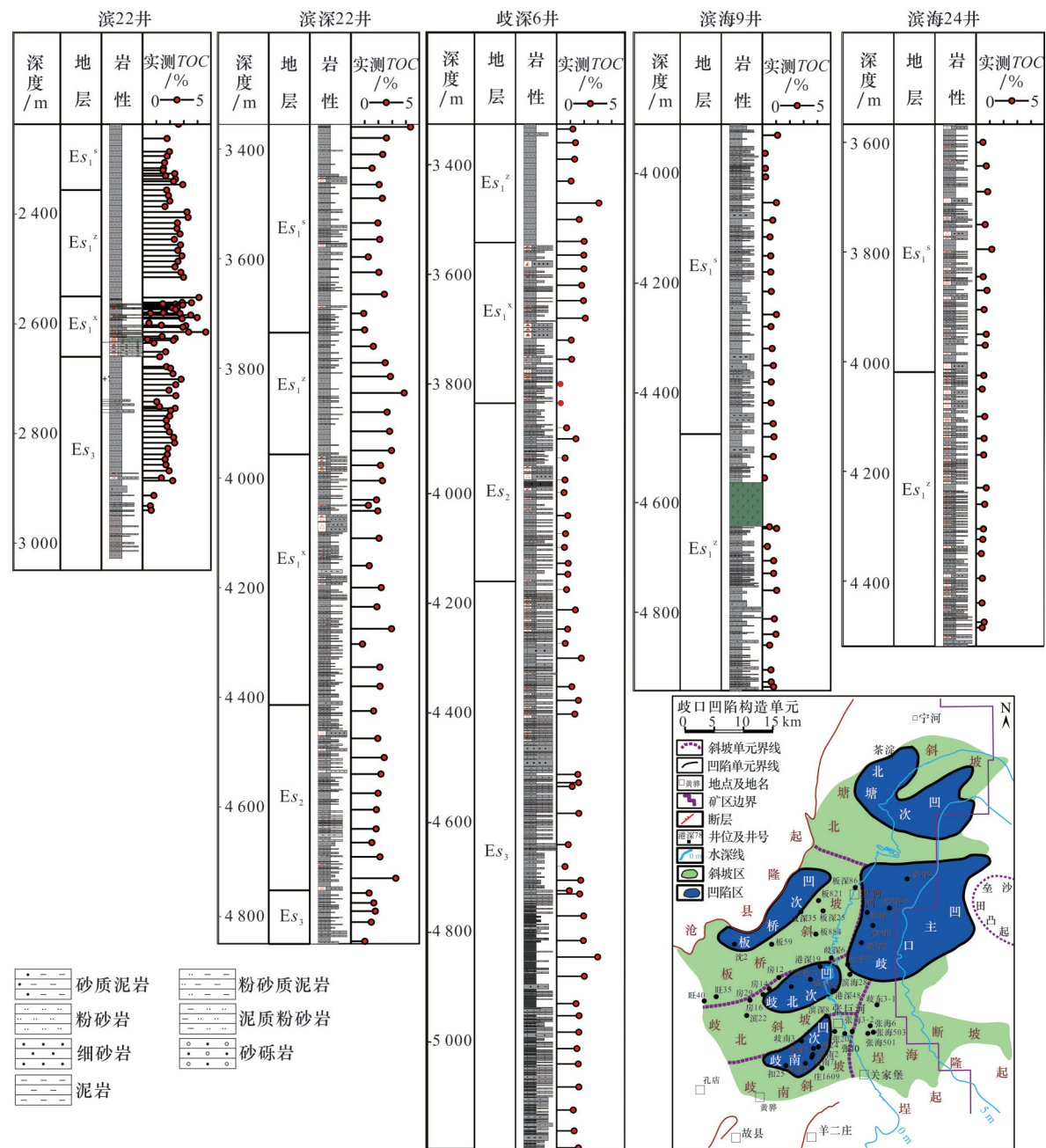


图 20 歧口凹陷沙河街组烃源岩连井剖面

Fig.20 Interwell profile of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

演化程度低,但是从烃源岩有机质丰度来说,斜坡区质量更好。

6.2 沉积环境对烃源岩发育的影响

烃源岩发育具有很强的非均质性,其影响因素较多,其中,有机质来源和沉积环境是2个重要因素。本文研究通过对QN6井(包括 E_{s1}^* 、 E_{s1}^z)、Z10井(包括 E_{s1}^* 、 E_{s2} 、 E_{s3}) [图21(a)]、W35井(E_{s1}^*) [图21(b)]纵向上有机碳和地球化学参数的演化研究,分析沉积环境对烃源岩发育的影响。

