

渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段 岩相特征及沉积环境

——以樊页1井为例

逢淑伊^{1,2}, 操应长^{1,2}, 梁超^{1,2}

[1. 中国石油大学(华东) 深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:通过岩心、显微薄片的观察,依据有机质含量、无机矿物组成、沉积构造等特征,将渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)—沙三下亚段樊页1井的细粒沉积岩划分出11种岩相类型。利用常量、微量元素含量及特定元素比值的垂向变化,从古气候、古物源、古水深、古盐度和古氧化还原性5个方面对沉积环境的垂向变化特征进行分析。研究层段发育的细粒沉积岩形成于半深湖—深湖、半咸水—咸水、相对湿润、还原—强还原的古环境条件,且环境的垂向演化具有明显的阶段性,经历了水体加深、盐度降低、气候由干旱转为湿润、强还原—弱还原—还原、陆源供给由多减少再增多的演化过程。5个沉积环境要素共同影响着岩相类型的垂向分布与组合特征。随水体加深,岩相组合中碳酸盐岩所占比重逐渐降低。不考虑重力流事件,岩石组分中石英、长石含量与水体深度、离岸距离、陆源碎屑供给量密切相关,从而影响粉砂岩及粉砂质细粒沉积岩的发育程度。高盐、强还原的水介质环境有利于有机质的保存,多形成富有机质岩相。古气候的变化使其他古环境要素也相应发生改变,进而影响岩相类型的分布与组合特征。

关键词:细粒沉积岩;岩相特征;沉积环境;沙河街组;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Es^{4u} and Es^{3L}: A case study of Well FY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin

Pang Shuyi^{1,2}, Cao Yingchang^{1,2}, Liang Chao^{1,2}

[1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Characteristics summarized through core and microscopic thin section observations, including the organic matter content, inorganic mineral composition and sedimentary structure, were used to categorize the lithofacies types of the fine-grained sedimentary rocks in the upper section of the fourth member of Shahejie Formation (Es^{4u}) and the lower section of the third member of Shahejie Formation (Es^{3L}) in Dongying sag, Bohai Bay Basin. As a result, 11 lithofacies types were identified. The vertical variation of the sedimentary environment was analyzed in terms of paleoclimate, palaeosource, paleo-water-depth, paleosalinity and paleo-oxidation-reduction, based on the content of major and trace elements as well as vertical variation of specific element ratios. The fine-grained sedimentary rocks formed in semi-deep to deep brackish-to-saline lacustrine environments with relatively humid climate and reduction-to-strong reduction. In addition, the evolution of sedimentary environment is obviously periodic, featuring increase in water depth, decrease in salinity, climate change from arid to humid, change from strong reduction to weak reduction then to reduction, and terrigenous sediment supply change from large to small then to large quantities. All the five elements of sedimentary environment collectively influence the vertical distribution and combination of lithofacies types. With the water depth increasing, the proportion of carbonates to lithofacies assemblages will decrease. Without considering the gravity flows, a combination of water depth, offshore distance

收稿日期:2018-01-20;修订日期:2019-01-21。

第一作者简介:逢淑伊(1995—),女,硕士研究生,沉积学。E-mail:1536787473@qq.com。

通讯作者简介:操应长(1969—),男,博士、教授,沉积学、层序地层学和油气储层地质学。E-mail:cyc8391680@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1762217);国家自然科学基金青年科学基金项目(41602142);国家科技重大专项(2016ZX05006-003)。

and terrigenous debris supply will affect the contents of quartz and feldspar, which will in turn influence the development of siltstone and silty fine-grained sedimentary rocks. The setting featuring high salinity and strong reduction facilitates the preservation of organic matters, prone to produce organic-rich lithofacies types. Variation of paleoclimate makes other paleo-environmental elements change correspondingly, then affecting the distribution and combination of lithofacies types.

Key words: fine-grained sedimentary rock, lithofacies characteristic, sedimentary environment, Shahejie Formation, Dongying sag, Bohai Bay Basin

页岩油是未来油气勘探的重要接替领域,国内外勘探表明页岩油具有非常大的资源潜力^[1-2]。北美页岩油气的成功开发,极大地推动了全球页岩油气的勘探开发进程^[3-4]。中国页岩油资源潜力巨大^[5-8],在渤海湾盆地济阳坳陷^[9-10]、南襄盆地泌阳凹陷^[11-12]、松辽盆地^[13-14]及三塘湖盆地^[15-16]等多个盆地页岩层段,已不同程度地获得了页岩油流。东营凹陷是中国陆相页岩油勘探的主要地区之一,其发育的古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)–沙三下亚段泥页岩作为已发现油气的主要烃源岩^[17-20],具有厚度稳定、埋深适中,有机质丰度高、类型好的特点^[21-23]。已有110余口井见油气显示,勘探前景十分广阔。随着泥页岩油气勘探的深入^[24-26],对其岩相类型进行科学、系统划分,建立岩相组合与沉积环境之间的对应关系,对页岩油气勘探开发以及优势岩相的确立有着重要意义。本文通过岩心观察、薄片鉴定等手段,结合全岩X-射线衍射及有机地球化学资料,对研究层段发育的岩相类型进行划分,分析其沉积环境特征及垂向演化过程,以岩相及其组合特征为切入点,探讨沉积环境对岩相的控制作用。

