

文章编号:1673-5005(2014)06-0024-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.004

东营凹陷沙四下盐湖相沉积序列

马立民¹, 李志鹏², 林承焰^{1,3}, 刘振阳⁴, 李文涛², 杨显成², 卜丽侠⁵

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利地质科学研究所, 山东东营 257061;
3. 山东省油藏地质重点实验室, 山东青岛 266580; 4. 中国石化胜利西部研究中心, 山东东营 257061;
5. 中国石化胜利油田东辛采油厂, 山东东营 257061)

摘要:根据岩心、岩屑和测井等资料,依据沉积学理论和马尔科夫链方法,对东营凹陷东部沙四下盐湖相沉积特征、沉积序列和对比模式进行研究。结果表明:东营凹陷东部沙四下沉积时期盐湖同时存在深水、浅水两种蒸发岩的沉积特征;深水蒸发岩主要与近岸水下扇砂砾岩和深水深灰色泥页岩共生,发育在湖盆中心和北部陡坡带,以石膏和石盐沉积为主;浅水蒸发岩主要与漫湖三角洲粉、细砂岩和紫红色泥岩共生,发育在湖盆南坡的浅水沉积环境中,发育石膏、石盐和碳酸盐岩沉积;第一套膏盐层存在4种对比模式,第二和第三套膏盐层存在两种对比模式。

关键词:沉积序列;膏盐岩;盐湖相;沙四下;东营凹陷

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码:**A

引用格式: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):24-31.

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): 24-31.

Sedimentary sequences of salt-lake facies in Lower Es₄ of Dongying Depression

MA Limin¹, LI Zhipeng², LIN Chengyan^{1,3}, LIU Zhenyang⁴, LI Wentao², YANG Xiancheng², BU Lixia⁵

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. The Geology Scientific Institution of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China;
3. The Key Laboratory of Reservoir Geology in the Shandong Province, Qingdao 266580, China;
4. The West Research Centre of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China;
5. Dongxin Oil Production Plant of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China)

Abstract: Using rock cores, rock fragments and well logs, we studied the sedimentary characteristics, the sedimentary sequences and the correlation methods of lower Es₄ in the eastern Dongying Depression, based on the theories of sedimentation and Markov chain method. The results reveal the existence of shoal and deep water evaporates in the Es₄ salt-lake. The deep water evaporates, mainly gypsum and halite, are associated with glutenite of the near-shore subaqueous fan and charcoal grey deep-water shale, and are mostly in the center of the lake basin and the north steep slope. The shoal evaporates, mainly gypsum, halite and carbon rock, are associated with sand and purplish red mudstone of the over-lake delta, and are mostly in the south gentle slope. There are four correlation methods in the first gypsum-salt layer and two correlation methods in the second and third gypsum-salt layer.

Key words: sedimentary sequence; gypsum-salt rock; salt-lake facies; lower 4th member; Dongying Depression

对石膏、石盐的沉积成因国内外学者做过大量研究^[1-7],目前大部分学者认为主要有浅水蒸发成因

和深水成因两种^[8]。近几年随着胜利油田对深层油气勘探力度的加大,沙四下盐湖相勘探潜力受到

收稿日期:2014-04-16

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-003)

作者简介:马立民(1985-),男,博士研究生,主要从事油藏描述和油气藏形成与分布研究。E-mail:malm1985@126.com。

重视,石膏、石盐发育岩层(简称膏盐层)以下地层已经取得了一定的勘探成果和认识^[9-11],但膏盐层内部勘探程度和认识较低。前人对东营凹陷沙四下膏盐层的研究主要是探究其盐源和成因^[12-15],对膏盐层的沉积序列和对比模式研究较少。因此,笔者根据取心井的岩心观察、岩屑资料和测井资料,依据沉积学理论和马尔科夫链相序研究方法^[16],研究东营凹陷东部不同部位沙四下膏盐层的沉积序列特征,探讨石膏、石盐的沉积机制,提出东营凹陷不同构造带间沙四下膏盐层的地层对比模式,为东营凹陷沙四下膏盐层地层对比和储层预测提供指导。

1 区域概况

东营凹陷位于济阳坳陷南部,东部由牛庄、民丰

2个生油洼陷及北部陡坡带、中央隆起带和南部斜坡带等二级构造单元组成。沙四段沉积时期中央隆起带和牛庄洼陷尚未形成,仍属于南部斜坡带的一部分^[17],所以沙四下沉积时期,东营凹陷东部主要由北部陡坡带、民丰洼陷和南部斜坡带3个二级构造单元组成,盆地整体为北断南超的半地堑构造形态。东营凹陷沙四下沉积时期继承了孔店期干旱—半干旱的气候特征^[12-15],由孔店期典型的间歇性湖盆转变为永久性咸水湖盆,在沙四下亚段的上部沉积了3套稳定的膏盐层。这3套膏盐层沉积时期长期基准面是不断上升的过程,中期旋回有一定变化,以完整旋回为主,膏岩和盐岩主要发育在中期基准面相对较低且有一定水体的区域(图1)。

