

再论东濮凹陷沙三段成盐模式

彭君¹, 冯阵东², 国殿斌¹, 程秀申¹, 慕文俊²

(1. 中石化中原油田分公司勘探开发研究院, 河南濮阳 457001; 2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454003)

摘要:依据井点 X 衍射矿物和氯同位素垂向分布资料, 分析东濮凹陷盐岩垂向序列, 并结合咸水蒸发实验和盐湖钻孔资料分析盐岩沉积及保存过程, 研究东濮凹陷沙三段成盐模式。结果表明: 浅水蒸发成盐过程中保持有足够的水深, 为盐下有机质的保存提供便利, 浅水盐岩与油页岩及黄铁矿伴生不矛盾; 淡水的注入是影响垂向盐韵律组成的关键因素, 注入量少时可能引起氯同位素的变化, 随着注入量的增大可能引起盐韵律中氯化物乃至硫化物的缺失; 凹陷满盆含砂、控边断层面上盘缺少粗碎屑的现象可能是边界断层长期小规模活动造成的, 东濮凹陷沙三段盐岩更有可能是浅水蒸发成因。

关键词:东濮凹陷; 沙三段; 盐岩序列; 氯同位素; 盐岩成因

中图分类号: TE 122 **文献标志码:** A

引用格式: 彭君, 冯阵东, 国殿斌, 等. 再论东濮凹陷沙三段成盐模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 9-15.

PENG Jun, FENG Zhendong, GUO Dianbin, et al. Revisiting salt-forming models in the third member of Shahejie Formation in Dongpu Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 9-15.

Revisiting salt-forming models in the third member of Shahejie Formation in Dongpu Depression

PENG Jun¹, FENG Zhendong², GUO Dianbin¹, CHENG Xiushen¹, MU Wenjun²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield, Puyang 457001, China;
2. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Based on mineral X diffraction and the vertical distribution of chlorine isotopes, vertical sequences in Dongpu Depression and deposition and preservation processes of salt rock were analyzed combining the experiments of saline water evaporation and the salt lake drill data. The salt-forming models in Dongpu Depression from the deep-rooted mechanism were developed. Results suggest that, organic preservation may be facilitated with sufficient water depth during evaporation of salt-forming process in shallow water. Salt rock in shadow water may form with oil shale and pyrite. The volume of injected fresh water is the main factor to affect the vertical salt rhythmic deposition; it may cause the Cl isotope to vary when the injection is small, but with rising volume, chloride even sulfide may become deficient. The sandstone in Dongpu depression and the deficiency of coarse clastic in the hanging wall were caused by activities in bordered fault at small scales. Salt-forming in shadow water is most likely responsible for salt rock in the third member of Shahejie Formation.

Keywords: Dongpu Depression; the third member of Shahejie Formation; salt rock sequence; Cl isotope; origin of salt rock

东濮凹陷的盐岩成因的争论主要集中在盐源和沉积模式上^[1-15]。由于盐岩主要集中在洼陷中心, 早期认为盐源来自受深大断裂活动控制的地下阵发

性热卤水^[10,16]。其后发现盐岩中的次生包裹体由上到下密度减小, 证实盐源来自于上部, 因在伴生的地层中发现了海相化石, 猜测盐源来自于间歇性的

收稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05006-004, 2011ZX05040-006); 河南理工大学博士基金项目(B2015-03)

作者简介: 彭君(1970-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为石油勘探。E-mail: 157516239@qq.com。

通讯作者: 冯阵东(1983-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为石油勘探地质。E-mail: fzd203@163.com。

