

文章编号: 1000-0550(2014) 02-0238-06

食盐析出实验对盐湖盆地沉积研究的启示^①

冯阵东¹ 吴伟² 程秀申³ 张继标⁴ 白圣方⁵

(1.河南理工大学安全科学与工程学院 河南焦作 454003; 2.河南理工大学资源环境学院 河南焦作 454003;

3.中原油田勘探开发科学研究院 河南濮阳 457001; 4.中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083;

5.中国石化胜利油田纯梁采油厂 山东博兴 256504)

摘要 将物理模拟实验结果与地震、岩芯资料相结合,对东濮凹陷盐岩沉积的古地理位置、成因机制提出新的认识。研究认为:洼陷带的边缘、中央隆起带等浅水部位是盐岩沉积较早的部位,可以沉积厚度大、粒度小的单盐层,而靠近湖盆中心,矿物结晶时间充分,沉积的盐岩粒度大,单盐层厚度可大可小,甚至可以缺失,盐岩沉积的古地理位置受古盐度影响明显;盐湖盆地绝大部分地区,湖水有一定深度时便已形成湖底盐层,湖水变浅时盐层已具备一定厚度,保证了其下部泥页岩的还原环境,盐岩沉积后基本保持了原有的构造形态,其上可以再次接受泥页岩沉积;湖盆边缘的渗滤带在湖水退去以后仍可以沉积盐岩,该处盐层最薄、粒度细小,下部地层常见氧化环境标志。

关键词 盐湖盆地 盐岩 沉积部位 沉积环境 物理模拟

第一作者简介 冯阵东 男 1983 年出生 讲师 石油地质勘探 E-mail: fzd203@163.com

中图分类号 P558.24⁺⁷ **文献标识码** A

0 引言

关于东濮凹陷的盐岩成因存在着多种学说,争论的焦点往往集中在盐岩来源、沉积过程、古气候等^[1-15],但对盐岩沉积对应的古地理位置认识相对统一,无论是“浅水成盐说”^[1-7]还是“深水成盐说”^[8-15]一致认为盐岩沉积于盆地相对低洼的部位。然而,东濮凹陷中央隆起带沙三下亚段盐岩发育,该处的地层厚度却小于西部洼陷带。在盐岩接触的地层中既有红层、泥裂、雨痕等氧化环境的标志^[3,5],又有黑色泥页岩、黄铁矿等还原环境的标志^[8,10,12]，“深水成因”、“浅水成因”无法对两种标志共存的现象做出合理的解释。笔者通过物理模拟实验方法解决以上矛盾,借鉴食盐晶体析出过程、厚度、粒度、位置分布特征,对盐湖沉积提出新的认识。

1 食盐析出实验过程分析

1.1 实验设计

本次实验的主要目的是观察食盐的析出过程,以及晶体的分布特征。除选择食盐、纯净水等必备实验材料外,由于玻璃容器、纯净水、盐水全为无色材料,玻璃容器容易反光,对实验现象的观察及记

录十分不利;而金属容器容易与食盐产生化学反应,被腐蚀后影响盐水及晶体的颜色,不利于实验效果的观测,因此本次实验选择普通纸杯作为实验容器。实验过程如下:

取高 75 mm、上口直径 70 mm、底部直径 55 mm 的普通纸杯一个,倾斜放置于桌面之上(见图 1,杯底与桌面接触,杯口垫置于高 15 mm 的桌缘之上);

向清洗干净的样品瓶里注入纯净水,放入大量食盐(NaCl),摇晃 1 分钟后静置 10 分钟,重复摇晃 1 分钟后静置 2 小时,使得食盐充分溶解,将过饱和的食盐溶液倒出备用;

向倾斜纸杯内注入饱和食盐溶液,杯底深度 13 mm,向杯口逐渐减薄,剖面为楔形(图 1);静置,观察并记录食盐析出现象。

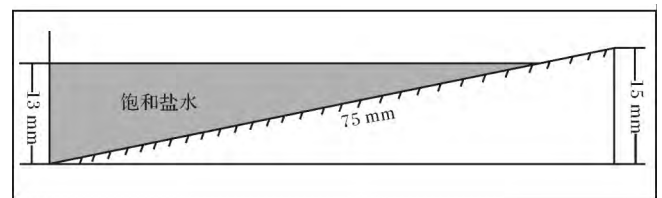


图 1 食盐析出实验模型示意图(剖面)

