

东濮凹陷濮卫洼陷盐岩发育规律及成因探讨

屈红军 李文厚 苗建宇 庞军刚

(西北大学教育部大陆动力学重点实验室;西北大学地质系 陕西 西安 710069)

提 要: 东濮凹陷濮卫洼陷发育巨厚的盐岩沉积, 搞清其发育规律和成因对区域地质研究及油气勘探具有重要意义。笔者以高分辨率层序地层学的基本理论和方法为指导, 通过对钻井岩芯、测井和地震资料的综合分析, 结合盆地结构和地层分析, 在研究区古近系沙河街组划分出 7 个盐韵律组, 其中 I 级 3 个, II 级 4 个, 分析了各个盐韵律组的发育及分布规律。地球化学及古生物分析表明, 研究区古近纪古气候具干旱与潮湿的高频变化, 盐岩的物源主要为海泛的海水, 盐岩在高频层序中为低水位于早期深水处蒸发成因。

关 键 词: 濮卫洼陷; 盐韵律组; 盐岩成因; 海泛; 低水位

中图分类号: P588.24⁷ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)03-0309-06

1 区域地质概况

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南端, 东侧以兰聊断裂为界与鲁西隆起为邻, 西侧以长恒断裂为界与内黄隆起相接, 南以封丘北断层为界与兰考凸起相邻, 北以马陵断层为界与莘县凹陷相望。根据东濮凹陷构造特征将东濮凹陷自西向东划分为西部斜坡带、西部洼陷带、中央隆起带、东部洼陷带和东部兰聊断阶陡坡带 5 个次级构造单元。东濮凹陷以古—中生代地层为基底, 以新生代地层为盖层, 在构造演化及沉积相带上具有明显的南北分区、东西分带的特征^[1]。

濮卫洼陷位于东濮凹陷东部洼陷带北部, 夹持于濮城断裂系与卫东断裂系之间, 基底区域东倾, 被多条反向断层复杂化, 为西高东低的箕状洼陷(图 1)。濮卫洼陷自下而上钻遇的地层有古近系沙河街组沙四段、沙三段、沙二段、沙一段及东营组, 新近系馆陶组 and 明化镇组及第四系平原组, 总厚度约 4 800 m, 其中沙河街组发育有数套盐层或膏盐层。弄清这几套盐层或膏盐层发育规律及成因, 对于认识区内地质演化及油气生成、运移、聚集和保存规律有重要意义。

2 前期研究与本次研究

东濮凹陷的盐岩前人已作过不少研究, 对于盐岩的发育

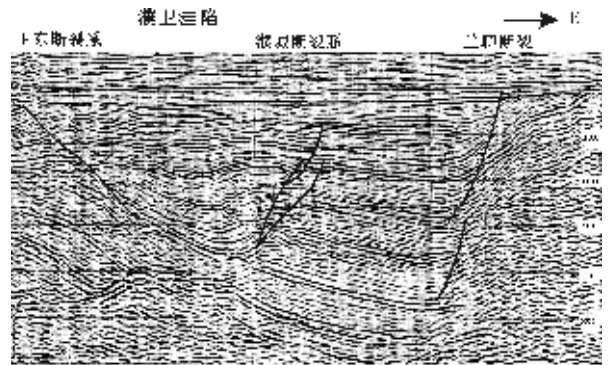


图 1 濮卫洼陷盆地结构(L728 地震测线)

Fig. 1 Basin structure in the Puwei subdepression (seismic profile L728)

及展布规律有一定的了解, 对于盐岩的成因和盐源有 3 种不同的认识。金强等^[2]、陈发亮等^[1]认为东濮凹陷的盐源为深部卤水; 顾家裕^[3]认为东濮凹陷盐岩形成于高山深盆环境, 对于盐源提出了 3 种可能性(陆源、深部卤水、海侵); 李任伟等^[4]根据溴微量元素和硫同位素认为东濮凹陷古近系盐岩为非海相成因; 张建军等^[5]、林又玲等^[6]、任来义等^[7]提出东濮凹陷盐源为侵入的海水; 郑鸿闻^[8]、杨香华等^[9]从层序地层模式、层

