

doi: 10.12029/gc20200201

李志丹, 金若时, 李效广, 李凌平, 陈烈, 刘朝强, 周恩恩, 张超. 2020. 西藏阿里地区泽错大型盐湖锂(硼)矿床的发现及开发利用前景[J]. 中国地质, 47(2): 265-277.

Li Zhidan, Jin Ruoshi, Li Xiaoguang, Li Lingping, Chen Lie, Liu Chaoqiang, Zhou Kenken, Zhang Chao. 2020. The Discovery of lithium-boron large scale deposit in Zetso salt lake, Ngali District of Tibet and its prospects for development and utilization[J]. Geology in China, 47(2): 265-277 (in Chinese with English abstract).

西藏阿里地区泽错大型盐湖锂(硼)矿床的发现 及开发利用前景

李志丹^{1,2}, 金若时^{1,2}, 李效广^{1,2}, 李凌平³, 陈烈³, 刘朝强³, 周恩恩⁴, 张超^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 3. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816099; 4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082)

摘要: 2016—2018 年中国地质调查局天津地质调查中心联合西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队组建盐湖调查队伍, 针对西藏羌塘盆地西段泽错盐湖开展调查评价工作, 探获大型锂(硼)矿产地 1 处。泽错湖表水体长 16.3 km, 宽 3.3~11.3 km, 湖表面积 113.8 km²。湖水深度变化较大, 四周水较浅, 逐渐向中间变深, 最深处达 44 m, 湖水平均深度为 24 m, 湖面海拔 4940 m。泽错盐湖位于藏北羌塘—三江复合板块内, 矿区第四纪地层可划分为更新统湖积, 全新统现代湖水, 全新统冲洪积, 全新统冲积和全新统湖积。湖盆可划分基岩裂隙含水层、亚砂土孔隙含水层、亚黏土孔隙含水层和湖表卤水 4 个水文地质单元。经计算直接补充到湖盆表面的大气降水量为 1.081×10⁷ m³/a, 地表水补给湖水量为 8.262×10⁷ m³/a, 地下水补给量为 2.052×10⁷ m³/a, 泽错年补给水量为 11.395×10⁷ m³/a 左右。自然蒸发为泽错湖盆的主要排泄方式, 泽错湖水年蒸发量为 12.745×10⁷ m³/a, 年均水量变化值为 1.35×10⁷ m³/a, 地表水补给湖水量带入的总盐量为 7.8×10⁴ t/a。泽错湖盆卤水中主要成盐元素有 Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、K⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、B₂O₃、Mg²⁺、Li⁺ 等, 平均矿化度 41.57 g/L, pH 值为 9.31, 泽错湖水为高矿化度盐水, 水化学类型为硫酸钠亚型。泽错盐湖 LiCl 平均品位为 376.02 mg/L, LiCl 资源量为 102.68×10⁴ t, 远景规模达到大型; B₂O₃ 平均品位为 840 mg/L, B₂O₃ 资源量为 229.38×10⁴ t, 远景规模达到大型。在综合分析锂、硼资源需求、提锂技术、盐田建设、气候条件、经济价值等方面的基础上, 对泽错盐湖的开发利用前景进行了展望。

关键词: 盐湖锂矿; 盐湖硼矿; 开发利用; 矿产资源勘查工程; 泽错; 西藏

中图分类号: P618.71

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2020)02-0265-13

The Discovery of lithium-boron large scale deposit in Zetso salt lake, Ngali District of Tibet and its prospects for development and utilization

LI Zhidan^{1,2}, JIN Ruoshi^{1,2}, LI Xiaoguang^{1,2}, LI Lingping³,
CHEN Lie³, LIU Chaoqiang³, ZHOU Kenken⁴, ZHANG Chao^{1,2}

收稿日期: 2019-04-06; 改回日期: 2020-03-12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160129, 12120113057300, DD20190119)、国家重点基础研究发展计划项目(2015CB453006)和国家自然科学基金项目(41502082)联合资助。

作者简介: 李志丹, 男, 1986 年生, 工程师, 从事矿产调查与研究工作; E-mail: cugcug@qq.com。

通讯作者: 金若时, 男, 1958 年生, 教授级高级工程师, 长期从事矿产调查与研究工作; Email: ruosj2003@aliyun.com。

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China; 3. NO. 5 Geological Survey Party, Tibet Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Golumd, Qinghai 816099, China; 4. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610082, China)

Abstract: During 2016—2018, aiming at the Zetso Salt Lake in the western of Qiangtang Basin, Tibet Autonomous Region, Tianjin Center of China Geological Survey joined The No.5 Geological Survey Party of Tibet Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau to form a team to carry out the geological survey and assessment, eventually found it is a large scale brine–lithium–Boron deposit. Zetso Salt Lake, with a length of 16.3 km, width within 3.3–11.3 km, has an area of 113.8 km², also, it has a larger range in its depth, with shallow water around it but gradually becoming deeper and deeper to the middle of the lake with the deepest part of 44 m, average water depth of 24 m and the altitude of it is 4940 m. Zetso is located within the Qiangtang–Sanjiang Composite Plates. The Quaternary strata around Zetso can be divided into Pleistocene lacustrine sediments, Holocene alluviation, Holocene alluvial–diluvial, Holocene lacustrine sediments and Holocene surface brine. Lake basin can be divided into four hydrogeological units of bedrock fissure water, subsandy pore aquifer, subclayey pore aquifer and lake brine. By the authors statistics and calculation, the atmospheric precipitation adding into the Zetso directly is 1.081×10^7 m³/a, the supplies of the surface water into it is 8.262×10^7 m³/a, the supplies of the underground water into it is 2.052×10^7 m³/a, as a result, the total water–supply amount per year into Zetso is about 11.395×10^7 m³/a. Natural evaporation is the main discharge mode in Zetso lake. Its annual evaporation amount is 12.745×10^7 m³/a, annual average amount value is 1.35×10^7 m³/a, the total salt amount from surface water supplies into it is 7.8×10^4 t/a. The main salt brine elements within Zetso are Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻, K⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, B₂O₃, Mg²⁺, Li⁺, etc. The salt lake has an average salinity of 41.57 g/L, pH 9.31, therefore, the brine belongs to high salinity one and its water chemical type is due to sodium sulfate subtypes. The average grade of LiCl is 376.02 mg/L, its resources is 102.68×10^4 t, thus, it has been proved to be a large scale brine–lithium deposit; in the meantime, the average grade of B₂O₃ is 840 mg/L, its resources is 229.38×10^4 t, it also has been proved to be a large scale brine–boron deposit. On the foundation of the comprehensive analysis of lithium, boron resource requirements, extracting lithium technology, construction of salt field, and climatic conditions as well as economic value etc., the authors make a prospection of exploitation and utilization to Zetso salt lake in the future.

Key words: brine lithium deposit; brine boron deposit; development and utilization; mineral resource exploration engineering; Zetso; Tibet.

About the first author: LI Zhidan, male, born in 1986, engineer, majors in the mineral resources survey and research; E-mail: cugcug@qq.com.

About the corresponding author: JIN Ruoshi, male, born in 1958, professor of engineering, majors in the mineral resources survey and research; E-mail: ruosj2003@aliyun.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160129, No.12120113057300 and No.DD20190119), National Key Basic Research Program of China (No. 2015CB453006) and National Science Foundation of China (No. 41502082).