Fig.1 Schematic diagram of the model for salt precipitation experiment(profile)

①国家科技重大专项“东濮凹陷油气富集规律与增储领域”(编号:2011ZX05006-004)资助
收稿日期:2013-01-30;收修改稿日期:2013-03-26

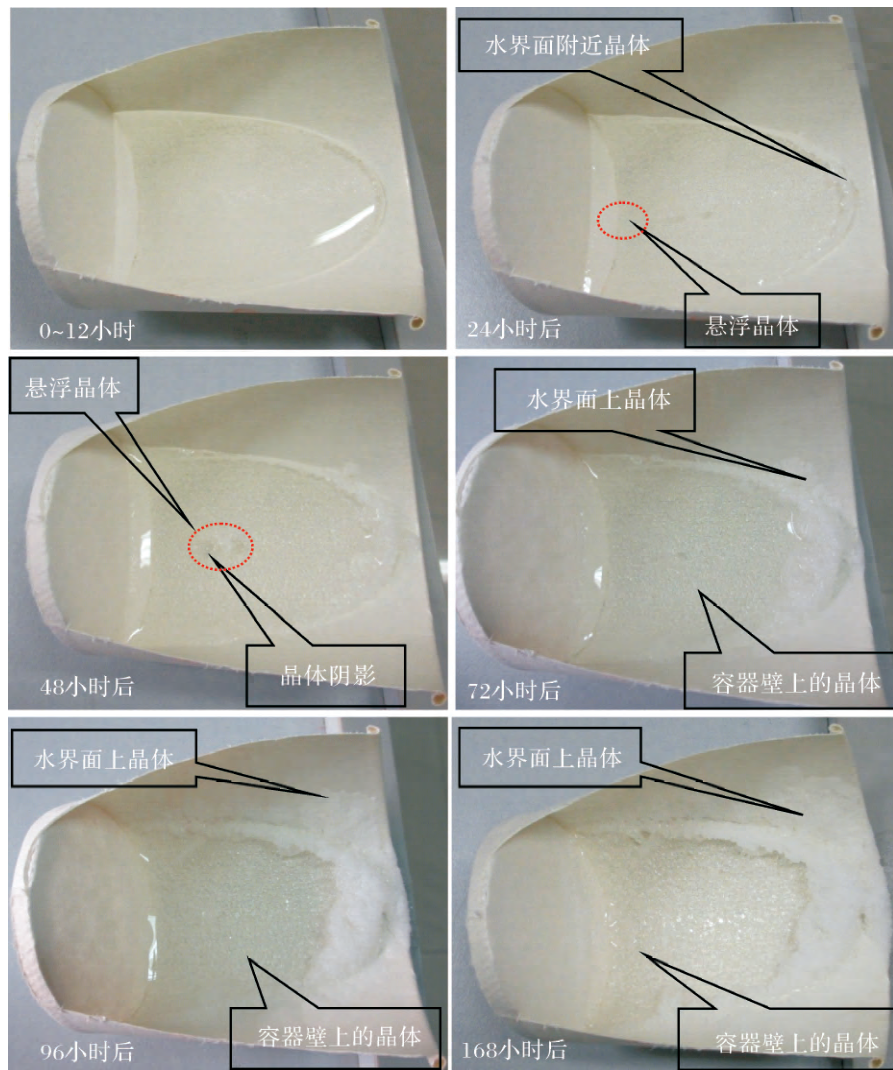


图2 食盐析出实验过程

Fig.2 The process of salt precipitation experiment

1.2 实验结果分析

实验进行 168 小时后,水体干涸,结束本次实验。根据实验现象,可以将晶体析出划分为三个阶段(图 2):

实验开始 12 小时内:未发生晶体析出现象,肉眼观测到的溶液与初始状态无明显差别;

12~48 小时:实验进行 24 小时后,水界面附近出现晶体析出;有雪花状食盐晶体析出,并悬浮于液面之上,随着实验进行,悬浮晶体有增大迹象,但整体厚度较薄,呈半透明状(照片中晶体颜色与溶液、容器相近,不易观测,但其阴影清晰可见);

