

膏盐岩油气封盖性研究进展

李永豪¹, 曹 剑¹, 胡文瑄¹, 陆现彩¹, 范 明², 张殿伟³, 洪冬冬¹

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:膏盐岩是全球范围内最为重要的一种油气盖层,越来越多的勘探实例显示膏盐岩油气封盖性差异显著。为加强对这个科学问题的理解,综述了此领域的研究进展。结果表明,膏盐岩的成因主要有膏盐盆和萨布哈两种,分别呈环带状和平行岸线的带状分布。前者分布广、厚度大,最具封盖意义。膏盐岩的封盖机理主要包括物性、超压和塑性三重封闭。膏盐岩的溶蚀在垂向上可划分为4个带:顶部溶蚀带、断层溶蚀带、层内水溶蚀带和底部溶蚀带;平面上可划分为3个区:岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地。在评价膏盐岩封盖性时,要多方面综合考虑。首先是内因,即膏盐岩的分布面积、完整度与厚度等。在此基础上再分析溶蚀作用和构造作用(外因)对封盖性的影响。评价的量化是发展趋势,尤其是溶蚀和构造作用(外因)对膏盐岩封盖性的影响,目前的研究还处于探索阶段,这是今后工作的重点与难点。

关键词:有效断接厚度;溶蚀作用;构造作用;膏盐盆;膏盐岩;油气盖层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Research advances on hydrocarbon sealing properties of gypsolyte/saline rocks

Li Yonghao¹, Cao Jian¹, Hu Wenxuan¹, Lu Xiancai¹, Fan Ming², Zhang Dianwei³, Hong Dongdong¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Gypsolyte/saline rocks are one of the most important hydrocarbon cap rocks worldwide. More and more exploration cases indicate that their sealing properties are highly variable from well to well. To better understand the rocks and its implication as cap rocks, we present in this article an overview of the research advances in the industry. It shows that these rocks are mostly originated from evaporitic basins and sabkhas, largely presented themselves as annular rings or bands parallel to shorelines. The rocks of the former origin have been considered ideal cap rocks as they are usually widely distributed and big in thickness. The sealing mechanisms of the gypsolyte/saline rocks may be summarized as favorable physical properties, overpressure and plasticity. The dissolution of the rocks was recorded vertically by four zones: top dissolution zone, fault dissolution zone, intra-layer water dissolution zone and bottom dissolution zone, and horizontally by three zones: karst uplift, karst slope and karst basin. Many factors, such as the distribution area, integrity, thickness and etc. (the internal controlling factors for sealing properties), shall be taken into consideration during the evaluation of sealing properties of the rocks. The impacts of dissolution and tectonism (external controlling factors for sealing properties) on the sealing properties of the rocks are then analyzed. Current research is focused more on quantitative evaluation of the sealing capacity of the rocks, especially the impacts of dissolution and tectonism. The research is still in a stage of exploration and it is both challenging and exciting.

Key words: effective juxtaposition thickness, dissolution, tectonism, gypsolyte/saline rock, evaporitic basin, hydrocarbon cap rock

膏盐岩顾名思义是一种主要由膏岩和盐岩类沉积岩组成的蒸发岩,因结构致密,孔缝不发育,且具有极

强的可塑性和流动性,所以通常被视为优质的油气封盖层^[1-7],是全球许多大型油气田的主要盖层^[8-13]。

收稿日期:2016-04-06;修订日期:2016-08-20。

第一作者简介:李永豪(1994—),男,硕士研究生,石油地质与油气地球化学专业。E-mail:lyh369po@163.com。

通讯作者简介:曹剑(1978—),男,教授、博士生导师,石油地质与有机地球化学。E-mail:jcao@nju.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(973计划)项目(2012CB214803);国家科技重大专项(2016ZX05002-006-005);国家自然科学基金项目(41322017,41472100)。

根据 Klemme 统计,在全球 334 个大型油气田中,以盐岩和石膏为盖层的占到了 33%^[14]。国内最大的海相气田(普光)和陆相气田(库车)也均是以膏盐岩为盖层,因此膏盐岩的油气封盖性研究对于油气勘探具有十分重要的意义。然而,长久以来,该领域并无系统深入的研究,主要原因在于传统观点认为,膏盐岩不象另一种主要的油气盖层泥页岩发育孔缝^[15],而且又具有可塑性和强流动性^[16],因此在盖层研究中,只需刻划膏盐岩的分布即可^[17]。

但是,越来越多的勘探实例,比如在中国南方,显示并非有膏盐岩分布的地区均为有利勘探区^[18]。膏盐岩在一定条件下,如流体环境中,易受溶蚀^[19],所以有必要加强对膏盐岩油气封盖性的认识。有鉴于此,本文综述这一领域的研究进展,包括膏盐岩成因模式、油气封盖性影响因素与评价等内容,在此基础上分析未来研究方向,为今后的深入研究和勘探提供参考信息。

1 膏盐岩成因

膏盐岩的成因是膏盐岩研究的基本内容,它决定了膏盐岩的分布,因此具有重要意义。其研究通常主要从探讨盐类物质的来源和沉积环境着手^[20]。一般而言,盐类物质来源主要有两种。一是深部,即深部热液/卤水通过深大断裂等通道上涌,将盐类物质携带至地表而沉积成盐^[21]。在这种情况下,膏盐岩一般集中分布于大断裂处^[22]。另一种盐类物质是浅表来源,通常为蒸发成盐。由于深部来源的膏盐岩通常沿断裂分布,较易于识别和预测。因此,此处主要分析具有区域性分布特征的蒸发成盐。

对于蒸发成盐,前人已提出了多种成因观点,如“潮上萨布哈”^[23-24]、“高山深盆成盐”^[25]、“深水深盆”^[26-27]、“干化深盆”^[28]以及“表海台地成盐”^[29]等。如此多的成盐模式说明了盐类沉积的复杂性,但无论何种成因模式,有一点是公认的,即这类膏盐类沉积必须形成在水体的总蒸发量超过总补给量的环境中,干旱炎热的气候条件是必要的^[30]。