1 引 言

锂作为最轻的金属,有着独特的物理和化学性能,近些年随着新能源汽车产业的蓬勃发展,锂资源的供需矛盾凸显。中国锂盐生产占全球的30%,但原料进口比例达75%,绝大部分为进口锂辉石,少部分为进口高浓度卤水(李效广等,2016;后立胜等,2016)。盐湖卤水型锂矿是最为重要的锂资源类型(Kesler et al., 2012),其储量占世界锂总量的69%,并且其提锂成本仅是花岗伟晶岩型锂辉石矿的一半

(赵元艺,2003)。为缓解中国锂资源瓶颈,中国地质调查局天津地质调查中心瞄准盐湖卤水型锂资源,在中国北方盐湖大规模筛查的基础上,于2016—2018年联合西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队组建盐湖调查队伍,针对西藏北部羌塘盆地西段泽错盐湖开展调查评价工作,并迅速取得了锂(硼)资源调查突破。随后地方资金快速跟进,开展泽错盐湖锂矿工程勘查、环境评价、盐田选址等工作,有效推进了泽错盐湖的产业化进程,目前某汽车公司已有开发泽错盐湖锂(硼)矿意向。

泽错盐湖位于西藏自治区阿里地区,属日土县管辖。中心地理坐标:79°47'E,34°10'N,该湖湖表水体长16.3 km,宽3.3~11.3 km,面积113.8 km²,湖水最深处达44 m,平均深度24 m,湖面海拔4940 m。湖区有简易小路向东行驶约100 km可到达G219国道,由G219国道向南行驶约50 km可到达日土县,继续向南行进约130 km可到达狮泉河,向东沿黑—阿公路行驶1400 km可到达那曲地区,交通较为不便。本文以2016—2018年野外地质调查工作为基础,进一步梳理了泽错湖盆区域地质特征和水文地质特征,介绍了泽错湖盆盐类矿产特征和锂(硼)资源量,并展望了开发利用前景。

2 泽错湖盆地质特征

泽错盐湖位于藏北羌塘—三江复合板块内,板块南以班公错—怒江缝合带(孙立新等,2011;刘良志等,2018)为界,北为南昆仑—巴彦喀拉地块(图1)。

区域内主要出露石炭系、二叠系、第四系(图2)。下二叠统一上石炭统展金组(C₂-P_{1z})主要出露

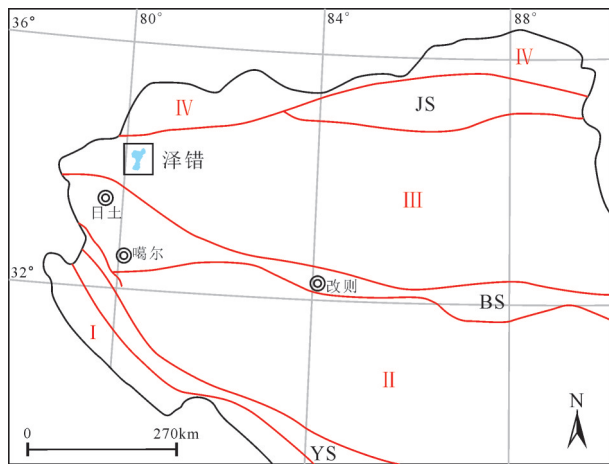


图1 西藏泽错盐湖大地构造位置简图(据唐菊兴等,2017修改)
I—喜马拉雅地块;II—冈底斯—念青唐古拉地块;III—羌塘—三江复合地块;IV—南昆仑—巴彦喀拉地块;YS—雅鲁藏布江缝合带;
BS—班公湖—怒江缝合带;JS—金沙江缝合带

Fig.1 Simplified geotectonic map of Zetso salt lake, Tibet Autonomous Region (modified from Tang Juxing et al., 2017)
I—Himalayan block; II—Gangdese-Nyainqentanglha block; III—Qiangtang-Sanjiang composite block; IV—Southern Kunlun-Bayan Har block; YS—Yalung Zangbo suture zone; BS—Bangong Co-Nujiang suture zone; JS—Jinshajiang suture zone

于湖盆东部,岩性为石英砂岩、长石石英砂岩、砂质板岩夹板岩、千枚岩。下二叠统曲地组(P_{1q})是一套以细粒石英砂岩、粉砂质板岩、板岩为主的细碎屑岩,局部夹有少量砂岩,近顶部板岩中夹泥灰岩透镜体(黄东荣等,2017)。中二叠统吞龙共巴组(P_{2t})下部为粉砂岩、石英砂岩、长石石英砂岩、泥岩夹煤线;中部为灰岩夹砂岩、粉砂岩;上部为岩屑石英砂岩、石英砂岩、钙质页岩等。中二叠统龙格组(P_{2l})岩性为生物碎屑灰岩、灰岩,局部夹少量砂岩(毕志伟,2017)。始新统中新统松西组(E₂-N_{1s})岩性为紫红色复成分砾岩、含砾长石岩屑砂岩、凝灰质长石砂岩、沉凝灰岩等。

第四系主要分布于河床两岸阶地、湖滨地带、宽缓的山坡、冰川前缘等地段(图2)。按地层沉积类型可划分为更新统湖积(Qp¹),全新统现代湖水(Qh^w),全新统冲洪积(Qh^{ap}),全新统冲积(Qh^{a1})和全新统湖积(Qh¹)。更新统湖积(Qp¹)分布于泽错湖盆西部,其上层为黄褐色含黏土砂砾层,下层为黄褐色含砂黏土层。全新统现代湖水(Qh^w)分布于泽错湖盆中部,为湖表卤水。全新统冲洪积(Qh^{ap})为土黄色含砾黏土砂层,分布于泽错盐湖的西部和东部。全新统冲积(Qh^{a1})呈枝状展布于湖盆西部、北部和南部,以砂砾石、砂、泥等松散堆积物为主,少量弱固结的砂砾石层堆积。全新统湖积(Qh¹)主要分布于泽错盐湖周缘,以砾、粉砂黏土为主,少量灰色细砂。

白垩纪黑云二长花岗岩广泛分布于泽错湖盆北东部及北西部(图2),部分岩体被雪山覆盖。黑云二长花岗岩整体呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,局部可见弱褐铁矿化及绿泥石化现象。SHRIMP 锆石U-Pb年龄显示该岩体的侵位时代为107~123 Ma(韩帅等,2019),侵位于黑云二长花岗岩中的白云母二长花岗岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为101 Ma(钟华明等,2006),因此可确定其是燕山晚期的产物(钟华明等,2007)。湖盆东部少量可见辉绿玢岩侵入于早二叠世地层中,并与地层同时卷入褶皱,花岗闪长斑岩分布于泽错湖盆东部,呈岩株、岩瘤状产出,出露面积较小(图2)。

泽错湖盆断裂构造发育,以东西向断裂为主干断裂。东西向断裂包括那布拉达坂—展穷南逆断层、西藏沟—龙头山正断层和红黄岭南—绒强马秋断层,断

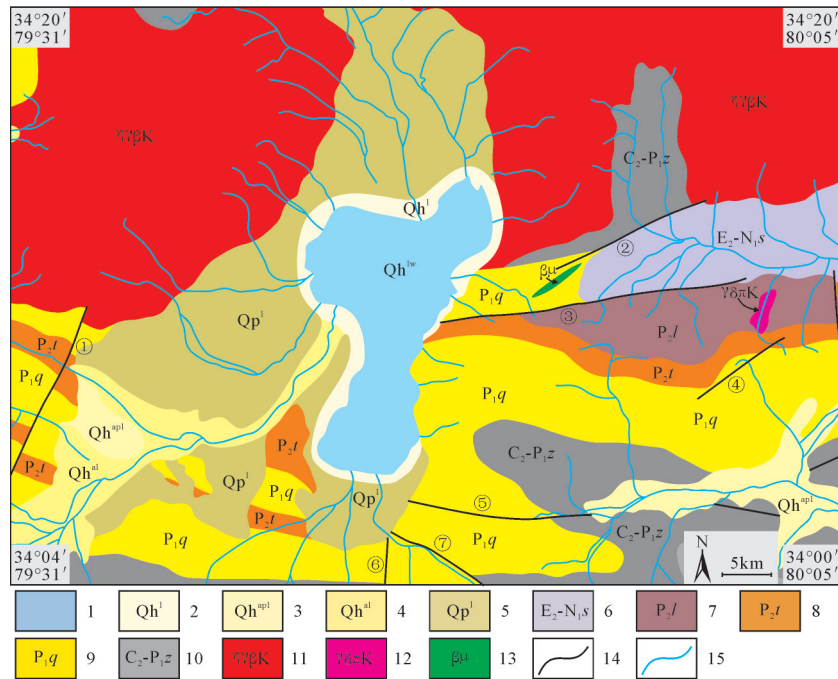


图2 西藏泽错盐湖区地质图(据钟华明等,2005^①修改)

