

早始新世极热气候时期咸化湖盆混合沉积作用 ——以渤海湾盆地东营凹陷孔店组为例

谭先锋^{1,2},王萍¹,王佳^{1,2},罗龙³,梁迈²,谭东萍²,况昊^{1,2}

[1. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室,重庆 401331; 2. 重庆科技学院石油与天然气工程学院,重庆 401331;

3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:混合沉积作用是一种特殊的沉积现象,一直是沉积学领域关注的对象。文章利用钻井岩心、薄片、同位素和元素分析等资料,对早始新世极热气候(IETM)时期东营咸化湖盆混合沉积进行系统研究。结果表明,渤海湾盆地东营凹陷孔店组混合沉积现象包括混积层系和结构混合沉积两种类型。混积层系主要包括陆源碎屑岩与碳酸盐岩的互层沉积和陆源碎屑岩与硫酸盐岩的互层沉积。结构混合沉积主要包括陆源碎屑物质与碳酸盐的结构混合和陆源碎屑物质与硫酸盐的结构混合沉积。孔店组沉积期不同阶段具有不同的混积相带特征,早期混合沉积发育在滨浅湖泥坪和滨浅湖砂坝环境中;中期受到极热气候影响,混合沉积主要发生在泥坪、砂坝和高盐度深水环境中;晚期湖盆咸化持续,混合沉积主要发生在泥坪、砂坝、高盐度深水环境和生物浅滩等环境中,混合沉积主要以相缘混合为主,发育少量间断混合和原地混合类型,受到物源供给、水化学性质、水动力和湖平面升降等制约。证实了在IETM事件的影响下,孔店组沉积期湖盆发生了强烈咸化作用,咸化过程与碎屑物质的充注同时进行,形成了典型的咸化湖盆混合沉积,混合沉积物埋藏过程中的碳酸盐组分、硫酸盐组分溶蚀,以及裂缝作用均可以形成油气储层,混合沉积中的原始化学组分可以很好地恢复古湖泊环境。

关键词:咸化湖盆;极热气候;混合沉积;孔店组;早始新世;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Mixed sedimentation in saline lacustrine basins during initial Eocene thermal maximum period: A case study on Kongdian Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Tan Xianfeng^{1,2}, Wang Ping¹, Wang Jia^{1,2}, Luo Long³, Liang Mai², Tan Dongping², Kuang Hao^{1,2}

[1. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil & Gas Exploration and Development, Chongqing 401331;

2. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249]

Abstract: Mixed sedimentation, a special sedimentary phenomenon, has always been a hot topic in sedimentology domain. This article documents a systematic study on the mixed sedimentation in saline lacustrine basins during the initial Eocene thermal maximum (IETM) period and the formation of Dongying Sag, Bohai Bay Basin based on analyses of core, thin section, isotopic and element data. The results reveal that there are two kinds of mixed sedimentation in the Kongdian Formation of Dongying Sag: mixed sedimentary sequences and structure-mixed deposits. The former mainly includes deposits of continental siliciclastic rocks interbedded with carbonates and that interbedded with sulfates. The latter mainly include deposits of structurally mixed continental siliciclastic with carbonates and that with sulfates. Various mixed siliciclastic-carbonate facies zones are identified in different stages of the deposition of the Kongdian Formation. Mixed sedimentation in the formation occurred in shore-shallow lake mud flats and sand bars during the early stage, and then in mud flats, sand bars and high-salinity deep water settings during the interim stage due to the thermal maximum. Later on, with a continuous salinization of the lake basin, sedimentation in the place went on in such settings as mud flat, sand bar, high-salinity deep water as well as bioclastic shoal and etc. It was dominated by facies-margin mixing, with accidentally discrete or autochthonous mixing. Controlling factors include sediment input, water hydrochemistry, hydrodynamic force,

收稿日期:2017-12-13;修订日期:2018-03-19。

第一作者简介:谭先锋(1982—),男,博士、副教授,沉积地质与古环境研究。E-mail: xianfengtan8299@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202043);中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0108);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1401316)。

and fluctuation of water-level. The study confirms that, during the initial Eocene thermal maximum period, the lake basin in the area had gone through an intense salinization process, which occurred simultaneously with clastic input into the basin and formed typical mixed siliciclastic-carbonate deposits in the saline lacustrine basin. Dissolution of carbonate and sulfate during burial process of the mixed sediments and fracturing contributed to the formation of hydrocarbon-bearing reservoirs. The original chemical constituents in the mixed deposits could be used to restore the paleo-environment of the lake.

Key words: saline lacustrine basin, extreme hot climate, mixed deposit, Kongdian Formation, Early Eocene, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

“混合沉积现象”自 Mount 在 1984 年首次提出以来^[1],一直受到国内外沉积地质学家的广泛关注^[2-7],这种特殊的沉积现象广泛发现于浅海陆棚、陆表海、滨浅湖、滨浅海及三角洲前缘等环境中^[8-10]。在类似的研究报道中,有关湖泊环境中混合沉积现象的报道屡见不鲜^[7,11-14]。与海洋相比,湖泊环境的规模较小,且受季节性气候条件和物源供给的影响较大^[15],沉积厚度变化较快,容易形成薄互层的岩性组合^[16],这种岩性组合包括了灰岩-砂岩、泥岩-泥晶灰岩、砂岩-颗粒灰岩、泥岩与颗粒灰岩等混积层系^[7,17],这种互层型的混积层系在湖泊沉积记录中广泛存在,是混合沉积的宏观表现形式。事实上,混合沉积现象远不止互层型的混积层系这么简单,在同一个岩石中的混积现象表现的更加丰富。典型的就是在镜下薄片观察时发现的碎屑颗粒和呈现基底式的泥晶方解石(少数为亮晶方解石和白云石)的共生现象^[18],也有生物颗粒中发现的大量碎屑颗粒现象,如川中龙岗地区的介壳灰岩中出现的大量碎屑颗粒^[14,19],甚至还有少量的碳酸盐内颗粒和陆源碎屑颗粒的混合沉积现象^[3-4]。这样的沉积作用主要发生在滨浅湖环境的生物滩坝、砂坝和三角洲的前缘地带^[7,14,20],其成因主要是碎屑物质的沉积分异和湖泊化学沉积分异的共同参与而形成,主要受控于构造条件、气候条件和物质来源等因素^[8],也有学者探讨其层序地层控制下的混合沉积作用规律^[21]。随着湖相混合沉积研究的深化,逐步开始由定性的描述向定量计算,由传统的镜下观察向信息化手段的运用,如利用测井识别定量识别混积岩类型^[22],并开始对这一典型沉积现象与油气的关系进行探讨^[23],认为混积岩中存在很大的油气储集潜力,大量钙质组溶解为储层发育提供了条件^[9]。

盐湖是一种特殊的湖泊类型,化学物质沉淀速度较快,可形成石膏、盐岩及方解石等典型的化学物质^[24-25],可以形成大量的混合沉积记录^[26]。与开放性淡水湖泊不同的是湖泊中除了沉淀碳酸钙之外,还可以原生形成石膏和盐岩,有学者曾提出盐湖中的混积岩应该也包括硫酸盐的参与^[26-28]。近年来,笔者在

对济阳拗陷古近系和柴达木盆地古近系的对比研究中发现,地层中存在一定数量的膏质砂岩,即砂岩中存在基底式分布的石膏^[15]。济阳拗陷古近系孔店组沉积中后期,受古新世末期的极热气候事件(IETM)影响,湖泊持续咸化,形成典型盐湖^[16]。本文以孔店组为例,深入探讨该时期咸化湖盆的混合沉积作用并讨论其研究意义,为混合沉积作用研究增添新的实例。

1 区域地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地东南缘,属于济阳拗陷次一级构造单元(图 1a)。古近纪早期,济阳地区受 NW 向左行走滑断层影响,形成一系列 NE、NNE 向断裂,总体表现为北断南超的半地堑式盆地构造,叠置在中生代陆相盆地之上^[29],形成了一系列箕状断陷湖盆,其中以东营箕状断陷湖盆最具有代表性^[30]。该时期东营凹陷北边发育陈家庄凸起,南边发育广饶凸起和鲁西隆起,西边发育滨县凸起、林樊家凸起和青城凸起,东边发育青坨子凸起(图 1b),这些构造凸起与东营箕状断陷湖盆共同构成了一个完成的盆—山耦合体系,形成一个典型的箕状断陷湖泊;东营箕状断陷湖泊主要表现为北部断裂活动发育,发育了陈南断层、胜北断层、永北断层和利津断层等断裂带,这些断裂带共同控制了东营箕状断陷湖盆的构造格局和沉积面貌,在北部地区形成了系列的粗粒碎屑岩沉积体,如近岸水下扇和扇三角洲等粗碎屑沉积体^[31];南部缓坡带断裂活动不发育,少量小型断裂规模远小于北部,构造格局控制了该时期沉积格局,主要为缓坡型的三角洲和滨浅湖沉积,沉积物粒度总体较细^[15]。

该时期沉积格局差异制约了地层岩性的横向变化,沉积了一套孔店组的碎屑沉积物。孔店组为古新世和早始新世时期沉积的产物,主要为一套红色碎屑沉积物(图 1c)。岩性上可分为 3 段,孔三段主要为红色碎屑沉积,为断陷初期的沉积产物,研究区大部分为剥蚀状态,只有零星发育;孔二段主要为灰色碎屑沉

