

辽河拗陷雷家地区沙四段富有机质页岩 沉积环境及有机质聚集影响因素

丰玉涣¹, 马成龙^{1,2}, 张英杰^{1,3,4,5}

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010; 3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 4. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206; 5. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:辽河拗陷雷家地区沙四段发育大量富有机质页岩。采集关键井位的页岩样品, 进行总有机碳、主量元素和微量元素测试, 分析研究区有机质页岩沉积环境及有机质聚集影响因素。结果表明: 研究区沙四段页岩总有机碳质量分数 $w(\text{TOC})$ 普遍较高, 在底部、中部、中上部发育三套 $w(\text{TOC})$ 高值层段; 具有高 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 、低 $w(\text{Mo})$ 和低 $w(\text{Ti})$ 特点, 主要沉积在缺氧、近源粗粒碎屑沉积输入很小的沉积环境中, 有利于有机质的保存; $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 和 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 等在沙四段底部、中部、中上部多发生正偏, 与 $w(\text{TOC})$ 的变化趋势具有一致性, 古生产力变化是有机质聚集垂向差异的关键因素; $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 与 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 等变化存在内在联系, 湖平面变化影响有机质聚集。该结果为辽河拗陷雷家地区页岩油勘探与开发提供指导。

关键词:富有机质页岩; 有机质聚集; 沉积环境; 古生产力; 沙四段; 雷家地区; 辽河拗陷

中图分类号: TE12; TE13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2026)01-0033-14

0 引言

富有机质页岩既是重要的烃源岩, 也是关键的非常规油气勘探层^[1-4]。水体的古生产力^[1,2,5-10]和沉积环境^[1-2,5-6,11] (如氧化还原条件与水体清浊度) 等因素控制有机质聚集作用的时空差异, 影响富有机质页岩的分布特征^[12-13]。

辽河拗陷西部凹陷沙河街组沉积多套富有机质页岩层段, 集中发育于沙河街组中下部(沙河街组四段、三段), 成为辽河油田页岩油勘探的重要目的层^[14-18]。西部凹陷沉降中心的雷家地区在沙四段沉积时期形成一套厚层的湖相沉积物^[14-15,17-18], 沙四段富有机质页岩在雷家地区广泛发育, 分布范围在空间上与半深湖—深湖亚相沉积的发育范围相近, 存在 2 个高总有机碳质量分数中心点, 呈“北东部 $w(\text{TOC})$ 高、西南部分布面积广”的特点^[17]; 主要由泥质页岩和含灰质/白云质泥质页岩组成, 泥质页岩的 $w(\text{TOC})$ 整体较高, 碳酸盐矿物质量分数与 $w(\text{TOC})$ 呈非线性负相关关系^[17]; 在纵向上连续发育, 有机质丰度在不同层段存在明显差异, 沙四段底部发育一套 $w(\text{TOC})$ 普遍高于 4% 的富有机质页岩, 在空间上具有良好的延续性^[14,17]。

西部凹陷沙四段的富有机质页岩与深湖亚相页岩具有良好对应性, 有关沙四段深湖亚相页岩沉积环境及古生产力等关键因素对有机质聚集的影响研究较少。以雷家地区沙四段为研究对象, 根据典型钻井岩心与测井资料, 进行地层单元划分与沉积描述, 对富有机质页岩岩心进行总有机碳、主量元素和微量元素测试, 分析页岩沉积环境及各类因素对有机质聚集过程的影响, 为雷家地区页岩油勘探与开发提供参考。

1 区域地质概况

渤海湾盆地属于华北地台内陆裂谷盆地, 发育辽河拗陷、临清拗陷等六大拗陷, 以及内黄、埕宁和沧县

收稿日期: 2025-07-07; 编辑: 陆雅玲 任志平

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472217)

作者简介: 丰玉涣(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石学、地球化学和油气地质学等方面的研究。

通信作者: 张英杰, E-mail: zhangyingjier@qq.com

等三大隆起,划分为 40 多个凸起和 160 多个凹陷(见图 1(a)),形成多套油气藏,是中国重要油气勘探地之一^[17,19-20]。受郯庐断裂和地壳垂向运动控制,渤海湾盆地的最北端在中新生代形成一个大致沿北东—南西向展布的裂谷盆地——辽河拗陷(见图 1(a-b))^[17]。相较于渤海湾盆地其他拗陷区,辽河拗陷地处盆地边缘,水深总体较黄骅拗陷、济阳拗陷等更靠近盆地中心区域的拗陷区更浅,古近系多由砂岩、粉砂岩、泥岩及页岩等碎屑岩组成,砂岩及粉砂岩占比较高,在局部地区发育少量砾岩,相对深水环境主要发育在辽河拗陷沉降中心的次级构造单元——西部凹陷中(见图 1(b-c))^[17]。

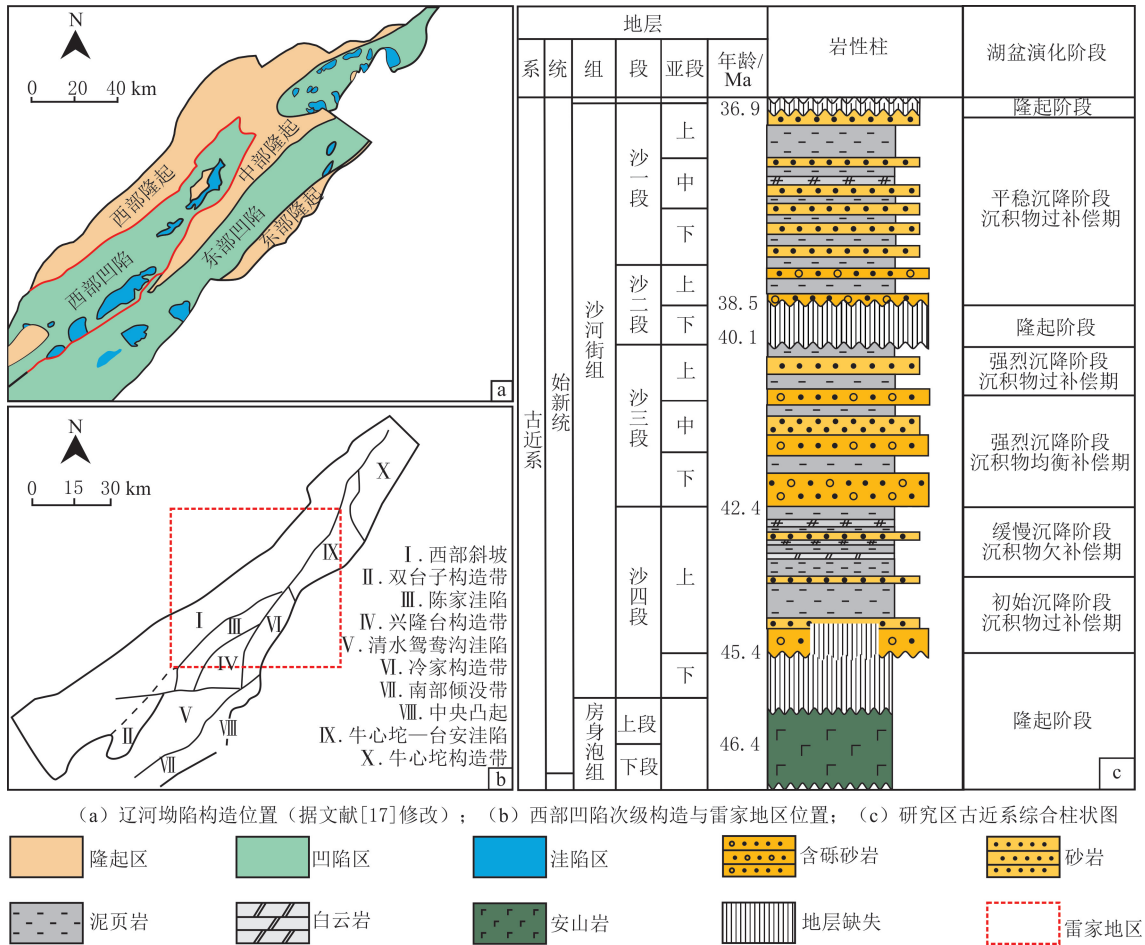


图 1 辽河拗陷雷家地区的构造地质简图与古近系区域地层
 Fig. 1 Structural geological sketch and regional stratigraphic map of the Paleogene in Leijia Area of Liaohe Depression

古近系在西部凹陷中发育良好,主要由房身泡组、沙河街组和东营组等组成^[14,18],沉积于始新世的沙河街组自下而上分为 4 段——沙四段—沙一段^[15,17]。深水页岩主要集中发育于沙四段和沙三段,局部地区沙一段、东营组发育较多的深水页岩^[14,17]。西部凹陷自古新世开始沉降并接受沉积,在古新世与始新世之间受构造抬升影响,始新世初期的古地貌呈隆起状,沙四段下部在西部凹陷中普遍缺失^[17,20]。受始新世前期(大致对应沙四段沉积中期)的较强湖侵作用影响,西部凹陷沙四段上部发育较多的半深湖—深湖亚相沉积物(见图 1(c))^[15,17]。