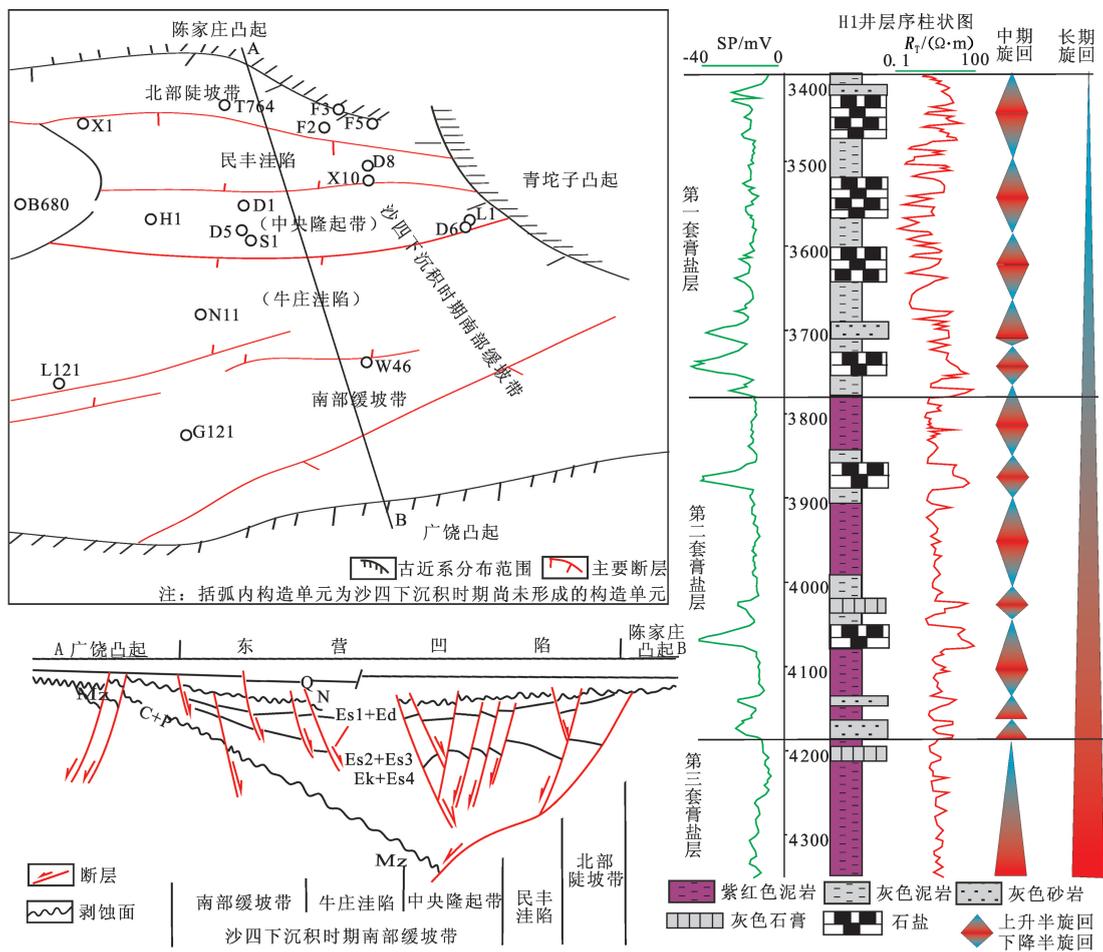


图1 东营凹陷东部地质概况

Fig. 1 General situation of geology in eastern Dongying Depression

2 膏盐层沉积特征

2.1 碎屑岩沉积特征

(1)北部陡坡带: F3井和F5井沙四下膏盐层岩心显示东营凹陷陡坡带发育大套的砂砾岩和砂岩,

物源主要来自断层以北的陈家庄凸起。沉积构造表现出明显的重力流特征,粒度概率累积曲线主要为一段式和上拱式,发育块状层理、递变层理、火焰状构造和冲刷面等(表1),主要为近岸水下扇和浊积扇沉积^[18]。