取至 50 mL 容量瓶中,摇均匀后在 ICP-MS 上采用在线内标(Rh)法进行测量,得各样品的测定结果。

为了系统分析砂岩中碳酸盐矿物的成因,判定其是否为原始沉积环境下的混合沉积作用所形成的产物,重点选取了 W100 和 SK1 两口井的 20 个不同碳酸盐含量的样品进行了分析,实验测试在长江大学沉积盆地研究中心实验室-GasbenchII 气体同位素质谱仪上采用磷酸法进行实验分析, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)和 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)的标准偏差分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。检测依据:SY/T 5238—2008;实验温度 25℃左右,湿度为 60%RH。

3 混合沉积现象

3.1 混积层系

混积层系是一种常见沉积现象^[4],普遍存在于地表露头 and 钻井岩心剖面中^[8]。本次研究通过对济阳坳陷 10 口典型单井钻井剖面进行观察,系统总结了区内混积层系类型及叠加方式(图 2),主要特征如下。

3.1.1 陆源碎屑岩与碳酸盐岩的互层沉积

该类混合沉积现象在研究区内广泛发育,以南部缓坡带最为普遍。这种混合沉积现象主要表现为灰岩与粉砂岩的交互沉积、泥质灰岩与泥岩的交互沉积(图 2)。录井资料显示,灰岩厚度一般较小,约为 0.1~2 m,少数为比较纯的灰岩类型(图 2a),多数灰岩中碳

酸盐矿物成分不纯,灰岩夹层实际为含有少量粘土和粉砂的结构混合类灰岩(图 2b—d)。岩心精细观察表明,在粉砂岩和砂岩中普遍存在较多的钙质夹层(图 3a),夹层厚度非常小,约为 0.1~0.5 cm,这种钙质夹层类似于“夹心饼干”,广泛存在于滨浅湖粉砂岩中。大量录井资料显示,南部缓坡带的 W46, WG100, W100, BG1 等井区存在有较多的灰岩(泥灰岩)夹层,主要受南部缓坡带滨浅湖物源供给和钙化水介质条件制约。

3.1.2 陆源碎屑岩与硫酸盐岩的互层沉积

该类混合沉积现象是一种典型的盐湖沉积现象(Xiao Chuantao 等, 1999),以中央洼陷带最为普遍。该类混合沉积现象主要表现为膏岩与泥岩、膏岩与粉砂岩的交互沉积(图 2e—h)。录井资料显示,膏岩厚度不均匀,约为 0.1~10 m,以薄层的膏岩夹层为主。膏岩成分不纯,多数为含有粘土的膏岩类型。录井资料显示,这种混积层系主要发育在中央洼陷带,如 XDF10, XLS1 和 HK1 等井位区,主要跟高浓度的封闭性盐湖有关。

3.2 结构混合沉积

结构混合沉积现象在滨浅湖中普遍存在,尤其是在高浓度的化学型湖泊中广泛发育。这种沉积物类型一般表现为陆源碎屑物质、碳酸盐矿物和硫酸盐矿物

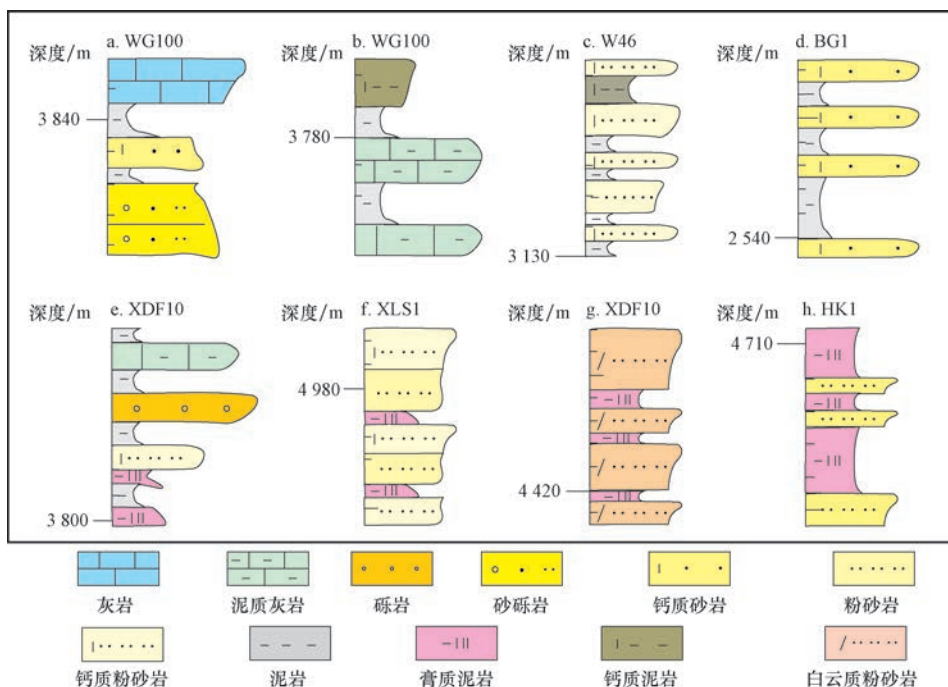


图 2 东营凹陷孔店组不同类型混积层系

Fig. 2 Mixed sequences of various kinds in the Kongdian Formation of Dongying Sag

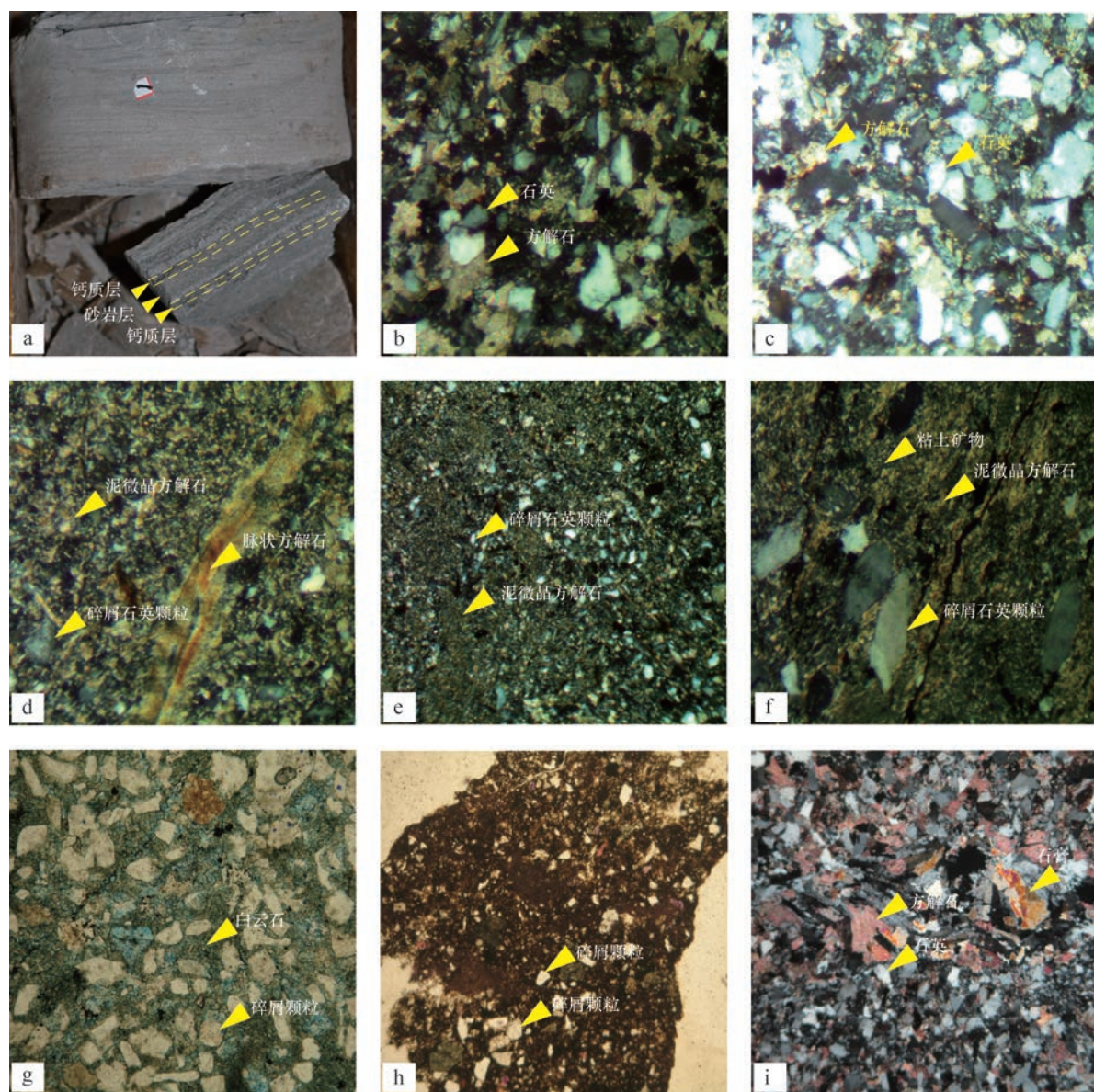


图3 东营凹陷孔店组混合沉积现象

Fig. 3 Mixed sedimentation in the Kongdian Formation of Dongying Sag

a. 砂岩与泥晶灰岩互层, W100 井, 埋深 1 574.1 m; b. 钙质粉砂岩, W100 井, 埋深 2 188.6 m; c. 含钙泥质粉砂岩, W100 井, 埋深 2 264.2 m; d. 含粉砂泥质灰岩, W46 井, 埋深 2 872 m; e. 含钙质泥质粉砂岩, W46 井, 埋深 2 957.1 m; f. 含钙泥质砂岩, 浊流沉积, SK1 井, 埋深 5 954.9 m; g. 白云质粉砂岩, XLS1 井, 埋深 4 412 m; h. 藻类中含有少量碎屑砂, XLS1 井, 埋深 4 340 m; i. 含膏钙质粉砂岩, XDF10 井, 埋深 5 050 m