1 地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东南部,东起青坨子凸起,西邻惠民凹陷,南抵鲁西隆起和广饶凸起,北以陈家庄–滨县凸起为界(图1),是中国陆相箕状断陷湖盆的典型代表,具有“北断南超,北深南浅”的特点。其构造演化受多期构造活动的影响^[27],根据构造活动特征的不同,划分为裂陷充填期和裂后充填期两个阶段^[28]。本次研究的层段发育在裂陷充填期,该时期盆地构造运动相对稳定,湖泊水体不断加深,气候暖湿^[29-30],入湖水流携带大量营养物质,湖生生物繁盛,沉积形成了厚层的富有机质细粒沉积。

2 细粒沉积岩岩相类型

细粒沉积岩是由粒径小于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的粘土级和细粉砂级沉积物组成的沉积岩,主要由碳酸盐矿物、粘土矿物、长石、石英及有机组分构成^[32],此外研究层段内

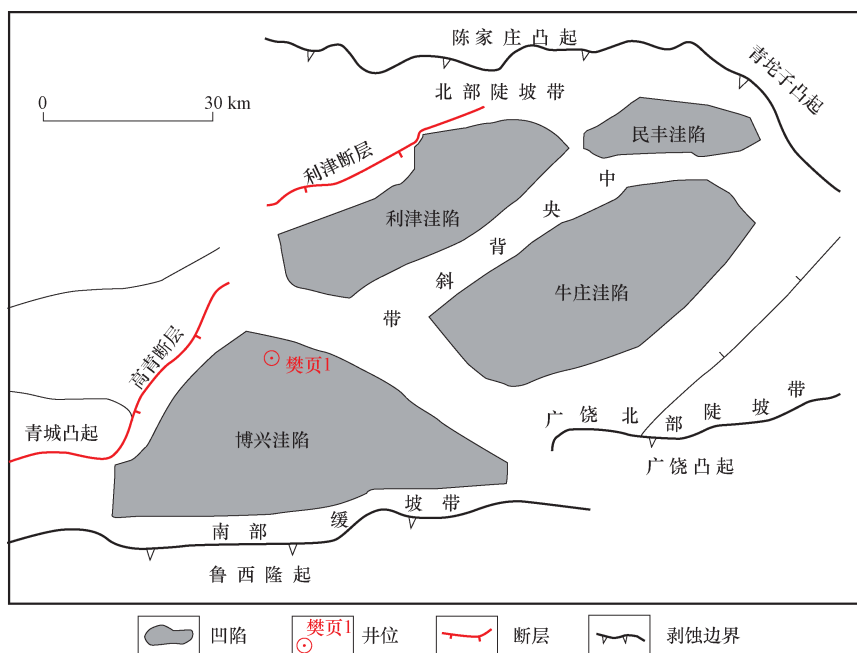


图1 东营凹陷构造单元及樊页1井井位分布^[31]

Fig. 1 Structural units of Dongying sag and the location of Well FY1^[31]

还发育有黄铁矿、菱铁矿以及少量硬石膏等矿物。对细粒沉积岩岩相类型进行分类有助于系统地描述细粒沉积岩的多样性,并对非常规油气勘探起到一定指导和借鉴意义。

目前国内外学者提出的岩相划分方案多是参考传统碎屑岩分类命名方式,以具成因意义的无机矿物、沉积构造、生物相及结构为分类依据^[33-35]。现有的划分方案多侧重于无机组分含量,而忽视了有机质对于岩相划分的重要意义^[36]。湖泊中的有机质来源具有二元性,岩石中总有机碳含量(*TOC*)一方面受湖泊原始生产力影响,一方面与保存条件密切相关;而湖泊原始生产力受古环境影响较大,保存条件与水介质物理化学性质密切相关^[37],因此,*TOC*可在一定程度上反映古环境和古水体物理化学条件。水体中的浮游植物进行光合作用使得局部水介质 *pH* 值升高,引起碳酸盐矿物的局部沉淀,或通过钙化作用形成生物钙质骨架,或通过分泌黏液、捕获碳酸盐矿物颗粒^[31],可见生物对碳酸盐矿物的沉淀有重要影响。此外,有机质的富集特征对于寻找有利储层具有重要意义。因此,有机质作为细粒沉积物的组成部分是岩相划分中不可忽略的重要依据。

2.1 岩相划分方案

通过对樊页1井300余米岩心的系统观察以及薄片鉴定,在前人分类方案的基础上,依据岩石类型、无机矿物组成及含量、颜色、沉积构造、有机质含量等特征,以 *TOC* 2% 为界,划分为贫有机质和富有机质两大类,将石英+长石、粘土矿物、碳酸盐矿物作为三端元,以含量 50% 为界分为 4 类:Ⅰ——碳酸盐岩;Ⅱ——粘土岩;Ⅲ——粉砂岩;Ⅳ——混合细粒沉积岩(图2)。

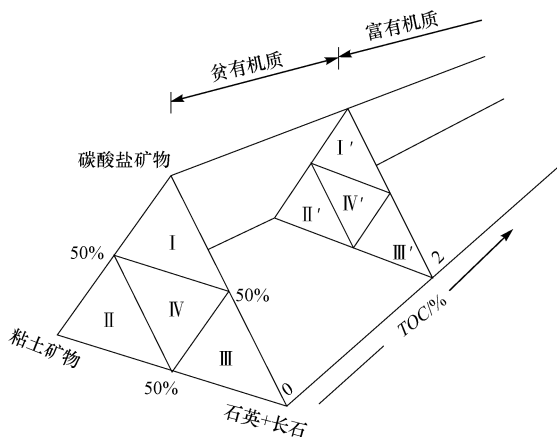


图2 东营凹陷樊页1井沙四上亚段—沙三下亚段细粒沉积岩三端元分类方案^[31]

