歧口凹陷滨海斜坡沙一中亚段烃源岩地球化学特征及沉积环境

朱华汇，陈家旭*，张佼杨，张明振，石倩茹，董越崎，付东立，唐鹿鹿

中国石油大港油田公司，天津 300280

第一作者，E-mail：zhuhhui@petrochina.com.cn

* 通信作者，E-mail：chenjxu@petrochina.com.cn

2024-11-02 收稿；2024-12-17 修回；2024-12-23 接受

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0043-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240651

摘　要：歧口凹陷滨海斜坡沙一中亚段烃源岩评价和沉积环境研究薄弱，制约了油气勘探向海域拓展。基于滨海斜坡新钻揭的烃源岩样品，利用岩石热解、饱和烃色谱-质谱、元素录井技术等手段，对沙一中亚段烃源岩的地球化学特征、沉积环境和发育模式进行了系统研究。研究结果表明：滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的总有机碳质量分数介于 0.21%～8.61%，平均为 2.41%，生烃潜量平均为 9.73 mg/g，以好-优质烃源岩为主；有机质类型主要为Ⅱ$_1$～Ⅱ$_2$型干酪根；烃源岩镜质体反射率介于 0.58%～1.32%，整体处于低熟-成熟阶段。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的有机质来源于陆生高等植物和水生生物混源，发育于弱氧化-弱还原的淡水湖盆环境，沉积时期湖盆水体较深，气候温暖潮湿，湖盆古生产力处于较高水平。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩有机质类型较好，有机质丰度高，成熟度适中，湖盆沉积环境利于有机质的富集和保存，烃源岩生烃能力较强，具备勘探潜力。

关键词：烃源岩；沉积环境；沙一中亚段；歧口凹陷；滨海斜坡；地球化学

歧口凹陷是黄骅坳陷最重要的富油气凹陷之一，具备丰富的油气资源。经过 60 年的勘探实践，已经在歧口凹陷古近系发现了东三段、沙一段和沙三段共 3 套生烃层系，主力烃源层为沙一段和沙三段[1-3]。近年来，随着油气勘探向海域拓展，在滨海斜坡部署的 TD73X1 等探井在沙一中亚段获得突破，展示出滨海斜坡沙一中亚段烃源岩良好的生烃潜力。前人对歧口凹陷沙一段烃源岩的有机地球化学特征、无机地球化学特征和沉积环境开展过研究，但多集中在沙一下亚段烃源岩，认为沙一下亚段烃源岩受到海水侵入的影响，沉积于干旱气候下的咸水湖盆环境，营养物质丰富，生产力水平高[4-7]。前人对歧口凹陷沙一中亚段烃源岩的研究主要以凹陷为对象开展，对歧口凹陷沙一中亚段烃源岩整体的有机质丰度、类型、成熟度开展过评价，认为沙一中亚段的总有机碳质量分数 w(TOC)介于 0.36%～4.29%，有机质类型以Ⅰ和Ⅱ$_1$型为主，成熟度从低成熟到成熟阶段均有分布[4-5, 8]。但受钻井条件制约，对滨海斜坡沙一中亚段烃源岩研究较少。勘探实践表明，不同区域、不同层位的烃源岩在质量和分布上具有较强的非均质性[9]，对于滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的地球化学特征及沉积环境研究缺少系统分析，制约了油气勘探向海域拓展。

在复杂陆相断陷湖盆中，烃源岩的非均质性强，优质烃源岩的形成受控于古气候、古水深、古盐度、古氧相、古生产力等沉积环境[10-12]。恢复烃源岩的古沉积环境对于烃源岩评价，烃源岩非均质性刻画和烃源岩发育模式研究有重要意义[13-16]。本研究基于岩石热解、总有机碳质量分数测定、全岩 X 射线衍射(X-ray diffraction，简称 XRD)、元素录井技术

著录信息：朱华汇，陈家旭，张佼杨，等. 歧口凹陷滨海斜坡沙一中亚段烃源岩地球化学特征及沉积环境[J]. 地质科技通报，2025，44(3)：43-56.
ZHU Huahui, CHEN Jiaxu, ZHANG Jiaoyang, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope, Qikou Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 43-56.

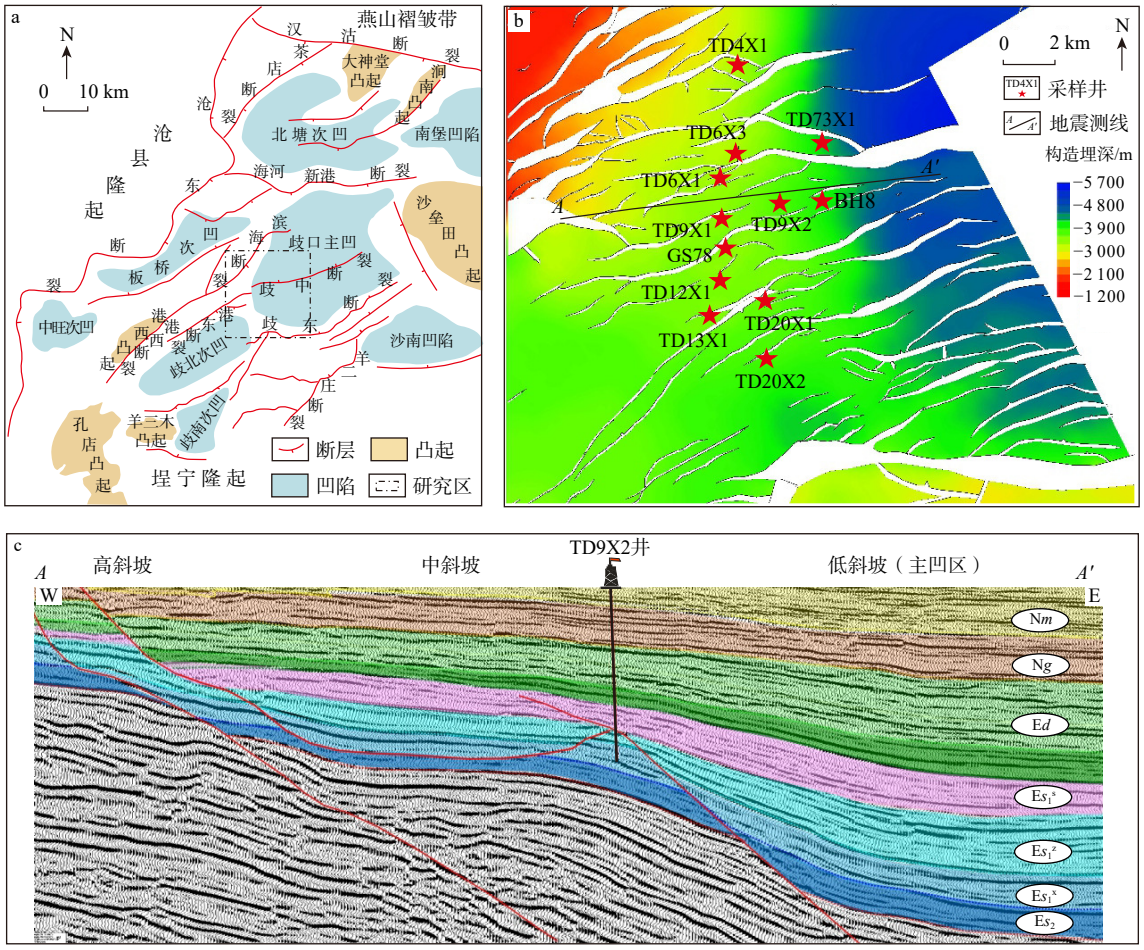
© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

等无机化学分析和干酪根镜检、镜质体反射率测定、饱和烃色谱−质谱分析等有机地球化学方法，对滨海斜坡 12 口重点井的沙一中亚段烃源岩的地球化学特征进行分析，恢复烃源岩的沉积环境，并建立滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的发育模式。研究结果进一步夯实了滨海斜坡油气资源基础，为进一步选择有利勘探方向提供了有益的借鉴。

1　地质背景

黄骅坳陷位于渤海湾盆地腹地，是渤海湾盆地重要的组成部分之一[17-18]。歧口凹陷位于黄骅坳陷中北部，为黄骅坳陷的一个次级断陷构造单元，是黄骅坳陷最重要的生油凹陷之一[19-21]。歧口凹陷西侧受沧东断裂控制与沧县隆起相接，东侧至沙垒田凸起与渤中坳陷相望，北部以汉沽断裂为界与燕山褶皱带相邻，南部止于埕宁隆起和孔店−羊三木凸起（图 1a）。歧口凹陷为长期继承性发育凹陷，自古近纪以来，歧口凹陷经历了古近纪裂陷和新近纪裂后热沉降 2 个阶段[6]。歧口凹陷内部发育 1 个主凹、4 个次凹共 5 个规模不等的次级凹陷单元，形成隆凹相间、环绕歧口主凹、多沉降中心共存的宏观格局（图 1a）。