从图21(a)可以看出,纵向上 E_{s1}^z 烃源岩有机碳含量最高,从 E_{s3} 到 E_{s1}^* 烃源岩整体上具有旋回性增长的趋势: E_{s3} 到 E_{s1}^* ,有机碳含量先增加后减小, E_{s2} 烃源岩有机碳含量最高, E_{s1}^* 到 E_{s1}^z ,烃源岩有机碳含量出现另一个增长旋回, E_{s1}^z 烃源岩有机碳含量最高,且增长趋势更加明显,增长幅度远大于第一个旋回。剖面1中有机质来源参数轻重比($\Sigma C_{21}^-/\Sigma C_{22}^+$)介于0.13~1.15之间,平均值为0.58;低碳数分子与高碳数分子($C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$ 值介于0.75~4.94之间,平均值为1.80;规则甾烷 C_{27}/C_{29} 值介于0.43~2.29之间,平均值为1.05;综合各参数分析有机质来源的变化,发现纵向上各层段中水生生物有机质占比的变化规律与有机碳变化趋势一致。 Pr/Ph 值介于0.35~2.20之间,平均值为0.96; Pr/nC_{17} 值介于0.37~2.18之间,平均值为0.87; Ph/nC_{18} 值介于0.33~1.53之间,平均值为0.72。说明烃源岩整体形成于氧化—半氧化半还原环境,有间歇性还原环境出现。其纵向上变化规律总体与有机碳含量变化规律以及水生生物所占比重变化规律一致。伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值介于0.04~0.71之间,平均值为0.22。纵向上,从 E_{s3} 到 E_{s1}^* 急剧增长,至 E_{s1}^* 达到峰值后又迅速下降,至 E_{s1}^z 和 E_{s1}^* 后,其值低于 E_{s3} 。 E_{s1}^* 低 Pr/Ph 值、高伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值说明 E_{s1}^* 水体盐度较高,还原性增强。该段有机碳含量较低,说明急剧变化的高盐度水体环境不适合该区水生生物的广泛发育。陆源有机质的输入虽然能够提供有机质的来源,但是湖泊原生古生产力受到较大影响,导致该时期该井区烃源岩质量较差。 E_{s1}^z 水体盐度开始迅速降低,水生生物占比明显增大,沉积环境也处于半氧化半还原的过渡区域,烃源岩质量明显提高。因此,湖盆水体盐度急剧增加虽然可以明显提高水体的还原程度,但同时降低了该井区湖泊的原生古生产力,导致烃源岩质量变差。

从图21(b)可以看出,纵向上 E_{s1}^* 烃源岩有机碳含量先增加后减小,在整体维持较高水平的过程中,有过短暂回落。剖面中有机质来源参数轻重比($\Sigma C_{21}^-/\Sigma C_{22}^+$)介于0.28~0.89之间,平均值为0.65;低碳数分子与高碳数分子($C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$ 值介于0.51~2.56之间,平均值为1.12;规则甾烷 C_{27}/C_{29} 值介于0.64~2.01之间,平均值为1.44;综合各参数分析有机质来源的变化,发现 E_{s1}^* 水生生物有机质占比整体较大。 Pr/Ph 值介于0.12~0.92之间,平均值为0.35,且整体小于0.5; Pr/nC_{17} 值介于0.71~1.72之间,平均值为1.08; Ph/nC_{18} 值介于1.02~4.36之间,平均值为2.12。伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值介于0.07~0.80之间,平均值为0.42。纵向上伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值具有和有机碳含量相同的演化趋势,先增加后减小,在整体维持较高水平的过程中,有过短暂回落。 E_{s1}^* 极低的 Pr/Ph 值、较高的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值说明 E_{s1}^* 水体盐度较高,水体还原性明显增强,该段有机碳含量整体处于较高水平,说明急剧变化的高盐度水体环境促进了该区水生生物的广泛发育,湖泊原生古生产力受到较大影响,导致该时期该井区烃源岩质量较好。

综上所述,湖盆水体盐度急剧增加可以明显提高水体的还原程度,对烃源岩的保存条件产生积极影响。但是,水体盐度对湖泊的原生古生产力具有双重影响(图22)。在低盐度阶段,随着水体盐度增加,导致广盐性生物勃发,湖泊古生产力提高,为烃源岩形成提供了大量的有机质,有利于烃源岩的形成;在高盐度阶段,水体盐度的增加,导致狭盐性生物的大量减少,湖泊古生产力降低,烃源岩有机质供给量减少,不利于烃源岩的形成。因此,湖泊原生古生产力是控制烃源岩形成的关键因素。

6.3 烃源岩发育模式

根据对歧口凹陷沙河街组沉积期古水体盐度的恢复结果及古气候环境的综合分析并结合前人研究成果,认为该地区沙河街组沉积期湖盆水体受到了海水的影响。海水进入湖盆的直接结果是导致湖盆水体盐度发生改变,在一定程度上影响了湖盆内水生生物的发育并导致沉积环境发生改变。适当的盐度范围使得该地区出现过生物勃发,古生产力水平出现过短期的明显提高,可以达到超富营养水平。稳定的陆源有机质输入和歧口凹陷沙河街组较高的古生产力为该区烃源岩的形成提供了物质基础,间歇性的还原环境为该地区优质烃源岩