Fig. 2 Ternary diagram of fine-grained sedimentary rocks in Es^{4U} and Es^{3L} in Well FY1, Dongying sag^[31]

参照碎屑岩命名方式,结合沉积构造和组分含量(10%, 25%, 50%)对Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ类进一步细分,对于三端元组分含量相对均一的Ⅳ类混合细粒沉积岩,将石英+长石+粘土矿物作为硅质碎屑端元,碳酸盐矿物作为碳酸盐端元,分为硅质碎屑型混合细粒沉积岩(硅质碎屑含量大于65%)和碳酸盐型混合细粒沉积岩(碳酸盐矿物含量大于35%)^[38]。按照上述方案将研究层段内发育的细粒沉积岩划分为11种岩相类型(表1)。

2.2 岩相特征

通过三端元投点(图3)可知研究层段主要发育混合细粒沉积岩和碳酸盐岩。其中碳酸盐岩是研究层段内分布最广的岩相类型,可细分为6小类(表1)。白云岩可细分为贫有机质层状白云岩(OPLD)和富有机质层状白云岩(ORLD)两小类。两种岩相类型均集中在沙四上亚段,岩心呈灰白色,镜下纹层水平、边界清晰且横向延伸较连续,浅色纹层由泥晶白云石构成。两者区别在于暗色粘土层中有机质含量的高低及赋存状态的差异,OPLD中的有机质含量低,呈分散分布(表1a₁, a₂),而ORLD中见断续层状有机质,且亮暗纹层之间可见结晶程度较好、具有一定定向性的碳酸盐矿物颗粒(表1b₁, b₂)。灰岩可依据矿物类型及含量、沉积构造及有机质含量细分为4小类。其中,粉砂含量小于25%的层状灰岩因有机质含量差异可细分为贫有机质层状灰岩(OPLL)和富有机质层状灰岩(ORLL)两类。两种岩相类型在研究层段内均广泛分布,主要集中在沙四上亚段。镜下OPLL的浅色泥晶

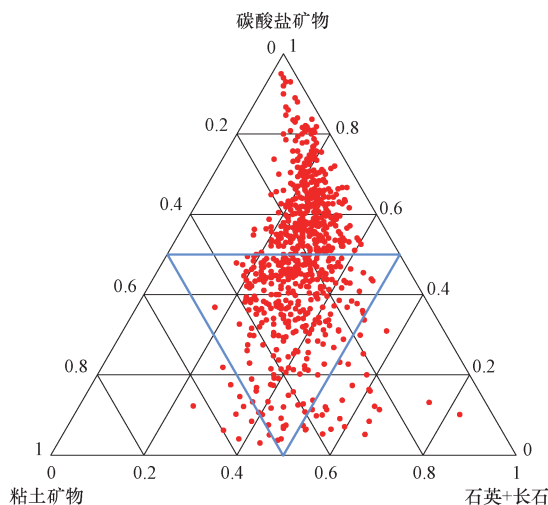
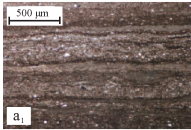
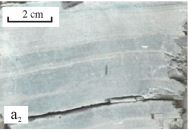
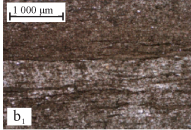
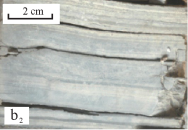
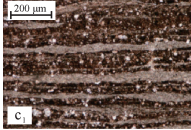
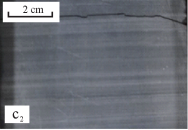
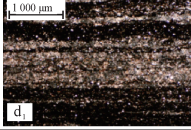
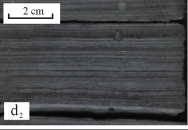
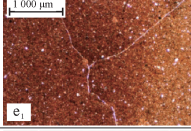
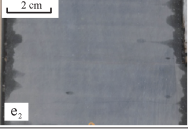
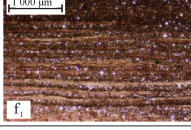
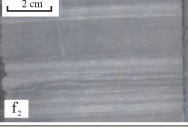
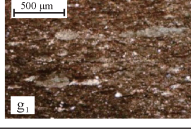
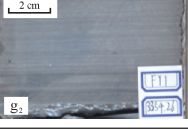
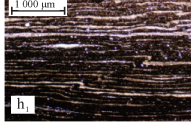
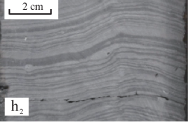
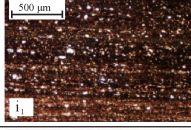
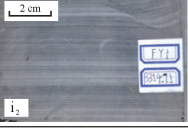
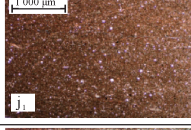
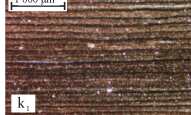
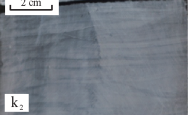


图3 东营凹陷樊页1井沙四上亚段—沙三下亚段细粒沉积岩矿物组成散点图

Fig. 3 Scatter diagram showing the mineral composition of fine-grained sedimentary rocks in Es^{4U} and Es^{3L} in Well FY1, Dongying sag

表1 东营凹陷樊页1井沙四上亚段-沙三下亚段细粒沉积岩岩相类型及特征

Table 1 Lithofacies types and characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Es^{4u} and Es^{3L} in Well FY1, Dongying sag