沙四段沉积时期作为西部凹陷从隆起区向沉降区转变的关键阶段,记录湖平面的大幅变化,最底部发育的地层大致归属为沙四上亚段,局部发育一套薄层砂砾岩,标志盆地处于沉积物过补偿和欠补偿期(见图 1(c))^[14,17]。随古湖盆逐渐向沉积物欠补偿期演化,沙四段上部泥页岩与碳酸盐岩占比稳步提升,在区域上呈明显的差异性^[14-15,17]。

2 实验方法

根据岩心和测井资料,识别雷 93 井沙四段顶底界面,细化沙四段单元,明确垂向岩性变化。对沙四段岩心中页岩发育良好的层段取样,样品数为 29 个,分别进行 TOC、主量元素和微量元素测试。测试前,所有样品清洗干燥,粉碎成小于 200 目的粉末。TOC 测试采用高温氧化—红外吸收法,流程参照 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳的测定》,称取一定量待测粉末样品置于石英坩埚,在氧气充足且 950 °C 温度下充分燃烧,使样品中有机碳完全转化为 CO₂,CO₂ 气体经脱水、除杂净化后导入红外检测器。主量元素(Ti 和 Al)测试采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES),检测样品释放的 Ti 和 Al 的特征谱线强度并计算质量分数。微量元素(Cu、P、U、Th、V、Cr 和 Ni 等)测试采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),采用碱熔—酸溶联合法,检测样品并形成待测溶液,根据不同元素的质荷比实现分离,由检测器计数特定质荷比的离子信号强度,计算样品各微量元素的质量分数。

计算生物二氧化硅浓度(c_{SiO_2})和有机碳总磷摩尔比($r_{C/P}$)。生物硅作为硅质浮游生物的遗骸,富集程度反映湖泊表层水体的初级生产力,初级生产力是控制有机质原位生成与埋藏效率的核心因素。采用 ICP-OES 法测试获得的 Si 数据包含陆源碎屑硅和生物硅,需要去除陆源碎屑硅的干扰^[7]。

辽河拗陷西部凹陷沙四段陆源碎屑岩摩尔比($r_{Si/Al}$)数据有限,难以获取区域专属背景,参考沉积地球化学领域惯例,选取 3.1 作为 Si/Al 背景值^[21]。 $r_{C/P}$ 作为判断沉积水体氧化还原环境程度的指标之一^[22],将 $r_{C/P}$ 分为三类:当 $r_{C/P} < 80$ 时,主要为氧化环境;当 $80 \leq r_{C/P} \leq 150$ 时,主要为近 Redfield 平衡区,即氧化还原平衡环境;当 $r_{C/P} > 150$ 时,主要为还原环境。

3 实验结果

3.1 地层组成与展布特征

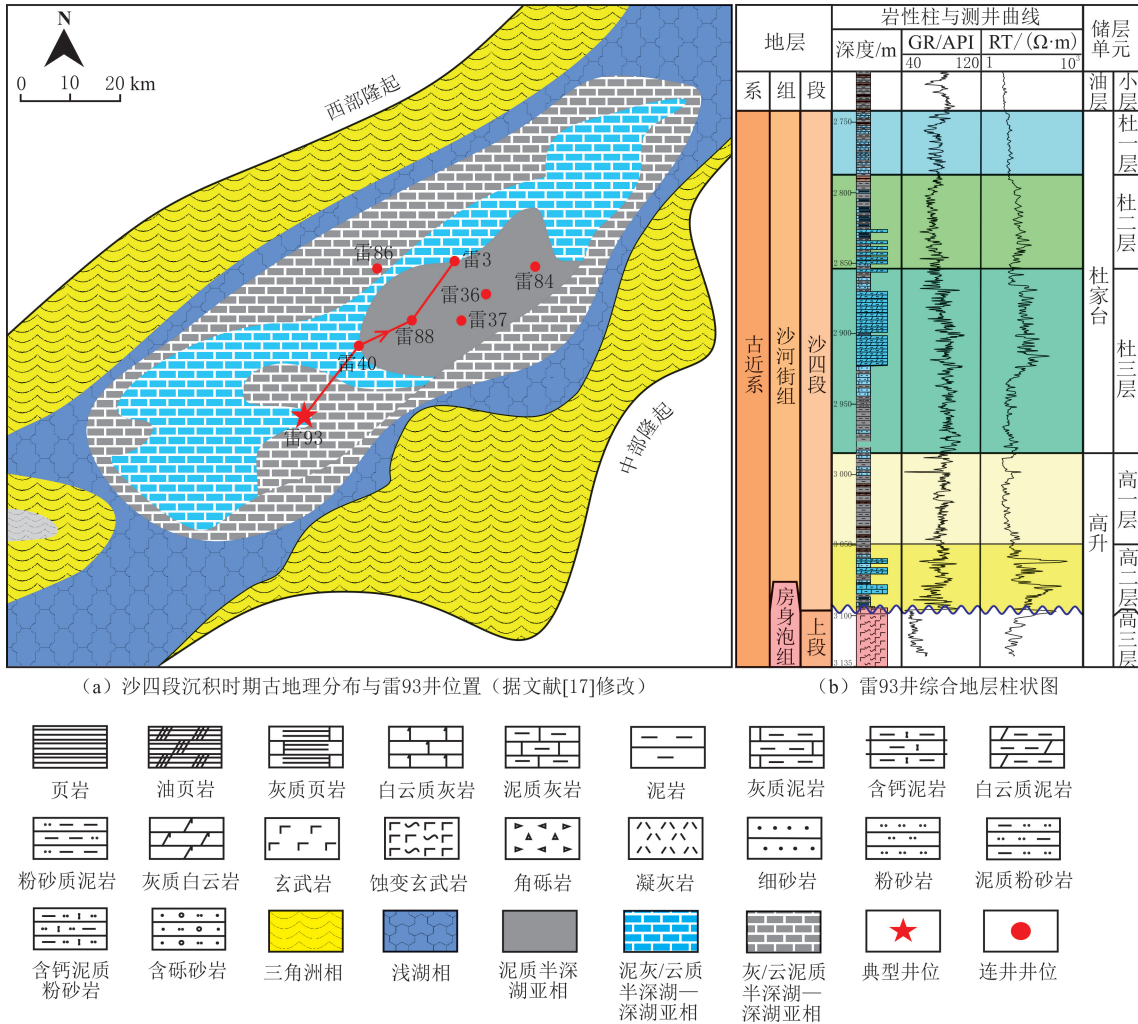
研究区沙四段主要由沙四上亚段组成(沙四下亚段普遍缺失),形成于盆地缓慢下降期,划分为生心沱、高升和杜家台 3 个油层。生心沱油层以一套砂砾岩为主导,在靠近隆起区的西部凹陷边缘小面积发育,在研究区的大部分地区不发育(见图 2(b))。高升油层下部主要发育白云岩、砂质泥页岩,高升油层上部—杜家台油层下部一般由黑色泥岩、页岩及粉砂岩等组成。杜家台油层上部由白云岩、含砂泥岩等组成。受古地理格局限制(见图 2(a)),地层单元主要在南西—北东向上展布良好。

雷家地区各个油层的地层学研究较为成熟。参考岩性组合、区域变化协同性等因素,将高升和杜家台油层划分为 6 个小层,自下而上分别为高三层、高二层、高一层、杜三层、杜二层、杜一层(见图 3)。其中,高三层在南西—北东向上偶有分布,多与下伏房身泡组呈角度不整合接触,小层多发育玄武岩、凝灰岩等与火成岩紧密相关的岩石;高二层在南西—北东向上展布良好,向两端以碳酸盐岩质量分数上升、下伏地层从房身泡组演变为高三层为主要特征,反映在高二层沉积时期处于较为低洼的古地势特征;不同于高二层在空间上展现强烈的岩性分异,高一层—杜一层在南西—北东向上展布良好,岩性与厚度的空间差异性较小,反映低洼处在经历高二层沉积时期的沉积物过补偿后,湖盆基底逐渐填平补齐。

研究区发育多种类型的暗色泥页岩,主要为灰质泥页岩、云质泥页岩和炭质泥页岩等,局部可见灰质泥页岩与灰岩互层或云质泥页岩与白云岩互层。其中,灰质泥页岩主要分布于高二层且可见灰质泥页岩与灰岩互层;云质泥页岩广泛分布于杜家台油层,杜三层发育较多的白云岩,云质泥页岩常呈夹层状发育于白云岩或与白云岩互层;炭质泥页岩主要分布于高一层。杜三层发育较多含凝灰质成分的岩石,与其他小层的差异明显(见图 4)。

雷 93 井位于西部凹陷的沉降中心(见图 2(a)),沙四段主要由高升油层和杜家台油层组成,以 $\omega(\text{TOC})$ 较高、富有机质页岩垂向分布范围广为特征。雷 93 井的沙四段上覆于由火山岩(多为玄武岩,含少量凝灰岩)组成的房身泡组,房身泡组的 GR 曲线表现为较明显的低值,平均为 30 API,在垂向上小幅变化(见图 2(b))。沙四段底部为一套泥质白云岩、泥质粉砂岩,GR 曲线呈陡增特征,为 60~90 API,平均为 80 API,与下伏房身泡组分界明显(见图 2(b))。雷 93 井的沙四段自下而上划分为高二层、高一层、杜三层、杜二层及杜一层 5 个小层,缺失沙四下亚段、生心沱油层和高三层沉积体,依次为一套由泥质白云