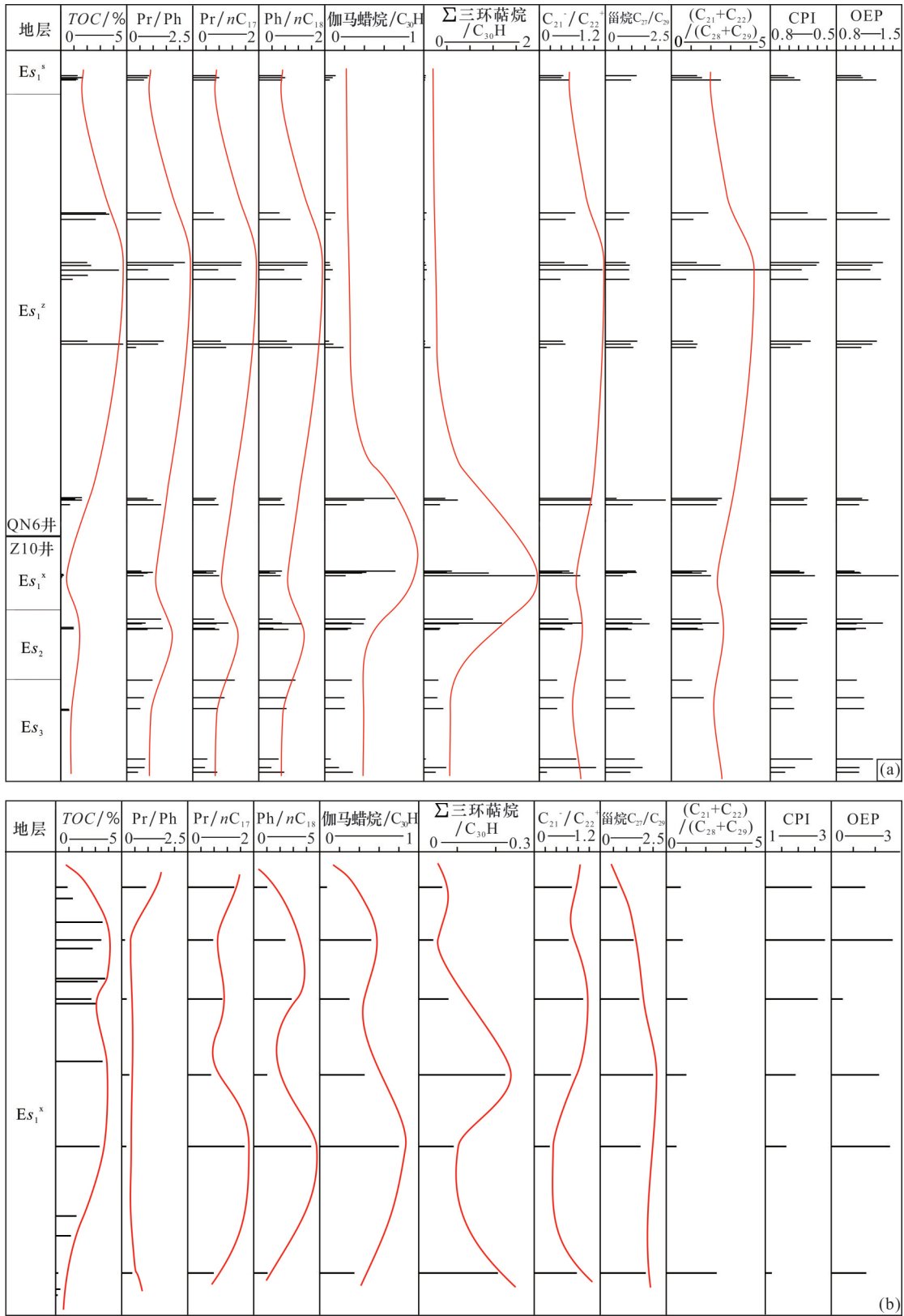


图 21 歧口凹陷沙河街组烃源岩有机碳(a)和地球化学参数(b)演化剖面

Fig.21 Evolution profile of organic carbon(a) and geochemical parameters(b) of source rocks of Shahejie Formation in Qikou Sag

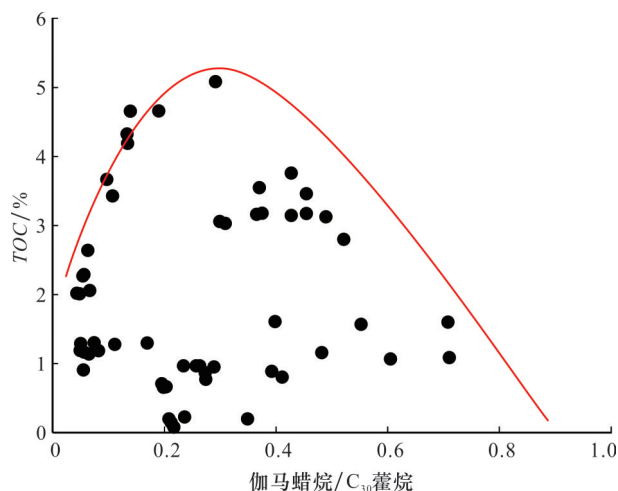


图 22 歧口凹陷沙河街组烃源岩伽马蜡烷/C₃₀藿烷与有机碳含量关系

Fig.22 Relationships between Gammanane/C₃₀ hopane and TOC of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

