

# 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

赵艳军<sup>1)</sup>, 焦鹏程<sup>1)</sup>, 汪明泉<sup>1)</sup>, 张大义<sup>2)</sup>, 朱振光<sup>2)</sup>, 胡宇飞<sup>1)</sup>

1) 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;  
2) 五矿盐湖有限公司, 青海西宁, 810000

**内容提要:**一里坪盐湖是柴达木盆地中一个典型的富锂卤水矿床, 具有重大的经济价值。本文以查明盐湖深部卤水分布为目的, 从卤水储层的空间分布特征和储层物性的角度对富水区进行预测, 为卤水开发提供依据。研究区位于一里坪成盐盆地沉积中心区域, 晚更新世末期以来, 以沉积浅湖相的含淤泥和黏土粉砂岩, 盐湖相的含粉砂和黏土的石盐岩为特征。在垂向上, 由上下两套石盐岩夹中部粉砂岩组成一里坪富锂卤水的储层; 平面上, 研究区北部主要为浅湖相, 往南过渡为盐湖相, 石盐岩厚度在东南部最大。对储层厚度、孔隙度和给水度的分析表明, 第Ⅱ矿层孔隙型和晶间型卤水优质储层均位于研究区东部, 可作为卤水资源勘查开采的重点区域。

**关键词:**富水区; 储层; 卤水; 一里坪盐湖; 柴达木盆地

柴达木盆地中部由东、西台吉乃尔、一里坪、别勒滩等盐湖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 (Zhang Pengxi, 1987; Han Fengqing, 2001; Zhan Dapeng et al., 2010), 在我国战略性矿产勘查开发规划中占有重要地位。当前, 随着该区卤水锂资源开发进程的加快, 后备资源不足的问题越加明显, 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。

一里坪锂矿区位于柴达木盆地中部, 是一个以富锂、钾为特色、固液相并存的现代内陆沉积盐湖矿床。Zhang Pengxi (1987) 通过研究成矿元素的迁移规律, 认为一里坪在成为干盐湖之前, 湖水的来源不仅仅是昆仑山水系, 上新世末期西部残余卤水的东移和第一成盐期盐类物质的迁移也不容忽视。近年来, 多种同位素分析的结果更支持洪水河-那棱格勒河富锂水系是一里坪盐湖主要物质来源, 对其卤水锂成矿具有支配作用 (Fan Qishun et al., 2010; Yu Junqing et al., 2013, 2018; Tan Hongbing et al.,

2020; He Maoyong et al., 2020)。接受热泉水补给的那棱格勒河提供了柴达木盆地东台吉乃尔湖、西台吉乃尔湖和一里坪盐湖近 95% 的锂元素 (Li Jiansen et al., 2019)。石膏<sup>230</sup>Th定年研究表明一里坪表面盐层开始形成于末次冰期 (Chen Andong et al., 2017), 那棱格勒河上游阶地的年代学研究也同样证明了早全新世以来锂富集期的存在 (Chang Qifang, 2017)。

近年来, 随着卤水开采工程的实施, 深部卤水勘查和开发的速度不断加快, 对储层的精细刻画和富水区的勘查必将成为柴达木盆地盐湖资源研究的一个热点问题 (Jiao Pengcheng et al., 2016)。但由于对盐湖卤水储层复杂性认识不够, 对储层特征的研究相对较少。在柴达木盆地, 仅在昆特依盐湖开展了储层卤水形貌分析 (Wang Mili et al., 1994) 和储层渗透性对卤水组成的影响 (Yuan Xiaolong et al., 2018)。对罗布泊第四纪卤水钾矿储层特征的研究表明, 随着埋藏深度的增加, 承压水层的孔隙度相比潜卤水层降低一半, 而渗透率则降低到潜卤水层的

注: 本文为国家重点研发计划项目 (编号 2018YFC0604801) 资助的成果。

收稿日期: 2020-12-07; 改回日期: 2021-01-18; 网络发表日期: 2021-06-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 赵艳军, 男, 1982年生。副研究员, 主要从事沉积岩石学和地质流体分析方面的研究工作。E-mail: zhaoyanjun266@163.com。

通讯作者: 焦鹏程, 男, 1964年生。研究员, 长期从事盐湖矿产水文地质和钾盐地质研究。E-mail: jiaopengcheng@263.net。

**引用本文:** 赵艳军, 焦鹏程, 汪明泉, 张大义, 朱振光, 胡宇飞. 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. 地质学报, 95(7): 2062~2072, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021160.

Zhao Yanjun, Jiao Pengcheng, Wang Mingquan, Zhang Dayi, Zhu Zhenguang, Hu Yufei. 2021. Characteristics of lithium-rich brine, reservoir physical properties and analysis on water-rich areas in the Yiliping salt lake, Qaidam basin. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2062~2072.

约 2.3%,含黏土粉砂高的钙芒硝岩物性明显变差(Liu Chenglin et al., 2002),对本研究具有重要参考价值。

本研究利用一里坪盐湖大量的钻孔岩性和卤水储层物性统计数据,分析不同储层在平面上的分布特征,并对富水区进行预测,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

柴达木盆地为青藏高原北部北西向近菱形的断陷盆地,是一个典型的中新生代陆内沉积盆地。盆地西部为阿尔金山走滑断裂,北部为南祁连山走滑冲断带,盆地南部为东昆仑山走滑冲断带(Shen Zhenshu et al., 1993; Zhai Guangming et al., 1997; Yuan Jianying et al., 2006; Zhang Bin et al., 2018)。自印支运动以来该盆地一直处于拗陷状态,第四纪时期盆地的发展具有很强的继承性。一里坪盐湖位于柴达木盆地中部(图 1),向南与东、西台吉乃尔湖相连,向东北与柴北缘块断带相接,西为柴西断坳区,整体上为呈 NWW 向展布的狭长状盆地(Shen Zhenshu et al., 1993; Guo Zeqing et al., 2009)。

柴达木盆地在晚上新世时为统一的古湖。上新世末至早更新世初期新构造运动引起柴达木西北部抬升,而东南部则发生强烈沉降,柴达木古湖发生初步分割,形成了一里坪沉积盆地的雏形(Shen

Zhenshu et al., 1993)。至晚更新世末期,大约在距今 30~50 ka 前,柴达木盆地发生了一次规模很大的新构造运动,致使古湖进一步解体(Yuan Jianqi et al., 1995),即柴达木古湖形成了西部分离,东部分隔的状况(Wei Xinjun et al., 1993)。晚更新世晚期—全新世,一里坪东南部湖水急剧浓缩,开始形成广布的石盐沉积,普遍进入盐湖阶段,并在全新世中期盐湖全面干涸成干盐滩,仅在其边缘残存一些小盐湖(Shen Zhenshu et al., 1993)。

