

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025367

厚层盐岩的分布与成盐模式及对页岩油勘探的启示

——以渤海湾盆地东濮凹陷为例

彭勇民^{1,2}, 袁波³, 徐云龙³, 王亚明³, 吴舟凡²(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206;
3. 中国石化中原油田分公司勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 根据岩心观察、地震测井资料, 针对东濮厚层盐岩的深水、浅水成盐的争论问题, 探讨了渤海湾盆地东濮凹陷盐岩的成因。研究表明: 沙河街组第三段(以下简称沙三段)膏盐岩厚度约 1 000 m, 厚层盐岩纵向上由水体变深、水体变浅 2 类蒸发岩序列反复叠置而成, 单个序列厚度介于 5.7~18.0 m, 单层盐岩厚度介于 1.0~12.0 m。受干旱气候、多个构造次洼、湖平面升降的影响, 盐岩分布具有“多期次、多中心”的特点, 在沙河街组第三段下亚段(以下简称沙三下亚段)时期早期, 新卫 12 井区为核心的“牛眼状”盐岩中心处于柳屯洼陷, 与柳屯洼陷的沉降中心、沉积中心一致, 属于重合型匹配关系。然而, 多数情况下盐岩中心与构造沉降中心、沉积中心 3 个中心出现分离的空间匹配关系, 其中, 盐岩中心不能反映水体深或浅。研究结果表明: ①东濮凹陷沙三下亚段甚至更早的沙河街组第四段上亚段(以下简称沙四上亚段)I 时期中央隆起属于水下隆起与浅水沉积, 没有形成沉积中心; ②既有“深水成盐”又有“浅水成盐”, 二者同盆同时共存; ③创新性提出“深盆深水、浅平台浅水”的复杂成盐模式, “深水成盐”模式以柳屯洼陷为例, “浅平台浅水成盐”模式以中央隆起、前梨园洼陷西侧为例。研究结果与之前的单一浅水、单一深水盐岩成因认识不同, 解决了盐岩与深水相的时空匹配, 为“避盐(针对钻完井工程)、找深水”页岩油勘探提供依据。

关键词: 东濮凹陷; 厚层盐岩; 分布规律; 深盆深水; 浅平台浅水

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Distribution and Salt Formation Model of Thick Salt Rocks For Shale Oil Exploration Insights in Dongpu Depression

PENG Yongmin^{1,2}, YUAN Bo³, XU Yunlong³, WANG Yaming³, WU Zhoufan²(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206 China;
2. Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206 China; 3. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: Based on core observations and seismic data, this paper explores the genesis of salt rocks in the Dongpu Depression, in response to the debate over deep water and shallow water salt formation in thick salt rocks. Research shows that thickness of the gypsum salt rock in the third section of the Sha River is about 1 000 meters. The thick layer of salt rock is composed of two types of evaporite rock sequences vertically stacked, with a single sequence thickness of 5.7–18.0 m and a single layer salt rock thickness of 1.0–12.0 m. Due to the influence of arid climate, multi-tectonic deep-sags, and lake level fluctuations, the distribution of salt rocks has the characteristics of multi-periods and multi-centers, the "bull's-eye"-shaped salt dome core centered on the Xinwei-12 well area was located within the Liutun Sag during the early Es3x period; the sedimentation center of Liutun Sag is consistent with that of its structural subsidence, which belonging to the coincidence matching relationship. In most cases, there is a spatial matching relationship between the center of salt rock and the center of structural subsidence or sedimentation. The center of salt rock does not represent deep or shallow water. Research suggests that the central uplift of the Lower Sha3 and even earlier Upper Sha4 periods in the Dongpu Depression belongs to underwater uplift and shallow water sedimentation, without forming a sedimentary center; there were both deep-water salt formation and shallow-water salt formation, coexisting

收稿日期: 2025-07-30

第一作者简介: 彭勇民(1965—), 男, 博士, 教授级高工, 从事沉积储层与成岩作用、常规与非常规油气勘探开发。地址: 北京市昌平区沙河镇百沙路 197 号中国石化石油勘探开发研究院非常规研究所, 邮政编码: 102206。E-mail: pengym.syky@sinopec.com

基金项目: 中国石化攻关项目“东濮凹陷薄互层页岩油地质评价与关键技术”(023227); 国家自然科学基金联合重大项目“陆相断陷湖盆页岩油富集机理与立体开发方法”(U24B6002)。

in the same basin. It is innovatively proposed that a complex salt formation model of deep-basin and deep-water, shallow-platform and shallow-water in the Dongpu Depression, This breaks the previous understanding of the single shallow-water and single deep-water salt rock genesis, solves the spatiotemporal matching between salt rocks and deep-water facies, therefore provides a basis for avoiding salt (for drilling and completion projects and finding deep water in shale oil exploration).

Keywords: Thick and massive salt rocks; distribution rule; Deep-basin and deep-water; Shallow-platform shallow-water; Dongpu depression

国外越来越多的报道表明膏岩或盐岩在萨布哈深海环境均可发育,纹层或韵律交替状硬石膏在海相中的深水盆地中心常见^[1]。现今一些大型内陆盐湖和干盐湖具备洼陷中心成盐的典型特征,存在与古代海相洼陷中心成盐类似的相带或相的样式^[1]。透镜状、球状毫米级韵律交替的薄层石膏岩相以及内含化石、水流波痕表明:小的透镜状石膏薄层在湖水稀释期形成,沉淀、降落于湖泊区的深湖环境^[2-3];重力流成因的膏盐岩也常见于中部湖区的浅湖斜坡至深湖^[3]。地中海发育的中厚层状石膏浊积岩/石膏角砾岩岩相是由深海一半深海斜坡带的石膏发生软沉积变形而产生的^[4],浊积构造表现为石膏薄层的不连续、波状、扭曲、肠状结构以及层内微滑塌/破裂。

在中国,陆相盐湖对常规油气藏、新型页岩油藏具有重要影响,尤其是中国东部地区的渤海湾盆地东濮凹陷、江汉盆地潜江凹陷、渤海湾盆地东营凹陷盐岩沉积等。关于盐岩成因存在显著的分歧,有学者认为“深水成盐”^[5-16],也有学者认为“浅水成盐”^[17-22]。

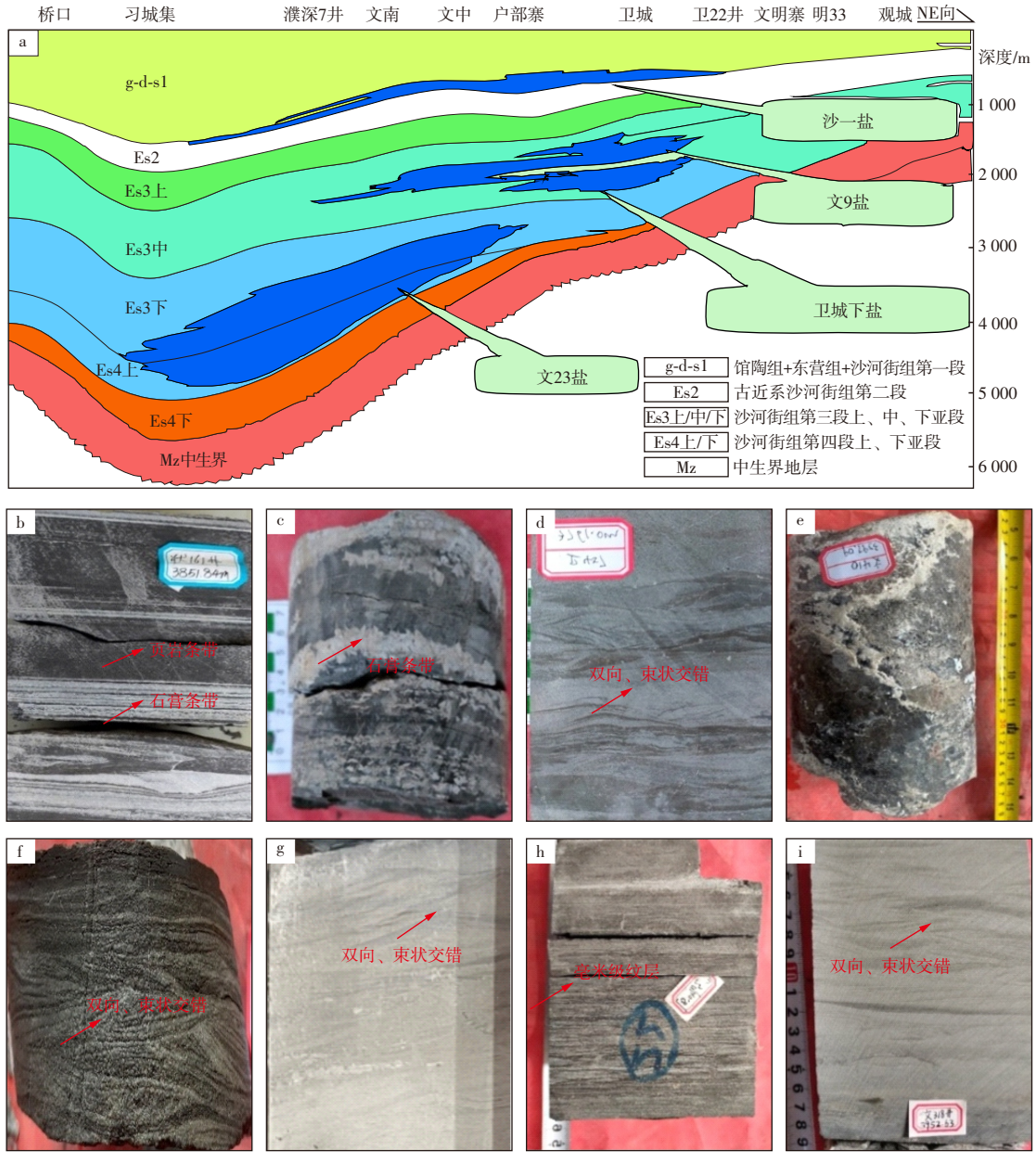
东濮断陷勘探面积约 5 300 km²,呈“两洼一隆一斜坡”格局,即西洼、东洼、中央隆起和西斜坡或西缓坡。“十三五”全国油气资源评价结果显示东濮断陷页岩油为 7.29×10⁸ t,具有很大的勘探潜力。近年来,随着东濮凹陷濮 7601H 井、文东 1 井压裂试油超过 10 t/d,与页岩油紧密相关的盐岩成因研究受到关注和重视。针对东濮厚层盐岩的深水、浅水成因争论问题,认为“深水成盐”的学者通过现代盐湖和东濮古代盐岩“深水成盐”识别标志提出东濮属于深盆深水成因的观点^[5]。也有学者认为东濮凹陷沙三段具有“高山深盆”的地貌景观,是深水盐湖,与盐岩共生的源岩有机碳含量一般大于 1%,有的甚至达到 3%~4%^[12]。通过包裹体方法,发现盐岩原始或沉积流体存在原始有机物,这证明了深水盐湖环境可以有大量的生物存在^[8]。认为“浅水成盐”的学者提出低水位期沉积盐岩、膏岩,发育低位三角洲与扇三角洲沉积,盐源为周边隆起的中、下奥陶统^[17]。采用 X 衍射矿物和氯同位素资料,浅水蒸发成盐过程中保持有足够的水深将为盐下有机质的保存提供便利^[18]。盐岩发育特征、分布规律、现代盐湖沉积类比研究以及东濮凹陷新的成盐模式为盐湖背景下页岩油勘探提供了依据^[23-25]。