滨海斜坡位于歧口凹陷中部北大港构造带东倾次端，是滨海断鼻向歧口主凹过渡的大型东倾斜坡构造（图 1b）[1]。受热沉降作用控制，滨海斜坡基底不均匀性差异沉降，形成具备多个呈阶状展布产状多变的挠曲坡折带（图 1c）。滨海斜坡主要发育 NE 向和 NW 向 2 组不同走向的断裂，形成东西分带的构造特征，由西向东划分为高、中、低 3 个斜坡带（图 1c）。滨海斜坡高斜坡为依附于滨海断裂系的大型断鼻构造，断裂结构复杂，发育多个断鼻、断块构造；中斜坡北侧发育一地堑构造，南侧发育北调断阶构造，主断裂不发育；低斜坡夹持与歧中—歧东断层间的北调断阶构造，歧中断层下降盘为单一的东倾斜坡构造，断裂不发育（图 1c）。



Nm. 明化镇组；Ng. 馆陶组；Ed. 东营组；Es_1^s. 沙一上亚段；Es_1^z. 沙一中亚段；Es_1^x. 沙一下亚段；Es_2. 沙二段；下同

图 1　歧口凹陷构造位置图 (a)、滨海斜坡沙一中亚段底界深度图 (b) 和测线 A−A'地震剖面图 (c)

Fig. 1　Location map of the Qikou Sag (a), depth contour map of the bottom (b) and seismic profile of cross section A−A' (c) in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

受北部燕山褶皱带、西部沧县隆起、南部埕宁隆起、东部沙垒田凸起等多物源供给控制，歧口凹陷古近系沉积了巨厚的碎屑岩和少量碳酸盐岩[5, 22]。滨海斜坡古近系自下而上发育沙河街组和东营组，其中沙河街组可划分为沙三段、沙二段和沙一段，沙一段可以进一步划分为沙一下亚段、沙一中亚段和沙一上亚段[1]。在沙一中亚段沉积期，湖盆古生产力长期处于富营养水平，滨海斜坡以沉积泥岩为主，夹少量砂岩[5]。

2 烃源岩地球化学特征

2.1 岩性特征

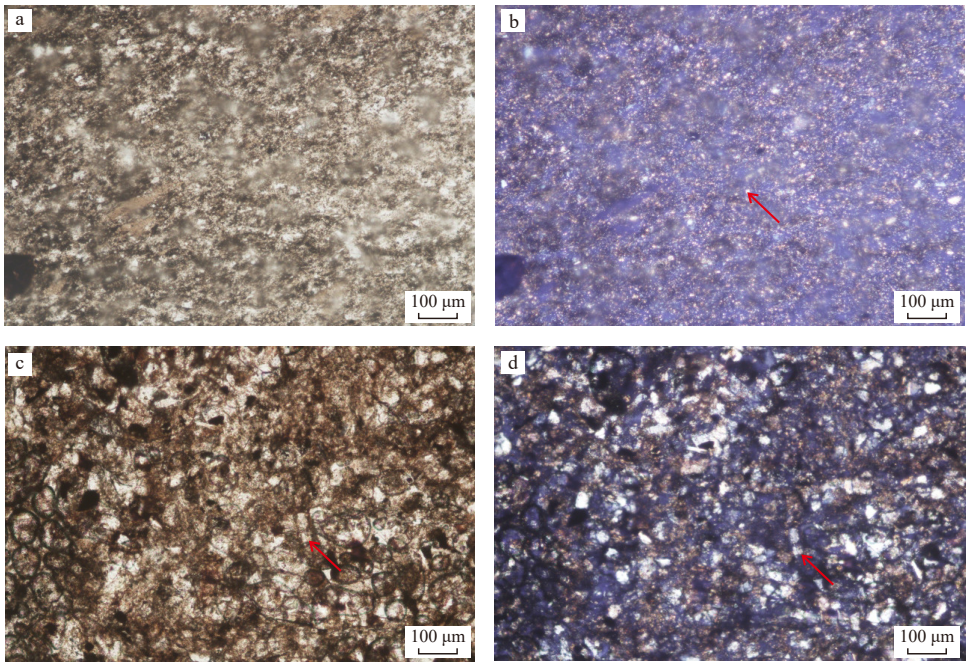
滨海斜坡沙一中亚段岩性以泥岩、灰质泥岩和砂质泥岩为主，夹杂少量粉砂岩和泥质粉砂岩，泥岩厚度约占地层总厚度的 80%。研究区泥岩 XRD 表明沙一中亚段烃源岩由石英、斜长石、方解石、白云石、铁白云石、石盐、硬石膏、菱铁矿、黄铁矿、方沸石、辉石、磁铁矿、黏土矿物等十余种矿物组成，其中，石英质量分数 20% ~ 52%，斜长石质量分数 13% ~ 36%，方解石质量分数 0 ~ 25%，铁白云石质量分数 0 ~ 15%，黏土矿物质量分数 7% ~ 30%。整体上，滨海斜坡沙一中亚段烃源岩成分中长英质矿物占比约 54.8%，碳酸盐占比约 19.6%，黏土矿物占比约 22.5%，石盐、硬石膏、菱铁矿等其他矿物占比相对较小。

普通薄片镜下观察显示，烃源岩主要成分为泥质，呈现泥质结构，见少量星点状泥晶碳酸盐分布（图 2a, b）。在部分烃源岩中，石英、长石、酸性喷出岩等碎屑颗粒略具定向分布，压实作用强烈，泥质胶结，局部见泥质、泥碳酸盐富集分布（图 2c, d）。

2.2 有机质特征

2.2.1 有机质丰度

有机质丰度是指烃源岩中有机质富集程度，是油气形成的重要物质基础，同时也是烃源岩评价最基本指标之一[23]。依据《烃源岩地球化学评价方法》（SY/T5735-2019）[24]，常见的评价烃源岩有机质丰度的指标包括总有机碳质量分数（w(TOC)）、生烃潜量（S_1+S_2）和 w(氯仿沥青“A”)。如表 1 所示，滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的 w(TOC)分布于 0.21% ~ 8.61% 之间，均值为 2.41%；(S_1+S_2)分布于 1.24 ~ 79.14 mg/g 之间，均值为 9.73 mg/g；w(氯仿沥青“A”)分布于 0.167 8% ~ 0.597 9% 之间，均值为 0.443 8%。沙一中亚段烃源岩样品的(S_1+S_2)与 w(TOC)的关系图显示不同泥岩样品之间的差异较大，但(S_1+S_2)与 w(TOC)具有强烈的正相关性（图 3）。《烃源岩地球化学评价方法》(SY/T5735-2019)[24] 显示好烃源岩的 w(TOC)≥1%，(S_1+S_2)≥6 mg/g 和 w(氯仿沥青“A”)≥0.1%[24]。滨海斜坡 10 口井泥岩的 w(TOC)，



a. TD73X1 井，深度 4 450 m，灰质泥岩，泥质结构均匀，单偏光；b. TD73X1 井，深度 4 450 m，灰质泥岩，见泥晶碳酸盐分布，正交光；c. TD73X1 井，深度 4 692 m，砂质泥岩，见碎屑颗粒定向分布，单偏光；d. TD73X1 井，深度 4 692 m，砂质泥岩，见碎屑颗粒定向分布，正交光

图 2 滨海斜坡沙一中亚段细粒沉积岩岩性特征

Fig. 2 Lithological characteristics of fine-grained sedimentary rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

表 1　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩热解参数

Table 1　Data of pyrolysis parameters of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