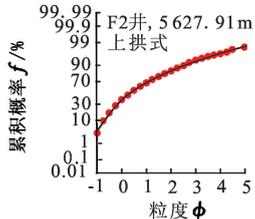
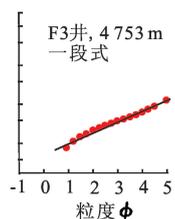
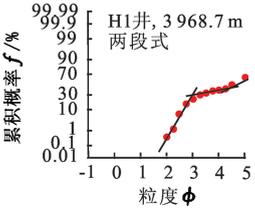
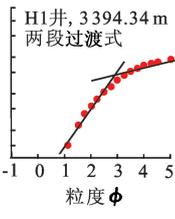
(2)中央隆起带和南部缓坡带:东营凹陷中央隆起带在沙四下沉积时期尚未形成,仍属南部缓坡带的部分^[17]。该构造部位的第三套膏盐层碎屑岩以紫红色泥岩和灰色粉砂岩为主,紫红色泥岩中见石膏晶体和石盐假晶,H1井的紫色泥岩中见泥裂现象。第二套膏盐层碎屑岩仍以紫红泥岩和灰色粉砂岩为主,较第三套膏盐层灰色泥岩有所增加。第一套膏盐层碎屑岩以灰色泥岩、灰色粉砂岩和细砂岩为主,泥岩颜色由紫红色转变为灰色。砂岩粒度累计概率曲线以两段式为主,牵引流沉积构造丰富,发育沙纹层理、波状交错层理和水平层理等,也见重荷

模、递变层理等沉积构造,砂泥薄互层中发育生物扰动构造(表1)。

综上所述,第三套膏盐层沉积时期中央隆起带和南部缓坡带主要被紫红色泥岩所占据,属水体间歇性覆盖的漫湖相沉积。随着气候逐渐湿润,第二套膏盐层沉积时期灰色泥岩占据范围向南扩展,紫红色泥岩占据范围稍有减少,中央隆起带由漫湖相向滨浅湖相演变,南部缓坡区仍处于漫湖沉积环境。到第一套膏盐层沉积时期,湖盆水体明显扩大,紫红色泥岩范围向南缩退,滨浅湖占据范围向南扩展,此时中央隆起带主要以滨浅湖相沉积为主(图2)。

表1 东营凹陷东部沙四下膏盐层碎屑岩沉积特征

Table 1 Sedimentary characteristics of clastic rock in gypsum-salt bed of lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression

分类	沉积构造			粒度累积概率曲线	
北部陡坡带					
	F3井, 4785.8 m 灰色含砾粗砂岩	F5井, 4511 m 滑塌构造	F2井, 5646.8 m 火焰状构造		
中央隆起带					
	H1井, 3760.72 m 重荷模,泄水构造	H1井, 3759.72 m 水平层理,生物钻孔			
					
	H1井, 3767.15 m 沙纹层理	H1井, 3764.65 m 干燥泥裂			

2.2 石膏、石盐沉积特征及成因机制

2.2.1 沉积特征

F2井等岩心资料揭示,东营凹陷湖盆中心在沙四下发育大量的石膏和石盐沉积,包括灰色石膏、石盐、盐质石膏和泥质石膏等。石盐中常夹有薄层的灰色泥质或灰色粉砂质碎屑岩,反映了石盐的沉积期次,也反映出石盐沉积过程中沉积水体存在一定变化。湖盆中心石膏、石盐最大特点是与灰黑色或深灰色泥岩、泥页岩等深水岩相共生,属深水化学岩沉积,主要发育在基准面相对低的沉积时期(图3)。中央隆起带在沙四下沉积时期属南部缓坡,也存在大量的化学岩沉积,其代表是H1井,其岩心揭示中央隆起带化学岩以石盐和石膏沉积为主,同时有一定量的泥质石膏和泥质石盐。石盐在晶型和颜

色上与湖盆中心石盐基本相同,但两者在共生岩性上存在明显差异。中央隆起带膏盐层主要与大套紫红色泥岩和浅灰色泥岩共生,紫红色泥岩很少与石盐、石膏上下直接接触,之间一般有一定厚度的灰色泥岩段。中央隆起带的盐岩和石膏主要发育在湖平面相对较高、有一定水体深度的第一套膏盐层内,分布在基准面相对较低时期(图1、3)。综上所述,中央隆起带石盐、石膏形成环境与湖盆中心深水环境存在明显不同,中央隆起带的形成环境应与“红层”形成环境相同或相近,属浅水沉积环境。

平面上石膏和石盐的沉积范围随水体范围的扩展而不断向南扩展,说明其沉积需要一定深度的水体。石膏在第二套膏盐层内最为发育,在第三套膏盐层内范围最广;石盐在第二套膏盐层湖盆中心沉