## 2 沉积环境

一里坪盐湖沉积相按水动力状况可分为滨浅湖相、浅湖相和浅湖湖心相。滨浅湖相特征是出现内碎屑、鲕粒、微小交错层理,陆源碎屑可达中—细砂级;浅湖相多见水平纹理和细粉砂条带或透镜体等;浅湖湖心相特征是发育大量纹层或薄层的黑色淤泥(Shen Zhenshu et al., 1993)。本次研究聚焦盐湖沉积中心区域,共统计了 69 个钻孔的岩性和对应的储层孔隙度、给水度测试数据,层位为上更新统上部和全新统。孔隙度和给水度的测试在青海省柴达木综合地质矿产勘查院测试中心完成。全新统以石盐岩沉积为特征,上更新统岩性以含粉砂和黏土的石盐岩、含淤泥和黏土的粉砂岩为主,局部见中—细砂岩,底部以厚层黏土层为界(图 2)。

研究区全新统发育盐湖相。上更新统以浅湖和盐湖相为特征,浅湖相为含淤泥和黏土的粉砂

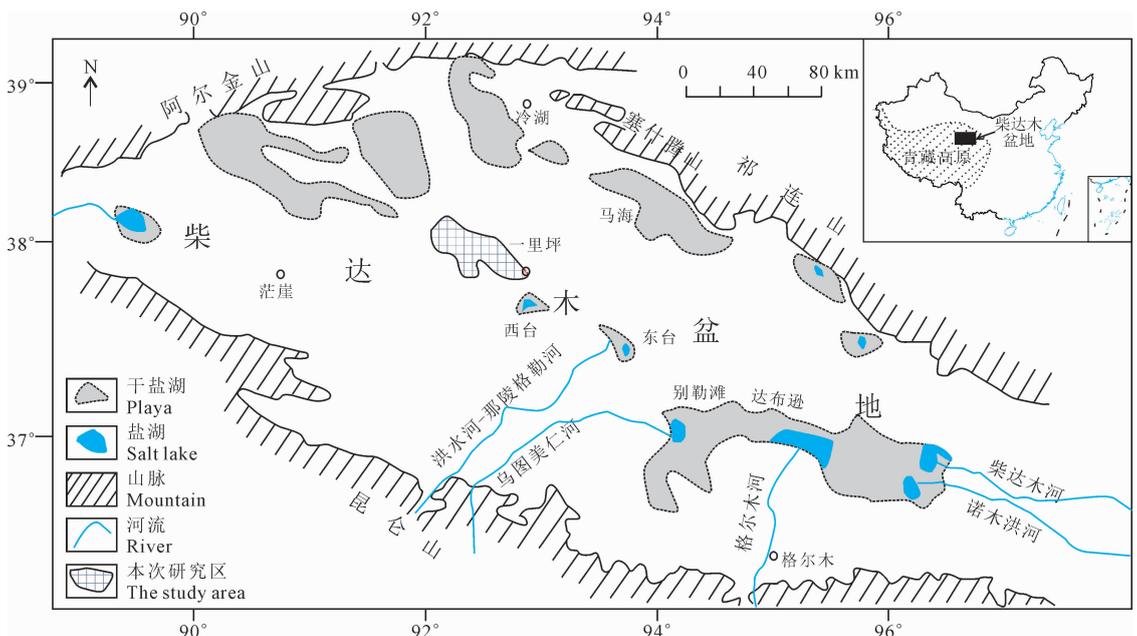


图 1 柴达木盆地主要盐湖分布及研究区位置图

Fig. 1 The sketch distribution of main salt lakes in the Qaidam basin and the location of study area

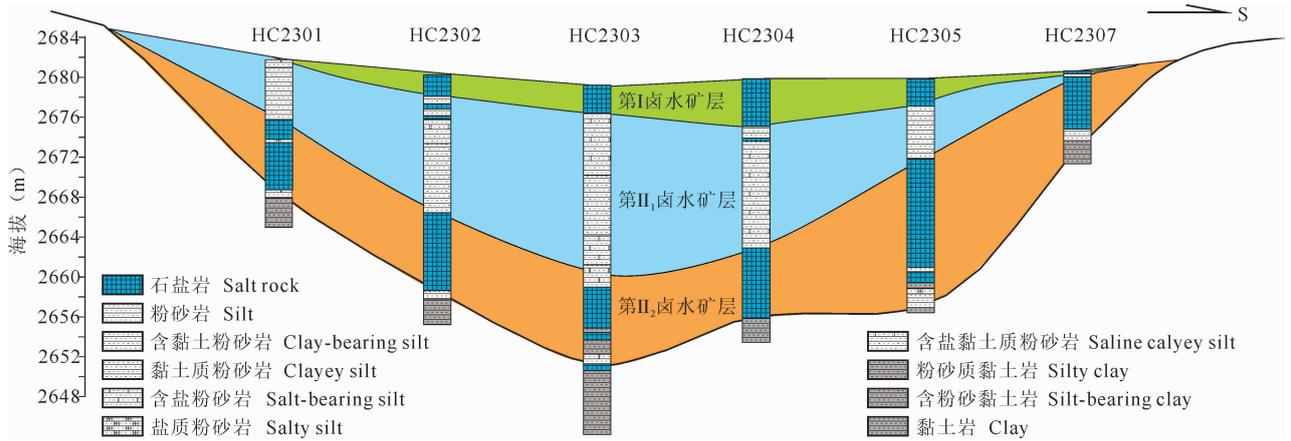


图2 一里坪盐湖南北向矿层展布剖面图

Fig. 2 The N-S correlation of profiles of brine aquifers in the Yiliping salt lake

岩,部分层段发育少量石膏,淤泥为淡化浅湖沉积体系的中心;盐湖相为含粉砂的石盐岩,厚层石盐岩中可见黏土和淤泥夹层,表明在盐湖沉积时期,受气候影响,短期内湖水急剧淡化,在浅湖的沉积中心沉积黏土和淤泥;中—细砂岩在部分层段发育,表明受气候变化引起的短时间水位下降,滨浅湖沉积体系向沉积中心推进,形成了局部的粗碎屑沉积物。根据上更新统的地层厚度、岩性组合特征、碎屑沉积物的粒度和含盐率(石盐岩与地层厚度的比值),对沉积相的平面展布进行了分析(图3),认为研究区北部主要为浅湖相,东南部为台吉乃尔湖卤水补给的方向,发育盐湖相,石盐岩厚度在研究区东南部最大。

### 3 卤水矿特征与储层分布

在一里坪盐湖卤水矿的勘查和开采中,按储层的岩性和埋藏深度等的差异性,将其分为I卤水矿层和II卤水矿层,两个卤水矿层间存在透水性较弱的隔水层(图2)。其中I卤水矿层位于浅部的全新世地层中,储层岩性主要以石盐岩为主,富水性较强;II卤水矿层位于深部的上更新世地层中,富水性弱到中等,储层岩性为石盐岩、含砂石盐岩和粉砂岩。第II卤水矿层又按储层的岩性和孔隙类型分为储存于粉砂岩孔隙中的II<sub>1</sub>孔隙卤水和储存于石盐岩晶体间的II<sub>2</sub>晶间卤水两个亚层(图2)。