海水^[17-18],随着对盆地周边研究的深入,证实东濮凹陷沙三期缺少海水注入的通道,其后苏惠等^[5]提出盐源来自于奥陶纪膏盐,海相化石是母岩中未破坏的残留物质,目前该观点最能被人接受。在盐源相对明确之后,争议的焦点主要集中在东濮凹陷的成盐模式上,形成了“浅水成盐说”^[1-7]与“深水成盐说”^[8-15]两种观点的碰撞。坚持浅水成盐的学者发现,在盐岩接触的地层中存在红层、泥裂、雨痕等氧化环境的标志^[3,5],而难以解释多数情况下盐岩与黑色泥页岩、黄铁矿的伴生现象^[8,10,12],冯阵东等^[19]曾通过食盐的析出实验解释过氧化、还原标志共存的现象,认为在浅水成盐中盐岩可以与油页岩伴生,提出盐岩析出之前相当长的时间内,水体盐度大致使古生物死亡,此时外来淡水注入少,携带入盆地的耐干旱植物孢粉相应含量低,盐岩下部泥岩中古生物、孢粉特征所反映的沉积环境、古气候与成盐期不同步^[8,10,14,19]。在其后的生产、科研过程中,针对盐岩及伴生地层的X衍射、氯同位素等数据测试的完成,部分学者重新开始质疑浅水成盐^[20]。笔者结合现有的咸水蒸发实验结果、盐湖钻孔资料,利用浅水成盐说解释东濮凹陷沙三段盐岩韵律及氯同位素的垂向变化,结合两种学说及现有资料,从深层机制上探讨东濮凹陷的成盐模式,以作为盐湖盆地沉积研究的参考。

1 浅水成盐底部保存有机质的可能性分析

东濮凹陷沙三段盐岩通常与烃源岩互层,且黄铁矿十分发育,这些特征往往被当做深水成盐模式的最有力证据(图1)。然而,暗色的泥页岩及黄铁矿仅仅指示一个水体相对安静、强还原的沉积环境,其在水体较深的深湖环境可以形成,在湖盆变浅过程中也能形成类似的沉积物,因此该沉积序列便不能作为反驳浅水成盐的证据。

1.1 盐下有机质保存原因

反驳东濮凹陷浅水成盐的主要疑问在于盐岩互层中有机质的保存问题,认为水体变浅的过程中有机质可能被氧化。事实上,湖水底部盐层形成以后,便会阻隔底部有机质与水体、大气中的氧接触的机会^[19],因此只需要探讨晶体析出之前的水体深度,便可明确有机质的保存条件。

由于东濮凹陷的盐岩存在大量的石盐,假设东濮凹陷当时的盐度与海水相当,在缺少盐源补给条件下,体积需要萎缩约90%,即氯化钠饱和时对

应的湖水总体积为原来的10%,坚持深水成盐的学者认为,水深下降90%的条件下有机质很难保存,因此极力反对浅水成盐模式。然而,只有在盆地边界陡峭的情况下湖盆水体变浅而水体面积基本保持不变,湖水体积 V 与深度 h 成正比:

$$V \propto h \quad (1)$$

实际地质条件下很少有盆地边界近直立,多数情况下湖水变浅的同时湖盆大面积萎缩,湖水体积与水深的三次方成正比:

$$V \propto h^3 \quad (2)$$

满足体积浓缩至10%,仅需要水体深度下降为原来的 $\sqrt[3]{0.1} \times 100\% = 46.4\%$ 即可,东濮凹陷古水深参考青海湖现今水深为30 m,湖水浓缩90%、NaCl析出时仍可保持14.8 m的水深,在盐源不断补给的情况下NaCl析出可能对应更大的水深数值。与此同时,湖盆萎缩,水体面积变小,湖面风流的吹程大幅度降低,对应的湖盆浪基面相应变浅。如有硫酸盐存在,可能在更深的湖水条件下便可形成盐层,隔绝烃源岩与水体接触。由此可以看出,在盐岩析出前,靠近湖盆中心保持安静、强还原的沉积环境存在理论上的可能。



(a) 盐岩泥页岩共存

(b) 盐岩接触层中的黄铁矿^{*}

图1 东濮凹陷盐岩相关岩心照片

Fig. 1 Related picture of salt rock core in Dongpu Depression

1.2 现代沉积证据

现代沉积中存在浅水盐岩与高有机碳含量、富含 H_2S 的地层接触。青海地区的茶卡盐湖在雨季面积大于 100 km^2 ,对应的水深则不足1 m,湖水底部沉积厚层的盐,是典型的浅水成因,刘兴起等^[21]研究钻孔资料发现,盐岩层底部保存了较高的有机质,总有机碳含量一般大于0.2%,存在多个有机碳大于0.5%的数据点,该钻孔692 m处对应有机碳含量最高大于0.8%,且有较强的 H_2S 气味,紧邻该层的上部为石膏层,其上依次为钙芒硝—粗粒石盐—中粗粒石盐—细粒石盐,在沉积序列和湖盆演化模式上都符合浅水成盐特征。与之相对应的是,