地表蒸发成盐的成因总体可归结为“潮上萨布哈”和“水下浓缩沉淀”两个大类。其中,潮上萨布哈型膏盐岩主要发育于半干旱-干旱气候条件下的潮上沉积环境,强蒸发作用导致潮上带沉积物粒间水分减少,浓度增大而结晶沉淀出矿物。这类蒸发岩通常成层性较差,具有大量典型的矿物学与沉积学结构构造特征,如硫酸盐结核、石膏晶体和假晶、石盐外壳、含潮坪卵石的砾岩、大量的侵蚀表面构造、藻纹层、印模和干裂纹等^[31-32]。平面上发育于靠陆一侧,呈平行岸线

的带状分布^[33]。四川盆地东北部下三叠统飞仙关组的含膏盐岩层系,属于典型的潮上萨布哈型(图 1a),基本上由薄层状膏岩夹膏质鲕粒云岩及泥晶云岩互层的蒸发潮坪旋回构成^[34-35]。层序内膏盐岩以不规则状、肠状为主,呈现与海岸线平行的带状分布,层序中的泥晶白云岩中含有数量不等的石膏、硬石膏结核、针状和板状晶体。许多潮上带、潮间带的相标志存在于层序中,如各种暴露标志、潮汐层理、潮道充填构造、风暴潮砾石、生屑层、藻纹层、不规则纹层、递变纹层和变形纹层等^[35]。部分层序泥晶白云岩中的石膏与硬石膏结核溶蚀后形成孔穴,从而成为良好的储层。

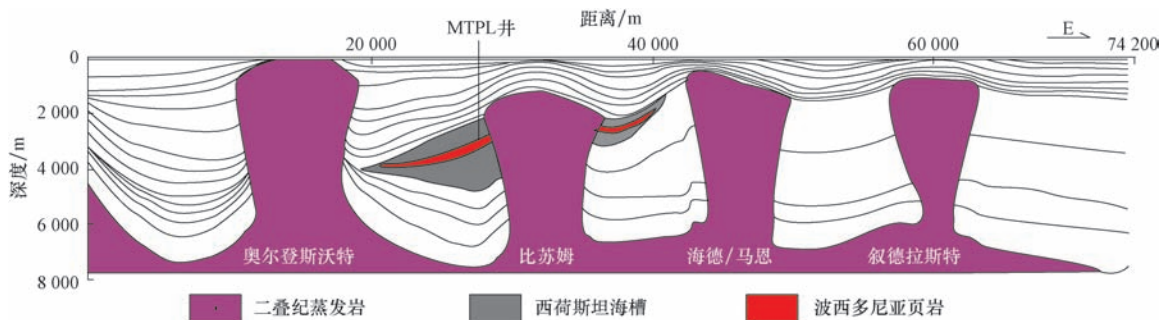
相比而言,水下浓缩沉淀型膏盐岩主要发育于半干旱-干旱气候条件下的稳定蓄水体(如潟湖、凹陷)内,由强蒸发作用导致水体盐度增加,高盐度水体回流于低凹处而结晶析出盐类沉积。这种成因的膏盐岩通常表现出发育层位稳定,成层性好,缺乏暴露标志等基本特征。平面上,从沉积边缘到中心,呈由泥岩—灰岩—白云岩—膏岩—盐岩过渡的环带状分布^[34]。根据发育厚度和规模又可分出“蒸发潟湖”和“膏盐盆”两种类型^[31],显然后者对油气封盖的意义更大。四川盆地下寒武统龙王庙组,其膏盐岩为典型的水下浓缩沉淀型(图 1b),在盆地东南部和南部共存在 3 个厚度高值区,普遍在数十米以上。膏盐岩围绕这 3 个沉积中心呈环带状分布,厚度从中心向边缘逐渐减小,为典型的膏盐盆和蒸发潟湖沉积。龙王庙组井下膏盐岩成层性较好,发育水平层理、块状层理和韵律层理等,且缺乏暴露标志(膏盐盆)。中寒武统陡坡寺组和中、上寒武统洗象池群的含膏盐岩层展布特征与龙王庙组类似,反映了水下浓缩沉淀型膏盐岩沉积的连续性,但厚度明显减小,反映成盐条件变差(蒸发潟湖)。

2 膏盐岩油气封盖机理与控制因素

2.1 膏盐岩油气封盖机理

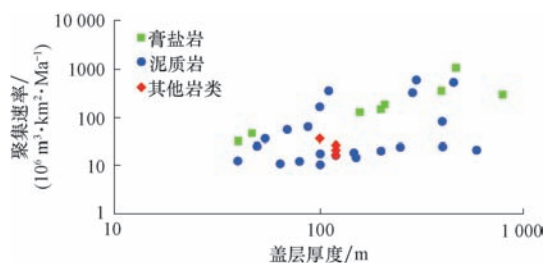
如前所述,膏盐岩类蒸发岩为石盐、石膏等矿物从高盐度水体中结晶析出所形成,因此通常结构致密,孔隙度和渗透率极低,孔隙度多数在 0.1%~0.3%,渗透率为 $10^{-9} \mu\text{m}^2$ 级,最大喉道半径小于 1.8 nm^[36],因此具有极高的毛管突破压力。如埋深较大的膏盐岩排替压力和突破压力可超过 30 MPa,有的甚至超过 70 MPa(库车坳陷克拉 2 井的突破压力高达 74 MPa)^[37],故具有很强的油气封堵能力。

此外,从膏盐岩的自身岩性变化看,以石膏为例,当埋深大致超过 2 000 m 时,会析出近一半体积的水,脱水转变成硬石膏。这部分水因流通不畅而滞留在膏泥岩地层中,会引起泥岩欠压实而形成超压^[37-40]。超

图2 Mittelplate 油田东西向剖面蒸发岩侧向封堵示意图^[42]Fig. 2 Sketch map showing the lateral sealing of the evaporite rocks in the east-west section of the Mittelplate oil field^[42]

而高效气藏[聚集速率大于 $100 \times 10^6 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$]的膏盐岩盖层厚度均大于 100 m(图3)^[48]。此外,在研究膏盐岩的封盖性时,要考虑其分布的连续性,部分地方的缺失可能导致其封盖性能降低甚至失效。如以四川盆地威远构造,是盆地地表最大的构造,但灯影组天然气圈闭充满度仅为 25%,很重要的一个原因是 20 Ma 以来威远构造的隆升剥蚀,使得中-下三叠统区域性膏盐岩盖层遭到一定程度的剥蚀,其连续性受到破坏,进而盖层封盖能力大大降低,保存条件变差,致使灯影组天然气从威远构造顶部地表下三叠统嘉陵江组天窗开始泄漏和逸散^[49]。膏盐岩的发育规模、厚度以及连续性取决于区域构造背景、古气候条件和沉积格局。其中,构造背景控制了区域沉积地形、沉积格局以及物源供应,古气候条件是膏盐岩是否发育的决定性因素,而沉积格局和沉积古地形对于膏盐岩的沉积规模起到了决定性作用。

