

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

李瑞琴^{1,2}, 刘成林¹, 赵艳军¹, 刘万平³, 王石军³, 江雨彤⁴

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 青海盐湖工业股份有限公司, 青海 格尔木 816000; 4. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 我国是一个钾盐资源贫乏的国家, 长期依靠进口。在我国, 钾盐找矿难度较大, 经过 50 多年的勘查, 盐湖找钾已很难有新的大突破。但值得注意的是, 在察尔汗盐湖、马海、罗布泊等地有数亿吨低品位固体钾盐, 这些资源相当于一个超大型钾矿, 对低品位固体钾盐的开发是缓解我国钾盐短缺重要的、可行的方向。本文在青海别勒滩试验区对 3 米以浅地层进行了野外溶矿实验, 研究低品位固体钾盐固液转化过程中的水动力学和水化学变化等问题。研究发现, 溶矿过程中试验区内不同时间、不同单元探坑中水位变化差别较大, 表明别勒滩地区在地质结构、构造, 特别是孔隙度等方面存在较大差异; 溶矿过程中试验区内不同时间、不同单元探坑中卤水的 KCl 含量有差异, 溶矿初期, 探坑内卤水 KCl 含量变化与水位埋深呈相反趋势, 水位抬升效果最好的区域其卤水品质较差; 随着溶剂的不断补充和与固体钾矿反应时间的增加, 卤水 KCl 含量整体趋于平均, 但总体上含量较低。经过几个月的溶矿实验, 探坑中卤水 KCl 含量仍较低, 溶矿效果不理想。这可能是因为近几年对低品位固体钾盐持续开采, 地层中钾盐矿物含量降低导致溶矿后卤水中 KCl 含量降低。因此, 需要对浅部矿床地质特征进行精准评估, 精细化分形溶采管理, 以避免盲目补给溶剂, 造成无效溶解, 使得溶采工程低效率运行, 生产成本提高。

关键词: 青海; 别勒滩; 低品位固体钾盐; 卤水; 液化开采

中图分类号: P619.21¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)-0076-13

A study of the field experimental liquefaction and exploitation of low-grade solid potassium resource in the Bieletan experimental area, Qinghai Province

LI Rui-qin^{1,2}, LIU Cheng-lin¹, ZHAO Yan-jun¹, LIU Wan-ping³, WANG Shi-jun³ and JIANG Yu-tong⁴

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud 816000, China; 4. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Potassium resources are one of the seven major scarce mineral resources in China. For a long time, China depends on imports for potassium resources. It is not easy to find potassium deposits in China. After more than 50 years' exploration, it is difficult to get a new breakthrough for potassium in the saline lake. There are hundreds of millions of tons of low-grade potassium in Qarhan Salt Lake, Mahai, and Lop Nur, equivalent to a large potash deposit. The development and exploitation of low-grade potassium is an important and feasible direction to solve the

收稿日期: 2020-08-13; 接受日期: 2020-11-12; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 青海省自然科学基金(2019-ZJ-917); 国家重点研发计划课题(2018YFC0604801); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005); 全国矿产资源国情调查与综合评价(DD20190606)

作者简介: 李瑞琴(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为卤水的综合利用、溶矿关键技术、表生成矿, E-mail: 1601110551@pku.edu.cn; 通讯作者: 刘成林, 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积矿床研究工作, E-mail: liuchengl@263.net。

shortage of potash in China. In this paper, the authors carried out field experiments on liquefaction and exploitation of low-grade solid potassium in Bielelan, Qinghai Province, mainly studying the hydrodynamic and hydrochemical change. In the process of converting low-grade solid potassium into liquid, there exists big difference of water level change in different units of the experimental area in different periods, showing that there are significant differences in geological structure, tectonics, and especially porosity in Bielelan. In the process, the content change of KCl in the brine is different. In the initial stage of the process, the change of KCl content of brine in the detective pit is opposite to that of water level, and where the water level rises obviously, the quality of the brine is poor. However, with the constant replenishing of the solvent and the increasing of reaction time between solid potassium and solvent, the KCl content of the brine in the experimental area tends to become average, but the overall content is low. After months of liquefaction of low-grade solid potassium, the KCl content of the brine is still low and doesn't rise obviously. These phenomena may be attributed to the fact that many years mining of low-grade potassium has led to the reduction of potassium minerals in this area.