1—全新统湖表卤水;2—全新统湖积;3—全新统冲洪积;4—全新统冲积;5—更新统湖积;6—始新统一中新统松西组;7—中二叠统龙格组;8—中二叠统吞龙共巴组;9—下二叠统曲曲组;10—上石炭统展金组;11—黑云母二长花岗岩;12—花岗闪长斑岩;13—辉绿玢岩;14—断层;15—河流;①—5299~5493高地断层;②—那布拉达坂—展穷南断层;③—西藏沟—龙头山断层;④—果内罗玛断层;⑤—红黄岭南—绒强马秋断层;⑥—拉龙东断层;⑦—5526高地断层

Fig.2 Reginal geological map of Zetso salt lake, Tibet Autonomous Region (modified from Zhong Huaming et al., 2005^①)

1—Holocene surface brine; 2—Holocene lacustrine sediments; 3—Holocene alluvial-diluvial; 4—Holocene alluviation; 5—Pleistocene lacustrine sediments; 6—Eocene-Miocene Songxi Formation; 7—Middle Permian Longge Formation; 8—Middle Permian Tunlonggongba Formation; 9—Lower Permian Qudi Formation; 10—Upper Carboniferous Zhanjin Formation; 11—Biotite monzogranite; 12—Granodiorite porphyry; 13—Diabase porphyry; 14—Fault; 15—River; ①—5299-5493 highland fault; ②—Nabuladaban-Zhanqiongnan fault; ③—Xizangou-Longtoushan fault; ④—Guoneiluoma fault; ⑤—Honghuanglingnan-Rongqiangmaqu fault; ⑥—Lalongsong fault; ⑦—5526 highland fault

层规模相对较大,其他方向断裂规模相对较小。

3 泽错湖盆水文地质特征

3.1 水文单元划分

按照含水介质和水质类型,泽错湖盆可划分基岩裂隙水层、亚砂土孔隙含水层、亚黏土孔隙含水层和湖表卤水4个主要水文地质单元(图3)。

基岩裂隙水是泽错湖盆地下水和地表水的主要补给源区,分布于泽错湖盆东部和西南部海拔5100~5300 m的基岩山区,该地区岩石裂隙发育,受长期风化淋滤和地表水冲刷影响常形成切割较深的沟谷。基岩裂隙水在丰水期呈河流和泉群的形式形成地表径流,在枯水期和平水期呈地下潜流形式汇入湖泊。基岩裂隙水的隐伏侧向补给和地表径流强烈渗漏是地下水获得补给的主要途径。基

岩分布区主要为花岗岩体,常年性流水携带了丰富的 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Li^+ 、 B_2O_3 等元素,为下游盐类矿物的富集成矿奠定了基础。

亚砂土孔隙含水层的含水介质为冲洪积松散堆积的含黏土(黏土质)砂砾层、含黏土砂层、砂砾层、砂土层等,主要分布于湖盆东西两侧及北侧的山麓堆积带,是地下水的主要径流地带。

亚黏土孔隙含水层分布在泽错湖盆周边湖滩、湖滨地带,以湖相沉积为主,含水介质以细砂、含砾砂黏土、砂质黏土等为主,分选性较好。

湖表卤水位于泽错湖盆沉降的近中心地带,是整个湖盆地表水和地下水的最终归属地,也是盐分最终积累的场所,垂直蒸发是唯一的排泄途径。

3.2 水的补给、径流和排泄

泽错湖盆水的补给方式主要为大气降水、地表

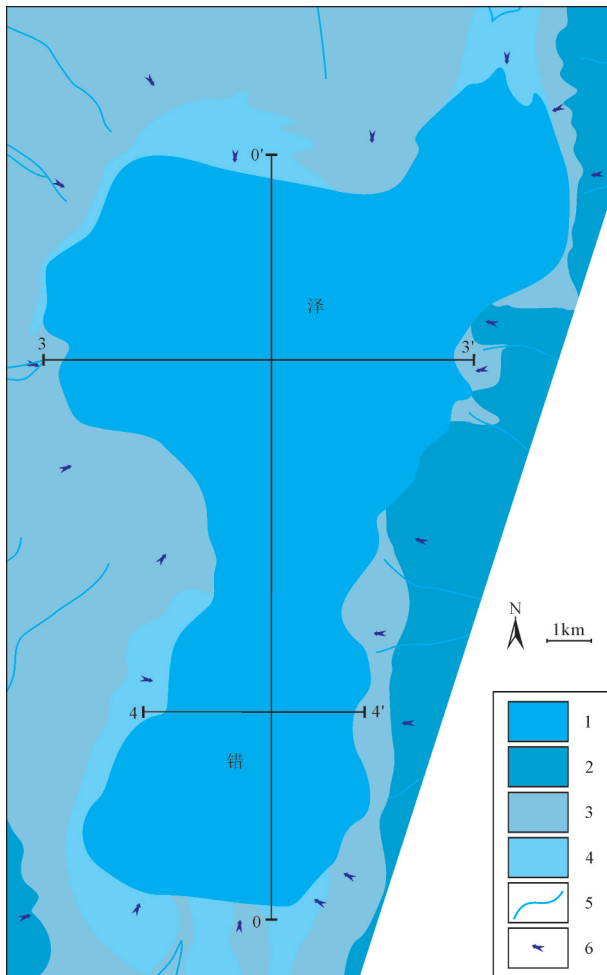


图3 西藏泽错盐湖水文地质图
1—湖表卤水;2—基岩裂隙水;3—亚砂土孔隙含水层;4—亚黏土孔隙含水层;5—河流;6—水补给方向

Fig.3 Hydrogeologic map of Zetso salt lake, Tibet Autonomous Region

1—Lake brine; 2—Bedrock fissure water; 3—Subsandy pore aquifer; 4—Subclayey pore aquifer; 5—River; 6—Water supply direction

水和地下水3部分。由于湖盆四周封闭,蒸发是湖水排泄的唯一途径。

大气降水是湖泊地表水和地下水的主要来源,它以3种不同的形式汇入湖盆:(1)直接补给到湖盆表面湖水中;(2)将汇水流域内的大气降水以河流水的形式流入湖泊中;(3)通过基岩裂隙和松散沉积物孔隙进入地下,又将其中一部分以泉或地下径流的形式流入湖泊。

按照区内自然地理以及气象站资料(年均降水量约95 mm/a),直接补充到湖盆表面的大气降水量为 $113.8 \times 10^6 \times 0.095 = 1.081 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。通过对泽错盐

湖周边河流分3次进行观测(表1),测得泽错湖盆周边地表水流平均补给量约为 $2.62 \text{ m}^3/\text{s}$,大致计算泽错年均地表水补给湖水量为 $2.62 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 8.262 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水补给量根据湖盆汇水区面积的降水量和汇水面积岩性的降水入渗系数进行概算,区内主要出露砂岩、泥岩、花岗岩和第四系松散沉积,按照降水入渗系数的平均值(0.18)进行计算,汇水面积按照遥感影像图圈定,约为 1200 km^2 ,计算可知地下水量为: $0.18 \times 1200 \times 10^6 \times 0.095 = 2.052 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。因此,泽错湖区水补给总量为地表水、地下水和大气降水之和,约为 $11.395 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

泽错湖盆地表水主要有两种径流模式,一是由湖盆高处沿河道直接汇入湖盆;二是地表水渗透到地下,由地下径流汇入湖泊。地下水的运移模式有两种:其一为水平方向的运移,地下水以基岩裂隙水、第四系孔隙水或承压水的形式直接补给湖水;其二为越流补给,基岩裂隙水、第四系孔隙水或承压水由高处流经低洼处的同时渗出地表,通过地表径流的方式补给湖水,如泉水露头、地下河露头。