等以不同比例混合在一起, 形成过渡类型的沉积岩。考虑到成岩因素的影响, 一般认为只有陆源碎屑物质或碳酸盐(硫酸盐)含量大于5%的沉积岩才可以称为混积岩^[3,11]。通过大量薄片观察, 东营凹陷广泛发育结构混合沉积岩类型, 主要表现为陆源碎屑岩—碳酸盐和陆源碎屑岩—硫酸盐, 其中第一种混合最为普遍(图3)。

3.2.1 陆源碎屑物质—碳酸盐的混合

这种混合沉积在研究区最为普遍, 主要表现为陆源碎屑物质和碳酸盐类物质以不同比例的混合。由于

粘土矿物多数是因为机械搬运—沉积作用形成的, 所以一般也考虑为陆源碎屑物质^[5], 碳酸盐类物质主要包括方解石和白云石两种矿物类型。大量薄片观察表明, 东营凹陷广泛存在陆源碎屑物质(含粘土矿物)、方解石和白云石混合沉积现象, 方解石和白云石主要以基底式胶结或孔隙式胶结方式存在(图3b—i), 陆源碎屑颗粒多数“漂浮”在碳酸盐矿物中, 大量的粘土矿物充填在陆源碎屑颗粒中, 与碳酸盐矿物一起起到胶结的作用, 陆源碎屑石英、长石等颗粒呈“漂浮状”分布在粘土矿物和碳酸盐矿物混合体系中(图3d—f)。碳酸盐矿物主要为方解石和白云石, 以泥微晶方解石和白

表 1 东营凹陷混合沉积岩微观矿物特征
Table 1 Minerology of the mixed deposits in Dongying Sag

样品号	深度/m	岩石类型	石英/%	长石/%		岩屑(R)/%			泥质杂基/%	方解石/%	白云石/%	硬石膏/%
				钾长石	斜长石	岩浆岩 (VRF)	变质岩 (SRF)	沉积岩 (SRF)				
W46-14	2 924.80	含灰长石砂岩	49.00	22.00	20.00	1.00	5.00	2.00	0.50	8.00	2.00	5.00
W46-13	2 924.83	含灰长石砂岩	49.00	20.00	18.00	2.00	8.00	2.00	4.00	7.00	2.00	5.00
W46-12	2 924.70	含灰长石砂岩	49.00	20.00	17.00	2.00	7.00	2.00	8.00	7.00	2.00	3.00
W46-6	3 787.69	含膏长石砂岩	48.00	8.00	12.00	8.00	16.00	4.00	2.00	2.00		3.00
W46-5	3 791.35	含灰长石砂岩	48.00	20.00	20.00	1.00	7.00	2.00	1.00	12.00		
W46-4	4 404.20	含灰长石岩屑砂岩	25.00	15.00	22.00	3.00	31.00	1.00	10.00	2.00		
W46-3	4 404.40	含灰岩屑长石砂岩	34.00	13.00	23.00	0.50	23.00	7.00	8.00	4.00		
W46-1	4 406.85	含灰长石砂岩	10.00	10.00	39.00	0.50	40.00	1.00	3.00	6.00	4.00	
W100-33	1 799.80	含灰长石砂岩	53.00	18.00	16.00	2.00	8.00	3.00	8.00	15.00		
W100-29	1 799.80	含灰长石砂岩	47.00	18.00	17.00	3.00	10.00	5.00		25.00		
W100-23	1 863.95	含灰长石砂岩	44.00	19.00	18.00	3.00	12.00	4.00	5.00	20.00		
W100-22	1 900.20	灰质长石砂岩	48.00	17.00	16.00	3.00	12.00	4.00	2.00	25.00		
W100-20	2 018.10	含灰岩屑长石砂岩	46.00	20.00	17.00	3.00	11.00	3.00	1.00	12.00	3.00	
W100-19	2 020.30	含灰长石砂岩	44.00	17.00	16.00	4.00	12.00	7.00	3.00	8.00	2.00	
W100-17	2 112.25	含灰岩屑长石砂岩	42.00	17.00	16.00	5.00	14.00	6.00	4.00	15.00		
W100-16	2 112.50	灰质岩屑长石砂岩	44.00	18.00	17.00	4.00	14.00	3.00	1.00	25.00		
HK1-47	4 754.00	含灰岩屑长石砂岩	45.00	15.00	15.00	15.00	5.00	5.00	1.00	8.00	2.00	0.50
HK1-46	4 781.00	含膏长石砂岩	53.00	18.00	16.00	2.00	6.00	5.00		3.00	1.00	6.00
HK1-40	4 786.00	含灰长石砂岩	52.00	18.00	17.00	2.00	5.00	5.00	2.00	10.00	2.00	0.50
HK1-39	4 787.00	含灰长石砂岩	55.00	17.00	15.00	2.00	7.00	4.00	3.00	6.00	4.00	6.00
HK1-31	5 105.05	含膏长石砂岩	44.00	17.00	19.00	2.00	14.00	4.00		3.00	1.00	12.00
HK1-28	5 105.45	含灰长石砂岩	50.00	19.00	15.00	2.00	10.00	4.00	2.00	13.00	3.00	0.50
HK1-27	5 106.55	含砂长石砂岩	52.00	18.00	17.00	2.00	7.00	3.00	1.00	13.00	2.00	0.50
HK1-25	5 107.15	含灰长石砂岩	50.00	18.00	17.00	2.00	9.00	2.00	2.00	10.00	1.00	2.00
HK1-23	5 107.85	含灰长石砂岩	50.00	18.00	17.00	2.00	8.00	4.00	2.00	10.00	1.00	3.00
HK1-21	5 108.35	含灰长石砂岩	50.00	18.00	17.00	2.00	8.00	4.00	2.00	18.00	1.00	
HK1-12	5 579.00	含灰屑长石砂岩	41.00	18.00	16.00	5.00	16.00	4.00		12.00	0.50	
HK1.11	5 625.00	含灰岩屑长石砂岩	41.00	18.00	16.00	5.00	16.00	4.00		13.00	0.50	

云石为主,少数方解石重结晶形成较大的晶粒结构,碎屑颗粒以石英为主,分选和磨圆一般(图 3)。大量统计表明,碳酸盐矿物含量最高可达 25%,一般分布在 5%~20%,白云石含量较小,少数岩石中有发现,碎屑颗粒含量一般在 50%以上,较少有比较纯的灰岩或者白云岩(表 1)。由于有陆源碎屑颗粒、碳酸盐和粘土矿物的 3 种类型物质存在,通常形成钙质砂岩、砂质灰岩、泥质灰岩和含钙泥质砂岩等过渡类型的岩类。

3.2.2 陆源碎屑物质-硫酸盐的混合

该类混合沉积岩类型一般发育在盐湖环境中,主要为不同比例的陆源碎屑物质(含粘土矿物)和硫酸盐的混合沉积^[27]。通过对东营凹陷不同沉积部位的薄片进行鉴定,该类混合沉积现象主要发育在 SK1,

HK1 和 XDF10 等井区,硫酸盐以基底式和孔隙式胶结方式充填于碎屑颗粒中,碎屑颗粒以石英为主。大量微观统计表明,硬石膏含量最高可达 12%,多数为 4%~8%(表 1),少数以硬石膏沉积为主的混合沉积岩当中,硬石膏含量可达 80%以上。这种硫酸盐和碎屑颗粒的混合沉积,根据不同的比例混合可形成含膏泥岩、含膏粉砂岩、膏质泥岩、膏质粉砂岩以及含粉砂质膏岩等混合岩类。

4 混合沉积过程及机制

4.1 混合沉积相类型

研究区新生代北部断裂活动比较发育,形成了一个箕状断陷湖盆,孔店组沉积期为断裂活动的初期,湖

盆总体呈逐步扩大的趋势。平面上,从北到南可以划分出北部陡坡带、中央洼陷带(中央隆起带)和南部缓坡带^[15-16]。通过对 50 口钻井剖面的进行统计,并重点对不同部位的 12 口井的薄片进行镜下观察,结合沉积环境的变化规律,对不同区带和不同时限的混合沉积现象进行了系统研究。按照孔店组沉积期的不同阶段,建立了发生混合沉积的沉积相类型。

4.1.1 孔店组沉积早期

为断陷的初期,北部陡坡带开始发育断裂活动,主要在北部地区发育小规模湖泊,南部广大地区主要为间歇性的洪泛平原(图 4),大部分井区处于剥蚀状态,如 W46 和 W100 井区,北部地区主要以浅湖—半深湖为主,如 HK1、SK1 和 XDF10 井区等。由于该时期为断陷初期,湖泊面积较小,碎屑物质供给充足,化学沉淀作用较慢,以碎屑沉积作用为主。该时期混合沉积作用主要发生在滨浅湖泥坪环境和滨浅湖砂坝当

中,且以碎屑沉积为背景,混积层系主要为钙质砂岩与砂岩互层、泥质灰岩与泥岩互层、膏质粉砂岩与泥岩互层;混积岩主要有少量的钙质粉砂岩和膏质粉砂岩为主。

4.1.2 孔店组沉积中期

随着断陷活动的持续进行,该时期湖泊面积不断扩大,区内大部分地区均被湖水所覆盖。由于该时期经历了极热气候变化^[32],气候炎热,蒸发作用增强,湖水开始咸化,湖水开始由早期的以碎屑沉积为主的湖泊逐步开始向碎屑—化学型的湖泊过渡,湖泊盐度持续增强^[33]。该时期混合沉积主要发生在南部滨浅湖的泥坪和砂坝中,如 WG1 和 W46 井区;湖盆中央盐度较高,深水区发育高盐度深水混合沉积作用,如 XDF10 和 SK1 等井区。南部滨浅湖混积层系主要发育钙质砂岩与砂岩互层、泥质灰岩与泥岩互层,中央深水去主要发育膏质砂岩与泥岩互层、云质粉砂岩与膏岩互层;