Key words: Qinghai; Bielelan; low-grade solid potassium; brine; liquefaction and exploitation

Fund support: Natural Science Foundation of Qinghai Province (2019-ZJ-917); The State-Key Research Development Project (2018YFC0604801); Special Project for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Public Welfare Scientific Research Institutes (KK2005); National Mineral Resources Investigation and Comprehensive Evaluation (DD20190606)

钾是农作物生长必需的营养元素,钾盐主要用作生产钾肥,是重要的农肥资源,然而钾盐资源是我国七种大宗紧缺矿产之一(王弭力等, 2001; 孙小虹, 2013)。长期以来,我国土壤普遍缺钾,据不完全统计,截至 2014 年,我国缺钾土壤已经达到 4.5 亿亩(郭海飞, 2014; 王栋等, 2017),钾肥的短缺已成为制约我国农业发展的瓶颈因素之一。作为全球最大的钾肥消费市场,2016 年中国整体消费量达 1.47×10^7 t,进口量 7.04×10^6 t,约 50%需要依靠进口(王栋, 2019; 王春连等, 2020),这对我国在国际钾肥市场提高竞争力不利。钾盐找矿,无论在国内还是国外,都是一件不容易的工作,尤其在我国的钾盐找矿难度更大。经过 50 多年的勘查,盐湖找钾已很难取得新的大突破。为了缓解国内钾肥严重依赖进口局面,我国政府大力支持钾盐资源勘探,并施行油钾兼探策略,但至今尚未取得重大突破(王栋等, 2017)。不过,值得重点关注是,察尔汗盐湖、马海、昆特依、罗布泊还有数亿吨低品位固体钾盐,这些资源相当于一个超大型钾矿,仅别勒滩地区 S_4 盐层就储存有 1.8×10^8 t 的低品位固体钾盐(牛雪, 2014; 牛雪等, 2015)。因此,对盐湖地层中数亿吨的低品位固体钾盐进行开发是解决中国钾盐短缺重要的、可行的方向。

20 世纪 90 年代以来,国内开始有专家针对固体钾盐液化开发进行研究,如 1990 年青海省盐湖勘查开发研究院做了淡卤水回灌溶解驱动实验,设计了室内静态、动态溶矿实验以及野外小型封闭盐田溶矿实验,主要取得以下成果:固体 KCl 的溶矿率与溶矿时间长短无直接关系;固体 KCl 的溶解率与溶剂中 KCl 浓度有关;溶剂溶度越低,溶矿效果越好;溶剂流量越大,溶矿效果越好(青海省盐湖勘查开发研究院, 1990)^①;孙大鹏等(1995)对察尔汗盐湖首采区卤水溶解光卤石进行了初步研究,发现光卤石的溶解使卤水中 K^+ 含量升高,该过程伴随着大量石盐的析出;李文鹏(1991)、李文鹏等(1994)、Li Wenpeng(2008)进行了固液转化数值模拟研究,发现溶矿过程中晶间卤水可分为溶矿驱动后浓度带、弥散交换影响浓度带和原晶间卤水浓度带,固体盐层也相应分为溶矿驱动后浓度带、溶矿驱动影响带和原固相浓度带,模拟结果显示 K^+ 呈波浪式前进;郝爱兵等(2003)进行了有关固体钾盐变温高浓卤水体系的地球化学平衡研究,通过溶解驱动开采固体钾矿的室内实验所用溶剂的化学平衡计算,分析了各溶剂的溶矿能力,提出溶剂中光卤石不饱和是其溶解固相钾矿的关键所在;安莲英等(2005)进行了察尔汗盐湖固液矿转化实验研究,得出的主要结论

① 青海省盐湖勘查开发研究院. 1990. 青海省察尔汗盐湖淡卤水回灌溶解驱动实验报告.

