王首良,李元昊,马婷钰,等. 滨里海盆地早二叠世孔谷期盐构造特征及其形成机制[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(1): 65-78. WANG Shouliang, LI Yuanhao, MA Tingyu, et al. The salt structure characteristics and formation mechanism of Early Permian Kungurian in Pre-Caspian Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(1): 65-78.

滨里海盆地早二叠世孔谷期盐构造特征 及其形成机制

王首良^{1,2},李元吴^{1,2*},马婷钰^{1,2},段祎乐^{1,2}

(1 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065)

摘 要:滨里海盆地为自寒武系以来多期沉降的大型叠合含盐盆地,也是世界上油气资源最 丰富的大型沉积盆地之一。下二叠统孔谷阶含盐层系在全盆皆有分布,岩盐层具有厚度大、 分布广、后期变形构造样式多等特征,但厚层岩盐形成机制尚有争议,盐构造变形类型、空间 组合分布规律、变形主控因素等尚不明确。为了研究盆地巨厚盐构造的形成机制及分布规律, 在深入了解区域地质背景基础上,利用二维地震剖面资料,采用平衡剖面恢复方法,从全盆地 的角度分析盆地演化过程与盐构造变形样式及分布规律,并探讨了盆地盐构造形成演化过程 及触发机制。结果表明,盐岩变形程度由盆地中央向盆地边缘减小,由盆缘盐滚、盐背斜构造 向盆地中心盐墙构造变化,呈现分带特征。盐岩层的变形对盐下地层影响较小,地层连续性 较好;对盐上地层穿插切割较强,导致盐上地层连续性差,形变剧烈。先存斜坡和盆缘的挤压 作用是盐岩层最初开始形变的因素,而上覆地层的差异负载作用是盐岩层发生构造变形的主 导因素。滨里海盆地连续且巨厚的致密盐岩层是一个天然盖层,阻止了油气向上运移,盐下 地层应是未来油气勘探的重点目标,同时,局部岩盐变形消失后使上下地层连接,利于油气向 上运移成藏,形成盐上油气勘探目标区。

关键词:滨里海盆地;盐构造;构造变形;平衡剖面;形成机制 中图分类号:P744.4;P618.13 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.298

0 引言

盐构造是指由于岩盐或其他蒸发岩的流动变 形所形成的地质变形体,包括盐变形体本身及其周 围的其他变形岩层^[1]。盐丘相关的圈闭是盆地油气 成藏和富集的重要因素,由于盐构造对油气成藏具 有重要的影响,所以其研究受到极大关注,成为全 球含盐油气盆地中的研究热点^[2-5]。在全球含盐油 气盆地中,南大西洋被动陆缘盆地下白垩统盐构造

收稿日期: 2022-10-28

资助项目: 陕西省教育厅 2020 年度重点科学研究计划"里海超级含油气 盆地地质"(20JS127)

第一作者: 王首良(1999-), 女, 在读硕士, 主要从事构造地质学方面的研究工作. E-mail: wsl97999@163.com

*通讯作者: 李元昊(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积学、构造地 质学方面的研究工作. E-mail: 51396434@qq.com

类型主要为盐珠、盐席,盐构造形成的主导因素为 多期重力变形的构造改造^[6];墨西哥 Burgos 盆地渐 新统-- 更新统浅层盐构造主要以盐席、盐蓬为主, 深层母岩的溢流沉积和深浅两套盐的空间配置关 系为浅层盐构造形成的主导因素^[7]。滨里海盆地石 油资源丰富,是一个典型含盐盆地,在中下二叠统 孔谷阶发育有巨厚盐层,盐层厚度变化范围从几十 米至几千米不等,并同时产生了许多盐丘以及与盐 丘有关的盐构造^[8]。前人对滨里海盆地的主要研究 方向集中在与盆地相关的沉积相^[9-10]、油气地 质^[11-13]、储层^[14-15]等,对盐构造的研究多集中在某 区块范围内[16-18],或集中在某时期的特定构造活动 影响中^[19],而本文依据相关资料,从全盆地的角度 分析盐构造分布特征,并选取相关剖面进行平衡剖 面恢复,分析盆地盐构造特征及其形成机制,发现 盐岩层对盐上、盐下构造层的影响和对油气勘探的 指导意义。

1 地质背景

1.1 构造背景

滨里海盆地位于东欧地台东南隅,为克拉通边 缘前陆盆地,北部是伏尔加-乌拉尔地台,南部是广 阔的斯基泰地台和图兰地台^[20]。盆地的北部和东 北部毗邻伏尔加-乌拉尔盆地和海西期乌拉尔山前 褶皱带,乌拉尔山前褶皱带以东为哈萨克斯坦板块; 东部和东南部以南恩巴隆起带为界与北乌斯秋尔 特盆地相邻;南部和西南部以顿巴斯大型逆掩断层 的延伸部分为界与北高加索盆地和里海相邻;西北 部以深大断裂带或挠曲带为边界与古老的东欧地 台一系列隆起构造单元分隔^[12]。滨里海盆地划分 为4个次一级单元,分别为北-西滨里海次盆、中央 凹陷、东滨里海次盆和南滨里海次盆(图1)^[21-22]。 盆地的典型特征是在下二叠统孔谷阶发育一套厚 达数十米到几千米不等的盐层,并形成多个盐丘和 与盐丘相关的盐构造^[23-24]。





据前人研究[13,25-26],盆地最早在早一中泥盆世形 成时,位于乌拉尔洋的西边,古特提斯洋的北边。 早泥盆世末期,盆地北部出现一条 EW 向的滨里海 北部裂谷,以洋壳为基底,向东止于艾伦迪克弧。 晚吉维特期--早弗拉斯期,东欧地台沿着一条新的 裂谷(即顿涅慈-卡宾斯基-南恩巴裂谷)发生顺时针 旋转,新裂谷构成了滨里海盆地的南缘。早石炭世 杜内期,北高加索-卡拉博加慈地块与东欧地台南缘 的碰撞导致裂谷闭合和反转,东部挤压构造尤其强 烈,形成南恩巴逆冲带。在这个时期,裂谷的北缘 可能发生了一系列向北的逆冲作用。东乌拉尔地 块是乌拉尔洋内的一个陆块,早韦宪期在东欧地台 东部边缘形成,导致盆地内部隆起和侵蚀,主要集 中在东部(图 2)。乌拉尔洋的最后封闭发生在中巴 什基尔期,标志着哈萨克斯坦大陆与东欧地台的碰 撞,并导致了进一步的抬升和逆冲作用,形成了盆