岩相类型	岩相特征					薄片照片	岩心照片	
	石英 + 长石/%	粘土矿物/%	碳酸盐/%	沉积构造	TOC/%			
碳酸盐岩	贫有机质层状白云岩	<25	<25	>50	层状	<2	 a ₁	 a ₂
	富有机质层状白云岩	<25	<25	>50	层状	>2	 b ₁	 b ₂
	贫有机质层状灰岩	<25	<25	>50	层状	<2	 c ₁	 c ₂
	富有机质层状灰岩	<25	<25	>50	层状	>2	 d ₁	 d ₂
	富有机质块状泥质灰岩	<25	25 ~ 50	>50	块状	>2	 e ₁	 e ₂
	贫有机质层状粉砂质灰岩	25 ~ 50	<25	>50	层状	<2	 f ₁	 f ₂
粘土岩	富有机质层状粉砂质粘土岩	25 ~ 50	>50	<25	层状	>2	 g ₁	 g ₂
粉砂岩	富有机质层状粉砂岩	>50	<25	<25	层状	>2	 h ₁	 h ₂
混合细粒沉积岩	富有机质层状硅质碎屑型混合细粒沉积岩	>65		<35	层状	>2	 i ₁	 i ₂
	贫有机质块状碳酸盐型混合细粒沉积岩	<65		>35	块状	<2	 j ₁	 j ₂
	富有机质层状碳酸盐型混合细粒沉积岩	<65		>35	层状	>2	 k ₁	 k ₂

注: a₁. OPLD, 埋深 3 263.71 m; a₂. OPLD, 埋深 3 433.71 m; b₁. ORLD, 纹层横向延伸较连续, 埋深 3 269.83 m; b₂. ORLD, 埋深 3 438.26 m; c₁. OPLL, 埋深 3 405.13 m; c₂. OPLL, 埋深 3 165.99 m; d₁. ORLL, 有机质呈层状分布, 埋深 3 180.50 m; d₂. ORLL, 埋深 3 375.68 m; e₁. ORBAL, 有机质呈分散状分布, 埋深 3 080.36 m; e₂. ORBAL, 不发育纹层, 埋深 3 076.76 m; f₁. OPLSL, 埋深 3 415.26 m; f₂. OPLSL, 埋深 3 345.01 m; g₁. ORLSC, 埋深 3 090.80 m; g₂. ORLSC, 埋深 3 354.24 m; h₁. ORLS, 埋深 3 170.51 m; h₂. ORLS, 埋深 3 389.29 m; i₁. ORLSMM, 埋深 3 179.31 m; i₂. ORLSMM, 埋深 3 354.77 m; j₁. OPBCMM, 埋深 3 079.31 m; j₂. OPBCMM, 不发育纹层, 埋深 3 359.78 m; k₁. ORLCMM, 埋深 3 168.45 m; k₂. ORLCMM, 埋深 3 348.07 m

方解石层厚约 70 μm , 暗色层主要由粘土矿物和有机质构成, 亮暗层厚度相近, 有机质呈断续薄层状, 另可见少量亮晶方解石颗粒(表 1 c_1, c_2); ORLL 的浅色亮晶方解石层厚约 50 μm , 暗色粘土层厚度明显小于方解石层, 有机质呈连续层状(表 1 d_1, d_2)。此外, 富有机质块状泥质灰岩(ORBAL)在研究层段内分布十分局限, 仅在沙三下亚段以夹层形式产出。矿物均匀分布、无定向性, 不发育纹层, 可见分散分布的亮晶方解石、有机质颗粒(表 1 e_1, e_2)。贫有机质层状粉砂质灰岩(OPLSL)在研究层段内分布较为广泛, 主要集中在沙四上亚段, 浅色泥晶方解石层部分横向延伸不连续, 这可能是由于水体动荡, 陆源输入对碳酸盐纹层改造的结果(表 1 f_1, f_2)。

混合细粒沉积岩在研究层段的各个深度段均有出现, 可细分为 3 小类。富有机质层状硅质碎屑型混合细粒沉积岩(ORLSMM)手标本呈灰色, 浅色层由石英、长石、碳酸盐矿物构成, 暗色粘土层中见大量分散分布的亮晶方解石颗粒, 发育横向断续的有机质层(表 1 i_1, i_2)。贫有机质块状碳酸盐型混合细粒沉积岩(OPBCM)手标本呈浅灰色, 矿物均匀分布、不发育纹层, 少量亮晶方解石、有机质分散分布, 见生物碎屑(表 1 j_1, j_2)。富有机质层状碳酸盐型混合细粒沉积岩(ORLCMM)纹层横向连续、边界清晰, 浅色层由碳酸盐矿物、石英、长石构成, 暗色粘土层厚度明显小于浅色层, 可见分散状分布的亮晶方解石颗粒, 发育有机质薄层(表 1 k_1, k_2)。

此外, 研究层段内还发育富有机质层状粉砂质粘土岩(ORLSC)(表 1 g_1, g_2)以及富有机质层状粉砂岩(ORLS)(表 1 h_1, h_2), 两种岩相类型分布十分局限。