(1) I 卤水矿层:该卤水矿层赋存于全新统湖相

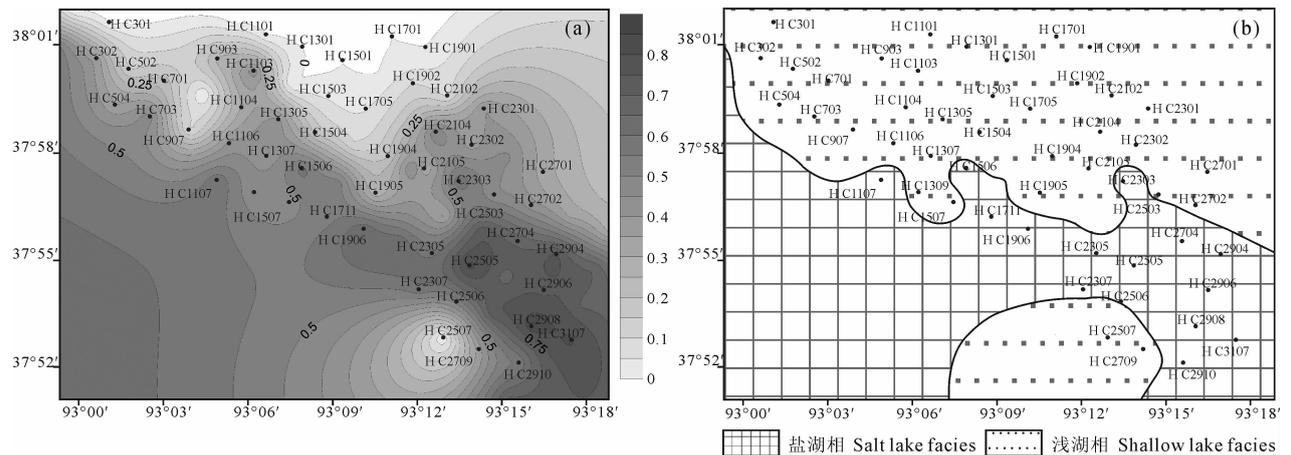


图3 一里坪盐湖上更新统上部含盐率等值线和沉积相平面展布图

Fig. 3 The salt content contour and distribution of sedimentary facies of the upper part of the Late Pleistocene sediments in the Yiliping salt lake

(a)—含盐率等值线图(%);(b)—沉积相平面展布图

(a)—The contour map of salt contents (%);(b)—the distribution map of sedimentary facies

化学沉积中,储层岩性主要为黄白色含粉砂的石盐岩、灰白色石盐岩,矿层呈水平或近水平状产出,储层厚度由湖盆边缘向中部增加,东西长约 30 km,南北宽约 7 km,厚度 0.05~2.84 m,平均厚度 1.10 m (图 4)。受近年来卤水开采活动的影响,该层卤水已接近枯竭,仅局部残存透镜状卤水矿层。该卤水矿层 LiCl 品位在 361.79~6426.98 mg/L 之间,平均含量 2065.91 mg/L,多集中在 1000~2300 mg/L 之间;矿区边缘为贫矿区,品位一般低于 200 mg/L。卤水 KCl 品位为 0.48%~2.63%,平均 1.66%,多集中在 1.2%~2.0%之间。

(2) II 卤水矿层:该卤水矿层主要赋存于上更新统湖积、风积及化学沉积层中,分布于第 I 卤水锂矿层之下,储层岩性主要为含粉砂的石盐岩、粉砂质石盐岩、盐质粉砂岩、粉砂岩、中细砂岩。矿层近水平状产出,东西长约 30 km,南北宽约 9.0 km,厚度 0.05~31.70 m,平均厚度 13.214 m,中部厚,向边缘逐渐变薄。该卤水矿层 LiCl 品位在 48.87~8180.35 mg/L 之间,平均含量 2044.66 mg/L,多集中在 1000~2400 mg/L 之间。KCl 品位 0.05%~3.05%,平均 1.45%,多集中在 1.2%~2.4%之间。其中,II<sub>1</sub>矿层(孔隙型储层卤水)主要分布在矿区的中部,厚度一般 3.0~12.0 m,最厚达 24.7 m,向边缘逐渐变薄(图 5)。II<sub>2</sub>矿层(晶间卤水)主要分布在矿区的东部,厚度一般 4.0~15.0 m,最厚达

25.40 m。垂向上,两层卤水矿层的分布呈消长关系,II<sub>2</sub>矿层位于II<sub>1</sub>矿层下部(图 6)。

#### 4 储层物性特征及富水区预测

孔隙度和给水度是卤水储层质量评价的两个关键要素。孔隙度影响储集空间的大小,给水度决定了卤水的产能和开采的难易程度(Li Wenxue et al., 2018)。通过分析钻孔岩心孔隙度和给水度测试数据,对研究区储层的物性特征进行了研究。

在 I 卤水矿层共 35 个钻孔获得储层孔隙度和给水度测试数据 39 个,其中孔隙度变化范围为 15.18%~44.85%,平均值为 32.17%;给水度的变化范围为 3.23%~37.70%,平均值为 19.47%。孔隙度平均值在研究区中部存在一个明显的低值区,在东北部和西南部最高(图 7)。给水度平均值与孔隙度表现出基本一致的特点(图 8)。将孔隙度和给水度的特征与 I 卤水矿层石盐岩的厚度平面分布(图 4)进行对比分析,可见全新统石盐沉积的中心卤水储层质量较差,东北和西南两侧储层质量较好。

在 II<sub>1</sub>卤水矿层共 48 个钻孔获得储层孔隙度和给水度测试数据 130 个,其中孔隙度变化范围为 12.50%~46.71%,平均值为 31.38%;给水度的变化范围为 1.81%~35.48%,平均值为 9.91%。II<sub>1</sub>卤水矿层孔隙度平均值在研究区中部相对较低,在东北部和西南部、东南部最高(图 9)。给水度平均