1 厚层盐岩的结构性

东濮凹陷自下而上发育古近系沙河街组第四段上亚段(简称沙四上亚段)、沙河街组第三段下亚段(简称沙三下亚段)、沙河街组第三段中亚段(简称沙三中亚段)和沙河街组第一段(简称沙一段)。共 5 套厚层盐岩,分别为文 23 盐、沙三下亚段、卫城下盐、文 9 盐和沙一盐(图 1a)。

东濮凹陷中部的文留地区、北部的濮城和卫城地区沙三段纵向上盐岩夹泥岩与粉砂岩段的厚度约 1 000 m,平面上膏盐岩向四周依次过渡为薄层碳酸盐岩、暗色泥岩和粗碎屑岩^[17,22]。厚层盐岩纵向上由水体变深、水体变浅 2 类蒸发岩序列反复叠置而成,单个序列厚度介于 5.7~18.0 m,单层盐岩厚度介于 1.0~12.0 m^[17]。

根据岩心观察、录井资料和测井相分析,东濮中央隆起带中部的濮深 7 井沙四上亚段上部 1 砂组 4 361.5~5 458.0 m 井段为大套盐岩、膏岩与深灰色泥岩互层段(图 1),单层盐岩小计 100 个,累计厚度为 512 m。沙四上亚段上部 1 砂组顶部 4 360~4 380 m 井段自下向上发育盐岩至膏质页岩的水体变深序列(图 2a),属于干旱环境、湖盆扩张或湖平面上升形成的,从测井相看,伽马(GR)、声波(DT)测井曲线组合型式为向上的正旋回,其单个盐岩属 GR 或 DT 高值的箱型样式,多个盐岩与页岩夹层构成 GR 或 DT 相对高值锯齿状箱型样式,单个盐岩在感应电导率(CLLD)曲线样式表现为突变、低值的尖指状或箱型,多个盐岩 CLLD 曲线样式与 GR 曲线样式相似。相反,沙四上亚段下部 4 砂组 5 440~5 470 m 从下而上可见灰质页岩到盐岩岩性突变的水体变浅序列(图 2b),是干旱环境、湖盆收缩或湖平面下降造成的,从测井相看,GR 或 DT 测井曲线组合型式为向上的正旋回,其单个盐岩属 GR 或 DT 高值箱型样式,多个盐岩与页岩夹层构成 GR 或 DT 相对高值锯齿状箱型样式,单个盐岩在 CLLD 曲线样式表现为突变、低值的尖指状或箱型,多个盐岩 CLLD 曲线样式与 GR 曲线样式相似。另外,4 150~4 227 m 井段为红层、泥裂与灰-黑色页岩交互,其顶部单层厚约 5 m 的盐岩与红-黑色页岩共生,为浅水与深水沉积互层。



注:a为厚层盐岩纵向上发育情况,东濮凹陷;b为韵律层理膏质泥岩,3 851.84 m,濮161井沙三下亚段2砂组;c为膏质页岩,含厘米级石膏条带,深度3 772.2 m,卫457井沙三下亚段8砂组;d为浪成沙纹交错层理泥质粉砂岩,深度3 761.0 m,卫457井沙三下亚段8砂组;e为盐岩,累计厚度10 m,深度3 597.1 m,文410井沙三中亚段5砂组;f为浪成沙纹交错层理粉砂岩,深度3 552.4 m,文410井沙三中亚段4砂组;g为浪成沙纹交错层理粉砂岩,深度3 689.8 m,文东1井沙三中亚段5砂组;h为纹层状云质泥岩,深度3 940.87 m,文318井沙三中亚段4砂组;i为浪成沙纹交错层理粉砂岩,深度3 952.63 m,文318井沙三中亚段5砂组。

图1 渤海湾盆地东濮凹陷盐岩发育及其浪成沙纹交错层理砂岩照片

Fig. 1 Salt Rock Development and Wave Formed Cross Layered Sandstone Photos in Dongpu Depression

在中央隆起带北部,濮161井沙三下亚段2砂组3 845~3 850 m岩心段可见浪成沙纹交错层理从泥质粉砂岩到含膏页岩再到灰色粉砂质页岩的向上水体变浅序列,多个序列反复叠置。单个序列厚度为5.7 m,石膏呈白色细—粉粒的纤维状晶体(图1b)。卫457井沙三下亚段8砂组下部3 705.7~3 772.8 m岩心段形成从中细砂岩—粉砂岩到粉砂质页岩再到含膏页岩的向上变细变浅序列,单个序列厚度为5.1 m,厘米级石膏条带由白色粗粒

的纤维状、雪花状晶体构成(图1c)。在卫457井沙三下亚段8砂组3 761.0 m与沙四上亚段1砂组3 764.14 m中,与石膏沉积共生的浪成沙纹交错层理泥质粉砂岩属于浅水滩坝沉积,不是三角洲砂体,其细层见双向流动特征,单个层系为束状或瓣状收敛,厚度小于3 cm,多个层系之间形成“人字形”(图1d中部),浪成沙纹交错层理的下部为波状层理而非槽状,为弱冲刷。

在柳屯洼陷东侧,文410井沙三中亚段5砂组的上部

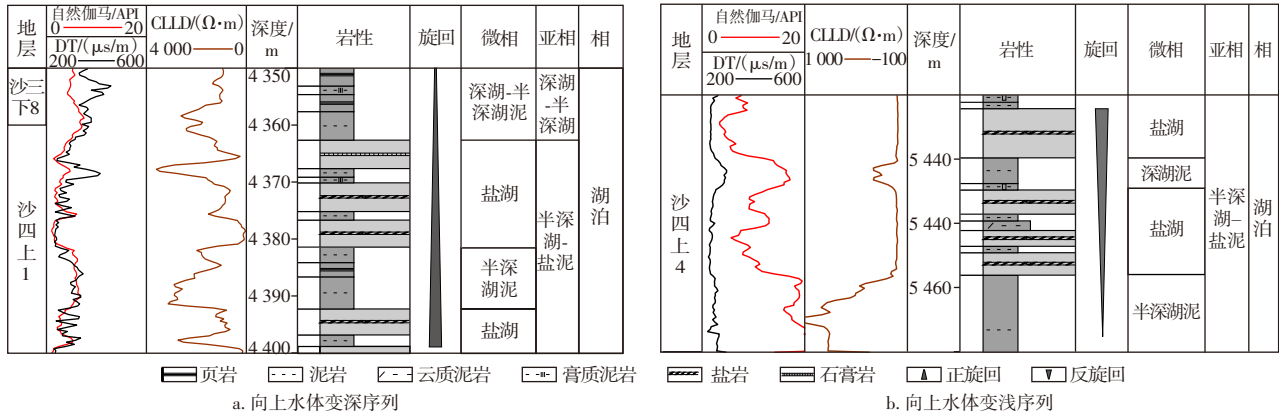


图2 渤海湾盆地东濮凹陷濮深7井盐岩发育序列

Fig. 2 Development sequence of salt rock in Well Pushen 7 in Dongpu Depression

3 585~3 599 m岩心段发育从盐岩到含膏页岩再到泥质白云岩岩性组合的向上水体变深序列,说明该序列是干旱环境、湖盆扩张或湖平面上升形成的,单层盐岩厚度介于1.85~3.17 m。然而,沙三中亚段5砂组的中部3 635~3 660 m井段(含部分岩心)构成从暗色灰质页岩到盐岩的向上水体变浅序列,单层盐岩厚度介于1.0~5.5 m,累计厚度10 m,盐岩为粗晶结构(图1e)。此外,沙三中4砂组的顶部从下而上可见从浪成沙纹交错层理粉砂岩(浅滩坝相,图1f)到粉砂质页岩再到灰色含膏页岩的水体变浅序列。