地大范围的不整合和局部的粗碎屑沉积(表1)。

盆地内下二叠统孔谷阶(P₁kg)盐岩层全盆 分布是盆地最典型的特征,因此,在整个盆地的沉 积层序上可划分出盐下、含盐和盐上3套层系^[13] (表1)。

1.2 油气地质特征

滨里海盆地是全球典型的含盐盆地,油气资源 非常丰富。盆地石油剩余可采储量为 38.2×10⁸ t,天 然气剩余可采储量为 42.8×10⁸ t^[29],盆地油气资源 主要为气和凝析气,多集中在盐下层,约占总量的 96%;而盐上层主要含油。盐岩层系属于下二叠统 上部孔谷阶,盐岩层为盐下层系最重要的区域性盖 层,对油气运移及聚集有明显控制作用;在盆地北 部、东部和南部,盐岩与盐下大型油气藏的分布关 系紧密,起到直接或间接的封盖作用^[30]。



图 2 滨里海盆地构造演化简图 Fig.2 Schematic diagram of tectonic evolution of the Pre-Caspian Basin

2 二叠系盐构造特征

2.1 盐构造类型及变形特征

盐岩层要形成盐底辟构造必须拥有足够厚的 盐源层,若盐源层较薄则无法形成,只能作为区域 的滑脱层参与构造变形^[31]。滨里海盆地沉积了足 够厚的盐岩层,也使盐构造成为滨里海盆地最显著 的构造形变特征。由于初始盐岩层存在的厚度差 异,后续盐底辟的产生也更使这种厚度差变大,构 造形式多样。整个盆地的主要盖层是孔谷阶盐岩 层,下二叠统还含有黏土岩层,在单个油田的规模 上起着封闭作用。这一层的厚度差别很大,除了孔 谷阶蒸发岩之外,在盆地的一些边缘地带,盐从未 沉积过的地方,也通常保留着一个碱性硬石膏层, 盆地中西部等大部分地区还发育喀山阶蒸发岩,在 西南部还发育了亚丁斯克阶蒸发岩^[20]。现在盐岩 都以各种盐构造的形式表现,在剖面上分别形成了 盐丘构造与盐缘坳陷相间分布的格局。

据 IRIS 21 数据库资料和数十条剖面研究(图 3), 滨里海盆地的盐丘之间既单一生长又相互联系,总 体上都是从其幅度及成熟度较低的整合接触型向 着幅度及成熟度较高的刺穿侵入型演化。依据盐 体形变程度及其与上覆地层之间的接触关系,以及 盐丘构造生长过程与围岩的相互作用关系,将盆地 内盐丘分为整合接触非刺穿型、隐刺穿型和不整合 接触刺穿型盐丘 3 类^[13,32](表 2、图 4)。

2.1.1 整合接触非刺穿型盐丘

盐构造变形程度小,未刺穿上覆地层,上拱幅 度较小,从数十米到几百米,上覆地层仅发生微弱 褶皱变形,没有缺失,地层序列也未发生改变,并与 盐丘顶面产状一致,与上覆为整合接触,通常分布 在盆地边缘及外围,以盐枕、盐背斜为代表(表 2)。

表 1 滨里海盆地地层层序简表 (据 IHS 数据库资料^[28])

 $Table \ 1 \quad Stratigraphic sequence \ of \ the \ Pre-Caspian \ Basin \ (according \ to \ IHS \ database^{[28]})$

| 地层划分 | | | | | | 生储盖组合 | | 地层 | 岩相 | お火車は |
|----------|------|-----------------|------|--|---|--------|---|-------------|----------------|--------------------------------|
| | 界 | 系 | 统 | 阶 | 生 | 储 | 盖 | 序反 /m | 类型 | 何但事件 |
| 盐层系 | 新生界 | 新近 系 | | | | | | 790 | 陆相 | |
| | | 古近 系 | | | | | | 340 | 浅海 相 | |
| | 中生界 | 白垩系 | | | | | | 532 | 海陆 过渡 相 | |
| | | 侏罗 系 | | * | | | | 500 | 滨浅 海、 湖相 | |
| | | 三叠系 | | - | | | | 1 137 | 浅海 棚 相 | |
| | | | 上二叠统 | 鞑靼阶喀山阶乌菲姆阶 | | | | 980 | 湖泊 相 | |
| 含盐 层系 | | | | 孔谷阶 | | | | 2 000 | 闭塞 海盆 | |
| | | | 下二叠统 | 亚丁斯克阶 | | | | 80 | 浅相 | 南部卡拉库尔-斯缪什科夫逆冲带和南恩巴逆 冲带重新活动 |
| | | | | 萨克马尔阶 | | | | 150 | | |
| | | | | 阿瑟尔阶 | | | | 60 | | 次序碰撞和相对抬升 |
| | | 石炭系 | 上石炭统 | 格泽里阶 | | - - | | | | |
| | | | | 卡西莫夫阶 | | | | ? | | |
| | | | 中石炭统 | 莫斯科阶 | | | | 370 | | |
| 盐层系 | | | | 巴什基尔阶 | | | | 75 | | 乌拉尔洋最终闭合 |
| | | | | 谢尔普霍夫阶 | | | | | | |
| | | | 下石炭统 | 韦宪阶 | | | | 605 | | 东乌拉尔地块碰撞,形成南恩巴褶皱带 |
| | | | | 杜内阶 | | | | 200 | | 南恩巴裂谷闭合 |
| | | . 泥盆 | 上泥盆统 | 法门阶 | | | | 205 | | 第聂伯-顿涅慈-卡宾斯基-南恩巴裂谷带阶段 |
| | | | | 弗拉斯阶 | | | | 312 | | |
| | | | 中泥盆统 | 吉维特阶 | | | | 94 | | 滨里海北部裂谷后沉降的开始 卫投尼托尔斯古地也迷掉 |
| | | | | | | | | 60 | | 当 |
| | | | 下 | | | | | | | |
| | | | 泥盆统 | | | | | 400+ | 海陆过渡 | 滨里海北部凹陷 |
| | | 志留 系−寒 武系 | | | | | | 20 000 ? | 相 | |
| | 前寒武系 | | | | | | | | | |