收稿日期: 2003-02-17; 改回日期: 2003-04-25

基金项目: 中原油田分公司采油二厂与西北大学横向合作科研项目。

作者简介: 屈红军, 男, 1967 年生, 博士, 讲师, 主要从事沉积学与层序地层学的教学和研究工作; E-mail: hongjun@nwu.edu.cn。

序结构与储层预测角度作了论述，但没有强调盐岩的成因；另外对于主要盐段在东濮凹陷展布规律陈发亮等^[1]、林又玲等^[6]作过研究。

本次研究有以下不同：①进行盐韵律组及盐韵律的精细划分，并确定其发育规律；②概括了含盐层段、盐韵律组及盐韵律在层序地层中的位置；③在地球化学方面获得了不同于前人的数据(微量元素溴的含量)；④综合层序地层、地球化学和古气候分析建立盐岩的沉积模式。

3 盐岩在层序地层中的位置

由于濮卫洼陷在古近纪位于东濮湖盆的一个沉积中心，加之受断层的影响，很难识别层序界面，因此低频层序(2~3级)表现不明显，但高频层序(4~6级)表现很明显，表现为盐韵律与泥岩的交替互层，笔者认为这是高频气候旋回。

从长期基准面旋回看，含盐层段发育期为构造沉降期，处于长期基准面上升期或低频层序的水进期。

从中期及短期基准面旋回看，盐韵律组及单个盐韵律形成于高频层序低水位期(图2)，根据钻测井岩性组合、测井曲线识别的准层序组叠置方式可以看出，盐韵律组之上地层显示出退积的准层序叠置方式，表现出一个向上变细的沉积序列，反映了盐岩沉积以后湖平面开始上升，盐岩形成于低湖平面期；盐韵律组之下地层显示出进积的准层序叠置方式，表现出一个向上变粗的序列，反映了盐岩沉积以前湖平面开始下降，低湖平面期形成盐岩。

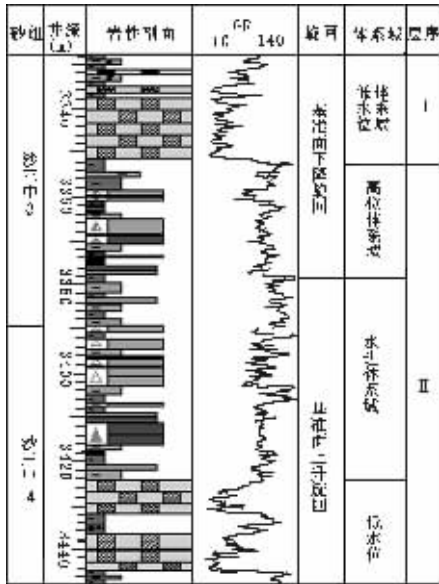


图2 盐岩上为基准面上升旋回；盐岩下为基准面下降旋回(濮83井)

Fig. 2 Above the salt rock is the rise base-level cycle and below the salt rock is the fall base-level cycle (well P83)

4 盐韵律组与盐韵律划分及发育规律

4.1 盐岩识别方法

4.1.1 岩心观察特征及盐岩的垂向序列

东濮凹陷盐岩、膏岩、碳酸盐岩在垂向上有明显的沉积序列，每一完整的序列由3部分组成。每一沉积序列开始，为暗色泥岩与薄层碳酸盐岩韵律互层；之上为薄层石膏或暗色泥岩夹薄层石膏或暗色泥岩中含各种石膏晶体，最上部为10~30 cm厚的盐岩层。厚层盐岩的基本结构是由10~30 cm的纯盐岩与1~3 cm的含石膏或泥质岩的韵律层组成，岩芯上可以看到形成近似于“年轮”的结构，石膏或泥质夹层呈竹节状突起，颜色有深灰、浅黄、铁锈红，说明水体变化频繁，有外源的碎屑物输入盐湖；盐岩一般质纯，具有一定的透明度，玻璃光泽，晶体大小为5~12 mm，个别可达2 cm；石膏为白色纤维状晶体，呈结核状、小竹叶状、波状、盘肠状等；泥岩一般为深灰、灰黑色，与盐膏岩渐变接触，局部见油页岩，含较多黄铁矿，多含生物化石碎片。

