

柴达木盆地别勒滩地区深部卤水储层空间分布特征研究

崔子豪^{1,2,3}, 赵艳军³, 刘万平⁴, 杜江民^{1,2}, 赵婷钰⁵, 焦鹏程³, 王罗海⁴,
严群雄⁴, 沈立建³

(1. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学 地球科学学院, 河北 石家庄 050031; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4. 青海盐湖工业股份有限公司 国家盐湖资源综合利用工程技术研究中心, 青海省盐湖资源综合利用重点实验室, 青海 格尔木 816099; 5. 北京矿信科技有限公司, 北京 100020)

摘要: 我国柴达木盆地蕴藏着丰富且极具开发潜力的卤水钾锂资源, 但随着产能的不断扩大和持续开发, 浅部易开采的优质资源不断减少, 走向深部开采成为必然选择。与浅部相比, 盐湖深部卤水储层质量相对较差, 富水性弱且不稳定, 开采难度极大。本文以查明察尔汗盐湖别勒滩区段深部卤水储层特征为目的, 通过分析钻孔岩性和物性数据, 研究了别勒滩区段深部卤水储层的平面分布特征和厚度变化规律, 结果表明研究区以东南部储层厚度最大且石盐岩储层质量最优。卤水储层三维建模研究显示, 富锂卤水主要分布在研究区中北部, 南部锂含量相对较低; 平面上第Ⅱ含矿层在中部石盐厚度大且粉砂和黏土夹层少, 有利于卤水的开采。

关键词: 柴达木盆地; 别勒滩区段; 深部卤水; 储层特征; 三维建模

中图分类号: P641.5; P618.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0723-12

Spatial distribution characteristics of deep brine reservoir in Beletan area, Qaidam Basin

CUI Zi-hao^{1,2,3}, ZHAO Yan-jun³, LIU Wan-ping⁴, DU Jiang-min^{1,2}, ZHAO Ting-yu⁵, JIAO Peng-cheng³,
WANG Luo-hai⁴, YAN Qun-xiong⁴ and SHEN Li-jian³

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd, National Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Sakt Resources, Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Qinghai Salt Lake Resources, Golmud 816099, China; 5. Beijing Kuangxin Technology Co., Ltd, Beijing 100020, China)

Abstract: Qaidam Basin contains abundant and highly prospective brine potassium-lithium resources. However, with the continuous expansion of production capacity and ongoing development, the easily accessible high-quality resources in the shallow part are decreasing, so it is inevitable to go deep mining. Compared to the shallow section, the brine reservoir in the deep part of the salt lake is relatively poor in quality, with weaker and more unstable water

收稿日期: 2023-06-07; 接受日期: 2023-08-16; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604801); 地质调查项目(DD20230037)

作者简介: 崔子豪(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事层序地层学与能源盆地分析的研究工作, E-mail: 80648264@qq.com; 通讯作者: 赵艳军(1982-), 男, 研究员, 主要从事沉积学及流体包裹体地质学研究工作, E-mail: zhaoyanjun226@163.com。

enrichment, so it is very difficult to exploit. In order to find out the characteristics of deep brine reservoir in Beletan section of Qarhan Salt Lake, the planar distribution and thickness variation of deep brine reservoir in Beletan section were studied by analyzing the lithology and physical property data of borehole. The results show that the southeastern part of the study area has the thickest reservoir and the highest quality of rock salt reservoir. Three-dimensional modeling of the brine reservoir shows that lithium-rich brine is mainly distributed in the middle and northern part of the study area, and the lithium content in the southern part is relatively low. The second ore-bearing layer on the plane has a large thickness of rock salt and fewer interbedded silt and clay layers in the central part, which is beneficial to the extraction of brine.

Key words: Qaidam Basin; Beltan section; deep brine; reservoir characteristics; three-dimensional modeling

Fund support: The State Key Research and Development Project (2018YFC0604801); Geological Survey Project (DD20230037)

柴达木盆地中部由东台吉乃尔盐湖、西台吉乃尔盐湖、一里坪干盐滩、察尔汗盐湖别勒滩区段等组成的富锂带,是我国乃至世界上重要的盐湖卤水锂富集区,对保障我国钾肥及锂等新能源矿产的自给率和市场稳定发挥了重要作用。当前,随着浅部优质资源的持续开发,深部卤水又常常同时富含钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘等高价值、战略性新兴矿产资源(王春连等, 2020, 2021),从而成为重要的后备资源。但由于深部富水区勘查难度大,开采效率低,并未得到很好的利用,直接影响了锂产业和企业的可持续发展,因此加强盐湖深部卤水的开发势在必行。

别勒滩位于察尔汗盐湖的最西侧,保有 LiCl 储量高达 774 万吨,固、液体钾总储量占整个察尔汗盐湖总量的 60% 以上(田润等, 2007; 刘万平等, 2021)。其晶间卤水中钾离子浓度一般自上而下呈下降的趋势,而锂离子的浓度一般自上而下呈上升的趋势。部分钻孔晶间卤水的 Li^+ 浓度平均值可达 345 mg/L,比涩聂湖地表卤水平均要高 3 倍多(田润等, 2007; 田润, 2007; 展大鹏等, 2010)。由于其深部承压卤水储层具有富锂的特征,别勒滩已成为察尔汗盐湖最具开发潜力的卤水矿层(刘万平等, 2021)。

本研究利用别勒滩地区大量的钻孔岩性和卤水储层物性统计,分析不同储层在平面上的分布特征,对富水区进行预测,并运用三维可视化技术构建矿体三维模型,为卤水资源的高效勘查和开发利用提供重要依据。

1 地质背景

柴达木盆地位于青藏高原东北部,大致呈北为阿尔金山、祁连山包围,南为昆仑山环绕的北西向菱

形,是我国内陆大型山间断陷盆地之一(耿鋈等, 2021)。察尔汗盐湖位于柴达木盆地中南部,面积约 5 800 km²,是一个以液体钾矿为主,固、液并存且伴生有 B、Li、Mg、Br 等多种有益组分的大型综合性盐湖矿床。盐湖区以干盐壳为主,由东向西分为霍布逊、察尔汗、达布逊及别勒滩 4 个区段(图 1)(张彭熹, 1987; 沈振枢等, 1993; 梁青生等, 1995)。察尔汗盐湖的盐类沉积形成于上更新世末至全新世,含盐系的厚度一般为 40~55 m,最大可达 70 m 以上,自西向东逐渐变薄。含盐系由 4 个石盐层和夹于其间的碎屑层组成(图 2),属于第四纪湖相沉积,分布有上更新统的洪积层和全新统风积、冲积、冲洪积以及冲积湖积等其他成因地层。

别勒滩区段位于察尔汗盐湖的最西端,矿区面积约 1 500 km²(杨谦, 1982),地层完整,总体趋势南高北低(于升松等, 2000; 李波涛等, 2010),主要为干盐湖,局部地段含有杂卤石、光卤石、钾石盐、石膏、芒硝、水氯镁石及碎屑沉积物等,属于开发利用较晚的地区,也是察尔汗盐湖开发最有潜力的地区。该区段内地下水主要赋存于不同成因类型的第四系松散堆积物中,补给来源主要是大气降水入渗、外围松散层孔隙水的侧向补给、来自下部的越流补给和大别勒湖、涩聂湖湖水的补给(王文祥等, 2013; 李瑞琴等, 2021)。