如上所述,保存完好的膏盐岩具有极好的油气封盖能力,但膏盐岩极易被溶蚀^[50-53],在大气降水、地层水等流体作用以及人类活动(注水、开采等)的影响下,膏盐岩会发生岩溶作用,形成溶蚀洞穴、孔缝和溶蚀角砾等,甚至导致蒸发岩的局部缺失,孔隙度和渗透率升高,使盖层的封盖性显著降低^[44]。如鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组,马五段发育碳酸盐岩与膏盐岩共生沉积,中奥陶世末,加里东运动使盆地整体抬升,膏盐岩受到强烈溶蚀,孔隙度升高,形成溶蚀孔穴,甚至全部溶蚀形成空洞,丧失封盖性能,成为储集层^[54]。除此之外,区域构造作用也能对膏盐岩封盖性产生影响。具体而言,在构造应力作用下,膏盐岩发生侧向流动或向上刺穿,导致较薄的膏盐岩盖层在某些区域缺失而形成盐焊接^[55-56],封盖性受到破坏;但对于较厚的膏盐岩盖层,褶皱核部膏盐岩增厚,而减薄处也不会断裂形成盐焊接,整体封盖性较好。如横跨土库曼斯坦东部和乌兹别克斯坦西南部的阿姆河盆地,其天然气资源总体相当丰富,但在盆地内查尔朱隆起南翼,因膏盐岩盖层较薄,断裂构造贯穿膏盐岩层,向上断至地表,成为油气运移通道,破坏了膏盐岩盖层的封盖性能^[57]。

图3 中国部分大、中型气田盖层厚度与天然气聚集速率关系^[48]Fig. 3 Statistics showing the relationship between the thickness of cap rocks and gas accumulation rate in some large and medium scale gas fields in China^[48]

膏盐岩在沉积后,要经历一系列的成岩演化,在埋深加大的过程中,石膏会脱水转变成硬石膏,并且膏盐岩由脆性状态逐渐转变为塑性状态。当膏盐岩埋深较浅时,其处于脆性状态,更易被断层切穿,且容易遭受流体溶蚀淋滤;当膏盐岩埋深较大时,处于塑性状态,在未经受古溶蚀的情况下,其盖层封闭性主要受构造作用影响。因此,膏盐岩的脆性-塑性转换深度和时间是一项重要研究内容。吴桐等^[58]根据三轴压缩实验,并结合莫尔-库伦准则、Byerlee 摩擦定律以及 Goetze 准则^[59-62],估算了库车坳陷库姆格列木组膏岩由脆性向脆-塑性转换的埋深为 1 740 m,脆-塑性向塑性转换的埋深为 3 400 m,为定量评价膏盐岩的封盖性提供了依据,但也有观点认为膏盐岩本质上是塑性流变的,因此无需研究其脆-塑性转换特征^[52-53]。因此,该问题还需要进一步研究。

3 膏盐岩溶蚀破坏模式

如前所述,膏盐岩的溶蚀作用对其封盖性影响较大。最近通过对下扬子皖江地区三叠系周冲村组膏盐岩研究发现,受区域流体活动的影响,膏盐岩的溶蚀作用在垂向上和平面上具有一定的变化特征,据此初步建立了膏盐岩区域溶蚀破坏模式(图4)。垂向上膏盐岩溶蚀可划分为 4 个带,分别是顶部溶蚀带、断层溶蚀带、层内水溶蚀带和底部溶蚀带。顶部溶蚀带位于膏

盐岩岩层顶部,来自地表的流体通过上层的松软沉积物和砂岩层侵入到膏盐岩层,对膏盐岩进行溶蚀。断层溶蚀带只在有断层的地方发育,区域断层连通至地表,地表流体顺断层往下侵入膏盐岩层,对膏盐岩进行溶蚀,因膏盐岩已被断层切割破坏,导致流体对其更易溶蚀。层内水溶蚀带发生在膏盐岩层内,此溶蚀带流体非外部侵入,而是来自层内生物体或矿物在成岩演化中析出的水,溶蚀程度较轻,典型特征是硬石膏发生揉皱,断续出现泥炭物质,有机质含量丰富,易污手,出现条带状水化石膏。底部溶蚀带发育在膏盐岩层底部,因膏盐岩极易溶蚀,在与下伏灰岩接触处,流体沿顺层层导层侵入膏盐岩底部进行溶蚀。

平面上,因所处构造位置不同,又可对溶蚀进行分区,划分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地。岩溶高地位于古地形较高的地方,局部发育溶蚀浅坑。岩溶斜坡位于岩溶盆地与岩溶高地间的斜坡区,广泛发育溶蚀沟,斜坡的倾斜程度决定了斜坡区膏盐岩的垂向溶蚀程度,越平缓,则流体渗透量越大,溶蚀越严重。岩溶盆地处于地形较低的地方,往往处于盆地中心,因流

体汇聚,顶部溶蚀带的溶蚀情况最为严重(图4)。

尤其重要的是,在断层发育的地方,因断层切割破坏岩层,并且为流体提供了渗透通道,所以溶蚀有其独有的特点(图5)。原始膏盐岩近水平沉积,在后期构造运动作用下,地层抬升倾斜,区域应力致使断层发育,膏岩层被切割破碎,一方面使表层膏盐岩溶蚀加剧,形成溶蚀空腔,上覆地层失去重力支撑,整体垮塌;另一面流体顺断层侵入,对断层带及断层两盘的膏盐岩进行溶蚀,形成断层溶蚀带。

4 膏盐岩油气封盖性评价

对于膏盐岩的油气封盖性研究而言,最终目标是评价,应用于勘探生产。我们认为,在评价膏盐岩封盖性时,需要从内因和外因两方面进行评价。

膏盐岩在埋藏较深时,通常具有极高的突破压力和排替压力,且处于塑性状态,古溶蚀的影响较弱,所以此时膏盐岩的封盖性主要受内因(发育规模、厚度和连续性),以及外因(构造作用)的影响。据统计,全球