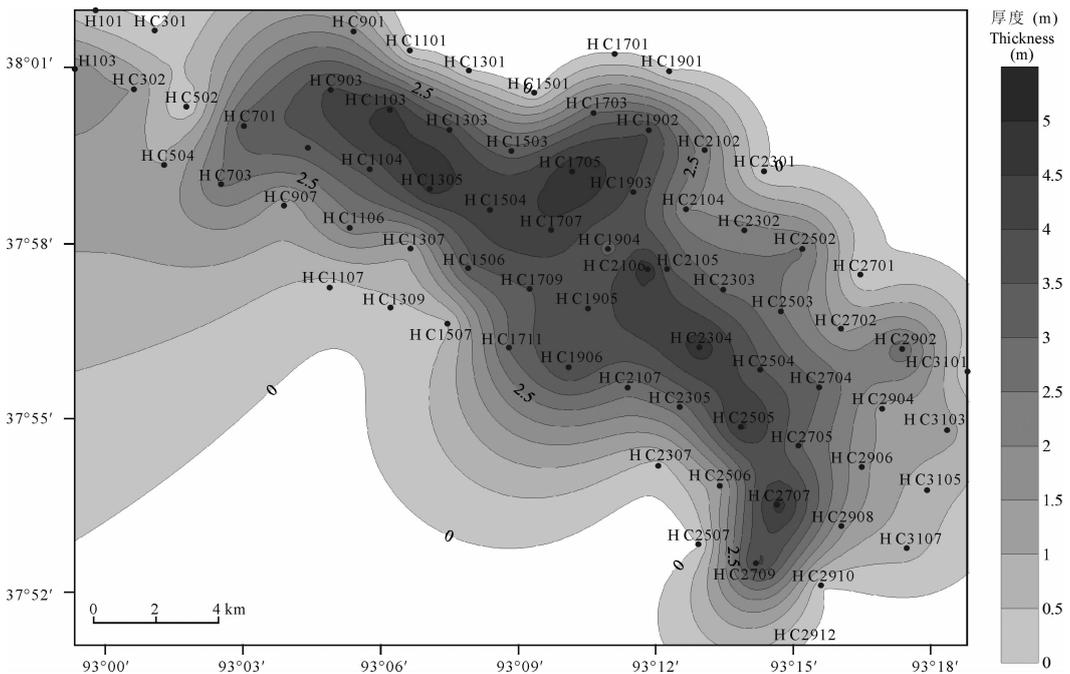


图 4 一里坪盐湖第 I 卤水矿层分布及厚度等值线图

Fig. 4 The distribution and thickness contours of the I aquifer of brine in the Yiliping salt lake

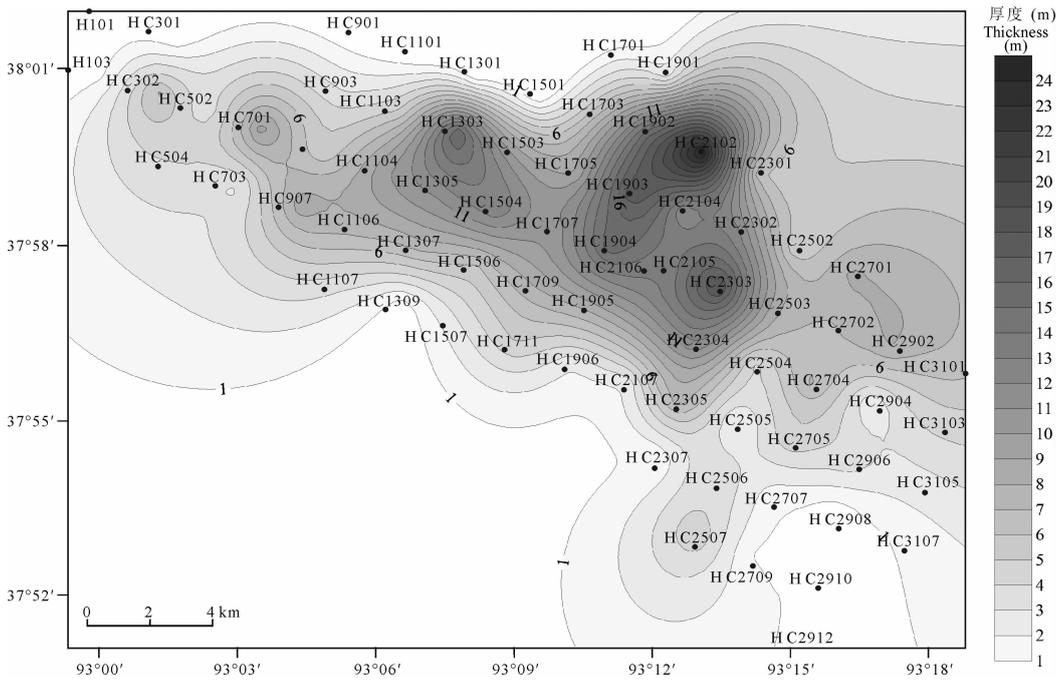


图 5 一里坪盐湖第 II<sub>1</sub> 卤水矿层(孔隙型卤水)厚度等值线图

Fig. 5 The thickness contour of the II<sub>1</sub> aquifer of pore brine in the Yiliping salt lake

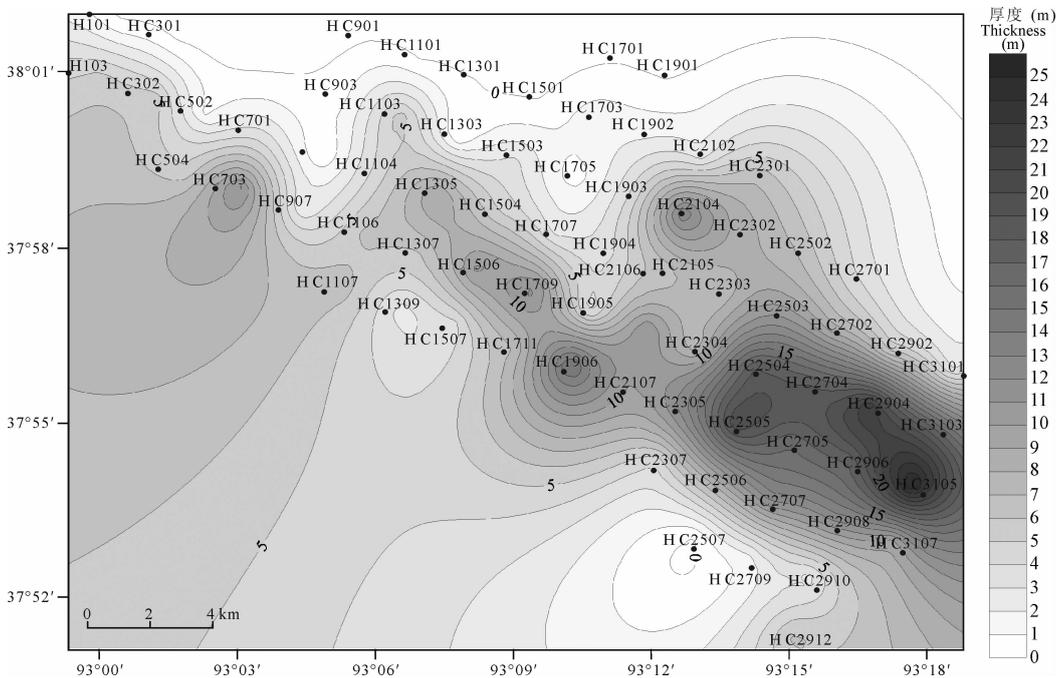


图 6 一里坪盐湖第 II<sub>2</sub> 卤水矿层(晶间卤水)厚度等值线图

Fig. 6 The thickness contour of the II<sub>2</sub> aquifer of intercrystalline brine in the Yiliping salt lake