2 沉积特征

察尔汗盐湖自柴达木盆地西部盐湖干涸以后开始形成(袁见齐等, 1995),自晚更新世开始出现盐类沉积,最终形成了现代内陆盐湖钾盐矿床(牛雪等, 2015)。别勒滩地区沉积相按沉积物及生物特征

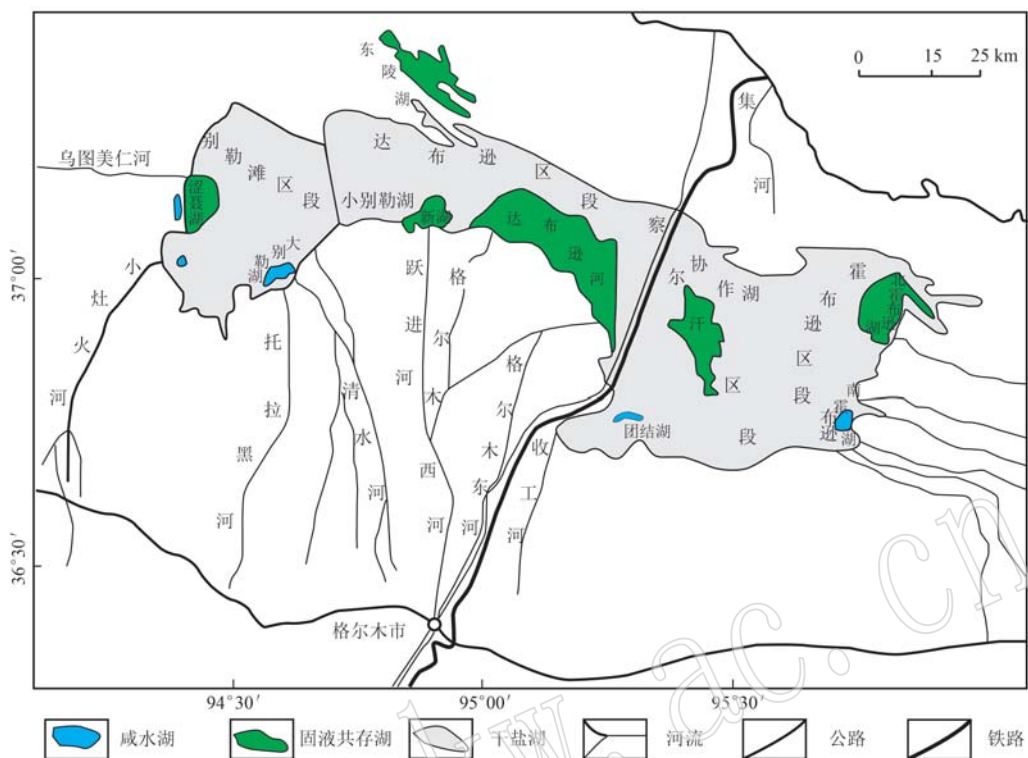


图 1 察尔汗盐湖区段划分示意图 [据李波涛等(2010)修改]

Fig. 1 The divided section of Qarhan Salt Lake (modified after Li Botao et al., 2010)

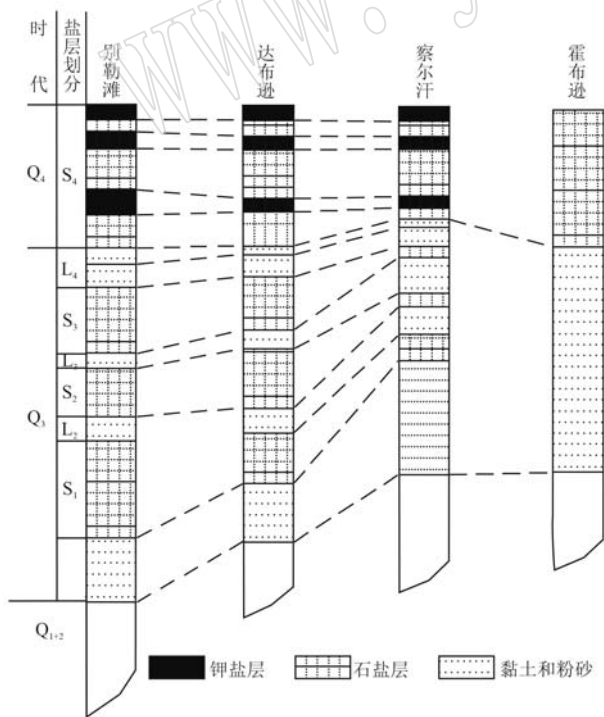


图 2 察尔汗盐湖各区段盐层分布对比图 (据杨谦, 1982)

Fig. 2 Comparison of salt layers in different sections within the Qaidam Salt Lakes (after Yang Qian, 1982)

可划分为咸水-盐湖相、深湖-中深湖相、浅湖相和滨湖沼泽相。咸水-盐湖相特征是上部为灰色含粉砂石盐,含光卤石、钾石盐、软钾镁矾等钾镁盐矿物,光卤石呈韵律性产出,属盐坪沉积;中部为褐色粉砂石盐夹石盐粉砂,石盐具砂屑结构,含鲕粒、泥球、细砂及粗砂;下部为黄色黏土质粉砂,含姜黄色铁质泥纹和少量石膏,具微细水平层理,生物贫乏。深湖-中深湖相特征是以灰色粉砂质黏土和黏土质粉砂为主,粒度细,粉砂含量较低,而微晶碳酸盐较多,水平纹理极发育,次为显微递变水平纹理,生动化石贫乏。浅湖相特征是厚度巨大,主要为黏土质粉砂、含黏土粉砂,有姜黄色含铁质泥纹层断续分布,水平层理较为发育,夹粉砂质碳酸盐薄层,含腹足类化石碎片,介形虫较多,偶见植物碎屑。滨湖沼泽相特征是以黏土质粉砂、含黏土粉砂为主,夹泥炭、粉砂质碳酸盐薄层,含鲕粒、泥球、螺壳和植物碎屑(沈振枢等, 1993)。本次以别勒滩地区盐湖沉积中心为主要研究对象,共统计了 97 个钻孔的岩性及其对应的储层孔隙度、给水度测试数据,层位为上更新统上部和全新统。