岩、灰质页岩和粉砂质页岩等组成的混积岩体(高二层),以及局部含灰岩的暗色页岩层(高一层)、含页岩夹层的碳酸盐岩层(杜三层)、主要由钙质泥岩组成的层段(杜二层)、含钙质页岩的泥岩层段(杜一层)。



(a) 沙四段沉积时期古地理分布与雷93井位置 (据文献[17]修改)

(b) 雷93井综合地层柱状图

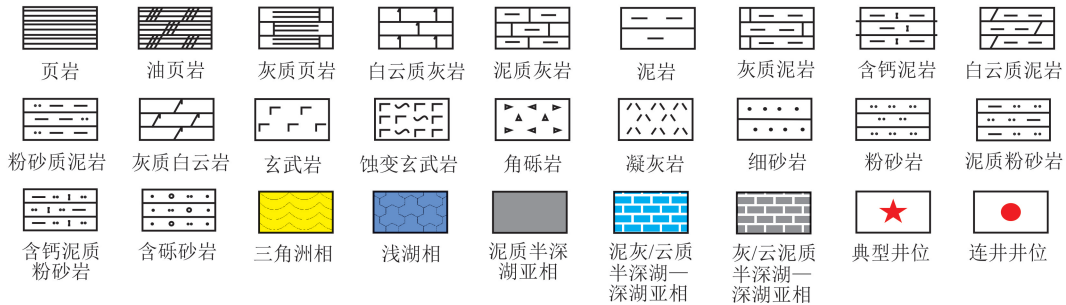


图2 雷家地区沙四段古地理格局、雷93井位置及综合地层柱状图

Fig. 2 Paleogeographic pattern of the Leijia Area during the deposition of the Es₄ Member and comprehensive stratigraphic column of the Es₄ Member in the well Lei 93

雷93井记录湖盆在沙四下亚段沉积期向沙四上亚段沉积期过渡阶段湖平面的强烈震荡,地处地势低洼处,各个地层单元发育完整,形成大量富含有机质暗色页岩,序列具有较强的代表性,为研究雷家地区沙四段富有机质页岩的有机质聚集主控因素提供依据。

3.2 富有机质页岩分布特征

沙四段页岩的 $w(\text{TOC})$ 自下而上差异明显,为 1.69%~7.94%,平均为 4.29%,96.6%的样品 $w(\text{TOC})$ 不低于 2.00%,是一套富有机质页岩广泛发育的湖相沉积序列(见表1)。各小层间的 $w(\text{TOC})$ 分布差异显著,高二层页岩的 $w(\text{TOC})$ 较高,为 3.92%~7.94%,平均为 5.63%;高一层页岩的 $w(\text{TOC})$ 明显降低,为 2.00%~5.10%,平均为 3.54%,80.0%的样品 $w(\text{TOC})$ 低于 4.00%;杜三层页岩的 $w(\text{TOC})$ 处于较低水平,为 1.69%~5.10%,平均为 3.91%,过半数页岩样品的 $w(\text{TOC})$ 高于 4.00%;杜二层页岩的 $w(\text{TOC})$ 再次较大幅度提升,富有机质页岩的品质与高二层的相似,为 4.71%~5.94%,平均为 5.44%,页岩样品的 $w(\text{TOC})$ 高于 4.00%;杜一层页岩的 $w(\text{TOC})$ 再次较大幅度降低,富有机质页岩的品质为沙四段中最差的, $w(\text{TOC})$ 为 3.07%~3.92%,平均为 3.38%(见表1和图5)。

雷93井的沙四段页岩普遍富含有机质,有机质丰度在垂向上差异明显,高有机质丰度的层段主要由高二层和杜二层组成,分别位于沙四段的底部和中上部, $w(\text{TOC})$ 普遍高于 4.00%;低有机质丰度的层段主要

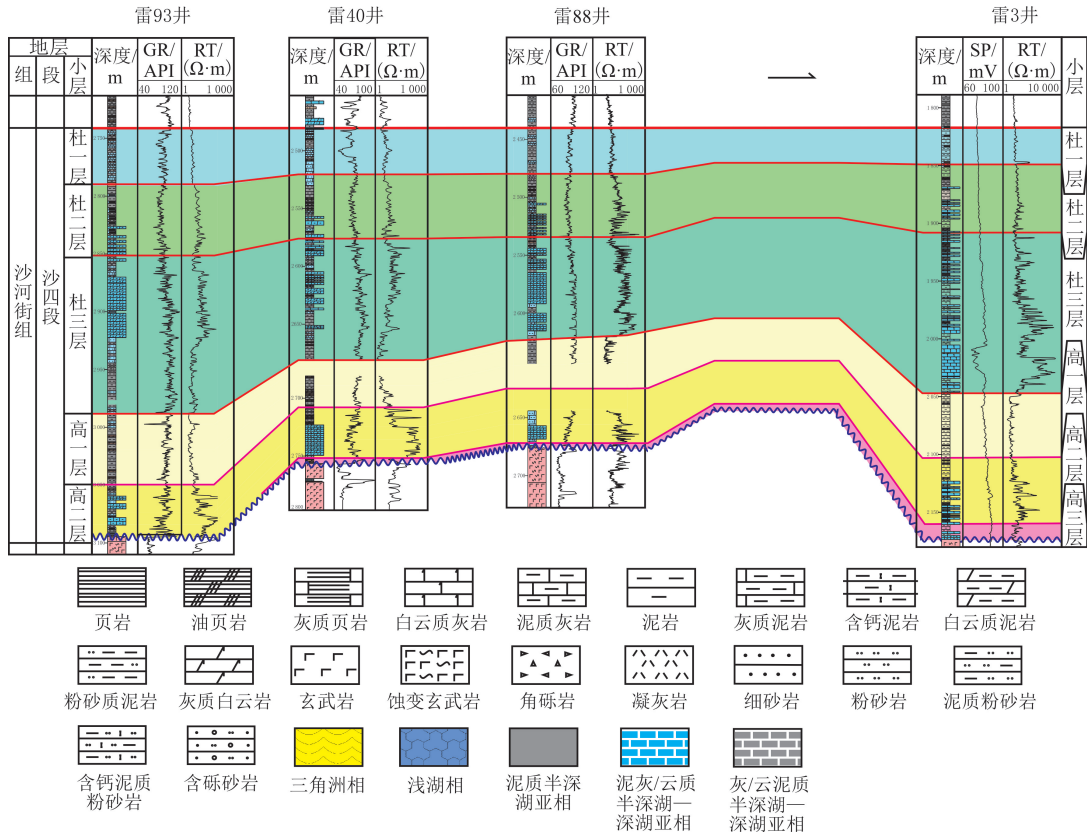
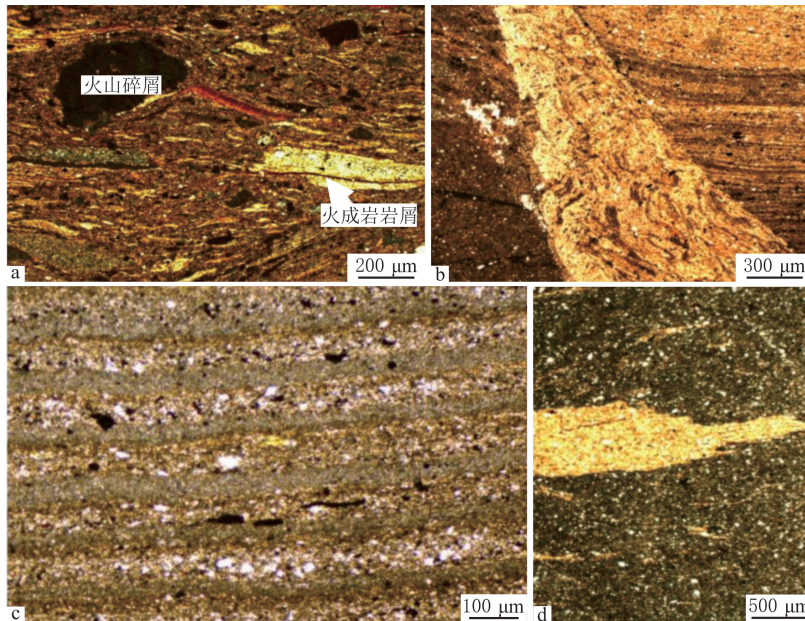


图 3 雷家地区沙四段小层连井剖面展布(剖面位置见图 2(a))

Fig. 3 SW-NE distribution profile of Es₄ shale sub layers in the Leijia Area(section position as shown in Fig. 2(a))



(a) 含大量火山碎屑与火成岩岩屑的凝灰质白云岩, 反映强烈的火山作用, 雷29-15井, 2 646.3 m; (b) 凝灰质岩浆热液侵入泥晶白云岩形成的纹层状凝灰质泥晶白云岩, 雷84井, 2 627.4 m; (c) 凝灰质泥晶白云岩, 大量凝灰质组分呈纹层状充填在白云石纹层之间, 曙古169-1井, 2 894.1 m; (d) 凝灰质岩浆热液侵入的凝灰质白云岩, 雷84井, 2 636.7 m