Fig.3 Seismic interpretation profile of the Pre-Caspian Basin

2.1.2 隐刺穿型盐丘

隐刺穿型盐丘构造会使盐丘顶部地层减薄甚 至缺失,但盐丘的生长仍处于较低成熟的演化阶段, 故称之为隐刺穿型盐丘,以盐滚为代表。

2.1.3 非整合接触刺穿型盐丘

 变化剧烈,中间巨厚、两侧急剧减薄,与围岩呈大 角度不整合接触关系,是盐构造后期形态,成熟度 较高。如盐墙、盐株、盐脊、盐悬挂、盐篷、盐焊 接等。

2.1.4 其他与盐构造相关的构造样式

盐岩活动过程中围岩及盐上层所产生的构造 变形、沉积作用、剥蚀等作用的记录,如龟背构造、

| 表 2 | 滨里海盆地盐构造类型分类及特征 |
|-----|-----------------|
|-----|-----------------|

Table 2 Classification and characteristics of salt structure types in the Pre-Caspian Basin

| 类型 | 名称 | ————————————————————————————————————— |
|-----------------------|--------|--|
| 整合接触非刺 穿型盐丘 | 盐枕 | 早期盐构造,中间厚边缘薄的、平面上呈圆形的盐隆,剖面上呈枕状,形态上表现为上凸下平,继续活动形成盐珠 |
| | 盐背斜 | 形态较为对称,盐枕构造因塑性流变而进一步发展,逐步汇聚形成盐背斜(图4) |
| 隐刺穿型盐丘 | 盐滚构造 | 幅度低,两翼不对称,缓倾一翼与上覆地层整合接触,陡倾一翼由于存在断层使盐岩沿断层挤入,与上覆地层以正断层接触 |
| 非整合接触刺 | 盐墙 | 狭长条带状,如墙体一样,沿断层发育,具深层盐核及延伸很长的长轴盐背斜构造形态(图4) |
| | 盐珠 | 顶部呈圆形的颈装刺穿体,成熟度高,幅度大(图4) |
| | 盐脊 | 在断层作用下盐岩沿着断面进一步向上运动,最终对上覆上二叠统甚至侏罗系产生刺穿 |
| 穿型盐丘 | 盐悬挂 | 或称盐悬边,一般和其他盐构造伴生,剖面形状不对称,岩盐朝着侧向延伸侵入,好象悬挂在地层中(图4) |
| | 盐蓬 | 一种复合型盐构造体,由多个盐悬挂侧向扩张连接起来组成的 |
| | 盐焊接 | 发育于盐丘构造之间的凹陷底部,盐岩经过塑性流动,原先被盐岩层分隔的盐上地层与盐下地层直接接触(图5c) |
| 其他与盐构造 相关的构造 样式 | 龟背构造 | 发育于盐源凹陷内,由于盐流动引起构造反转而形成,盐间凹陷的地层上隆变形,短轴状的为龟背构造,长轴的为 背斜构造 |
| | 残余盐高 | 具有盐芯的反形式,可能与相邻的圆顶断开连接。在这些结构中,高结构点始终处于高位,低点始终处于低位(图5b) |
| | 盐丘间凹陷 | 在两个或多个盐丘之间常发育由上二叠统一中生界组成的坳陷,可称之为"盐缘坳陷"或"盐丘间凹陷",受控于盐构造运动(图4) |
| | 盐丘顶部断层 | 盐丘顶部形成断层密集分布的地带,形成于大规模的盐运动中所产生的局部张扭性构造作用,常与部分龟背构造伴生,剖面上表现为"Y"字形断裂,平面上呈环形围绕核部向四周呈放射状分布(图5b) |



Fig.4 Deformation patterns of major salt structures in the Pre-Caspian Basin

残余盐高、盐丘间凹陷、盐丘顶部断层等,通过对这 一系列现象的研究,对盆地演化、识别盐构造运动、 油气聚集成藏都有重要意义。

2.2 盐构造平面分布规律

结合盆地剖面图和盐构造的变形特征可知:滨 里海盆地盐岩厚度巨大,厚度变化剧烈,盐构造形 态多样;除盆地周缘斜坡盐丘成熟度低,大部分区 域盐丘的幅度和成熟度都较高,为刺穿型盐构造。 据盐构造形态与盐丘成熟度,可将盆地盐构造划分 6个盐构造带(图 5a)。

(1) 盆地外围二叠系盐层层状分布带(A区)

位于盆地的西北缘和北缘外,盐层与碳酸盐 岩形成互层,由于该地区处于稳定的伏尔加-乌拉尔 地台上,变形微弱,基本呈平缓的层状分布,厚度 <500 m。

(2)盐滚、盐墙构造带(B区)

位于盆地北缘和西北缘边缘及西南缘,处于稳 定构造环境。邻近滨里海盆地北部存在局部隆起, 所以盐岩层发生形变,发育等轴状的盐枕构造,形 态较为对称,在盆缘陡坡带的延伸部分发育盐滚构 造,盐层厚度增加到 500 m 以上。

(3) 盐背斜构造带(C区)