的形成提供了保障。据此,建立了歧口凹陷沙河街组受海水影响的烃源岩形成模式(图 23)。

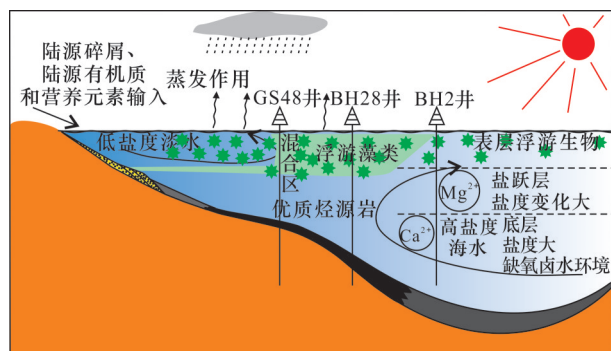


图 23 歧口凹陷沙河街组烃源岩形成模式

Fig.23 The formation model of source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag

和其他的典型烃源岩形成模式相比,歧口凹陷属于陆相断陷湖盆,沙河街组沉积期构造活动强,湖盆水深较大,水体受海水入侵的影响,盐度较大,在整体沉降的背景下,温暖潮湿的古气候条件加强了母源区的风化强度,带来了大量的陆源碎屑和陆源有机质,为湖盆水体提供了充足的营养物质,导致河流入湖口区的河流淡水和高盐度海水混合,水生生物广泛发育,陆源有机质和水生有机质的双重贡献促进了斜坡区优质烃源岩的形成。底层水体虽然盐度更大、还原程度更高,但是,远离陆源区导致水体营养物质贫乏、且沉积时间久,有机质降解严重,所以深凹区烃源岩质量相对较差。

7 结论

以渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组烃源岩为研究对象,研究了其基本地球化学特征与分布,沙河街组沉积期的古气候条件、水体古盐度、氧化还原环境和湖泊古生产力,探讨了烃源岩的形成机理、明确了影响烃源岩形成的主要因素,并得到以下新的认识和结论:

(1)歧口凹陷沙河街组烃源岩有机质丰度达到中等—最好的级别,整体具有从E_{s3}到E_{s1}到E_{s1}呈现先增大后减小的特征。有机质类型从I型到III型均有分布,反映沙河街组沉积期有机质来源为湖泊原生有机质和陆源有机质混源。

(2)对沙河街组沉积期的古气候研究表明,该地区受到中等风化强度影响,沙河街组沉积期古气候条件整体为温暖湿润,非常适合生物的发育。

(3)通过对歧口凹陷沙河街组沉积期水体古盐度的恢复,歧口凹陷水体盐度较高,属于半咸水环境,明显受到海水的影响。古盐度和有机质含量的关系表明,在低盐度阶段,有机质含量随古盐度的升高而增大;在高盐度阶段,有机质含量随古盐度的升高而减小。

(4)根据微量元素比值和C_{org}:P摩尔比值,歧口凹陷沙河街组沉积期发育氧化—亚氧化的沉积环境,Pr/Ph特征表明E_{s1}还原性增强,有利于有机质的保存。

(5)歧口凹陷沙河街组沉积期湖泊营养程度整体较高,可以达到中—富营养水平,具备的初始生产力较高。板桥地区古生产力较低,为贫—中营养湖泊。在纵向上,沙河街组沉积期古生产力水平具有E_{s1}>E_{s3}>E_{s2}的特征。

(6)由于陆源有机质和水生有机质的双重贡献,使歧口凹陷的斜坡区优质烃源岩更为发育。

参考文献(References)

- [1] 蒋有录,苏圣民,刘华,等.渤海湾盆地古近系油气富集差异性及其主控因素[J].石油与天然气地质,2020,41(2):248-258.
JIANG Y L, SU S M, LIU H, et al. Differential hydrocarbon enrichment of the Paleogene and its main controlling factors in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 248-258.
- [2] 蒋有录,苏圣民,刘华,等.渤海湾盆地新生界沉积洼陷类型及与油气富集的关系[J].石油学报,2019,40(6):635-645.
JIANG Y L, SU S M, LIU H, et al. Types of Cenozoic sedi-