井名	深度范围/m		样品个数	w(TOC)/%	(S_1+S_2)/(mg·g^{-1})	T_{max}/(℃)	HI/(mg·g^{-1})	D/%	PI	OSI/(mg·g^{-1})
	斜深	垂深								
GS78	3975	3975	1	3.01	13.71	443	388.37	37.80	0.15	100.66
TD4X1	4148 ~ 4410	3430 ~ 3692	86	0.64 ~ 3.44 1.36	2.84 ~ 24.78 7.85	433 ~ 445 439	320.95 ~ 754.57 494.14	28.83 ~ 69.46 47.01	0.05 ~ 0.29 0.13	54.60 ~ 360.61 107.31
TD6X3	3988 ~ 4134	3712 ~ 3857	15	0.57 ~ 1.45 0.96	1.25 ~ 5.43 2.92	432 ~ 443 437	168.07 ~ 298.28 224.01	17.74 ~ 39.46 25.00	0.17 ~ 0.39 0.25	55.4 ~ 264.55 114.88
TD9X1	3896 ~ 4212	3683 ~ 3952	148	0.67 ~ 6.07 2.95	1.39 ~ 28.24 10.72	427 ~ 450 440	127.91 ~ 409.78 266.97	11.77 ~ 50.07 27.98	0.09 ~ 0.68 0.20	19.02 ~ 661.07 151.57
TD9X2	4390 ~ 4730	3887 ~ 4186	146	0.21 ~ 8.61 2.50	1.43 ~ 79.14 8.85	413 ~ 450 438	68.43 ~ 841.2 228.64	7.58 ~ 99.47 27.43	0.13 ~ 0.59 0.30	34.31 ~ 763.68 151.57
TD12X1	3944 ~ 4208	3726 ~ 3975	122	0.57 ~ 6.28 2.14	1.85 ~ 34.77 11.14	424 ~ 453 442	144.09 ~ 784.87 397.95	17.80 ~ 74.80 42.58	0.07 ~ 0.55 0.22	38.48 ~ 530.17 172.46
TD13X1	4198 ~ 4314	3877 ~ 3986	53	0.61 ~ 2.25 172.46	1.62 ~ 26.66 10.61	435 ~ 457 447	128.29 ~ 685.47 379.62	11.29 ~ 60.72 36.35	0.04 ~ 0.37 0.12	11.54 ~ 321.04 87.38
TD20X1	4478 ~ 4656	3945 ~ 4122	80	0.54 ~ 7.45 87.38	1.98 ~ 37.65 16.24	434 ~ 443 439	211.75 ~ 483.99 354.30	21.34 ~ 46.42 35.67	0.02 ~ 0.31 0.16	12.95 ~ 174.64 101.99
TD20X2	4438 ~ 4740	3950 ~ 4252	99	0.45 ~ 4.64 1.84	1.24 ~ 19.53 5.90	429 ~ 445 437	129.17 ~ 980.3 247.57	13.4 ~ 98.76 27.43	0.1 ~ 0.44 0.25	34.36 ~ 478.57 123.26
TD73X1	4447 ~ 4774	4350 ~ 4643	67	0.23 ~ 5.37 2.61	1.32 ~ 16.48 7.94	398 ~ 454 431	69.83 ~ 798.94 218.77	8.49 ~ 99.56 26.18	0.15 ~ 0.49 0.31	47.13 ~ 584.35 142.95
总	/	/	817	0.21 ~ 8.61 2.41	1.24 ~ 79.14 9.73	398 ~ 457 439	69.83 ~ 980.3 312.50	7.58 ~ 99.56 33.10	0.02 ~ 0.68 0.22	11.54 ~ 763.68 127.64

注：w(TOC)为总有机碳质量分数；(S_1+S_2)为生烃潜量，S_1为游离烃，S_2为热解烃；T_{max}为最大热解峰温；HI为氢指数；D为降解率；PI为产率指数；OSI为含油饱和度指数；$\frac{0.64 \sim 3.44}{1.36}$ 表示 $\frac{\text{最小值} - \text{最大值}}{\text{平均值}}$；下同

(S_1+S_2)和 w(氯仿沥青“A”)数据表明，滨海斜坡沙一中亚段烃源岩以好–优质烃源岩为主，少部分样品为非烃源岩–一般烃源岩。

2.2.2　有机质类型

不同类型的有机质生烃能力存在显著差异[5]，因此有机质类型也是评价烃源岩的重要参数之一，本研究选取岩石热解参数和显微组分为指标划分研究区沙一中亚段烃源岩有机质类型。

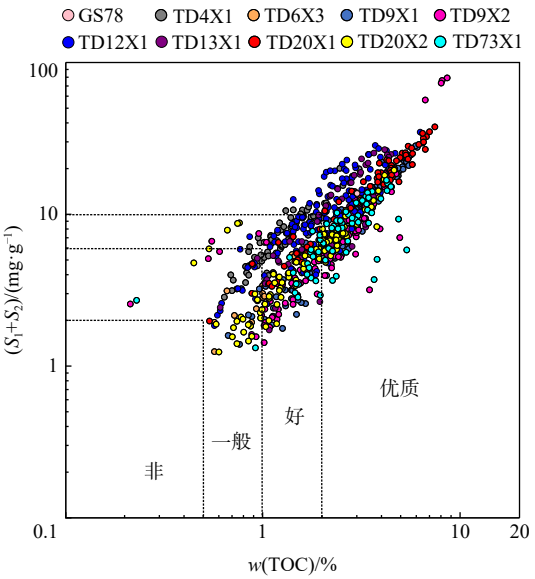


图 3　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 (S_1+S_2) 与 w(TOC) 交汇图

Fig. 3　Cross plot of (S_1+S_2) versus w(TOC) of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

岩石热解参数中氢指数(HI)和降解率(D)可以较好地反映烃源岩的有机质类型。一般情况下，有机质类型越好，氢指数与降解率越高，但该参数受成熟度影响[25]，因此本研究用 HI–T_{max} 和 D–T_{max} 关系图版对有机质类型进行划分。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 HI 在 69.83 ~ 980.3 mg/g 之间，均值为 312.50 mg/g；D 处于 7.58% ~ 99.56% 之间，均值为 33.10%(表 1)。HI–T_{max} 和 D–T_{max} 关系图指示，沙一中亚段烃源岩以Ⅱ$_1$ ~ Ⅱ$_2$型干酪根为主，少部分样品为Ⅰ、Ⅲ型干酪根(图 4a, b)。

不同类型显微组分的相对含量也可以较好地反映烃源岩的有机质类型[26]。滨海斜坡沙一中亚段泥岩显微组分以腐泥组(体积分数 28% ~ 50%)和壳质组(体积分数 44% ~ 53%)为主，镜质组(体积分数 5% ~ 15%)次之，惰质组(体积分数 1% ~ 4%)最少，类型指数(TI)为 39 ~ 67，烃源岩显微组分测试结果表明沙一中亚段烃源岩有机质(干酪根)类型为Ⅱ$_1$ ~ Ⅱ$_2$型。

2.2.3　有机质成熟度

有机质的成熟度反映了烃源岩有机质的热演化程度，有机质只有达到一定的成熟度范围，才能有效生烃[27-28]。本研究选取碳优势指数(CPI)、奇偶优势

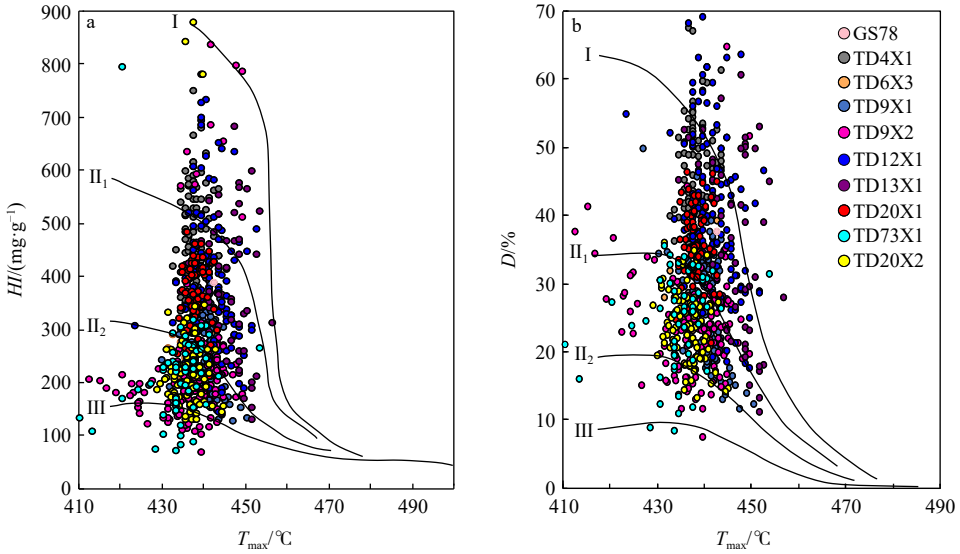


图 4　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 *HI* 与 T_{max} 交汇图 (a) 和 *D* 与 T_{max} 交汇图 (b)（Ⅰ，Ⅱ$_1$，Ⅱ$_2$ 和Ⅲ均为干酪根类型）

Fig. 4　Cross plot of *HI* versus T_{max} (a) and *D* versus T_{max} (b) of source rock in the Middle Section of Es$_1$ in the Binhai slope

比(*OEP*)、C_{29} αααα 20S/(20S+20R)、C_{29} ββ/(ββ+αα)、产率指数(*PI*)、岩石最大热解峰温(T_{max})和镜质体反射率(R_o)综合判断滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的有机质成熟度。

当规则甾烷异构化参数 C_{29} αααα 20S/(20S+20R)值小于 0.25 且 C_{29} ββ/(ββ+αα) 值也小于 0.25 时，烃源岩成熟度表现为未熟；当 C_{29} αααα 20S/(20S+20R)值介于 0.25 ~ 0.40 之间且 C_{29} ββ/(ββ+αα) 值介于 0.25 ~ 0.40 之间时，烃源岩为低熟；当 C_{29} αααα 20S/(20S+20R)值大于 0.4 或 C_{29} ββ/(ββ+αα) 值大于 0.4 时，烃源岩热演化程度为成熟[29-30]。对滨海斜坡 8 口重点井 13 块烃源岩样品开展饱和烃气相色谱−质谱分析测试，C_{29} αααα 20S/(20S+20R)值介于 0.29 ~ 0.55 之间，已达到平衡值(0.52 ~ 0.55)[31]，C_{29} ββ/(ββ+αα) 值介于 0.39 ~ 0.58 之间，接近于平衡值(0.67 ~ 0.71)[31]，表明烃源岩处于成熟阶段(表 2，图 5a)。当成熟度逐渐增加时，烃源岩的 *CPI* 和 *OEP* 会逐渐接近于 1.0[32]。沙一中亚段烃源岩的成熟度参数 *CPI* 介于 1.06 ~ 1.16 之间，*OEP* 介于 1.00 ~ 1.12 之间(表 2，图 5b)，奇偶优势不明显，表明烃源岩主体处于生油阶段。