位于盆地的东缘和东南缘,盐层厚度为 0~ 1 000 m。受乌拉尔造山带和南恩巴褶皱带的作用, 发育不对称倾斜的岩墙,边缘发育盐背斜。盐岩层 的变形更为剧烈,发育盐焊接构造和龟背构造。

(4) 盐珠、盐墙发育带(D区)

环绕伏尔加-乌拉尔造山带和南恩巴构造带。

受其影响,盐构造运动由盆地东缘、东南边缘再向 盆地内部推进,进而形成了带状盐株构造。

(5)盐悬挂构造带(E区)

早侏罗世盐岩底辟构造强烈,仅孔谷阶盐层发 生底辟作用,后期由盆地南部、东南部边缘向盆地 内部推进,在环绕盆地中心部位形成盐体悬挂构造 发育带。

(6) 巨型对称盐墙发育带(F区)

位于盆地中心地区,盆地中心区域保持着连续 沉积过程,孔谷阶和喀山阶的盐层都发生了底辟作 用,盐岩的长期、持续运动形成了规模宏大的对称 型盐墙构造。

综上可以看出,滨里海盆地盐构造广泛,全盆 地均有分布。盆地中央盐构造变形最强烈,刺穿上 覆地层,主要发育巨型盐墙、盐珠和盐悬挂;盆地边 缘盐构造变形较弱,主要发育层状盐岩、盐枕和盐 背斜。整体呈现一个盐构造变形程度由盆缘向盆 地中央逐渐增强的分带特征。

3 厚层盐岩和盐构造形成演化

盆地内盐构造形变与盆地演化密切相关,由于 盐岩层埋深巨厚和变形剧烈,论证盐构造的形成过 程和相关影响因素较为困难。平衡剖面技术目前 在盆地构造演化模拟^[34]、地震解释^[35]、估算滑脱面 的深度^[36]、恢复断裂带地层展布^[37]、探讨盆地演化 阶段伸展和走滑作用的叠加配比关系^[38]、研究盆地 伸缩率的时空变化及构造演化过程^[39]都有广泛应 用,并逐渐应用于复杂构造解释当中,对研究区的 构造演变恢复能做出合理解释。

3.1 平衡剖面原理

平衡剖面技术是根据物质守恒定律提出的,如 层长、面积和体积守恒。平衡剖面的制作是通过卸 载剖面来模拟分解和均衡响应,然后将剖面的其余 部分展开到一个恢复的基准面,或者一个区域古水 深测量面,再恢复区域内的断层和断层相关的褶 铍^[40-42]。它最早由 ROWAN 提出^[43],引入了均衡 调整的概念,所以可使用于存在盐构造区域的剖面 恢复。本文运用面积守恒原理,计算每一次剥蚀盐 岩的面积差,以减小误差。选取 BB'和 CC'这两条 垂直相交的代表性剖面对其做二维平衡剖面恢复 (剖面位置见图 1),并据此对盐岩的形成机制和影 响因素及盆地演化过程等做出相应解释。



 A: 盆地外围层状分布地区
 B: 盐滚构造带
 C: 盐背斜构造带
 D: 盐珠发育带

 E: 盐悬挂构造带
 F: 巨型对称盐墙发育区
 G: 盐下盆缘陡坡带

 (a) 盆地盐构造分带示意图





3.2 BB′剖面

剖面位于盆地东部,穿过乌拉尔地区、前乌拉 尔海槽、阿斯特拉罕-阿克纠宾斯克隆起带,直达滨 里海盆地中部。前乌拉尔海槽地区盐丘未刺穿上 覆地层,被上二叠统覆盖,多发育盐枕、盐背斜构造。 阿斯特拉罕-阿克纠宾斯克隆起带盐丘刺穿上覆地 层,上二叠统被局部剥蚀,仅存于盐丘间凹陷地区, 盐丘上部多被三叠系覆盖;盐丘顶部地层出现断层, 断层贯穿三叠系直到侏罗系;盐丘变形强烈,多发 育盐珠、盐悬挂构造,东部出现盐焊接构造。滨里 海盆地中部盐丘刺穿上覆地层,盐丘间凹陷多充填 上二叠统、三叠系,部分还充填侏罗系;盐丘变形最 剧烈,多发育巨型盐墙,盐层厚度巨大。根据剖面 盐岩上覆地层厚度变化将盐上覆地层分为受盐构 造变形影响地层和未受盐构造变形影响地层两部 分。对未受到盐构造变形影响的新生代地层先进 行构造恢复,再拉平白垩系地层,消除变形,复原受 上覆地层影响的盐构造剖面;以此过程依次恢复侏 罗系、三叠系和二叠系地层。从恢复过程来看,剖 面西部发育刺穿型盐丘,盐层厚度大,东部发育非 刺穿型盐丘,盐层厚度小(图 6)。

BB'剖面线与盆地构造运动方向一致,在剖面东 部发育因乌拉尔造山运动产生了叠瓦状正断层。盆 地上二叠统和三叠一侏罗系盆地存在抬升挤压运动, 使盐岩层上充填了大量的碎屑物质,由于盐岩层和 上覆地层的密度差引起的浮力作用使盐岩层向上运 动,并影响着上覆层的构造变形和沉积作用。三叠 系地层最初沉积时较为连续,但当盐构造活动持续 变形的时候,三叠系地层最终大部填充于盐丘间凹 陷;与盐丘顶部接触的三叠系和侏罗系地层产生一 系列正断层,盐岩在流动过程受到断层阻挡,改变流 动方向,挤入断层裂隙,影响盐构造形态。白垩纪后 地层对盐构造影响相对较小,本身形变也较小。

总之,乌拉尔洋的闭合形成了盆缘斜坡,晚二 叠世盐岩层沉积,上二叠统盐岩层上覆地层沉积较 薄,此时盐岩层的形变发生在盆缘斜坡上。晚三叠 世盆地内沉积了较厚的沉积物,盆地中央盐构造形 变加剧;盆缘由于源盐层和上覆地层较薄,盐构造 变形程度较盆地中央明显偏弱。侏罗纪和白垩纪 地层加剧了盐构造形变,并且形成了盐焊接和盐丘 顶部断层等伴身构造,盐构造成熟度很高。新生代 的沉积由于厚度较薄且距盐岩层较远,对盐构造的 形变影响较小。