积厚度最大,在第一套膏盐层受水体影响范围最广 (图 2)。

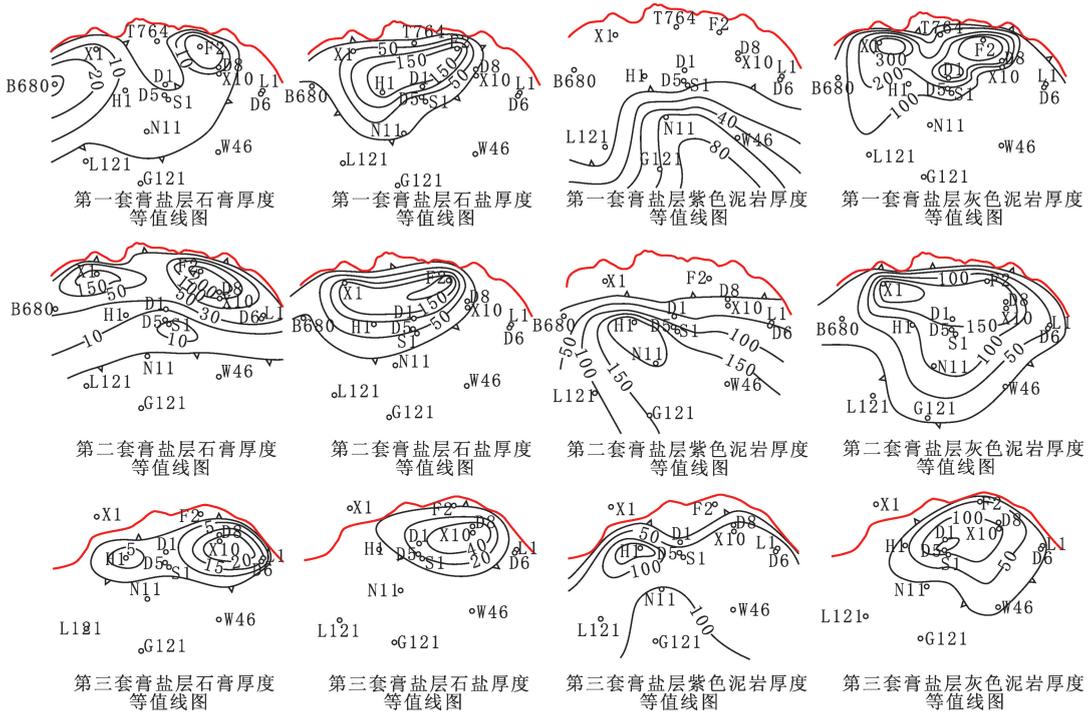


图 2 东营凹陷沙四下膏盐层主要岩性平面分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of main lithology of lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression

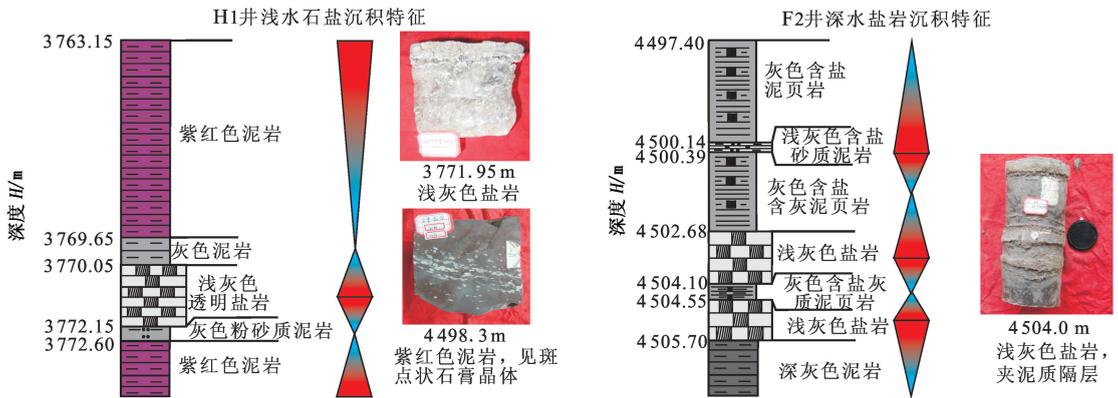


图 3 东营凹陷沙四下膏盐层盐岩沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics gypsum-salt bed of lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression

2.2.2 形成机制

通过以上湖盆中心和中央隆起带石膏、石盐沉积特征的分析,可知两者在形成环境上存在较大差异,应属同一沉积时期不同环境下的沉积产物。

东营凹陷沙四下沉积时期为半干旱气候^[13-15],湖水具一定盐度,这可从 3 个方面得到证实:①深灰色泥岩和紫红色泥岩中发育石膏、石盐晶体;②灰色泥岩和紫红色泥岩尝之略带咸涩味;③泥岩中常含膏质和盐质成分。这种半干旱气候受气候短周期

(如季节变化)的影响,在干旱炎热的夏季蒸发作用强,湖水蒸发量大于注入量,湖平面降低,体积减小,湖水溶解盐类矿物的能力降低,如 2011 年的鄱阳湖,漫湖区露出水面发生沉积物的氧化,加之河水携带碎屑沉积物有限,湖水较为平静而清澈,此时湖水易于卤化。在气候相对湿润的季节,湖平面相对高,随着气温的不断升高和降雨量的减少,湖平面不断降低,湖水表层首先达到 CaSO_4 和 NaCl 的饱和和溶解度,开始有细小的盐类晶体析出,当结晶到一定程度