泽错湖盆地表水和地下水的排泄方式主要是自然蒸发。由于地下水以及地表流水在流经湖泊过程中,地面蒸发较小,对湖泊水的补给、排泄关系影响不大,因此湖泊排泄方式主要为湖面蒸发。泽错湖表面积 113.8 km^2 ,年均蒸发量约为 1600 mm ,实际蒸发量按气象站提供蒸发度的70%计算,泽错湖水年蒸发量为: $113.8 \times 10^6 \times 1.6 \times 0.7 = 12.745 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

3.3 盐的补给量

泽错湖盆的盐量主要以地表河流及泉眼的形式补给,通过河水、泉眼年补给湖水的含水盐量进行计算,考虑到藏北地区冬长夏短,常年流水时间以一个季度计算。因此,地表水补给湖水带入的总盐量为 $7.8 \times 10^4 \text{ t/a}$ (表2)。野外工作中未发现明显泉眼,地下水、大气降水的矿物元素含量参照河流矿物含量。

3.4 矿区水盐均衡状态

泽错湖盆年均水补给量约为 $11.395 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,年均蒸发量约为 $12.745 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,水量变化值约为 $1.35 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,表明泽错湖盆水补给量与蒸发量基本呈稳定状态,整体呈较小的缩小状态。

泽错湖盆为封闭的内陆盆地,湖表水体中盐分在自然状态下不会流失,因此湖表水体盐量只有收

表1 泽错湖盆区河流地表流量观测数据

Table 1 Observation data of stream discharge in Zetso salt lake							
观测点号	水温/℃	pH值	比重	流速/(m/s)	河流截面(宽×深)/m ²	流量/(m ³ /s)	观测时间
ZCHL01	7	8.38	1.001	1.2	7×1.0	8.4	2016年8月
	7	8.37	1.001	0.8	2.0×0.1	0.16	2016年9月
	4	8.38	1.001	0.66	1.82×0.1	0.12	2016年10月
	平均值	6	8.38	1.001	0.82	2.89	
ZCHL02	8	8.36	1.000	1.1	6.5×0.85	6.08	2016年8月
	8	8.33	1.002	0.6	2.0×0.1	0.12	2016年9月
	7	8.31	1.001	0.54	1.8×0.1	0.10	2016年10月
	平均值	8	8.33	1.001	0.65	2.1	
ZCHL03	8	8.36	1.002	1.2	5.0×0.74	4.44	2016年8月
	8	8.30	1.001	0.80	1.2×0.1	0.10	2016年9月
	5	8.31	1.000	0.64	1.2×0.09	0.07	2016年10月
	平均值	7	8.32	1.001	0.81	1.54	
ZCHL04	8	8.31	1.001	2.03	5.2×0.68	7.18	2016年8月
	8	8.30	1.000	1.5	1.5×0.1	0.23	2016年9月
	7	8.37	1.001	1.28	1.0×0.1	0.13	2016年10月
	平均值	8	8.33	1.001	1.56	2.51	
ZCHL05	7	8.32	1.000	3.0	7.2×0.50	10.8	2016年8月
	7	8.30	1.001	1.1	1.6×0.1	0.18	2016年9月
	5	8.38	1.002	0.88	1.35×0.1	0.12	2016年10月
	平均值	6	8.33	1.001	1.16	3.7	
ZCHL06	8	8.36	1.000	2.15	5.5×0.60	7.1	2016年8月
	8	8.34	1.000	1.00	1.8×0.1	0.18	2016年9月
	6	8.38	1.002	0.85	1.52×0.1	0.13	2016年10月
	平均值	7	8.36	1.001	1.02	2.47	
ZCHL07	8	8.34	1.002	1.82	5.3×0.62	5.99	2016年8月
	8	8.36	1.001	0.9	1.3×0.1	0.12	2016年9月
	4	8.36	1.000	0.76	1.0×0.1	0.08	2016年10月
	平均值	7	8.35	1.001	0.96	2.06	
ZCHL08	7	8.33	1.001	2.05	6.22×0.85	10.84	2016年8月
	7	8.39	1.000	0.90	1.6×0.1	0.14	2016年9月
	5	8.36	1.000	0.66	1.25×0.1	0.08	2016年10月
	平均值	6	8.36	1.000	0.97	3.69	
平均合计	7	8.35	1.000	0.99		2.62	

人无支出。水文地质特征显示,泽错湖盆为地表水和地下水的最终排泄汇集场地,也是盐分的聚集地,矿区年均盐量补给约为 7.8×10^4 t/a。

通过对泽错湖表卤水的水、盐均衡状态进行分析,泽错湖表卤水矿产的形成取决于两个必备条件:一是湖表水体源源不断地获得湖盆周围大量携带矿物质水的补给;二是矿区气候干燥寒冷,年均降水量为95 mm,蒸发量为1600 mm,湖水在这种条件下,经过长期的演变,导致水中盐类物质不断增高。

4 盐类矿产特征

野外调查并未发现泽错湖盆有固体盐类沉积

线索。因此泽错矿体主要为卤水矿体,湖水无色无嗅,透明度良好,具咸苦味。根据2016年野外实测数据,湖表水体长16.3 km,宽3.3~11.3 km,湖表面积113.8 km²。湖水深度变化较大,四周水较浅,逐渐向中间变深,最深处可达44 m,湖水平均深度为24 m,湖面海拔4940 m(图4)。

4.1 湖表卤水水化学类型

泽错湖盆野外样品分析在西藏地勘局中心实验室分室完成,样品分析结果见表3。卤水中主要成盐元素有Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、K⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、B₂O₃、Mg²⁺、Li⁺等,平均矿化度41.57 g/L,pH为9.31。泽错盐湖湖表卤水深度大,其组分在横向、纵向上变化

表2 地表水补给泽错盐量计算
Table 2 Calculation table of salt-supplying quantity from surface water

地表水矿物元素平均含量/(mg/L)						
K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺
9.81	10.59	275.05	79.41	0.21	0.28	0.05
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	B ₂ O ₃	矿化度	平均pH值
12.32	792.39	0.1	264.1	3.3	1418.917	8.35
年补给盐湖矿物元素量/(t/a)						
K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺
1118.34	1207.26	31355.7	9052.74	23.94	31.92	5.7
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	B ₂ O ₃	地表补给水量/(10 ⁷ m ³ /a)	总盐量/(10 ⁴ t/a)
35252.45	2267345	286.14	755695.7	9442.62	11.40	7.8

较明显,其主要矿物组分含量见表3。通过在2016年8月、9月以及10月采取不同时间段卤水样,其中8月份各元素离子含量较低,10月份含量最高。

利用其中主要组分为Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等离子特征系数计算,其中Kn1、Kn2、Kn3、Kn4均大于1,Kc为0(表4)。因此,水化学类型划分为硫酸钠亚型。

4.2 卤水矿主要组分及品位变化

泽错卤水中各离子含量的排序大致如下:Cl⁻ > Na⁺ > SO₄²⁻ > Mg²⁺ > K⁺ > HCO₃⁻ > CO₃²⁻ > Li⁺ > Br⁻ > Ca²⁺ > Rb⁺ > Cs⁺。湖表卤水中达到工业品位以上的矿产有LiCl,达到边界品位以上的矿产为B₂O₃。通过不同时间段湖表卤水矿品位含量比较,10月份受枯水期和冰冻期影响,卤水矿品位相对较高;8月份为泽错丰水期,卤水矿品位含量相对较低;9月份湖表水受前季度丰水期影响,卤水矿品位处于中等。泽错LiCl品位变化基本为南部高,北部较低,垂直上看,由湖表向湖底逐渐变高(图5);B₂O₃品位变化为南低北高,垂向上由湖表到湖底逐渐变高(图6),总的来看湖水产品位变化较小。经计算,矿区湖表卤水年均卤水矿品位为376.02 mg/L,B₂O₃平均品位为840 mg/L(表5)。

5 锂(硼)远景资源量

泽错湖表卤水调查采样网度为4 km×2 km,部分位置加密到2 km×2 km,分层采样。按照《盐湖和盐类矿产地地质勘查规范(DZ/T0212-2002)》,选择LiCl≥300 mg/L为最低工业品位,B₂O₃≥400 mg/L为