4.1.2 盐岩的电性特征

盐岩的电性特征主要表现为高电阻率、低密度、低自然伽玛、小声波时差、高传播速度的特点；而且在水基泥浆下扩井径，因此很容易识别出来。

4.1.3 盐岩的地震响应特征

由于盐岩具有低密度、高传播速度的地球物理特性，且它一般不与砂岩接触而与泥页岩互层，因此可以与泥页岩形成很高的波阻抗差，导致强反射界面的形成。因此在地震剖面上常表现为强振幅、低频率的响应特征。但在局部地区，由于缺少好的波阻抗界面，导致地震响应表现为较弱的近空白反射特征。

4.2 盐韵律组划分的原则

(1) 盐韵律组划分的理论依据是：根据高分辨率层序地层学沉积基准面原理的基本理论^[10]，盐韵律组发育于高频层序的基准面下降与基准面上升转换点的低水位期。

(2) 盐韵律组划分及对比的方法是：利用高分辨率层序地层学的地层旋回等时对比技术，根据录井剖面、测井曲线中盐岩的垂向特征，进行单井盐韵律组划分，并进行不同井盐韵律对比，地震波阻抗剖面上进行不同井盐韵律组标定，井间追踪不同盐韵律组的展布、延伸情况，确定盐韵律组的级别及可对比性，在每个盐韵律组，进行盐韵律的划分。

(3) 根据盐韵律组在濮卫洼陷内发育的规模、延续性及区域的可对比性，可将盐韵律组分为两个级别。Ⅰ级盐韵律组在洼陷两大部分地区广布，盐韵律多，单个盐层厚，延续性好，并且在东濮凹陷区域上可以对比；Ⅱ级盐韵律组在洼陷内局部地带分布，盐韵律组延续性较差，盐韵律少，单个盐层厚度小。

4.2 濮卫洼陷盐韵律组的划分

根据上述原则，在濮卫洼陷识别出Ⅰ级盐韵律组3个，

II 级盐韵律组 4 个(表 1,图 3)。

表 1 濮卫洼陷盐韵律组划分
Table 1 Division of rhythmic successions
in the Puwei subdepression

级别	盐韵律组名称(自下而上)		濮城油田开发分层层位	
I 级	I 沙一盐		沙一下	
II 级	II 沙二 ^下 盐		沙二上 ¹⁺²⁺³	
II 级	II 沙二 ^上 盐		沙二上 ⁴⁺⁵⁺⁶⁺⁷	
II 级	II 沙三 ¹ 盐		沙三上 ⁵⁺⁶⁺⁷⁺⁸⁺⁹⁺¹⁰	
I 级	I 沙三 ² 盐		沙三中 ¹⁺²⁺³	
I 级	I 沙三 ³ 盐	I 沙三 ^{3A} 盐	沙三中 ⁴⁺⁵⁺⁶⁺⁷	沙三中 ⁴⁺⁵
		I 沙三 ^{3B} 盐		沙三中 ⁶⁺⁷
II 级	II 沙三 ⁴ 盐		沙三中 ⁹⁺¹⁰ 及沙三下	

4.3 各个盐韵律组的发育及分布规律

4.3.1 I 级盐韵律组

洼陷内共识别出 I 级盐韵律组 3 个,自下而上分别是 I 沙三³盐、I 沙三²盐、I 沙一盐,其共性是在凹陷内大部分地区广布、延续性好,单个盐层厚度大,盐韵律发育多,并且在东濮凹陷区域上可对比。在洼陷内这 3 个盐韵律组的分布具有北薄南厚,西厚东薄的特点。