2024年已钻的文东1井沙三中亚段5砂组井深3 689.8 m、沙三下亚段7砂组井深4 456.6 m处均发现了浪成沙纹交错层理粉砂岩,并且在沙三中亚段3砂组见到膏质页岩、泥晶白云岩和灰绿色页岩互层,膏质页岩发育厚度介于0.6~11.0 cm的石膏条带,为白色泥粉晶石膏组成。再向南方的文318井未见膏盐岩,沙三中亚段4砂组在井深3 940.87 m处发育灰黑色纹层状云质泥岩。另外,纵向上邻近的沙三中5砂组3 952.63 m井深见到浪成沙纹交错层理粉砂岩,又出现了浅水与深水交替沉积。

沙三段还发育另一类向上变浅序列^[17,22],自下而上由暗色泥岩与薄层碳酸盐岩互层(湖平面较高、水深较深)到薄层膏岩或暗色泥岩夹薄层石膏即膏质泥岩(湖平面明显下降、水深较浅)再到厚度0.10~0.30 m盐岩(湖平面最低)构成。该序列与平面上膏盐岩呈牛眼状分布或与蒸发岩析出顺序一致。这一序列的特色是出现碳酸盐岩,盐岩层极薄且处于非盐岩中心位置。

东濮地区以海通集一桥口—白庙一线为界,具有北部发育盐岩、南部不发育盐岩的特殊现象^[7]。综上所述,东濮凹陷厚层盐岩是单个水体变深、水体变浅等蒸发岩序列反复叠置形成的,盐岩发育特征在不同时代、不同井区、中央隆起与洼陷的不同构造位置具有明显的差异性,这些井区可发育盐岩或仅膏质页岩,也可能发育无膏岩

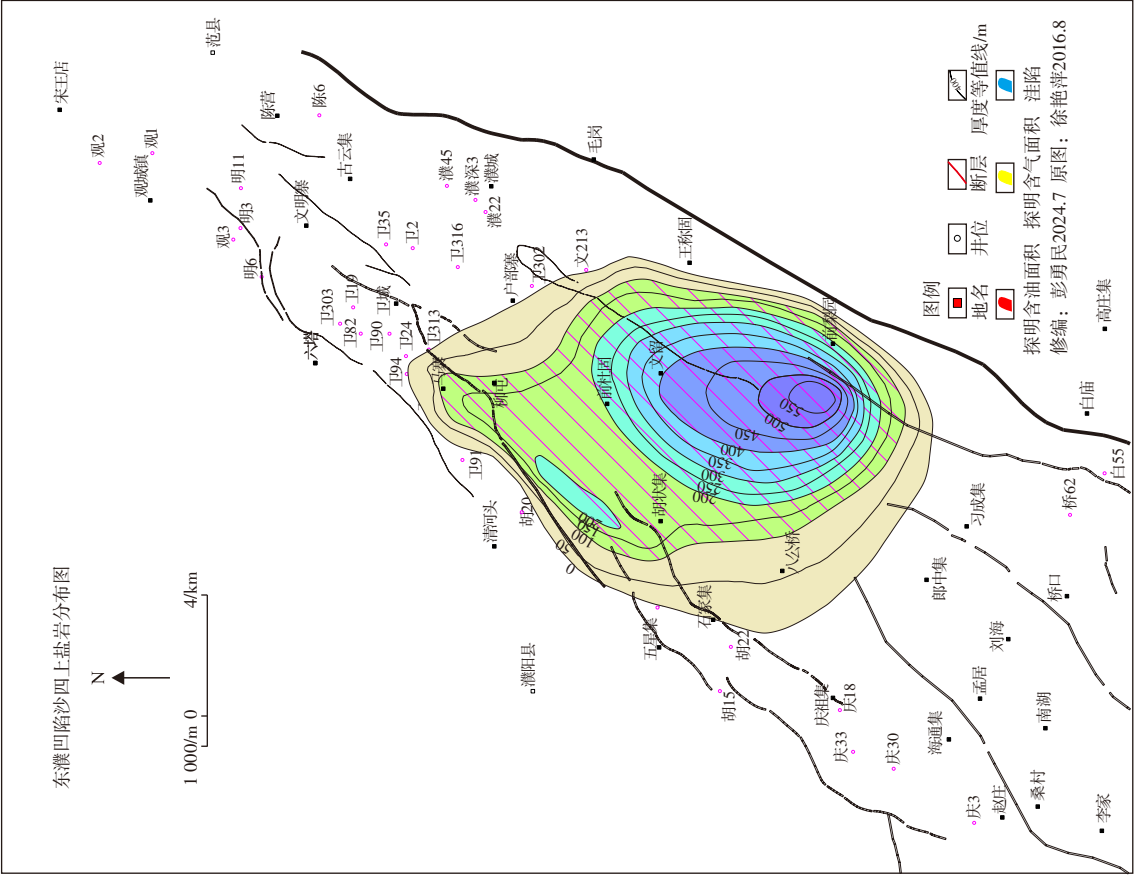
或无盐岩,并与浅水滩坝或深水富有机质页岩共生。

2 盐岩分布规律

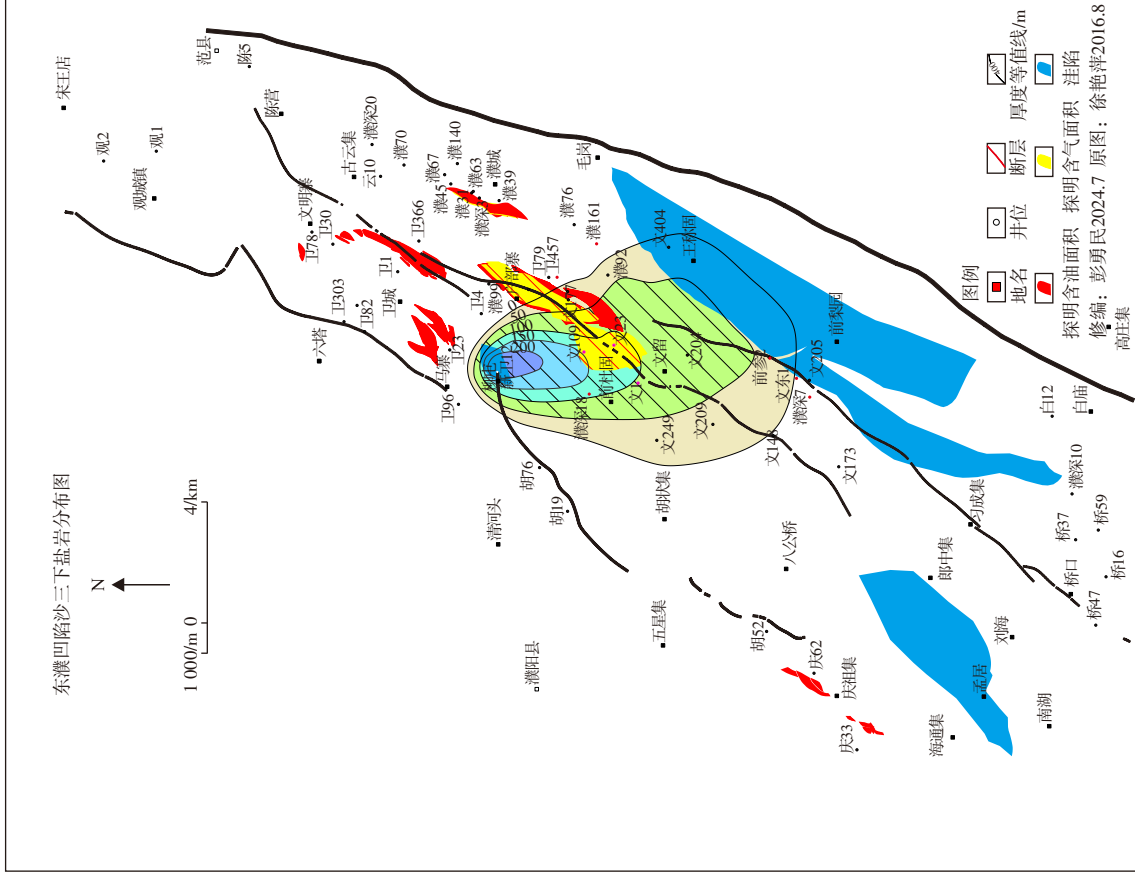
东濮凹陷独特的盐岩中心(即厚度最大)既与次洼(即构造沉降中心)、深水相(即水体最深或沉积中心)共生,又是常规油、页岩油的顶底板。盐岩分布具有“多期次、多中心”特点,多数情况下盐岩中心与构造沉降中心(即沉陷最深处)、沉积中心不重合或不一致。这3个中心在空间上发生分离或重合的匹配关系,是成盐模式重建的关键依据。