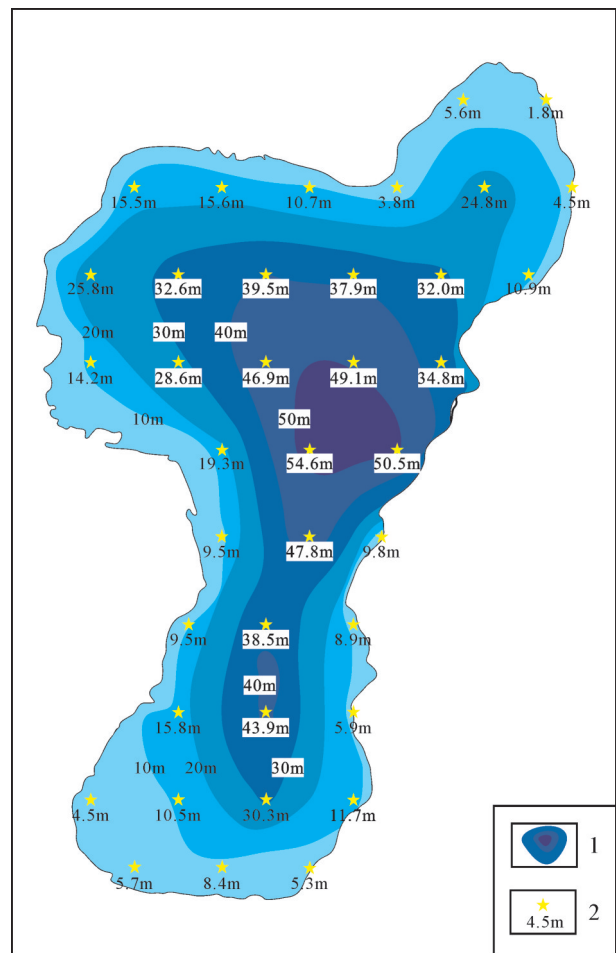


图4 泽错盐湖湖水水深等值线图(2017年10月实测)
1—湖水水深等值线;2—湖水测深点位置及深度
Fig.4 Contour map of brine depth in Zetso salt lake(measured in October 2017)
1-Water depth contour; 2-Measured location and depth

表3 泽错湖表卤水化学特征
Table 3 Chemical characteristics of brine in Zetso

元素/(mg/L)	实测值	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	B ₂ O ₃	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
	平均	644.10	11028	36.95	1916	59.99	779	14419	9766
8月	最大	763.3	12750	46.26	2233	73.3	889	16393	11700
	最小	410.5	7125	27.66	1262	38.12	503	9472	6326
	平均	692.71	12151	37.59	2122	62.92	874	15899	10877
9月	最大	720.3	12900	48.61	2226	67.35	897	16539	11660
	最小	647	11330	24.06	1997	57.03	814	14936	9956
	平均	703.91	12152	33.54	2136	61.76	867	15938	11151
10月	最大	736.8	12590	45.52	2231	65.68	892	16446	12340
	最小	659.9	11380	17.62	1989	57.52	823	15009	10000
	平均	680.24	11777	36.03	2058	61.56	840	15418	10598
项目	实测值	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Rb ⁺	Cs ⁺	Br	密度/(kg/L)	pH	矿化度/(g/L)
	平均	492.9	507.6	0.27	0.04	38.7	1.0306	9.27	38.82
8月	最大	593.7	783.8	0.29	0.05	43.8	1.0368	9.35	44.09
	最小	305.8	315.2	0.17	0.02	22.9	1.0192	9.15	25.23
	平均	483.6	650.2	0.29	0.05	40.78	1.0337	9.35	42.79
9月	最大	550	810.9	0.31	0.05	42.72	1.0361	9.39	44.12
	最小	409.4	482.1	0.28	0.04	38.72	1.0302	9.30	40.48
	平均	511.3	589.7	0.29	0.05	39.9	1.0335	9.31	43.11
10月	最大	569.7	705.8	0.31	0.05	43.1	1.0354	9.38	44.99
	最小	446.4	493.7	0.27	0.04	37.1	1.0245	9.25	41.09
	平均	495.93	582.5	0.28	0.05	39.80	1.0326	9.31	41.57

综合评价指标。卤水品位的确定参照卤水分析结果取其算术平均值,矿体的厚度、宽度、长度以湖水深度、现代湖盆的长度、宽度为准,取其平均值进行概算。采用GPS对湖表边界进行控制,并结合地形图进行了校正,求得矿体表面积为113.8 km²。根据实地测量,泽错盐湖深度变化较大,湖表卤水平均深度为24 m。湖表卤水展布面积与湖水平均深度的乘积为卤水矿体体积,为2731.2×10⁶ m³。由于卤水采样所使用的是统一规格的采样器,代表的是相同体积的卤水体的矿物组分及含量,因此在品位计算时,采用算术平均计算法,平均品位为块段内所

有见矿单样品位之和除以样品个数。经计算,LiCl平均品位为376.02 mg/L,B₂O₃平均品位为840 mg/L。湖表卤水体积与平均品位乘积为湖表卤水块段资源量,经计算泽错湖盆LiCl资源量为102.68×10⁴ t,远景规模达到大型;B₂O₃资源量为229.38×10⁴ t,远景规模达到大型。

6 开发利用前景

锂作为最轻的金属,是“21世纪的能源金属”,一方面其“储能”属性使在锂电池、新能源汽车等领域中发挥重要作用;另一方面是其作为能源金属,

表4 泽错盐湖化学类型计算

Table 4 Calculation table of chemical type of brine in Zetso

矿化度/(g/L)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	
41.57	离子含量/(mg/L)	680.24	11777	36.03	2058	15418	10598	582.5	495.93
	当量值/(meq/L)	17.29	511.24	1.79	168.94	433.06	220.67	9.56	16.39
	Kn1		Kn2	Kn3	Kn4		Kc/%	水化学类型	
	0.15		1.426	113.35	13.844		0	硫酸钠亚型	

注:Kn1=(CO₃+HCO₃)/(Ca+Mg);Kn2=(CO₃+HCO₃+SO₄)/(Ca+Mg);Kn3=SO₄/Ca;Kn4=(CO₃+HCO₃)/(Ca+HCO₃);Kc=[Na₂(K₂)CO₃+Na(K)HCO₃]

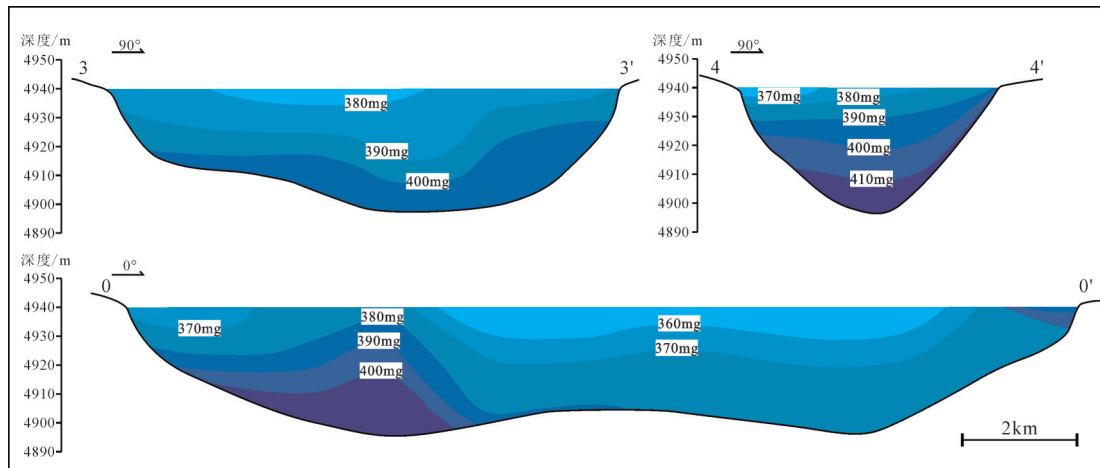


图5 泽错盐湖 LiCl 品位变化剖面图(2016年9月观测,剖面位置见图3)