48~168 小时:悬浮的雪花状晶体增大到一定程度,体积不再增长,盐水底部开始出现晶体,粒度逐渐增大并在水底构成薄盐层,随时间增长,盐层

有增厚的趋势;与此同时,原水界面之上暴露部位出现薄层、细粒食盐晶体。

2 物理模拟对应的地质过程分析

对照食盐析出实验,可以将盐湖盆地盐岩沉积划分为三个阶段,并将沉积的盐岩划分为三个区域(图 3):

湖水浓缩阶段(对应物理实验 0~12 小时):因淡水补给不够,湖水开始浓缩,靠近水面的水体矿化度、密度升高,从而造成密度反转,高密度盐水团块甚至细微食盐晶体(蒸发速度较快时)开始下沉。由于深部湖水矿化度较低,高密度盐水团块迅速扩散、细微晶体再次溶解。该阶段在湖底很难形成盐岩沉积,深浅层的湖水矿化度也不会相差太多。

湖水过饱和阶段(对应实验 12~48 小时):湖水高度浓缩,碳酸盐、硫酸盐、氯化物等依次达到饱和状态。湖水蒸发的速度受水温、表面与空气接触面积影响,湖盆边缘湖水温度高,部分水体与地下水连通,在淋滤、蒸发作用下,湖盆边缘失水速度明显加快;边缘处的水体总量较小,矿化度提升速度远大于湖盆中心,晶体率先析出并接受沉积。此时,湖水接近饱和,在进一步的蒸发作用下盐湖中心开始析出晶体,因水体密度较大,湖盆中心的食盐结晶呈雪花状分布且厚度小、质量轻,食盐晶体自身的重力小于湖水对其产生的浮力,晶体悬浮于水面之上。

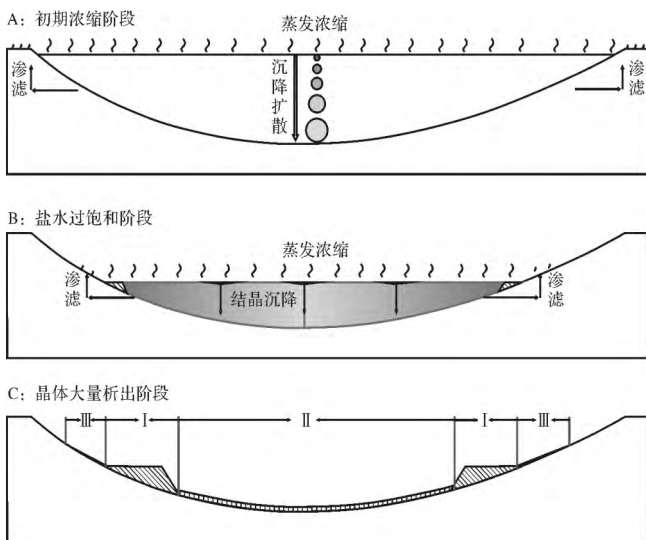


图 3 盐湖盆地盐岩沉积过程模式图

Fig.3 The pattern of the process of salt rock sedimentation in saline lakes

盐岩大量沉积阶段(对应实验 48~168 小时):水界面附近依旧是蒸发最强烈部位,盐岩沉积厚度增加较快,最终形成的盐层厚度最大、晶体粒度偏小;随着蒸发作用的进行,靠近湖盆中心,悬浮于溶液表面的雪花状晶体逐渐生长,当重力大于盐水对其自身的浮力之后,晶体开始下沉。由于湖水处于过饱和状态,悬浮食盐晶体在下沉的过程中,同时发生着晶体溶解—析出的平衡过程,食盐颗粒在被部分溶解同时,便有相同数量的晶体在湖底析出。随着实验过程推进,晶体逐渐生长,形成的薄盐层覆盖于容器壁之上,且有增厚的趋势;与此同时,暴露在初始水界面附近的渗滤带上开始出现薄层晶体,晶体最细、盐岩厚度最小。