PI 和 T_{max} 是热解法研究有机质成熟度的 2 个重要参数，当 $PI \geqslant 0.1$ 且 $T_{max} \geqslant 435$℃ 时，烃源岩进入生油阶段[33]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的 *PI* 分布于 0.02 ~ 0.68 之间，均值为 0.22，T_{max} 分布于 398 ~ 457℃ 之间，均值为 439，表明该套烃源岩总体位于主生油窗(表 1，图 6)。滨海斜坡 5 口重点井沙一中亚段烃源岩的实测 R_o 分布于 0.58% ~ 1.32% 之间，均值为 0.91%，受样品点所处深度不同，R_o 分布区间较大，但整体处于低熟−成熟阶段(图 7)。

2.3　有机质来源

C_{27}-C_{28}-C_{29} 规则甾烷的相对丰度常用于判断有机质的来源，C_{27} 规则甾烷代表了水生生物的来源，C_{29} 规则甾烷代表了陆源植物的来源，因此 C_{27}-C_{28}-C_{29} 规则甾烷相对含量三角图中靠近 C_{27} 规则甾烷区域反映了以水生生物为主的有机质贡献，靠近 C_{29} 规则甾烷区域反映了以陆源植物为主的有机质贡献，位于中心区域反映了水生生物和陆源植物的双重贡献[34]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩位于 C_{27}-C_{28}-C_{29} 规则甾烷相对含量三角图中心区域，表明有机质来源于水生生物和陆源植物的混合来源(图 8)。

2.4　生烃能力

烃源岩的生烃能力受烃源岩有机质的数量和质量共同控制，其中有机质的数量主要受控于有机质的丰度以及成熟度，有机质的质量主要受控于有机质类型和母质来源。可用(S_1+S_2)以及含油饱和度指数(*OSI*=S_1/*w*(TOC))来评估滨海斜坡沙一中烃源岩生烃能力。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的(S_1+S_2)分布于 1.24 ~ 79.14 mg/g 之间，均值为 9.73 mg/g(表 1)，变化范围较大，(S_1+S_2)与 *w*(TOC)关系图指示，沙一中亚段烃源岩整体处于好−优质烃源岩(图 3)。

含油饱和度指数是评估烃源岩能否具备页岩油勘探潜力的有效指标参数，普遍认为当 *OSI*<100 mg/g 时表明烃源岩不具备页岩油勘探潜力，当 *OSI*>100 mg/g 时表明烃源岩具备页岩油勘探潜力[25]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 *OSI* 变化范围较大，分布于 11.54 ~

表 2　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩生标参数

Table 2　Biomarker parameters of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

井名	深度/m		*CPI*	*OEP*	C_{29} ααα 20S/(20S+20R)	C_{29} ββ/(ββ+αα)	C_{27}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})	C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})	C_{29}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})	Pr/Ph	gammacerane/αβC_{30} hopane
	斜深	垂深									
TD12X1	4105	3877	1.14	1.12	0.38	0.53	0.44	0.27	0.29	1.30	0.06
TD13X1	4313	3955	1.09	1.02	0.38	0.52	0.46	0.19	0.35	1.48	0.12
TD20X1	4557	4024	1.07	1.09	0.29	0.44	0.38	0.25	0.36	1.20	0.11
TD20X1	4567	4034	1.12	1.10	0.38	0.54	0.41	0.27	0.32	1.31	0.09
TD20X2	4623	4135	1.11	1.08	0.48	0.58	0.52	0.24	0.24	1.56	0.12
TD20X2	4632	4144	1.10	1.02	0.49	0.39	0.28	0.32	0.40	1.29	0.14
TD20X2	4637	4149	1.12	1.12	0.42	0.54	0.50	0.23	0.27	1.48	0.13
TD20X2	4641	4153	1.10	1.11	0.54	0.58	0.53	0.23	0.24	1.41	0.12
TD6X1	3931	3718	1.06	1.08	0.41	0.52	0.46	0.26	0.28	1.24	0.06
TD6X1	3939	3726	1.06	1.05	0.47	0.53	0.48	0.27	0.25	1.27	0.07
TD9X1	4132	3891	1.16	1.12	0.55	0.41	0.27	0.28	0.45	1.23	0.09
TD9X2	4575	4049	1.14	1.03	0.35	0.41	0.43	0.30	0.27	1.26	0.21
TD73X1	4750	4621	1.12	1.00	0.41	0.45	0.26	0.27	0.46	1.66	0.12

注: *CPI*为碳优势指数; *OEP*为奇偶优势比; C_{29} ααα 20S/(20S+20R)为C_{29} ααα甾烷在20位碳原子上的2种立体异构体20S和20R的相对比值; S为甾烷; R为C_{31}H的构型; C_{29} ββ/(ββ+αα)为C_{29}甾烷中ββ构型占总异构体(ββ + αα)的相对比值; C_{27}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})、C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})和C_{29}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})分别为C_{27}规则甾烷、C_{28}规则甾烷、C_{29}规则甾烷在C_{27}规则甾烷、C_{28}规则甾烷、C_{29}规则甾烷之和的相对含量; Pr/Ph为姥鲛烷与植烷的比值; gammacerane/αβC_{30} hopane为伽马蜡烷与C_{30}霍烷的比值; 下同

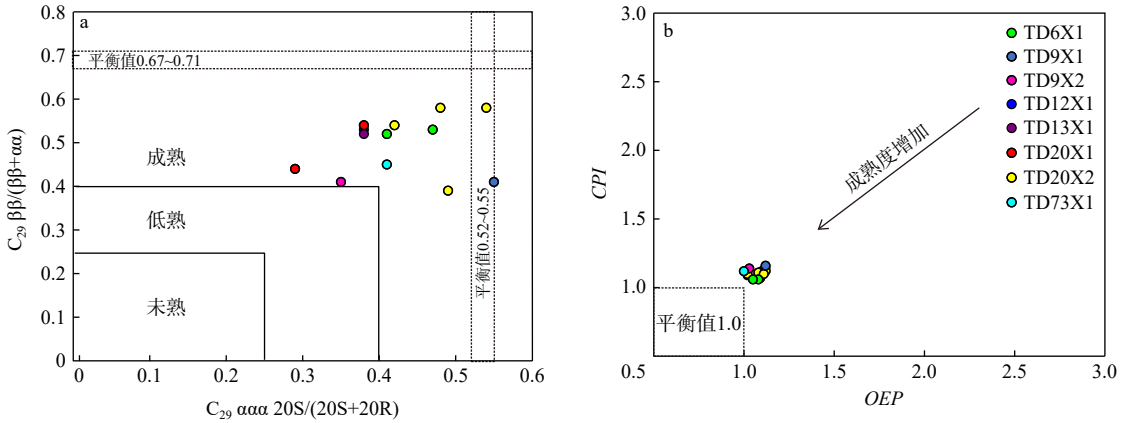


图 5　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 C_{29} ββ/(αα+ββ) 与 C_{29} ααα 20S/(20S+20R) 交汇图 (a) 和 *CPI* 与 *OEP* 交汇图 (b)

Fig. 5　Cross plot of C_{29} ββ/(αα+ββ) versus C_{29} ααα 20S/(20S+20R) steranes (a) and CPI versus OEP (b) of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

763.68 mg/g 之间, 均值为 127.64 mg/g(表 1), 指示沙一中亚段烃源岩具备一定的页岩油潜力。

3　烃源岩古沉积环境

3.1　古气候

古气候条件变化影响沉积物的供给与水体分层, 进而制约有机质储存与富集, 是影响烃源岩发育的关键因素之一[35]。利用潮湿气候型元素与干旱气候型元素比值计算的古气候指数 *C* 值是反映古气候条件的常用参数[36], *C*<0.2 指示干燥炎热气候, *C*≥0.2 指示温暖湿润气候[37]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的 *C* 值在 0.30 ~ 0.66 范围, 均值为 0.47, 表明烃源岩沉积于温暖湿润气候(图 9, 10a)。高含量的 Sr 元素指示干燥炎热气候条件下的湖水浓缩沉积, 而在温暖湿润条件下 Cu 元素则会在湖盆大量析出, 因此 Sr/Cu 在 1.3 ~ 5 之间指示温暖湿润气候, Sr/Cu>5 指示干旱气候[35, 38]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 Sr/Cu 分布于 1.46 ~ 4.21 之间, 均值为 2.37, 表明古气候为温暖湿润气候(图 9, 10a)。Mg/Ca 值同样对古气候变化十分敏感, 通常低的 Mg/Ca 值反映潮湿气候, 高的 Mg/Ca 值表示干旱气候。滨海斜坡沙一