值与孔隙度相比,仅东北部高值区比较明显(图 10),其他孔隙度高值区储层孔隙的联通性较差,给水度受到很大影响,这给卤水的开采带来很大困难。而且从孔隙度和给水度的平面分布来看,储层的非均质性较强,这可能与陆相咸水湖浅湖沉积环境稳

定性较差,而且还受到风成砂发育的影响有关。

在第 II<sub>2</sub> 卤水矿层共 55 个钻孔获得储层孔隙度和给水度测试数据 251 个,其中孔隙度变化范围为 11.26%~50.71%,平均值为 27.90%;给水度的变化范围为 0.38%~38.00%,平均值为 12.34%。第

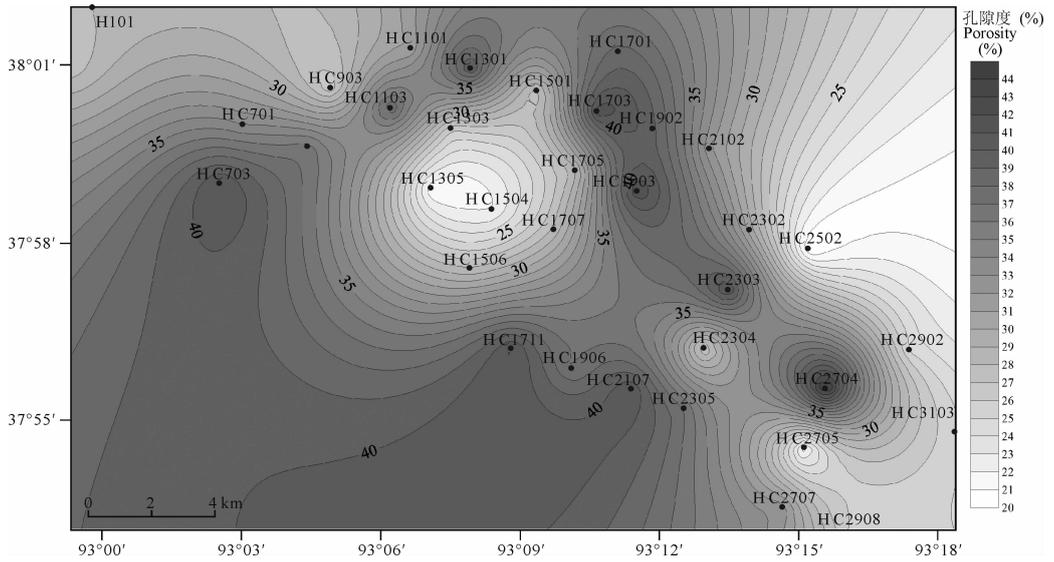


图 7 一里坪盐湖第 I 卤水矿层储层孔隙度平均值等值线图

Fig. 7 The contour of average reservoir porosity of the I brine aquifer in the Yiliping salt lake

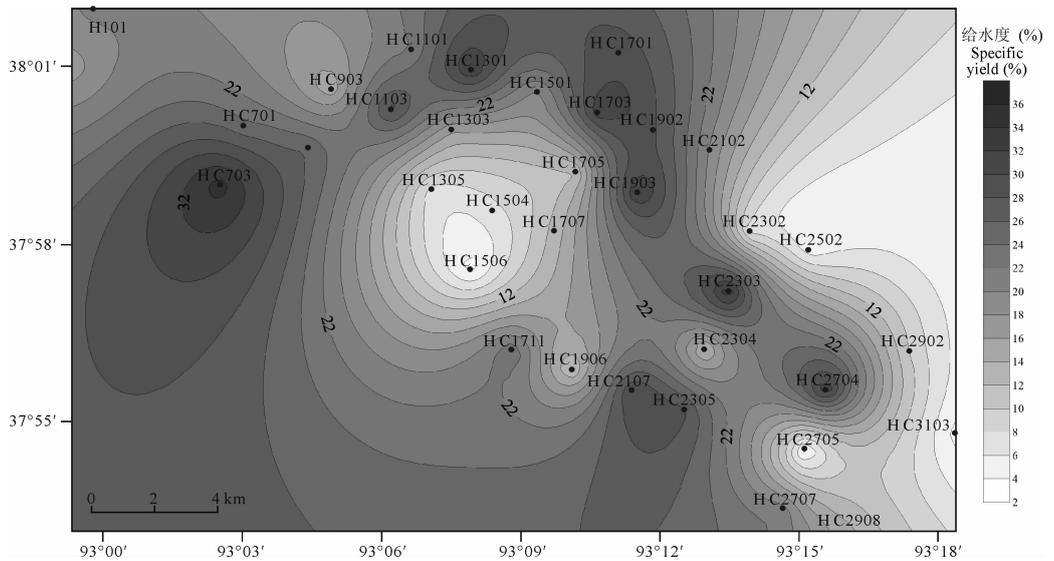


图 8 一里坪盐湖第 I 卤水矿层储层给水度平均值等值线图

Fig. 8 The contour of average specific yield of reservoir in the I brine aquifer in the Yiliping salt lake

Ⅱ<sub>2</sub> 卤水矿层(晶间型)与第Ⅱ<sub>1</sub> 卤水矿层(孔隙型)相比,虽然孔隙度的平均值略小,但给水度平均值相对增大。第Ⅱ<sub>2</sub> 卤水矿层孔隙度平均值在研究区东北部存在明显的高值区,其他区域有多个小规模的高值区(图 11)。给水度平均值与孔隙度相似(图 9),而且在平面上变化也较大,储层非均质性强。

Ⅱ<sub>1</sub> 矿层(孔隙型储层卤水)储层孔隙度和给水度有明显正相关性(图 13a),孔隙度和给水度值有很好的对应关系。将其按不同的岩性来统计分析,淤泥孔隙度和给水度值较低,中细砂岩相对较高,占储层绝大多数的粉砂岩和黏土岩孔隙度和给水度值

变化范围均较大,这可能与局部受成岩作用的影响,储层物性发生了变化有关系。断裂构造、溶解和胶结等成岩作用对储层的改造在卤水矿床的形成发挥重要作用(Liu Chenglin et al., 2003)。粉砂岩中含有物的不同(盐、细砂和黏土)对其储集能力的影响规律并不明显。Ⅱ<sub>2</sub> 矿层(晶间型储层卤水)储层孔隙度和给水度也有明显正相关性(图 13b)。

研究区第 I 卤水矿层目前已经大范围枯竭,因此本次研究仅对第Ⅱ 卤水矿层卤水的分布进行分析。碎屑岩(主要是粉砂岩和黏土岩)储层即孔隙型卤水储层的厚度较大的东北部,其孔隙度和给水度