东濮凹陷盐岩发育的沙三下、沙三中作为盆地的主力烃源岩,有机碳含量大于0.8%的井段偏少,大部分井点有机碳含量不足0.5%,与茶卡盐湖岩层下部的有机碳含量相比没有明显优势。由此推断,东濮凹陷沙三段盐岩即便为浅水成盐,与烃源岩互层也不矛盾。

2 垂向盐岩序列、同位素特征及原因分析

在实验室条件下,开展了大量的海水、湖泊咸水的蒸发实验,存在典型的蒸发岩形成时产生的盐岩序列以及同位素规律性变化^[22],坚持深水成盐的学者将东濮凹陷的测试结果与实验结果相对比,发现差异十分明显,因此认为东濮凹陷的浅水成盐不成立^[20]。然而,实验条件与实际地质条件并不吻合,只有从机制上分析其差异,并结合现代沉积证据,才能更好地解释盐岩的成因模式。

2.1 垂向矿物成分变化特征

由于海水中不同化合物的溶解度差异,造成沉积时率先析出溶解度小的碳酸盐,其次为硫酸盐,氯化物往往最后析出,在钻井资料中是否存在碳酸盐、石膏→石盐→硫酸钠镁盐→钾盐→光卤石→水卤镁石的沉积序列往往用来验证“浅水成盐”是否成立的证据^[23-24]。

东濮凹陷钻井资料表明,垂向上的盐韵律变化与海水蒸发序列类似,更支持“浅水成盐”模式。分析濮深18-1井25块样品X衍射特征可以发现(图2),该井3257~3292 m盐岩-碎屑岩沉积可以划分为10个膏盐岩韵律准层序,按照盐韵律变化特征可以归纳为3种类型:A型为泥质岩-碳酸盐岩旋回,B型为泥质岩-碳酸盐岩-硫酸盐岩旋回,C型为泥质岩-碳酸盐岩-硫酸盐岩-岩盐旋回。按照海水蒸发序列,化学岩的沉积随着溶解度变化,碳酸盐在浓缩初期便已形成,硫酸盐需浓缩19%,氯化物需浓缩90%,一个完整的盐韵律应为泥页岩-碳酸盐岩-硫酸盐岩-岩盐,实际地质材料中盐韵律多数不完整,部分韵律则缺失硫化物。

2.2 垂向氯同位素变化特征

由于湖水蒸发过程中存在氯同位素分馏效应,沉积物中 $\delta^{37}\text{Cl}$ 的变化一定程度上可以反映气候的变化。咸水蒸发实验表明,随着水体的浓缩、晶体析出, ^{37}Cl 优先进入固相,溶液中 $\delta^{37}\text{Cl}$ 含量降低,因此造成连续的盐岩沉积旋回中 $\delta^{37}\text{Cl}$ 含量逐步减小。东濮凹陷盐岩的氯同位素分析数据不多,卫