图 4 雷 93 井沙四段杜三层广泛沉积凝灰质组分

Fig. 4 Widely deposited tuffaceous components in the Du-3 sub-oil-layers of the Es₄ shale in well Lei 93

由高一层和杜一层组成,分别位于沙四段的中下部和顶部, $w(\text{TOC})$ 普遍低于4.00%;位于沙四段中部的杜三层代表有机质丰度的层段, $w(\text{TOC})$ 在4.00%附近,半数样品 $w(\text{TOC})$ 高于4.00%(见表1和图5)。

表1 雷93井沙四段页岩有机碳与主量元素质量分数

Table 1 Total organic carbon and major element contents of the Es₄ shale in well Lei 93

编号	埋深/m	$w(\text{TOC})/\%$	$w(\text{P})/w(\text{Ti})$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Ti})/\%$	$w(\text{Al})/w(\text{Ti})$	$w(\text{生物硅})/\%$	油层
1	2 750.0	3.07	10.82	13.48	1.18	11.38	16.96	
2	2 770.0	3.92	5.87	12.23	0.77	15.93	32.20	杜一层
3	2 778.0	3.14	46.67	12.75	0.68	18.69	19.10	
4	2 792.0	4.71	11.68	13.76	0.76	18.10	16.13	
5	2 800.0	5.24	25.96	12.30	0.66	18.74	16.78	杜二层
6	2 820.0	5.88	7.94	12.85	0.62	20.61	12.72	
7	2 832.0	5.94	38.44	12.27	0.62	19.86	13.06	
8	2 862.0	6.11	45.23	10.69	0.52	20.55	6.04	
9	2 872.0	4.42	46.49	10.37	0.61	16.97	8.52	
10	2 880.0	4.27	51.46	9.84	0.65	15.06	13.08	
11	2 890.0	3.22	19.83	9.78	0.61	15.96	7.95	
12	2 900.0	4.77	24.15	10.34	0.71	14.61	5.68	
13	2 912.0	3.65	32.99	10.33	0.69	15.00	6.88	杜三层
14	2 920.0	4.37	16.75	10.32	0.62	16.66	3.92	
15	2 930.0	4.18	23.09	11.94	0.63	18.84	5.07	
16	2 940.0	2.73	6.23	13.77	0.70	19.58	2.31	
17	2 958.0	1.69	9.37	15.58	0.72	21.78	9.88	
18	2 970.0	3.42	9.28	13.74	0.70	19.63	11.22	
19	2 980.0	4.08	8.71	13.44	0.68	19.85	9.14	
20	2 988.0	2.00	7.08	14.67	0.77	19.06	9.40	
21	3 000.0	3.56	10.90	13.70	0.64	21.25	11.67	
22	3 008.0	3.52	14.14	15.96	0.72	22.19	16.47	高一层
23	3 032.0	3.51	33.59	13.70	0.64	21.28	11.66	
24	3 042.0	5.10	13.25	13.56	0.64	21.06	30.05	
25	3 052.0	6.09	30.19	13.67	0.66	20.85	27.90	
26	3 064.0	7.94	22.12	8.63	0.44	19.45	15.92	
27	3 070.0	3.92	64.33	12.73	0.51	24.77	7.25	高二层
28	3 084.0	4.61	27.06	11.45	0.62	18.52	13.50	
29	3 090.0	5.59	15.69	10.29	0.62	16.72	11.36	

3.3 主量元素分布特征

岩石的各类主量元素对物源输入的通量、性质,以及沉积颗粒沉积阶段水体的性质具有良好的指示。测试P、Al、Ti三种主量元素质量分数(见表1),反映雷93井周边地区在沙四段沉积时期的环境与水体性质变化。由表1可知, $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 自下而上变化较为显著,为 $(5.87 \sim 64.33) \times 10^{-2}$,平均为 23.43×10^{-2} 。其中,高二层 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 平均为 31.88×10^{-2} ,高一层的平均为 15.79×10^{-2} ,杜三层的平均为 24.46×10^{-2} ,杜二层的平均为 21.00×10^{-2} ,杜一层的平均为 21.12×10^{-2} 。

$w(\text{Al})$ 自下而上变化相对平稳,存在几个明显升高层段,为8.63%~15.96%,平均为12.35%。其中,高二层 $w(\text{Al})$ 平均为11.35%,高一层的平均为14.32%,杜三层的平均为11.67%,杜二层的平均为

12.79%,杜一层的平均为 12.82%。

$w(\text{Ti})$ 自下而上变化不太明显,顶底层段的略显异常,为 0.44%~1.18%,平均为 0.67%。其中,高二层 $w(\text{Ti})$ 平均为 0.57%,高一层的平均为 0.68%,杜三层的平均为 0.65%,杜二层的平均为 0.66%,杜一层的平均为 0.87%。

3.4 微量元素分布特征

微量元素往往被生物组分稀释,一般需要标准化处理。标准化处理有两种方法:一种是用 Al 进行调和(如 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$);另一种是计算不同微量元素间的比值(如 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{U})/w(\text{Th})$)(见表 2)。

$w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 自下而上变化不显著,为 $(7.01\sim 18.28)\times 10^{-5}$,平均为 10.14×10^{-5} (见表 2 和图 5)。其中,高二层 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 平均为 11.04×10^{-5} ,高一层的平均为 9.25×10^{-5} ,杜三层的平均为 10.78×10^{-5} ,杜二层的平均为 7.82×10^{-5} ,杜一层的平均为 10.62×10^{-5} 。各层间的平均 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 差异明显,在高二层和高一层交界处、高一层和杜三层交界处、杜三层中上部,以及杜一层中下部发生明显的正偏,在高一层底部、杜三层底部、杜三层和杜二层交界处发生明显的负偏。

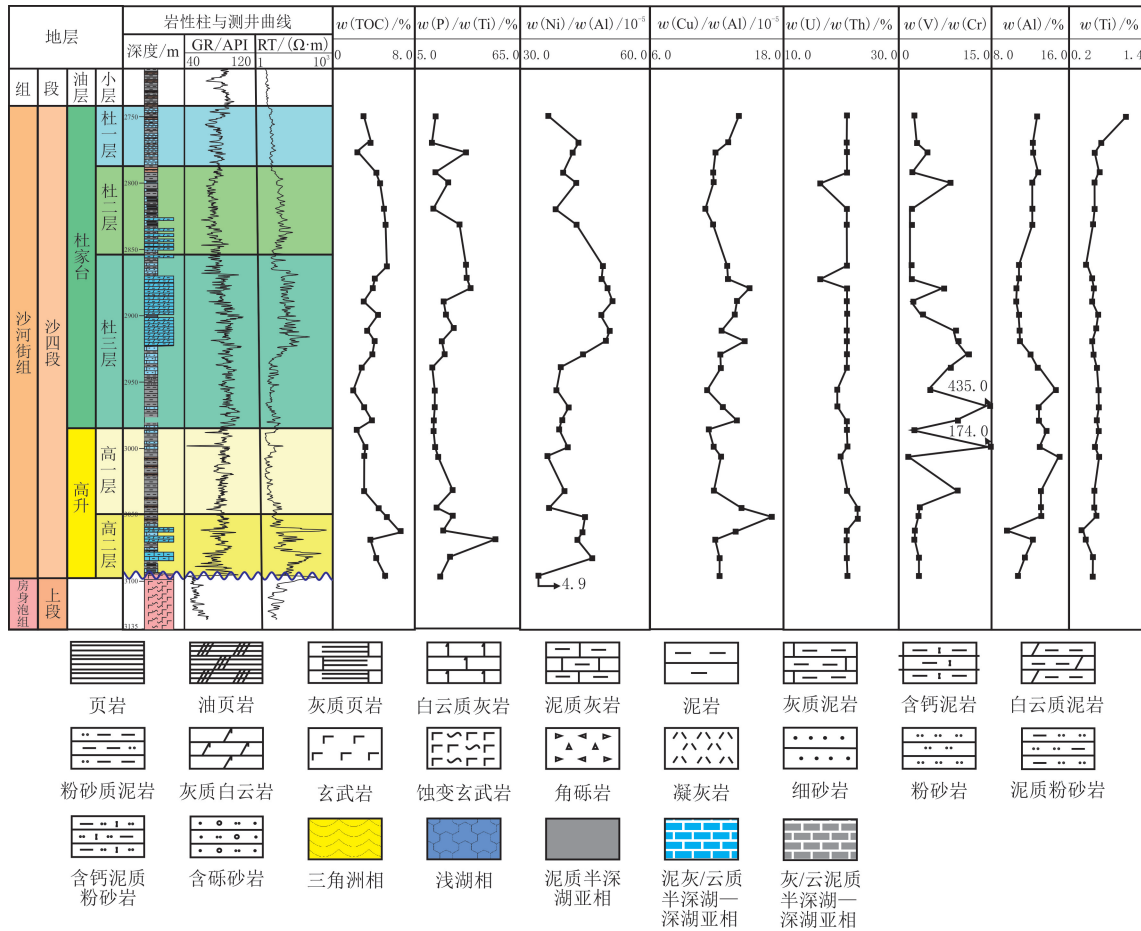


图 5 雷 93 沙四段的各项地球化学元素变化曲线

Fig. 5 Variation curves of geochemical elements in the Es₄ Member of the well Lei 93