Fig.5 Profile of LiCl grade line in Zetso brine(Mesured in Sep.2016, Section position as shown in Fig.3)

是可控核聚变的原材料(刘丽君等,2017)。作为储能材料的锂随着新能源汽车产业的快速拉动直接导致碳酸锂价格飙升。而作为能源金属,1 g 锂所释放出的有效能量最高可达 8500~72000 kWh,与具有放射性的铀(金若时等,2016,2017)相比,锂的聚变比 ^{235}U 裂变产生的能量大 8 倍,相当于 3.7 t 标准煤(王乃银,1989),而生产 100 亿度电的锂反应堆仅需要 10 t 金属锂(王秀莲,2001),一旦受控核聚变反应堆实现工业化,锂的消费量或将成倍增长(马培华和张彭熹,1999)。硼主要用于生产硼砂、硼酸和硼的各种化合物,是一种用途广泛的化工原料(魏双等,2019),硼还可用于制造超高性能永磁材料、立方氮化硼超硬材料、半导及超导材料、特种陶瓷

等。据统计 2017 年中国硼消费量约为 60 万 t,而产量约为 16 万 t,自给率不足 30%,预计到 2030 年中国硼资源对外依存度将维持在 70%~80%,在相当一段时间内硼矿产品将长期依赖进口,供需矛盾十分突出(林勇杰等,2017)。盐湖卤水型锂矿约占全球锂矿总储量的 69%,而就经济可采储量而言,其占比高达 91%(汪镜亮,1999;赵元艺,2003),是最为重要的锂矿床类型。青藏高原地区是中国盐湖分布最多的地区,同时也是世界上重要的盐湖分布区之一(郑喜玉和于松升,1981;韩凤清,2001;高峰等,2011)。泽错大型锂(硼)矿的发现与评价是西藏地区继扎布耶、拉果错、麻米错、龙木错等矿床发现以来盐湖锂矿找矿的重大进展。

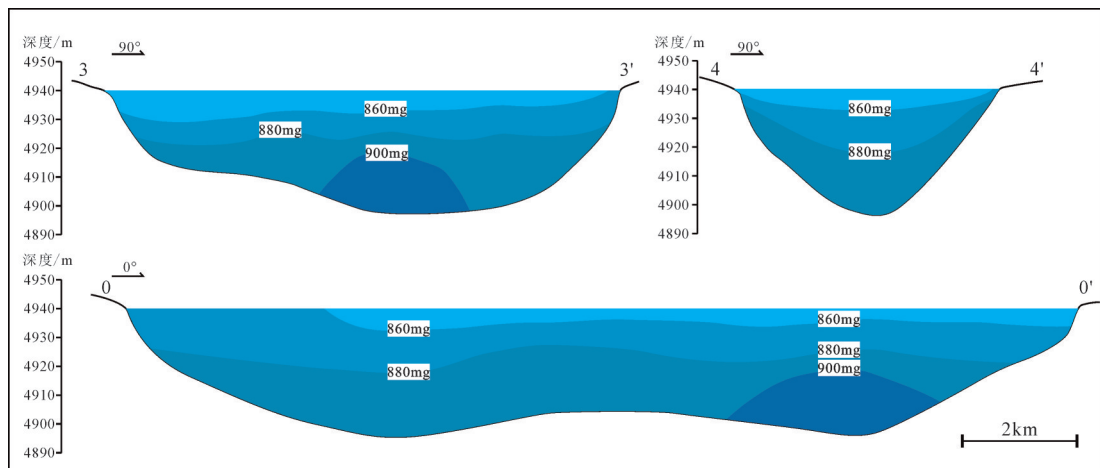


图6 泽错盐湖 B₂O₃ 品位变化剖面图(2016年9月观测,剖面位置见图3)

Fig.6 Profile of B₂O₃ grade line in Zetso brine(Mesured in Sep.2016, Section position as shown in Fig.3)

表5 泽错湖表卤水矿品位计算

Table 5 Calculation table of grade of Saline water in Zetso

采样日期	矿石品位	KCl/(g/L)	LiCl/(mg/L)	B ₂ O ₃ /(mg/L)	NaCl/(g/L)	MgCl ₂ /(g/L)	Rb ₂ O/(mg/L)	Cs ₂ O/(mg/L)	pH	矿化度/(g/L)
8月	平均值	1.228	366.45	779	25.727	7.505	0.58	0.08	9.27	38.823
	最大值	1.456	447.70	889	31.520	8.746	0.65	0.10	9.35	44.09
	最小值	0.783	232.83	503	14.138	4.943	0.38	0.04	9.15	25.232
9月	平均值	1.321	384.35	874	28.581	8.312	0.58	0.08	9.35	42.788
	最大值	1.374	411.36	897	32.559	8.718	0.68	0.10	9.39	44.12
	最小值	1.234	348.33	814	24.419	7.821	0.38	0.04	9.30	40.48
10月	平均值	1.342	377.28	867	28.584	8.366	0.64	0.10	9.31	43.112
	最大值	1.405	401.16	892	31.474	8.738	0.69	0.11	9.38	44.994
	最小值	1.258	351.32	823	25.013	7.790	0.60	0.09	9.25	41.092
	平均	1.297	376.02	840	27.631	8.061	0.60	0.08	9.31	41.574

泽错盐湖LiCl平均品位为376.02 mg/L, LiCl资源量为 102.68×10^4 t; B₂O₃平均品位为840 mg/L, B₂O₃资源量为 229.38×10^4 t。泽错盐湖卤水矿化度为41.57 g/L, 泽错盐湖为矿化度相对较低的锂(硼)矿床。湖水中Ca²⁺、Mg²⁺等有害组分小于允许含量, 对矿产的开发利用影响不大。从提锂技术方面看, 泽错盐湖镁锂比平均为33.43, 属高镁锂比盐湖。目前针对高镁锂比盐湖有较多的技术方法进行提锂, 主要包括: 溶剂萃取法、离子交换吸附法、纳滤和电渗析技术等(Somrani et al., 2013; Zhu et al., 2014; Shi et al., 2015; 赵冬等, 2017; 赵旭等, 2017; 刘东帆等, 2018)。针对高镁锂比盐湖, 青海柴达木兴华锂盐有限公司采用溶剂萃取法已经可实现稳定产出纯度为99.9%的氯化锂溶液; 青海锂业有限公司针对东台吉乃尔湖通过离子选择性分离提取碳酸锂的方法已突破高镁锂比卤水锂矿发展障碍(崔晓林, 2017); 泽错邻区龙木错硫酸盐型盐湖与结则茶卡碳酸盐型盐湖通过兑卤法已实现有效提锂(李美鲜, 2012; 崔玉虎等, 2014; 高峰等, 2018); 在产业化方面, 青海盐湖佛照蓝科锂业股份有限公司、青海锂业有限公司已经拥有成熟的提锂技术, 藏格控股股份有限公司通过购买提锂技术已经可实现产能的快速扩张(李媛媛, 2018)。泽错盐湖具有较低的矿化度, 在目前的提锂技术下实现锂、硼矿产的产业化不存在技术障碍。

在盐田建设、卤水开发方面, 泽错盐湖总体形态为一南北向湖盆, 地形开阔平缓, 湖盆北部为基岩山体, 南侧为开阔平缓坡地, 矿区湖盆湖水面是本区的地下水侵蚀基准面, 湖表海拔高度为4940

m。矿区地形坡度较小, 地形平坦开阔, 相对高差不足20 m, 十分有利于盐田的建设。泽错矿区主要为湖表卤水矿床, 其特征是: 湖表卤水无风时风平浪静湖水清澈; 刮风时却是风涌浪起。湖岸低矮平缓, 湖滨地貌发育, 无湖岸岩体因湖水浪潮冲刷倒塌及山体滑坡之患, 工程地质条件较好, 有利于卤水开发利用。泽错盐湖矿床是地表水和地下水最终汇集排泄区, 水不外泄, 以蒸发作用参与水循环, 矿区液体矿是湖盆地表水和地下水最终演化变质的结果。这种封闭的水文地质条件决定了矿床水文以垂直循环为主, 因此矿床不存在径流冲刷破坏之弊, 也无滑坡、洪水、泥石流等对矿床的破坏之患。矿床具备一般盐湖矿床特征, 地势平坦, 开阔等条件决定了适于露天开采。矿区主要液体矿床湖表卤水平均水深24.2 m, 深度适宜, 湖水变幅不大(年波动0.30 m), 动态稳定, 利于卤水开发利用。但泽错盐湖地处阿里地区西北部, 目前仅有一条长约100 km的简易公路与主干公路连接, 周边并无电力供应, 同时该地区属生态脆弱区, 因此在盐湖开发时需要加强交通、能源和环保等方面的考虑。