时,在重力作用下下沉(图4(a))。沉降过程中晶体又不断被溶解,浅水区由于水体浅晶体在还没有完全被溶解时就已经达到湖底,部分晶体沉积下来,深水区晶体在还没有达到湖底时就已经被溶解,所以湖平面降低的早期深水区并不存在石盐、石膏沉积。随着气候不断干旱,湖平面不断降低,湖水表面晶体不断析出,造成湖水含盐度不断增加,高盐度水在重力作用下下沉,浅水区形成的高盐度水体在重力作用下也沿着斜坡缓慢向湖盆中心运动,最终形成湖水分层。超过饱和溶解度的卤水层受重力控制位于最底部,其上是盐度向上不断降低的盐跃层,表层是稀释层(图4(b)),气候越干旱、湖平面越低,湖水的分层现象越明显。这种干旱气候下蒸发作用形成的卤水层具有流动性,流动方向为沿着湖底斜坡由浅水区流向湖盆中心,造成卤水层的形态与湖底形态相近,湖盆中心厚,边缘薄。卤水层内析出的石盐和石膏晶体可以直接在湖底沉积下来,可同时在浅水区和深水区沉积石盐和石膏。

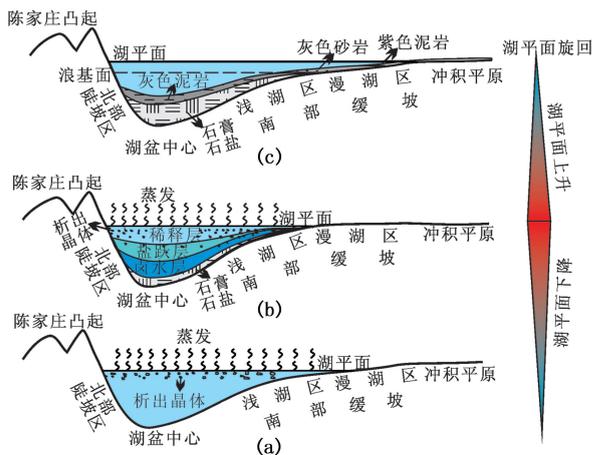


图4 东营凹陷沙四下膏盐岩形成机制

Fig. 4 Genesis of gypsum-salt rocks in lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression

随着气候不断湿润,降雨量增加,湖平面上升,造成湖水深度和体积增加,溶解能力增加,湖水盐度不断降低。河水携带大量碎屑沉积物的注入使湖水较为动荡,湖水变浑浊,以上条件都不利于石盐、石膏晶体卤水层的形成和析出,所以高湖平面时期主要沉积碎屑岩。在深水区,干旱低湖平面时期沉积下来的石膏和石盐被该时期的泥质岩覆盖得以保存;在浅水区特别是浪基面之上,干旱低湖平面时期沉积的石盐由于湖水动荡将很大程度上发生回溶作用,难以保存(图4(c)),石膏因稳定性强,回溶作用弱,在浪基面之上得到一定程度的保存,所以同一

时期浅水区石膏的沉积范围比石盐的沉积范围更广(图2)。

通过以上分析发现,东营凹陷沙四下膏盐层的石盐和石膏主要形成在气候干旱的水下沉积环境,发育在湖平面相对较低时期,从滨浅湖一直到湖盆中心,其沉积范围随湖盆水体的扩展而相应扩展。这正是东营凹陷沙四下膏盐层中膏岩和石盐在湖盆中心与深灰色泥岩互层,南坡浅水区与紫红色泥岩共生的原因,也是石膏和石盐不直接与紫红色泥岩接触的原因,同时也证实石膏、石盐主要发育在低湖平面时期。

3 沉积序列特征及对比

3.1 沉积序列特征

(1) 北部陡坡带:利用 F2 和 L97 等东营凹陷北部陡坡带 8 口井的取心和岩屑资料建立北部陡坡带沙四下膏盐层的 3 种沉积序列。第一种为深水石膏沉积序列,第二种为深水石盐沉积序列,反映了气候干旱、湖平面较低条件下的卤化深水环境,以深水灰色、黑色泥页岩结束;第三种为深水重力流沉积序列,包括近岸水下扇和浊积扇两类沉积序列,主要发育在砂砾岩体中,同样以深灰色泥页岩结束。3 种沉积序列颜色为深灰—黑的还原色调,反映深水沉积,沉积序列种类少,沉积环境稳定(表 2)。