青海地矿局第一地质队 1984 年钻探的水 6 孔(位于别勒滩区段干盐湖中部)(图 3)的资料显示,

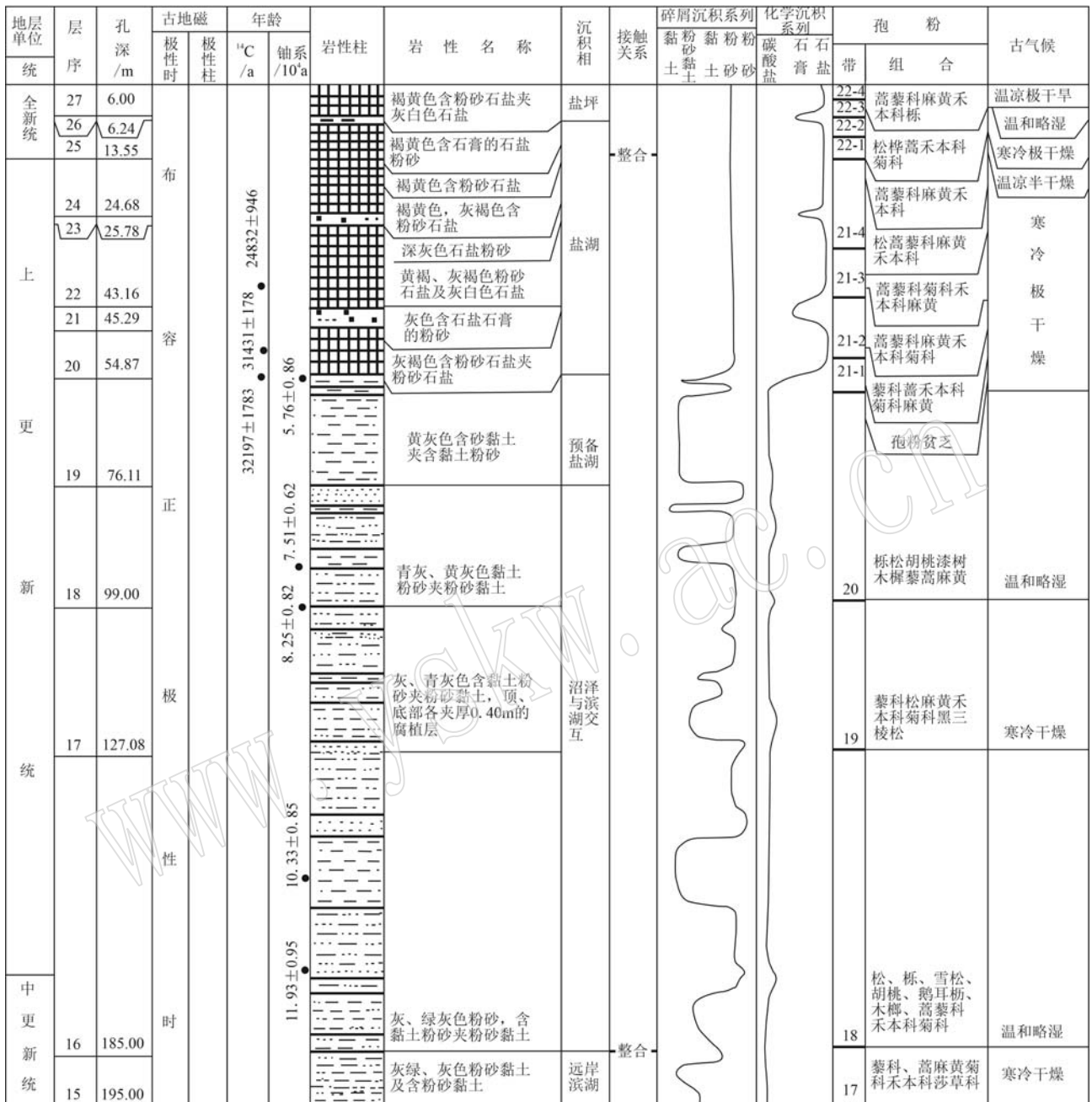


图3 察尔汗盐湖6孔综合柱状图(据袁见齐等, 1995)

Fig. 3 Comprehensive histogram of water 6 hole from Qarhan Salt Lake (after Yuan Jianqi et al., 1995)

该孔沉积物岩性较简单,以黏土质粉砂为主,次为粉砂质黏土,夹泥炭薄层,顶部为盐类沉积物;碳酸盐含量较高,普遍含方解石、文石和白云石;颜色以灰、绿灰色为主,次为灰黄色,上部出现姜黄色,常含铁质泥球或铁泥质纹层,大部分层段具水平纹理;生物化石如螺壳和植物碎片、硅藻、介形虫的出现反映以浅水环境为主;沉积物多为湖流悬浮搬运,属较静水沉积(沈振枢等, 1993)。

3 卤水矿特征与储层分布

3.1 矿层特征

别勒滩区段为湖积平原,地面较为平坦,出露地层及地下与盐层有关的地层均为第四系(图4)(李瑞琴等, 2021)。在别勒滩地区卤水矿的勘查和开采中,根据富水性强弱,将其分为第I含矿层和第II

含矿层,即上部含矿层(Q₄)和中、下部含矿层(Q₃)。

第 I 含矿层: 为出露地表的上部盐层,岩性主要为粗巨粒石盐和含粉砂石盐,因孔隙大,富水性强,是本区主要矿层。

第 II 含矿层: 该矿层包括中部盐层和下部盐层,主要分布在别勒滩和达布逊,多为胶结致密的盐层,富水性较差,单位涌水量小(袁见齐等, 1995)。以往认为其工业价值不大,现为重要的后备资源,是本次研究的重点。

度为 0.55~54.05 m,平均值为 15.20 m(图 5a),石盐岩厚度具有中部厚、边缘减薄、北部厚、南部薄的特征。Q₃(第 II 含矿层)石盐岩厚度为 0.3~41.3 m,平均值为 20.89 m(图 5b),石盐岩厚度具有东南部厚、西北部薄的特征。石盐岩的厚度变化表明沉积中心由晚更新世的东南部转移到了全新世的北部。

4 储层物性特征

孔隙度和给水度是卤水储层质量评价的两个关键要素(赵艳军等, 2021)。孔隙度影响储集空间的大小,给水度对于卤水的产能和开采的难易程度起决定性作用(李文学等, 2018)。

本文统计了深部卤水储层(第 II 含矿层)不同岩性储层的孔隙度和给水度,结果分别见图 6 和图 7。别勒滩地区不同岩性储层在孔隙度等方面存在较大差异(李瑞琴等, 2021)。粉砂孔隙度变化范围为 4.15%~29.96%,平均值为 17.44%;泥沙孔隙度变化范围为 7.22%~38.3%,平均值为 17.40%;石盐孔隙度变化范围为 1.84%~45.2%,平均值为 17.89%;细砂孔隙度变化范围为 12.61%~41.4%,平均值为 29.69%;黏土样品仅测试得出两个孔隙度数据,分别为 14.94%和 5.5%;石膏有两个孔隙度数据,分别为 20.61%和 16.88%;一个中砂样品孔隙度为 31.8%。由上述数据可以看出,除黏土的孔隙度较低外,其他岩性样品的孔隙度值变化范围都较大,这主要与含盐系储层极易受盐类矿物结晶胶结有较大关系。随着埋深的增加,孔隙度值也明显降低,在 10~20 m 范围内,孔隙度高于 20%的样品已经明显减少,深度超过 20 m 孔隙度进一步降低(图 6a)。

粉砂给水度为 2%~21.5%,平均值为 8.3%;泥沙给水度为 1.8%~3.6%,平均值为 2.7%;石盐给水度为 0~33.3%,平均值为 8.12%;细砂给水度为 0~8.79%,平均值为 5.2%;黏土样品仅测试得出两个数据,分别为 9.05%和 1.7%;石膏两个数据,为 1.32%和 3.67%;中砂样品一个,给水度为 17.76%(图 6b)。除石盐和中细砂外,其他岩性的储层给水度相比孔隙度明显偏低,表明孔隙连通性差,胶结程度高,这也意味着卤水的开采难度极大。与孔隙度相比,随着埋深的增加,给水度的减少则相对较小。孔隙度和给水度整体上具有明显的正相关关系(图 7),这符合储层质量的一般规律。