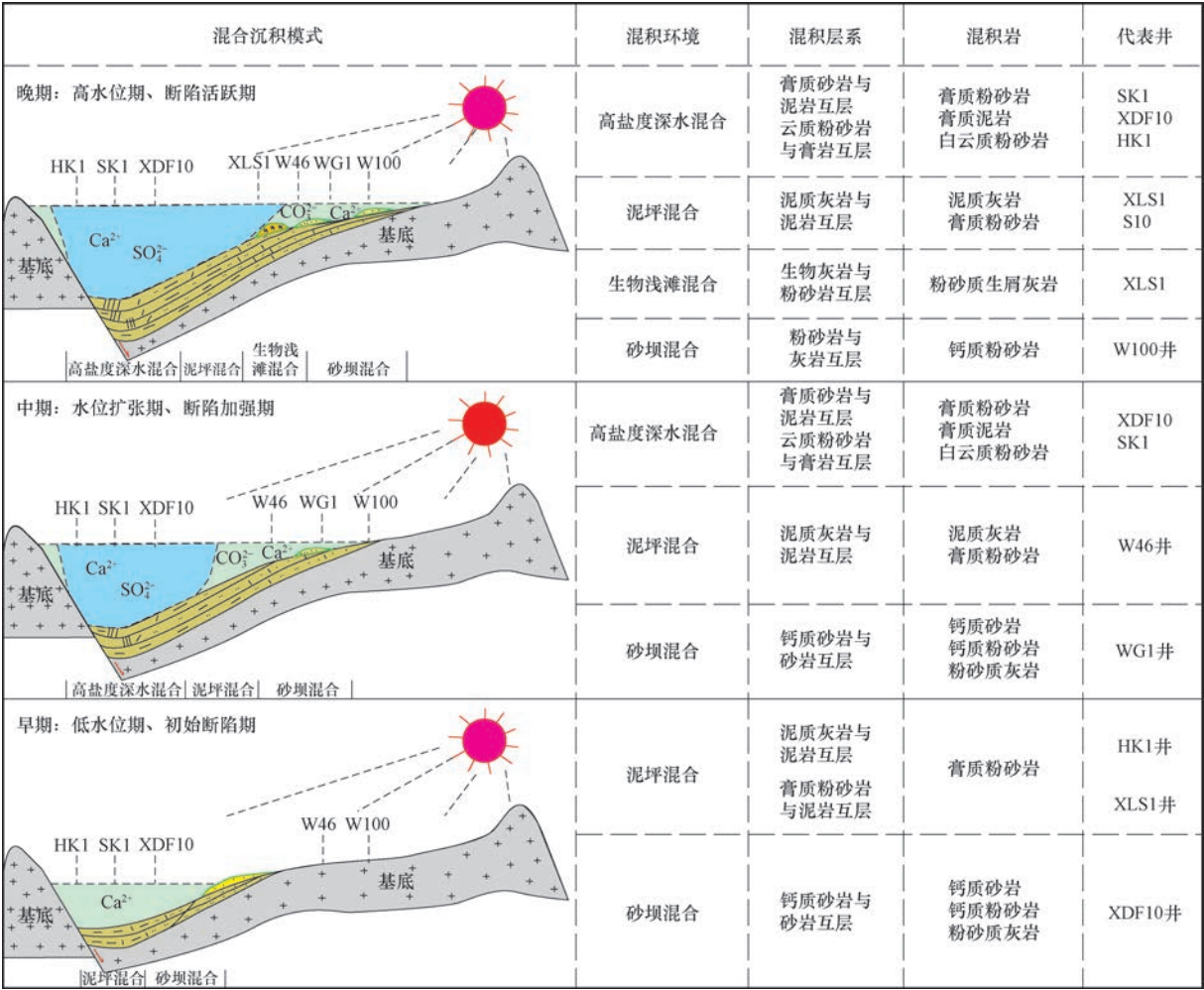


图 4 东营地区孔店组沉积期混合沉积类型

Fig. 4 Mixed sedimentation types during the deposition of the Kongdian Formation of Dongying Sag

南部滨浅湖地区混积岩主要发育钙质砂岩、钙质粉砂岩、粉砂质灰岩、泥质灰岩和膏质粉砂岩,中央深水环境主要发育膏质粉砂岩、膏质泥岩和白云质粉砂岩。

4.1.3 孔店组沉积晚期

经历了上一个时期的极热气候,湖水浓度较高,盐度和碱度均达到了一定的程度^[16]。尽管该时期气候已经逐步恢复到正常水平,但是湖泊盐度仍然较高,化学性质的湖泊导致了混合沉积作用增强。该时期主要的混合沉积环境有南部的砂坝混合、生物浅滩混合和泥坪混合,如 W100, XLS1 和 S10 等井区;中央深水区的高盐度混合沉积,如 SK1, XDF 和 HK1 等井区。混积层系包括南部的粉砂岩与灰岩互层,生物灰岩与粉砂岩互层,泥质灰岩与泥岩互层,中央深水区的膏质砂岩与泥岩互层、云质粉砂岩与膏岩互层;混积岩有南部地区的钙质粉砂岩、粉砂质生屑灰岩、泥质灰岩和膏质粉砂岩,中央深水区的膏质粉砂岩、膏质泥岩和白云质粉砂岩。

4.2 混合沉积机制

近 30 年来,混合沉积现象受到了众多学者的广泛关注,有关混合沉积作用的发生过程、物质效应和机制等问题是大家重点关注的对象。对混积岩的成因问题形成了一些共识,主要有间断混合、相缘混合沉积、原地混合和源地混合^[3-4]。研究区孔店组沉积期主要为断陷型湖泊的早期,湖泊规模较小,混合沉积方式主要以相缘混合为主,少量间断混合和原地混合沉积,并主要受到如下 4 个因素的制约。

4.2.1 物源供给

这个因素是发生混合的制约因素,尤其是在陆相

湖泊沉积环境中。陆相湖泊由于规模远较海洋小,离物源较近,相缘混合规模和时限均有限。混合沉积发生的理想场所主要是浅湖地带,其规模也远远比海洋环境的陆棚规模要小得多^[8,34],物源供给对混合沉积影响较大,陆相湖泊中发生混合沉积的条件要求也更高,尤其是发生相缘混合沉积。东营断陷湖泊在孔店组沉积期,北部陡坡带,物源供给充足,相带很窄,不容易发生理想的混合沉积作用;在南部缓坡带,地域宽阔,发育几个典型三角洲-河流沉积,沉积物源向湖盆推进的过程中,发生分异、卸载,较少有颗粒到达靠近湖盆中央的地带,颗粒呈漂浮状态出现,在这些过渡地带,容易发生混合沉积作用。

4.2.2 湖泊水化学性质

湖泊水化学条件是制约混合沉积的重要因素,尤其是对于高盐度湖泊条件下的沉积作用。孔店组沉积中-晚期,广泛发育膏岩、岩盐等化学沉积(图 5),部分井区厚度还较大,说明该时期为高盐度湖泊^[24]。通过建立典型单井盐度变化曲线也表明^[16],孔店组沉积期有盐度逐渐增加的趋势,说明湖泊随着时间的推移,在逐渐咸化,向化学型湖泊过渡,在远离湖岸的浅湖-半深湖-深湖环境中,主要以化学沉积为背景,严重缺乏陆源物质供给,只有粒度非常细小的粘土级和粉砂级的颗粒能到达,充填到以化学沉积为背景的沉积物当中,形成漂浮状的混积过渡岩类。需要说明的是,化学沉积和碎屑沉积的发生过程是跟两个元素密切相关的,如陆源碎屑物质随着季节变化,间歇性的爆发或者停歇,就会在远离湖岸的地带交替沉积混积层系。

4.2.3 湖泊水动力

湖泊规模较小,不会像海洋那样发生大规模海啸

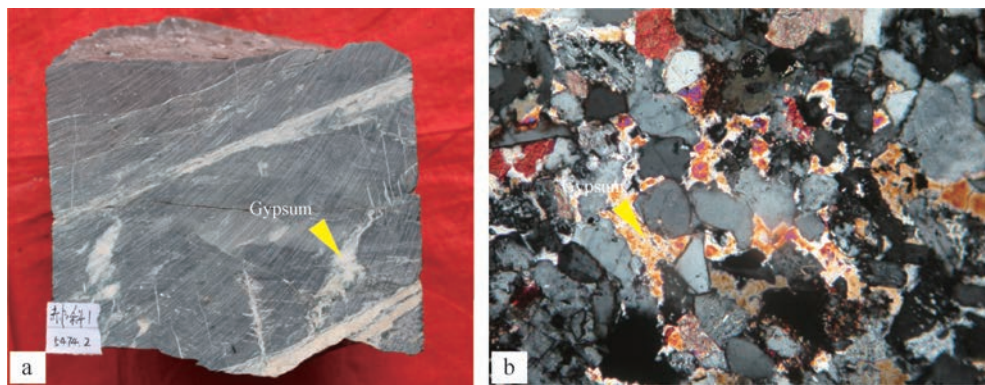


图5 东营凹陷孔店组高盐度湖泊沉积特征

Fig. 5 Characterization of sedimentation in high-salinity lakes of the Kongdian Formation in Dongying Sag

a. 膏质泥岩, HK1 井, 埋深 1 574. 2 m; b. 粉砂岩中的石膏, XDF10 井, 埋深 4 360 m

以及大规模的涨落潮,但湖泊中的波浪作用,季节性变化引起的水体运动也是制约混合沉积的重要因素。这种因素可能导致了间断混合的直接发生,波浪作用可能将一个地方的沉积物质搬运到以化学沉积为背景的沉积区,形成了间断混合,从而造成混合沉积。东营断陷湖泊中远端浊积扇也比较发育,说明了湖泊中发生异地间断混合沉积的可能性是存在的。