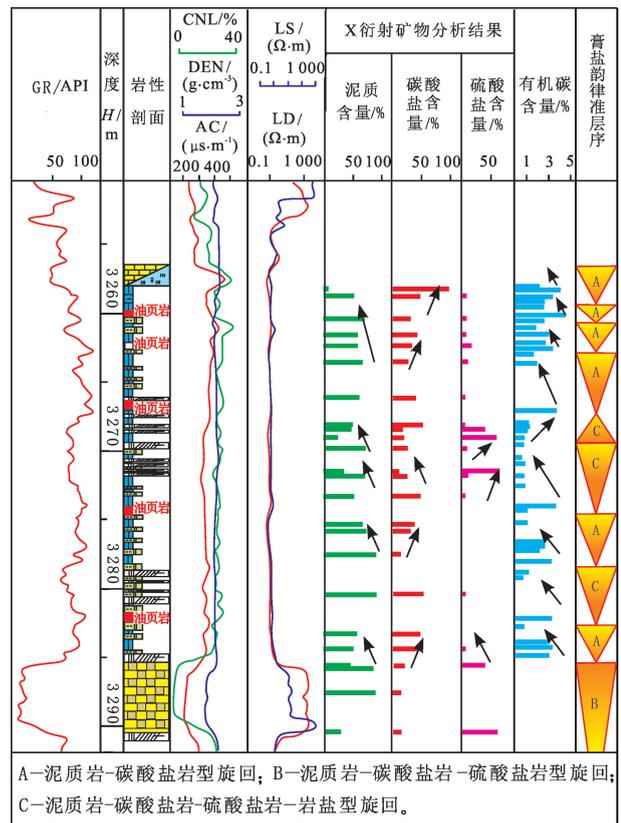


图2 濮深18-1井盐岩韵律特征

Fig. 2 Characteristics of salt rock rhythm for well 18-1

42、卫48、卫69等井共有18个 ^{37}Cl 测试数据,在岩性没有变化的盐岩段没有表现出 $\delta^{37}\text{Cl}$ 下大上小的变化规律^[20],因此有学者认为这是反驳东濮凹陷沙三段盐岩浅水成因的重要证据(图3,数据来自文献^[20]、^[23])。然而,中国西北地区的昆特依湖湖底

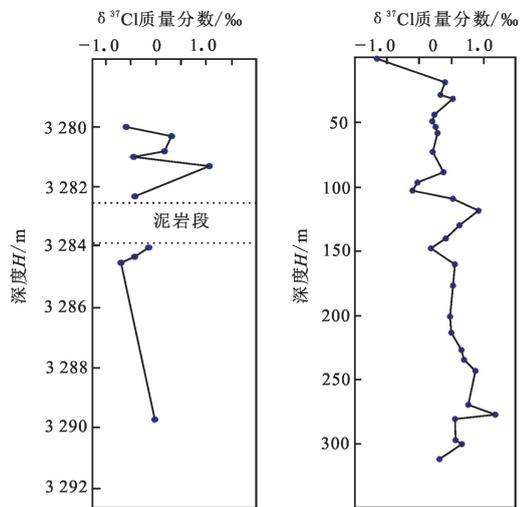


图3 东濮凹陷与昆特依盐湖氯同位素垂向变化特征

Fig. 3 Vertical variation characteristics of Cl isotope between Dongpu Depression and Kuntayi Salt lake

沉积的盐岩作为典型的浅水成因,由下到上 $^{37}\text{Cl}^-$ 含量也没有呈现出逐渐降低的趋势^[25]。可见,以氯同位素为基础探讨环境变化,不能简单地以 $^{37}\text{Cl}^-$ 含量变化判断,必须将实验室条件与实际地质条件相对比,详细分析阴阳离子之间的结合规律,才能更好地解释环境变化。