3 对盐湖盆地沉积研究的指导意义

3.1 重新认识盐岩沉积的古地理位置,为隆起区盐岩沉积提供证据

从实验结果看,盐岩沉积部位、盐层厚度最大部位并非对应着水体较深的古洼陷中心,而是对应古隆起、斜坡等水体相对较浅的部位。盐湖盆地底部具有高低不平的构造形态,中央隆起带与湖盆边缘斜坡带等水体较浅的部位,同等面积蒸发量相当的情况下,湖水的浓缩比例大,是盐岩沉积最早的部位(图 2);湖水进一步变浅,中央隆起带可能露出水面,在其表面蒸发、地下渗滤共同作用下,隆起区周缘是盐岩沉积的有利部位,盐岩沉积的厚度可能大于湖盆中心,从东濮凹陷过濮 70 剖面上可以看出,1#盐组斜坡带厚度明显大于洼陷中心(图 4),与物理实验中出现的斜坡带浅水沉积厚度大、深水沉积厚度小的特征基本相符。另外,如在盐湖干涸之前,有淡水的注入,湖底盐层停止生长,湖盆进入新一期沉积旋回,中心处薄层的盐最先与淡水接触,导致单套盐层仅在斜坡处发育(见图 4 中 2#盐组),湖盆中心则被碎屑岩充填。

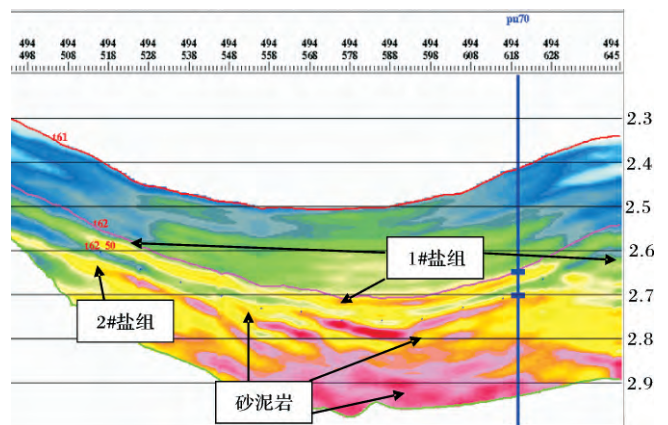


图 4 过濮 70 井波阻抗反演剖面

Fig.4 Profile of wave impedance inversion confined by Pu 70 Well

实验结果表明,中央隆起带形成以后,其顶部仍可以沉积厚层盐岩。事实上,盐岩的沉积与古地理位置关系并不完全对应,因为盐岩的沉积还与盆地的古盐度有关:其一,单个盐层序沉积时,如果湖盆洪水期的盐度偏小,湖水浓缩、析出时,水体范围集中于洼陷带中心,因此造成濮城、前梨园、海通集等洼陷区含有厚层盐岩;其二,湖水浓缩到一定程度后,外部携带大量矿物离子的水源注入,使得湖

水含盐岩饱和度降低,单盐层沉积时,如伴随多次蒸发、浓缩—外部盐水注入,单盐层沉积对应的范围则可以扩大到洼陷边缘、中央隆起带等区域,在青海湖、死海咸湖盆地的周缘、东濮凹陷濮城断层的上升盘、中央隆起带等部位都有盐岩的沉积,说明隆起区可以沉积盐岩。

3.2 根据食盐晶体特征,大致推断古构造特征

对比食盐析出实验结果,可以根据盐岩距离水界面位置、盐岩沉积厚度、颗粒大小等条件将盐岩沉积分为三个区:水界面附近为I区,该区食盐厚度最大、实验的颗粒较细,一般对应湖盆的斜坡带。I区底界至湖盆中心为II区,与I区相比,初始水界面之下的食盐晶体具有厚度小、粒度大的特点,界面之下到湖盆中心单盐层的厚度相对均匀,将该区域划分为盐岩沉积的II区;I区底界顶面之上,盐湖盆地含有碳酸盐、硫酸盐、氯化物等,这些盐类虽然达到饱和后才能析出,然而晶体生长后的范围却大于饱和时的水面范围,III区在盐岩沉积前可能暴露地表,出现过氧化、还原环境的交替。不同构造位置盐层厚度、晶体颗粒大小、接触地层特征表现出明显的差异,因此可以根据现有的岩芯资料,反推古构造位置。

3.3 为盐岩沉积区氧化、还原环境共存提供解释

东濮凹陷的盐岩接触地层中,既有反应氧化环境的红色泥岩、泥裂、雨痕,又有反应强还原环境的黑色油页岩、黄铁矿,在这些标志的支持下,盐岩的浅水与深水成因争议不断。本次实验可以为盐岩接触地层中表现出的氧化、还原环境共存提供合理解释,从实验结果中不难看出:

III区的盐层形成之前曾暴露于水面之上,盐岩自身以及下部接触的碎屑岩地层可以表现为红层(图5),部分地区可以发现泥裂、雨痕等氧化环境的沉积相标志;