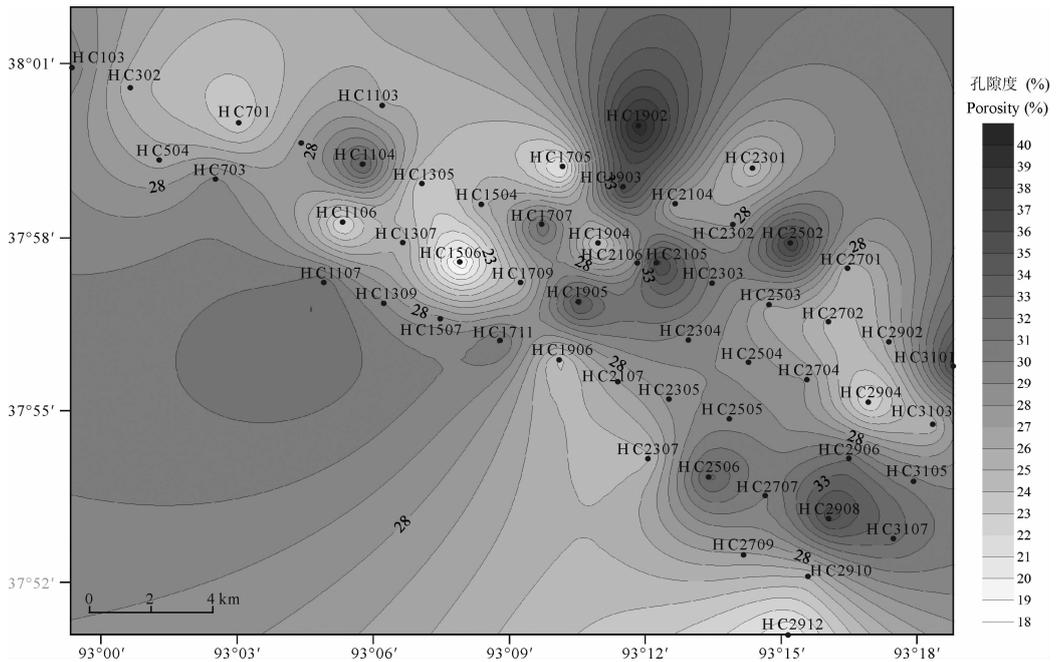


图 11 一里坪盐湖第 II<sub>2</sub> 卤水矿层储层孔隙度平均值等值线图

Fig. 11 The average porosity contour of reservoir for the II<sub>2</sub> brine aquifer in the Yiliping salt lake

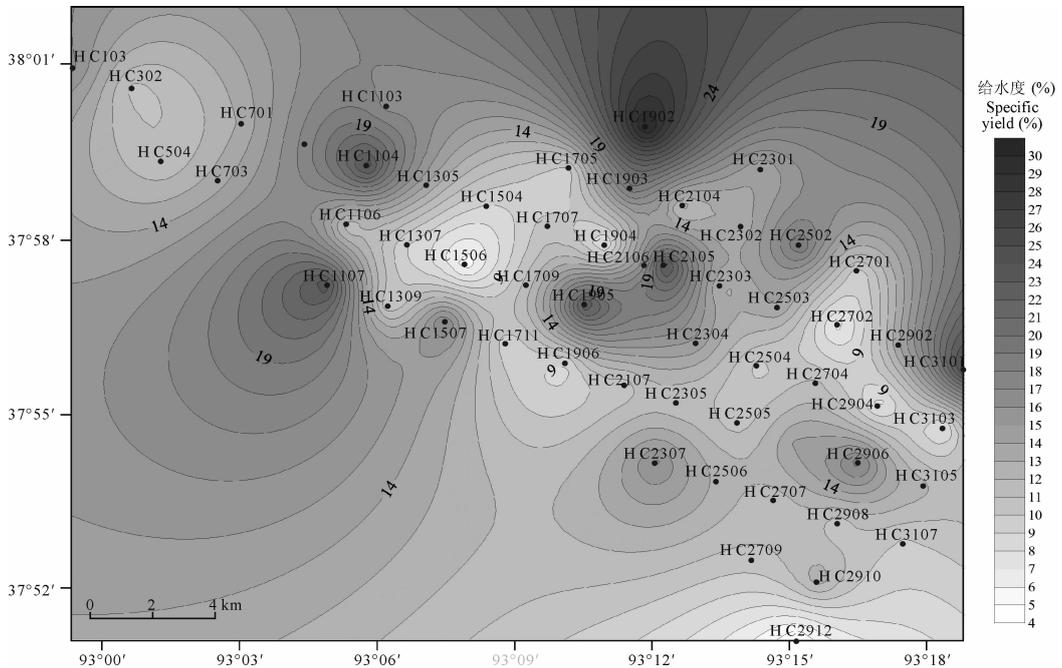


图 12 一里坪盐湖第 II<sub>2</sub> 卤水矿层储层给水度平均值等值线图

Fig. 12 The contour of average specific yield of the II<sub>2</sub> brine aquifer in the Yiliping salt lake

指导了深部钾盐勘查,取得深部找钾重大进展,也进一步证明了断裂带控矿模式在盐湖深部卤水优质储层和富水区的勘查中具有重要意义(Jiao Pengcheng et al., 2018)。石盐岩与碎屑岩优质储层的发育在平面上有一定的重叠,推测研究区卤水储层受到浅部张性断裂的控制和改造,在东部形成了一个断裂