为钾均可从固相向液相转化,钾转化率和转化速率随温度的升高而增大,随固液矿种钾浓度差异增加而增大;王有德(2006)对马海盐湖的低品位固体钾矿溶解开采进行了探讨,认为对马海盐湖低品位固体钾矿完全可以进行水溶开采,并就水溶开采的必要性及可行性进行了论述;周训等(2006)对察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水进行了数值模拟,建立了晶间卤水非稳定流数学模型并进行数值计算,对别勒滩区段卤水开采过程进行模拟,结果表明该模型可以反映盐湖晶间卤水流场的变化;安莲英等(2010)对深埋藏的杂卤石的溶浸开采进行过可行性研究及溶浸动力学模拟,指出溶浸开采可能成为深埋藏杂卤石开发的有效途径;王文祥等(2010, 2013a)对察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采进行了探讨,得出了溶解驱动过程中水动力场和水化学场的部分变化规律,结果表明,作为溶解驱动溶剂,盐田老卤的溶解钾矿效果明显,但溶矿过程中部分NaCl析出结盐,减弱了地层的渗透性;中国地质科学院矿产资源研究所(2013)^①对青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发关键技术进行了研究,对别勒滩区段的矿床地质特征进行了详细描述,建立了钾盐矿床的三维模型,并对低品位固体钾矿的液化率与可液化资源量进行了评价,提出了增程驱动模式及开发方案;刘喜业等(2014)对察尔汗盐湖表层低品位固体钾矿溶矿实验及数值模拟进行了分析,建立了

稳态渗流有限模型;周桓等(2015)对大浪滩低品位钾矿溶浸富钾规律进行了研究,指出不同溶剂对固体钾矿的溶浸效果不同;Li等(2020)对察尔汗盐湖低品位固体钾盐矿物特征及其溶解机理进行了研究,野外实验显示老卤和淡水配制的具有高镁低钠低钾的溶剂溶矿效果相对较好。

上述研究取得了一些重要认识,首先证明了低品位固体钾盐可以通过固液转化的方法进行开发利用,其次多个数值模拟获得了部分适用于低品位固体钾盐溶矿模拟分析的参数及条件,还获得了低品位固体钾盐溶矿过程中水动力场和水化学场的部分变化规律。但是,关于低品位固体钾矿溶解机理尚不完全清楚,数值模拟方面仍需补充大量数据,溶矿过程中的水动力学和水化学变化仍需要更深入的研究。本文在前人研究基础上,以青海别勒滩为研究对象,进行了野外溶矿实验,研究低品位固体钾盐固液转化过程中的水动力学和水化学变化问题,欲为低品位固体钾盐的开发提供科学参考。

1 矿区地质特征

别勒滩位于察尔汗盐湖的最西部(图1),地层完整,总的趋势是南高北低(于升松,2000;李波涛等,2010),面积约1500 km²(杨谦等,1993),岩盐属蒸发岩沉积,主要由石盐组成,局部地段含有杂卤

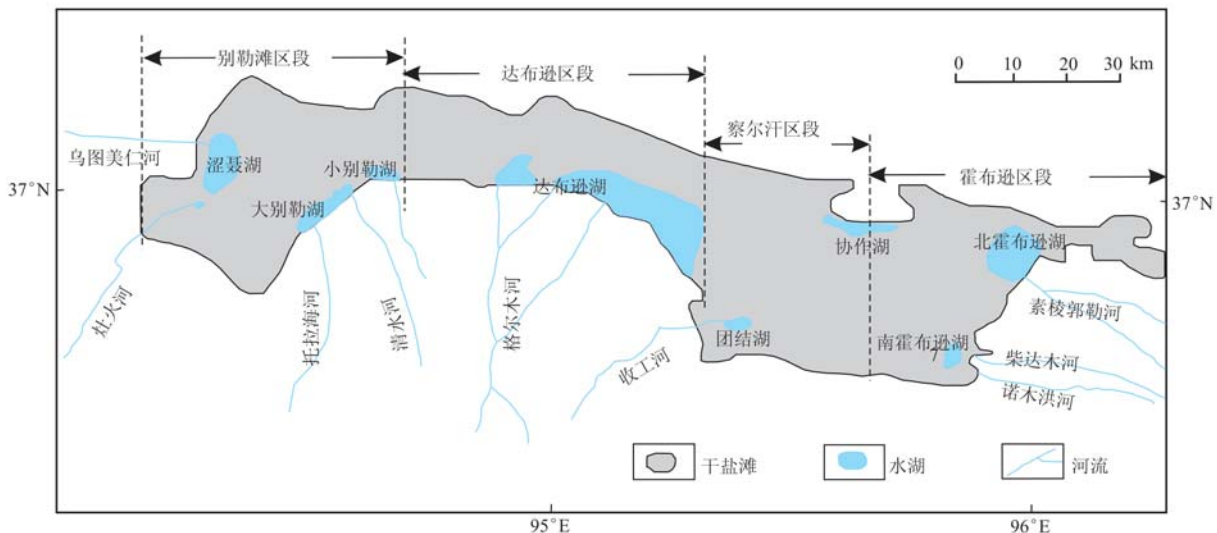


图1 察尔汗盐湖各区段划分示意图(据孙大鹏等,1988;李波涛等,2010)

Fig. 1 The section division of the Qarhan Salt Lake (after Sun Dapeng *et al.*, 1988; Li Botao *et al.*, 2010)

^① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2013. 青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术.