$w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 为 $(4.86\sim 57.30)\times 10^{-5}$,平均为 42.49×10^{-5} (见表 2 和图 5)。其中,高二层 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 平均为 37.95×10^{-5} ,高一层的平均为 36.35×10^{-5} ,杜三层的平均为 48.33×10^{-5} ,杜二层的平均为 40.20×10^{-5} ,杜一层的平均为 40.00×10^{-5} 。 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 在垂向上变化明显,杜三层的平均 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 相较于其他小层的最高,且在中部观察到一次明显的正偏。 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 为 0.88%~43.50%,平均为 6.53%。各小层间的 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 存在显著差异。其中,高二层 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 平均为 2.13,高一层的平均为 6.79,杜三层的平均为 10.14,杜二层的平均为 3.66,杜一层的平均为 2.82。 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 在垂向上差异显著,尤其是在高一层和杜三层中存在多个异常点, $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 变化频繁。

在高一层和杜三层间,页岩样品的 $w(V)/w(Cr)$ 突增至 43.50。

表 2 雷 93 井沙四段页岩微量元素质量分数

Table 2 Trace element contents of the Es₄ shale in well Lei 93

编号	埋深/m	$w(Ni)/w(Al)/10^{-5}$	$w(Cu)/w(Al)/10^{-5}$	$w(U)/w(Th)/\%$	$w(V)/w(Cr)$	$w(Mo)/10^{-6}$	油层
1	2 750.0	33.39	12.62	27.27	1.43	<1.00	杜一层
2	2 770.0	44.15	10.63	27.27	2.42	<1.00	
3	2 778.0	42.35	8.63	27.27	4.61	<1.00	
4	2 792.0	37.79	7.99	27.27	1.93	<1.00	杜二层
5	2 800.0	43.92	8.13	18.18	9.00	<1.00	
6	2 820.0	34.25	7.01	27.27	1.81	<1.00	
7	2 832.0	44.84	8.15	27.27	1.89	<1.00	
8	2 862.0	53.34	10.29	27.27	1.81	<1.00	杜三层
9	2 872.0	52.08	10.61	18.18	1.81	<1.00	
10	2 880.0	54.87	14.22	27.27	7.58	<1.00	
11	2 890.0	57.26	12.27	27.27	2.35	<1.00	
12	2 900.0	53.19	11.60	27.27	6.89	<1.00	
13	2 912.0	55.19	9.68	27.27	9.85	<1.00	
14	2 920.0	53.32	13.57	27.27	10.75	<1.00	
15	2 930.0	46.90	9.21	27.27	12.29	<1.00	
16	2 940.0	38.48	9.44	27.27	9.00	<1.00	
17	2 958.0	36.59	7.06	25.00	5.06	<1.00	
18	2 970.0	40.04	9.46	25.00	43.50	<1.00	
19	2 980.0	38.70	11.91	27.27	10.75	<1.00	
20	2 988.0	36.81	7.50	27.27	2.18	<1.00	高一层
21	3 000.0	40.87	8.03	27.27	17.40	<1.00	
22	3 008.0	30.71	9.40	25.00	0.88	<1.00	
23	3 032.0	39.42	8.03	27.27	10.88	<1.00	
24	3 042.0	33.92	13.27	30.77	2.64	<1.00	
25	3 052.0	46.81	18.28	30.77	2.42	<1.00	高二层
26	3 064.0	45.21	11.59	27.27	1.75	<1.00	
27	3 070.0	43.98	7.85	27.27	1.58	<1.00	
28	3 084.0	48.92	8.74	27.27	2.46	<1.00	
29	3 090.0	4.86	8.75	27.27	2.46	<1.00	

$w(U)/w(Th)$ 为 0.18~0.31, 平均为 0.27, 在垂向上差异很小(见表 2 和图 5)。其中, 高二层 $w(U)/w(Th)$ 平均为 0.28, 高一层的平均为 0.27, 杜三层的平均为 0.26, 杜二层的平均为 0.25, 杜一层的平均为 0.27。

4 实验讨论

页岩的有机质丰度影响因素: 一方面是充足的有机质来源, 表层水体需要维持较高的古生产力^[1-2,5-10]; 另一方面是良好的有机质埋藏和保存条件, 沉积环境需要具备底水缺氧与较低的碎屑输入量等特征^[5-6,8-11]。古生产力、缺氧条件和碎屑输入量等因素对有机质丰度具有直接且复杂的控制作用^[5,8,12-13,23-26]。

4.1 古生产力

P 是古生产力的营养基础^[8-9], Cu 是参与多种酶的活性、生物必需的微量元素^[27-29], Ni 是微生物代谢的关键元素; 沉积通量、有机质通量与埋藏效率具有较强的相关关系^[29-30], Cu 和 Ni 的沉积通量与生物作用密切相关。岩石的主量元素 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 和微量元素 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 等常作为反映古生产力变化的关键指标^[8-9, 28-29], 各元素指标具有自身的局限性, 需要对古生产力的变化趋势进行评判^[8, 29, 31]。

根据微量元素测试结果, $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 与 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 的垂向变化趋势整体较为一致(见表 2 和图 5)。三类元素的垂向变化趋势说明古生产力大致呈 2 个上升—下降阶段, 在杜三层显著提升且与 $w(\text{TOC})$ 的变化趋势具有强烈的相似性, 表明古生产力是有机质聚集的重要控制因素。P 在还原环境下优先释放, 导致 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 具有一定的不可靠性, 可以作为一个参考性参数。 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 在垂向上变化较大, 大致识别 2 个旋回, 分别位于 $-3\ 090.0 \sim -2\ 940.0$ 和 $-2\ 940.0 \sim -2\ 750.0$ m, 以 $-3\ 084.0 \sim -3\ 032.0$ 和 $-2890.0 \sim -2\ 832.0$ m 为峰值段, 与 $w(\text{TOC})$ 的部分峰值段具有一定的可比性(见图 5)。 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 与 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 的垂向变化趋势与 $w(\text{TOC})$ 的变化趋势具有一定的相似性, 显示与有机质丰度间的直接关联性。 $w(\text{生物硅})$ 的垂向变化与 $w(\text{TOC})$ 几乎不存在相关关系, 在趋势上表现不一致。高 $w(\text{生物硅})$ 发育层与高 $w(\text{TOC})$ 发育层具有对应关系(见表 1), 如杜一层的 $2\ 770.0$ m 和高二层的 $3\ 052.0$ m 等处呈同步正偏。原因是缺少辽河拗陷 $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ 背景值, 采用全球陆源碎屑岩 $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ 背景值计算 $w(\text{生物硅})$ 不精确, 未反映与 $w(\text{TOC})$ 的关系, 无法明确古生产力对有机质丰度具有明显的控制作用, 但是具有一定的影响, 有机质丰度在古生产力较高的阶段较高。

4.2 沉积环境

4.2.1 氧化还原环境

$w(\text{U})/w(\text{Th})$ 和 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 等常被作为衡量氧化还原环境的参数^[28, 33]。当 $w(\text{U})/w(\text{Th}) > 1.25$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr}) > 4.25$ 时, 一般解释为缺氧环境; 当 $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 为 $0.75 \sim 1.25$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 为 $2.00 \sim 4.25$ 时, 一般解释为弱氧化—弱还原环境^[33, 34]。沙四段的 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 整体较高, 多层段 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 远高于 4.25 , 指示强烈的缺氧环境; $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 多为 0.27 左右, 指示氧化环境(见表 2)。考虑雷家地区沙四段广泛发育火山碎屑物质(见图 3), $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 与 $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 在垂向上的相反变化趋势指示微量元素质量分数受后期的改造影响^[8, 35]。

计算沙四段各小层页岩样品的 $r_{\text{C/P}}$, 多处于还原环境或弱氧化—弱还原环境, 零星样品的落在氧化区(除杜三层外, 其他小层各 1 个样品指示氧化环境)。 $w(\text{Mo})$ (见表 2) 指示明显的缺氧环境(见图 6)。综合 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 、 $w(\text{Mo})$ 与 $r_{\text{C/P}}$ 等对氧化还原环境的指示, 将沙四段的沉积环境判定为缺氧环境。尽管氧化还原条件的变化对有机质的保存条件进行调控, 但是主要处于相对缺氧的环境, 说明氧化还原条件的变化对不同层段有机质丰度的影响较小。氧化区大部分样品的 $w(\text{TOC})$ 高于 4.00% (见图 6), 近 Redfield 平衡区和还原区中存在 $w(\text{TOC})$ 低于 2.00% 的样品, 反映氧化还原条件下的页岩有机质丰度不是关键控制因素。