4.2.4 湖平面升降

湖平面升降旋回变化首先导致了沉积区带的交替往复,可以形成不同的混积层系,也可以导致混合沉积相带的迁移变化。东营断陷湖泊孔店组沉积期为一个持续断陷,相对湖平面不断增加的趋势,这种湖水面积扩大,加速了物源卸载的进程,导致搬运到湖中心的碎屑物质变少。总体来看,混合沉积在整个孔店组沉积期是逐渐加强。如图6所示,W100井区湖平面总体呈上升的趋势,镜下特征表明,钙质充填物逐渐增加,岩石微观结构演变为“漂浮”状接触,说明钙质组分多数为原生沉淀碳酸钙。方解石和Ca元素的含量均呈现增加的趋势(图6),达到了混合沉积的含量要求,由此说明了随着湖平面上升,碎屑物质极少达到该地区,化学性质的沉淀占了主导地位,来自临近相区的碎屑颗粒间歇性的漂浮到该沉积区,形成了混积层系和混积岩。

5 讨论

5.1 湖泊咸化过程中的混合沉积作用

古新世/始新世之交,全球发生了极热气候事件,全球温度平均上升 $5 \sim 6^{\circ}\text{C}$ [35-36], Moore 在最新的一项研究中定量计算了65年时间内湖泊蒸发量与咸化作用的关系,提出干旱气候变化对湖泊咸化的制约作用[37]。全球范围内,气候交替变化导致了湖泊环境的深刻变化[38],天文轨道旋回的周期性变化导致了气候的交替变化,进而造成了陆地地表湖泊环境的变化。干旱气候环境下,加剧了湖泊的咸化过程,形成系列咸化湖泊。在湖泊咸化的过程中,由于受到了化学分异和机械分异作用的双重效应,进而在部分沉积相带会形成咸化湖泊的特殊沉积组构和物质聚集规律,进而沉积不同类型和组合方式的混积岩类[28]。这种沉积环境下形成的混合沉积远远不同于一般的淡水湖泊中的混合沉积类型,最典型的特征就是陆源碎屑岩、碳酸盐和硫酸盐的混合沉积[27]。研究表明,新生代出现了多次短暂的热气候事件,在全球出现了强烈的反应,如海洋酸化、CCD界面(碳酸钙补偿深度)大幅度上升[35]等变化。极端干旱气候条件会加剧湖水的浓缩和咸化,影响了中国北方陆相湖泊的环境变化和物质

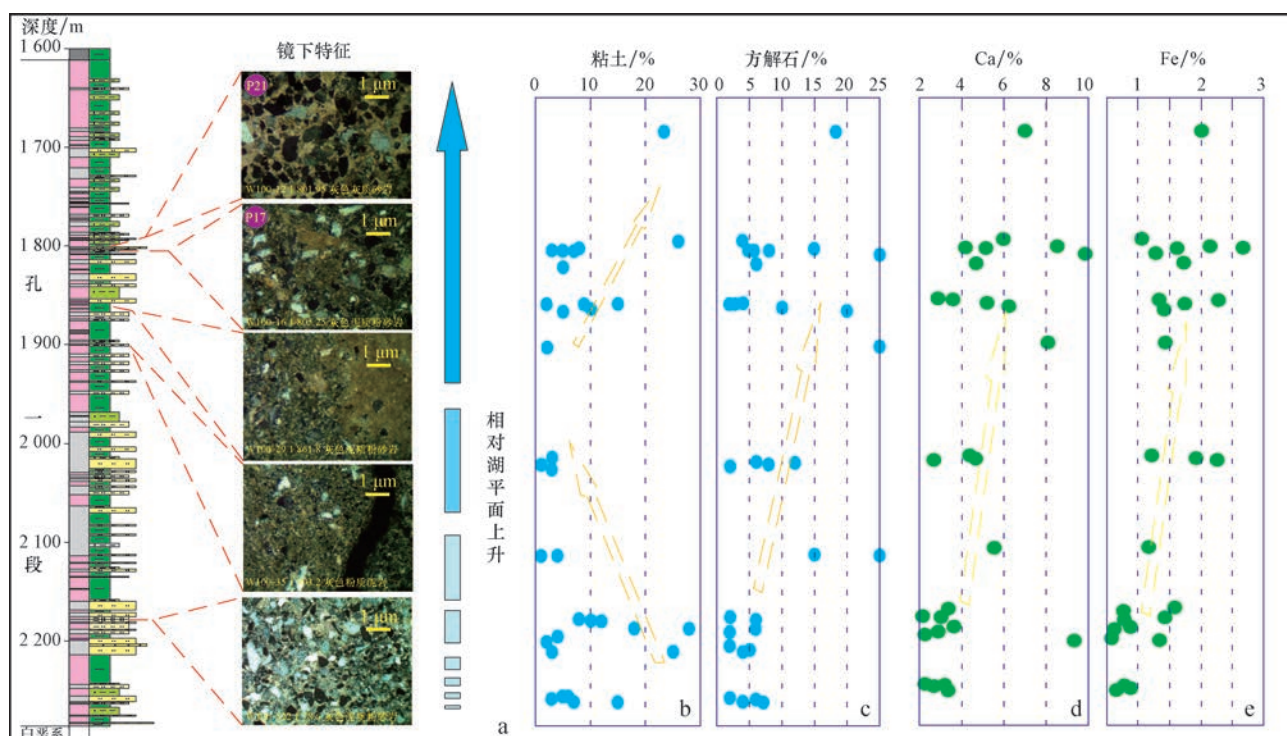


图6 东营凹陷湖盆咸化过程中的混合沉积作用物质响应规律(W100井)

Fig. 6 Response of mixed sedimentation in the Kongdian Formation of Dongying Sag to the salinization of the lakes (Well W-100)

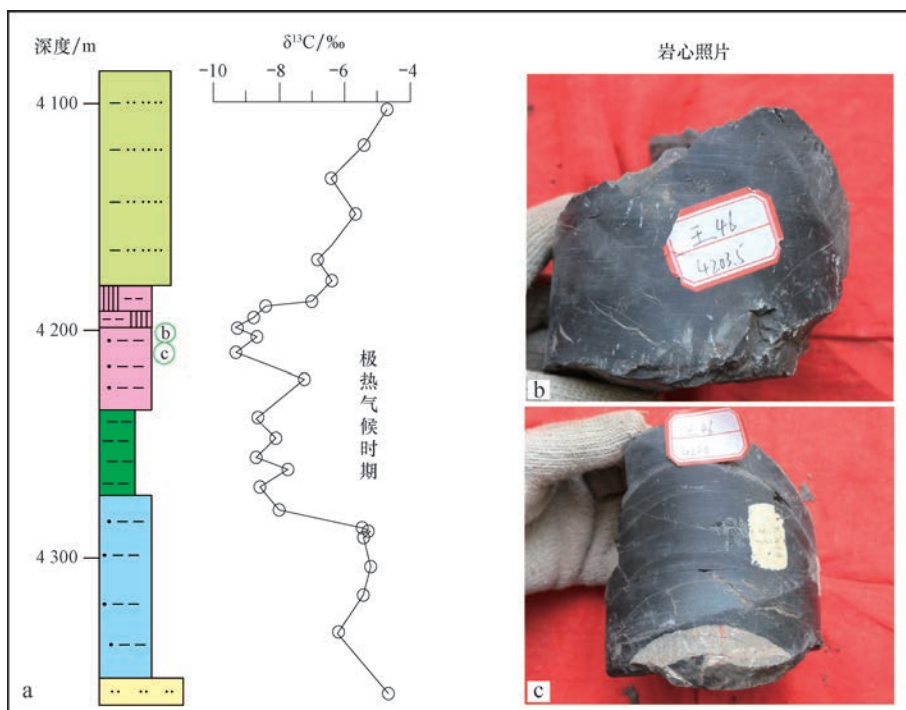


图7 东营凹陷极热气候时期物质响应(W46井)

Fig. 7 Response of the Kongdian Formation of Dongying Sag to the initial Eocene thermal maximum event(Well W-46)

过程^[16,39],造成了湖泊环境的不断咸化,形成了系列盐湖。不少学者也意识到盐湖环境下的混合沉积作用现象,对这特殊沉积环境下的混合沉积作用的机理^[28]、混积岩石类型^[27]、混积岩的分类体系^[39]和油气储层特征^[26]等方面进行了探索。