3 沉积环境

3.1 沉积环境判定指标

沉积岩中常量、微量元素的含量可在一定程度上表征沉积水介质特征及古气候变化, 这是由于元素自身物化性质、古气候对元素分配的影响很大^[39]。元素的地球化学性质是复杂的, 特定矿物颗粒对特定元素的吸附作用、沉积物与水介质之间的元素交换、元素自身化学性质、古环境等都会对元素分配产生影响, 元素地球化学指标对沉积环境指示具有多解性且适用条件方面存在局限性。本文利用沉积岩中常量、微量元素含量的相对大小及特定元素比值的垂向变化, 从古气候、古物源、古水深、古盐度和古氧化还原性 5 个方面分析研究层段古环境的垂向变化特征。

3.1.1 古气候

1) Na/Al: 气候潮湿, 淡水输入增多, 水体加深, 盐度降低, 沉积岩中 Al 元素含量较高; 干旱气候条件下, 水体蒸发强烈, 盐度增加、碱性增强, Na 元素会以盐类形式富集在沉积岩中^[40]。因此 Na/Al 高值可指示干旱气候, 反之气候偏潮湿。

2) Mg/Ca: 一般情况下, 气候干旱, Mg/Ca 呈高值^[41]。在湖相泥岩中, Mg 含量通常低于 Ca 含量, 且在咸水湖相泥岩中, Mg 的富集与白云石有关, 表现出异常高值。

3.1.2 古物源

文中古物源指陆源输入供给量, 沉积物中粘土矿物 + 粉砂的含量可在一定程度上反映物源供给变化情况, 结合陆源元素 Al 和 Ti 的百分含量以及 TOC 变化趋势综合分析陆源输入的变化情况。

3.1.3 古盐度

1) Sr/Ba: 锶、钡化学性质较相似, 均能以可溶盐的形式进入到溶液中, 且对古盐度变化很敏感^[40]。由于锶的溶解度比钡高, 随着盐度升高、矿化度增加, Ba^{2+} 先达到饱和, 以硫酸盐的形式早于 Sr^{2+} 沉淀, 之后随着盐度进一步升高, Sr^{2+} 才会沉淀下来^[42]。故 Sr/Ba 高值反映古盐度偏大, 反之古盐度偏小。同时 Sr 含量高也指示干旱环境, 这与 Sr/Ba 高值所指示的高盐度水介质相吻合。但该指标在陆相湖盆水体盐度的表征方面仍存在一定误差^[43], 且碳酸盐矿物对 Sr 具有捕获作用故一定程度上影响准确性。

2) K/Na: 当水体盐度升高时, 与 Na^+ 相比 K^+ 更容易被粘土矿物吸附或进入矿物晶格中, 因此, K/Na 高值指示较高盐度的水介质环境^[44]。由于粘土矿物对 K 的吸附作用, K/Na 的异常高值一般对应泥岩层或含泥质多的层段。

3.1.4 古水深

1) Fe/Co: 近岸条件下, Fe 比 Co 更易沉淀, 故 Fe/Co 值较高; 随着水体加深、离岸距离的增大, Co 开始大量发生沉淀, Fe/Co 值变小^[45]。

2) Mn/Fe: 由于元素化学性质的差异, Mn 和 Fe 的沉积分异现象较为明显。与铁相比, 锰的稳定性较好, 可进行长距离搬运, Mn/Fe 值随水体加深、离岸距离的增加而呈相对高值^[46-47]。

3.1.5 氧化还原性

1) Ni/Co: Co 对水介质的氧化还原条件较为敏感,表现出氧化环境下易溶解迁移、还原环境下易沉淀富集的特征,在还原环境下趋向以硫化物的形式沉淀保留在沉积物中^[48]。故 Ni/Co 值高反映偏还原的水介质条件^[49],但这一比值受成岩作用的影响较大。

2) 黄铁矿百分含量:研究层段内黄铁矿存在多种赋存状态,以莓球状、粒状居多,其高含量可指示还原环境。

3.2 各环境要素之间的关系

古气候、古水深、古盐度、陆源输入及水体氧化还原性之间是相互关联、相互影响的。当整体为干旱气候背景,水体蒸发量的增大、入湖淡水的减少导致水体变浅、咸化,水介质出现分层,湖盆底部水体还原性增强;且随着水位下降、入湖水流的减少,陆源碎屑供给量也相应减少。反之,温暖湿润的气候条件使入湖水流增多、水体加深、盐度和还原性降低、水体分层减弱,入湖水流携带大量陆源碎屑物质沉淀在湖盆中。

3.3 沉积环境演化

通过元素地球化学指标、有机地球化学资料及矿物含量等的垂向变化特征,将研究层段沉积环境演化自下而上分为6个阶段,每个阶段又可细分为A和B两小段(图4)。研究层段的细粒沉积岩形成于半深湖-深湖、半咸水-咸水、相对湿润、还原-强还原的古环境条件,经历了水体加深、盐度降低、气候由干旱转为湿润、强还原-弱还原-还原、陆源供给由多减少再增多的演化过程,与前人的研究结果基本一致。

4 沉积环境与岩相类型

根据沉积环境的演化阶段,结合各阶段发育的岩相组合类型,可以看出沉积古环境条件的不同会使得岩石特征存在差异^[50],进而对岩相类型的分布和组合有一定的控制作用(图5)。

陆相湖盆沉积环境中,气候的变化在很大程度上会影响其他古环境要素的变化,进而影响岩相类型的分布与组合特征。干旱的气候导致入湖水流减少、水体蒸发强烈,水体变浅、盐度增大,多沉积形成碳酸盐岩,个别深度的样品中可见硬石膏。温暖湿润的气候使得入湖淡水增加,入湖水流携带着大量陆源碎屑进