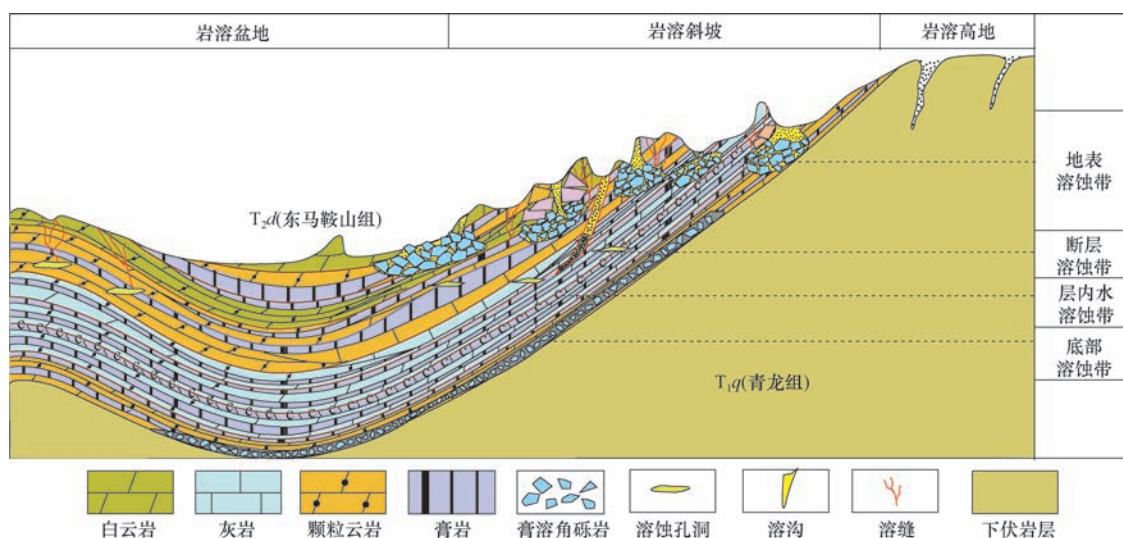


图4 典型膏盐岩区域溶蚀破坏模式

Fig. 4 Typical model of dissolution of gypsolyte/saline rocks

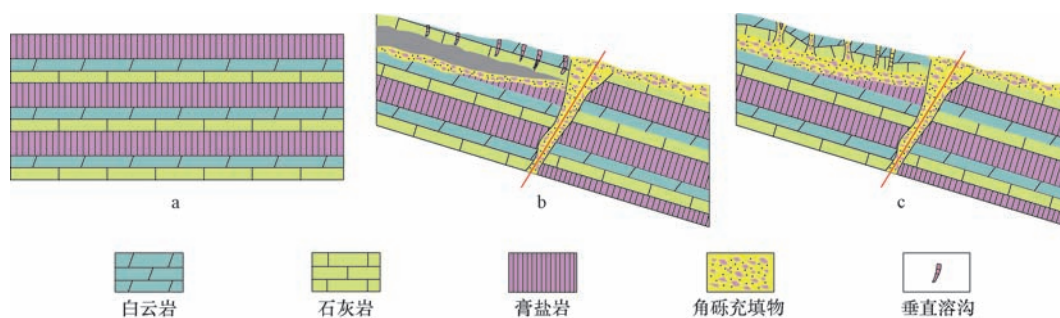


图5 膏盐岩断层溶蚀破坏模式

Fig. 5 Model of fault dissolution on evaporites

a. 正常地层沉积; b. 地层抬升, 表生岩溶发育, 侵蚀性流水顺膏盐岩层溶蚀成“空腔”; c. 被溶空膏盐岩层导致上覆地层失去重力支撑, 而整体垮塌

碳酸盐岩大型油气田中膏盐岩盖层厚度在1~10 m的占21.3%,10~20 m的占20.0%,20~50 m的占18.7%,50~100 m的占20.0%,大于100 m的占20.0%。最薄的在美国的 Little Sand Draw 油田,膏盐岩盖层仅有1.2 m,最厚的在俄罗斯的 Markovo 油田,可达1 300 m^[63]。虽然较薄层的膏盐岩也能对部分油气田形成良好封盖,但当构造运动过于强烈时,较薄层的膏盐岩在褶皱核部增厚,在翼部减薄甚至断裂形成盐焊接,造成膏盐岩的封盖性的减弱或失效^[64]。因此在盖层封盖性评价时,要考虑构造作用强度和盖层厚度的关系。显然,膏盐岩的规模越广,厚度越大,连续性越好,则其封盖性越好,这取决于当时的区域构造背景、古气候条件和沉积格局。因此,可通过分析区域沉积背景和钻井资料,查清膏盐岩的发育规模、厚度以及连续性。其次,膏盐岩在埋藏超过一定深度后,处于塑性状态,使得其即使在构造作用强烈时,也不容易被断层切穿,因此对油气,尤其是对封盖性要求很高的天然气也具有有良好的封盖性。构造作用主要是考虑盐焊接的问题。

膏盐岩在埋藏深度较浅时,地层温度较低,可能处于脆性状态,其封盖性跟埋藏较深时不同,主要受内因(发育规模、厚度和连续性),以及外因(溶蚀作用和构造作用)的影响。埋藏较浅的膏盐岩,其孔隙度和渗透率较深埋藏时高,突破压力和排替压力较低。如羌塘盆地,其地表膏盐岩的突破压力和排替压力仅为几兆帕,远远低于深埋藏状态^[65]。脆性的地层易被断层所切穿,所以埋藏较浅的膏盐岩易被断层破坏,造成封盖性失效。并且膏盐岩在浅埋藏条件下非常易受到溶蚀^[66],常温下膏盐岩在100 g水中的溶解度大于两百毫克,而同属咸(盐)水沉积体系的方解石和白云石仅为十几毫克,因此埋藏较浅的膏盐岩易被大气水和地表水溶蚀淋滤,使其孔隙度和渗透率显著升高,甚至局部区域缺失,严重降低其封盖性。