2.3 盐岩序列、同位素垂向变化原因

咸化的湖泊中各种离子以水合离子的形势存在,同一元素中 $^{35}\text{Cl}^-$ 与 $^{37}\text{Cl}^-$ 相比,水合离子之间的键能更低,因此更容易脱水并与 Na^+ 结合形成晶体,在咸水快速蒸发的室内试验中可以看出 $^{35}\text{Cl}^-$ 优先进入固相。然而,实际地质条件下食盐晶体析出的速度较慢,进入固相的 $^{35}\text{Cl}^-$ 并不稳定,与湖水时刻存在着离子交换,存在溶解-析出的平衡,在此过程中 $^{35}\text{Cl}^-$ 离子在化合物中键能偏低,更容易溶解进入液相,最终造成固相中 $^{37}\text{Cl}^-$ 相对富集,而溶液中的 $^{37}\text{Cl}^-$ 含量降低。必须强调的是,这一同位素变化趋势是在没有外来水体注入的前提下发生的,现实条件下外來水体会携带 $^{37}\text{Cl}^-$ 离子,母岩类型不同 $^{37}\text{Cl}^-$ 离子含量也可能存在差异,必然会影 响后期沉积的 $^{37}\text{Cl}^-$ 离子含量。以昆特依湖为例,钻孔 270 m 附近有一 $\delta^{37}\text{Cl}$ 明显偏高的数据点,可能对应一次湖盆的淡化(图 3(a)),钻孔 19 m 以上 $\delta^{37}\text{Cl}$ 含量降低速度快,可能对应湖盆的快速蒸发萎缩。必须说明的是,昆特依湖氯同位素变化曲线基础数据偏少,300 多米的井段仅有 28 个数据,加密测试数据后可能出现更为频繁的 $\delta^{37}\text{Cl}$ 高低变化。相应地,东濮凹陷卫 22 井自 3 289.7 m 开始析出晶体,沉积至 3 284.5 m 点后,存在一期淡水注入,此时河流带来的碎屑物质并未运移至卫 22 井点处,通过水分子与矿物离子之间的扩散影响,因 $^{37}\text{Cl}^-$ 的外来补给,新沉积的盐岩 $\delta^{37}\text{Cl}$ 含量增高,其后碎屑物质运移至该井点附近,沉积厚度约 1.7 m 的泥岩;而 3 284 ~ 3 282.3 m 之间,进入另一个盐岩沉积旋回(图 3(b))。与昆特依湖一样,卫 22 井盐岩取样密度较大,仍不能保证漏掉盐岩的析出-溶解的旋回。如此高频率的盐岩沉积旋回在现代沉积中并不难解释,以昆特湖为例年降水量约为 300 mm,而年蒸发量约为 3 400 mm,每年的降水一般都是在雨季多次完成的,降雨后在快速蒸发条件下很快便再次达到饱和,每一次降雨都可能对应一次 $\delta^{37}\text{Cl}$ 垂向变化的旋回。

总之,不能将没有岩性变化的盐岩简单看做连续沉积,其间可能发生多次的析出-溶解-再结晶的旋回,每一次淡水的注入都可能引起一个新的盐

岩沉积旋回,这种变化频率超高,可能对应到湖盆周围的每一次降水。降水量较为集中时,溶解作用不仅会造成氯同位素的垂向变化,进一步溶解可能造成氯化物、甚至硫酸盐的缺失,造成垂向上盐岩沉积序列的不完整。

3 深水成盐的不利证据

深水成盐最有力的证据是盐岩与油页岩互层,且黄铁矿十分发育。然而,油页岩与盐岩并不具备等时关系,且只能反映相对安静的还原环境,对水深的要求并不太高。油页岩及黄铁矿的出现不一定代表水深,而红层的出现证明东濮凹陷当时一定水浅,濮深 7 井沙三段盐岩发育段伴生有红层,伴随有雨痕、泥裂等标志,垂向序列上表现出原地堆积的特征^[5],这点深水成盐无法解释。

前已述及的垂向盐序列、氯同位素的变化,深水成盐更难解释。深水成盐认为盐水密度偏大,在重力作用下在湖底富集,达到饱和后析出沉积,如该假设成立,重力大于扩散力,离子按照重量由大到小为 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 应该从深到浅分布,沉积物中应该存在硫酸盐-碳酸盐-氯化物的盐序列,对于氯元素, $^{37}\text{Cl}^-$ 重量大于 $^{35}\text{Cl}^-$,垂向上也应该存在 $^{37}\text{Cl}^-$ 逐渐减小的现象,然而在东濮凹陷并未发现满足类似条件的盐序列。必须说明的是,深水成盐无法像浅水成盐一样,用后期的淡水注入来解释成盐旋回的终止,因为该学说认为湖底饱和盐水与浅层湖水之间存在盐跃层,后期注入的水体矿化度偏小,难以影响盐跃层之下。

深水成盐必须强调盐跃层存在^[10],跃层的定义为水深增加 1 m,盐度增加 0.01‰,如深水成盐中不强调跃层,氯化钠饱和度为 26.7%,湖底如达到饱和需要满足水深达到数千米,显然地质条件无法满足。现代沉积中并未发现盐湖存在盐度跃层的报道,无淡水注入的海洋跃层也难以存在,且多以温度为主导,并未发现盐度主导的跃层,如大西洋暖水注入北冰洋高冷水体之中、黄海底部的的高冷水团、太平洋不同性质水团的叠置等^[26-27],东濮凹陷沙三期显然不具备高冷水体存在的条件。而在东濮凹陷,按照深水成因的假设,盐离子为重力沉淀下形成,浅层具备的盐度不会太高,即便外来水体注入,也难形成跃层。由此推断,东濮凹陷的沙三期深水成因可能极小。