从气候条件看, 与世界上盐湖锂矿床的形成气候相似(王秋舒等, 2015), 泽错盐湖的气候为高原亚寒带半干旱季风型气候区, 区域内气候干燥、寒冷, 空气稀薄, 低压、缺氧严重, 冬长无夏, 多风少雨, 日温差大, 没有绝对无霜期, 年大风日达250 d, 年日照时间长达3445 h, 降水量集中, 6—8月的降水量约占全年降水量的93%, 年降水量平均95 mm, 平均年蒸发量为1600 mm。野外常有极端气候出现, 高寒缺氧, 工作条件较为艰苦, 气候条件会增大

矿山开发成本。

从经济价值方面看,2018年中国新能源汽车产量为129.6万辆,同比增长40.1%,随着新能源汽车产业的快速发展,碳酸锂的需求也不断飙升。大量的需求直接使碳酸锂价格快速上涨,2016年上半年电池级碳酸锂价格达到16.7~17.8万元/t,是2015年初价格的3倍,2017年再次上涨,2018年达到16~18万元/t(李冰心和张振花,2018),但随着产能的快速扩张,2018年底后已降至7~8万元/t,2019年随着特斯拉上海超级工厂的建立,锂更成为炙手可热的金属。总之,西藏阿里地区泽错盐湖良好的锂资源禀赋,势必会为企业和地方带来巨大的经济价值和社会效益。

7 结 论

(1)西藏泽错盐湖位于藏北羌塘—三江复合板块内,泽错湖盆第四纪地层可划分为更新统湖积、全新统现代湖水、全新统冲洪积、全新统冲积和全新统湖积。

(2)泽错湖盆可划分基岩裂隙水层、亚砂土孔隙含水层、亚黏土孔隙含水层和湖表卤水4个水文地质单元。

(3)泽错湖盆面积约为113.8 km²,长约16.3 km,宽3.1~11.3 km,湖水最深44 m,最浅约1.4 m。整体看中部深,四周浅,北部较南部深。采样结果显示LiCl平均品位为376.02 mg/L, LiCl资源量为102.68×10⁴ t,远景规模达到大型;B₂O₃平均品位为840 mg/L, B₂O₃资源量为229.38×10⁴ t,远景规模达到大型。

致谢:工作中中国地质调查局成都地质调查中心徐学义研究员、孙清元研究员、陈小炜高级工程师、伍皓高级工程师,西藏五队陈晓深高级工程师、赵波高级工程师给予了很多指导和帮助,在此表示感谢!

注释

①钟华明,鲁如魁,夏军. 2005. 1:25万温泉松西幅区域地质调查报告[R]. 安徽省地质调查院. 1-241.

References

Bi Zhiwei. 2017. Research on the Middle Permian Longge formation in western part of the south Qiangtang Basin, Qianghai—Xizang

(Tibet),China[J]. Geological Survey and Research, 40(2): 89-98(in Chinese with English abstract).

Cui Xiaolin. 2017. Demand Projection of Lithium Resource and its Demand & Supply Analysis in China[D]. Beijing:China University of Geosciences, 1-57 (in Chinese with English abstract).

Cui Yuhu, Yuan Jianjun, Yang Meijie, Sha Zuoliang. 2014. Salt precipitation and evaporation of mixed brine from two salt lakes in Tibet[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 45(2): 239-243 (in Chinese with English abstract).

Gao Feng, Nie Zhen, Zheng Mianping. 2018. Preparation of lithium carbonate from sodium sulfate subtype brine by a brine mixing method[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 32(2): 472-477 (in Chinese with English abstract).

Gao Feng, Zheng Mianping, Nie Zhen, Liu Jianhua, Song Pengsheng. 2011. Brine lithium resource in the salt lake and advances in its exploitation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 483-492 (in Chinese with English abstract).

Han Fengqing. 2011. The geochemistry of lithium in salt lake on Qinghai-Tibetan plateau[J]. Journal of Salt Lake Research, 9(1): 55-61 (in Chinese with English abstract).

Han Shuai, Li Haibing, Pan Jiawei, Lu Haijian, Zheng Yong, Liu Dongliang, Bai Mingkun, Zhang Jinjiang. 2019. Evolution history of the Chem Co pluton, Longmu Co region and its tectonic implications: Constraints from geochemistry and geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(6): 1647-1672 (in Chinese with English abstract).

Hou Lisheng, Li Xiaoguang, Jin Ruoshi, Li Zhidan, Cong Yumei. 2016. China's saline lithium resources and suggestion[J]. Resources & Industries, 18(5): 55-61 (in Chinese with English abstract).

Huang Dongrong, Yang Huaquan, Hu Weizheng, Lu Guoan, He Guojian, Deng Birong. 2017. Characteristics of the Aru village east copper-gold point and prospecting mark in Xizang(Tibet) [J]. Geological Survey and Research, 40(1): 35-40(in Chinese with English abstract).

Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin "Red and Black beds" coupling formation constraints on the sandstone[J]. Geology in China, 44(2): 205-223 (in Chinese with English abstract).

Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Yang Jun, Ao Cong, Li Jianguo, Li Yanfeng, Zhou Xiaoxi. 2016. Classification and correlation of Jurassic uranium-bearing series in the Junggar basin[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3293-3309 (in Chinese with English abstract).

Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P, Wallington T J. 2012. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 48 (5): 55-69.