入湖盆,沉积物中石英、长石的含量相应增加;大量营养物质进入湖盆,使得藻类生物繁盛,沉积物中有机质含量相应增大;水体加深,盐度降低,水体分层性减弱,碳酸盐岩含量减少,多沉积混合细粒沉积岩类。在总体气候条件不变的情况下,相对浅水环境多发育碳酸盐岩,随着水体加深,碳酸盐岩含量逐渐减少,发育混合细粒沉积岩。古环境及古水介质条件的变化造成生物的周期性繁盛、死亡,提供了充足的有机质。在湖泊原始生产力一定的情况下,还原的水介质环境有利于有机质保存,氧化条件下有机质多被分解。高盐环境下形成的细粒沉积岩有机质含量高,这是由于高盐水介质环境使水体出现分层,表层水与底层水之间的循环受阻,从而在湖盆底部形成还原环境,有利于有机质的保存;不考虑重力流事件,岩石中粉砂组分的含量一定程度上会受到水体深度、陆源碎屑供给量的影响,相对浅水环境下,较高的陆源输入量使得多沉积粉砂岩和粉砂质细粒沉积岩;随着离岸距离的增加,陆源输入量减小,沉积物中石英、长石含量也会相应减少。总的看来,几种沉积古环境要素的变化共同影响着岩相类型的分布与组合特征。

5 结论

1) 在岩性基础上结合矿物组成及含量、沉积构造、有机质含量等指标,将樊页1井沙四上亚段-沙三下亚段发育的细粒沉积岩划分为11种岩相类型。主要发育贫有机质块状碳酸盐型混合细粒沉积岩、富有机质层状碳酸盐型混合细粒沉积岩、富有机质层状硅质碎屑型混合细粒沉积岩、贫有机质层状粉砂质灰岩、贫有机质层状灰岩、富有机质层状灰岩6种类型。

2) 结合元素地球化学指标将研究层段的沉积古环境自下而上划分为6个演化阶段,研究层段的细粒沉积岩形成于半深湖-深湖、半咸水-咸水、相对湿润、还原-强还原的古环境条件,经历了水体加深、盐度降低、气候由干旱转为湿润、强还原-弱还原-还原、陆源供给由多减少再增多的演化过程。

3) 沉积古环境条件对岩相类型的分布和组合有一定控制作用。古气候条件的改变在很大程度上会影响其他古环境要素的变化,从而影响岩性;在不考虑重力流事件的情况下,岩石中粉砂组分的含量一定程度上受水体深度、陆源碎屑供给量的影响;有机质的保存受盐度和水体还原性影响;随水体的加深,碳酸盐岩逐渐减少,发育混合细粒沉积岩。