从图3可以看出,在沙四上亚段时期,盐岩主要分布于文留—胡状集地区,面积约450 km²,盐岩呈北东向展布,受东濮凹陷主构造方向控制。该时期的盐岩中心可见中央隆起—前梨园洼陷西侧、柳屯洼陷2个分支,并以前者为主(图3a)。其中,中央隆起—前梨园洼陷西侧盐岩分支占据中央隆起带大部分面积,以濮深7井区厚512 m的厚层盐岩为盐岩中心,濮深7井含盐剖面厚度为1 096.5 m。自南向北沿着濮深7井—前参2井—文23井一线分布于中央隆起,该分支的盐岩中心与前梨园洼陷沉降中心、前梨园洼陷沉积中心或深水相不重合。柳屯洼陷盐岩分支位于柳屯洼陷,呈北东向长条状分布,盐岩中心为新湖4井区,厚度大于200 m,其盐岩中心与柳屯洼陷沉降中心、柳屯洼陷沉积中心或深水相三者是重合的。

在沙三下亚段早期,盐岩分布略从南侧退缩,但盐岩中心向西北方向迁移,主要分布于柳屯—前杜固一带^[7,17,20-22],濮深7井区已无膏盐岩,面积缩小至280 km²。盐岩分布规律具有“偏心式牛眼状”特点,盐岩中心在柳屯洼陷新卫12井区,厚度约200 m(图3b),近南北向顺着前参2井—文204井—文23井—新卫12井一线分布于中央隆起、柳屯洼陷,该盐岩中心与柳屯洼陷沉降中心、柳屯洼陷沉积中心或深水相是一致的,另外,在

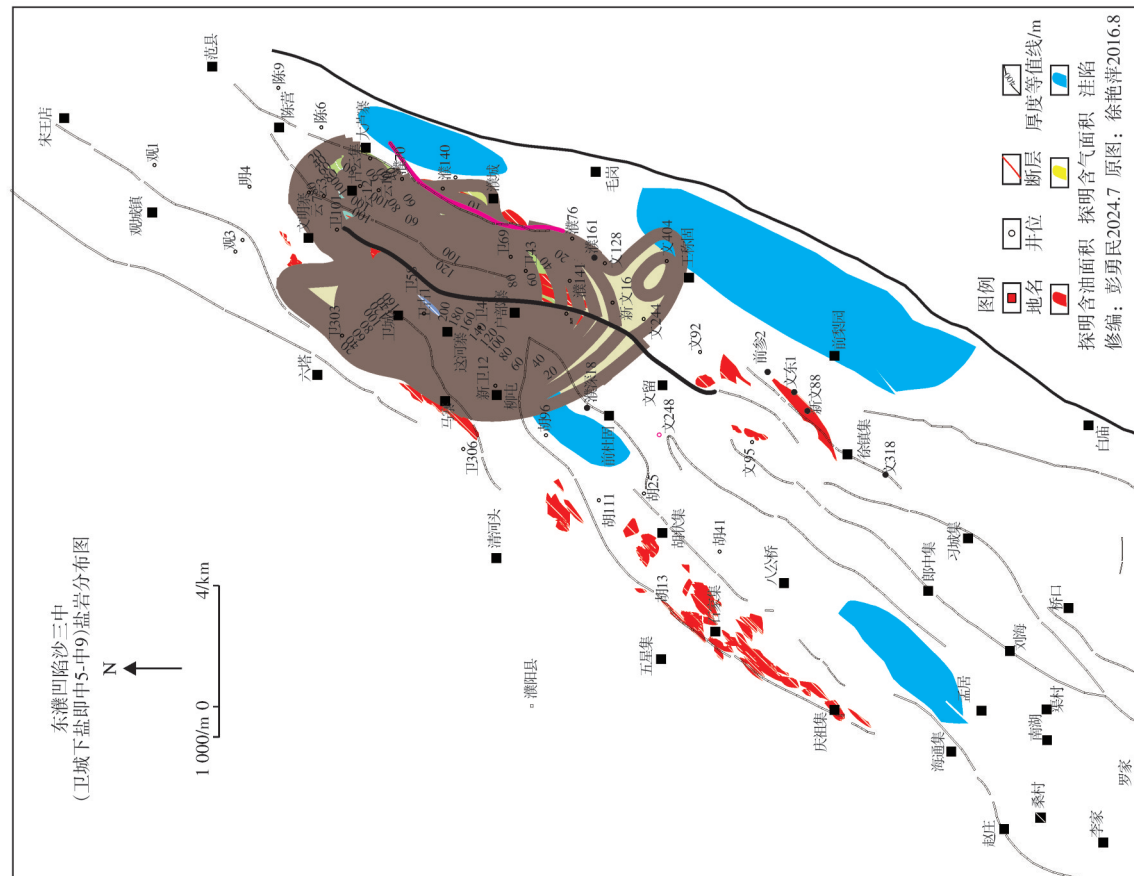


a. 沙四上亚段盐岩分布

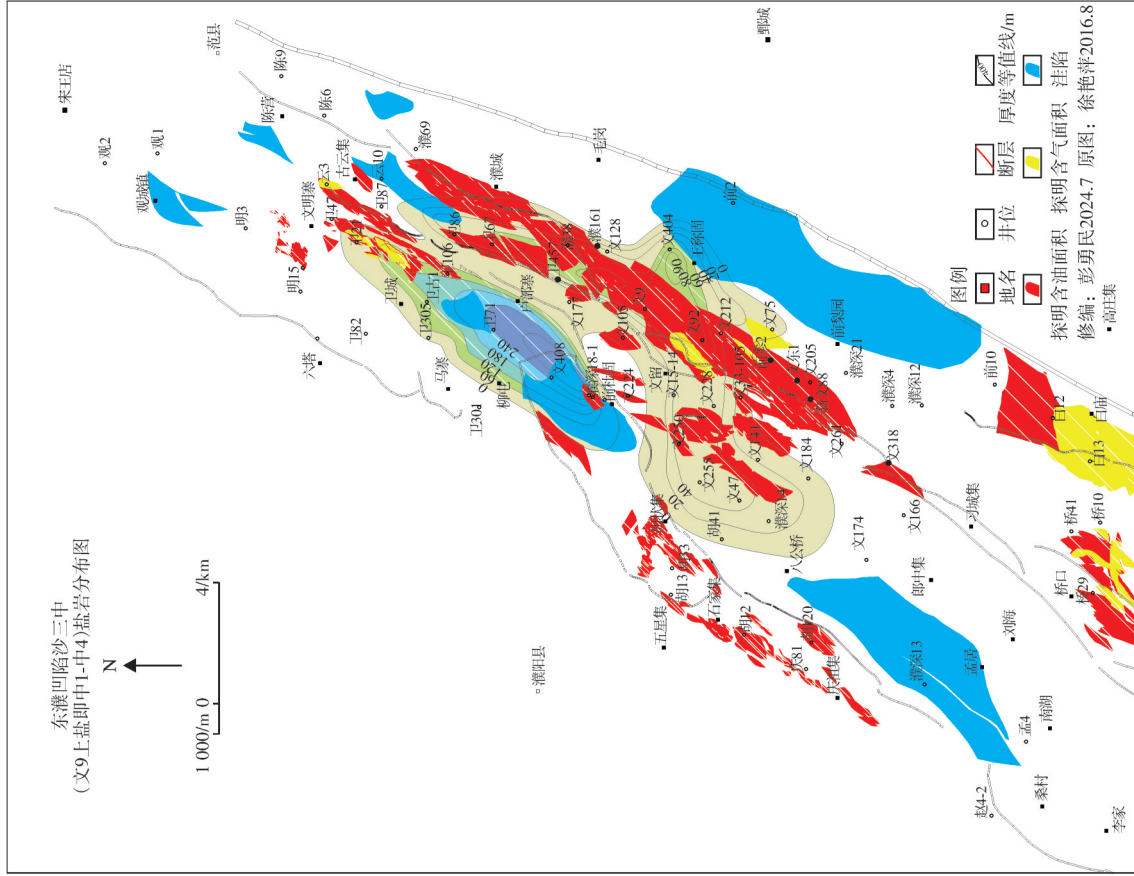


b. 沙三下亚段盐岩分布

图3 东濮凹陷沙四上与沙三下亚段盐岩分布
Fig. 3 Distribution of salt rocks in the lower third and upper fourth Member and of Shahejie Formation in Dongpu Depression



a. 中5—中9砂组盐岩分布



b. 中1—中4砂组盐岩分布

图4 东濮凹陷沙三中亚段盐岩分布
Fig. 4 Distribution of salt rocks in the middle of Shahejie Formation third Member in Dongpu Depression

前梨园洼陷西侧的前参2井、文404井也发育盐岩。从图3b上看出,这时期厚层盐岩盖层对户部寨—文留一带的油气田成藏发挥了重要作用,也将对页岩油钻完井工程、勘探开发具有重要影响。