3.3 CC'剖面

剖面贯穿盆地南北部,从现今剖面可以看出盆 地盐构造变形强烈,盐岩层厚度巨大,盐岩上覆地 层出现部分地层缺失。不考虑盐构造运动进行恢 复,先依据剖面盐量对盐构造展平,再依次剥蚀恢 复上层地层,结合该地区大地构造活动可以简要概 述盆地的演化过程(图 7)。

早二叠世盆地受南北方向挤压,导致南恩巴逆 冲带的重新活动和其两侧碎屑磨拉石的沉积。阿 丁斯克期南部卡拉库尔-斯缪什科夫逆冲带和南恩 巴逆冲带重新活动,形成了盆地周缘山系,盆内发 生快速沉降,滨里海盆地内的海洋与世界海洋大部 分隔绝,形成超咸化深水海盆,这导致了孔谷阶厚 层且连续的蒸发岩沉淀,成为了一个优质盖层。早 二叠世,大部分地区已发展成为洼地,但东南部是 一个独特而又平缓的相对隆起区^[21-22]。孔谷期末, 盆地变成了一个相对浅水的陆内水体,盆地东部的 乌拉尔造山运动提供了充沛的陆源碎屑物质,导致 盆内沉积了碎屑岩地层。直到晚三叠世,盆地持续 沉降,但速度越来越慢,并且三叠系沉积模式深受 孔谷阶盐构造的影响。在三叠纪和侏罗纪之交,南 部古特提斯洋闭合,产生了最强烈的冲断期,使卡 拉库尔-斯穆什科夫冲断带重新活动,南恩巴逆冲带 也再次隆升。白垩纪,滨里海盆地的沉降基本停止, 横跨盆地的白垩系和新生界沉积,虽然分布广泛, 但厚度很薄。

综上,乌拉尔洋的闭合和盆缘周围山系的形成 导致滨里海盆地内的海洋与世界大洋隔绝,使滨里 海盆地成为一个超咸化海盆,孔谷阶盐岩沉积后, 盆地整体处于稳定沉积环境中,部分地区有小范围 的挤压或伸展运动。

4 厚层盐岩的形成及盐构造形成机制

4.1 厚层盐岩形成模式

目前国内外学者对盐岩沉积模式大概有萨布哈 学说、沙漠盆地学说、反流学说、分离盆地学说、深 水深盆理论、干缩盆地学说等。由于滨里海盆地是 处于相对稳定并且封闭的构造环境,期间盆内一直 存在常年盐湖,阿斯特拉罕-阿克纠宾斯克隆起带北 部的里海对盆内存在周期性的补充;加之盆内沉积 物存在浮游有孔虫、硬石膏等^[44],可以认为滨里海 盆地是一种类似于萨布哈模式的深盆干化成盐模式。

深盆干化成盐模式又称为深盆浅水成盐模式, 要使盐类物质持续沉积造成巨厚盐岩层,必须满足 以下3个条件:①处于稳定沉降和相对封闭的构造 环境。由于盆地内存在巨厚盐层,要保持蒸发岩矿 物沉积作用持续进行,除了需要盐类矿物的持续补 给,还需要盆地有充足的可容空间,否则沉积盆地 将会被填平补齐,沉积作用难以继续^[45-46]。滨里海 盆地自海西期末乌拉尔洋的闭合,使滨里海盆地独 立于古特提斯洋成为一个超咸化且仍在持续沉降 的深盆。②海水的阶段性补给。东南部的南恩巴 隆起带和阿斯特拉罕-阿克纠宾斯克隆起带与特提





Fig.6 Balanced cross section of the transection BB'

斯洋形成一个障壁,全球二叠系层序划分及对比结 果表明,二叠系 15 个三级层序代表 15 次三级周期 相对海平面旋回产物;其中,至少有 6 次海平面升 降事件具全球成因意义^[47],当海平面上升时,盆地 接受里海的周期性供给(图 8)。③干旱或半干旱气 候。早二叠世至中二叠世期间,大气二氧化碳浓度 增加4倍,海水增温近10℃,全球增温,大规模冰 川逐渐消融,大量沉淀进入沉积物中,给盐类物质 沉积创造了条件。在早二叠世时期持续干旱的气 候条件下,随着蒸发作用的加强,海水含盐浓度不



图 7 CC'剖面平衡演化 Fig.7 Balanced cross-section of the CC'

断提高,浓卤水在水体表面形成,盐岩不断从海水 中析出,并下沉到盆地底部。在下一个潮流到来时, 盆地又补充高盐度海水,沉淀盐类矿物,历经多次 蒸发-补充循环,直至盆地完全与大洋失去联系,盆 地最终被蒸发岩充填,形成巨厚蒸发岩^[48]。蒸发岩 在地表易于风化淋滤或溶解,长期暴露地表不利于 盐岩保存。晚二叠世一三叠纪,盆地接受了来自南 部、东南部山系及北部台地区的陆源碎屑持续供



给,覆盖在孔谷阶盐岩层之上,使得厚层盐岩得以 保存^[51]。

4.2 盐构造形成机制

盐岩具有特殊的力学和流变学性质,具有较高 塑性,在变形过程中表现为黏性流动,如抗压强度 较弱、弹性模量较小、易溶、易变、易流、密度低等 特点^[1]。近年来,大多数学者在研究盐构造形成机 制时认可并采用 JACKSON 等^[52]总结提出的6种 盐构造影响因素:浮力作用、差异负载作用、重力扩 张作用、热对流作用、挤压作用、伸展作用。结合 上文和相关文献^[6,20,24,53], 滨里海盆地沉积的巨厚母 岩层使盆地盐构造样式各异, 本文认为影响滨里海 盆地盐构造的影响因素包括以下几方面。