I 沙三³盐,对应于卫城下盐,又分为 I 沙三^{3A}盐和 I 沙三^{3B}盐 2 个亚盐段,分别对应于沙三³上部盐和沙三³中部盐。I 沙三^{3A}盐段在环洼带内广布,向北向南有变薄趋势,从古云集的云 7 井到卫 70 井比较稳定,卫 70 井向南发生相变,单个盐韵律层减薄,直至尖灭。I 沙三^{3B}盐段分布范围小于 A 盐,古云集—陈营地区已完全消失,洼陷南部濮 141 井区域仅有 20~25 m。I 沙三³盐在濮卫洼陷内沉积中心

位于 V83 至 V90 井一带,最大沉积厚度 100 m 左右,在洼陷内最多可发育 19 个盐韵律,单个盐韵律层最厚可达 20.5 m。

I 沙三²盐,对应于卫城上盐的中盐段,主要分布于卫 87、濮 70 井以南区域,洼陷内沉积中心位于 V43 至 V69 井一带,最大沉积厚度 90 m,可分为 19 个盐韵律层,单个盐韵律层最厚达 26 m。该盐组向东逐渐尖灭。

I 沙一盐,主体位于沙一下段,在洼陷内西厚东薄,最大厚度 100 余米,可分为 30 多个盐韵律,单个盐韵律层最厚达近 30 m。洼陷内沉积中心位于洼陷中西侧,主要岩性为灰白色盐岩、石膏层及灰色泥岩、油页岩的中互层。

4.3.2 II 级盐韵律组

洼陷内共识别出 II 级盐韵律组 4 个,自下而上分别是 II 沙三⁴盐、II 沙三¹盐、II 沙二^上盐、II 沙二^下盐,其共性是在洼陷内分布比较局限、延续性差,单个盐层厚度薄,盐韵律发育少,除 II 沙三⁴盐外难以在东濮凹陷区域上进行对比。这些盐组主体分布于濮 83 井至卫 311 井一线,除 II 沙三⁴向北向东向西尖灭外,其余盐组沿 4 个方向延伸都尖灭。

II 沙三⁴盐对应层位沙三中⁹⁺¹⁰及沙三下,在洼陷内由于仅有个别井钻至,研究程度不高,可分为 3~5 个盐韵律,II 沙三¹盐包括沙三上⁵⁺⁶⁺⁷⁺⁸⁺⁹⁺¹⁰盐层,即包含了勘探分层沙二²的上段盐,主体分布于卫 70、卫 43 井区域,可分为 12 个盐韵律,最大厚度约 25 m,盐韵律岩性为盐膏层与薄层泥岩互层。I 沙三²盐和 II 沙三¹盐对应于卫城上盐。

II 沙二^上盐对应层位沙二上⁴⁺⁵⁺⁶⁺⁷,最多可分为 7 个盐韵律,最大厚度约 17 m,盐层向四周很快尖灭。

II 沙二^下盐对应层位沙二上¹⁺²⁺³,主要发育于濮 86 井一带,最多可分为 27 个盐韵律,最大厚度 8 m,盐层向四周很

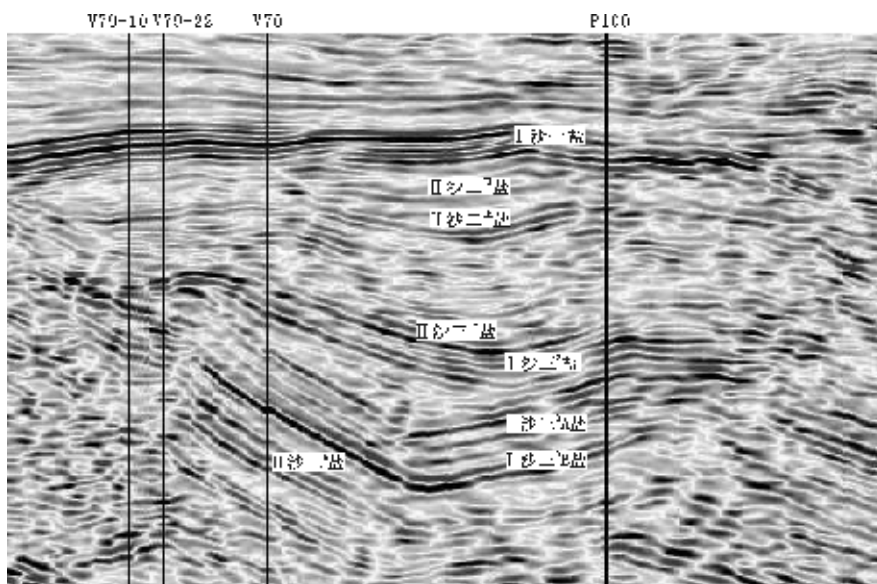


图 3 濮卫洼陷地震剖面盐韵律组划分图

Fig. 3 Division of rhythmic successions at the seismic profile in the Puwei subdepression