在沙三中亚段早期,盐岩分布继续向西北方向扩张和迁移,主要分布在马寨—卫城地区^[7,17,20-22],面积扩大至400 km²。盐岩分布规律具有2个分支的特点,一分支盐岩中心在卫城洼陷深凹区,卫古1井区最厚达200 m(图4a),在马寨洼陷、卫城洼陷呈“牛眼”连片,北东向展布;另一分支盐岩中心在古云集洼陷,云12井区最厚达100 m。这2个分支的盐岩中心均与各自的洼陷沉降中心、沉积中心或深水相重合。此外,西南侧盐岩顺着中央隆起的前参2井—文204井—卫79井一线分布。从图4a可以看出,这时期厚层盐岩对户部寨—卫城一带的4个油田起到了重要封盖作用。

在沙三中时期晚期,盐岩分布开始从北侧退缩,向西南方向扩张,呈北东向主要分布在柳屯、八公集—文留、王称固地区^[7,17,20-22],面积扩大至530 km²。该时期盐岩分布规律具有“三支”特点,第一分支盐岩中心在柳屯洼陷—马寨洼陷连片,具有“牛眼”分布模式,文408井区最厚达200 m(图4b),该盐岩中心与洼陷沉降中心、沉积中心或深水相重合。第二分支盐岩中心在八公桥—文留一带,位于海通集洼陷的东北侧,文248井最厚达60 m。这2个分支的盐岩中心与海通集洼陷的沉降中心(图4b)、沉积中心或深水相是分离或不重合的。第三分支在王称固地区,位于前梨园洼陷的西北侧,文404井最厚达90 m,该盐岩中心与前梨园洼陷沉降中心(图4b)、沉积中心或深水相也是重合的分离或不重合的。从图4b上看出,这时期厚层盐岩对中央隆带丰富的油田与气田起到了决定性封闭作用。

东濮凹陷盐岩中心不是随单个构造或次洼中心迁移,而是受多个构造次洼的影响,产生多期次、多中心的结果。盐岩中心不能反映水体深或浅,也不一定处于沉积中心或深水相,并且沉积中心或深水相也不一定是盐岩中心,除非全部蒸发干涸。综上所述,水体深或浅是由沉积相识别标志或古生物法等来判断,不是由盐岩中心来确定。

3 厚层盐岩成盐模式及页岩油勘探方向

根据沉积学、死海现代盐岩,结合东濮凹陷盐岩中心、构造沉降中心、沉积中心三者空间匹配关系,探讨东濮是“深盆深水”“深盆浅水”还是“浅盆浅水”成盐模式,为页岩油勘探指明方向。

3.1 东濮凹陷沉积学证据

与现今青海湖底“六洼五隆”格局相似^[26],东濮凹陷是典型盐湖盆地,因受多个构造次洼的影响,深水沉积相被中央隆起浅水沉积隔开^[21-22],其分割性成为一大特色。

从图1可以看出,位于中央隆起东侧和西侧、北部与中部的濮161、文410、文248、卫457、文东1、文318等多口井在不同层位(沙三中亚段4砂组、沙三中亚段5砂组、沙三下亚段2砂组、沙三下亚段3砂组、沙三下亚段7砂组、沙三下亚段8砂组、沙四上亚段1砂组)均发现了浪成沙纹交错层理的沉积相“硬”标志。由于被西洼、东洼截留或捕获来自东侧陡坡带、西侧斜坡带方向的河流、三角洲或扇三角洲陆源砂,以及北侧、南侧的三角洲砂^[26],因此,在中央隆起带北部卫457井区、濮161井区向南至文318井区,浪成沙纹交错层理的砂岩属于浅水、受双向湖泊波浪触及的浅湖滩坝沉积或浅水滩坝砂体,非三角洲沉积。东濮凹陷中央隆起的卫457井自沙四上亚段1砂组开始就发育典型的浪成沙纹交错层理与浅水滩坝沉积,以及石膏条带与红层,属于水下隆起,此外,文东1井、文318井纵向上以厚度30 m间隔频繁交替出现半深湖与浅水滩坝沉积。

为了研究导致这些独特现象的原因,根据陆相层序地层学理论和坡折带概念,建立了深水—浅水沉积交替发育模式(图5),可以较好地解释频繁交替的动态变化现象。在湖平面1的湖退时期,坡折带位于斜坡底形即半深湖古地理中,该时期的浅水1或滩坝沉积(包括浅水滩坝、膏质页岩和红层)向半深湖进积并占据半深湖上部位置,半深湖下倾方向和深湖(湖盆底形)对应为深水1或深水泥沉积;在湖平面2的湖进时期,坡折带由浅水1变为深水2的泥沉积,浅水2滩坝沉积向水下的中央隆起方向发生退积,对应的深水2的泥沉积占据半深湖上部位置和半深湖下倾方向和深湖;在湖平面3的湖进时期,重复湖平面1的情况。因此,文318井等纵向上就出现频繁交替的深水—浅水沉积(井位置见图4b),由于坡折带

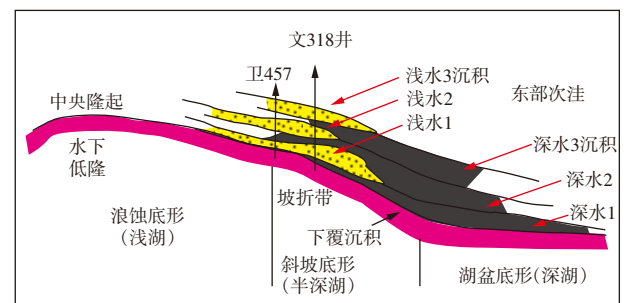


图5 基于坡折带的深水—浅水沉积交替发育模式
Fig. 5 Alternation model of deep-water and shallow-water sedimentary based on slope break zone

处的湖平面快速升降、强烈蒸发,产生了深水—浅水高频旋回页岩甚至盐岩沉积。根据该沉积模式,可以预测向东进入次洼或洼陷区深水相页岩厚度增加,为页岩油勘探优选区^[27]。

中央隆起带中部的砂岩成因存在较大的争论,纪友亮等^[22]认为在文留中部地区单层厚度介于0.2~5.0 m的较薄砂岩是形成牵引流的三角洲砂体,这些砂岩过去被认为是深水重力流砂体,与上文浅水滩坝砂的认识也存在明显的差异。另外,胡7-18井井深2 340 m处的块状砂岩是受高水位期三角洲或滨湖环境缓慢沉积而形成,在中央隆起带南部的桥25井井深4 696 m、马15井井深3 250 m处泥岩撕裂屑是经过浅水湖浪流再沉积而形成^[22]。

综上所述,在沙三下亚段甚至更早的沙四上亚段1时期,东濮凹陷中央隆起属于水下隆起与浅水沉积,说明在中央隆起带无深水相也没有形成沉积中心,这得到了沉积学证据的支撑。

3.2 现今死海的盐岩沉积及启示

现今死海湖泊具有湖盆中心典型的“深盆深水”、湖盆边缘“浅盆浅水”的盐岩成因特征^[5],并且二者同时共存,这说明发生“满湖”的盐岩沉积类似于古代海域内碳酸盐岩的“满海”沉积。

20世纪60至70年代,死海南北长为80 km,东西宽为18 km,面积超过1 000 km²,湖面海拔为-400 m,最大深度达400 m^[27-28]。研究表明,在第三纪上新世时期(3.7 Ma,包括早更新世)死海仍是与古地中海相联通的典型泻湖,更新世时期才完全与海水隔绝并变成了内陆盐湖^[27-28]。死海的地表露头剖面揭示了厚度达2 500 m以上的盐岩夹少量石膏层沉积,最厚可达5 000~7 000 m^[27]。根据1960年左右死海南岸钻探结果,在曾经的湖盆中心晚更新世地层中发现盐岩和高矿化度卤水,但无石膏,其化学组成与现代死海相似^[27]。1975年,死海上层水体的盐度超过下层;1978年,死海上、下两层水体开始发生混合,这是千百年来死海水体盐度第一次变得上、下均匀,含盐量约为33.7%^[28]。1989年至今,死海含盐量23%~30%,超咸,是现今四大洋(含盐量为3.5%)的8倍,死海湖面以1.2 m/a的速度下降而变浅24 m,全湖仍在沉淀盐岩。

1990年至今,死海垂向上表层卤水(远超咸水)、底部卤水均已成为高盐度氯化钠过饱和阶段的终极盐湖^[29],而非碳酸盐或石膏饱和阶段。然而,如果顶部的卤水强烈不饱和,当处于湖平面上升期,在湖底将出现蒸发岩的沉积间断或溶解^[29]。因此,死海湖的盐度分层是显著的,这与许多现代深水湖泊垂向上水体分层,包括温

度、盐度、密度、Eh值(氧化还原电位)等的普遍现象是一样的。

2014年左右,死海地区经历了气候异常干燥、湖平面快速下降、盐度急剧上升的过程,深水洼陷带开始出现分层卤水析盐的现象,为“深水成盐”的机理分析提供了良好的研究实例^[5,30]。深水洼陷带为典型的“深盆深水”成盐^[5],这与2014年深海钻探计划(DREAM计划)所揭示的洼陷带深水相纯净均匀、厚层岩盐为主夹少量薄层的黏土岩相吻合。