II区对应湖盆较深的部位,洪水期具有较大的水深,可以沉积黑色的泥岩、泥页岩;进入枯水期,湖水变浅的同时能否保持还原环境是解决该争议的关键:

盐层形成于一定水深的条件下,对其下部有机质的保存十分有利:从实验过程推断,湖水中的矿物质达到饱和后,湖底开始析出盐的晶体,随着时间的推移,晶体颗粒逐渐生长、组成一套薄盐层,盐岩在湖底的沉积可以导致早期泥岩底部迅速失水,形成类似于泥岩干裂的水下收缩缝^[16]。湖底盐层

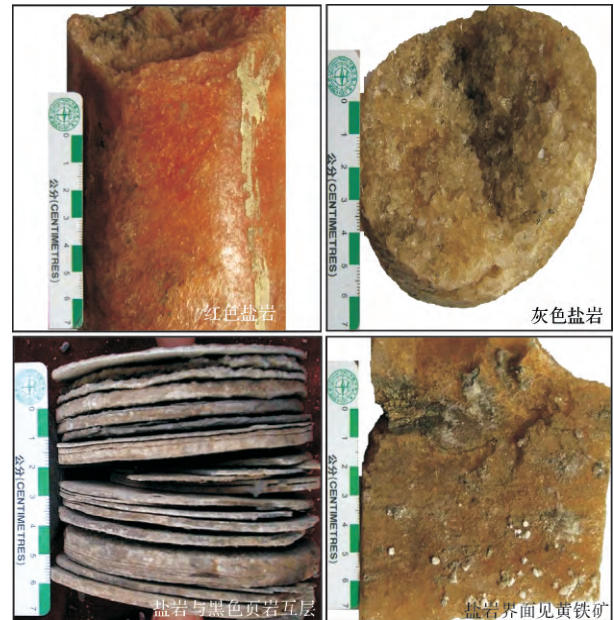


图5 东濮凹陷盐岩及接触地层特征

Fig.5 Characteristics of the salt rock and the formations contact with the salt rock in Dongpu depression

沉积时,仍有一定的水深,盐层阻隔了下部泥页岩中有机质与水中溶解氧的结合,对有机质的保存十分有利;当盐层具备一定的厚度时,即便湖盆干涸,盐的底部仍可能表现为还原环境;

湖水中氧的含量也是影响有机质保存的主要因素:湖水在蒸发作用下开始浓缩时,电解质的含量增高,离子产生的电缩作用增强,降低氧在湖水中的溶解度;含盐量达到一定程度后,会导致水中生产氧气的藻类死亡。由此可见,干旱环境下具有高矿化度、早成盐的盐湖盆地,其底部保持还原环境完全可能。

从实验中还可以看出,水界面之下至湖盆中心的广大区域内,盐岩的沉积厚度差异不大,沉积前后湖盆底部的地貌形态相似。下一个洪水期到来之后,湖盆中心的位置没有改变,仍是水深最大的部位,在盐层之上沉积一套黑色的泥页岩,从而出现岩心中薄层泥页岩中夹一套盐岩的地层组合,盐岩顶底部的接触面上都可以出现反应强还原环境的黄铁矿(图5)。这套地层在长期温暖湿润、短期干旱气候交替变化下可以形成,发现于泥页岩中的反应深水、湿润气候的古生物,不能作为盐岩深水成因的直接证据^[12~15]。

I区为氧化、还原的过度带,在有少量淡水补给的情况下,可能出现氧化、还原环境的交替。

3.4 对“深水成盐”说中提出的分层沉积提出质疑

“深水成盐”说认为湖水表面受蒸发浓缩后,造成表层密度大于深层,在重力作用下,高浓度盐水克服浮力后在湖底浓缩,达到饱和后析出、沉积。这种假说值得商榷,湖水处于一个蒸发、浓缩、下沉、扩散的连续过程,并不会等浓缩到一定规模后才开始下沉,即便在蒸发速度比较快的时候,在湖水表面形成了微小的晶体颗粒,也会在下沉过程中溶解、扩散。本次实验中使用了矿化度很高的盐溶液,12 小时以内在容器底部仍未见到晶体析出。只有在水面发现雪花状晶体一段时间以后,才在水底见到晶体颗粒,可见晶体是在水面析出,以固态形式开始下沉,在此过程中晶体、溶液之间的离子仍会交换,部分晶体被溶解,但整体处于溶解—析出的平衡过程,固态晶体可以达到湖底并沉积下来。因此,“深水成因”说假想的深部浓度大、浅层浓度小的湖水分层沉积很难出现。