表 2 濮卫洼陷盐岩化学成分 (%)

Table 2 Chemical composition (%) of salt rocks in the Puwei subdepression

井号	井深/m	层位	Na	Mg	Al	Cl	K	Ca	Br
V70	3272.8	Es ₃ ^{E1}	37.1	0.373	0.0709	62.1	0.029	0.0742	0.00607
V69	3566	Es ₃ ^{中4}	37.7	0.0219	0.0095	62.0	0.00518	0.223	0.00537
V43	3376	Es ₃ ^{中4}	37.3	0.140	0.0984	62.0	0.041	0.122	0.00631
V42	3279.93	Es ₃ ^{E10}	36.9	0.41	0.0162	61.5	0.00575	0.93	0.00431

注:样品由西北大学教育部大陆动力学重点实验室 x 荧光分析测试。

快尖灭。

5 盐岩成因及沉积模式

5.1 盐岩的矿物及化学组成

薄片、X-衍射分析表明,东濮凹陷盐岩的主要组成矿物为石盐(NaCl)、硬石膏(CaSO₄)、无水芒硝(Na₂SO₄)和钙芒硝(CaSO₄·Na₂SO₄)^[2]。重结晶粒度粗大,化学分析石盐元素组成与上述结果一致(表 2)。

5.2 盐岩的来源

关于东濮凹陷盐岩的来源有 3 种观点(前已述及),笔者认为东濮凹陷沙河界组的盐主要来源于海水的侵入(即事件性的海泛作用),同时又有陆源的影响,主要证据如下:

5.2.1 盐岩中溴微量元素和硫同位素的指相意义

据 Holser(1979)的研究结果,不同成因的石盐岩,溴含量明显不同,海相成因的石盐岩,Br⁻的含量通常高于 60×10⁻⁶,而陆相成因的石盐岩 Br⁻含量低于 20×10⁻⁶,甚至 10×10⁻⁶ 以下^[2,11],通过对濮卫洼陷 4 个井石盐岩的化学分析(表 2),其 Br⁻含量分别为 60.7×10⁻⁶、53.7×10⁻⁶、63.1×10⁻⁶、43.1×10⁻⁶,有 2 个样品值大于 60×10⁻⁶,另两个 Br⁻值接近 60×10⁻⁶,反映了盐岩主要来源于海泛的海水。

前人研究表明^[2],东濮凹陷盐层中的硬石膏的硫同位素 δ³⁴S 值的范围为 +33.1‰~+37.5‰,其特征显著富 δ³⁴S 成分;而古近纪新近纪—现代海洋硫酸盐以及海相成因的蒸发岩的硫同位素 δ³⁴S 大约为 +20‰,沿红海流动的热卤水,其 δ³⁴S 为 +20.8‰。从硫同位素的成因机理讲,海相成因的盐岩,往往富集轻硫同位素 δ³⁴S,陆相成因的盐岩,往往富集硫重同位素 δ³⁴S,造成这种现象的原因在于陆相盆地水体中所含的硫酸盐数量有限,由硫还原菌所造成的生物分馏可以大大改变硫同位素原来的组成,形成 δ³⁴S 的高值,而海相则不具备这一条件,由此可见陆相和海相、深源热卤水的硫同位素 δ³⁴S 的含量明显不同。从硫同位素的组成反映了东濮凹陷盐岩为陆相成因。