综合上述,可见在评价区域膏盐岩封盖性时,首先要分析内因,查明其分布面积、完整度及厚度,在此基础上,再分析溶蚀作用和构造作用对封盖性的影响。据此,基于对国内外油气田膏盐岩盖层发育规模、厚度、埋藏深度,溶蚀作用情况以及构造作用破坏程度的统计分析,建立了简略的膏盐岩油气盖层封盖性评价表(表1)。发育规模主要根据盆地、坳陷及凹陷等盆地内构造单元面积进行划分,厚度主要根据孙明亮等的统计结果进行统计^[48],连续性可通过分析区域沉积格局以及后期的抬升剥蚀史,并结合实际勘探情况进行评价,溶蚀作用和构造作用对盖层封盖性的影响目前还没有较为理想的定量评价方法,这将是后期工作的重点和难点。

5 研究展望

综观当前膏盐岩及其油气封盖性研究的现状,今后很重要的一个研究方向是对封盖性的定量评价,特别是新参数的开拓,众多研究人员在这方面已展开了不少工作。

5.1 膏盐岩厚度与封盖性

对于膏盐岩到底多厚才能对油气形成封堵,实际上这与很多复杂因素有关,如油气的性质、构造作用和溶蚀作用等。一般来说,天然气较石油更易扩散,所以对盖层的封盖性能要求更高。如前文提及的美国 Little Sand Draw 油田,膏盐岩盖层仅有1.2 m,但这个厚度对于气田而言往往不够。根据孙明亮等对我国40多个大中型气藏盖层条件的分析,统计了盖层厚度与天然气聚集速率的关系,以及盖层厚度与储量丰度关系,初步建立了评价天然气成藏有效性的盖层基本标准,结果表明,要形成中效天然气藏[聚集速率介于 $10 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$],盖层厚度必须大于40 m,盖层排替压力应大于15 MPa,而要形成高效天然气藏[聚集速率大于 $100 \times 10^6 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$],则需要厚度超过100 m的直接盖层,盖层的排替压力不应小于20 MPa^[48]。

5.2 膏盐岩脆性-塑性转换与封盖性

膏盐岩的脆塑性状态对其封盖性的影响较大,随着成岩演化,在埋深加大的过程中,其延展性逐渐从完全脆性转变成塑性,塑性阶段的膏盐岩有着比脆性阶段膏盐岩更好的流动性,以及更大的排替压力和突破压力^[65]。对于膏盐岩由脆性向塑性转换深度定量计

表1 膏盐岩油气盖层封盖性评价

Table 1 Simplified evaluation standards of hydrocarbon sealing capacity of gypsolyte/saline rocks

封盖性能	极好	好	良	差	
内因	发育规模/ km ²	>1×10 ⁴ (区域发育)	>1 000	>100 (局部发育)	<50
	厚度/m	>1 000	>100	>40	<20
	连续性	完全连续	连续	基本连续	不连续 盐窗较多
外因	溶蚀作用	无溶蚀	无溶蚀	未溶穿	溶蚀严重
	构造作用	无构造破坏	构造运动 未切穿	有效断接 厚度大	盐焊接较多 或有效断接 厚度小
	成岩演化 (埋深/m)	完全塑性 (>3 400)	脆 - 塑性 (1700 ~ 3 400)	塑 - 脆性 (1 000 ~ 1 700)	完全脆性 (<1 000)

算,前人已经进行了一些探索,如吴桐等^[57]估算了库车坳陷库姆格列木组膏岩脆性向脆-塑性转换的埋深为1 740 m,脆-塑性向塑性转换的埋深相当于3 400 m(图6)。此外,李双建等^[68]运用岩石变为塑性时极限强度和残余强度趋于相同(即应力降趋于零)这一原理,计算出硬石膏转变为塑性的临界围压为68.5 MPa,折合临界深度为4 029 m。两人都对膏盐岩脆延转换定量计算做了探索性的研究,但因实际地质条件复杂多变,具体转换深度还有不确定性。此外,还需注意的是,仍有学者认为膏盐岩总体属于塑性,不存在脆性。

5.3 浅埋藏膏盐岩溶蚀与封盖性

埋藏相对较浅的膏盐岩容易遭受流体溶蚀,甚至局部区域完全溶解消失,形成盐窗,严重破坏其封盖性能。但目前溶蚀作用对膏盐岩封盖性影响还局限于地质勘探描述上,定量评价工作还未有突破进展。一个可行的方法是建立区域溶蚀模式(图4,图5),结合区域流体来源和流量大小,以及膏盐岩在此流体中的溶解度,运用动力学的方法来定量分析区域内膏盐岩的溶蚀量和溶蚀程度,进而分析其对膏盐岩封盖性的影响。

5.4 浅埋藏膏盐岩孔隙流体压力、断层与封盖性

对于处于相对浅埋藏状态下的膏盐岩盖层,评价其油气封盖性时,除测量排替压力和突破压力外,还要考虑孔隙流体压力和断层对盖层的破坏。盖层与储层界面处孔隙流体压力增加导致盖层破裂称为水力破

裂。Gaarenstroom等系统研究了北海盆地的油气盖层,确定了评价水力破裂的参数——保持力,即最小水平主应力与孔隙流体压力的差值。保持力越小,盖层发生水力破裂的风险就越大,北海盆地中部盖层发生水力破裂的临界保持力为7 MPa^[63]。

断层对膏盐岩盖层的破坏,目前的研究可采用有效断接厚度的概念来评价,即盖层一旦被断层错开以后,起封闭作用的盖层厚度就不再是原始的盖层厚度,而是断层两盘盖层与盖层的对接厚度,称为断接厚度。断接后盖层的封闭能力由于受断层紧闭程度的影响,其实际封闭能力必然小于(或等于)原盖层相同厚度的封闭能力,将断接厚度乘以断层倾角的余弦值,并将其定义为有效断接厚度^[68]。吕延防等^[64]计算了塔里木盆地库车坳陷库姆格列木群各点膏盐岩盖层的有效断接厚度,据此做出了盖层有效断接厚度等值图,并得出库姆格列木群盖层在库车坳陷中-西部地区应是有效盖层,东秋5构造及其以东地区,库姆格列木群盖层均被断层破坏,失去封盖能力的结论,已被勘探所证实。