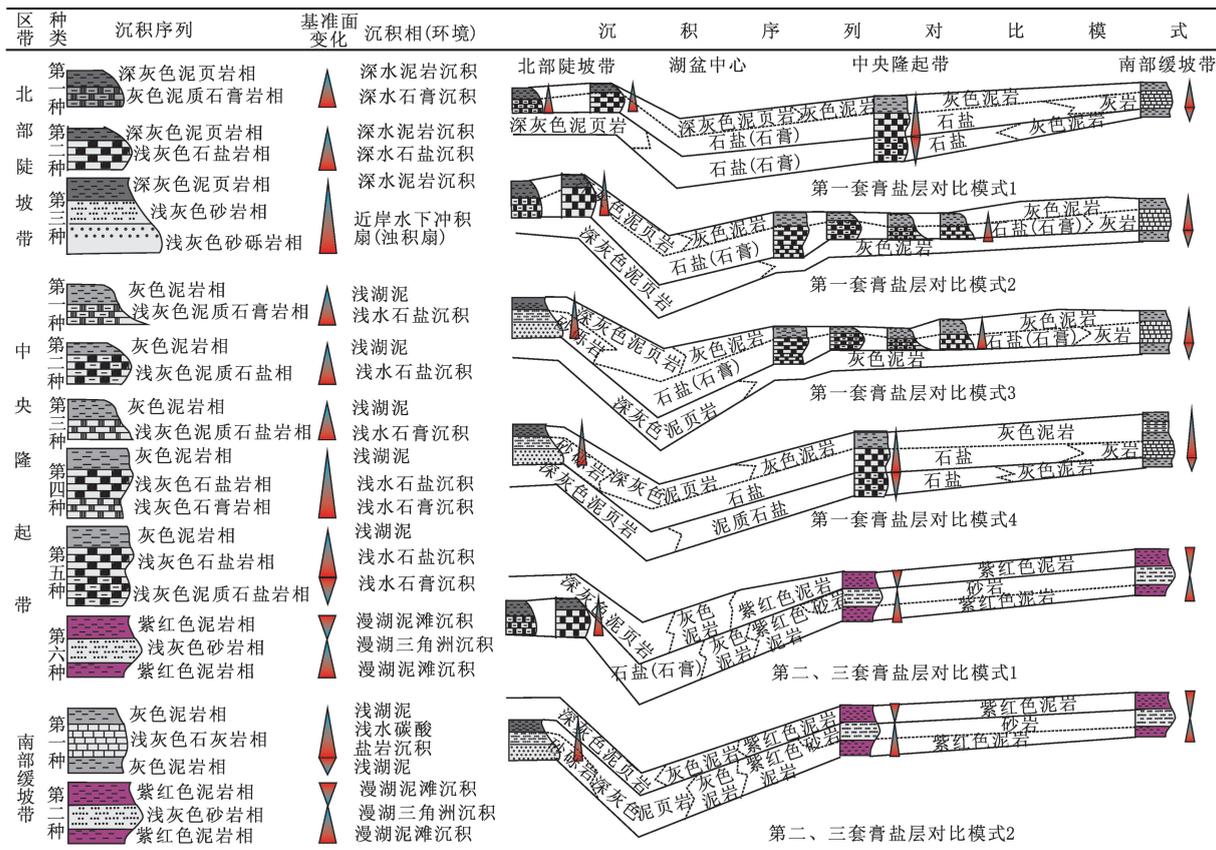
(2) 中央隆起带:利用 D1 和 H1 等中央隆起带 8 口井的取心和岩屑资料建立中央隆起带沙四下膏盐层的沉积序列。该区带主要发育 4 类 6 种沉积序列,沉积序列种类多,反映水体变化频繁,稳定性差,泥岩颜色以灰色的弱还原色调为主,属浅水沉积。4 类沉积序列分别是浅水石盐沉积序列、浅水石膏沉积序列、浅水石膏—石盐沉积序列和漫湖沉积序列,其中浅水石盐沉积序列发育种类最多,有 3 种沉积序列,其他 3 类各 1 种沉积序列。浅水石盐沉积序列、浅水石膏沉积序列和浅水石膏—石盐沉积序列都以滨浅湖灰色泥岩结束,主要发育在湖盆范围相对最大的第一套膏盐层中。漫湖相沉积序列,主要发育在第二和第三套膏岩层中,是中央隆起带沙四下膏岩层沉积时期的主要沉积序列,包括紫色泥岩和碎屑砂岩两种岩相(表 2)。

(3) 南部缓坡带沉积序列:利用 W46 和 G121 的岩屑资料建立南部缓坡带沙四下膏盐层的两种沉积序列:① 漫湖相沉积序列,是南部缓坡带主要的沉积序列,碎屑岩较中央隆起带发育;② 浅水碳酸

盐岩沉积序列,与中央隆起带和北部陡坡带的石盐、石膏沉积序列相对应,发育较少,在第一套膏盐岩上

表2 东营凹陷沙四下膏盐层膏盐岩沉积序列及对比模式

Table 2 Sedimentary sequence and comparison models of gypsum-salt bed of lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression



3.2 沉积序列对比

在上述研究的基础上按照层序地层学的旋回对比原则,同时考虑沉积相序,建立了东营凹陷沙四下盐湖相的沉积序列对比模式(表2),借此指导膏盐层内部次级旋回的划分和对比(图5)。首先根据基准面旋回进行等时对比,在基准面旋回对比框架下进行旋回内部的岩相对比。