东濮凹陷微量元素 Br⁻反映的盐岩来源于海泛的海水与硫同位素反映的盐岩为陆相成因并不矛盾,说明盐岩的形成主要是源于海水但形成于陆相环境。

5.2.2 盐间泥岩微量元素分析表明了海泛的影响

通过对濮卫洼陷 11 口井沙三中³及沙三中⁴盐间深灰色泥岩微量元素测试分析(表 3),可以看出:

V/Ni 值:11 个样品的 V/Ni 都大于 1,显示了海侵成因;

Th/U 值:11 个样品中 9 个样品的 Th/U 比值在 2~6 之

表 3 沙三段盐间深灰色泥岩微量元素分析对比

Table 3 Correlation of trace elements in dark gray mudstone intercalated in salt rocks in the Third Member of the Shahejie Formation

井号	P139	P75	P83	P84	V42	V43	V67	V67	V69	V69	V70
Li	104	69.0	109	77.7	105	162	81.8	112	81.4	117	123
V	81.5	69.2	84.4	60.1	80.6	69.2	23.0	79.5	31.6	85.8	57.5
Ni	50.7	25.2	34.1	23.0	30.4	26.5	8.66	29.7	13.0	29.4	21.1
Cu	31.3	20.3	26.2	16.0	21.9	26.7	6.77	21.0	10.8	21.4	16.1
Zn	49.9	100	43.7	31.9	50.0	44.1	21.9	41.2	29.7	190	35.4
Rb	173	128	162	104.5	167	117	31.7	163	49.2	145	103.7
Sr	164	695	1381	541	492	391	854	296	1924	180	264
Ba	266	372	523	334	706	245	108	275	352	271	193
Pb	35.7	23.8	25.8	19.3	31.5	33.7	7.93	28.0	11.9	25.4	17.7
Th	15.3	11.0	13.4	8.73	15.0	10.7	4.18	13.5	4.84	13.4	9.77
U	4.72	4.45	3.56	3.03	4.44	3.86	7.98	3.55	3.72	3.52	2.60
V/Ni	1.61	2.75	2.48	2.61	2.65	2.61	2.66	2.68	2.43	2.92	2.73
Th/U	3.24	2.47	3.76	2.88	3.38	2.77	0.52	3.8	1.3	3.81	3.75
Sr/Ba	0.62	1.87	2.64	1.62	0.7	1.6	7.91	1.08	5.47	0.66	1.36

注:样品由西北大学教育部大陆动力学重点实验室分析测试,单位为 10⁻⁶。

间(2.47~3.81),有两个样品 Th/U 比值小于 2(0.52 及 1.3),显示了海水影响的特点。

Sr/Ba 值:11 个样品中仅有 3 个样品 Sr/Ba 小于 1(0.62、0.7、0.66),有 8 个样品 Sr/Ba 值大于 1,显示了主要为海侵成因。

Br⁻10³/Cl⁻系数:表 2 的 4 个石盐样品的 Br⁻10³/Cl⁻系数分别为:0.1、0.09、0.102、0.07,有两个值接近海水蒸发盐岩(>0.11)的标准,反映了盐源既有海水又有陆源。

东濮凹陷沙三段 9 个碳酸盐岩氧、碳同位素分析中,有 5 个样品 δ¹³C(PDB)值为+0.36‰~+1.19‰,落在了海水、淡水混合时的 δ¹³C(PDB)数值区间(-3‰~+3‰)^[7]。

5.2.3 海泛的古生物证据

古生物化石也说明了海侵的存在^[6,7]。沙三段沉积期,东濮凹陷发育有各类丰富的古生物化石。沟鞭藻类化石 *Cordosphaeridium* 和 *Achomospharera* 为代表的属种,仅有海相沉积环境的报道,而 *Sinocyta minuta* 和 *S.subtilis* 等均见于新疆塔里木盆地等西部海相地层中;沙一段产丰富的 *Spiniferites puyangensis*,该种虽是一个本区地方种,但这个属的化石沟鞭藻分子多为海产;钙质超微化石 *Abisectus* 则是该带的重要成员,*Coccolithus pelagiatus* 是大洋水体中的常见分子;枝管藻 *Cladosiphonia sinensis* 是一种造礁绿藻化石,现代造礁绿藻多生活于亚热带宁静浅海和潮间带的岩石上;所见鱼化石 *Knightia* sp.的相近现代属在浅海及河口的集群中生活,是广盐性海生生物。