Li Bingxin, Zhang Zhenhua. 2018. Lithium industry profile of

- China[J]. *China Nonferrous Metals*, (2): 40–41 (in Chinese).
- Li Meixian. 2012. The Extraction Process of Lithium and Boron in Brine of Longmucuo, Tibet[D]. Jiangxi University of Science and Technology, 1–64 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yongjie, Zheng Mianping, Liu Xifang. 2017. Boron resource of salt lakes in Qinghai–Tibet plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(12): 77–82 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoguang, Hou Lisheng, Li Zhidan, Jin Ruoshi, Ran Shuming, Zeng Jiangping, Zhang Nan. 2016. Outlook for lithium resource in sea salt fields[J]. *Resources & Industries*, 18(2): 48–52 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuanyuan. 2018. The economic research about lithium extraction from salt lake [J]. *Modern Economic Information*, (11): 374 (in Chinese).
- Liu Liangzhi, Lu Lichun, Jiang Hong, Li Longfeng, Wang Longlong, Li Bing, Wang Peng, Tao Qinghua. 2018. Gravity and magnetic field characteristics and geological interpretation in the Luobusha area, Tibet[J]. *Geological survey and research*, 41(3): 204–212 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongfan, Sun Shuying, Yu Jianguo. 2018. Research and development on technique of lithium recovery from salt lake brine[J]. *CIESE Journal*, 69(1): 141–155 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. *Geology in China*, 44(2): 263–278 (in Chinese with English abstract).
- Ma Peihua, Zhang Pengxi. 1999. Sustainable development of lithium resources in salt lake of China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 3: 210–213 (in Chinese).
- Shi Chenglong, Jia Yongzhong, Zhang Chao, Liu Hong, Jing Yan. 2015. Extraction of lithium from salt lake brine using room temperature ionic liquid in tributyl phosphate[J]. *Fusion Engineering and Design*, 90: 1–6.
- Somrani A , Hamzaoui A H , Pontie M . 2013. Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO)[J]. *Desalination*, 317: 184–192.
- Sun Lixin, Bai Zhida, Xun Debin, Li Huaikun, Sun Biao. 2011. Geological characteristics and zircon U–Pb SHRIMP dating of the plagiogranite in Amduo ophiolites, Tibet[J]. *Geological Survey and Research*, 34(1): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Qin, Yang Huanhuan, Gao Xin, Zhang Zebin, Zhou Bing. 2017. Mineralization, exploration and resource potential of porphyry–skarn–epithermal copper polymetallic deposits in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 517–613 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingliang. 1999. Change of development direction of lithium mineral resources[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 11: 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Wang Naiyin. 1989. A welcome energy metal [J]. *Today Science & Technology*, 9: 34 (in Chinese).
- Wang Qiushu, Qiu Jingzhi, Shao Henan, Xu Hong. 2015. Analysis on metallogenic characteristic and resource potential of salt lake brine lithium deposits[J]. *China Mining Magazine*, 24(11): 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiulian, Li Jinli, Zhang Mingjie. 2001. Energetic metal of the 21th century: The use of metal lithium in nuclear fusion[J]. *Gold Journal*, 3(4): 249–252 (in Chinese).
- Wei Shuang, Wang Liqiang, Zheng Zhikang, Zhang Nan, Zeng Jiangping. 2019. Determination of Boron in soils by microwave digester and ICP–OES[J]. *Geological survey and research*, 42(4): 256–262 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dong, Du Xuemin, Wang Shiqiang, Guo Yafei, Deng Tianlong. 2017. Research on extraction from Salt Lake brine with High Mg/Li ratio[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 46(6): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xu, Zhang Qi, Wu Haihong, Hao Xiaocui, Wang Liang, Huang Xiping. 2017. Extraction of lithium from salt lake brine[J]. *Progress in Chemistry*, 29(7): 796–808 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi. 2003. Saline lake lithium resources of china and its exploitation[J]. *Mineral deposits*, 22(1): 99–106 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiyu, Yu Shengsong. 1981. Formation of the salt lakes resources and its utilization on the Xizang plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1(1): 66–76 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Huaming, Tong Jingsong, Lu Rukui, Xia Jun. 2006. Geochemical characteristics and tectonic setting of peraluminous granite in the Songxi area, Rutog County, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1/2): 183–188 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Huaming, Tong Jingsong, Lu Rukui, Xiajun. 2007. Geochemical features and tectonic setting of Yanshanian high–K calc–alkaline granite in the Songxi–Shenglishan area, northern Rutog, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 730–738 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Chengcai, Dong Yaping, Yun Zeng, Hao Yong, Wang Chun, Dong Naijin, Li Wu. 2014. Study of lithium exploitation from carbonate subtype and sulfate type salt–lakes of Tibet[J]. *Hydrometallurgy*, 149: 143–147.

附中文参考文献

- 毕志伟. 2017. 青藏高原南羌塘盆地西部中二叠统龙格组地层的研究[J]. *地质调查与研究*, 40(2): 89–98.
- 崔晓林. 2017. 中国锂矿资源需求预测及供需分析[D]. 中国地质大学(北京), 1–57.
- 崔玉虎, 袁建军, 杨美洁, 沙作良. 2014. 龙木错与结则茶卡盐湖卤水

- 兑卤及蒸发析盐规律研究[J]. 海洋与湖沼, 45(2): 239-243.
- 高峰, 卮贞, 郑绵平. 2018. 兑卤法从硫酸钠亚型盐湖卤水中制备碳酸锂[J]. 高校化学工程学报, 32(2): 472-477.
- 高峰, 郑绵平, 卮贞, 刘建华, 宋彭生. 2011. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报, 32(4): 483-492.
- 韩凤清. 2011. 青藏高原盐湖Li地球化学[J]. 盐湖研究, 9(1): 55-61.
- 韩帅, 李海兵, 潘家伟, 卢海建, 郑勇, 刘栋梁, 白明坤, 张进江. 2019. 龙木错地区泽错岩体演化历史及构造意义: 来自地球化学和年代学的约束[J]. 岩石学报, 35(6): 1647-1672.
- 后立胜, 李效广, 金若时, 李志丹, 丛玉梅. 2016. 中国盐湖卤水锂资源禀赋分析与策略建议[J]. 资源与产业, 18(5): 55-61.
- 黄东荣, 杨华全, 胡为正, 卢国安, 何国建, 邓必荣. 2017. 西藏阿汝村东铜金矿点地质特征及找矿标志[J]. 地质调查与研究, 40(1): 35-40.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 44(2): 205-223.
- 金若时, 程银行, 杨君, 奥琮, 李建国, 李艳锋, 周小希. 2016. 准噶尔盆地侏罗纪含铀岩系的层序划分与对比[J]. 地质学报, 90(12): 3293-3309.
- 李冰心, 张振花. 2018. 中国锂产业概况[J]. 中国有色金属, (2): 40-41.
- 李美鲜. 2012. 西藏龙木错盐湖卤水锂硼提取工艺研究[D]. 江西理工大学, 1-64.
- 林勇杰, 郑绵平, 刘喜方. 2017. 青藏高原盐湖硼矿资源[J]. 科技导报, 35(12): 77-82.
- 李效广, 后立胜, 李志丹, 金若时, 冉书明, 曾江萍, 张楠. 2016. 海盐场卤水中锂资源状况和产业前景初步探讨[J]. 资源与产业, 18(2): 48-52.
- 李媛媛. 2018. 盐湖提锂相关行业经济研究[J]. 现代经济信息, (11): 374.
- 刘良志, 路利春, 姜鸿, 李陇锋, 王龙龙, 李冰, 王鹏, 陶青华. 2018. 西藏罗布莎地区重磁场特征与地质解释[J]. 地质调查与研究, 41(3): 204-212.
- 刘东帆, 孙淑英, 于建国. 2018. 盐湖卤水提锂技术研究与进展[J]. 化工学报, 69(1): 141-155.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263-278.
- 马培华, 张彭熹. 1999. 中国盐湖锂资源的可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 3: 210-213.
- 孙立新, 白志达, 徐德斌, 李怀坤, 宋彪. 2011. 西藏安多蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征及锆石U-Pb SHRIMP年龄[J]. 地质调查与研究, 34(1): 10-15.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 517-613.
- 汪镜亮. 1999. 锂矿产资源开发方向的变化[J]. 化工矿物与加工, 11: 1-5.
- 王乃银. 1989. 令人垂青的金属能源[J]. 今日科技, (9): 34.
- 王秋舒, 邱景智, 邵鹤楠, 许虹. 2015. 全球盐湖卤水型锂矿床成矿特征与资源潜力分析[J]. 中国矿业, 24(11): 82-88.
- 王秀莲, 李金莉, 张明杰. 2001. 21世纪的能源金属——金属锂在核聚变反应中的应用[J]. 黄金学报, 3(4): 249-252.
- 魏双, 王力强, 郑智慷, 张楠, 曾江萍. 2019. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱仪测定土壤样品中的硼[J]. 地质调查与研究, 42(4): 256-262.
- 赵冬, 杜雪敏, 王士强, 郭亚飞, 邓天龙. 2017. 高镁、锂比盐湖卤水提锂研究[J]. 盐科学与化工, 46(6): 40-44.
- 赵旭, 张琦, 武海虹, 郝晓翠, 王亮, 黄西平. 2017. 盐湖卤水提锂[J]. 化学进展, 29(7): 796-808.
- 赵元艺. 2003. 中国盐湖锂资源及其开发进程[J]. 矿床地质, 22(1): 99-106.
- 郑喜玉, 于升松. 1981. 西藏高原的盐湖资源及其利用[J]. 地理科学, 1(1): 66-76.
- 钟华明, 童劲松, 鲁如魁, 夏军. 2006. 西藏日土县松西地区过铝质花岗岩的地球化学特征及构造背景[J]. 地质通报, 25(1/2): 183-188.
- 钟华明, 童劲松, 鲁如魁, 夏军. 2007. 西藏日土北部松西一胜利山一带燕山期高钾钙碱性花岗岩的地球化学特征及构造环境[J]. 地质通报, 26(6): 730-738.