5.5 深埋藏膏盐岩构造作用与封盖性

膏盐岩当处于相对深埋藏条件时,岩石基本性质为塑性,其排替压力和突破压力极高,又因其埋藏较深,溶蚀作用对其影响较小,所以构造作用是评价油气封盖性的主要影响因素。较薄层的膏盐岩,强烈的构造运动可使其褶皱翼部断裂产生盐焊接,整体封盖性能遭受破坏;反之,较厚层的膏盐岩则可以在构造运动中仍保持其连续性,因此分析盖层厚度与构造作用强弱的关系变得尤为重要。目前对于塑性阶段的膏盐岩

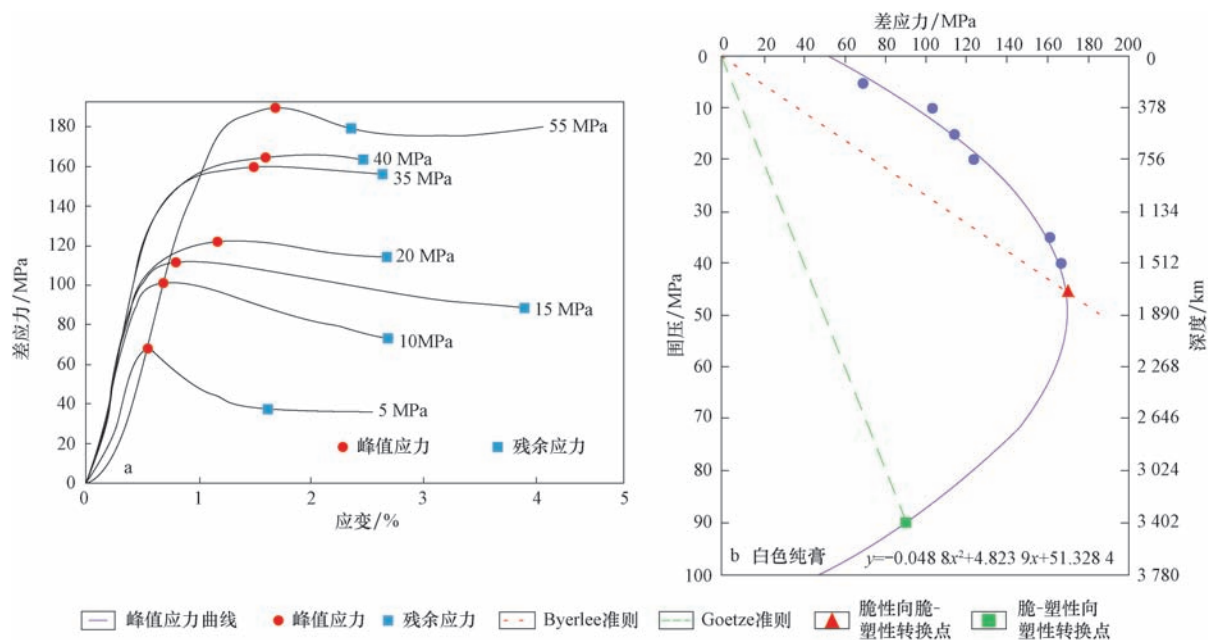


图6 库车坳陷古近系库姆格列木群膏岩应力-应变曲线(a)及脆塑性转换临界深度(b)^[58]

Fig. 6 Stress-strain curves (a) and critical depth (b) of brittle-ductile transition of the Paleogene Kumugeliemu

Group gypsolyte in the Kuqa Depression, Tarim Basin^[58]

定量评价还处于探索阶段,但随计算机技术飞速发展,运算能力得以大大提高,可以采用离散元建模的方法,结合区域构造应力场,对区域内膏盐岩在构造运动中的状态变化进行模拟。需要注意的是,实际地质情况往往不是单一岩性,岩性和断裂构造作用复杂,构造作用往往呈现多期、多方向性,因此实际工作中需要具体问题具体分析。

综合上述,对于相对浅埋藏阶段的膏盐岩,可应用保持力和有效断接厚度来定量评价孔隙流体压力和断层对盖层封盖性的影响。相比而言,溶蚀作用对封闭性的影响还处于探索阶段。对于相对深埋藏阶段的塑性膏盐岩,其封盖性评价主要考虑厚度与构造作用强度的关系,考虑是否存在盐焊接以及其数量和规模,未来一个可行的方向是采用离散元建模方法对其进行模拟。总之,膏盐岩封盖性的综合评价难度很大,要考虑的参数较多,尚有很多工作需要进一步开展。

6 结论

1) 膏盐岩是全球范围内最为重要的油气盖层,原始发育特征受其成因控制,主要有水下浓缩沉淀和潮上萨布哈两种成因模式,其中水下浓缩沉淀的膏盐盆成因膏盐岩分布广、厚度大,最具封盖意义。

2) 膏盐岩的封盖机理包括物性、超压和塑性三重封闭。封盖性受多种复杂因素控制,总体可分为内因和外因,内因即膏盐岩的发育规模、厚度和连续性,外因即溶蚀作用、构造作用和成岩演化的影响。

3) 膏盐岩的溶蚀是破坏其封盖性的重要影响因素,建立了溶蚀模式,垂向上可划分为4个带:顶部溶蚀带、断层溶蚀带、层内水溶蚀带和底部溶蚀带。平面上可划分为3个区:岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶盆地。

4) 在评价膏盐岩封盖性时,首先要考虑膏盐岩的分布面积、完整度、厚度(内因),在此基础上,再分析溶蚀作用和构造作用(外因)对封盖性的影响。定量是今后膏盐岩油气封盖性评价的发展趋势,综合评价难度很大,要考虑的参数较多,特别是溶蚀作用和构造作用的影响还处于探索阶段。