- mentary subsags and their relationship with hydrocarbon enrichment in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(6): 635-645.
- [3] 蒋有录, 王鑫, 于倩倩, 等. 渤海湾盆地含油气凹陷压力场特征及与油气富集关系[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1361-1369. JIANG Y L, WANG X, YU Q Q, et al. Pressure field characteristics of petroliferous depression and its relationship with hydrocarbon enrichment in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1361-1369.
- [4] 高先志, 赵贤正, 张万选. 渤海湾盆地天然气地质及气田分布特征[J]. *天然气工业*, 1992, 12(2): 24-29, 7. GAO X Z, ZHAO X Z, ZHANG W X. Natural gas geology and gas field distribution characteristics in Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1992, 12(2): 24-29, 7.
- [5] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 渤海湾盆地古近纪超深水与极超深水沉积及油气地质意义[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(3): 521-532. ZHONG J H, NI L T, SHAO Z F, et al. Identification of the ultra deep water deposition of the Bohai Bay Basin during the Paleogene and its significance for oil and gas geology[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(3): 521-532.
- [6] 袁选俊, 譙汉生. 渤海湾盆地富油气凹陷隐蔽油气藏勘探[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(2): 130-133. YUAN X J, QIAO H S. Exploration of subtle reservoir in prolific depression of Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(2): 130-133.
- [7] 龙华山, 向才富, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组天然气赋存状态及其勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(5): 665-678. LONG H S, XIANG C F, NIU J Y, et al. Occurrences of the natural gas in Shahejie Formation of Qikou Depression in Bohai Bay Basin and its exploration significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(5): 665-678.
- [8] 姜文亚, 宋泽章, 周立宏, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷地层压力结构特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(1): 52-69. JIANG W Y, SONG Z Z, ZHOU L H, et al. Characteristics of formation-pressure-structure of Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(1): 52-69.
- [9] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆地相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅凹陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 143-162. ZHAO X Z, PU X G, ZHOU L H, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143-162.
- [10] 周立宏, 肖敦清, 蒲秀刚, 等. 陆相断陷湖盆复式叠合油气成藏与优势相富集新模式——以渤海湾盆地歧口凹陷为例[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(1): 7-11. ZHOU L H, XIAO D Q, PU X G, et al. New pattern of composite superimposed reservoirs and advantageous phase accumulation in continental rifted lake basin: A case study from Qikou Sag of Bohai Bay Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(1): 7-11.
- [11] 丁修建, 柳广弟, 黄志龙, 等. 有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用[J]. *地球科学*, 2016, 41(5): 832-842. DING X J, LIU G D, HUANG Z L, et al. Controlling function of organic matter supply and preservation on formation of source rocks[J]. *Earth Science*, 2016, 41(5): 832-842.
- [12] 丁修建, 柳广弟, 赵龙梅, 等. 小型断陷湖盆有机质富集和烃源岩形成机制——以二连盆地地下白垩统腾格尔组一段为例[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(6): 650-657. DING X J, LIU G D, ZHAO L M, et al. Organic matter enrichment and hydrocarbon source rock forming mechanism in small-scale faulted lacustrine basins: A case from the first member of Lower Cretaceous Tenger Formation in Erlian Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(6): 650-657.
- [13] 丁修建. 小型断陷湖盆高丰度烃源岩形成机理及其对成藏的控制——以二连盆地为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014. DING X J. Formation Mechanism of Effective Source Rock and Its Control on Hydrocarbon Accumulation in Small Faulted Lacustrine Basin: A Case Study of Erlian Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2014.
- [14] 袁伟. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富有机质页岩形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. YUAN W. Formation Mechanism of The Organic-rich Shales in the 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [15] 李守军, 郑德顺, 耿福兰. 定量再造湖泊古生产力的尝试[J]. *高校地质学报*, 2002, 8(2): 215-219. LI S J, ZHENG D S, GENG F L. An attempt on quantitative calculation of lake paleoproductivity[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(2): 215-219.
- [16] 刘惠民, 李守军, 郑德顺, 等. 东营凹陷沙三段沉积期湖泊古生产力研究[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 65-67. LIU H M, LI S J, ZHENG D S, et al. Lacustrine palaeoproductivity in the third member of the Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 65-67.
- [17] 李守军, 王纪存, 郑德顺, 等. 东营凹陷沙河街组一段沉积时期的湖泊古生产力[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(6): 656-658. LI S J, WANG J C, ZHENG D S, et al. Study on palaeoproductivity of the lake during the deposition of the 1st member of Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. *Oil & Gas Geology*,