4 浅水成盐的间接证据

盐岩区之外的沉积特征以及整个凹陷烃源岩的

地化特征从一定程度上可以为成盐模式提供参考。从沉积上看,所有钻遇沙三段的井点证实,不同构造部位的沙三段中发育多套薄层砂体,整体具有满盆含砂、砂泥岩薄互层发育^[6,9,16],这种特征反映出只有在水体较浅、震荡频繁的环境下湖盆容易萎缩,在靠近沉积中心才能沉积砂体;如东濮凹陷沙三期水体较深,应该更发育透镜砂体,这种砂体分布十分局限,湖盆中心应发育大套的烃源岩,而非泥岩与砂岩的薄互层。兰聊断层作为东濮凹陷的控边断层,沙三期表现出明显的正断层特征^[28-29],然而其下降盘砾岩十分少见(东古2井沙三上亚段发现粗相带,该井位于兰聊断层的分叉处,极其靠近断层,砾岩的形成可能受断层影响),推断兰聊断层两侧不具备高山深盆的地貌特征,其下降盘巨厚的沙三段沉积只是断层长期、多次、小规模活动的产物,湖盆所具备的水体并不深。从东濮凹陷烃源岩地球化学特征上,反L型的标志化合物十分常见,高等植物特征来源的原油遍及东濮凹陷,分布于各个层位,完全可能是凹陷在沙三期整体水深不够,水体较浅时水底高等植物发育造成的。由此可以推断东濮凹陷盐岩沉积时可能是偏浅且震荡频繁的水体环境,盐岩更有可能是浅水成因。

5 结 论

(1)湖水蒸发,盐岩沉积之前能够保持足够水深,盐层形成后又能阻隔有机质与氧气接触,浅水成盐与油页岩、黄铁矿共存不矛盾。

(2)淡水的注入会影响垂向盐韵律的组成,淡水注入量小,可能造成氯同位素的波动,出现 $\delta^{37}\text{Cl}$ 偏高数据,该数据的突变频率可能对应到每一次降雨;淡水注入量进一步增大,可能造成氯化物完全溶蚀,进一步造成硫酸盐缺失,从而造成垂向盐韵律的不完整。

(3)深水成盐模式不仅无法解释盐岩伴生红层,对盐韵律、氯同位素的垂向变化也难以解释,沙三段满盆含砂、砂泥岩薄互层的沉积以及高等植物来源的油气遍及凹陷等间接证据也更支持浅水成因。

参考文献:

[1] 李任伟,辛茂安.东濮盆地蒸发岩的成因[J].沉积学报,1989,7(4):141-148.
LI Renwei, XIN Maoan. Origin of evaporites of Dongpu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(4): 141-