整体上, $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 变化反映氧化还原条件变化趋势, 与岩性变化反映湖深变化趋势具有较强的可比性。在垂向变化曲线的中下部存在多处异常点, 个别层段样品的 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 远高于其他层段样品的(在 $-3\ 000.0$ 与 $-2\ 970.0$ m 处)。根据 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 垂向变化趋势特点, 可以识别 2 个旋回, 分别为 $-3\ 090.0 \sim -2\ 890.0$ 和 $-2\ 890.0 \sim -2\ 790.0$ m(见表 2 和图 5)。第一个旋回以 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 变化幅度较大、涵盖较多异常点为主要特征; 第二个旋回的 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 整体变化幅度较小(在 2.00 左右), 少数样品的 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 大幅增加(达到 9.00 , 在 $-2\ 800.0$ m 处), 在高 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 层段垂向上不具有连续性。此外, $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 的连续低值区主要集中在 $-2\ 900.0 \sim -2\ 820.0$ m 处, 与沙四段的碳酸盐岩集中发育层段具有良好的匹配度; 连续高值区主要集中在 $-3\ 032.0 \sim -2\ 912.0$ m 处, 大致对应沙四段页岩的集中发育层段(见表 2 和图 5)。 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 的高值区与 $w(\text{TOC})$ 的高值区具有较强的可比性, 沙四段底部(大致对应高升油层)及沙四段中上部(大致对应杜二层中下部—上部)的缺氧条件更为显著, 对应的

$w(\text{TOC})$ 在整个沙四段中相对较高,缺氧环境为沙四段页岩的有机质丰度提高起促进作用。

此外, $r_{\text{C/P}}$ 反映氧化还原环境与 $w(\text{TOC})$ 具有可比性(见图 6)。在碳酸盐岩集中发育的杜三层中,页岩样品的 $r_{\text{C/P}}$ 相对分散,反映沉积环境的氧化还原条件处于频繁变化的特点, $w(\text{TOC})$ 大幅减少,多数低于 3.00%;在页岩集中发育的高二层和高一层中,页岩样品的 $r_{\text{C/P}}$ 主要落在还原区和近 Redfield 平衡区中,对应样品 $w(\text{TOC})$ 普遍高于 3.00%,绝大部分高于 4.00%。尽管氧化还原条件不是影响页岩有机质丰度的关键因素,但是在富有机质页岩的发育特征上具有一定的影响。

4.2.2 水体清浊度

水体的清浊度主要取决于物源碎屑的输入量。在深湖环境下,由于离物源区较远,碎屑输入对有机质聚集的影响较小^[3-4,8-10]。 $w(\text{Al})$ 与 $w(\text{TOC})$ 的垂向变化趋势具有一定的可比性且大致呈正相关关系(见表 1 和图 5),在高二层、杜三层中有一个小幅变化,且整体变化趋势基本相似; $w(\text{Ti})$ 与 $w(\text{TOC})$ 的垂向变化趋势具有较弱的负相关关系,在 -3 064 m 处的 $w(\text{Ti})$ 发生明显负偏, $w(\text{TOC})$ 发生明显正偏, $w(\text{Ti})$ 在杜一层中整体呈上升趋势, $w(\text{TOC})$ 在杜一层中整体呈下降趋势。

两种相关关系代表碎屑输入对有机质聚集的两类相反的影响途径^[8,10,28]。Al 主要赋存于陆源细粒黏土矿物,其含量的上升往往与大陆风化的加强相关。在这一过程中,往往伴随盆地外的营养物质向盆地内输入的上升,从而促进古生产力的上升。Ti 主要富集于近源粗粒碎屑沉积,沉积对有机质往往具有明显的稀释作用,对有机质聚集具有不利作用。 $w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Ti})$ 与 $w(\text{TOC})$ 之间呈明显的负相关关系,表明有机质的聚集受碎屑输入的直接影响,且碎屑输入对有机质聚集为不利影响(见图 7)。

4.3 其他影响因素

在海相富有机质页岩中,海平面变化对有机质聚集具有显著的控制作用,海侵作用控制有机质来源与保存条件;促进盆地连通与营养物质交换,提升古生产力,保障有机质供给^[2,9];增强水体分层并抑制底水氧化,扩大可容纳空间,减少碎屑输入,优化有机质保存条件^[2,9,35-36]。

在湖相富有机质页岩中,古生产力和有机质保存条件是有机质聚集的关键因素,发生在湖盆内的一些不定期事件掩盖湖平面变化对有机质聚集的控制作用,火山作用形成的营养物质含量提升,促进周期性的藻华^[2,6,37];斜坡重力流事件促进有机质的大量埋藏^[2,37-38]。湖平面变化对有机质聚集产生影响^[17,37,39]。 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 对湖平面变化具有较强的指示意义,可以指示沉积物源距离和输入能量,间接反映湖平面变化,大致识别 2 个增高—降低旋回,反映沙四段沉积时期为湖侵—湖退—湖侵—湖退阶段,且在第一个旋回中识别 2 个小尺度的增高—降低旋回(见表 1 和图 8)。 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 低值区对应碳酸盐岩集中发育层段,高值区一般对应页岩集中发育层段,与岩性垂向变化趋势反映的湖平面变化特征基本吻合。

在沙四段页岩中,识别 3 套富有机质页岩层段, $w(\text{TOC})$ 普遍高于 4.00%,局部个别样品 $w(\text{TOC})$ 低于 4.00%(高于 3.50%),分别为高二层—高一层底部(-3 090.0~-3 042.0 m)、杜三层中部(-2 930.0~-2 900.0 m)、杜三层顶部—杜二层(-2 880.0~-2 792.0 m),与湖平面变化曲线的高值区具有良好的对应关系(见图 5-6)。在湖相富有机质页岩中,有机质聚集除受古生产力、缺氧条件和碎屑输入量等因素控制外(见图 9),湖平面变化是重要控制因素,较高的湖平面高度一般有利于有机质聚集^[2,17,37-38]。

湖平面变化一般是改变古生产力,缺氧条件和碎屑输入量对有机质聚集施加宏观控制作用^[3-4,8-10]。 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 与 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 的协同变化具有较强的关联关系(见表 1 和

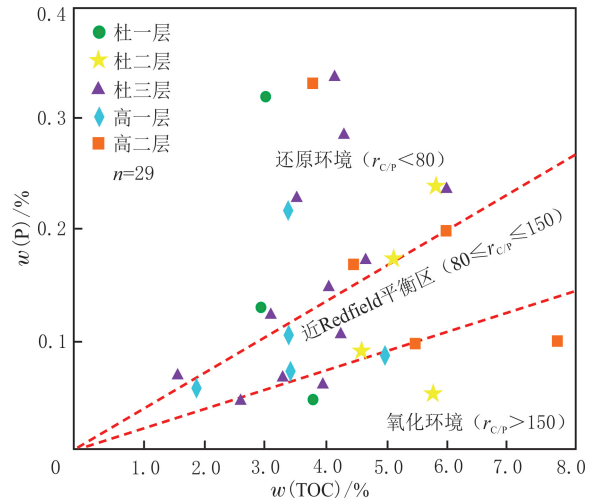


图 6 雷家地区沙四段页岩有机碳总磷摩尔比
Fig. 6 Molar C:P ratio of shale of the Es₄ Member in the Leijia Area

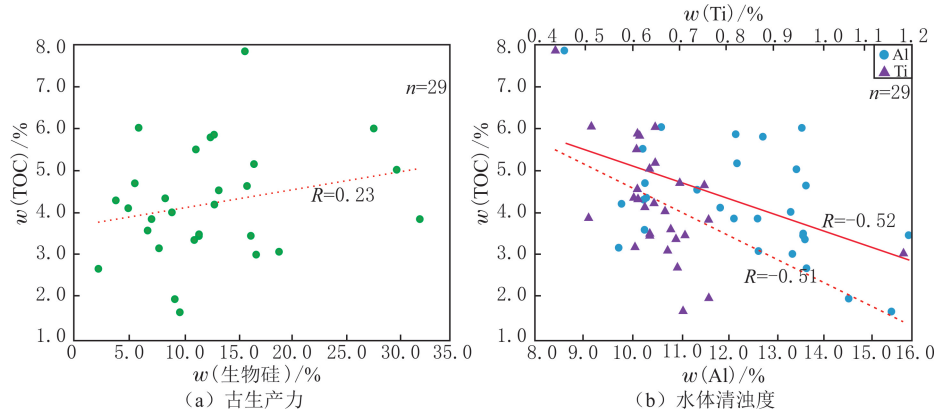


图 7 雷家地区有机质聚集参数与 $w(\text{TOC})$ 的相关关系
 Fig. 7 The correlation between organic matter accumulation parameters and TOC values in the Leijia Area