参 考 文 献

- [1] Surkov V S, Grishin M P, Larichev A I, et al. The Riphean sedimentary basins of the Eastern Siberia Province and their petroleum potential[J]. *Precambrian Research*, 1991, 54(1): 37-44.
- [2] Chen Z H, Osadetz K G, Li M W. Spatial characteristics of Middle Devonian oils and non-associated gases in the Rainbow area, north-west Alberta[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(3): 391-401.
- [3] Liu S G, Zhang Z J, Huang W M, et al. Formation and destruction processes of upper Sinian oil-gas pools in the Dingshan-Lintanchang structural belt, southeast Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(3): 289-301.
- [4] Beydoun Z R. Arabian plate oil and gas; why so rich and so prolific? [J]. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 1998, 21(2): 74-81.
- [5] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade, 1990-1999 [M]. Tulsa: AAPG, 2003: 1-340.
- [6] 周兴熙. 库车油气系统成藏作用与成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 8-10.
Zhou Xingxi. The reservoir-forming process and model in the Kuqa petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 8-10.
- [7] 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 858-865.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Guoxiong. Basic characteristics and concentration of the Puguang gas field in the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 858-865.
- [8] 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 9-14.
Ma Yongsheng. Generation mechanism of Puguang gas field in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 9-14.
- [9] 秦胜飞, 贾承造, 陶士振. 塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征[J]. *中国地质*, 2002, 29(1): 103-108.
Qin Shengfei, Jia Chengzao, Tao Shizhen. Some characteristics of oil and gas accumulation in the Kuqa depression, Tarim basin [J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 103-108.
- [10] 张准, 饶铁群, 张挺军, 等. 哈萨克斯坦滨里海盆地盐下层系油气成藏组合特征及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2007, 12(1): 81-86.
Zhang Huai, Rao Yiqun, Zhang Tingjun, et al. Features and exploration trends of hydrocarbon accumulation assemblage of the subsalt strata in Marginal Caspian Basin of Kazakhstan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(1): 81-86.
- [11] 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]. *西南石油大学学报*, 2002, 24(3): 11-15.
Liu Luofu, Zhu Yixiu, Hu Aimei, et al. Petroleum geology of pre-salt sediments in the Pre-Caspian Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2002, 24(3): 11-15.
- [12] 金之钧, 王骏, 张生根, 等. 滨里海盆地盐下油气成藏主控因素及勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(2): 111-115.
Jin Zhijun, Wang Jun, Zhang Shenggen, et al. Main factors controlling hydrocarbon reservoirs and exploration directions in the pre-salt sequence in Precaspian Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(2): 111-115.
- [13] 孙龙德, 李曰俊, 宋文杰, 等. 塔里木盆地北部构造与油气分布规律[J]. *地质科学*, 2002, 37(S1): 1-13.
Sun Longde, Li Yuejun, Song Wenjie, et al. Tectonics and oil-gas distribution in the North Tarim Basin, NW China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(S1): 1-13.
- [14] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. *石油地质学* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 123.
Zhang Houfu, Fang Chaoliang, Gao Xianzhi, et al. *Petroleum geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 123.
- [15] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 603-622.
- [16] Yumuang S, Khantaprab C, Taiyagupt M. The evaporite deposits in

- Baronet Narong area, Northeastern Thailand [J]. *GEOSEA V Proceedings*, 1986, 11: 249–267.
- [17] 张元春, 陆黄生, 吴海燕. 川东北元坝地区膏盐岩盖层分布特征[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(4): 450–452.
- Zhang Yuanchun, Lu Huangsheng, Wu Haiyan. Distribution of gypsum-salt cap rocks in Yuanba Area of Northeastern Sichuan Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(4): 450–452.
- [18] 冉隆辉, 谢姚祥, 戴弹申. 四川盆地东南部寒武系含气前景新认识[J]. *天然气工业*, 2008, 28(5): 5–9.
- Ran Longhui, Xie Yaoxiang, Dai Tanshen. New knowledge of gas-bearing potential in Cambrian system of southeast Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(5): 5–9.
- [19] Raines M A, Dewers T A. Mixed transport/reaction control of gypsum dissolution kinetics in aqueous solutions and initiation of gypsum karst [J]. *Chemical Geology*, 1997, 140(1/2): 29–48.
- [20] 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(2): 299–308.
- Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, et al. The impact of saline deposit upon the hydrocarbon accumulation in petroliferous basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(2): 299–308.
- [21] 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 179–216.
- Sun Zhencheng, Yang Fan, Zhang Zhihuan, et al. Sedimentary environment and oil and gas generation of the new generation of salt lakes in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 179–216.
- [22] 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, 39.
- 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, 39.
- [23] Masson P H. An occurrence of gypsum in southwest Texas [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1955, 25(1): 72–77.
- [24] Kinsman D J J. Modes of formation, sedimentary associations, and diagenetic features of shallow-water and supratidal evaporites [J]. *AAPG Bulletin*, 1969, 53(4): 830–840.
- [25] 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.
- [26] Schmalz R F. Deep-water evaporite deposition; a genetic model [J]. *AAPG Bulletin*, 1969, 53(4): 798–823.
- [27] Babel M. Depositional environments of a salina-type evaporite basin recorded in the Badenian gypsum facies in the northern Carpathian Foredeep [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 285(1): 107–142.
- [28] 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.
- [29] 薛平. 陆表海台地型蒸发岩的成因探讨[J]. *地质论评*, 1986, 32(1): 59–66.
- Xue Ping. Origin of evaporates in a vast epicontinental platform sea [J]. *Geological Review*, 1986, 32(1): 59–66.
- [30] 袁见齐. 关于钾盐矿床形成条件的几个问题[J]. *盐湖研究*, 1975(4): 36–41.
- Yuan Jianqi. Several problems about the formation conditions of potash deposits [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 1975(4): 36–41.
- [31] 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): 316–324.
- Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, et al. Origin of the Leikoupo formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan basin, and their structural significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 316–324.
- [32] 邓尔新. 关于萨布哈成因的石膏和硬石膏矿床[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 1981(2): 31–38.
- Deng Erxin. About the Sabkha gypsum and anhydrite deposit [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 1981(2): 31–38.
- [33] Treesh M I, Friedman G M. Sabkha deposition of the Salina group (Upper Silurian) of New York state [C]//Fourth Symposium on Salt. Cleveland: Northern Ohio Geological Society, 1974, 1: 35–46.
- [34] 包洪平, 杨承运, 黄建松. “干化蒸发”与“回灌重溶”——对鄂尔多斯盆地东部奥陶系蒸发岩成因的新认识[J]. *古地理学报*, 2004, 6(3): 279–288.
- Bao Hongping, Yang Chengyun, Huang Jiansong. “Evaporation drying” and “reinflusing and redissolving”—a new hypothesis concerning formation of the Ordovician evaporites in eastern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(3): 279–288.
- [35] 王一刚, 张静, 刘兴刚, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相[J]. *古地理学报*, 2005, 7(3): 357–371.
- Wang Yigang, Zhang Jing, Liu Xinggang, et al. Sedimentary facies of evaporative carbonate platform of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in northeastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 357–371.
- [36] 杨传忠, 张先普. 油气盖层力学性与封闭性关系[J]. *西南石油学院学报*, 1994, 16(3): 7–13.
- Yang Chuansong, Zhang Xianpu. Relationship between dynamics of Caprocks and characteristics of seal [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1994, 16(3): 7–13.
- [37] 胡剑风, 刘玉魁, 杨明慧, 等. 塔里木盆地库车坳陷盐构造特征及其与油气的关系[J]. *地质科学*, 2004, 39(4): 580–588.
- Hu Jianfeng, Liu Yukui, Yang Minghui, et al. Salt structure characteristics and its relation to hydrocarbon accumulation in the Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(4): 580–588.
- [38] Wagner III B H, Jackson M P A. Viscous flow during salt welding [J]. *Tectonophysics*, 2011, 510(3/4): 309–326.
- [39] 文竹, 何登发, 童晓光. 蒸发岩发育特征及其对大油气田形成的影响[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(3): 373–378.
- Wen Zhu, He Dengfa, Tong Xiaoguang. Global evaporites development characteristics and their effects on formation of giant oil fields [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(3): 373–378.
- [40] Warner M J C, Elders C, Davis T, et al. Salt Tectonics above complex basement extensional fault systems: results from 3D seismic analysis of central graben salt structures [C]//2002 AAPG Annual Convention. 2002: 10–13.
- [41] 周雁, 金之钧, 朱东亚, 等. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(3): 234–245.
- Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya, et al. Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(3): 234–245.
- [42] Grassmann S, Cramer B, Delisle G, et al. Geological history and petro-