- 2004, 25(6): 656-658.
- [18] 胡玮, 卢宗盛, 喻鹏. 陆相盆地古生产力研究现状[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 15-20.
- HU W, LU Z S, YU P. Current status of paleoproductivity research in continental basins[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 15-20.
- [19] 王振升, 滑双君, 于学敏, 等. 歧口凹陷沙河街组烃源岩分级评价及优质烃源岩分布[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1896-1902.
- WANG Z S, HUA S J, YU X M, et al. Grading evaluation and high quality source rock distribution in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1896-1902.
- [20] 姜文亚, 柳飒. 层序地层格架中优质烃源岩分布与控制因素——以歧口凹陷古近系为例[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(2): 51-58.
- JIANG W Y, LIU S. Distribution and controlling factors of high-quality hydrocarbon source rock in sequential stratigraphic framework: Taking Paleogene System in Qikou Depression for instance[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(2): 51-58.
- [21] 于超, 孙超因. 歧口凹陷古近系沙一段烃源岩成烃环境与沉积有机相研究[J]. 录井工程, 2015, 26(4): 70-73, 80.
- YU C, SUN C N. Studies on hydrocarbon source rocks environment and sedimentary organic facies for Paleogene Shale member, Qikou Sag[J]. Mud Logging Engineering, 2015, 26(4): 70-73, 80.
- [22] 蒲秀刚, 周立宏, 王文革, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷斜坡区中深层碎屑岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 36-48.
- PU X G, ZHOU L H, WANG W G, et al. Medium-deep clastic reservoirs in the slope area of Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 36-48.
- [23] ZHOU L H, FU L X, LOU D, et al. Structural anatomy and dynamics of evolution of the Qikou Sag, Bohai Bay Basin: Implications for the destruction of North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012(47): 94-106.
- [24] 柳广弟, 王德强. 黄骅坳陷歧口凹陷深层异常压力特征[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 22-24, 16, 8, 7.
- LIU G D, WANG D Q. The characteristics of abnormal pressure in deep formations in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 22-24, 16, 8, 7.
- [25] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沉积体系重建与储集层评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 565-578.
- ZHAO X Z, PU X G, ZHOU L H, et al. Reconstruction of Paleogene sedimentary system and reservoir evaluation in Qikou Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(5): 565-578.
- [26] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 206-213.
- LU S F, ZHANG M. Oil and Gas Geochemical[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 206-213.
- [27] 中国石油天然气总公司. 陆相烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735—1995[S]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- China National Petroleum Corporation. Evaluation Criteria for Organic Matter of Terrestrial Hydrocarbon Source Rock: SY/T 5735-1995[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [28] 杜治利, 田亚, 刘洪军, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长9段页岩气资源潜力评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 358-367.
- DU Z L, TIAN Y, LIU H J, et al. Shale gas resource potential evaluation of Chang 9 Member, Yanchang Formation in South Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(2): 358-367.
- [29] 李天军, 黄志龙, 王瑞, 等. 银根—额济纳旗盆地天草凹陷下白垩统巴音戈壁组有效烃源岩地球化学特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 957-972.
- LI T J, HUANG Z L, WANG R, et al. Geochemical characteristics and formation environment of effective hydrocarbon source rock of the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in Tiancao Sag, Yingen-ejinaqi Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 957-972.
- [30] 郭立言, 顾信章. 热解技术在我国生油岩研究中的应用[J]. 石油学报, 1986, 7(2): 13-19.
- WU L Y, GU X Z. The application of pyrolysis technique in source rock research[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(2): 13-19.
- [31] 赵文, 郭小文, 何生. 生物标志化合物成熟度参数有效性: 以伊通盆地烃源岩为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(6): 23-31.
- ZHAO W, GUO X W, HE S. Analysis on validity of maturity parameters of biomarkers: A case study from source rocks in Yitong Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(6): 23-31.
- [32] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 475-640.
- [33] HUANG W Y, MEINSCHEN W G. Sterols as ecological indicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(3): 739-745.
- [34] CZOCHANSKA Z, GILBERT T D, PHILP R P, et al. Geochemical application of sterane and triterpane biomarkers to a description of oils from the Taranaki Basin in New Zealand[J]. Organic Geochemistry, 1988, 12(2): 123-135.
- [35] 鹿坤, 左银辉, 梅冰, 等. 东濮凹陷古沉积环境及其对有机质丰度的影响[J]. 地质与勘探, 2013, 49(3): 589-594.