第一套膏盐层的岩相对比基本可以化学岩对化学岩,碎屑岩对碎屑岩,化学岩横向上可相变为灰色泥岩相和深灰色泥页岩相。该时期湖盆水体大,在化学岩沉积时期,湖盆处于卤水分层控制阶段,湖水安静、清澈,河水携带作用弱;在碎屑岩沉积时期,湖平面相对较高,河流携带作用强,湖水较为动荡,水体相对浑浊,不利于化学岩沉积。由北部陡坡带到南部缓坡带化学岩相主要发育两种侧向相变模式:石盐(石膏)→灰岩;深灰色泥页岩→石盐(石膏)→灰

色泥岩。碎屑岩相也主要发育两种侧向相变模式:深灰色泥页岩相→灰色泥岩相;砂砾岩相→深灰色泥页岩相→灰色泥岩相(表2)。

第二和第三套膏岩层沉积时期湖盆水体小,在膏盐岩沉积时期漫湖区出露水面一般不接受石盐、石膏沉积,主要发育漫湖三角洲砂体和紫红色漫湖泥。沉积序列上石盐、石膏不与紫红色泥岩直接接触,之间夹有一定厚度的灰色泥岩,按相序原则侧向上石盐岩相、石膏岩相与紫红色泥岩相之间应存在浅水灰色泥岩相。自北部陡坡带到南部缓坡带化学岩主要发育一种侧向相变模式:石盐(石膏)岩相→灰色泥岩相→紫红色泥岩相夹砂岩相。碎屑岩主要发育两种侧向相变模式:深灰色泥页岩相→灰色泥岩相→紫红色泥岩相;砂砾岩相→深灰色泥页岩相→灰色泥岩相→紫红色泥岩相夹砂岩相(表2)。

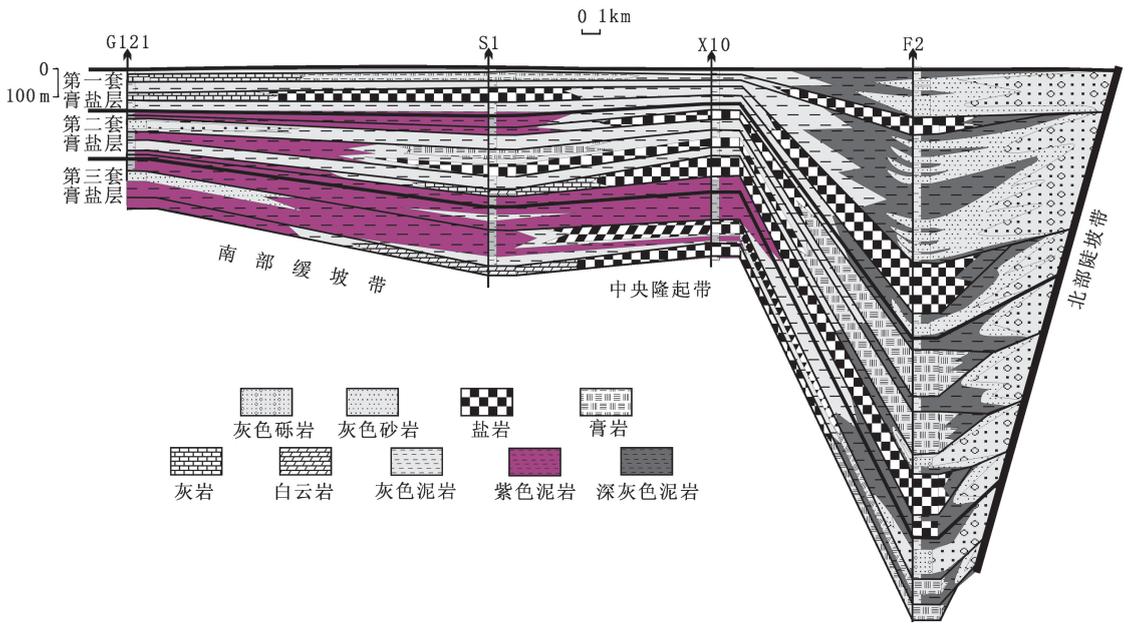


图5 东营凹陷沙四下膏盐层膏盐岩对比剖面

Fig. 5 Comparison section of gypsum-salt bed of lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Depression

4 结论

(1) 东营凹陷沙四下膏盐层沉积时期盆地不同部位水深差异大,造成同期碎屑岩、石盐、石膏等存在不同成因机制。北部陡坡带紧靠物源、坡度大、水体深,碎屑岩为近岸水下扇、浊积扇等砂质沉积和深灰色、灰黑色深水泥岩、油页岩沉积;石盐与石膏为蒸发环境下的深水成因。中央隆起带与南部缓坡带远离物源、坡度小、水深浅,碎屑岩主要为漫湖三角洲、滨浅湖细粒砂质沉积与紫红色浅水泥岩沉积;石盐与石膏为蒸发环境下的浅水盐岩沉积。