4 结论

(1) 盐湖盆地浓缩变浅时,湖底绝大部分地区仍能保持还原环境,主要原因是:湖底盐层形成于湖水干涸前,阻隔盐底部有机质与湖水溶解氧的接触;高矿化度盐水杀死产氧藻类、降低了湖水中氧的溶解度。

(2) 盐岩不会产生分层沉积,盐湖浓缩分为 3 个阶段:初期浓缩阶段湖水矿化度相对均匀;过饱和阶段的晶体除了在湖盆边缘沉积外,湖盆中心的水面附近浓缩速度快,晶体早期悬浮于湖水之上,颗粒增长到足够大时,开始向湖底沉降、沉积;晶体大量析出阶段,湖盆底部晶体生长形成薄层盐,随着时间增长盐层加厚,湖盆边缘渗滤带产生薄盐层。

(3) 盐岩沉积分 3 个区带,不同区带盐层厚度、晶体粒度、接触岩层表现出明显差异:湖盆水界面附近为 I 区,在构造上对应湖盆边缘斜坡带、中央隆起带等水浅、浓缩快的地区,该区盐岩沉积厚度大、粒度细;I 区底界至湖盆中心为 II 区,盐层厚度相对较小、厚度变化不大、晶体粒度较粗,接触岩性多为黑色泥页岩;I 区顶界以上为 III 区,该区盐层最薄、形成时间最晚,底部碎屑岩中可能出现红层、泥裂、雨痕等氧化环境标志。

参考文献 (References)

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 Wenhou, 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 s₃₋₄ submember in Dongpu depression[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 Petroli 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 China University of Petroleum, 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 Eocene, 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,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 China University of Petroleum, 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 周瑶琪, 赵振宇, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙沉积模式及定量化研究[J]. 沉积学报 , 2006 , 24(5) : 672-681 [Zhou Yaoqi , Zhao Zhenyu , Ma Xiaoming , et al. The sedimentary model and quantitative analysis of the subaqueous shrink-cracks [J]. Acta Sedimentologica Sinica , 2006 , 24(5) : 672-681]

Enlightenment from Salt Precipitation Experiment to the Researching on Saline Lacustrine Basin Sedimentology

FENG Zhen-dong¹ WU Wei² CHENG Xiu-shen³
ZHANG Ji-biao⁴ BAI Sheng-fang⁵

(1. Henan Polytechnic University , College of Safety Science and Engineering , Jiaozuo , Henan 454003;

2. Henan Polytechnic University , Resourced and Environment School , Jiaozuo , Henan 454003;

3. Research Institute of Exploration and Development , Zhongyuan Oilfield , Puyang , Henan 457061;

4. Exploration and Production Research Institute , SINOPEC , Beijing 100083;

5. Chunliang Oil Production Plant , Shengli Oilfield , Boxing , Shandong 256504)

Abstract: Combined the results of the physical simulation experiment with the seismic and core information , a new understanding about the tectonic position , paleogeographic position of salt sediment and the genetic mechanism were proposed in Dongpu Depression. The research suggested that the sedimentation of salt was earlier in shallow parts such as the edge of the lake basin sag and the central uplift belt , the salt layer were thick , the particle size of salt rock was small while the size was large and with a thin or absent layer near the center of the lake basin; a single salt layer with large thickness and small particle size may be deposited , while near the center of the lake basin , there are enough time for the mineral to crystallize , salt rock with large particle was deposited , and the thickness of a single salt layer can be very flexible , or can even be absent. The paleogeographic position of salt rock sediment were obviously impacted by paleosalinity. The salt layer at the bottom of the lake has already formed in certain depth in most areas of the saline lake basin , and has a certain thickness when lakes become shallower , that ensures the reducing environment of the lower part of the shale , and the basic original structure was kept after the salt sediment , the upper can again accept shale deposition; The salt rock can still deposit after the lake receded in the leakage zone at the edge of the lake basin , there salt layer is thinnest , small particle size , symbol of redox environment were commonly in sight in the lower strata.

Key words: saline lacustrine basin; salt rock; sedimentary position; sedimentary environment; physical simulation