孔店组沉积期经历了古新世/始新世的转变期^[16],尽管具体时限还无法完全确定,但在孔店组二段出现了大量黑色泥岩和碳同位素的负漂移现象证实了经历极热事件的可能性(图7)。粉分析也表明,东营地区古近纪经历了持续极热的干旱气候时期,经历了持续极热—温室交替—持续温暖的阶段^[32]。湖盆水体氧化还原变化也表明,极热气候时期的缺氧变化在该地区的元素地球化学响应上广泛存在^[33],这种极热干旱环境是引起东营断陷湖盆咸化的关键因素。根据沉积相划分原则,编制了东营凹陷孔店组沉积相平面图,并以XDF10井为例,开展孔店组沉积期的湖泊环境变化时空分析,系统揭示湖泊环境的咸化过程。从平面图上可以看出,孔店组沉积早期,东营凹陷湖盆水域很小,为断陷初期,湖盆以碎屑沉积为主,物源供给相对比较充分,沉积补偿较好,XDF10井显示,该时期主要为沉积较粗的碎屑颗粒沉积,该时期混合沉积作用比较弱,以含钙砂岩为主;孔店组沉积中期经历了极热气候,平面图上看出化学湖泊区开始出现,湖水咸化开始加剧,XDF10井显示,该时期主要沉积钙质砂

岩、膏质砂岩和泥岩为主;孔店组沉积晚期,气候恢复温暖潮湿^[32],但是咸化湖盆仍然未得到改善,湖水比较封闭,化学湖泊沉积区扩大,该时期混合沉积作用加强,XDF10井显示,该时期主要为白云质砂岩、灰质砂岩和膏质泥岩等混合类型(图8)。

5.2 混合沉积对油气储层的贡献

混合沉积作用自被提出以来,越来越受到了广大学者的重视。尽管在沉积学领域,这只是一个非常特殊的沉积现象,但具有非常重要的研究意义^[8]。近年来,混合沉积作用在油气勘探中的地位越来越受到关注^[11]。混合沉积作用除了可以形成较好的生储盖组合之外,在储层研究中同样具有非常重要的价值^[9],各大油田均发现了一定规模的混积岩为储层的油藏,如大港滩海区古近系^[40]、东营凹陷金家地区古近系^[7]和柴西北区古近系^[11]。

研究表明,混合沉积的油气储层贡献主要体现在具有能提供溶蚀作用的组分^[9],特别是在深部储层开放成岩体系中,碳酸盐组分和硫酸盐组分的溶蚀能力较强,形成次生孔隙的可能性较大,这种次生孔隙与后期的裂缝系统搭配,可以形成很好的储层空间,具有较好的孔渗能力^[9,23]。研究区孔店组混合沉积中这种现象比较普遍,孔店组埋藏深度较大,断裂活动强烈,混合沉积岩中多发于溶蚀作用(图9a,b)和裂缝作用

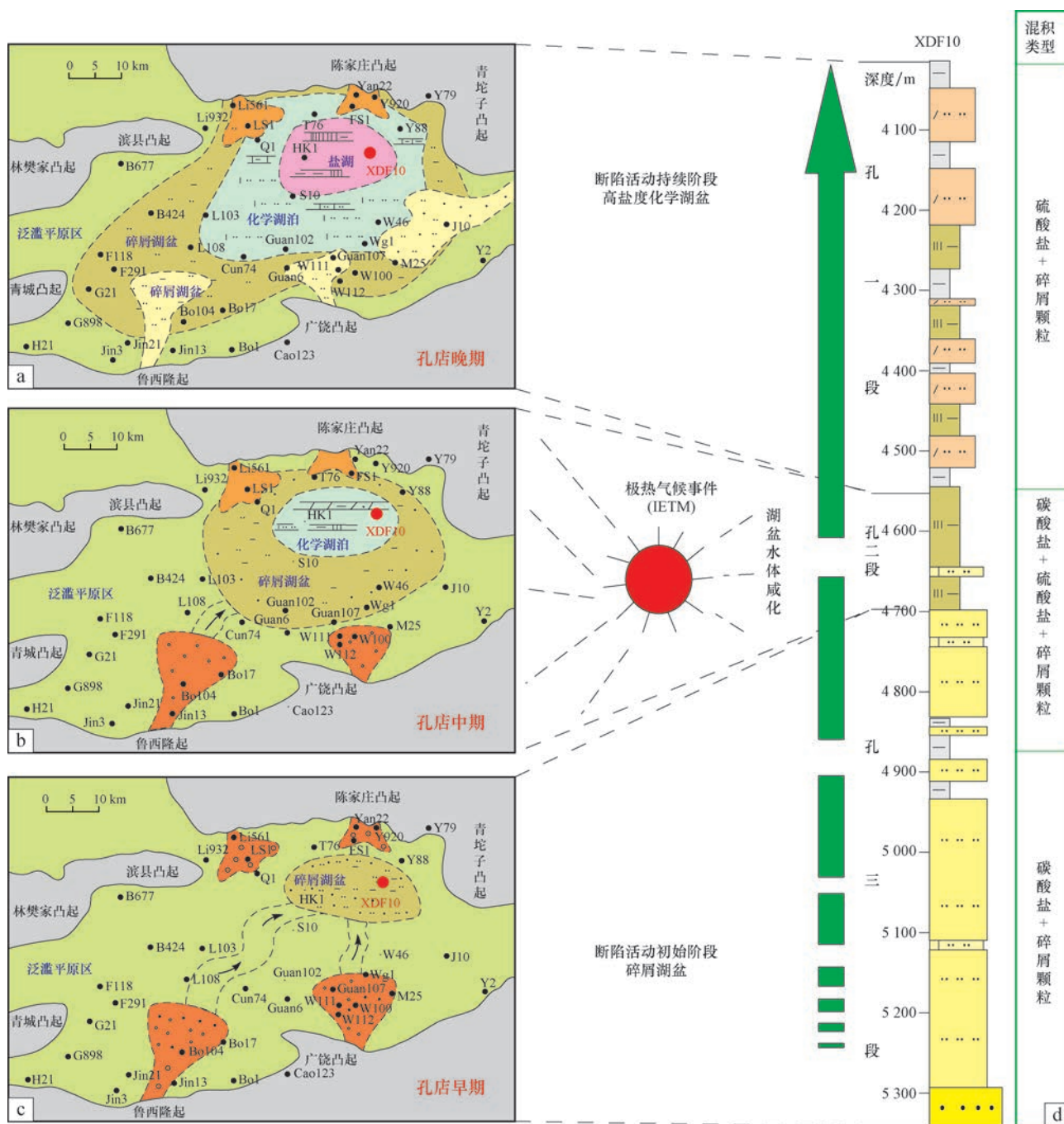


图8 东营地区孔店组沉积期时空演化

Fig. 8 Spatio-temporal evolution during the deposition of Kongdian Formation in Dongying Sag

(图9c),这是研究区孔店组深部储层改造的重要因素。多数情况下,混合沉积作用多发生于陆源碎屑物质补充不足的环境中^[28],缺乏充足的陆源碎屑物质补给,主要在远离湖岸的浅湖和半深湖中沉积细粒岩,如粉砂质灰岩和钙质泥岩等,这种类型的混积岩在成岩改造过程中要形成大规模的次生孔隙比较困难,主要以纳米级的孔隙为主^[23,26],难以形成大规模储层常规储层,但大量钙质存在,可以为细粒岩的非常规压裂改造提供有力支持^[41]。研究区孔店组广泛发育碎屑岩-

碳酸盐-粘土矿物的三元混合的沉积,碎屑颗粒较少,碳酸盐和粘土矿物为主要背景(图9d),这种混合沉积岩很难发育常规的裂缝-孔隙型储层,以非常规储层为主。

5.3 混合沉积对古环境恢复的贡献

利用碳酸盐岩同位素数据可以恢复古海洋(湖泊)环境,原始沉积的碳酸盐岩中的元素依赖于海洋(湖泊)环境,排除成岩过程的钙质沉淀的干扰,一般

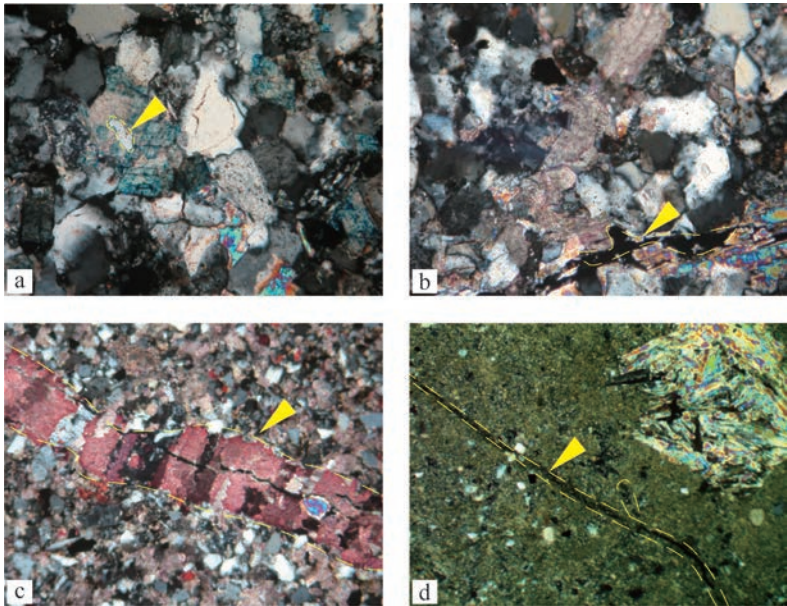


图 9 东营凹陷混积岩储层微观特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of the mixed siliciclastic-carbonate reservoirs in the Kongdian Formation in Dongying Sag
a. 灰质砂岩中的碳酸盐溶蚀孔,埋深 4 071. 5 m,XDF10 井;b. 含膏粉砂岩中的膏岩溶蚀孔,埋深 4 058 m,XDF10 井;c. 钙质粉砂岩中的裂缝及充填,埋深 4 171. 5 m,XDF10 井;d. 含粉砂钙质泥岩中的裂缝及溶孔,埋深 2 918. 13,W46 井