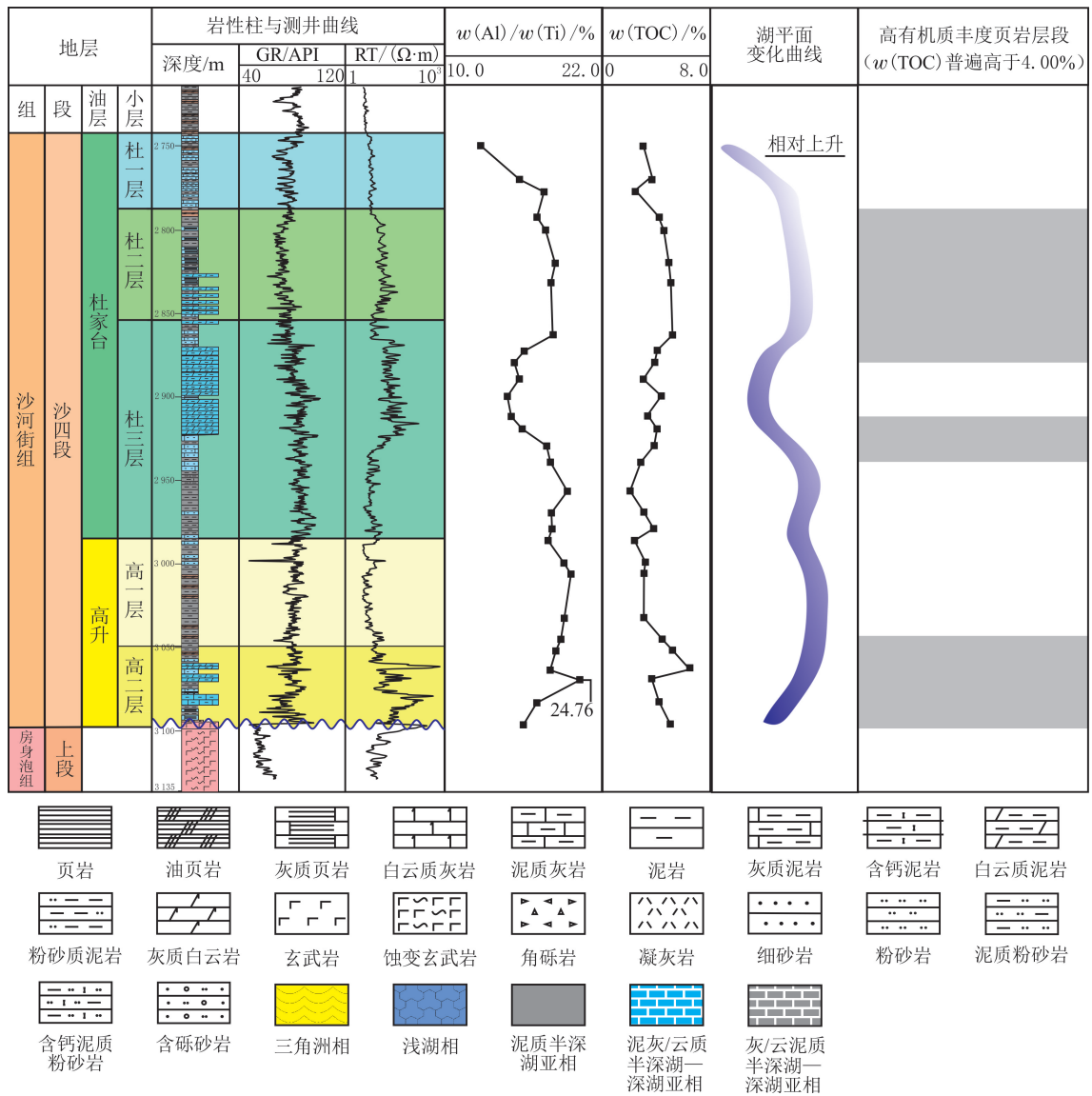


图 8 雷家地区沙四段 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{TOC})$ 及湖平面变化曲线
 Fig. 8 Variation curves of $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$, $w(\text{TOC})$ and corresponding lacustrine-level changes in the Es₄ Member in the Leijia Area

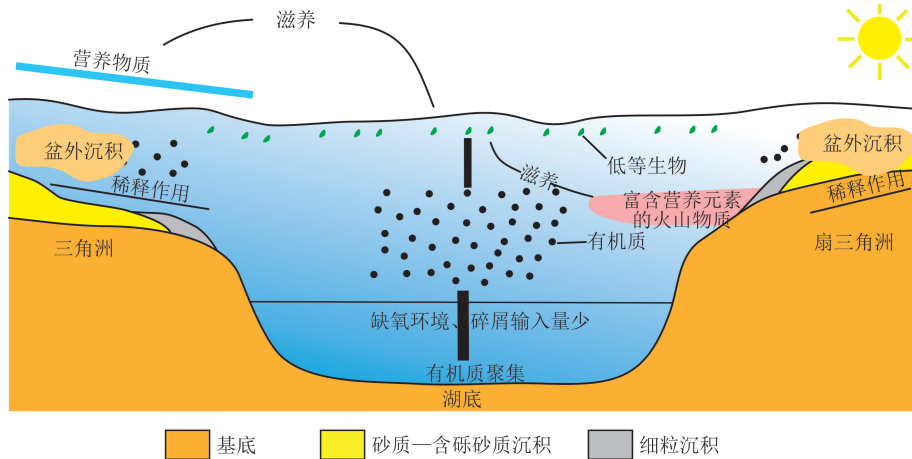


图9 雷家地区沙四段富有机质页岩沉积模式(据文献[17]修改)

Fig.9 Depositional model of organic-rich shales of the Es₄ Member in the Leijia Area (modified by reference[17])

图5-6)。 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 与 $w(\text{P})/w(\text{Ti})$ 的协同变化表征营养物质浓度的提升对古生产力的提升具有促进意义^[6,8-9,40],湖侵作用可能促进湖盆与其他盆地进行营养物质交换^[10,40-43],整体对营养物质的提升具有显著的作用(见表1-2和图5-6)。 $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 与 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 的协同变化表明,湖平面变化对湖底氧化还原条件具有一定的影响, $w(\text{U})/w(\text{Th})$ 在垂向上的变化幅度很小,基本在0.27左右(见表2)。 $w(\text{Al})$ 与 $w(\text{Ti})$ 直观反映黏土矿物和粗粒碎屑输入量的变化^[8,10,28],大致反映湖平面处于相对高值时,黏土矿物和粗粒碎屑的输入量普遍较低,说明湖平面变化对碎屑输入量具有一定的控制作用,在垂向上的变化幅度较小,与湖平面变化间的对应关系不显著,说明湖平面变化对深湖环境下的碎屑输入量施加不明显的宏观控制,符合碎屑输入量在湖侵期和湖退期减少的基本趋势。在普遍缺氧、粗粒碎屑输入量很小的深湖环境下,湖平面变化主要通过古生产力对有机质聚集作用具有较为显著的宏观控制作用。

此外,研究区沙四段广泛发育火山碎屑物质(见图4),以及湖相沉积与火成岩(玄武岩或凝灰岩)互层的岩石组合等,说明火山作用处于湖盆裂陷初期(见图1(c))的沙四段沉积时期并相对活跃。在杜三层中,凝灰质成分在研究区多口井中广泛发育(见图4)。在雷93井的杜三层中部(-2 930.0~ -2 900.0 m)、杜三层顶部—杜二层(-2 880.0~ -2 792.0 m)等相近或相邻层段,为富有机质页岩的发育层段,说明周期性的火山爆发对有机质聚集具有宏观控制作用^[17,37]。

5 结论

(1)雷家地区雷93井及其周边的沙四段主要由半深湖—深湖亚相黑色页岩组成,分为高升和杜家台2个油层,进一步分为高二层、高一层、杜三层、杜二层、杜一层5个小层。沙四段页岩的 $w(\text{TOC})$ 基本高于2.00%,平均为4.29%,沙四段底部(高二层)、中部(杜三层中部)和中上部(杜三层顶部—杜二层)发育3套高 $w(\text{TOC})$ 层段, $w(\text{TOC})$ 普遍高于4.00%。

(2)富有机质页岩集中发育层段的 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 普遍高于非富有机质页岩集中发育层段的,且 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 与 $w(\text{TOC})$ 的垂向变化特征在趋势上具有一定的相似性,古生产力的提升对雷93井沙四段页岩有机质聚集具有促进作用。

(3)氧化环境及较高的碎屑输入量不利于雷93井沙四段页岩的有机质聚集。富有机质页岩的集中发育形成在整体缺氧、近源粗粒碎屑沉积较少的环境下,为有机质聚集提供良好的保存基础。

(4)湖平面变化对有机质聚集具有一定的宏观控制作用。与火山—热液作用相关的凝灰质组分在杜三层中大量发育,对应高 $w(\text{Ni})/w(\text{Al})$ 、高 $w(\text{Cu})/w(\text{Al})$ 、高 $w(\text{P})$ 与高 $w(\text{TOC})$ 层段,火山作用形成的营养物质输入增加对古生产力变化的控制作用。

参考文献(References):