2019年死海的底形可看到“三洼二隆”的构造格局,类似于现今中国青海湖“多洼多隆”格局^[27],目前青海湖水深为30 m^[18]。死海南侧为浅盆、北侧为深盆且洼-隆相间,整个死海湖的盐岩沉积发生在洼陷深水相、隆起或滨岸浅水区,死海南岸的滨岸正在堆积厚度介于0.5~3.0 m的粗粒盐岩层。死海巨厚盐岩也是经历多个蒸发岩序列、多级次成盐旋回而形成的^[5]。

死海湖给东濮厚层盐岩的成因带来启示:一是盐岩沉积或湖水盐度处于哪个阶段(包含碳酸盐饱和阶段、石膏饱和阶段、氯化钠饱和阶段);二是“深盆深水”和“浅盆浅水”的盐岩能否共存;三是“满湖”盐岩沉积的状况是否发生,即滨岸、浅湖、半深湖、深湖任何环境均有膏盐岩。

3.3 盐岩中心与构造-沉积中心的空间匹配

东濮凹陷盐岩具有“多中心”的特点。在沙四上亚段时期,以濮深7井区为核心的盐岩中心位于中央隆起,与东部前梨园洼陷或西部海通洼陷的构造沉降中心、沉积中心或深水相不一致,空间上是分离的。柳屯洼陷是以新湖4井区为核心的另一个盐岩中心,与柳屯洼陷的沉降中心、沉积中心发生重合,在空间上东濮凹陷盐岩中心、洼陷沉降中心、沉积中心是一致的。在沙三下亚段早期,以新卫12井区为核心的“牛眼状”盐岩中心处于柳屯洼陷,与柳屯洼陷的沉降中心、沉积中心是一致的。在沙三中亚段早期,第一个以卫古1井区为核心的“牛眼状”盐岩中心位于卫城洼陷构造沉降中心与沉积深水区;第二个以云12井区为核心的盐岩中心与古云集洼陷的沉降中心、沉积中心相重合。在沙三中亚段晚期,第一个以文408井区为核心的“牛眼状”盐岩中心与柳屯洼陷—马寨洼陷的沉降中心、沉积中心是重合的;第二个以文248井为核心的盐岩中心位于八公集—文留一带,与海通集洼陷的沉降中心、沉积中心是分离或不重合的;第三个以文404井为核心的盐岩中心位于王称固地区,与前梨园洼陷沉降中心、沉积中心也是分离的。综上所述,东濮凹陷盐岩中心与洼陷沉降中心及沉积中心既有重合一致也有分离的,但这3个中心在柳屯洼陷一直都是重合的,发育了很厚的盐岩,他们的空间匹配关系为成盐模式的重

建提供了关键依据。

3.4 成盐模式讨论

成盐模式涉及湖平面变化、卤水分层、湖盆底形和成盐位置的动态沉积模式等因素^[31],由于现代盐湖几乎都位于蒸发作用强烈的干旱地区,古气候也成为了关键因素^[32]。

在国外,1969年SCHMALZ最早提出“深水成盐”模式,从深水、深盆地貌和巨大的可容空间角度,并运用了卤水分层的概念及盐岩析出机理解释了地中海的形成时间短(小于1 Ma),以及厚度很深的古代海相领域盐岩的成因是由于洼陷带的深水环境。但是,HSU等^[33]根据死海湖边缘的钻探结果提出,地处内陆的死海深处主要包含文石和石膏沉积为主的浅水而非深水成因标志,以及不发育盐岩;另外,有学者根据地中海盆缘或浅水区的钻井资料,推测地中海的巨大岩盐当时也为“深盆浅水”成盐的干缩海盆,建立了“干化深盆说”。“深盆深水”和“深盆浅水”这2种观点受争议的根本原因在于2014年之前,地中海洼陷区缺少连续的岩心资料^[34],直到2014年,DREAM计划研究结果表明,地中海洼陷带以纯净均匀的古代厚层岩盐为主,夹少量薄层的黏土岩,具有明显的深水沉积特征^[35-36]。因此可以得出结论:地中海盆缘为“浅水成盐”,洼陷带为“深水成盐”,且二者共存,其古代膏盐岩具有“牛眼式”的分布规律。REODIVG^[37]依据成盐位置与洼陷中心的关系,海相成盐可分为“盆地边缘成盐”与“洼陷中心成盐”。

在中国,“高山深盆”的现代内陆盐湖,其多数成盐过程也发生于浅水环境^[38]。“高山深盆说”中的深盆特指周围的物源区与岩盐沉积区的地貌高差很大,并不是指湖平面至湖底的高差或可容纳的大空间。东营凹陷下第三系沙四段“高山深盆”堆积了3套厚层或薄层盐岩的深水成因蒸发岩^[39],膏盐岩“牛眼状”分布,在民丰洼陷及紧邻的中央隆起带、胜坨断块区形成厚度超过1 000 m的盐岩段。向南牛庄地区为膏岩沉积,再向南纯化镇—王家岗一带有碳酸盐岩沉积^[13]。潜江凹陷西北部王场构造3口井岩心表明,盐层厚度超过1 800 m的古近系潜江组盐间段是常年性半深水—深水为主的分层盐湖,自下而上分为微咸水湖、半咸水湖、咸水湖和盐湖^[15],盐间段发育背景沉积纹层状暗色泥岩,白云岩与厚层状盐岩,以及无水芒硝岩(厚度几米至几十米的韵律性互层且无膏岩);王80-2井潜四段在盐度相对淡化的盐间段见到深水陆源碎屑浊积砂岩^[15]。

因此,“深盆”未必存在“深水”,而“深水”必然处于“深盆”。另外,具有“深水成盐”的盆地一般在盆缘又存在“浅水成盐”^[15]。

1985年,研究者在东濮凹陷提出了“深水成盐”的模式^[6],其膏盐岩发育段内的页岩毫米级纹层十分发育,与深水伴生的页岩有机质更富集,TOC分别介于0.97%~4.40%^[11]和2%~55%^[13]。东濮凹陷“浅水成盐”^[17-18,20,22]在盆地中央形成深盆浅水成因蒸发岩段中的高水位期深水相暗色生油岩,与低位期膏盐岩和三角洲砂体密切共生的薄互层^[22]。岩盐层系不一定形成于低位期^[17,22],也可产生于高水位期^[5]甚至湖侵期,与碎屑岩、碳酸盐岩和硅质岩等层系相似。

综上所述,东濮凹陷既有“深水成盐”又有“浅水成盐”,二者同盆共存,并且研究者创新性提出东濮凹陷“深盆深水、浅平台浅水”的复杂成盐模式(图6),打破了之前的单一浅水、单一深水盐岩成因认识。

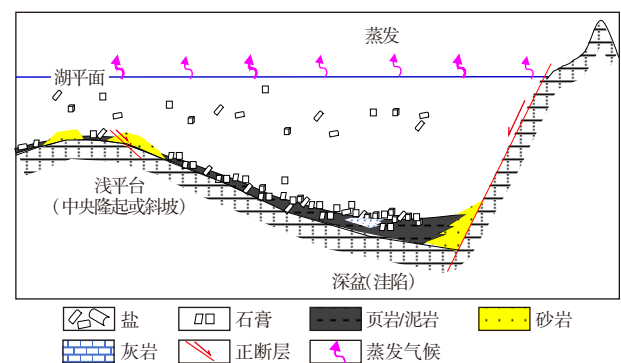


图6 “深盆深水、浅平台浅水”复杂成盐模式

Fig. 6 Complex salt formation model of deep-basin and deep-water, shallow-platform and shallow-water

东濮凹陷“深水成盐”模式以柳屯洼陷为例,见图6右侧的深盆(洼陷)。从沉积方面分析,自沙四上亚段1时期以来,柳屯洼陷中心具有深水相与厚层盐岩沉积,其西侧的文410井向上变深或变浅盐岩序列(图1),属于洼陷边缘至半深湖相的过渡带,或处于半深湖古地理背景的上倾方向(图5),形成了深水相灰黑色页岩与浅水滩坝交替沉积。从成盐位置或三中心空间匹配方面分析,柳屯地区的盐岩中心与该洼陷沉降中心、沉积中心是重合或一致的(图3b、图4、图7a),符合深盆、深水的成盐特征,类似于古代的地中海、现今死海的成盐模式^[32-33,36]。图7a的右侧为东向,可以看出新卫12井位于柳屯洼陷沉降中心,钻遇沙三下亚段底部的2个强同相轴盐岩沉积,在文古4井被断掉而缺失。沙三中亚段底部的新卫12井为4个强同相轴的盐岩,厚度增加,其中沙三中亚段4砂组底部的新卫12井为3个强同相轴的盐岩,另外,柳屯洼陷边缘的卫341井则为强同相轴的盐岩,厚度减薄明显。从盐岩主控因素方面分析,柳屯洼陷四周很少受到三角洲淡水注入和浅湖滩坝砂体的侵扰,盐岩明显呈“牛眼状”、对称分布。受干旱气候、强烈蒸发和湖平面升降变