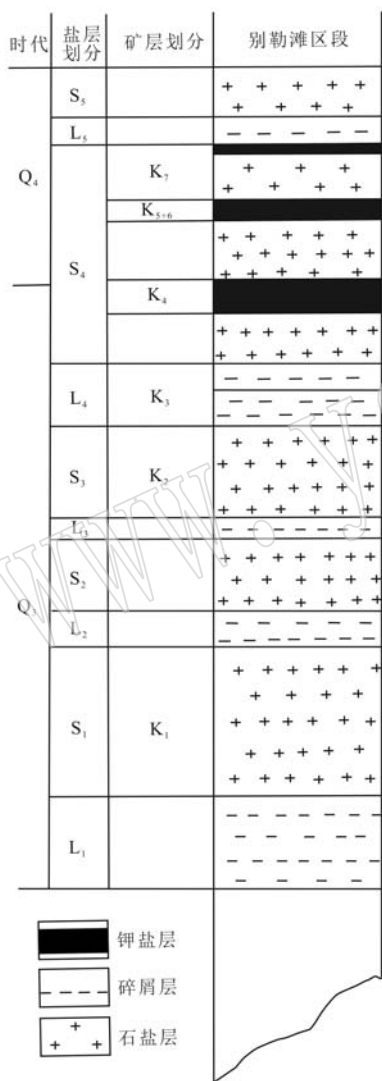


图 4 别勒滩地层剖面示意图[据袁见齐等(1995)修改]
Fig. 4 Stratigraphic section of Bieletan (modified after Yuan Jianqi et al., 1995)

3.2 储层空间分布特征

利用别勒滩区段的 97 个钻孔对储层的空间分布特征进行了分析研究。Q₄(第 I 含矿层)石盐岩厚

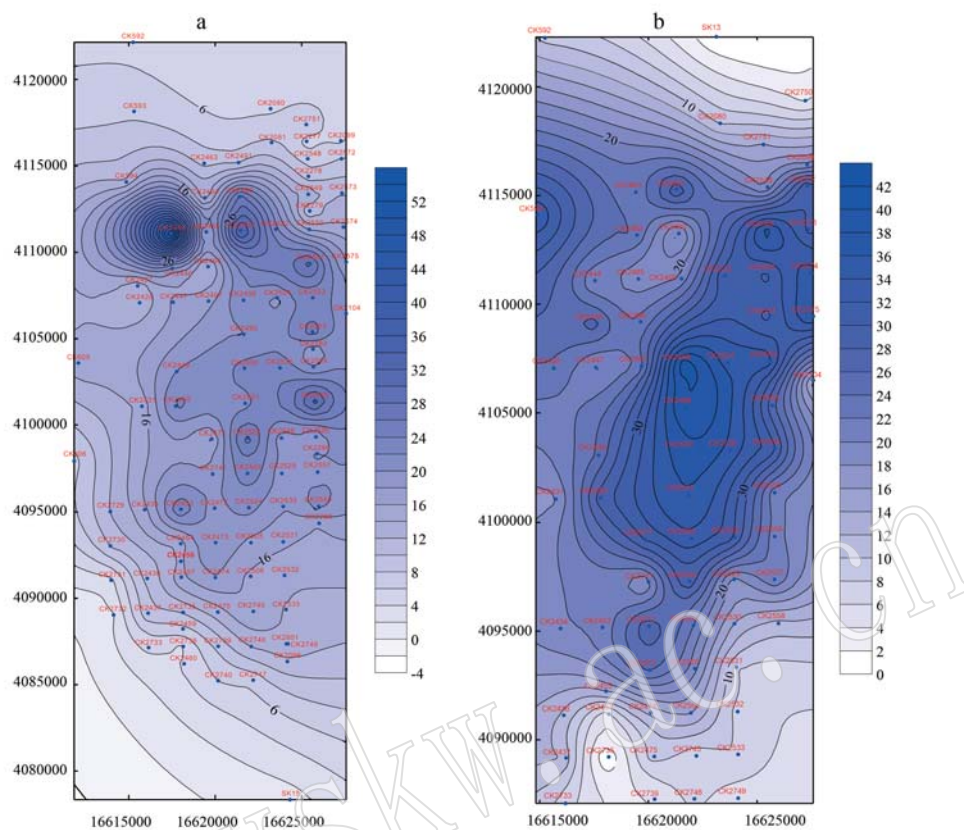


图5 别勒滩区块第I含矿层(a)和第II含矿层(b)中石盐储层厚度等值线图

Fig. 5 Contour maps of stone salt reservoir thickness in the I ore-bearing layer (a) and the II ore-bearing layer (b) from Beletan block

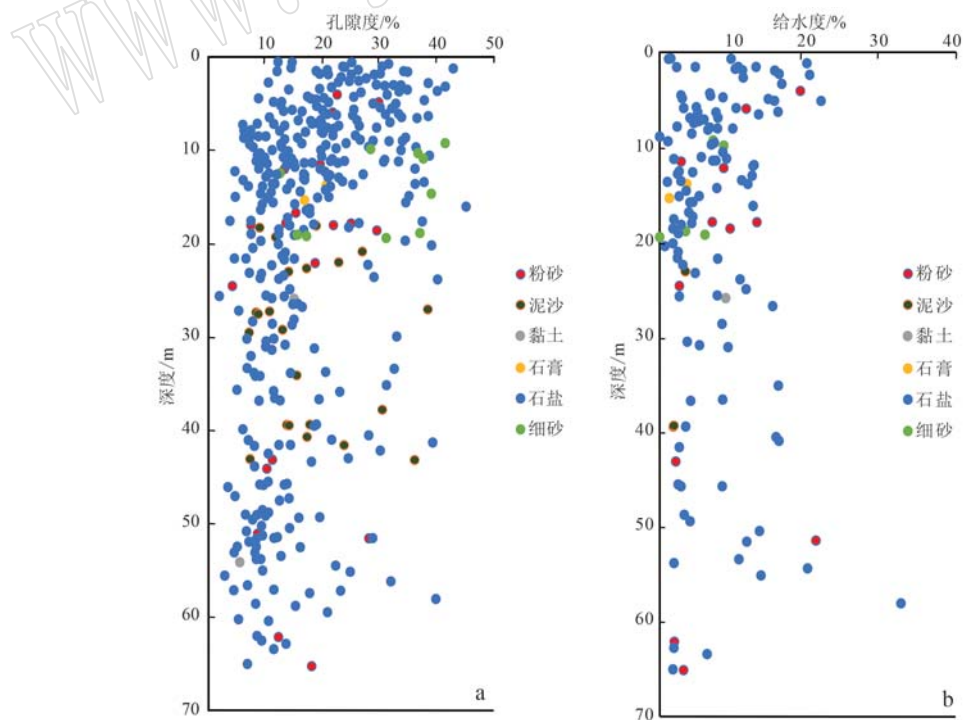


图6 别勒滩区段不同岩性卤水储层的孔隙度与深度对比图(a)和给水度与深度对比图(b)

Fig. 6 Comparisons of porosity and depth (a) and water supply degree and depth (b) of brine reservoirs with different lithologies in Beletan section