- LU K, ZUO Y H, MEI B, et al. Paleo-sedimentary environments in the Dongpu Depression and their impact on organic matter abundance[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(3): 589-594.
- [36] 任拥军, 宋全友. 青藏措勤盆地白垩统烃源岩中可溶有机质的地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 2000, 36(4): 64-77.
- REN Y J, SONG Q Y. Geochemical characteristics of the soluble organic matter in the Lower Cretaceous potential source rocks in Cuoqin Basin, Qingzang Plateau[J]. *Geology and Exploration*, 2000, 36(4): 64-77.
- [37] 邱欣卫. 鄂尔多斯盆地延长期富烃凹陷特征及其形成的动力学环境[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- QIU X W. Characteristics and Dynamic Setting of Yanchang Period Hydrocarbon-rich Depression in Ordos Basin, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [38] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [39] 赵增义, 赵建华, 王海静, 等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30(2): 30-32.
- ZHAO Z Y, ZHAO J H, WANG H J, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2007, 30(2): 30-32.
- [40] 任海鹰, 葛运华. 织纳煤田中寨矿区晚二叠世泥岩地球化学特征及沉积环境意义[J]. *中国煤炭地质*, 2016, 28(2): 7-10.
- REN H Y, GE Y H. Late Permian mudstone geochemical features and sedimentary environment significance in Zhonghai mine area, China Coalfield[J]. *Coal Geology of China*, 2016, 28(2): 7-10.
- [41] MORADI A V, SARI A, AKKAYA P. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hancili Formation) in the Cankiri-Corum Basin, Central Turkey: Implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance and tectonic setting [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 341(15): 289-303.
- [42] NESBITT H W, YOUNG G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [43] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101: 295-303.
- [44] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924.
- [45] FEDO C M, YOUNG G M, NESBITT H W. Paleoclimatic control on the composition of the paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to ice-house transition[J]. *Precambrian Research*, 1997, 86: 201-223.
- [46] SUTTNER L J, DUTTA P K. Alluvial sandstone composition and palaeoclimate. 1. Framework mineralogy[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986, 56: 329-345.
- [47] ROY D K, ROSER B P. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir Basin, Bangladesh[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1163-1171.
- [48] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 22-27.
- ZHENG R C, LIU M Q. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 22-27.
- [49] 腾格尔. 海相地层元素、碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系——以鄂尔多斯盆地为例[D]. 兰州: 中科院兰州地质研究所, 2004.
- TENG G E. The Distribution of Elements, Carbon and Oxygen Isotopes on Marine Strata and Environment Correlation Between They and Hydrocarbon Source Rocks Formation: An Example from Ordovician Basin, China [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [50] 袁文芳, 陈世悦, 曾昌民. 渤海湾盆地古近纪海侵问题研究进展及展望[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 604-612.
- YUAN W F, CHEN S Y, ZENG C M. Research development and prospects on Paleogene sea transgression in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 604-612.
- [51] 李应暹, 卢宗盛, 王丹. 辽河盆地陆相遗迹化石与沉积环境研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-146.
- LI Y X, LU Z S, WANG D. Research on Terrestrial Trace Fossils and Sedimentary Environment in the Liaohe Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-146.
- [52] 吴贤涛, 任来义. 渤海湾盆地古近纪海水通道与储层探新[J]. *古生物学报*, 2004, 43(1): 147-154.
- WU X T, REN L Y. The tertiary seaway and new reservoir probe in Dongpu Depression as well as its surrounded basins [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2004, 43(1): 147-154.
- [53] 牟晓慧, 董兆雄, 张建, 等. 歧口凹陷沙一段颗石灰岩的发现及其环境意义[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(5): 45-47.
- MOU X H, DONG Z X, ZHANG J, et al. The finding of coralline limestone and its environment significance in Qikou Depression in Shahejie 1 Member[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2007, 29(5): 45-47.
- [54] 何镜宇, 余素玉. 黄骅坳陷北部下第三系的海绿石[J]. *地球科学*, 1982, 7(1): 129-143.
- HE J Y, YU S Y. Occurrence of glauconite in lower tertiary of northern Huanghua Depression[J]. *Earth Science*, 1982, 7(1): 129-143.
- [55] 葛瑞全. 济阳坳陷新生界海绿石的存在及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 276-280.
- GE R Q. Occurrence and geological significance of glauconite in Cenozoic Group of Jiyang Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 276-280.

- logica Sinica, 2004, 22(2): 276-280.
- [56] 葛瑞全, 宋传春, 淳萍, 等. 济阳沾一车凹陷古近系沙河街组海侵的再认识[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 450-457.
- GE R Q, SONG C C, CHUN P, et al. Restudy on the Shahejie Formation transgression of the Paleocene in Zhan-Che Sag (Jiyang Depression) [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 450-457.
- [57] 侯读杰, 王铁冠, 张一伟. 中国东部第三系陆相沉积中的甲藻甾烷: 海侵指相的标志物? [J]. 地质论评, 1997, 43(5): 524-528.
- HOU D J, WANG T G, ZHANG Y W. Dinosteranes in the tertiary terrestrial deposits, eastern China: The marker of marine transgression facies? [J]. Geological Review, 1997, 43(5): 524-528.
- [58] 任来义, 林桂芳, 谈玉明, 等. 从古生物和地球化学标志看东濮凹陷早第三纪的海侵事件[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 20-23.
- REN L Y, LIN G F, TAN Y M, et al. Studying marine transgression of Early Tertiary in Dongpu Depression from Paleontologic and geochemical marks [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2002, 17(1): 20-23.
- [59] 田景春, 尹观, 覃建雄, 等. 中国东部早第三纪海侵与湖相白云岩成因之关系——以东营凹陷沙河街组为例[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(4): 34-38.
- TIAN J C, YIN G, QIN J X, et al. The relationship between the transgression of Eocene and the origin of lacustrine dolomite in eastern China [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1998, 12(4): 34-38.
- [60] 邓运华. 歧口凹陷沙一下碳酸盐岩形成环境探讨[J]. 石油勘探与开发, 1990, 16(1): 8-13.
- DENG Y H. An analysis of the depositional environment of Sha₁ carbonate rocks in Qikou Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 16(1): 8-13.
- [61] 廖静, 董兆雄, 翟桂云, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河几组一段下亚段湖相白云岩及其与海相白云岩的差异[J]. 海相油气地质, 2008, 13(1): 18-24.
- LIAO J, DONG Z X, ZHAI G Y, et al. Feature of Oligocene Shahejie lower-1st member lacustrine dolostone in Qikou Depression, Bohaiwan Basin, and difference of it from marine dolostone [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(1): 18-24.
- [62] 陈世悦, 李聪, 杨勇强, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩形成环境[J]. 地质学报, 2012, 86(10): 1679-1687.
- CHEN S Y, LI C, YANG Y Q, et al. Depression environment of the lacustrine dolomite in Sha-1 lower submember of the Qikou Sag, Huanghua Depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(10): 1679-1687.
- [63] 杨扬, 高福红, 蒲秀刚. 歧口凹陷古近系沙河街组白云岩稀土元素特征及成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 38(2): 1-9.
- YANG Y, GAO F H, PU X G. REE characteristics and genesis of dolostones from Paleogene Shahejie Formation in Qikou Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 38(2): 1-9.
- [64] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(11): 1787-1816.
- [65] POTTER P E, SHIMP N F, WITTERS J. Trace elements in marine and fresh-water argillaceous sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963, 27(6): 669-694.
- [66] ZHANG X G, LIN C Y, ZAHID M A, et al. Paleosalinity and water body type of Eocene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 158: 469-478.
- [67] WALKER C T, PRICE N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illities and shale [J]. AAPG Bulletin, 1963, 47: 833-841.
- [68] COUCH E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data [J]. AAPG Bulletin, 1971, 55: 1829-1837.
- [69] LEVANTHAL J S. Carbon and sulfur relationships in Devonian shales from the Appalachian Basin as an indicator of environments of deposition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47: 133-137.
- [70] 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 402-410.
- CHEN J F. New geochemical proxies in paleoceanography studies [J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(3): 402-410.
- [71] ALGEO T J, INGALL E. Sedimentary Corg: P ratios, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric PO₂ [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 256(3-4): 130-155.
- [72] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, 46: 205-222.
- [73] SUESS E, MULLER P J. Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic matter in the oceans: II [C]. Proceedings of the CNRS Symposium on the Benthic Boundary layer, Marseille, France, 17-26.
- [74] KELTS K. Environment of Deposition of Lacustrine Petroleum Source Rocks: An Introduction [C]// FLEET A J, KELTS K, TALBOT M R, et al. Lacustrine Petroleum Source Rocks. London: Geological Society Special Publication, 1988, 3-29.