石、光卤石、钾石盐、石膏、芒硝、水氯镁石及碎屑沉积物等(图 2)。钾盐矿物主要分布于最上部的 S₄ 和

S₅ 盐层(图 3),地层中固体钾矿层或含钾矿层 KCl 品位较低,通常含量在 2%~6%之间,部分在 0.2%~

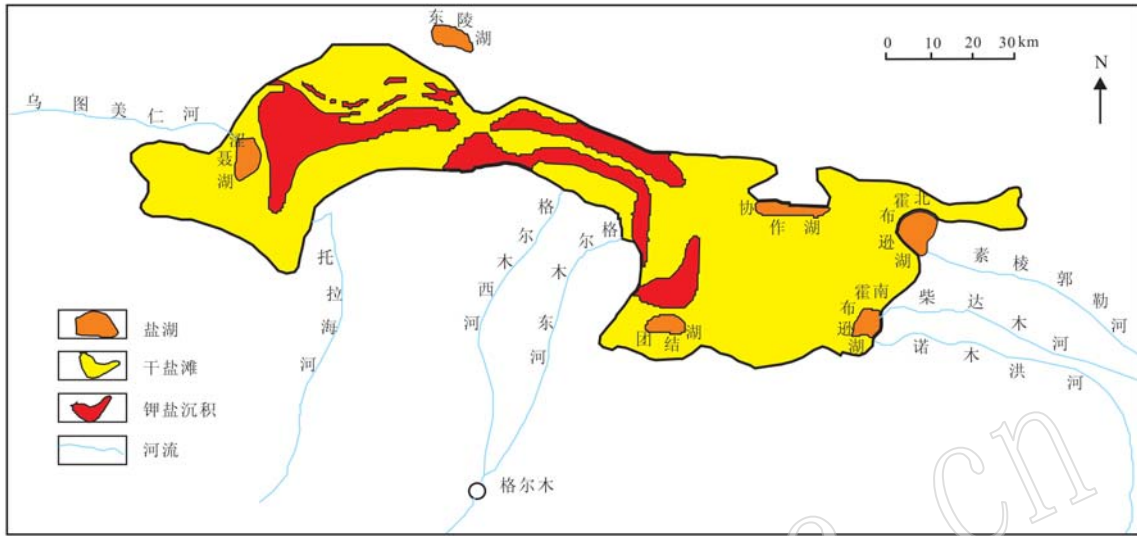


图 2 察尔汗盐湖钾盐沉积分布图(据孙大鹏等, 1988)

Fig. 2 The distribution of potash deposits in Qarhan Salt Lake (after Sun-Dapeng et al., 1988)

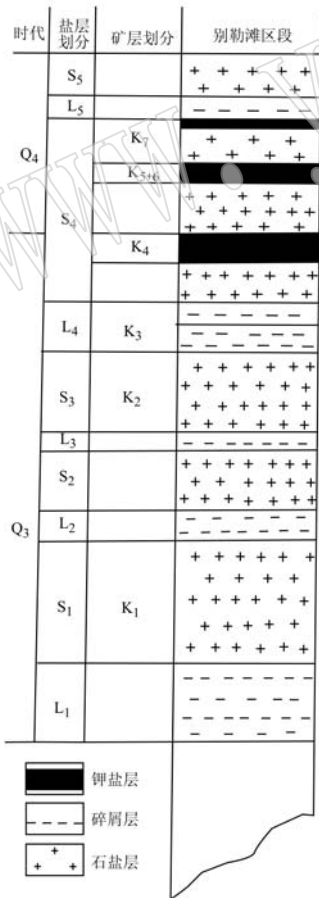


图 3 别勒滩地层剖面示意图(改自袁见齐等, 1995)
Fig. 3 Stratigraphic section of Bieletan (modified after Yuan Jianqi et al., 1995)