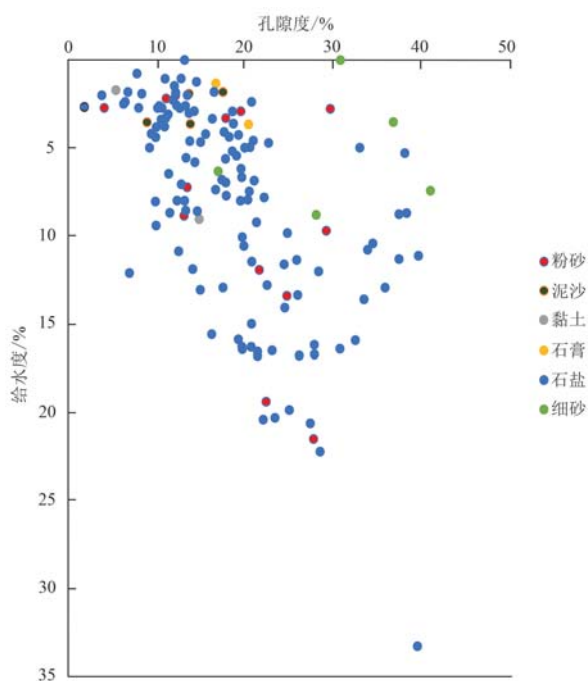


图 7 别勒滩区段不同岩性卤水储层的孔隙度和给水度对比图

Fig. 7 Comparison of porosity and water supply of brine reservoirs with different lithologies in Beletan section

对比不同粒度的石盐储层物性特征,发现浅部 (<20 m) 石盐晶体大小对孔隙度和给水度的影响较小,中粒石盐储层给水度在浅部相对较大;深部中粗粒和中粒石盐储层给水度基本相当,孔隙度中粒石盐储层最高,细粒和粗粒石盐储层的孔隙度和给水度相比中粒都较差(图 8)。

分析不同胶结物的石盐储层物性特征,发现粉砂胶结物的影响相对较小,其次是泥沙和无胶结物,黏土胶结的石盐物性最差(图 9)。胶结等成岩作用对储层的改造在卤水矿床的形成过程中发挥重要作用(刘成林等,2003)。胶结物的影响还取决于胶结物的多少和储层岩石的结构、构造特征(图 10a、10b),左侧石盐晶体干净,但孔隙不发育,右侧含大量泥沙胶结物,但物性较好。

综合以上分析,别勒滩区段深部储层(第 II 含矿层)以东南部厚度最大。储层质量由于中细砂发育相对局限,以石盐岩最优。石盐晶体的大小以中粒和中粗粒为佳,而粗晶和巨晶石盐可能多受到同沉积改造发生了重结晶,导致胶结致密,物性变差(图 10c、10d)。

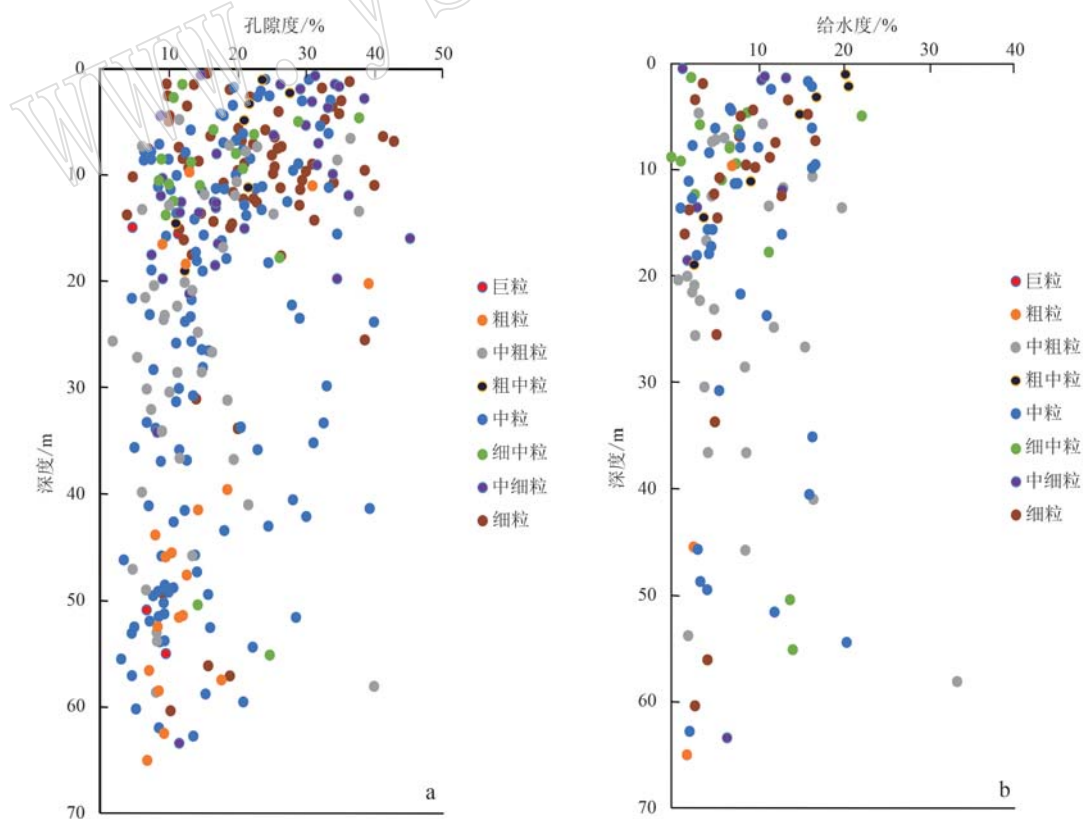


图 8 不同粒度的石盐储层孔隙度与深度对比图(a)和给水度与深度对比图(b)

Fig. 8 Comparisons of porosity and depth (a) and water supply degree and depth (b) of different grain size stone salt reservoirs

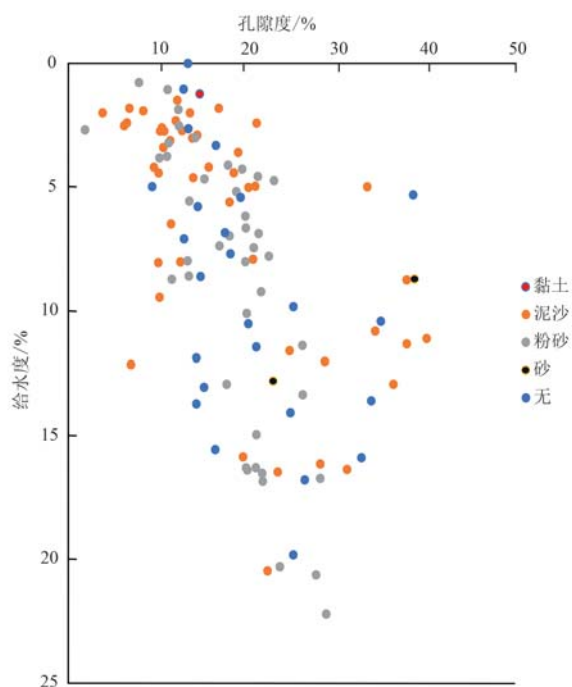


图9 不同胶结物的石盐储层物性特征
Fig. 9 Physical characteristics of rock salt reservoirs with different cements