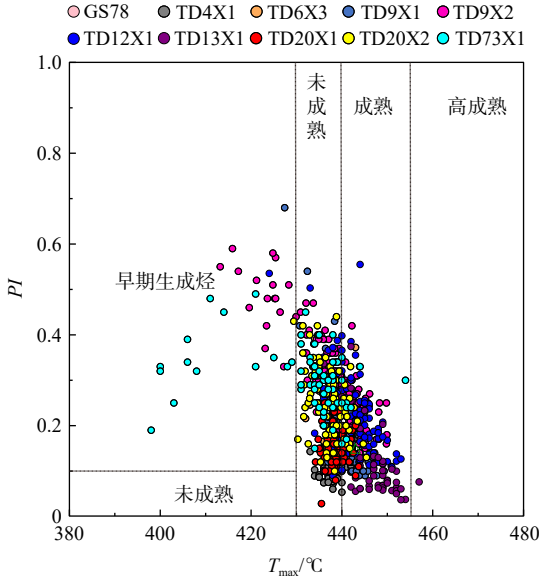


图 6　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 *PI* 和 T_{max} 交汇图

Fig. 6　Cross plot of *PI* versus T_{max} of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

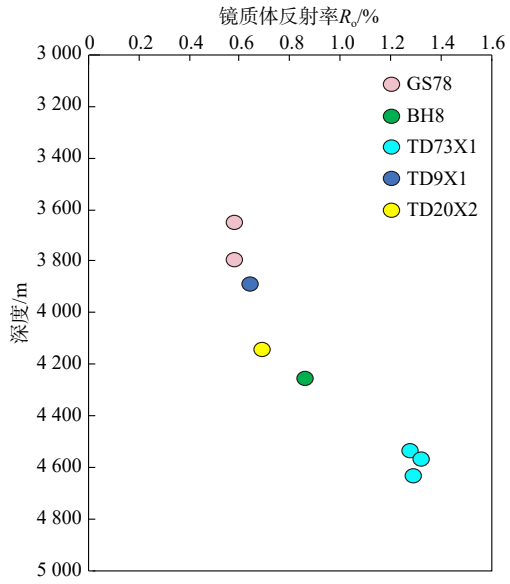


图 7　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩实测 R_o 随深度变化图

Fig. 7　Measured R_o versus depth of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

中亚段烃源岩 Mg/Ca 值分布于 0.12 ~ 0.64 之间，均值为 0.30，低 Mg/Ca 值也暗示了烃源岩形成于潮湿气候(图 9)。

滨海斜坡沙一中亚段烃源岩中被子类花粉含量最高，占 66.1% ~ 71.4%；其次是裸子类花粉，占 16.7% ~ 26.1%；藻类含量较少，占 2.9% ~ 7.1%；蕨类含量最少，占 2.9% ~ 4.8%(表 3)。孢粉化石中以被子类植物花粉为主，栎粉属 *Quercoidites* 和榆粉属 *Ulmipollenites* 占绝对优势，裸子植物花粉中双束松

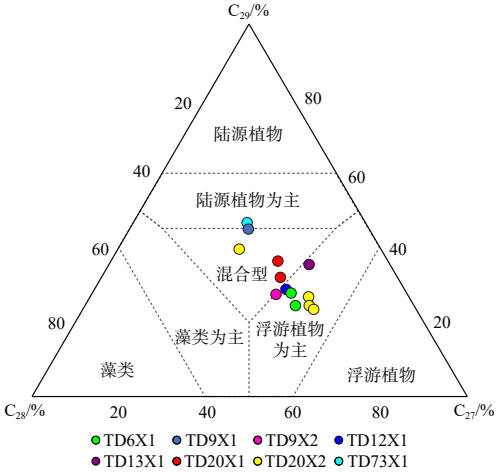


图 8　C_{27}-C_{28}-C_{29} 规则甾烷相对含量三角图

Fig. 8　Ternary plot showing the relative abundance of C_{27}-C_{28}-C_{29} regular steranes

粉属 *Pinuspollenites* 含量较高，麻黄粉属 *Ephedripites* 含量较少。孢粉组合类型表明沙一中亚段沉积时的气候适合喜湿的阔叶被子类植物生长，而反映干旱气候的矮小灌丛麻黄粉属含量较少，表明沙一中亚段沉积时期空气湿度较大，为温暖潮湿的气候。

3.2　古水深

水体的深浅反映了沉积可容纳空间的大小，古水深分析对恢复古环境和评价烃源岩生烃潜力等方面具有重要意义[39]。沉积物中某些元素的的聚散与沉积水体深度以及离岸距离有一定的相关性，这些对水体深浅敏感的元素以及相关比值，如 Fe/Mn、Zr/Al、Mn/Ti 等，能够较好地反映沉积时期水体的深浅[38]。

以氧化物存在的 Ti 元素稳定性较差，Fe 元素容易氧化，这类元素往往多聚集在滨海或近岸地区，Mn 元素则相对稳定，往往能被搬运至离岸较远的地方，因此 Fe/Mn、Mn/Ti 比值能够较好地反映搬运距离的远近，指示古水深的相对深浅[38]。通常 Fe/Mn<100 指示深水环境，100≤Fe/Mn<150 指示半深水环境，Fe/Mn≥150 指示浅水环境，而 Mn/Ti 比值从近岸到深海不断增大[40]。Zr 元素是典型的亲陆性元素，沉积在离岸较近的地区，而 Al 元素的含量随着水深增加而显著增加，因此 Zr/Al 比值越小表示水体越深，离岸越远。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 Fe/Mn 分布于 38.80 ~ 97.57，均值 64.99，Mn/Ti 分布于 0.09 ~ 0.24，均值为 0.15，Zr/Al 分布于 0.002 ~ 0.005，均值为 0.004，总体上研究区处于深水沉积环境(图 9，10b)。

3.3　古盐度

水体盐度直接影响水生生物类型以及有机质的

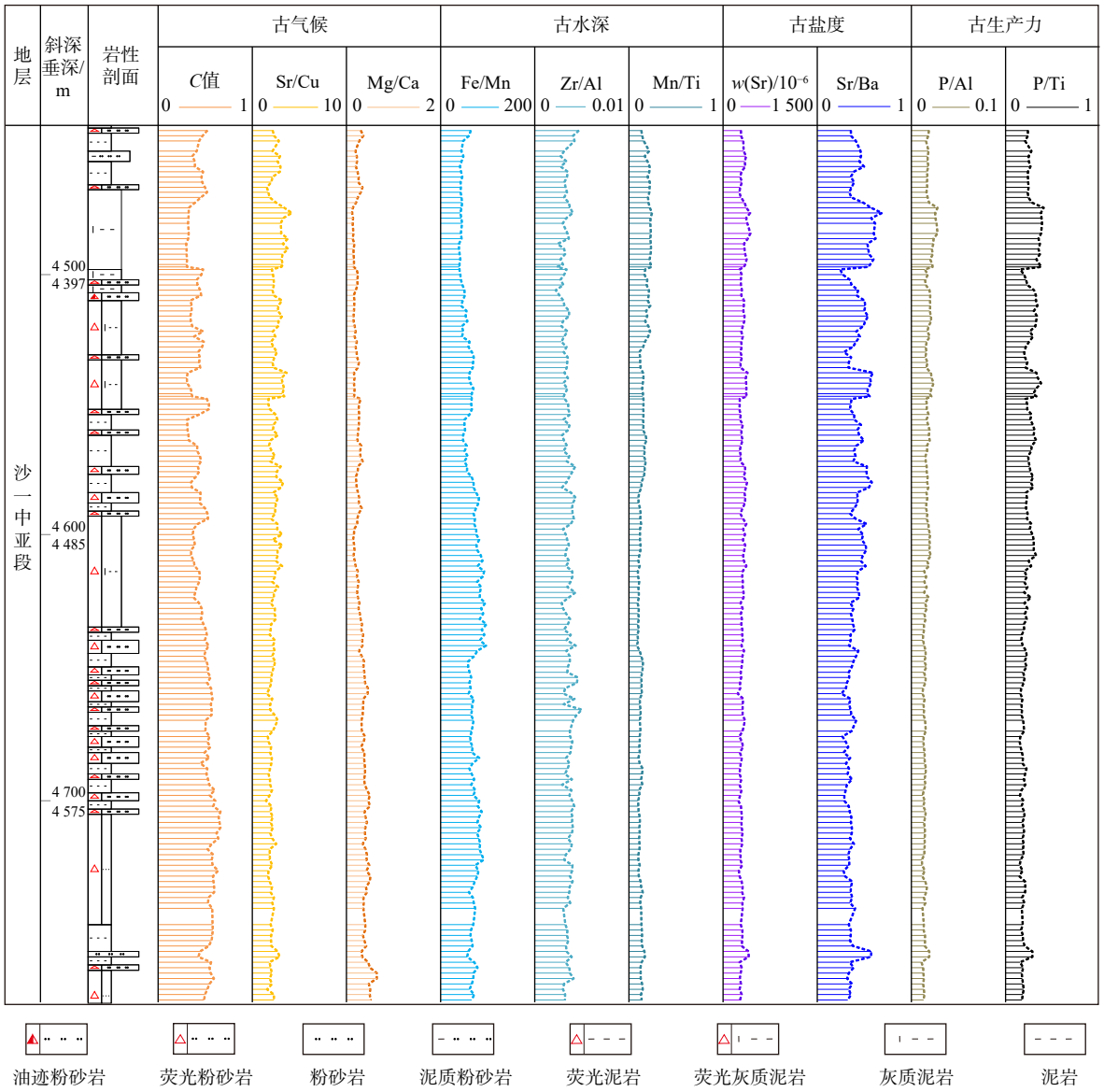


图 9　滨海斜坡 TD73X1 井沙一中亚段烃源岩元素比值剖面图（*C* 为古气候指数）

Fig. 9　Elemental ratio profiles of source rock in the Middle Section of Es_1 in Well TD73X1 of the Binhai slope