破碎带,成为研究区有利的富水区。

## 5 结论

(1)一里坪主要发育浅湖和盐湖沉积体系。研究区北部主要为浅湖相,往南过渡为盐湖相。在垂向上,由上下两套石盐岩夹中部粉砂岩层组成 I、

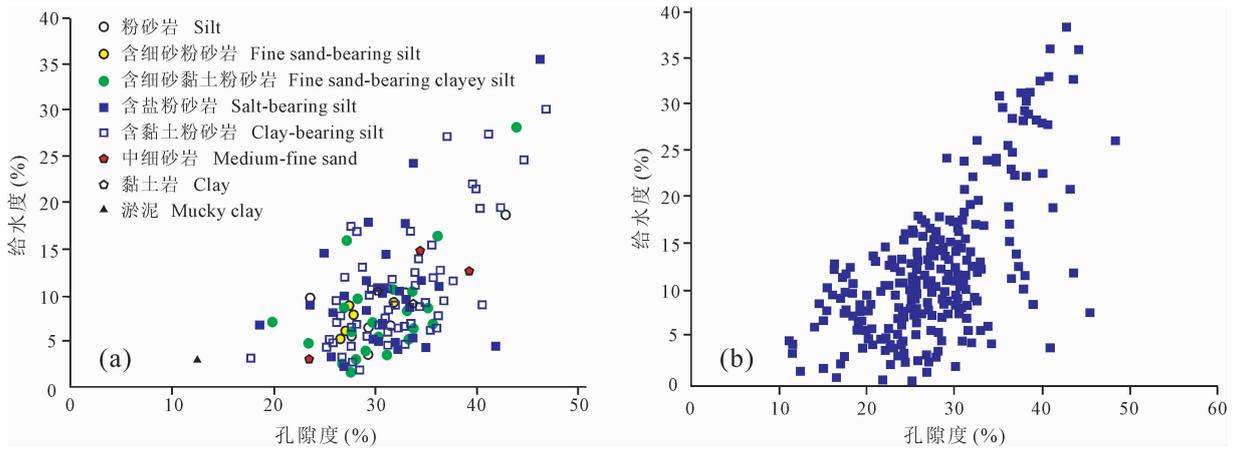


图 13 一里坪盐湖第 II 卤水矿层不同岩性储层孔隙度和给水度对比图

Fig. 13 The comparison among different petrology within the II brine aquifer

with respect to porosity and specific yield of the reservoir

(a)—孔隙型卤水储层; (b)—晶间型卤水储层

(a)—Reservoir of pore brine; (b)—reservoir of intercrystalline brine

II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>共三个卤水矿层。

(2)第 I 卤水矿层平均厚度 1.10 m,孔隙度平均值为 32.17%,给水度平均值为 19.47%,孔隙度和给水度低值区位于研究区中部;第 II<sub>1</sub> 卤水矿层(孔隙型)最厚达 24.7 m,孔隙度平均值为 31.38%,给水度平均值为 9.91%;第 II<sub>2</sub> 卤水矿层(晶间型)最厚达 25.40 m,孔隙度平均值为 27.90%,给水度平均值为 12.34%。II<sub>1</sub> 矿层和 II<sub>2</sub> 矿层孔隙度和给水度的高值区均位于研究区东部,是富水区勘查的重点区域。

**致谢:**感谢五矿盐湖有限公司盐田事业部唐发满部长等在样品采集和资料收集过程中给予的帮助。

## References

Chang Qiufang. 2017. Optically stimulated luminescence chronology and palaeoenvironmental implications of Aeolian sediment and the Nalinggele river terraces in the Tibetan Plateau. PhD degree of the University of Chinese Academy of Sciences. 73~89 (in Chinese with English abstract).

Chen Andong, Zheng Mianping, Shi Linfeng, Wang Hailei, Xu Jianming, Yuan Wenhui. 2017. Gypsum <sup>230</sup>Th dating of the 15YZK01 drilling core in the Qaidam basin: salt deposits and their link to Quaternary glaciation and tectonic movement. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(4): 494~504 (in Chinese with English abstract).

Fan Qishun, Ma Haizhou, Lai Zhongping, Tan Hongbing, Li Tingwei. 2010. Origin and evolution of oilfield brines from Tertiary strata in western Qaidam basin: constraints from <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr,  $\delta$ D,  $\delta^{18}$ O,  $\delta^{34}$ S and water chemistry. *Chinese Journal of Geochemistry English Language Edition*, 29: 446~454.

Guo Zeqing, Wang Zongli, Li Xuefeng, Zhang Lin, Zhang Shaosheng, Kong Hua. 2009. Preliminary study on sedimentary facies of the Neogene in Yiliping area, Qaidam

basin. *Journal of Palaeogeography*, 11(3): 284~292 (in Chinese with English abstract).

He Maoyong, Luo Chongguang, Yang Hongjuan, Kong Fancui, Li Yulong, Deng Li, Zhang Xiyang, Yang Kaiyuan. 2020. Sources and a proposal for comprehensive exploitation of lithium brine deposits in the Qaidam basin on the northern Tibetan Plateau, China: evidence from Li isotopes. *Ore Geology Reviews*, 117: 103277.

Han Fengqing. 2001. The geochemistry of lithium in salt lake on Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Salt Lake Research*, 9(1): 55~61.

Jiao Pengcheng, Zhang Jianwei, Yao Fujun, Zhao Long. 2016. Potassium exploration and research progress of deep brine in Mahai salt lake. *Mineral Deposits*, 35(6): 1305~1308 (in Chinese with English abstract).

Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Zhang Hua, Yan Hui, Zhang Fankai, Li Wen, Wang Licheng, Jiao Ding, Zhang Yun, Shen Lijian. 2018. New progress of potassium-bearing brine prospecting in deep salt lake of Lop Nur region. *Mineral Deposits*, 37(1): 191~194 (in Chinese with English abstract).

Li Jiansen, Ling Zhiyong, Shan Fashou, Chen Liang, Han Jinjun, Wang Jianping. 2019. Hydrogen, oxygen and strontium isotopes' indication on origin of lithium-rich salt lakes in eastern Kunlun Mountains. *Wetland Science*, 17(4): 17~24 (in Chinese with English abstract).

Li Wenxue, Zhang Fankai, Wang Jiang, Chen Wei, Yang Baoheng. 2018. Characteristics and mining method experiment of deep Artesian brine in potash deposit in the Luobei depression. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1605~1616 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, Li Shude. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the aquifers in Quaternary potash deposits in LoP Nur Lake, Xinjiang, China. *Geological Review*, 48(4): 437~443 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, Yang Zhichen, Li Shude, Chen Yongzhi. 2003. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur Lake, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 240~246 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi. 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur salt lake, Xinjiang. *Acta*

Geoscientia Sinica, 30(6): 796~802 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Sun Xiaohong, Lü Fenglin, Zhang Hua. 2018. Research on potash forming and exploration progress in potash deposits in the Lop Nur salt lake. Acta Geologica Sinica, 92(8): 1551~1570 (in Chinese with English abstract).

Shen Zhenshu, Chen Guo, Le Changshuo, Liu Shuqin. 2003. The Division and Sedimentary Environment of Quaternary Salt-bearing Strata in Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 132~134.

Tan Hongbing, Chen Jun, Rao Wenbo, Zhang Wenjie, Zhou Huifang. 2020. Geothermal constraints on enrichment of boron and lithium in salt lakes: an example from a river-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun Mountains, China. Journal of Asian Earth Sciences, 51: 21~29.

Wang Mili, Liu Chenglin, Li Changhua, Wei Baohe, He Jinfa, Xuan Zhiqiang. 1994. Microscopic pores in the brine-bearing layers in Kuntayi potash deposit with reference to SEM researches. Geology of Chemical Minerals, 16(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).

Wei Xinjun, Jiang Jixue. 1993. The evolution of the Quaternary salt lake in the Qaidam basin. Acta Geologica Sinica, 67(3): 255~265 (in Chinese with English abstract).

Yu Junqing, Gao Chunliang, Cheng Aiyong, Liu Yong, Zhang Lisa, He Xianhu. 2013. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam basin, northern Tibetan Plateau, China. Ore Geology Reviews, 50: 171~183.

Yu Junqing, Hong Rongchang, Gao Chunliang, Cheng Aiyong, Zhang Lisa. 2018. Lithium brine deposits in Qaidam basin: constraints on formation processes and distribution pattern. Journal of Salt Lake Research, 26(1): 7~14 (in Chinese with English abstract).

Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng. 1995. The Formation Conditions of the Potash Deposits in Charhan Saline Lake, Caidamu Basin, China. Beijing: Geological Publishing House, 45~46.