(2) 东营凹陷沙四下膏盐层沉积时期,由于沉积环境、成因机制不同,造成不同部位沉积序列存在较大差异。北部陡坡带主要发育深水石膏、深水石盐和深水重力流3种沉积序列,均以深水泥质岩沉积结束。中央隆起带主要发育浅水石盐、浅水石膏、浅水石膏-石盐和漫湖4类沉积序列。浅水石盐发育3种沉积序列,其他3类各发育1种沉积序列。南部缓坡带主要发育漫湖沉积序列和浅水碳酸盐岩沉积序列。沉积序列横向对比方式多样,第一套膏盐层存在4种对比模式,第二和第三套膏盐层存在2种对比模式。

参考文献:

[1] 高红灿, 陈发亮, 刘光蕊, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因研究的进展、问题与展望[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 251-261.

GAO Hongcan, CHEN Faliang, LIU Guangrui, et al. Advance problems and prospect in studies of origin of salt rocks of the paleogene Shahejie formation in Dongpu sag [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 251-261.

[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): 309-311.

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): 309-311.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征及沉积环境[J]. 岩相古地理, 2003, 5(1): 29-34.

ZHANG Yongsheng, YANG Yuqing, QI Zhixian, et al.

- Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang formation of the paleogene in Qianjiang sag of Jiangnan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 5(1): 29-34.
- [6] 王春连, 刘成林, 胡海兵, 等. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(2): 165-175.
WANG Chunlian, LIU Chenglin, HU Haibing, et al. Sedimentary characteristics and its environment significance of salt-bearing strata of the member 4 of Paleocene Shashi formation in southern margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2): 165-175.
- [7] 李凌, 谭秀成, 邹春, 等. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义 [J]. *地质学报*, 2012, 86(2): 29-34.
LI Ling, TAN Xiucheng, ZOU Chun, et al. Origin of the Leikoupo formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in Sichuan Basin, and their structural significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 29-34.
- [8] 方志雄. 潜江盐湖盆地盐间沉积的石油地质特征 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 608-612.
FANG Zhixiong. Hydrocarbon exploration signification of intersalt sediments in Qianjiang saline lake basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 608-612.
- [9] 张勇. 东营凹陷北部陡坡带沙四段盐下天然气成因类型分析: 以丰深1井为例 [J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(2): 394-398.
ZHANG Yong. Genetic analysis on Es₄ nature gases in northern steep slop of Dongying Depression: an example of well Fengshen 1 [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(2): 394-398.
- [10] 王居峰. 山东东营凹陷沙四段盐下层油气成藏条件分析 [J]. *现代地质*, 2009, 23(2): 313-318.
WANG Jufeng. Background for oil and gas accumulation of Es₄ sub-salt reservoir in Dongying sag Shandong [J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 313-318.
- [11] 李延钧, 宋国奇, 李文涛, 等. 济阳拗陷东营凹陷北带丰深1井区深层沙四下古油藏与天然气成因 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(2): 28-30.
LI Yanjun, SONG Guoqi, LI Wentao, et al. A fossil oil-reservoir and the gas origin in the Lower Sha-4 Member of the well Fengshen 1 area, the north Dongying zone of the Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(2): 28-30.
- [12] 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.
- [13] 袁静, 覃克. 东营凹陷沙四段深水成因蒸发岩特征及其与油气藏的关系 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2001, 25(1): 9-11.
YUAN Jing, QIN Ke. Characteristics of evaporate generated in deep water of Sha4 member in Dongying Sag [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2001, 25(1): 9-11.
- [14] 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): 4-6.
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): 4-6.
- [15] 操应长, 王健, 高永进, 等. 济阳拗陷东营凹陷古近系红层—膏盐层沉积特征及模式 [J]. *古地理学报*, 2011, 13(4): 376-386.
CAO Yingchang, WANG Jian, GAO Yongjin, et al. Sedimentary characteristics and model of red beds — gypsum salt beds of the Paleogene in Dongying sag, Jiyang Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(4): 376-386.
- [16] 朱筱敏, 信荃麟. 马尔科夫链法在建立沉积相模式中的应用 [J]. *沉积学报*, 1987, 5(4): 96-99.
ZHU Xiaomin, XIN Quanlin. Application of Markoff chain method to establish model of sedimentary facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5(4): 96-99.
- [17] 漆家福, 肖焕钦, 张卫刚. 东营凹陷主干边界断层(带)构造几何学、运动学特征及成因解释 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 8-12.
QI Jiafu, XIAO Huanqin, ZHANG Weigang. Geometry kinematics and mechanism interpretation of the major boundary faults in Dongying sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 8-12.
- [18] 鄢继华, 陈世悦, 姜在兴. 东营凹陷北部陡坡带近岸水下扇沉积特征 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2005, 29(1): 12-16.
YAN Jihua, CHEN Shiyue, JIANG Zaixing. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous of fans in steep slope of Dongying Depression [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2005, 29(1): 12-16.