保存程度[36]，本研究采取元素地球化学和生物标志物两种方法综合判别研究区水体盐度。

沉积物中 Sr 和 Ba 元素的化学性质较为相似，但 Ba 元素的迁移能力弱于 Sr 元素，Sr 和 Ba 元素易与海水中丰富的 SO_4^{2-} 离子反应生成 $BaSO_4$ 与 $SrSO_4$，$BaSO_4$ 的溶解度相比 $SrSO_4$ 的溶解度要小，因此沉积物中 Sr/Ba 比值可以较好地表征水体盐度。Sr/Ba> 1.0 为海相沉积咸水环境，0.6≤Sr/Ba<1.0 为半咸水相，Sr/Ba<0.6 为陆相沉积淡水环境。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 Sr/Ba 比值分布于 0.24 ~ 0.69，均值 0.41，总体上沙一中沉积时期滨海斜坡处于淡水沉积环境（图 9，10c）。

生物标志物中常用伽马蜡烷指数表征沉积时期水体盐度，淡水环境下伽马蜡烷含量较低，高丰度的伽马蜡烷往往出现在分层水体中，反映了有机质沉积时处于高盐度环境下。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩样品伽马蜡烷指数（伽马蜡烷/C_{30} 藿烷）分布于 0.06 ~ 0.21，均值为 0.11，表明滨海斜坡沙一中时期水体为淡水沉积环境，与元素地球化学分析一致（图 9，10d）。

3.4　古氧相

古氧相可以较好地反映沉积过程中水体环境的变化情况，影响有机质的保存条件[34]。姥鲛烷/植烷（Pr/Ph）是表征水体氧化还原条件常用的生物标志物，比值越小还原性越强，通常认为 Pr/Ph<1 指示还原环境，1≤Pr/Ph<3 指示弱氧化−弱还原环境，Pr/Ph>3 指示氧化环境[34]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩样品 Pr/Ph 分布于 1.20 ~ 1.66，均值为 1.36，指示样品处于

表 3　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩孢粉含量统计

Table 3　Statistical of sporopollen content of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

化石	深度3 720 m		深度3 830 m	
	数量	百分比/%	数量	百分比/%
光面球藻属 *Leiosphaeridia*			2	2.4
粒面球藻属 *Granodiscus*	2	2.9	4	4.8
藻类合计	**2**	**2.9**	**6**	**7.1**
水龙骨单缝孢属 *Polypodiaceaesporites*	2	2.9	4	4.8
蕨类合计	**2**	**2.9**	**4**	**4.8**
单束松粉属 *Abietineaepollenites*	4	5.8	4	4.8
双束松粉属 *Pinuspollenites*	8	11.6	5	6
云杉粉属 *Piceaepollenites*	1	1.4	4	4.8
雪松粉属 *Cetripites*	4	5.8	1	1.2
麻黄粉属 *Ephedripites*	1	1.4		
裸子类合计	**18**	**26.1**	**14**	**16.7**
胡桃粉属 *Juglanspollenites*	8	11.3	6	7.1
桦粉属 *Betulaepollenites*	2	2.8		
拟榛粉属 *Momipites*			1	1.2
栎粉属 *Quercoidites*	9	12.7	23	27.4
榆粉属 *Ulmipollenites*	28	39.4	28	33.3
芸香粉属 *Rutagraveolens*			2	2.4
被子类合计	**47**	**66.1**	**60**	**71.4**
总计	69	100	84	100

弱氧化–弱还原环境(表 2, 图 10d)。

3.5　古生产力

水体中生物生产力的大小影响着有机质能否大量富集, 进而影响优质烃源岩形成。P 元素是生物生存所需的重要元素, 用 Al、Ti 元素排除陆源输入碎屑对样品中 P 元素影响后, P/Al 和 P/Ti 比值高低能够较好地表征沉积时期水体古生产力的大小, P/Al 和 P/Ti 的低值代表低生产力, P/Al 和 P/Ti 的高值代表高生产力[41]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的 P/Al 处于 0.011 ~ 0.028 范围, 均值为 0.016(图 9), 高于后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)的 P/Al 标准值(0.007)[42]。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的 P/Ti 分布于 0.145 ~ 0.404, 均值为 0.238(图 9), 高于 PAAS 的 P/Ti 标准值(0.12)。滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的古生产力参数 P/Al 和 P/Ti 均高于 PAAS 的 P/Al 和 P/Ti 标准值, 表明研究区在沙一中亚段沉积时期湖盆古生产力处于较高水平, 有利于有机质的富集。

3.6　烃源岩发育模式

本研究综合沙一中亚段沉积期的古气候、古水深、古盐度、古氧相、古生产力, 建立了滨海斜坡沙一中亚段烃源岩的发育模式(图 11)。在沙一中亚段沉积期, 湖盆处于持续拉张、深陷活动中, 湖盆沉积了厚层细粒沉积岩和少量粗碎屑沉积。在此时期, 古气候温暖潮湿, 降水作用大于蒸发作用, 湖盆水体深度较大, 盐度较低, 为淡水沉积环境。来自陆源的植物碎屑和水生生物为烃源岩的形成提供了有机质来源, 温暖潮湿气候和淡水湖盆环境利于水生生物的生存, 湖盆古生产力较高。弱氧化–弱还原的深水环境利于有机质的富集和保存, 形成了有机质丰度高、生烃能力较强的沙一中亚段烃源岩。

4　结　论

(1)滨海斜坡沙一中亚段烃源岩有机质类型主要为Ⅱ$_1$ ~ Ⅱ$_2$型干酪根, 总有机碳质量分数为 0.21% ~ 8.61%, 生烃潜量为 1.24 ~ 79.14 mg/g, 整体处于好–优质烃源岩, 烃源岩镜质体反射率介于 0.58% ~ 1.32%, 整体处于低熟–成熟阶段。

(2)滨海斜坡沙一中亚段烃源岩沉积期气候温暖潮湿, 陆源高等植物和水生生物的混源输入为湖盆提供了大量的有机质, 在弱氧化–弱还原的深水环境下, 湖盆古生产力处于较高水平。