5 矿体三维建模

利用三维可视化技术对矿区钻孔、勘查、测量等数据进行分析汇总后,建立相应地质数据库和各种类型的三维实体模型,可直观地展现矿区地质现象、矿体空间分布及相互关系,为矿体资源储量动态管理和资源综合利用提供数据(郝全明等, 2016; 申晓丹等, 2017; 张权等, 2019; 李金勇等, 2022)。三维可视化模型的建立是在对矿区成矿地质背景、地层、构造及成矿特征分析研究的基础上开展的(王兴保, 2018)。利用别勒滩工程示范区 97 个钻孔共 1 659 个岩性分层数据、169 个卤水样品的化学分析数据和 406 个储层物性分析数据,使用三维建模软件进行了三维模型构建工作(图 11)。

工作区上更新统(第Ⅱ含矿层)不同岩性地层的厚度模型表明,砂和黏土在西部和南部相对发育,石盐在中部厚度更大且分布范围较广,物源补给方向主要为西南部,盐类矿物沉积中心在中东部(图 12)。



图 10 典型石盐岩储卤层(a,b)和重结晶的巨晶石盐岩(c,d)照片
Fig. 10 Photos of typical halogen reservoir in rock (a, b) and recrystallized macrocrystalline rock (c, d)

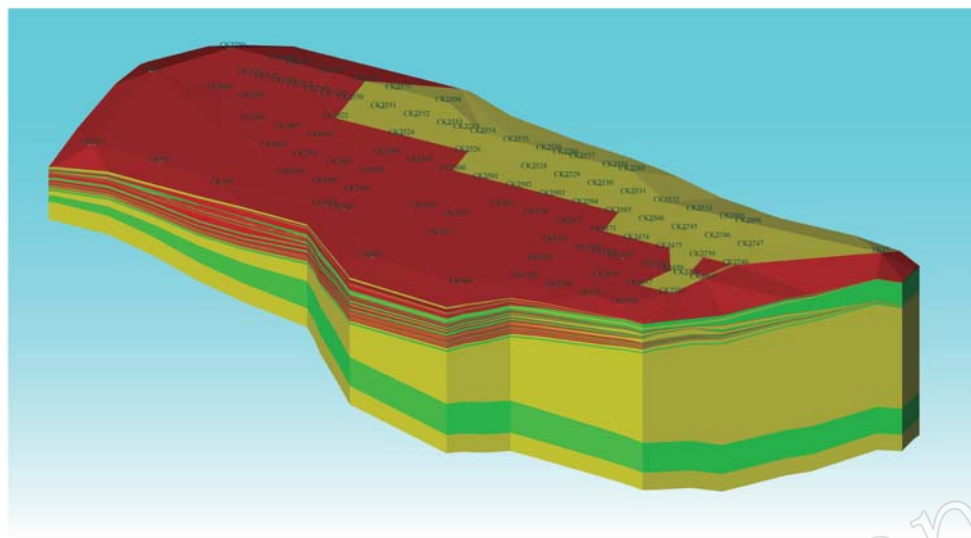


图 11 别勒滩工程示范区三维岩性图

Fig. 11 Three-dimensional lithology map of Beletan Project demonstration area

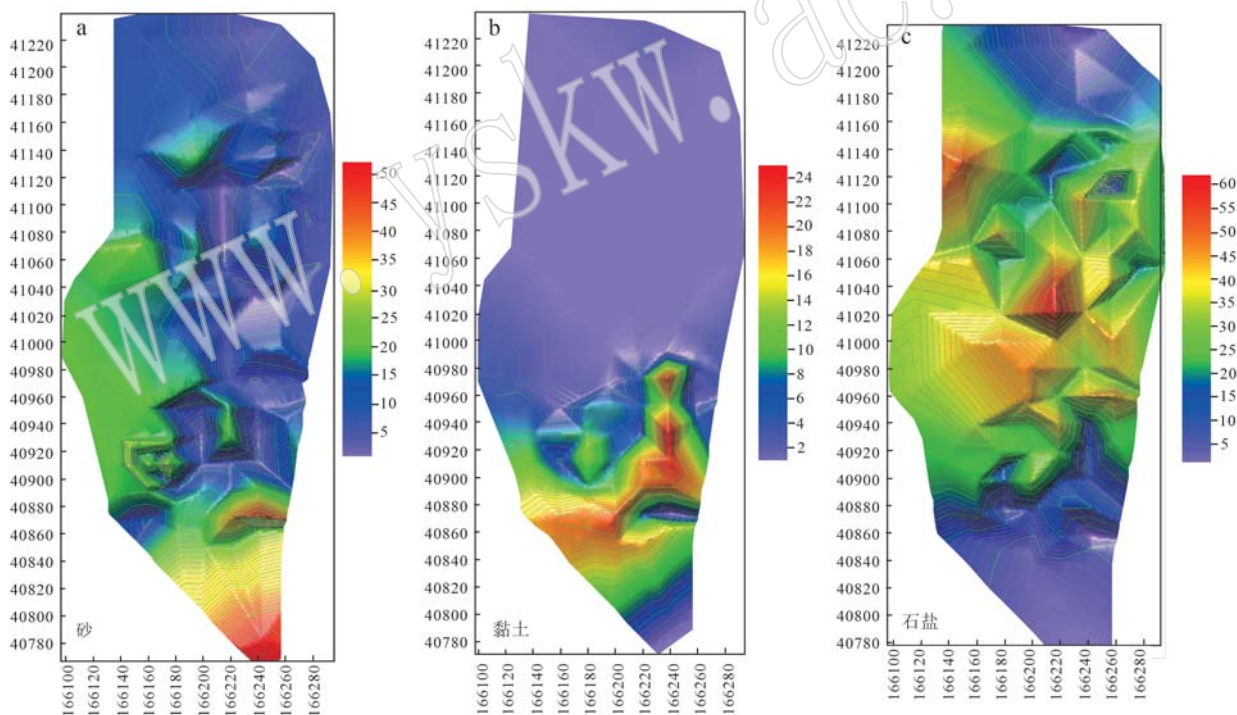


图 12 上更新统(Q₃)不同岩性地层厚度等值线图

Fig. 12 Contour map of strata thickness of different lithologies in Upper Pleistocene (Q₃)

别勒滩卤水锂矿 LiCl 含量的栅格图(图 13)显示,富 Li 卤水主要分布在研究区中北部,南部锂含量相对较低。储层的物性模型主要特征表现为随着深度增加,孔隙度有降低的趋势,而深部的给水度相比中深部略有增高(图 14a、14b)。

根据南北向岩性剖面模型(图 15)分析,高孔隙

度卤水储层主要在浅部发育,第 II 含矿层(Q₃)中,中部石盐厚度大且粉砂和黏土夹层少,主体上石盐晶间卤水储层质量比粉砂孔隙型储层好,不仅储卤空间大且有利于卤水的开采。北部和南部地层中盐间粉砂和黏土夹层发育,卤水开采的难度较大。