化的影响,柳屯洼陷的湖水盐度增加,发生垂向分层,并且分别经历了 CaCO_3 、 CaSO_4 、 NaCl 的饱和阶段,从高盐度湖水中依次沉淀了灰岩、膏岩和盐岩。由此可以认为柳屯洼陷中心为“深水成盐”、边缘存在“浅水成盐”。

东濮凹陷“浅平台浅水成盐”模式以中央隆起、前梨园洼陷西侧为例,见图6左侧的浅平台(中央隆起或斜坡)。在沉积学上,自沙三下亚段时期开始,北东向展布、狭窄而条带状的中央隆起属于水下隆起与浅水沉积,水下隆起没有形成沉积中心,并具有持续、长期的继承性。中央隆起具有大量的钻探和丰富的岩心资料,濮161、卫457、文东1、文318等井均发育浅水滩坝相砂岩沉积。从成盐位置角度分析,偏西南的八公桥—文留一带文248井区、偏北的前梨园洼陷西北侧文404井区为核心的盐岩中心均在中央隆起上,分别与西侧海通集洼陷、东侧的前梨园洼陷的沉降中心和沉积中心或深水相是分离的,

这说明盐岩中心是在浅水平台上堆积的,不是深水相,也不占据深盆的位置(图7b)。图7b的右侧为东向,可见文203井位于中央隆起带,文404井刚进入前梨园洼陷的边部,二者都不是该洼陷沉降中心。在沙三下亚段底部,文203井钻遇4个强同相轴盐岩沉积,文404井未钻穿,但在其下部见到3个强同相轴盐岩且比文203井强同相轴盐岩厚;在沙三中亚段底部,这2口井均为2个强同相轴盐岩,厚度减薄明显;在沙三中亚段4砂组底部,这2口井均为强同相轴的盐岩,厚度更薄。从盐岩主控因素看,248井区、文404井区厚盐岩四周未受到三角洲淡水注入,仅受浅湖滩坝砂体的侵扰,盐岩分布不具“牛眼状”、不对称,但在足够干旱、一定水深条件下,该中央隆起上的湖水盐度增加至 NaCl 饱和阶段,持续、重复周期性形成了厚层盐岩沉积。在“浅平台浅水成盐”的同时,该厚层盐岩沉积与柳屯洼陷的“深水成盐”是同盆共存的。

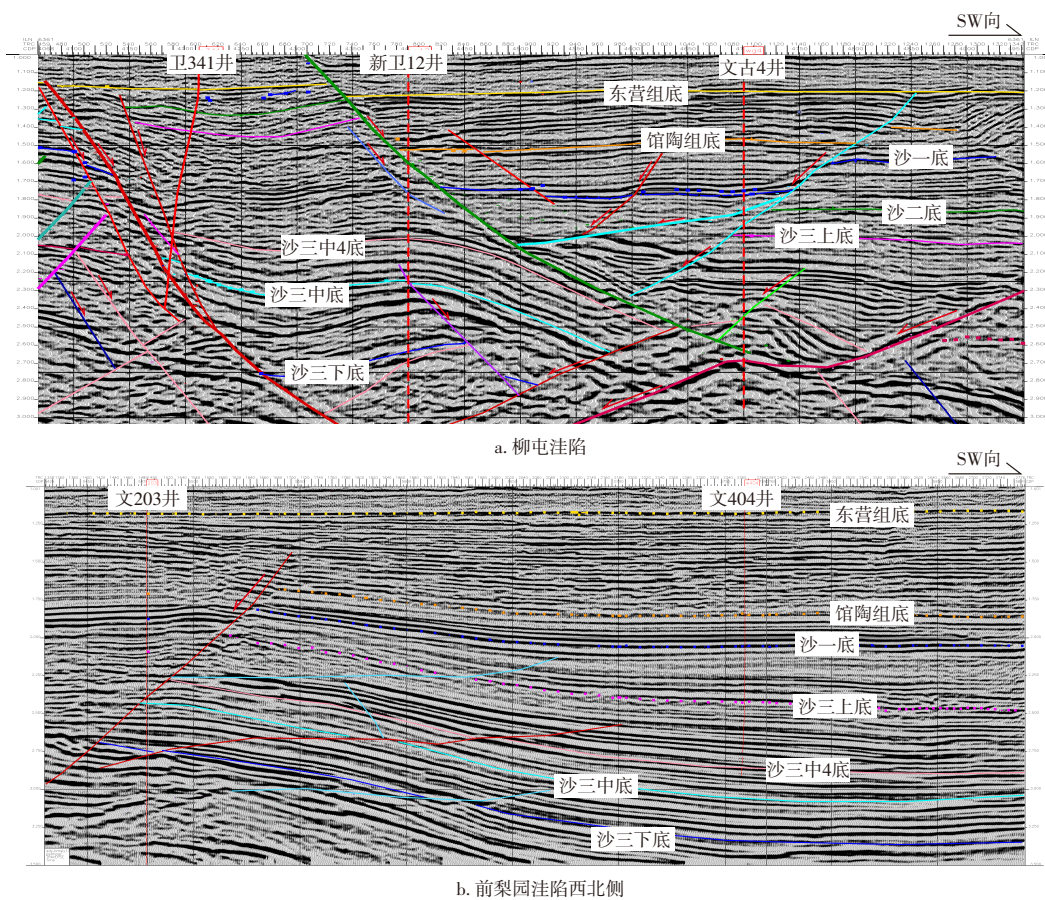


图7 地震剖面展示的深盆、浅平台盐岩分布

Fig. 7 Seismic profile showing the distribution of deep basin and shallow platform salt rocks r

从页岩油勘探角度分析,东濮凹陷沙三段共计6套页岩组合(沙三中亚段4砂组、8砂组,沙三下亚段1-2、4、6、8砂组),是页岩油未来的主力领域。该创新性的复杂成盐模式解决了东濮凹陷沙三段深水成盐与深水相的时空匹配,根据新认识和“避盐(针对水平井)、找深水”的

思路,确定了页岩油勘探方向。首先,对沙三中亚段4砂组,结合深水沉积、已有的测井评价与地震预测结果,并根据页岩厚度、TOC、镜质体反射率(R_0)等参数圈定页岩油有利区。从优质页岩厚度(TOC大于1%)方面分析,前梨园洼陷的页岩厚度(TOC大于1.5%)超过25 m;从TOC

参数方面分析,该洼陷 TOC 相对高, TOC 大于 1.5%;从 R_0 参数方面分析,该洼陷 R_0 也相对高, R_0 大于 1.3% 甚至达到 2.0%。并且,该洼陷属于半深湖—深湖相,为纹层状富碳灰质页岩。通过上述参数可以评价出前梨园洼陷为页岩油有利区之一,其面积为 131 km²、资源量 3 810×10⁴ t,为超压、深水相区。然而,在中央隆起东侧或该洼陷西北侧过渡区,该砂组在前参 2—文 204—文 404 井区发育厚层盐岩(图 4b),且这些井区属于浅湖相为主或与半深湖相互层。文 404 井区是半深湖相与深水成盐,根据“避盐、找深水”的勘探思路,统计时须扣除这些井区,扣除后的其他区就是沙三中亚段 4 砂组页岩油勘探或“源储共生型”页岩油勘探的首选。另外,沙三下亚段 1—2 砂组也评价出前梨园洼陷为页岩油有利区之一,且面积最大,不包括因发育厚层盐岩的文 204—文 404 井区。此外,前参 2 井无盐岩无需扣除。该洼陷扣除后的其他区就是沙三下 1—2 砂组页岩油勘探的优选阵地。

4 结论

1) 东濮凹陷沙三段膏盐岩厚度约 1 000 m,厚层盐岩由水体变深、水体变浅 2 类蒸发岩序列纵向上叠置而成,单个序列厚度介于 5.7~18.0 m,单层盐岩厚度介于 1.0~12.0 m。

2) 位于中央隆起东侧与西侧、北部与中部文 318 等多口井在不同层位均发现了浪成沙纹交错层理,表明东濮凹陷中央隆起自沙三下亚段甚至更早的沙四上亚段 1 砂组开始就发育典型的浪成沙纹交错层理与浅水滩坝沉积,以及石膏条带与红层,属于水下隆起,这是重要的新观点。

3) 受干旱气候、多个构造次洼、湖平面升降的影响,盐岩分布具有“多期次、多中心”的特点。盐岩中心不能反映水体深或浅,盐岩中心(最厚处)既可能是在深水区或沉积中心沉淀、堆积的,也可以是在浅水区沉淀、堆积的。

4) 创新性提出东濮凹陷“深盆深水、浅平台浅水”的复杂成盐模式,既有“深水成盐”、又有“浅水成盐”,二者同盆同时共存。东濮凹陷“深水成盐”模式以柳屯洼陷为例,盐岩明显呈“牛眼状”、对称分布;“浅平台浅水成盐”模式以中央隆起、前梨园洼陷西侧为例。打破了以前的单一浅水、单一深水盐岩成因认识,从而为“避盐(针对钻完井工程)、找深水”页岩油勘探提供依据。