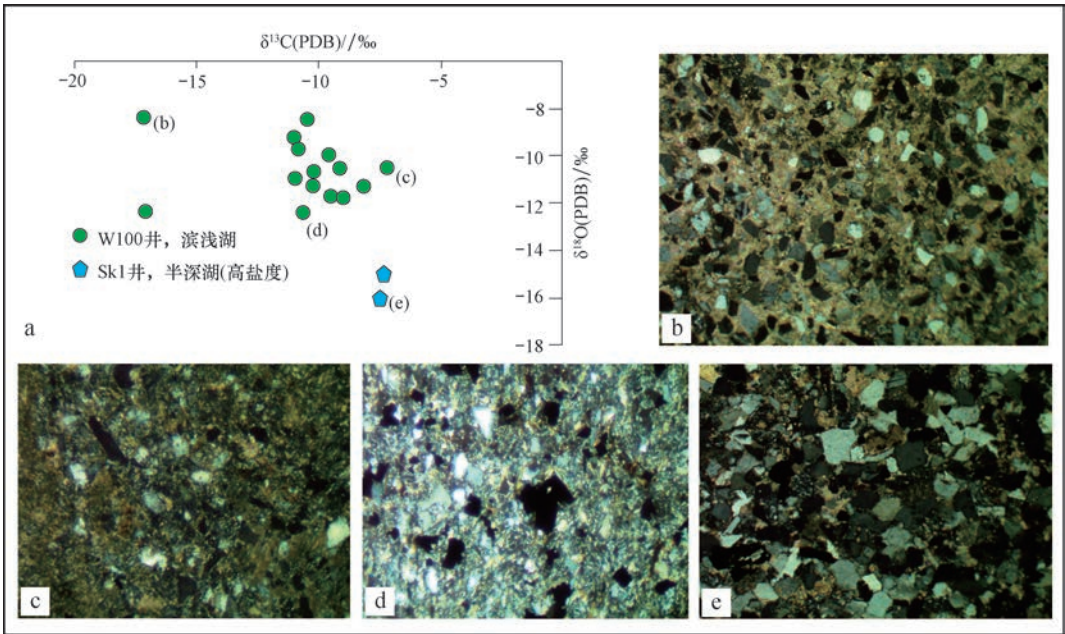


图 10 东营地区孔店组混积岩中的同位素及镜下特征

Fig. 10 Isotopes and their microscopic images from the mixed siliciclastic-carbonate sequences in the Kongdian Formation of Dongying Sag
a. 碳、氧同位素特征;b. 灰质砂岩,埋深 1 501. 95 m;c. 泥质粉砂岩,埋深 1 861. 8 m;d. 泥质粉砂岩,埋深 2 264. 2 m;e. 粉砂岩,埋深 2 264. 2 m

具有较好的耦合性^[42]。碎屑岩中成分复杂,多数组分是异地搬运而来,不能直接反应沉积水体环境的问题,如水深、氧化还原、盐度和碱度等相关问题。也有学者利用碎屑岩中的碳酸盐胶结物来探索古环境和成岩埋藏的关系问题^[43],这种恢复最大难度在于要确定碎屑岩中的碳酸盐矿物是否为原生沉淀?这是制约碎屑岩

古环境恢复的关键问题。

本次研究选取 W100 井和 SK1 井中的碳酸盐含量较高的碎屑岩进行了碳氧同位素测定(图 10),镜下特征也表明具有明显的原始沉积特征,测定的碳氧同位素基本可以反映相关沉积环境(图 10)。图中显示,W100 井的滨浅湖环境的氧同位素明显高于 SK1 井的

半深湖高盐度环境,这可能跟 W100 井离湖岸较近,受到大气淡水作用有关;在 W100 的样品点中,样品点(b)的碳同位素明显低于样品点(c)和(d),岩石镜下特征表明,样品点(b)碳酸盐含量明显较高,颗粒呈漂浮状态,碳酸钙以原生混合沉积作用形成,可以反映原始沉积环境。因此,在进行碎屑岩中的碳氧同位素测试时,必须要结合镜下特征,排除成岩作用矿物的影响,才能利用混合沉积作用真实的反映原始沉积环境。

6 结论

1) 早始新世时期,东营凹陷孔店组沉积中现在广泛现在混合沉积现象,包括混积层系和结构混合沉积两种类型。混积层系主要包括陆源碎屑岩与碳酸盐岩的互层沉积和陆源碎屑岩与硫酸盐岩的互层沉积;结构混合沉积主要包括陆源碎屑物质与碳酸盐的结构混合和陆源碎屑物质与硫酸盐的结构混合沉积,前者主要形成钙质砂岩、砂质灰岩、泥质灰岩和含钙泥质砂岩等混合岩类,后者主要形成膏质泥岩、膏质粉砂岩和含粉砂质膏岩等混合岩类。

2) 孔店组沉积期不同阶段具有不同的混积相带特征,早期混合沉积发育在滨浅湖泥坪环境和滨浅湖砂坝等环境中,混积层系包括钙质砂岩与砂岩互层等;混积岩包括钙质粉砂岩和膏质粉砂岩等;中期受到极热气候影响,混合沉积主要发生泥坪、砂坝和高盐度深水环境中,混积层系包括钙质砂岩与砂岩互层、膏质砂岩与泥岩互层等;混积岩主要发育钙质砂岩、膏质粉砂岩等;晚期湖盆咸化持续,混合沉积主要发生在泥坪、砂坝、高盐度深水环境和生物浅滩等环境中,混积层系主要包括粉砂岩与灰岩互层、生物灰岩与粉砂岩互层等;混积岩包括钙质粉砂岩、粉砂质生屑灰岩和膏质粉砂岩等。混合沉积主要以相缘混合为主,发育少量间断混合和原地混合类型,受到物源供给、水化学性质、水动力和湖平面升降等制约。

3) 孔店组沉积期经历了 IETM 事件的影响,湖盆咸化作用强烈,咸化过程与碎屑物质的充注同时进行,形成了系列的混合沉积现象;混合沉积作用对油气勘探具有重要意义,埋藏过程中的碳酸盐组分、硫酸盐组分溶蚀以及裂缝作用均可以改造储层,微观纳米孔隙也是储层空间的重要补充;通过分析测定混合沉积中的化学组分的微量元素与同位素等,可以很好地恢复古湖泊环境,具有重要的古环境意义。

参考文献

- [1] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [2] 蔡进功,李从先. 内蒙西南部石炭系碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积特征[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(1): 80-86.
Cai Jingong, Li Congxian. Characteristics of Carboniferous mixed siliciclastic and carbonate sediments in southwest Inner Mongolia[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(1): 80-86.
- [3] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 31-34.
Zhang Xionghua. Classification and origin mixosedimentite[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(4): 31-34.
- [4] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. *古地理学报*, 2001, 3(3): 63-66.
Sha Qing'an. Discussion on mixing deposit and Hunji rock[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(3): 63-66.
- [5] 郭福生,严兆彬,杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 68-68.
Guo Fusheng, Yan Zhaobing, Du Yangsong. Discussion on mixing deposit Hunji rock and mixing layer[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 68-68.
- [6] La Gesse J, Read J F. Updip sequence development on a wave and current dominated mixed carbonate, siliciclastic continental shelf; Paleogene, North Carolina, eastern U. S. A [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 184: 155-182.
- [7] 张金亮,司学强. 断陷湖盆碳酸盐与陆源碎屑混合沉积—以东营凹陷金家地区古近系沙河街组第四段上亚段为例[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 447-454.
Zhang Jinliang, Si Xueqiang. Mixed siliciclastic-carbonate sediment in rift lacustrine basin -a case on the upper part of the Fourth Member of the Eocene Shahejie Formation in Jinjia area, Dongying depression [J]. *Geological Review*, 2007, 53(4): 447-454.
- [8] 江茂生,沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(6): 551-554.
Jiang Maosheng, Sha Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10(6): 551-554.
- [9] 冯进来,曹剑,胡凯等. 柴达木盆地中深层混积岩储层形成机制[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2461-2472.
Feng Jinlai, Cao Jian, Hu Kai, et al. Forming mechanism of middle-deep mixed rock reservoir in the Qaidam basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2461-2472.
- [10] 王杰琼,刘波,罗平,等. 塔里木盆地西北缘震旦系混积岩类型及成因[J]. *成都理工大学学报(自科版)*, 2014, 41(3): 339-346.
Wang Jieqiong, Liu Bo, Luo Ping, et al. Classification and genesis of sinianmixosedimentite from northwest margin of Tarim Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2014, 41(3): 339-346.
- [11] 董桂玉,何幼斌,陈洪德,等. 惠民凹陷沙三中湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积—以山东商河地区为例[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3): 343-350.
Dong Guiyu, He Youbin, Cheng Hongde et al. Mixed sedimentation of carbonates of lagoonal facies and terrigenous clastics of the middle submember of Member 1 of Shahejie Formation in Huimin Sag: taking Shanghe area in Shandong Province for an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 343-350.