The paleo-sedimentary environment and formation mechanism of the source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin

LIU Xiangbai^{1,2}, LIU Guangdi^{1,2}, SONG Zezhang^{1,2}, JIANG Wenya³, WANG Na³

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

2.College of Geosciences, China University of Petroleum—Beijing, Beijing 102249, China;

3.Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: The distribution of source rocks is closely related to their sedimentary environment and has an important influence on the distribution of oil and gas. The evaluation of the source rocks and the study of their sedimentary environment can point out the direction for the next exploration in the Qikou Sag. In this paper, starting from the development and evolution of source rocks, the geochemical characteristics, distribution law and formation mechanism of source rocks in the Shahejie Formation in Qikou Sag are studied in depth. The geochemical analysis shows that the abundance of organic matter has reached the medium-best level and the contents of organic matter has the characteristics of increasing firstly from Es3 to Es1x and then decreasing from Es1x to Es1s. The types of organic matter are type I to type III, and the organic matter are dominated by type I and type III in Es1s and Es1z, while by type I to type III in Es1x, Es2, Es3, reflecting that the source of organic matter in the sedimentary period of the Shahejie Formation was lacustrine primary organic matter mixed with terrigenous organic matter. The distribution of source rocks in the Shahejie Formation on the plane has the characteristics of wide area and large thickness, and high-quality source rocks are more developed in the slope area. The paleoclimate during the sedimentary period of the Shahejie Formation was affected by moderate weathering intensity, and the overall warm and humid paleoclimate conditions during this period were conducive to the development of organisms. The high paleosalinity of the water belongs to the brackish water. There is no obvious correlation between paleosalinity and paleoclimate, and the high paleosalinity of water may be influenced by seawater intrusion. The relationship between paleosalinity and the content of organic matter shows that in the low paleosalinity stage, the abundance of organic matter increases with the increase of paleosalinity, and in the high paleosalinity stage, the abundance of organic matter decreases when the paleosalinity increases. According to the ratio of trace elements and Corg:P molar ratio, an oxidative-suboxidative depositional environment developed during the deposition of the Shahejie Formation in Qikou Sag, and the Pr/Ph ratio show that a strong reducing environment developed intermittently in Es1x, which is conducive to the preservation of organic matter. The evaluation of the paleoproductivity at the period of the Shahejie Formation deposited shows that the lake had medium-high nutrient content and primary productivity was medium-high, while the Banqiao Sag had low-medium nutrient content and had low-medium primary productivity. The relatively high paleoproductivity and the high input of terrigenous organic matter in the Qikou Sag, with the highest value in Es1 period and the lowest value in Es2 period, provide a rich material basis for the formation of source rocks. The paleoproductivity is the main factor affecting the formation of source rocks in the Shahejie Formation in Qikou Sag. Due to the dual contribution of terrigenous organic matter and aquatic organic matter in the slope area, high-quality source rocks are more developed here.

Key words: Source rock; Paleoclimate; Paleosalinity; Redox conditions; Paleoproductivity; Qikou Sag

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41772127); the National Key R & D Program of China (Grant No. 2017YFC0603106).