参考文献

[1] 钟逸斯,王立成,董浩伟. 蒸发岩沉积特征及环境综述[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1188-1214.
ZHONG Yisi, WANG Licheng, DONG Haowei. Evaporite

sedimentary characteristics and environment: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1188-1214.
[2] WARREN J K. Evaporites: a geological compendium[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
[3] ORTÍ F, ROSELL L, ANADÓN P. Deep to shallow lacustrine evaporites in the Libros Gypsum (southern Teruel Basin, Miocene, NE Spain): An occurrence of pelletal gypsum rhythmites[J]. Sedimentology, 2003, 50(2): 361-386.
[4] MANZI V, LUGLI S, LUCCHI F R, et al. Deep-water clastic evaporites deposition in the Messinian Adriatic foredeep (northern Apennines, Italy): Did the Mediterranean ever dry out? [J]. Sedimentology, 2005, 52(4): 875-902.
[5] 嵯喜准,郑旭,陈骁帅,等. 内陆湖盆“深水成盐”形成条件和识别标志: 以东濮凹陷与现代盐湖为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 43-59.
ZHUO Xizhun, ZHENG Xu, CHEN Xiaoshuai, et al. Forming conditions and indicators for deep-water evaporite deposits in inland lake basins: A case study of the Dongpu Sag and modern salt lakes [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 43-59.
[6] 吴文娟,戴建文,王华,等. 珠江口盆地深水气田储层差异及主控因素[J]. 非常规油气, 2024, 11(5): 52-59.
WU Wenjuan, DAI Jianwen, WANG Hua, et al. Reservoir property differences and main controlling factors in deep-water gas field, Pearl River Mouth Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(5): 52-59.
[7] 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): 19-32.
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): 19-32.
[8] 郭宏莉,王大锐. 东濮凹陷盐岩成因和烃类生成运移的包裹体证据[J]. 科学通报, 1991, 36(11): 848-850.
GUO Hongli, WANG Darui. Inclusion evidence of salt rock genesis and hydrocarbon generation and migration in Dongpu sag[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(11): 848-850.
[9] 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): 309-314.
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]. Geology in China, 2003, 30(3): 309-314.
[10] 李被,刘池洋,黄雷,等. 东濮凹陷北部沙河街组三段中亚段沉积环境分析[J]. 现代地质, 2018, 32(2): 227-239.
LI Bei, LIU Chiyang, HUANG Lei, et al. Analysis of the sedimentary environment in the north of Dongpu depression during the deposition of the middle section of the third member of the shahejie formation [J]. Geoscience, 2018, 32(2): 227-239.
[11] 金强. 深水和浅水盐湖相生油岩沉积及其石油地球化学特征[J]. 沉积学报, 1991, 9(2): 114-120.
JIN Qiang. Sedimentation and organic geochemistry of source rocks in the deep and shallow-water saline lakes in tertiary, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(2): 114-120.
[12] 张洪安,王长征,蒋飞虎,等. 河南东濮凹陷古近系沙三中亚段重

- 力流沉积与伴生遗迹化石组合[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1157-1170.
- ZHANG Hongan, WANG Changzheng, JIANG Feihu, et al. Gravity flow deposits associating with ichnoassemblages within the middle Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu sag, Henan Province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(6): 1157-1170.
- [13] 袁静, 赵澄林, 张善文. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 114-118.
- YUAN Jing, ZHAO Chenglin, ZHANG Shanwen. Genetic model of the deep water salt lake of the Paleogene Sha-4 member in Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 114-118.
- [14] 王伟锋, 张美. 洪泽凹陷赵集次凹阜宁组四段盐岩深水再沉积成因探讨[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 242-253.
- WANG Weifeng, ZHANG Mei. Study on deep water resedimented origin of saline sediments of E₁f₄ in zhaoji sag, Hongze depression, northern Jiangsu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 242-253.
- [15] 文星, 王坤, 谢明英, 等. 中国首个长期弃置深水油田二次开发技术创新与实践[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 610-617.
- WEN Xing, WANG Kun, XIE Mingying, et al. Innovation and practice of secondary development technology for China's first long-term abandoned deepwater oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 610-617.
- [16] 张永生, 王国力, 杨玉卿, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系盐湖沉积盐韵律及其古气候意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 461-470.
- ZHANG Yongsheng, WANG Guoli, YANG Yuqing, et al. Rhythms of saline lake sediments of the Paleogene and their paleoclimatic significance in Qianjiang Sag, Jianghan Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2005, 7(4): 461-470.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 任羿行, 徐尚. 沧东凹陷GD14井孔二段烃源岩有机地化特征及古沉积环境分析[J]. 非常规油气, 2025, 12(5): 40-50.
- REN Yixing, XU Shang. Analysis of organic geochemical characteristics and paleo-sedimentary environment of Ek2 source rock of well GD14 in Cangdong Sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2025, 12(5): 40-50.
- [20] 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): 12-14, 89-90.
- 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): 12-14, 89-90.
- [21] 赵俊峰, 纪友亮, 苏惠, 等. 东濮凹陷沙三段盐岩成因及含盐地层层序划分[J]. 海洋石油, 2009, 29(1): 9-14.
- ZHAO Junfeng, JI Youliang, SU Hui, et al. The salt rock genesis of 3rd member of Shahejie formation in Dongpu Depression and the division of saline formation sequence[J]. Offshore Oil, 2009, 29(1): 9-14.
- [22] 纪友亮, 冯建辉, 王声朗, 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.
- [23] 周刚, 阎泽昊, 雷鼎丞, 等. 白云岩成因模式及其对碳酸盐岩优质储层发育的影响[J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(1): 1-11.
- ZHOU Gang, YAN Zehao, LEI Dingcheng, et al. Genetic model of dolomite and its influence on development of high-quality carbonate reservoir[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(1): 1-11.
- [24] 沈童, 卢文涛, 郑爱维, 等. 四川盆地复兴地区侏罗系陆相页岩油可采储量评价方法[J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(5): 39-47.
- SHEN Tong, LU Wentao, ZHENG Aiwei, et al. An integrated method for estimating recoverable reserves of Jurassic continental shale oil in Fuxing area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(5): 39-47.
- [25] 王蓓, 朱占美, 刘微, 等. 川中龙女寺—合川栖霞组碳酸盐岩储集层特征及主控因素[J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(5): 64-75.
- WANG Bei, ZHU Zhanmei, LIU Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoirs in Qixia Formation, Longnvisi-Hechuan block, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(5): 64-75.
- [26] 王菁, 李相博, 刘化清, 等. 陆相盆地滩坝砂体沉积特征及其形成与保存条件: 以青海湖现代沉积为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 1016-1030.
- WANG Jing, LI Xiangbo, LIU Huaqing, et al. Study of the development and preservation of lacustrine beach and bar based on the modern sedimentary characteristics of Qinghai lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 1016-1030.
- [27] 刘文慧, 马啸, 户瑞宁, 等. 海陆相页岩孔隙结构对比研究: 以龙马溪组和芦草沟组为例[J]. 非常规油气, 2024, 11(3): 35-48.
- LIU Wenhui, MA Xiao, HU Ruining, et al. Comparative study on pore structure of marine and terrestrial shales: A case study of Longmaxi Formation and Lucaogou Formation[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(3): 35-48.
- [28] 罗千淘. 死海"生死录"[J]. 大自然探索, 2012, 31(3): 28-35.
- LUO Qiantao. Dead sea "life and death record" [J]. Discovery of Nature, 2012, 31(3): 28-35.
- [29] GERTMAN I, HECHT A. The dead sea hydrography from 1992 to 2000[J]. Journal of Marine Systems, 2002, 35(3/4): 169-181.
- [30] ARNON A, SELKER J S, LENSKY N G. Thermohaline stratification and double diffusion diapycnal fluxes in the hypersaline Dead Sea[J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(4): 1214-1231.
- [31] 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.
- [32] 张彭熹. 中国蒸发岩研究中几个值得重视的地质问题的讨论[J]. *沉积学报*, 1992, 10(3): 78–84.
ZHANG Pengxi. Discussion on some geological problems of the research of evaporite in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 78–84.
- [33] HSU K J. Origin of saline giants: A critical review after the discovery of the Mediterranean Evaporite[J]. *Earth–Science Reviews*, 1972, 8(4): 371–396.
- [34] ROVERI M, FLECKER R, KRIJGSMAN W, et al. The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 25–58.
- [35] 李超. 渤海湾盆地莱北低凸起明下段低弯度曲流河沉积特征[J]. *非常规油气*, 2024, 11(1): 22–28.
LI Chao. Sedimentary characteristics of low curvature meandering stream in lower part Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(1): 22–28.
- [36] FENG Y E, STEINBERG J, RESHEF M. Intra–salt deformation: Implications for the evolution of the Messinian evaporites in the Levant Basin, eastern Mediterranean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 251–267.
- [37] REODIVG H G. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy[J]. *Encyclopedia of Geology*, 1996, 688(5703): 580–587.
- [38] 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 高山深盆的成盐环境: 一种新的成盐模式的剖析[J]. *地质论评*, 1983, 29(2): 159–165.
YUAN Jianqi, HUO Chengyu, CAI Keqin. The high mountain–deep basin saline environment: A new genetic model of salt deposits[J]. *Geological Review*, 1983, 29(2): 159–165.
- [39] 徐磊, 操应长, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系膏盐岩成因模式及其与油气藏的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 30–35.
XU Lei, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Genetic model of salt–gypsum rock of Paleogene in Dongying depression and its relationship with hydrocarbon reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(3): 30–35.

(编辑 黄颖)