4.2.1 先存构造的影响

盆缘斜坡和浮力作用诱发了盆地最早的的盐 构造活动,石炭纪一二叠纪的盆地西缘冲断带的重 新活动导致盐层下存在先存隆起,盐的构造变形也 首先集中于先存隆起处,且此处的盐构造变形最为 强烈(图 9)。古隆起形成伴随断裂构造,有利于油 气运移,且上部盐岩层也相较其他地区厚,在此可 形成一个良好的圈闭^[54]。

断层阻挡盐构造运动主要是改变了盐岩的顺 层流动方向。盐上地层的厚度增大,盐构造的形变 加剧导致上覆地层在盐构造顶部出现断层,使盐岩 沿断层活动,造成盐岩汇聚。断层还可以阻挡盐层 由于重力作用向低处汇聚的运动。断层后期活化, 能破坏盐层及上覆地层稳定状态,导致盐岩沿断层 裂隙向上流动隆升;油气也会沿着断裂聚集、运移。 4.2.2 差异负载作用

差异负载作用是指由于盐源的供应速率、溶解 速率及上覆地层的岩石类型、厚度、密度和强度的 不同,而形成差异负载,导致盐岩由高压力区流向 低压力区^[55]。形成滨里海盆地盐构造最主要的因 素为差异负载作用,从平衡剖面过程可以看出,盐 构造的形变程度随着上覆地层的厚度增大而形变 更剧烈,上覆负载压力大地区的盐岩会流向上覆负 载压力小的地区,形成盐丘构造,盐丘也从非刺穿 型盐丘向刺穿型盐丘转变。盐构造形成通常导致 盐丘上部地层发生形变和剥蚀、地层弯曲变形甚至 产生断层,盐岩上覆地层也会由于剥蚀量的不同而 存在差异负载。在盐构造形成过程中对周围区域



Fig.9 Schematic diagram of influence of ancient uplift on salt rock deformation

沉积作用产生影响,在区域上存在若干局部沉积中 心,造成上覆同沉积层厚度发生变化。盐岩可以防 止油气的垂直运移,并使盆地边缘的圈闭能够被较 深盆地相对远距离的侧向运移所补充,但这也导致 了盆地油气含硫量高的严重问题。

4.2.3 挤压、伸展运动

在盐岩层沉积前,早石炭世的盆地抬升挤压运 动能为该地区范围内提供大量的碎屑物质供给,使 初始盐岩层厚度存在差异;在盐岩沉积后,南部古 特提斯洋的最终闭合导致了晚三叠世的大规模逆 冲运动,使先存盐底辟发生后期变形。盆地盐构造 的分带特征也体现盐构造活动强度与构造运动强 度呈正相关,向盆地中心方向盐构造更成熟。主动 盐底辟的发育主要是存在于盐岩层厚而上覆层薄 的地方,由于盐岩层的上覆层存在的密度差和负载 力导致底辟的产生(图 10a)。





伸展作用主要控制着盆地边界,它能导致盐岩 层上覆地层发生局部减薄,发育被动盐构造。被动 盐构造是在形成底辟构造后由于上覆地层的加载 导致盐岩持续上拱的行为,盐岩未被覆盖,始终出 露地表,这种被动型盐构造的盐体上升速率大于沉 积速率可形成盐墙等构造(图 10b)^[56]。盆地东北部 乌拉尔槽地区二叠-三叠纪的拉张作用导致先存盐 底辟失稳,在区域侧向应力作用下发生减薄,导致 盐岩刺穿上覆地层,使盐构造再活化(图 10c),形成 盐悬挂。

综上, 滨里海盆地的厚层盐岩的形成模式是一 种类似于萨布哈模式的深盆干化成盐模式, 盆地封 闭稳定的构造环境、海水的阶段性补给和干旱气候 使厚层盐岩沉积, 陆源碎屑的沉积使得厚层盐岩得 以保存。滨里海盆地盐构造最初形变由盆缘斜坡 和浮力作用引发, 盐下隆起、断层等先存构造带影 响对盐构造的运移有一定影响; 导致盐构造变形最 主要的因素是上覆地层的负载力; 挤压运动能导致 盐层上覆地层厚度的变化, 还能形成断层和斜坡, 从而影响盐构造的形态; 伸展运动主要控制着盆地 边界, 可以导致盐构造后期再活化。

5 结论

(1)滨里海盆地盐层形成是由于早二叠世盆地 南部卡拉库尔-斯缪什科夫逆冲带和南恩巴逆冲带 的重新活动,而导致盆地成为一个超咸化且相对封 闭的海盆,干旱气候和来自里海的周期性海水补给 使盆地盐源有充足的供应,巨厚盐岩层沉积后上覆 沉积的陆源碎屑物质使盐岩层得以保存,为盐构造 活动提供了充足的母岩层。

(2)盐构造活动最初是由盆地边缘斜坡带开始 的,挤压作用和盐下斜坡导致盐岩层发生变形,逐 渐向盆地中央推进。最初盐构造初步隆起,变形程 度小,未刺穿上覆地层,此时导致盐构造的主导作 用是先存斜坡和盆缘的挤压作用,也是导致盐岩层 最初开始形变的因素;随着上覆地层加厚,盐构造 变形剧烈,盐岩开始刺穿上覆地层,上覆地层产生 断层,盐岩也随之流入断层内,此时盐构造的主导 因素是上覆地层的负载作用,也是盐岩层发生构造 变形的主导因素;此后,一些挤压和差异负载使盐 构造再活化令其变形。由此形成了盆地边缘盐构造 变形较弱、盆地中间盐构造变形剧烈的分带特征。

(3)由于盐岩层的巨厚和盐岩本身的特性,盐 下地层连续性较好,除受挤压变形外,形变较弱;盐 上层由于盐构造的形成导致盐岩上覆盐层填充于 盐丘凹陷内,地层连续性差,变形剧烈,这种影响随 着距盐层越远影响越小。