148.
[2] 屈红军,李文厚,苗建宇,等.东濮凹陷濮卫洼陷盐岩发育规律及成因探讨[J].中国地质,2003,30(3):309-315.
QU Hongjun, LI Wenhui, MIAO Jianyu, et al. Development pattern of salt rocks in the Puwei subdepression of the Dongpu depression and their genesis [J]. Chinese Geology, 2003, 30(3): 309-315.
[3] 张孝义,王运所,段红梅,等.东濮凹陷北部浅水成盐与油气分布初探[J].断块油气田,2002,9(4):12-17.
ZHANG Xiaoyi, WANG Yunsuo, DUAN Hongmei, et al. The halites formed in shallow water and hydrocarbon distribution in Dongpu depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(4): 12-17.
[4] 纪友亮,冯建辉,王生朗,等.东濮凹陷下第三系沙三段盐岩和膏盐岩的成因[J].沉积学报,2005,23(2):225-231.
JI Youliang, FENG Jianhui, WANG Shenglang, et al. Origin of salt and gypsum rock in the third member of shahejie formation of lower tertiary in Dongpu depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 225-231.
[5] 苏惠,许化政,张金川,等.东濮凹陷沙三段盐岩成因[J].石油勘探与开发,2006,33(5):600-605.
SU Hui, XU Huazheng, ZHANG Jinchuan, et al. Origin of 3rd member salt rock of shahejie formation in Dongpu sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 600-605.
[6] 李健,王德仁,白兴盈.东濮凹陷沙三³⁻⁴亚段层序地层与沉积体系分析[J].石油与天然气地质,2001,22(2):161-164.
LI Jian, WANG Deren, BAI Xingying. Depositional system and sequence stratigraphy of s₃³⁻⁴ submember in Dongpu dpression [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 161-164.
[7] 周新科,许化政.东濮凹陷地质特征研究[J].石油学报,2007,28(5):20-26.
ZHOU Xinke, XU Huazheng. Discussion on geological features of Dongpu depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 20-26.
[8] 黄醒汉,蒋有录.东濮凹陷下第三系盐湖相沉积油气成因的初步探讨[J].华东石油学院学报,1983,7(2):127-141.
HUANG Xinghan, JIANG Youlu. Oil and gas generation of the saline lower tertiary in Dongpu depression [J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1983, 7(2): 127-141.
[9] 陈发亮,朱晖,李绪涛,等.东濮凹陷下第三系沙河街组层序地层划分及盐岩成因探讨[J].沉积学报,

- 2000,18(3):384-388.
- CHEN Faliang, ZHU Hui, LI Xutao, et al. Partition of sequence strata and discussion about salt-rock resource in shahejie formation of eogene, Dongpu depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000,18(3):384-388.
- [10] 金强,黄醒汉. 东濮凹陷早第三纪盐湖成因的探讨:一种深水成因模式[J]. 华东石油学院学报(自然科学版),1985,9(1):1-14.
- JIN Qiang, HUANG Xinghan. Studies on the origin of the early tertiary salt lake dongpu depression: a postulated deep water model[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 1985,9(1):1-14.
- [11] 陈发亮,陈业全,魏生祥,等. 东濮凹陷盐湖盆地油气富集规律研究[J]. 盐湖研究,2003,11(4):33-38.
- CHEN Faliang, CHEN Yequan, WEI Shengxiang, et al. The research of regularity of hydrocarbon enrichment in salt basin of Dongpu depression [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2003,11(4):33-38.
- [12] 顾家裕. 东濮凹陷盐岩形成环境[J]. 石油实验地质,1986,8(1):22-28.
- GU Jiayu. The depositional environment of salt rocks in Dongpu depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1986,8(1):22-28.
- [13] 张建军,李治,刘贤武. 东濮凹陷沙河街组盐岩成因研究[J]. 断块油气田,1998,5(5):18-22.
- ZHANG Jianjun, LI Zhi, LIU Xianwu. The study of genetic salt sedimentary in Dongpu depression [J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 1998,5(5):18-22.
- [14] 赵志清,吕红玉. 东濮盆地晚始新世生物群及其古环境探讨[J]. 微体古生物学报,1988,5(3):315-322.
- ZHAO Zhiqing, LÜ Hongyu. Late Eocene biota in the Dongpu Basin and its palaeoenvironment [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1988,5(3):315-322.
- [15] 胥菊珍,蒋飞虎,张孝义,等. 河南东濮凹陷古近系沙河街组盐岩沉积特征及成因[J]. 古地理学报,2003,5(2):162-170.
- XU Juzhen, JIANG Feihu, ZHANG Xiaoyi, et al. Sedimentary characteristics and origin of salt rock of Shahejie formation of Paleogene in Dongpu sag, Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003,5(2):162-170.
- [16] 陈发亮,韩福民,刘忠亮,等. 东濮凹陷含盐地层合成地震记录制作方法研究[J]. 勘探地球物理进展,2006,29(5):357-359.
- CHEN Faliang, HAN Fumin, LIU Zhongliang, et al. Synsetic seismogram construction in saliniferous strata in Dongpu depression [J]. *PEG*, 2006,29(5):357-359.
- [17] 林又玲,吴贤涛,潘结南,等. 东濮凹陷老第三系沙河街组盐类沉积模式新见[J]. 古地理学报,2000,2(4):66-76.
- LIN Youling, WU Xiantao, PAN Jienan, et al. Salt depositional model of the shahejie formation of palaeogene in Dongpu depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000,2(4):66-76.
- [18] 王秀林,张孝义,王运所,等. 东濮凹陷盐岩成因与油气聚集[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(5):11-13.
- WANG Xiulin, ZHANG Xiaoyi, WANG Yunsuo, et al. Discussion on genesis of halites and petroleum accumulation in Dongpu Depression [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2002,21(5):11-13.
- [19] 冯阵东,吴伟,程秀申,等. 食盐析出实验对盐湖盆地沉积研究的启示[J]. 沉积学报,2014,3(2):238-244.
- FENG Zhendong, WU Wei, CHENG Xiushen, et al. Enlightenment from salt precipitation experiment to the researching on saline lacustrine basin sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014,3(2):238-244.
- [20] 高红灿,郑荣才,肖应凯,等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因:来自沉积学和地球化学的证据[J]. 石油学报,2015,36(1):19-33.
- GAO Hongcan, ZHENG Rongcai, XIAO Yingkai, et al. Origin of the salt rock of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu sag Bohai Bay Basin: evidences from sedimentology and geochemistry [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015,36(1):19-33.
- [21] 刘兴起,王永波,沈吉,等. 16000 a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应[J]. 地质学报,2007,81(6):843-850.
- LIU Xingqi, WANG Yongbo, SHEN Ji, et al. Evolution of Chaka Salt Lake during the last 16000 years and its response to climatic change [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007,81(6):843-850.
- [22] 肖应凯,刘卫国,周引民,等. 盐湖卤水及盐类矿物的氯同位素组成[J]. 科学通报,1996,41(22):2067-2071.
- XIAO Yingkai, LIU Weiguo, ZHOU Yinmin, et al. Chlorine isotopic composition for brines and salt deposits of salt lake [J]. *Chinese Science Bullerin*, 1996,41(22):2067-2071.
- [23] 程亮,刘德华,夏志刚,等. 江汉盆地潜江凹陷新沟嘴组致密油成藏模式与分布规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):34-42.
- CHENG Liang, LIU Dehua, XIA Zhigang, et al. Accumulation model and distribution regularity of Xingouzui Formation tight oil in Qianjiang sag, Jianghan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Nat-*