- leum system of the Mittelplate oil field, Northern Germany[J]. International Journal of Earth Sciences, 2005, 94(5-6): 979-989.
- [43] Harding T P, Lowell J D. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(7): 1016-1058.
- [44] 李双建, 孙冬胜, 郑孟林, 等. 四川盆地寒武系盐相关构造及其控油气作用[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 622-631.
Li Shuangjian, Sun Dongsheng, Zheng Menglin, et al. Salt-related structure and its control on hydrocarbon of the Cambrian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 622-631.
- [45] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [46] Philipp S L. Geometry and formation of gypsum veins in mudstones at Watchet, Somerset, SW England[J]. Geological Magazine, 2008, 145(6): 831-844.
- [47] 徐士林, 吕修祥, 杨明慧, 等. 库车坳陷膏盐岩对异常高压保存的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 5-8.
Xu Shilin, Lv Xiuxiang, Yang Minghui, et al. Controlling effect of gypsum and salt rocks on abnormally high pressure in Kuche Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(4): 5-8.
- [48] 孙明亮, 柳广弟, 李剑. 气藏的盖层特征及划分标准[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 36-38.
Sun Mingliang, Liu Guangdi, Li Jian. Features of cap rocks of gas pools and criteria of identification[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 36-38.
- [49] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27.
Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, et al. Discussion on the theories of the hydrocarbon formation and distribution of the deep-seated marine carbonates in the Sichuan superimposed basin, China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 15-27.
- [50] Kemper W D, Olsen J, DeMooy C J. Dissolution rate of gypsum in flowing water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(3): 458-463.
- [51] Liguori V, Manno G, Mortellaro D. Evaporite karst in Sicily[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 975-980.
- [52] Gutiérrez F, Calaforra J M, Cardona F, et al. Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 951-965.
- [53] Johnson K S. Evaporite-karst problems and studies in the USA[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 937-943.
- [54] 邸领军, 杨承运, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组溶斑形成机理[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 260-265.
Di Lingjun, Yang Chengyun, Yang Yihua, et al. Solution spot genetic mechanism of Majiagou formation in Ordovician of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 260-265.
- [55] Giles K A, Lawton T F. Attributes and evolution of an exhumed salt weld, La Popa basin, northeastern Mexico[J]. Geology, 1999, 27(4): 323-326.
- [56] Rowan M G, Lawton T F, Giles K A. Anatomy of an exposed vertical salt weld and flanking strata, La Popa Basin, Mexico[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 363(1): 33-57.
- [57] 聂明龙, 吴蕾, 孙林, 等. 阿姆河盆地查尔朱阶地及邻区盐相关断裂特征与油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 803-808.
- Nie Minglong, Wu Lei, Sun Lin, et al. Salt-related fault characteristics and their petroleum geological significance in Zarzhu terrace and its adjacent areas, the Amu Darya Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 803-808.
- [58] 吴桐, 付晓飞, 王海学, 等. 膏盐岩脆塑性变形特征及封闭能力定量评价[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 127-137.
Wu Tong, Fu Xiaofei, Wang Haixue, et al. Brittle ductile deformation characteristics of anhydrite—salt rock and quantitative evaluation of its sealing ability[J]. Geological Review, 2016, 62(1): 127-137.
- [59] 金之钧, 周雁, 云金表, 等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 715-724.
Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 715-724.
- [60] 贾承造, 赵文智, 魏国齐, 等. 盐构造与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 17-19.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Wei Guoqi, et al. Salt structures and exploration of oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 17-19.
- [61] 李亚林, 王成善, 李永铁. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 173-178.
Li Yalin, Wang Chengshan, Li Yongtie. Characteristics of the Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang Basin of Tibet area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 173-178.
- [62] Guerrero J, Gutiérrez F, Lucha P. Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in the Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes[J]. Engineering Geology, 2004, 72(3/4): 309-329.
- [63] Gaarenstroom L, Tromp R A J, de Jong M C, et al. Overpressures in the Central North Sea: implications for trap integrity and drilling safety[C]//Proceedings of 4th Conference on Petroleum Geology of Northwest Europe. London: Geological Society, 1993, 4: 1305-1313.
- [64] 吕延防, 万军, 沙子萱, 等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162-174.
Lv Yanfang, Wan Jun, Sha Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 162-174.
- [65] Faulkner D R, Mitchell T M, Rutter E H, et al. On the structure and mechanical properties of large strike-slip faults[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2008, 299(1): 139-150.
- [66] Byerlee J D. Brittle-ductile transition in rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(14): 4741-4750.
- [67] Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B9): 17587-17602.
- [68] 李双建, 周雁, 孙冬胜. 评价盖层有效性的岩石力学实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 574-578, 586.
Li Shuangjian, Zhou Yan, Sun Dongsheng. Rock mechanic experiment study of evaluation on cap rock effectiveness[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 574-578, 586.