(4)盐下先存隆起是油气运移的指向区,上部 的厚层盐岩层为良好盖层,先存隆起和盐岩层的叠 置使其成为一个良好的构造圈闭;由于盐构造形变 而导致的断层是油气运移的优质通道。滨里海盆 地盐下发育的古生界碳酸盐岩和碎屑岩储层,分布 广、厚度大、储集性好、连续且巨厚的盐岩层为一 个天然盖层,应是未来油气勘测的重点。盐上层系 油气从盐下层的烃源岩沿着断层裂缝运移到盐上

层,被局部盖层遮挡聚集成藏。

参考文献:

- [1] 汤良杰,余一欣,陈书平,等.含油气盆地盐构造研究进展[J].
 地学前缘,2005,12(4):375-383.
- [2] 戈红星, JACKSON M P A. 盐构造与油气圈闭及其综合利 用[J]. 南京大学学报, 1996, 32(4): 640-649.
- [3] JACKSON M P A. Retrospective salt tectonics[M]//JACKSON M P A, ROBERTS D G, SNELSON S. Salt Tectonics: A Global Perspective. AAPG Memoir, 1995, 65: 1-28.
- [4] HUDEC M R, JACKSON M P A. Terra infirma: understanding salt tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 82(1/2): 1-28.
- [5] 葛智渊. 被动大陆边缘盐构造研究进展[J]. 地质论评, 2021, 67(1): 159-172.
- [6] 王迎,李江海,章雨,等.南大西洋中段被动陆缘盆地下白垩统 盐构造成因模式[J].地质学报,2022,96(4):1182-1196.
- [7] 朱钇同,李爰山,陈亮,等.墨西哥Burgos盆地Perdido构造带深 浅双层盐分布特征及南北差异构造形变[J].中国海上油气, 2021,33(6):62-70.
- [8] 杨泰,汤良杰,余一欣,等. 滨里海盆地南缘盐构造相关油气成 藏特征及其物理模拟[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 246-251, 258.
- [9] 刘洛夫,朱毅秀,胡爱梅,等. 滨里海盆地盐下层系的油气地质 特征[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 11-15.
- [10] 方甲中,吴林刚,高岗,等. 滨里海盆地碳酸盐岩储集层沉积 相与类型:以让纳若尔油田石炭系KT-II含油层系为例[J]. 石油勘探与开发,2008,35(4):498-508.
- [11] 雍天寿,杨瑞麒,关维东,等.扎纳若尔油田石炭系划分及沉 积特征[J].新疆石油地质,2003,24(1):92-95.
- [12] 钱桂华.哈萨克斯坦滨里海盆地油气地质特征及勘探方 向[J].中国石油勘探,2005,10(5):60-66.
- [13] 刘洛夫,朱毅秀,张占峰,等. 滨里海盆地盐上层的油气地质 特征[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(5): 442-447.
- [14] 梁爽, 王燕琨, 金树堂, 等. 滨里海盆地构造演化对油气的控制作用[J]. 石油实验地质, 2013, 35(2): 174-178, 194.
- [15] 刘洛夫,郭永强,朱毅秀.滨里海盆地盐下层系的碳酸盐岩储 集层与油气特征[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007, 22(1):53-58,63.
- [16] 王瑞,朱筱敏,陈烨菲,等.滨里海盆地肯基亚克地区中、下石炭统碳酸盐岩储层特征与成岩作用[J].石油与天然气地质, 2012, 33(2): 225-235.
- [17] 杨孝群,汤良杰,朱勇. 滨里海盆地东缘盐构造特征及其与乌 拉尔造山运动关系[J]. 高校地质学报,2011,17(2):318-326.
- [18] 苗钱友, 王燕琨, 朱筱敏, 等. 滨里海盆地东缘石炭系层序地 层研究[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4): 483-487.
- [19] 古俊林,朱桂生,李永林.滨里海盆地Sagizski区块盐上层系成 藏条件及分布规律研究[J].中国石油勘探,2012,17(2):57-61.
- [20] 杨怀义,张建球,李永林.滨里海盆地油气地质特征与勘探实 践[M].北京:石油工业出版社,2020.
- [21] FOMENKO K YE. Stroyeniye kristallicheskogo fundamental Prikaspiyskoy padiny po geofizicheskim damn ym. Geologiya

Nefti Gaza[J]. Nedra, Moscow, Russian Federation, 1972, 10: 39-46.

- [22] 刘洛夫,朱毅秀,熊正祥,等.滨里海盆地的岩相古地理特征 及其演化[J].古地理学报,2003,5(3):279-290.
- [23] 侯珏,林雅平,赵文琪,等.哈萨克斯坦北特鲁瓦油田石炭系 碳酸盐岩储层测井评价[J].海相油气地质,2022,27(1):103-112.
- [24] 景紫岩, 李国斌, 张亚军, 等. 滨里海盆地东缘盐构造及变形 机制: 物理模拟的启示[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1459-1468.
- [25] 邓西里,汪红,鲍志东,等.滨里海盆地油气分布规律及勘探 潜力分析[J].石油实验地质,2012,17(5):36-47.
- [26] MALUSHIN I I. Genesis of the North Caspian depression (in Russian) [J]. Sovetskaya Geologiya, Moscow, Nedra, 1985, 8(10): 72-77.
- [27] Blackbourn Geoconsulting. Petroleum Geology of the Precaspian Basin[DB/OL]. 2005.
- [28] IHS. Precaspian Basin, Kazakhstan, Russia[DB/OL]. Basin Monitor. 2012.
- [29] 贾小乐,何登发,童晓光,等.全球大油气田分布特征[J].中国 石油勘探,2011,16(3):1-7.
- [30] 张家青. 哈萨克斯坦滨里海盆地东南部油气地质特征及勘探 方向[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(7): 50-56.
- [31] 李江海, 王洪浩, 周肖贝, 等. 盐构造[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [32] YU Y X, TAO C Z, SHI S Y, et al. Physical modeling of salt structures in the middle south Atlantic marginal basins and their controlling factors [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 136-145.
- [33] BARD E J P, CHAMBERLAIN P, GALAVAZI M, et al. Sedimentation during halokinesis: Permo-Triassic reservoirs of the Saigak field, Precaspian Basin, Kazakhstan[J]. Petroleum Geoscience, 2002, 8(2): 177-187.
- [34] 张建培,唐贤君,张田,等.平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用[J].海洋地质前沿,2012,28(8):31-37.
- [35] 肖维德,唐贤君.平衡地质剖面技术发展现状与实际应用:以苏北盆地溱潼凹陷为例[J].海洋地质前沿,2014,30(5):58-63.
- [36] CHAMBERLIN R T. The Appalachian folds of central Pennsylvania[J]. The Journal of Geology, 1910, 18(3): 228-251.
- [37] 熊连桥,姚根顺,熊绍云,等.基于平衡剖面对断裂带地层展 布恢复的方法:以川西地区中泥盆统观雾山组为例[J].大地 构造与成矿学,2019,43(6):1079-1093.
- [38] 李伟,郭甜甜,吴智平,等.平衡剖面方法在伸展、走滑作用叠加、配比关系分析中的应用:以渤海海域辽东湾坳陷为例[J].地质论评,2019,65(6):1501-1514.
- [39] 张田,朱伟林,钟锴,等. 南黄海盆地东北凹构造特征及伸缩 率研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 118-125.
- [40] 陈书平,汤良杰.盐构造剖面的分层合并复原方法及应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2008,23(3): 32-37.
- [41] HOSSACK J. Geometric Rules of Section Balancing for Salt Structures[M]//JACKSON M P A, ROBERTS D G, SNELSON S. Salt Tectonics: A Global Perspective. AAPG Memoir, 1995,