- entologica Sinica, 2007, 25(3): 343–350.
- [12] 董艳蕾, 朱筱敏, 滑双君, 等. 黄骅坳陷沙河街组一段下亚段混合沉积成因类型及演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 98–107.
- Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Hua Shuangjun, et al. Genetic types and evolutionary model of mixed clastic ~ carbonate deposits in the lower part of the Sha-1 Formation, the Huanghua Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 98–107.
- [13] 王金友, 张立强, 张世奇, 等. 济阳坳陷沾化凹陷沙二段湖相混积岩沉积特征及成因分析——以罗家—邵家地区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1085–1096.
- Wang Jinyou, Zhang Liqiang, Zhang Shiqi, et al. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine mixed rocks of the Second Member of the Eocene Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression: taking Luoja—Shaojia Area for an Example[J]. Geological Review, 2013, 59(6): 1085–1096.
- [14] 谭梦琪, 刘自亮, 沈芳, 等. 四川盆地回龙地区下侏罗统自流井组大安寨段混积岩特征及模式[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 571–581.
- Tan Mengqi, Liu Ziliang, Shen Fang, et al. Features and model of mixed sediments of Da'anzhai Member in Lower Jurassic Ziliujing Formation, Huilong area, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(3): 571–581.
- [15] 谭先锋, 蒋艳霞, 李洁, 等. 济阳坳陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 61–72.
- Tan Xianfeng, Jiang Yanxia, Li Jie, et al. Sedimentary record and origin of high frequency cycles in the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 61–72.
- [16] 谭先锋, 王佳, 雷丽丹, 等. 早古近纪陆相断陷型湖泊物质分异作用及其对“PETM”事件的响应[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1893–1908.
- Tan Xianfeng, Wang Jia, Lei Lidan, et al. Material differentiation and its response to the “PETM” Events in continental fault lake during the Early Paleogene period: a case study of Kongdian Formation in Jiyang Depression[J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1893–1908.
- [17] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931–939.
- Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediment[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 931–939.
- [18] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义[J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297–307.
- Feng Jinlai, Hu Kai, Cao Jian, et al. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum—gas geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 297–307.
- [19] 丁一, 李智武, 冯逢, 等. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 389–400.
- Ding Yi, Li Zhiwu, Feng Feng, et al. Mixing of lacustrine siliciclastic-carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Daanzhai Member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang area, Central Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(2): 389–400.
- [20] 梁宏斌, 旷红伟, 刘俊奇, 等. 冀中坳陷束鹿凹陷古近系沙河街组三段泥灰岩成因探讨[J]. 古地理学报, 2007, 9(2): 167–174.
- Liang Hongbin, Kuang Hongwei, Liu Junqi, et al. Discussion on origin for marls of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in SHulu Sag of Central Hebei Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(2): 167–174.
- [21] 李祥辉. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 395–404.
- Li Xianghui. Mixing of siliciclastic-carbonate sediments within systems tracts of depositional sequences and its controlling factors[J]. Department of Earth Sciences, 2008, 14(3): 395–404.
- [22] 司马立强, 杨毅, 吴丰, 等. 柴西北小梁山地区混积岩测井岩性识别[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 180–185.
- Sima Liqiang, Yang Yi, Wu Feng, et al. Lithology identification on mixing deposit with logging data in Northwest[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 180–85.
- [23] 李婷婷, 朱如凯, 白斌, 等. 混积岩储层特征——以酒泉盆地青西凹陷下白垩统混积岩为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 376–384.
- Li Tingting, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Characteristics of mixed sedimentary reservoir: taking the Lower Cretaceous mixed sedimentary rock of Qingxi depression in Jiuquan Basin as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 376–384.
- [24] 岳志鹏, 曾俊, 高志卫, 等. 惠民凹陷孔店组—沙四段“膏盐岩”层沉积机理——以 MS1 井“膏盐岩”层分析为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 591–595.
- Yue Zhiping, Zeng Jun, Gao Zhiwei, et al. Sedimentation mechanism of “gypsum rock” in Kongdian Formation and Sha 4 Member of Shahejie Formation in Huimin Sag—With the “gypsum rock” of Well MS1 as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 591–595.
- [25] 龚大兴, 伊海生, 周家云, 等. 可可西里古近系含盐系地层沉积特征及古盐湖成盐模式讨论[J]. 盐湖研究, 2014, 22(3): 1–8.
- Gong Daxing, Yi Haisheng, Zhou Jiayun, et al. Discussion on sedimentary characteristics of the paleogene salt-bearing Formation and saltforming model of the Paleo—saline in Hoh Xil Area[J]. Journal of Salt Lake Research, 2014, 22(3): 1–8.
- [26] 吴丽荣, 黄成刚, 袁剑英, 等. 咸化湖盆混积岩中双重孔隙介质及其油气储集意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(2): 59–67.
- Wu Lirong, Huang Chenggang, Yuan Jianying, et al. Double—porosity system of mixed sediments in saline lacustrine basin and its significance to reservoir[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(2): 59–67.
- [27] Xiao Chuantao, Pan Yuntang. Carboniferous mixed terrigenous clastic, carbonate and sulphate sediments in the Bachu area, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(3): 341–347.
- [28] 徐伟, 陈开远, 曹正林, 等. 咸化湖盆混积岩成因机理研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1804–1816.
- Xu Wei, Chen Kaiyuan, Cao Zhenglin, et al. Original mechanism of mixed sediments in the saline lacustrine basin[J]. Acta Petrologica

- Sinica, 2014, 30(6): 1804 – 1816.
- [29] 刘华. 东营凹陷古近系 – 新近系流体 – 岩石相互作用分带特征[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 41 – 50. DOI: 10. 16452/j. cnki. sdkjzk. 2015. 02. 009.
- Liu Hua. Fluid-rock interaction zones and their characteristics of palaeogene and neogene systems in dongying depression[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science). 2015, 34(2): 41 – 50. DOI: 10. 16452/j. cnki. sdkjzk. 2015. 02. 009.
- [30] 谭先锋, 田景春, 黄建红, 等. 陆相碎屑岩旋回沉积记录中的物质响应及聚集规律—以济阳坳陷王家岗地区古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 332 – 341.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Huang Jianhong, et al. Material responses and accumulation patterns in cyclic sediment records of continental clastic rocks: taking the Paleogene Kongdian Formation of Wangjiagang area in Jiyang Depression as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 332 – 341.
- [31] 林玉祥, 赵承锦, 舒永, 等. 东营凹陷沉积沉降中心迁移特征与机制研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 1 – 9. DOI: 10. 16452/j. cnki. sdkjzk. 2016. 06. 001.
- Lin Yuxiang, Zhao Chengjin, Shu Yong, et al. Migration characteristics and geodynamic mechanism of depocenter and subsiding center of Dongying sag[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 35(6): 1 – 9. DOI: 10. 16452/j. cnki. sdkjzk. 2016. 06. 001.
- [32] 雷华蕊, 姜在兴, 周红科. 2017. 早古近纪极热时期古气候演化分析: 以东营凹陷为例[J]. 地球科学前缘, 24(12): doi: 10. 13745/j. esf. yx. 2017 – 100.
- Lei Huarui, Jiang Zaixing, Zhou Hongke. Analysis of paleoclimate evolution of the hyperthermal period in early Paleogene: taking Dongying Depression as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(12): doi: 10. 13745/j. esf. yx. 2017 – 100.
- [33] 刘萍, 谭先锋, 陈青, 等. 早始新世极热气候时期湖盆水体性质及生烃环境—以东营凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 39 – 48.
- Liu Ping, Tan Xianfeng, Chen Qing, et al. Water redox conditions and environment for source rock deposition in lacustrine during the Initial Eocene Thermal Maximum(ITEM): A case study on the Paleogene Kongdian Formation in the Dongying Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 39 – 48.
- [34] 董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 等. 湖南石门杨家坪下寒武统杷榔组三段混合沉积研究[J]. 地质论评, 2008, 54(5): 593 – 601.
- Dong Guiyu, He Youbin, Chen Hongde, et al. A Study on mixed sedimentation in the third Member of the Lower Cambrian Balang Formation at Yangjiaping, Shimen, Hunan Province[J]. Geological Review, 2008, 54(5): 593 – 601.
- [35] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 2001, 292: 686 – 693.
- [36] John C M, Banerjee N R, Longstaffe F J, et al. Clay assemblage and oxygen isotopic constraints on the weathering response to the Paleocene-Eocene thermal maximum, east coast of North America. Geo[J]logy, 2012, 40(7): 591 – 594.
- [37] Moore J N. Recent desiccation of Western Great Basin Saline Lakes: Lessons from Lake Abert, Oregon, U. S. A[J]. Science of the Total Environment, 2016, (554 – 555): 142 – 154.
- [38] Smith M E, Carroll A R, Scott J J, et al. Early Eocene carbon isotope excursions and landscape destabilization at eccentricity minima: Green River Formation of Wyoming[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2014, 403: 393 – 406.
- [39] 王越, 陈世悦, 张关龙, 等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征—以准噶尔盆地南缘芦苇沟组与吐哈盆地西北缘塔朗组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 1021 – 1065.
- Wang Yue, Chen Shiyue, Zhang Guanlong, et al. Classifications of mixed sedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin: taking examples as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taerlang Formation in the northwest of Tuha Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 1021 – 1065.
- [40] 马艳萍, 刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(4): 607 – 613.
- Ma Yanping, Liu Li. The genesis and diagenetic characteristics of The lake mixed sedimentary rocks of The tertiary in dagang area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(4): 607 – 613.
- [41] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义—以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦苇沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 598 – 607.
- Niu Bo, Lü Yanfang, Meng Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598 – 607.
- [42] 陈代钊, 陈其英, 江茂生. 泥盆纪海相碳酸盐岩碳同位素组成及演变[J]. 沉积与特提斯地质, 1995, 15(5): 22 – 28.
- Chen Daizhao, Chen Qiyang, Jiang Maosheng. Carbon isotopic compositions and evolution in the Devonian marine carbonate rocks[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 1995, 15(5): 22 – 28.
- [43] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 359 – 366.
- Huang sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 359 – 366.

(编辑 董立)