(3)滨海斜坡在沙一中亚段沉积期的古沉积环境利于有机质富集和保存, 处于中等热演化成熟阶段的高有机质丰度的沙一中亚段烃源岩生烃能力强, 具备良好的勘探开发潜力。

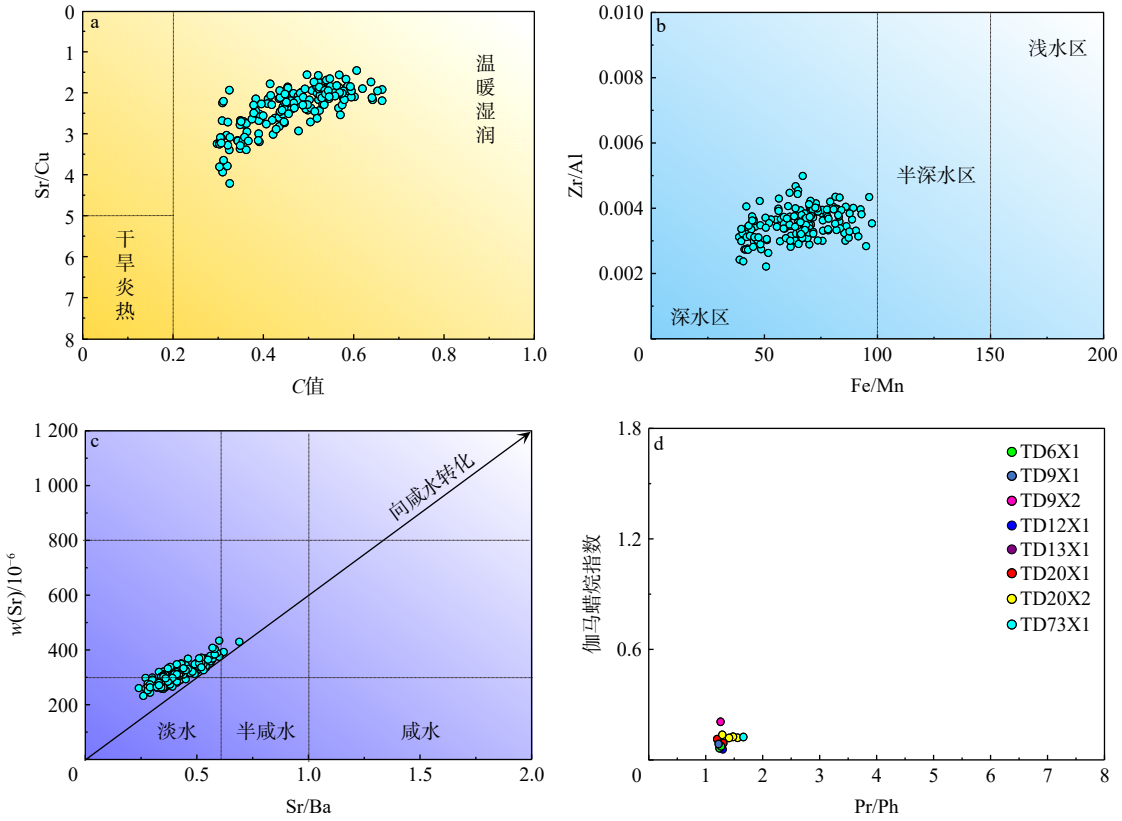


图 10　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩 Sr/Cu 与古气候指数 *C* 值交汇图 (a)，Zr/Al 与 Fe/Mn 交汇图 (b)，Sr 与 Sr/Ba 交汇图 (c) 以及伽马蜡烷指数与 Pr/Ph 交汇图 (d)

Fig. 10　Cross plot of Sr/Cu versus C (a), Zr/Al versus Fe/Mn (b), Sr versus Sr/Ba (c), and Gammacerane index versus Pr/Ph (d) of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

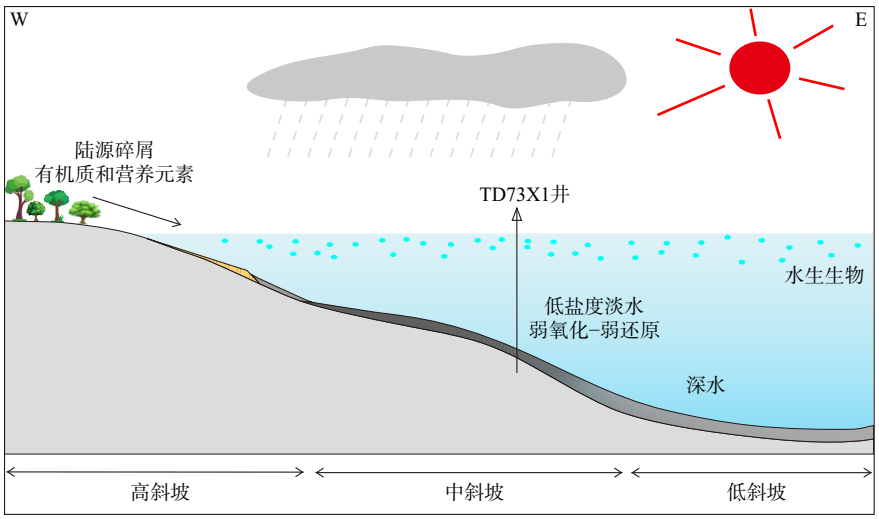


图 11　滨海斜坡沙一中亚段烃源岩发育模式图

Fig. 11　Development pattern of source rocks in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　周立宏, 何海清, 陈长伟, 等. 歧口凹陷滨海斜坡深凹区海探 1 井东营组勘探突破与启示 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 78-89.
ZHOU L H, HE H Q, CHEN C W, et al. Exploration breakthrough and enlightenment of Dongying Formation in Well Haitan 1 in the deep subsag area in Binhai slope, Qikou Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 78-89. (in Chinese with English abstract)

[2]　周立宏, 陈长伟, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、

新类型及资源潜力 [J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2160-2178.
ZHOU L H, CHEN C W, CUI Y, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2160-2178. (in Chinese with English abstract)

[3] ZHU C Z, GANG W Z, ZHAO X Z, et al. Reconstruction of oil charging history in the multi-source petroleum system of the Beidagang buried-hill structural belt in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin, China: Based on the integrated analysis of oil-source rock correlations, fluid inclusions and geologic data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109197.

[4] 董越崎, 刘庆新, 李洪香, 等. 歧口凹陷沙一段低熟烃源岩评价 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 203-211.
DONG Y Q, LIU Q X, LI H X, et al. Evaluation of immature hydrocarbon source rocks in Qikou Sag, Bohai Bay, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(2): 203-211. (in Chinese with English abstract)

[5] 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): 2008-2031.
LIU X B, LIU G D, SONG Z Z, 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): 2008-2031. (in Chinese with English abstract)

[6] 周立宏, 陈长伟, 甘华军, 等. 歧口凹陷沙一下亚段页岩形成环境及页岩油潜力综合评价 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 19-30.
ZHOU L H, CHEN C W, GAN H J, et al. Shale formation environment and comprehensive evaluation of shale oil potential of the Lower First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 19-30. (in Chinese with English abstract)

[7] 陈世悦, 王玲, 李聪, 等. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因 [J]. 石油学报, 2012, 33(1): 40-47.
CHEN S Y, WANG L, LI C, et al. The saline genesis of lacustrine basin in the Lower Section of the First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 40-47. (in Chinese with English abstract)

[8] SONG Y, YE X, SHI Q R, et al. A comparative study of organic-rich shale from turbidite and lake facies in the Paleogene Qikou Sag (Bohai Bay Basin, East China): Organic matter accumulation, hydrocarbon potential and reservoir characterization[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 594: 110939.

[9] WU Z Y, ZHAO X Z, PU X G, et al. Petroleum resource potential evaluation using insights based on hydrocarbon generation, expulsion, and retention capabilities: A case study targeting the Paleogene Es_1 Formation, Qikou Sag[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109667.

[10] 张林晔. 湖相烃源岩研究进展 [J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 591-595.
ZHANG L Y. The progress on the study of lacustrine source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 591-595. (in Chinese with English abstract)

[11] 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. (in Chinese with English abstract)

[12] 段玮, 曾翔, 蔡进功, 等. 渤海湾盆地东营凹陷沉积环境和古生产力对优质烃源岩形成的控制: 以牛庄洼陷沙河街组为例 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1754-1767.
DUAN W, ZENG X, CAI J G, et al. Control of sedimentary environment and paleoproductivity on the formation of high-quality hydrocarbon source rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin: Case study of the Shahejie Formation in Niuzhuang Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1754-1767. (in Chinese with English abstract)

[13] WU Z Y, ZHAO X Z, WANG E Z, et al. Sedimentary environment and organic enrichment mechanisms of lacustrine shale: A case study of the Paleogene Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 573: 110404.

[14] 阳宏, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤中凹陷西南洼东营组烃源岩地球化学特征及环境指示意义 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 339-349.
YANG H, LIU C L, WANG F L, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of source rocks of the Dongying Formation in Southwest Subsag of Bozhong Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 339-349. (in Chinese with English abstract)

[15] 王必金, 包汉勇, 刘皓天, 等. 川东红星地区吴家坪组富有机质页岩特征与发育控制因素 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 70-81.
WANG B J, BAO H Y, LIU H T, et al. Characteristics and controlling factors of the organic-rich shale in the Wujiaping Formation of the Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 70-81. (in Chinese with English abstract)

[16] 白洋, 谢宏, 王孟斋, 等. 贵州铜仁坝黄牛蹄塘组黑色岩系有机质富集机理 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 115-127.
BAI Y, XIE H, WANG M Z, et al. Enrichment mechanism of organic matter in black rock series of the Niutitang Formation in Bahuang, Tongren, Guizhou[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 115-127. (in Chinese with English abstract)

[17] DONG Y Y, ZENG J H, DONG X Y, et al. The control effect of normal faults and caprocks on hydrocarbon accumulation: A case study from the Binhai fault nose of the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 218: 110918.

[18] ZHANG Y D, SUN Y G, CHEN J P. Geochemical evidence of lake environments favorable for the formation of excellent source rocks: A case study from the Third Member of the Eocene Shahejie Formation in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 136: 105435.

[19] 周立宏, 韩国猛, 马建英, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙二段滨浅湖滩坝沉积模式与勘探实践 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 64-77.
ZHOU L H, HAN G M, MA J Y, et al. Depositional pattern and exploration practice of shallow shore lake beach bar sand body in the Second Member of Shahejie Formation in Qibei slope in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 64-77. (in Chinese with English abstract)

[20] 赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 等. 断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现: 以歧口凹陷歧北缓坡带为例 [J]. 石油学报, 2017, 38(7): 729-739.
ZHAO X Z, PU X G, WANG J H, et al. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin: A case study of Qibei slope in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(7): 729-739. (in Chinese with English abstract)

[21] MA C, ZHAO X Z, YANG T, et al. Mineralogy, organic geochemistry, and microstructural characterization of lacustrine Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin: Contribution to understanding microcosmic storage mechanism of shale oil[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 209: 109843.