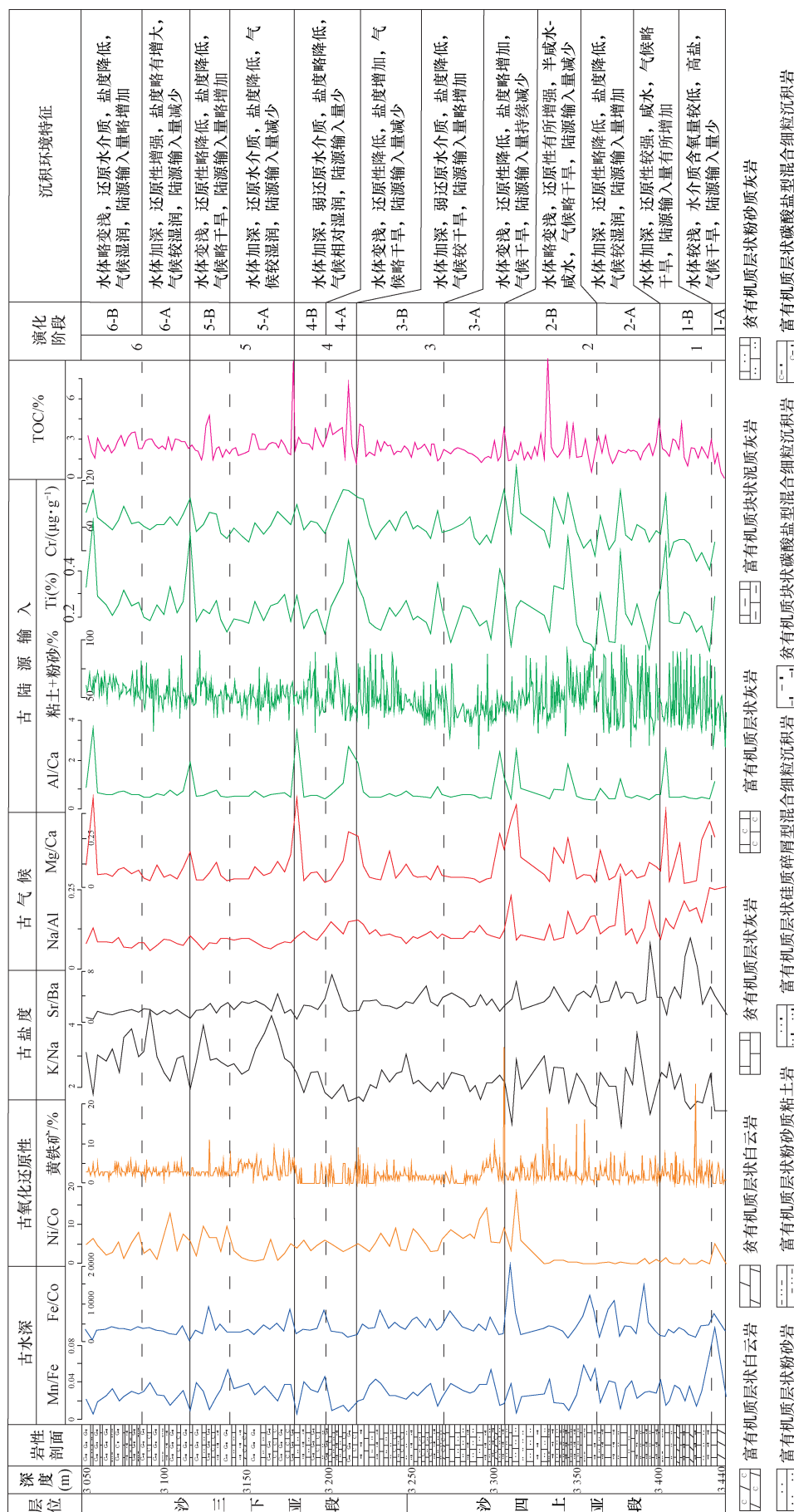


图4 东营凹陷樊页1井沙四上亚段—沙三下亚段沉积环境演化指标垂向变化

Fig. 4 Diagram showing the vertical evolution of sedimentary environment indexes in E_s^{4U} and E_s^{3L} in Well FY1, Dongying sag

参 考 文 献

- [1] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):3-17,1-2.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1):3-17,1-2.
- [2] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [3] Rogner H H. An assessment of world hydrocarbon resources[J]. Annual Review of Energy and Environment, 1997(22):217-261.
- [4] Hill D G, Lombardi T E, Martin J P. Fractured shale gas potential in New York[J]. Northeastern Geology and Environmental Sciences, 2004, 26(1/2):57-78.
- [5] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):14-24.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):14-24.
- [6] 姜在兴,张文昭,梁超,等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报,2014,35(1):184-196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1):184-196.
- [7] 卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2008.
Lu Shuangfang, Zhang Min. Petroleum Geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [8] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32,135-136.
Li Xinjing, Lv Zonggang, Dong Dazhong, et al. Geological conditions for the formation of shale gas resources in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):27-32,135-136.
- [9] 宋国奇,李继岩,贾光华,等. 东营凹陷王家岗构造带孔店组构造特征及其控藏作用[J]. 石油与天然气地质,2013,34(2):207-214.
Song Guoqi, Li Jiyang, Jia Guanghua, et al. Structural characteristics and its control on hydrocarbon accumulation of the Kongdian Formation in the Wangjiagang structural zone, Dongying Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2):207-214.
- [10] 张林晔,包友书,李钊源,等. 湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发,2014,41(6):641-649.
Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6):641-649.
- [11] 陈祥,王敏,严永新,等. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.
Chen Xiang, Wang Min, Yan Yongxin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4):568-576.
- [12] 李吉君,史颖琳,章新文,等. 页岩油富集可采主控因素分析:以泌阳凹陷为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2014,39(7):848-857.
Li Jijun, Shi Yinglin, Zhang Xinwen, et al. Control factors of enrichment and producibility of shale oil: a case study of Biyang Depression[J]. Earth Science (Journal of China University of Geoscience), 2014, 39(7):848-857.
- [13] 柳波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):280-285.
Liu Bo, Lv Yanfang, Ran Qingchang, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):280-285.
- [14] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青山口组为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(5):704-711.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):704-711.
- [15] 柳波,迟亚奥,黄志龙,等. 三塘湖盆地马朗凹陷二叠系油气运移机制与页岩油富集规律[J]. 石油与天然气地质,2013,34(6):725-730.
Liu Bo, Chi Yaao, Huang Zhilong, et al. Migration mechanism of the Permian hydrocarbon and shale oil accumulation in Malang Sag, the Santanghu Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6):725-730.
- [16] 柳波,吕延防,赵荣,等. 三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统地层超压与页岩油富集机理[J]. 石油勘探与开发,2012,39(6):699-705.
Liu Bo, Lv Yanfang, Zhao Rong, et al. Formation overpressure and shale oil enrichment in the shale system of Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6):699-705.
- [17] 张林晔,孔祥星,张春荣,等. 济阳凹陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学,2003,32(1):35-42.
Zhang Linye, Kong Xiangxing, Zhang Chunrong, et al. High quality oil prone source rocks in Jiyang depression[J]. Geochimica, 2003, 32(1):35-42.
- [18] 张林晔,蒋有录,刘华,等. 东营凹陷油源特征分析[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):61-64.
Zhang Linye, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Relationship between source rock and oil accumulation in Dongying sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):61-64.
- [19] 张林晔,刘庆,张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京:地质出版社,2005.
Zhang Linye, Liu Qing, Zhang Chunrong. Study on the genetic relationships between hydrocarbon occurrence and pools formation in