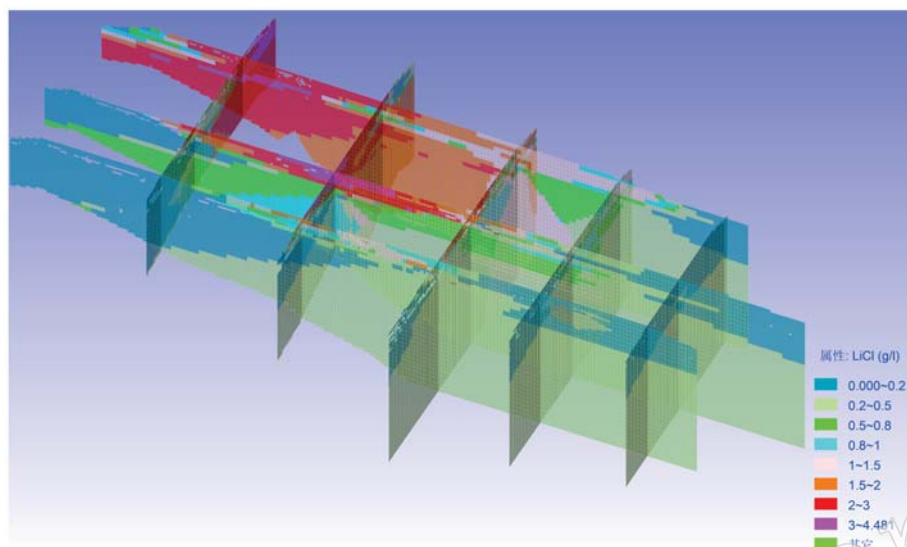


图 13 别勒滩卤水锂矿 LiCl 含量栅格图

Fig. 13 Grid diagram of LiCl content in Beletan brine lithium ore

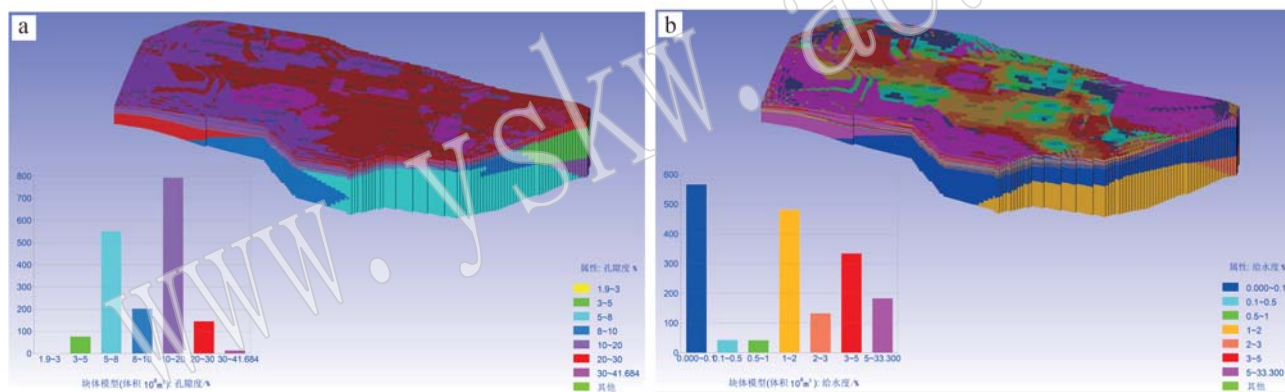


图 14 别勒滩卤水锂矿储层孔隙度块体模型(a)和给水度块体模型(b)

Fig. 14 Reservoir porosity block model (a) and block model of reservoir water supply degree (b) of Beletan brine lithium deposit

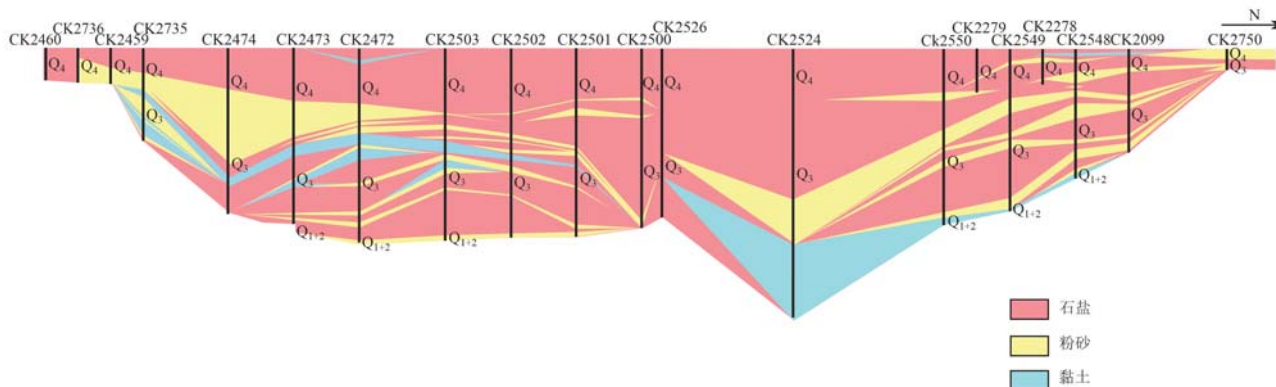


图 15 别勒滩研究区南北向岩性模型

Fig. 15 South-north lithology model of Beletan research area

6 结论

(1) 别勒滩区段深部储层(第Ⅱ含矿层)以东南部厚度最大,因中细砂发育相对局限,以石盐岩储层质量最优,且石盐晶体的大小以中粒和中粗粒最佳。

(2) 通过建立别勒滩区段深部卤水储层三维模型,发现富Li卤水主要分布在研究区中北部,南部锂含量相对较低;平面上第Ⅱ含矿层在中部石盐厚度大且粉砂和黏土夹层少,开采潜力大,是卤水矿勘查和开采的重点区域。

References

- Geng Jun, Zhang Xiyang, Li Wenxia, *et al.* 2021. Distribution characteristics of salt minerals on the surface in the middle east of Qaidam Basin and their relationship with the source of salt dust storm[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 121~130(in Chinese).
- Hao Quanming, Zhu Zhenlong, Xue Ruixiong, *et al.* 2016. Research on three-dimensional geology model of mine based on 3DMine[J]. *Coal Technology*, 35(5): 112~114(in Chinese).
- Li Botao, Zhao Yuanyi, Hao Aibing, *et al.* 2010. Composition characteristics of solidpotassium salts in Qarhan Salt Lake, Qinghai[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 381~382(in Chinese).
- Li Jinyong, Zou Jinchao and Zhao Liang. 2022. Application of 3DMine software in 3D modeling and resource estimation of a lead-zinc mining area[J]. *Mineral Exploration*, 13(10): 1 504~1 510(in Chinese).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, *et al.* 2021. A study of the field experimentalliquefaction and exploitation of low-grade soil potassium resource in the Bieletan experimental area, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 76~88(in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue, Zhang Fankai, Wang Jiang, *et al.* 2018. Characteristics and mining method experiment of deep artesian brine in potash deposit in the Luobei depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 605~1 606(in Chinese).
- Liang Qingsheng and Huang Qi. 1995. Salt-forming ages of the Dabusun and Bieletan Regions in Qarhan Playa, Qinghai[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (3): 126~131(in Chinese).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, *et al.* 2003. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur Lake, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (2): 240~246(in Chinese).
- Liu Wanping, Zhao Yanjun, Yao Fojun, *et al.* 2021. A study of controlling effect of fault structure on the deep brine distribution in the Bieletan area, Qaidam basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2 073~2 081(in Chinese).
- Niu Xue, Jiao Pengcheng, Cao Yangtong, *et al.* 2015. The origin of polyhalite and its indicating significance for the potash formation in the Bieletan area of the Qarhan Salt Lake, Qinghai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2 087~2 095(in Chinese).
- Shen Xiaodan, Chen Chao and Meng Haocan. 2017. Research progress of three-dimensional geological modeling of mine based on 3DMine [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 46(4): 34~37(in Chinese).
- Shen Zhenshu, Cheng Guo, Le Changshuo, *et al.* 1993. The Division and Sedimentary Environment of Quaternary Salt Bearing Strata in Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Tian Run. 2007. Hydrochemical and Hydororegime Study of Trata S4 Intercrystal Brine in Bieletan Section, Qarhan Salt Lake[D]. Master's Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Research Institute), 11~18(in Chinese).
- Tian Run, Han Fengqing, Ma Haizhou, *et al.* 2007. Distribution characteristics of themain ions in the intercrystalline brine of the Bieletan Regions of the Qarhan salt lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, (3): 7~13(in Chinese).
- Wang Chunlian, Liu Lihong, Li Qiang, *et al.* 2020. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium-potassium ore sources area in Jitai basin of Jiangxi Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65~84(in Chinese).
- Wang Chunlian, Meng Lingyang, Liu Chenglin, *et al.* 2021. A study of the genesis of Paleocene underground brine boron deposits in Jiangling Depression[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 1~13(in Chinese).
- Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Chenglin, *et al.* 2013. Transportation of potassiumfrom rivers surrounding Tarim Basin to Lop Nur since Quaternary[J]. *Mineral Deposits*, 32(6): 1 285~1 290(in Chinese).
- Wang Xingbao. 2018. Application of geostatistics based on 3DMine software to resource calculation of the Bijigou vanadium titanium magnetite deposit in Yangxian County, Shaanxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 54(S1): 1 409~1 415(in Chinese).
- Yang Qian. 1982. The sedimentation mechanism of potash deposits in the