65: 29-40.

- [42] HSÜ K J, MONTADERT L, BERNOULLI D, et al. History of the Mediterranean salinity crisis[J]. Nature, 1977, 267(5610): 399-403.
- [43] ROWAN M G. A systematic technique for the sequential restoration of salt structures [J]. Tectonophysics, 1993, 228(3/4): 331-348.
- [44] KUZNETSOV. Geological development of the Precaspian Basin and the distribution of reefs[J]. News from Higher Education Establishments, 2007, 32(2): 6-14.
- [45] SCHMALZ R F. Deep-water evaporite deposition: a genetic model[J]. AAPG Bulletin, 1969, 53(4): 798-823.
- [46] 禚喜准,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.
- [47] 覃建雄,陈洪德,田景春.二叠纪海平面变化研究[J].岩相古 地理,1998,18(6):40-47.
- [48] 刘洛夫,尚晓庆,孟江辉,等. 滨里海盆地东南部S区块下二叠 统空谷阶盐岩特征及其对盐上层系油气成藏的影响[J]. 吉林 大学学报(地球科学版), 2012, 42(2); 304-311.
- [49] VAIL P, MITCHUM R, THOMPSON S, et al. Seismic strati-

graphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap[J]. Antimicrobial Agents and Chemotheraphy, 1977, 41(9): 1859-1866.

- [50] Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes [J]. Earth-Science Reveiews, 1998, 48(4): 217-250.
- [51] VOLOZH Y A, ANTIPOV M P, BRUNET M F, et al. Pre-Mesozoic geodynamics of the Precaspian Basin (Kazakhstan)
 [J]. Sedimentary Geology, 2003, 156(1/4): 35-58.
- [52] JACKSON M P A, VENDEVILLE B C. Regional extension as a geologic trigger for diapirism[J]. GSA Bulletin, 1994, 106(1): 57-73.
- [53] 余一欣,郑俊章,汤良杰,等.滨里海盆地东缘中段盐构造变 形特征[J].世界地质,2011,30(3):368-374.
- [54] 汤良杰,余一欣,杨文静,等.库车坳陷古隆起与盐构造特征 及控油气作用[J].地质学报,2007,81(2):145-150.
- [55] VENDEVILLE B C, JACKSON M P A. The rise of diapirs during thin-skinned extension [J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(4): 331-354.
- [56] TALBOT C J, POHJOLA V. Subaerial salt extrusions in Iran as analogues of ice sheets, streams and glaciers[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 97(1/4): 155-183.

The salt structure characteristics and formation mechanism of Early Permian Kungurian in Pre-Caspian Basin

WANG Shouliang^{1,2}, LI Yuanhao^{1,2*}, MA Tingyu^{1,2}, DUAN Yile^{1,2}

(1 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;2 Key Laboratory of Oil and Gas Accumulation Geology in Shaanxi Province, Xi'an 710065, China)

Abstract: The Pre-Caspian Basin is a large superimposed salt-bearing basin, which is also one of the largest sedimentary basins with the richest oil and gas resources in the world. The Kungurian Stage salt-bearing strata are distributed throughout the basin. The salt beds are very thick and widely developed in salt structural units. There are many structural types and different influencing factors. Due to the nature of salt rock itself and the particularity of deformation, the factors affecting structural deformation are diverse and complex. To study the influencing factors on the deformation of the huge thick salt structures in the basin, we scrutinized the evolution process of the basin from the perspective of the whole basin and analyzed the characteristics of the salt structure in the whole basin by using 2D seismic profile data and regional geological data. The formation and evolution of salt structure in the basin and its triggering mechanism are discussed through the restoration of balanced profile. Results show that the deformation degree of salt rock decreases from the center of the basin to the edge of the basin, showing zoning characteristics. The compressional action of preexisting slope and basin margin is the factor of initial deformation of salt rock, and the differential loading of overlying strata is the dominant factor of structural deformation of salt rock. The strata beneath salt beds have good continuity and weak deformation duo to the existence of salt rock, while the upper salt layer is poorly continuous and severely deformed. Therefore, the continuous and extremely thick salt bed in the Pre-Caspian Basin is a natural cap rock, and the reservoir under the salt is good, which should be the focus of oil and gas exploration in the future.

Key words: Pre-Caspian Basin; salt structure; structural deformation; balanced profile; formation mechanism