Yuan Jianying, Chen Qilin, Chen Yingbin, Yan Cunfeng. 2006. Petroleum geological character and favorable exploration domains of Qaidam basin. Natural Gas Geoscience, 17(5): 640~644 (in Chinese with English abstract).

Yuan Xiaolong, Sheng Jinchang, Zhang Xiying, Li Binkai, Zhou Tongliang, Gao Donglin. 2018. Influence of shallow reservoir upon the components of brines in the Kuntayi playa. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(2): 13~20 (in Chinese with English abstract).

Zhai Guangming, Xu Fengyin, Li Jianqing. 1997. A reconsideration of Qaidam basin for a great breakthrough in oil and natural gas exploration. Acta Petrolei Sinica, 18(2): 1~7 (in Chinese with English abstract).

Zhan Dapeng, Yu Junqing, Gao Chunliang, Zhang Lisa, Cheng Aiyong. 2010. Hydrogeochemical conditions and lithium brine formation in the four salt lakes of Qaidam basin. Journal of Lake Sciences, 22(5): 783~792 (in Chinese with English abstract).

Zhang Bin, He Yuanyuan, Chen Yan, Meng Qingyang, Huang Jiakuan, Yuan Li. 2018. Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam basin. Acta Petrolei Sinica, 39(6): 674~685 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pengxi. 1987. Salt Lakes in Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 143~148.

## 参 考 文 献

常秋芳. 2017. 青藏高原风成沉积和那陵格勒河流域地释光年代学及环境意义. 中国科学院大学博士学位论文, 73~89.

陈安东, 郑绵平, 施林峰, 王海雷, 徐建明, 袁文虎. 2017. 柴达木盆地一里坪石膏<sup>230</sup>Th 定年及成盐期与第四纪冰期和构造运动的关系. 地球学报, 38(4): 494~504.

郭泽清, 王宗礼, 李雪峰, 张林, 张绍胜, 孔骅. 2009. 柴达木盆地一里坪地区新近系沉积相初探. 古地理学报, 11(3): 284~292.

韩凤清. 2001. 青藏高原盐湖 Li 地球化学. 盐湖研究, 9(1): 55~61.

焦鹏程, 张建伟, 姚佛军, 赵龙. 2016. 马海盐湖深部卤水钾盐勘查与研究进展. 矿床地质, 35(6): 1305~1308.

焦鹏程, 刘成林, 张华, 颜辉, 张凡凯, 李文学, 王立成, 焦丁, 张云, 沈立建. 2018. 罗布泊盐湖深部卤水钾盐找矿取得新进展. 矿床地质, 37(1): 191~194.

李建森, 凌智永, 山发寿, 陈亮, 韩进军, 王建萍. 2019. 东昆仑山南、北两侧富锂盐湖成因的氢、氧和铍同位素指示. 湿地科学, 17(4): 17~24.

李文学, 张凡凯, 王江, 陈伟, 杨宝恒. 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. 地质学报, 92(8): 1605~1616.

刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 陈永志, 李树德. 2002. 罗布泊第四纪卤水钾矿储层孔隙成因与储集机制研究. 地质论评, 48(4): 437~443.

刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究. 沉积学报, 21(2): 240~246.

刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 陈永志. 2009. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析. 地球学报, 30(6): 796~802.

刘成林, 焦鹏程, 孙小虹, 吕凤琳, 张华. 2018. 罗布泊盐湖成钾规律研究与找矿进展. 地质学报, 92(8): 1551~1570.

沈振枢, 程果, 乐昌硕. 1993. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境. 北京: 地质出版社, 132~134.

王弭力, 刘成林, 李长华, 魏宝和, 何锦发, 宣之强. 1994. 青海昆特依盐湖富钾卤水储层扫描电镜分析. 化工地质, 16(1): 1~9.

魏新俊, 姜继学. 1993. 柴达木盆地第四纪盐湖演化. 地质学报, 67(3): 255~265.

余俊清, 洪荣昌, 高春亮, 成艾颖, 张丽莎. 2018. 柴达木盆地盐湖钾矿床成矿过程及分布规律. 盐湖研究, 26(1): 7~14.

袁见齐, 杨谦, 孙大鹏. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床形成条件. 北京: 地质出版社, 45~46.

袁剑英, 陈启林, 陈迎宾, 阎存凤. 2006. 柴达木盆地油气地质特征与有利勘探领域. 天然气地球科学, 17(5): 640~644.

袁小龙, 盛金昌, 张西营, 李斌凯, 周同亮, 高东林. 2018. 昆特依盐湖浅部储卤层对卤水组成的影响. 水文地质工程地质, 45(2): 13~20.

翟光明, 徐凤银, 李建青. 1997. 重新认识柴达木盆地力争油气勘探获得新突破. 石油学报, 18(2): 1~7.

展大鹏, 余俊清, 高春亮, 张丽莎, 成艾颖. 2010. 柴达木盆地四盐湖卤水钾资源形成的水文地球化学条件. 湖泊科学, 22(5): 783~792.

张斌, 何媛媛, 陈琰, 孟庆洋, 黄家旋, 袁莉. 2018. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理. 石油学报, 39(6): 674~685.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 143~148.

## Characteristics of lithium-rich brine, reservoir physical properties and analysis on water-rich areas in the Yiliping salt lake, Qaidam basin

ZHAO Yanjun<sup>1)</sup>, JIAO Pengcheng<sup>\*1)</sup>, WANG Mingquan<sup>1)</sup>, ZHANG Dayi<sup>2)</sup>,  
ZHU Zhenguang<sup>2)</sup>, HU Yufei<sup>1)</sup>

1) *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2) *Minmetals Salt Lake Co. LTD, Xining, Qinghai 810000, China*

*\* Corresponding author: jiaopengcheng@263.net*

### Abstract

The Yiliping salt lake in the Qaidam basin are characterised by liquid lithium deposits of high economic value. This study's aims to clarify the distribution of deep brine in this lake and to estimate the brine-enriched area in terms of the spatial distribution and physical characteristics of brine reservoir, thus providing a basis for future brine exploitation. The study area is located in the depocenter of the Yiliping salt lake since the end of late Pleistocene. The related sediments are mainly characterized by the shallow lake facies comprising of silt and clayey silt and the salt lake facies comprising of silt- and clay-bearing halites. The reservoir of Li-enriched brine in the Yiliping salt lake is stratigraphically composed of upper and lower halite layer with clayey silt sandwiched between them. The shallow lake facies mainly occur in the north, and transform southward to saline lake facies with the thickest halite sediments in the southeast. By integrated analysis of reservoirs thickness, porosity and specific yield, we concluded that the high-quality reservoirs including both the porosity and intercrystalline type in the II brine seam are located to the east of the study area and can serve as the target area for the future exploitation of brine resources.

**Key words:** water-rich area; reservoir; brine; Yiliping salt lake; Qaidam basin