5.3 成盐期的古气候特征

从东濮凹陷古近系古生物化石资料看,东濮凹陷沙三³⁻⁴亚段有较多的藻类等水生生物^[5],说明沙三³⁻⁴亚段沉积时期不完全是干旱成盐环境,而是潮湿与干旱气候交替,因为干旱成盐环境不利于生物生栖繁殖。暗色泥岩与盐膏岩的交替沉积

正好说明了这一点。干早期形成岩盐,潮湿期形成暗色泥岩。

据东濮凹陷盐湖相沙三段的孢粉资料确定的信息函数表明,东濮地区沙三³⁻⁴亚段沉积时植物的分异度与温带植物特征相同,耐旱的麻黄粉含量为 3%~6%;喜湿的被子植物栎粉占 25%左右,说明沙三段沉积时湿润气候为主,干旱气候为辅或半干旱半潮湿气候^[12]。

5.4 盐岩的沉积模式——低水位深水处蒸发成盐

应用层序地层学的概念模式,可以很好地建立盐岩的沉积模式(图 4),笔者认为盐岩在高频层序中为低水位蒸发成因。理由如下:

1)盐膏岩分布局限,多分布于凹陷沉积中心,且多与深色泥岩、页岩互层,说明这是由于气候的干旱与潮湿高频变化韵律形成的。干早期湖平面下降,湖水浓缩到一定浓度就在湖盆中心沉淀结晶石膏盐、盐岩,在沉积中心侧的斜坡地带可以形成扇三角洲砂体与盐岩同时异相。潮湿期湖平面上升,偶而伴以海泛的影响,湖平面水位高,在湖盆中心处就沉积了深色泥岩或页岩。

2)东濮凹陷盐岩、膏岩、碳酸盐岩在垂向沉积序列上显示出蒸发成因。在每一沉积序列的开始,为暗色泥岩与薄层碳酸盐岩韵律互层;之上为薄层石膏或暗色泥岩夹薄层石膏或暗色泥岩中含各种石膏晶体,最上部为 10~30 cm 厚的盐岩。由于碳酸盐的溶解度低,只要湖水稍微浓缩,碳酸盐就开始沉淀,此时,仍可能有陆源碎屑物质的供给,因此易形成碳酸盐岩与暗色泥岩互层。当水体浓缩到 10%时,石膏开始沉淀,主要形成石膏纹层,由于此时黑色泥岩含石膏晶体。当水体浓缩到 5%时,盐岩开始沉淀,由于盐岩的溶解度高,其沉淀的速度也快,因此往往形成厚层的盐层。

3)盐岩、膏岩、碳酸盐岩在平面展布上显示出蒸发成因。平面上盐岩一般位于盆地沉积中心,以盐岩为中心向四周逐渐过度为膏岩、碳酸盐岩及碎屑岩,这是由于盆地沉积中心受淡水影响较小。

4)从钻测井岩性组合、测井曲线识别的准层序组叠置方式可以确定盐韵律组及盐韵律形成于低位期(图 2)。

参考文献(References):

- [1] 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):386~388.
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): 386~388(in Chinese with English abstract).
- [2] 金强,黄醒汉.东濮凹陷早第三纪盐湖成因探讨[J].华东石油学院学报,1985,(1):1~13.
Jin Qiang, Huang Xinghan. Discussion on the causes of saline lake of Palaeogene in Dongpu depression [J]. Journal of Huadong Oil College, 1985, (1): 1~13(in Chinese with English abstract).
- [3] 顾家裕.东濮凹陷形成环境[J].石油实验地质,1986,8(1):22~28.