- [1] Lazar R, Bohacs K, Schieber J, et al. Mudstone primer: lithofacies variations, diagnostic criteria, and sedimentologic/stratigraphic implications at lamina to bedset scales[C]//SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology 12. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 2015:1-128.
- [2] Zou C, Zhu R, Chen Z, et al. Organic-matter-rich shales of China[J]. Earth-Science Review, 2019,189:51-78.
- [3] Zhang Y, Cen W, Huang W, et al. Sequence stratigraphic analysis of Devonian organic-rich shales in Northern Guangxi[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023,156:106450.
- [4] Zhang Y, Cen W, Chai K, et al. Sequence stratigraphic analysis and distribution features of Lower Carboniferous organic-rich shales in Northern Guangxi[J]. Marine and Petroleum Geology, 2024,162:106727.
- [5] Bradley B S. A tale of shales; the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian Basin[J]. Chemical Geology, 2003,195:229-273.
- [6] Negri A, Ferretti A, Wagner T, et al. Phanerozoic organic-carbon-rich marine sediments; overview and future research challenges [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009,273:218-227.
- [7] Ross D J K, Bustin R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata; examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin[J]. Chemical Geology, 2009,260(1/2):1-19.
- [8] Dong T, Harris N B, Ayranci K, et al. Relative sea-level changes and organic matter accumulation in shales of the Middle and Upper Devonian Horn River Group, Northeastern British Columbia, Canada; insights into sediment flux, redox conditions, and bioproductivity[J]. Geological Society of America Bulletin, 2018,130(5/6):859-880.
- [9] Zhou H, Harris N N, Dong T, et al. New insights into organic matter accumulation from high-resolution geochemical analysis of a black shale: Middle and Upper Devonian Horn River Group, Canada[J]. Geological Society of America Bulletin, 2022,134(7/8):2130-2144.
- [10] Zhang Y, Cen W, Qin Y, et al. Sequence stratigraphic division of the Devonian Liujiang Formation dominated by silicalites in the Northeastern Part of the Dianqiangui Basin, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2025,99(3):646-666.
- [11] Land L S, Mack L E, Milliken K L, et al. Burial diagenesis of clayey sediment, South Texas Gulf of Mexico sedimentary basin: a re-examination[J]. Geological Society of America Bulletin, 1997,109:2-15.
- [12] Harris N B, Freeman K H, Pancost R D, et al. The character and origin of lacustrine source rocks in the Lower Cretaceous synrift section, Congo Basin, West Africa[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2004,88:1163-1184.
- [13] 张英杰,陆济璞,王新宇,等.滇黔桂盆地东北部泥盆系竹节石页岩的时空分布与沉积特征[J].东北石油大学学报,2024,48(3):52-68.
- Zhang Yingjie, Lu Jipu, Wang Xinyu, et al. The spatio-temporal distribution and sedimentary characteristics of the Devonian Tentaculitic shales in the northeast of the Dianqiangui Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(3):52-68.
- [14] 毛俊莉.辽河西部凹陷页岩油气成藏机理与富集模式[D].北京:中国地质大学(北京),2020:12-31.
- Mao Junli. Reservoir formation mechanism and enrichment modes of shale oil and gas in the Western Liaohe Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020:12-31.
- [15] 李甜,代宗仰,李阳,等.辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段湖相白云岩成因[J].岩性油气藏,2022,34(2):75-85.
- Li Tian, Dai Zongyang, Li Yang, et al. Genesis of lacustrine dolomites of the fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Leijia Area, Western Liaohe Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2022,34(2):75-85.
- [16] Ma C, Wu Y, Gu T, et al. Trachyte reservoir characteristics and favorable reservoir identification and prediction in the J34 Block, Eastern Sag[J]. Acta Geophysica, 2022,70(4):1635-1650.
- [17] Ma C, Zhang Y, Zhang G. Control of lake-level changes on the distribution of the organic-rich shales of the Upper Sha-IV Sub-member in the Leijia Area in the Liaohe Depression[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025,50(18):14889-14907.
- [18] 李阳,李晓光,陈昌,等.辽河拗陷西部凹陷雷家地区沙四段杜三层细粒沉积岩储层特征及评价[J].地学前缘,2025,32(2):277-289.
- Li Yang, Li Xiaoguang, Chen Chang, et al. Reservoir characteristics and evaluation of fine-grained sedimentary rocks in E_{2s4} in the Leijia Area of the Western Sag, Liaohe Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2025,32(2):277-289.
- [19] 纪友亮,任红燕,张世奇,等.渤海湾盆地古近纪古地理特征与油气[J].古地理学报,2022,24(4):611-633.
- Ji Youliang, Ren Hongyan, Zhang Shiqi, et al. Paleogene palaeogeography and oil and gas distribution in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2022,24(4):611-633.
- [20] 李思伟,王璞珺,丁秀春,等.辽河东部凹陷走滑构造及其与火山岩分布的关系[J].地质论评,2014,60(3):591-600.
- Li Siwei, Wang Pujun, Ding Xiuchun, et al. The relationship of strike-slip belts and volcanic rocks distribution in the Eastern Depression Liaohe Basin[J]. Geological Review, 2014,60(3):591-600.

- [21] Wedepohl K H. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1971,8:307-333.
- [22] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Scientist*, 1958,46(3):205-221.
- [23] 黄文彪,程杰,邵明礼,等. 松辽盆地南部深层中—高演化阶段烃源岩品质评价标准探讨[J]. *非常规油气*, 2021,8(2):13-23.
Huang Wenbiao, Cheng Jie, Shao Mingli, et al. Discussion on organic matter abundance evaluation criteria of source rocks in deep middle-high thermal evolution stage in south Songliao Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021,8(2):13-23.
- [24] 李晓慧,姜振学,黄立良,等. 玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素及有利富集层段[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(2):33-44.
Li Xiaohui, Jiang Zhenxue, Huang Liliang, et al. Main controlling factors of shale oil enrichments and optimization of favorable enrichment intervals of Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(2):33-44.
- [25] 卢克宁. 德惠断陷深层烃源岩分类评价及成藏关系研究[J]. *非常规油气*, 2021,8(6):14-23.
Lu Kening. Study on classification and evaluation of deep source rocks and their accumulation relations in Dehui Fault Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021,8(6):14-23.
- [26] Lash G G, Blood D R. Organic matter accumulation, redox, and diagenetic history of the Marcellus Formation, Southwestern Pennsylvania, Appalachian Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014,57:244-263.
- [27] Schoepfer S D, Algeo T J, Ward P D, et al. Testing the limits in a greenhouse ocean: did low nitrogen availability limit marine productivity during the end-Triassic mass extinction? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016,451:138-148.
- [28] 王跃,桂和荣,苏尚国,等. 滇黔北五峰组—龙马溪组页岩沉积环境和古气候地球化学特征[J]. *沉积学报*, 2022,40(3):653-666.
Wang Yue, Gui Herong, Su Shangguo, et al. Sedimentary environment and paleoclimate geochemical characteristics of shale in the Wufeng and Longmaxi Formations, Northern Yunan-Guizhou Area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022,40(3):653-666.
- [29] Song L, Chen Q, Li H, et al. Roller-coaster atmospheric-terrestrial-oceanic-climatic system during Ordovician-Silurian transition: consequences of large igneous provinces[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023,14(3):101537.
- [30] Böning P, Shaw T, Pahnke K, et al. Nickel as indicator of fresh organic matter in upwelling sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015,162:99-108.
- [31] Bond D P G, Wignall P B. The role of sea-level change and marine anoxia in the Frasnian-Famennian(Late Devonian) mass extinction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008,263(3/4):107-118.
- [32] 朱士波. 济阳拗陷热液流体活动特征及其油气地质意义[J]. *非常规油气*, 2024,11(2):21-28.
Zhu Shibao. Characteristics of hydrothermal fluid activity and its petroleum geological significance in Jiyang Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(2):21-28.
- [33] 陈洋,尹楠鑫,陈岑,等. 陆相页岩油有机质来源与沉积环境分析:以苏北盆地高邮凹陷花庄地区古近系阜宁组二段为例[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(6):17-30.
Chen Yang, Yin Nanxin, Chen Cen, et al. Organic matter sources and depositional environment analysis of continental shale oil: a case study of Paleogene second member in Funing Formation in the Huazhuang Area, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(6):17-30.
- [34] 焦梦妍,袁玉洁,王俊,等. 奥陶纪/志留纪之交时期重大地质事件对沉积古环境及页岩有机质富集的影响:以中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. *非常规油气*, 2024,11(5):82-84.
Jiao Mengyan, Yuan Yujie, Wang Jun, et al. Impacts of major geologic events on sedimentary paleoenvironments and organic matter enrichment of shales during the Ordovician-Silurian boundary: a case study of shales of Wufeng-Longmaxi Formation in Middle and Upper Yangtze regions[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(5):82-84.
- [35] 周刚,胡德胜,徐新德,等. 北部湾盆地涠西南凹陷深层原油和烃源岩地球化学特征及成藏模式[J]. *东北石油大学学报*, 2025,49(2):46-59.
Zhou Gang, Hu Desheng, Xu Xinde, et al. Geochemical characteristics and accumulation models of crude oils and source rocks in the deep strata of Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2025,49(2):46-59.
- [36] 梅冥相,陈基瑜,张英杰. 黔桂地区下石炭统富有机质页岩的页岩气勘探意义[J]. *地质学报*, 2024,98(7):2193-2215.
Mei Mingxiang, Chen Jiyu, Zhang Yingjie. Organic-matter-rich shales of the Lower Carboniferous and their importantly potential implications of the shale-gas exploration in the region from the Southern Guizhou to Central Guangxi of South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024,98(7):2193-2215.
- [37] Zou C N. *Unconventional petroleum geology*[M]. 2nd ed. Waltham: Elsevier, 2017:1-450.
- [38] 杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2016,43(4):511-520.
Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016,43(4):511-520.

(下转第62页)