- Dongying Depression [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [20] 闫志强. 东营凹陷永安镇油田沙三段“槽谷”砂体发育规律研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 968–973.
- Yan Zhiqiang. Distribution of trough valley sand body in the third member of Shahejie Formation in Yonganzhen oilfield, Dongying sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 968–973.
- [21] 张林晔, 李政, 李钜源, 等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 1–13.
- Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the Palaeogene shale of Dongying Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 1–13.
- [22] Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, et al. The sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shale in the salinized Eocene-Dongying Depression [J]. Geological Society of America Bulletin, 2017, 130(1–2): 154–174.
- [23] Liang C, Cao Y C, Jiang Z X, et al. Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying Depression: implications for geochemistry and reservoir [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(11): 1835–1858.
- [24] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173–187.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173–187.
- [25] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 689–694.
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Research status and trends of shale gas in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 689–694.
- [26] 梁世君, 黄志龙, 柳波, 等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 588–594.
- Liang Shijun, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 588–594.
- [27] 薛雁, 吴智平, 李伟, 等. 东营凹陷新生代盆地结构特征及其控藏作用[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(2): 206–212.
- Xue Yan, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Cenozoic basins structure in Dongying sag and its control over Reservoir [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(2): 206–212.
- [28] 路慎强, 陈冠军, 吴孔友, 等. 渤海湾盆地东营凹陷中央背斜带构造特征和演化机理[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 274–279.
- Lu Shenqiang, Chen Guanjin, Wu Kongyou, et al. Tectonic feature and evolution mechanism of central anticline belt of Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 274–279.
- [29] 吴靖, 姜在兴, 童金环, 等. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 464–473.
- Wu Jing, Jiang Zaixing, Tong Jinhuan, et al. Sedimentary environment and control factors of fine-grained sedimentary rocks in the upper fourth Member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 464–473.
- [30] 杨万芹, 蒋有录, 王勇. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 19–26.
- Yang Wanqin, Jiang Youlu, Wang Yong. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es3–upper Es4 in Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 19–26.
- [31] 梁超. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- Liang Chao. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [32] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031–2059.
- [33] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett mudstone: Lithofacies and depositional setting of a deep-water mudstone-gas succession in the Fort Worth basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579–601.
- [34] 王冠民. 济阳拗陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 666–671 + 680.
- Wang Guanmin. Laminar combination and genetic classification of eo-gene shale in Jiyang Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666–671 + 680.
- [35] Macquaker J S H, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: an inclusive nomenclature for mudstones [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 735–744.
- [36] 梁超, 吴靖, 姜在兴, 等. 有机质在页岩沉积成岩过程及储层形成中的作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 1–8.
- Liang Chao, Wu Jing, Jiang Zaixing, et al. Significance of organic matters on shale deposition, diagenesis process and reservoir formation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 1–8.
- [37] 卢粤晗, 孙永革, 翁焕新. 湖泊沉积有机质的地球化学记录与古气候古环境重建[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 20–26.
- Lu Yuehan, Sun Yongge, Weng Huanxin. Lacustrine sediments as a record of changes of regional climate and environment [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 20–28.
- [38] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031–1039.
- Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031–1039.
- [39] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳拗陷细粒沉积岩形成环境及沉积

- 构造[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(3): 7-14.
- Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al. Formation environment and sedimentary structures of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu Subsag in Yabulai Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(3): 7-14.
- [40] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005, 25(1): 67-73.
- Song Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the fourth Member of Shahejie Formation of Southern Ramp, Dongying Depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(1): 67-73.
- [41] 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 Xiaohui, Xiao Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments-A summary[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 405-414.
- [42] 许璟, 蒲仁海, 杨林, 等. 塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 509-517.
- Xu Jing, Pu Renhai, Yang Lin, et al. The palaeosalinity analysis of Carboniferous mudstone, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 509-517.
- [43] 彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(2): 121-127, 151.
- Peng Haifeng, Wang Lijin, Jiang Liping. Geochemical characteristics of the Lucaogou formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar basin and its environmental implications[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(2): 121-127, 151.
- [44] 焦养泉, 吕新彪, 王正海, 等. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境—吐哈盆地砂岩型铀矿研究实例[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 615-620.
- Jiao Yangquan, Lv Xinbiao, Wang Zhenghai, et al. Two distinct geological environments from sedimentary to diagenesis stages: examples from sandstone-type uranium deposit, Turpan-hami Basin[J]. Earth science, 2004, 29(5): 615-620.
- [45] 邵晓岩, 田景春, 杨玉林, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区晚三叠世长4+5沉积期古环境研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008, (18): 73-78.
- Shao Xiaoyan, Tian Jingchun, Yang Yulin, et al. Study on paleoenvironment of the Late Triassic change 4+5 depositional period of the Baibao area in Ordos Basin[J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2008(18): 73-78.
- [46] 陈中红, 查明, 金强. 东营凹陷古近系中深层湖盆演化中的无机元素响应[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 925-932.
- Chen Zhonghong, Zha Ming, Jin Qiang. Mineral elemental response to the evolution of terrestrial brine faulted-basin: a case study in the Paleogene of Well Haoke-1, Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 925-932.
- [47] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 72-80.
- Lin Zhijia, Chen Duofu, Liu Qian. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(1): 72-80.
- [48] 熊国庆, 江新胜, 蔡习尧, 等. 藏南白垩系泥、页岩微量、稀土元素特征及氧化—还原环境分析[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 730-745.
- Xiong Guoqing, Jiang Xinsheng, Cai Xiyao, et al. The characteristics of trace element and REE geochemistry of the Cretaceous mudrocks and shales from southern Tibet and its analysis of redox condition[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 730-745.
- [49] 张小龙. 四川盆地及周边地区五峰组—龙马溪组页岩有机质特征、沉积环境和含气性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- Zhang Xiaolong. The study of organic matter characteristic, sedimentary environment and shale gas potential for Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin and its periphery, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [50] 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷西部沙三下亚段—沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 320-332.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the west of Dongying sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 320-332.

(编辑 张亚雄)