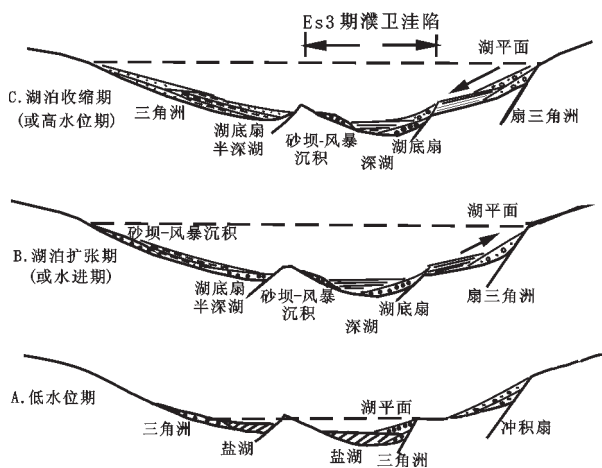


图 4 濮卫洼陷高频层序中盐岩的沉积模式

Fig. 4 Sedimentary model of salt of rocks in high-frequency sequence in the Puwei subdepression

- Gu Jiayu. The depositional environment of salt rocks in Dongpu depression[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1986, 8(1):22~28 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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 evaporates of Dongpu basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 386~388(in Chinese with English abstract).
- [5] 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(in Chinese with English abstract).
- [6] 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):66~75.
- 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):66~75 (in Chinese with English abstract).
- [7] 任来义, 林桂芳, 赵志清, 等. 东濮凹陷早第三系的海侵事件[J]. *古生物学报*, 2000, 39(4): 553~557.
- Ren Laiyi, Lin Guifang, Zhao Zhiqing, et al. Early Tertiary marine transgression in Dongpu depression [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(4): 553~557(in Chinese with English abstract).
- [8] 郑鸿稳. 东濮凹陷下第三系层序地层模式[J]. *石油学报*, 2002, 23(4): 24~28.
- Zheng Hongwen. The sequence stratigraphic model of Palaeogene in Dongpu depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(4): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨香华, 陈开远, 石万忠, 等. 东濮凹陷盐湖层序结构与隐藏油气藏[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(2):139~142.
- Yang Xianghua, Chen Kaiyuan, Shi Wanzhong, et al. Saline lake sequence structure of Dongpu depression and subtle reservoir [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(2):139~142(in Chinese with English abstract).
- [10] Wheeler H E. Base level, lithosphere surface and time-stratigraphy [J]. *Bull. Geol. Amer., Soc*, 1964, 75: 599~610.
- [11] Holser W T. Trace elements and isotopes in evaporites [J]. *Mineralogical Society of America Short Course Notes*, 1979, 6: 295~346.
- [12] 朱家蔚, 辛茂安, 许化政. 东濮凹陷油气生成特征[A]. 见: 中原石油勘探局. 东濮凹陷油气生成地球化学特征[C]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 1~48.
- Zhu Jiawei, Xin Maoan, Xuhuaizheng. Characteristics of oil and gas in Dongpu depression[A]. In: *Geochemical Characteristics of Oil and Gas Formation in Dongpu Depression*[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991. 1~48(in Chinese).

Development pattern of salt rocks in the Puwei subdepression of the Dongpu depression and their genesis

QU Hong-jun, LI Wen-hou, MIAO Jian-yu, PANG Jun-gang

(The Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education;
Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Very thick salt rocks are developed in the Puwei subdepression of the Dongpu depression. To ascertain their development pattern and genesis is of great significance for the study of the regional geology and oil and gas exploration. Using the basic theory and method of high-resolution sequence stratigraphy, on the basis of an integrated analysis of the cores, logs and seismic data, combined with an analysis of the basin structure and stratigraphy, seven salt rhythmic successions are recognized in the Paleogene Shahejie Formation in the study area, of which 3 are of the first order and 4 are of the second order. The development and distribution pattern of each salt rhythmic succession is analyzed. Geochemical and paleontological analyses indicate that the Eocene climate in the area had high-frequency dry-moist change, that the source of salt rocks was mainly seawater in the marine flooding period, and that salt rocks in the high-frequency sequences formed by evaporation of water at depths during the dry lowstand phase.

Key words: Puwei subdepression; salt rhythmic succession; genesis of salt rock; marine flooding; lowstand