[22] 张洪, 赵贤正, 王居峰, 等. 歧口凹陷埕北断阶带油气输导体系及其控藏作用 [J]. 地球科学, 2023, 48(8): 3053-3067.
ZHANG H, ZHAO X Z, WANG J F, et al. Hydrocarbon migration pathways and its control on accumulation in Chengbei fault zone of Qikou Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 3053-3067. (in Chinese with English abstract)

[23] 赵青芳, 谢德智, 陈建文, 等. 下扬子区二叠系烃源岩评价与生源环境 [J]. 地质通报, 2023, 42(7): 1154-1165.
ZHAO Q F, XIE D Z, CHEN J W, et al. Evaluation and biogenetic derivation and sedimentary environment of source rocks from Permian in the Lower Yangze region[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(7): 1154-1165. (in Chinese with English abstract)

[24] 中华人民共和国国家能源局. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T5735-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Energy Administration of the People's Republic of China. Method for geochemical evaluation of source rocks: SY/T5735-2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019. (in Chinese)

[25] 刘超威, 尤新才, 李辉, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组烃源岩地球化学特征与生烃潜力研究 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 338-346.
LIU C W, YOU X C, LI H, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Lucaogou Formation source rocks in Fukang Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 338-346. (in Chinese with English abstract)

[26] 唐勇, 王智强, 庞燕青, 等. 准噶尔盆地西部坳陷二叠系下乌尔禾组烃源岩生烃潜力评价 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(4): 16-28.
TANG Y, WANG Z Q, PANG Y Q, et al. Hydrocarbon-generating potential of source rocks of Permian Lower Urho Formation in Western Depression, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(4): 16-28. (in Chinese with English abstract)

[27] 李艳红, 金奎励. 烃源岩成熟度评价指标及选取 [J]. 地质地球化学, 2000, 28(2): 94-96.
LI Y H, JIN K L. Evaluation indices for maturity of hydrocarbon-source rocks[J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(2): 94-96. (in Chinese with English abstract)

[28] CHEN J X, GUO X W, HE Z L, et al. Maturity assessment of solid bitumen in the Sinian carbonate reservoirs of the eastern and central Sichuan Basin, China: Application for hydrocarbon generation modelling[J]. Geological Journal, 2022, 57(11): 4662-4681.

[29] 刘飞, 朱钢添, 何生, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷沙河街组原油地球化学特征及油源对比 [J]. 石油实验地质, 2019, 41(6): 855-864.
LIU F, ZHU G T, HE S, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation of Shahejie Formation in Linnan Sub-Sag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(6): 855-864. (in Chinese with English abstract)

[30] 席胜利, 刚文哲, 杨清宇, 等. 鄂尔多斯盆地盐池−定边地区长7烃源岩有机地球化学特征及沉积环境研究 [J]. 现代地质, 2019, 33(4): 890-901.
XI S L, GANG W Z, YANG Q Y, et al. Organic geochemistry and sedimentary paleoenvironment of Chang 7 source rocks in Yanchi-Dingbian area, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2019, 33(4): 890-901. (in Chinese with English abstract)

[31] HAO F, ZHOU X H, ZHU Y M, et al. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo Uplift, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 1015-1037.

[32] 成海燕, 李安龙, 龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析 [J]. 海洋地质动态, 2008, 24(2): 6-10.
CHENG H Y, LI A L, GONG J M. Analysis on evaluation parameters of continental source rocks[J]. Marine Geology Letters, 2008, 24(2): 6-10. (in Chinese with English abstract)

[33] 侯读杰, 冯子辉. 油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
HOU D J, FENG Z H. Oil and gas geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011. (in Chinese)

[34] CHEN J X, GUO X W, HAN Y J, et al. Combination of basin modelling and carbazoles to investigate secondary oil migration pathways in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 131: 105163.

[35] 蔡倩茹, 王金铎, 张关龙, 等. 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组烃源岩沉积环境分析及物源示踪: 来自泥岩地球化学的证据 [J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 146-157.
CAI Q R, WANG J D, ZHANG G L, et al. Research on sedimentary environment and provenance for hydrocarbon source rocks of Upper Carboniferous Batamayineishan Formation in northeastern

Junggar Basin: Evidences from the geochemistry of mudstones[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 146-157. (in Chinese with English abstract)

[36] 阳宏, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤中凹陷东营组古沉积环境及烃源岩发育模式 [J]. 岩性油气藏, 2021, 33(6): 81-92.
YANG H, LIU C L, WANG F L, et al. Paleoenvironment and development model of source rocks of Dongying Formation in Bozhong Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 81-92. (in Chinese with English abstract)

[37] 胡奕明, 杨海风, 王飞龙, 等. 渤海海域庙西地区烃源岩有机相特征及其对优质烃源岩的指示意义 [J]. 天然气地球科学, 2023, 34(2): 226-239.
HU Y M, YANG H F, WANG F L, et al. Organic facies characteristics of source rocks and its indication for high quality source rocks of Miaoxi area, Bohai Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(2): 226-239. (in Chinese with English abstract)

[38] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪 [J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
XIONG X H, XIAO J F. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 405-414. (in Chinese with English abstract)

[39] 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复: 以渤东低凸起南端为例 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 18-25.
PAN W J, LIU S L, TIAN D R, et al. Reconstruction of paleo-water depth of Neocene shrinking lake: An example from the south of Bodong low uplift, Bohai Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(4): 18-25. (in Chinese with English abstract)

[40] 何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 珠江口盆地陆丰南地区文昌组沉积古环境恢复及烃源岩有机质富集主控因素研究 [J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 359-376.
HE Y B, LEI Y C, QIU X W, et al. Sedimentary paleoenvironment and main controlling factors of organic enrichment in source rocks of Wenchang Formation in southern Lufeng, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 31(2): 359-376. (in Chinese with English abstract)

[41] 游君君, 柳波, 胡德胜, 等. 珠江口盆地文昌凹陷烃源岩发育时期湖盆古生产力构成及分布规律 [J]. 地质论评, 2024, 70(2): 624-642.
YOU J J, LIU B, HU D S, et al. Composition and distribution of lacustrine paleoproductivity during the deposition of hydrocarbon source rocks in Wenchang Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Geological Review, 2024, 70(2): 624-642. (in Chinese with English abstract)

[42] 赵汉杰. 日青威盆地灵山岛地区莱阳组烃源岩地球化学特征及有机质富集规律研究 [D]. 山东青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
ZHAO H J. The geochemical characteristics and organic matter enrichment of the source rocks of Laiyang Formation in Lingshan Island, Riqingwei Basin[D]. Qingdao Shandong: China University of Petroleum (East China), 2021. (in Chinese with English abstract)

Summary for “歧口凹陷滨海斜坡沙一中亚段烃源岩地球化学特征及沉积环境”

Geochemical characteristics and sedimentary environment of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope, Qikou Sag

ZHU Huahui，CHEN Jiaxu*，ZHANG Jiaoyang，ZHANG Mingzhen，SHI Qianru，DONG Yueqi，FU Dongli，TANG Lulu

PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China

First author，E-mail：zhuhhui@petrochina.com.cn

* Corresponding author， E-mail：chenjxu@petrochina.com.cn

Abstract：[**Objective**] The geochemical characteristics and sedimentary environment of source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope have been insufficiently studied, limiting the potential for expanding hydrocarbon exploration into offshore areas.[**Methods**] In this study, newly drilled source rock samples from the Binhai slope were analyzed to systematically investigate the geochemical characteristics, depositional environments, and developmental models of source rock in the Middle Section of Es_1. Techniques such as petrographic pyrolysis, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) of saturates, and elemental logging were employed. [**Results**] The findings show that source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope predominantly contains type Ⅱ$_1$-Ⅱ$_2$ kerogen, with total organic carbon w(TOC) contents ranging from 0.21% to 8.61%, an average w(TOC) of 2.41%, and an average (S_1+S_2) of 9.73 mg/g. The source rock can be classified as good to high quality. The source rock maturity ranges from low to mature, with R_o values between 0.58% and 1.32%. The organic matter is derived from a mixture of terrestrial plants and aquatic organisms, and the source rock formed in a freshwater environment with minimal oxidizing and reducing conditions. During the period of source rock deposition, the lake water was relatively deep, the climate was warm and humid, and the paleo-productivity was high. [**Conclusion**] The source rock in the Middle Section of Es_1 in the Binhai slope contains high-quality organic matter with abundant organic content and moderate maturity. The sedimentary environment was conducive to the enrichment and preservation of organic material, indicating that the source rock have strong hydrocarbon generation potential and exploration value.

Key words: source rock； sedimentary environment； Middle Section of Es_1； Qikou Sag； Binhai slope； geochemistry

Received：2024-11-02；Revised：2024-12-17；Accepted：2024-12-23

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240651