- ural Science), 2015, 39(6):34-42.
- [24] 马立民,李志鹏,林承焰,等. 东营凹陷沙四下盐湖相沉积序列[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6):24-32.
MA Limin, LI Zhipeng, LIN Chengyan, et al. Sedimentary sequences of salt-lake facies in Lower Es₄ of Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):24-32.
- [25] 刘卫国,肖应凯,韩凤清,等. 昆特依盐湖氯同位素特征及古气候意义[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(4):431-436.
LIU Weigu, XIAO Yingkai, HAN Fengqing, et al. Characteristics of chlorine isotopes in salt lakes of Kuntayi and their significance of paleoclimate[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(4):431-436.
- [26] 鲍献文,李娜,姚志刚,等. 北黄海温盐分布季节变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(4):553-562.
BAO Xianwen, LI Na, YAO Zhigang, et al. Seasonal variation characteristics of temperature and salinity of the North Yellow Sea[J]. Eriodical of Ocean University of China, 2009, 39(4):553-562.
- [27] 史久新,赵进平. 北冰洋盐跃层研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3):351-358.
SHI Jiuxin, ZHAO Jinping. Advances in studies on the arctic Halocline[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3):351-358.
- [28] 漆家福,王德仁,陈书平,等. 兰聊断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4):451-460.
QI Jiafu, WANG Deren, CHEN Shuping, et al. Impact of geometry and kinematics of Lanliao fault on structural styles in Dongpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4):451-460.
- [29] 孙思敏,彭仕宓,汪新文. 东濮凹陷兰聊断层的分段特征及其石油地质意义[J]. 石油学报, 2003, 24(4):26-31.
SUN Simin, PENG Shimi, WANG Xinwen. Segmentation characteristics of Lanliao Fault in Dongpu Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4):26-31.

(编辑 修荣荣)