- Qarhan inland salt lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 281~292 (in Chinese).
- Yu Shengsong, Tan Hongbing, Shao Mingyu, *et al.* 2000. Viscosity of strata S4 interbrine in Qarhan Salt Lakes[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, (5): 553~557(in Chinese).
- Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng, *et al.* 1995. The Formation Conditions of the Potash Deposits in Charhan Saline Lake, Caidamu Basin, China [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhan Dapeng, Yu Junqing, Gao Chunliang, *et al.* 2010. Hydrogeochemical conditions for the formation of lithium resources in the Four Salt Lakes brine in Qaidam Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 22 (5): 783~792(in Chinese).
- Zhang Pengxi. 1987. Salt Lakes in Qaidam Basin [M]. Beijing: Science Press, 217~229(in Chinese).
- Zhang Quan, Wang Jishan, Xie Encai, *et al.* 2019. Characteristics of structural superimposed halos and genesis of Yangmeitian Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Yunnan province [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 71(2): 58~65(in Chinese).
- Zhao Yanjun, Jiao Pengcheng, Wang Mingquan, *et al.* 2021. Characteristics of lithiumrich brine, reservoir physical properties and analysis on water-rich areas in the Yiliping salt lake, Qaidam basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2 162~2 172(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 耿 璠, 张西营, 李雯霞, 等. 2021. 柴达木盆地中东部表土盐类矿物分布特征及其与盐尘暴物源联系 [J]. *岩石矿物学杂志*, 40 (1): 121~130.
- 郝全明, 朱振龙, 薛瑞雄, 等. 2016. 基于 3DMine 的矿山三维地质建模研究 [J]. *煤炭技术*, 35(5): 112~114.
- 李波涛, 赵元艺, 郝爱兵, 等. 2010. 青海察尔汗盐湖固体钾盐物质组成特征 [J]. *矿床地质*, 29(S1): 381~382.
- 李金勇, 邹进超, 赵 亮. 2022. 3DMine 软件在某铅锌矿区三维建模及资源量估算中的应用 [J]. *矿产勘查*, 13(10): 1 504~1 510.
- 李瑞琴, 刘成林, 赵艳军, 等. 2021. 青海别勒滩试验区低品位固体钾盐液化开采的野外实验研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 76~88.
- 李文学, 张凡凯, 王 江, 等. 2018. 罗北凹地液体钾盐矿深部承压卤水特征及其开采方法试验研究 [J]. *地质学报*, 92(8): 1 605~1 616.
- 梁青生, 黄 麒. 1995. 青海察尔汗盐湖达布逊区段和别勒滩区段的成盐年代 [J]. *沉积学报*, (3): 126~131.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究 [J]. *沉积学报*, (2): 240~246.
- 刘万平, 赵艳军, 姚佛军, 等. 2021. 柴达木盆地别勒滩地区断裂构造对深部卤水分布的控制作用研究 [J]. *地质学报*, 95(7): 2 073~2 081.
- 牛 雪, 焦鹏程, 曹养同, 等. 2015. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段杂卤石成因及其成钾指示意义 [J]. *地质学报*, 89(11): 2 087~2 095.
- 申晓丹, 陈 超, 孟浩灿. 2017. 基于 3DMine 的矿山三维地质建模研究进展 [J]. *化工矿物与加工*, 46(4): 34~37.
- 沈振枢, 程 果, 乐昌硕, 等. 1993. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境 [M]. 北京: 地质出版社.
- 田 润. 2007. 察尔汗盐湖别勒滩段 S₄ 层晶间卤水水化学和水位动态变化特征研究 [D]. 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所).
- 田 润, 韩凤清, 马海州, 等. 2007. 察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水的主要离子分布特征 [J]. *盐湖研究*, (3): 7~13.
- 王春连, 刘丽红, 李 强, 等. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 39 (1): 65~84.
- 王春连, 孟令阳, 刘成林, 等. 2021. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼矿成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 1~13.
- 王文祥, 李文鹏, 刘成林, 等. 2013. 第四纪以来塔里木河流域对罗布泊的钾离子输运量 [J]. *矿床地质*, 32(6): 1 285~1 290.
- 王兴保. 2018. 基于 3DMine 软件的地质统计学在洋县毕机沟钒钛磁铁矿资源量计算中的应用 [J]. *地质与勘探*, 54(S1): 1 409~1 415.
- 杨 谦. 1982. 察尔汗内陆盐湖钾矿层的沉积机理 [J]. *地质学报*, (3): 281~292.
- 于升松, 谭红兵, 邵明显, 等. 2000. 察尔汗盐湖 S₄ 层晶间卤水的粘滞性 [J]. *海洋与湖沼*, (5): 553~557.
- 袁见齐, 杨 谦, 孙大鹏, 等. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件 [M]. 北京: 地质出版社.
- 展大鹏, 余俊清, 高春亮, 等. 2010. 柴达木盆地四盐湖卤水锂资源形成的水文地球化学条件 [J]. *湖泊科学*, 22(5): 783~792.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖 [M]. 北京: 科学出版社.
- 张 权, 王积善, 谢恩彩, 等. 2019. 云南杨梅田 Cu-Pb-Zn 多金属矿床构造叠加晕特征及矿床成因探讨 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 71(2): 58~65.
- 赵艳军, 焦鹏程, 汪明泉, 等. 2021. 柴达木盆地一里坪盐湖富锂卤水特征、储层物性及富水区分析 [J]. *地质学报*, 95(7): 2 062~2 072.