2.0%之间(袁见齐等, 1995; 王文祥等, 2013b),属于低品位固体钾盐。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,岩性特征见图 3。别勒滩区段主要为干盐湖,其晶间卤水的补给来源主要是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。

2 矿区溶矿工程部署

本次溶矿试验区位于别勒滩地区西部,涩聂湖东岸,涩北公路以西。该区盐层孔隙发育好,厚度大,2017年5月~10月在实验区开展了针对埋深3m以上浅矿层的溶解转化实验,主要溶解转化区域面积约为27km²,具体的工程部署详见图4。本次溶矿采用的是分形加密渠道布置,平均每200m开挖一条渗水支渠,与单级驱动和增程驱动溶矿相比,能增加有效溶矿面积。

为了监测溶矿过程中试验区的水位和水质变化规律,本次溶矿共在试验区开挖探坑32个(图4、图5),试验区西南侧以支渠A1-A3、A4-A5和A6-A7为界分为3个单元。单元1内有1#~6#探坑,单元2内有7#~15#探坑,单元3内有16#~21#探坑,同时在6号渠西南侧开挖探坑11个(编号22#~32#)。

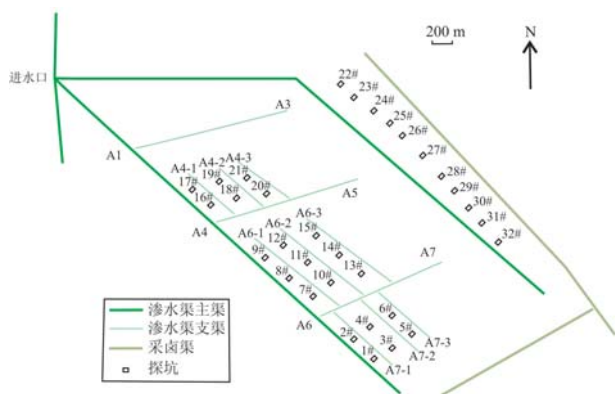


图4 别勒滩试验区溶剂渗水渠道分布图
Fig. 4 Distribution of the infiltration channel in the Bieletan experimental area



图5 试验区探坑照片
Fig. 5 The detective hole in the experimental area

探坑到渗水渠的平均距离为 178 m,根据观测探坑中的水位和水质变化来判断溶矿效果。

溶矿需要采用一定浓度的卤水,如果采用淡水或低浓度卤水,会在盐层内部形成大量溶解而形成

空洞,造成盐层垮塌(梁卫国等, 2003; 王石军等, 2013),或者形成优势通道;如果采用卤水浓度较高,又会造成渠壁结盐。本次溶矿采用老卤与淡水掺兑的方法配制溶剂,KCl 含量平均值为 0.44%,NaCl 含量平均值为 1.29%,MgCl₂ 含量平均值为 19.09%,呈低钠低钾高镁的特点,因符合 Na⁺、K⁺、Mg²⁺/Cl⁻-H₂O 四元水盐体系,投在该四元水盐体系相图上的位置见图6。

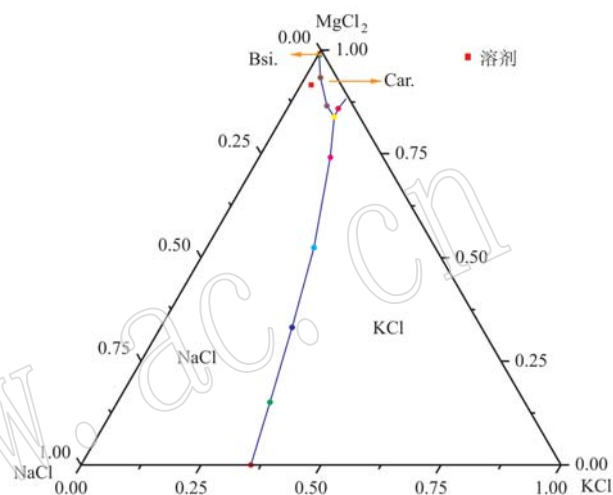


图6 溶矿溶剂在 25°C 的 Na⁺、K⁺、Mg²⁺/Cl⁻-H₂O 四元水盐体系相图上投点

Fig. 6 The point of the solvent on the phase diagram of 25°C Na⁺、K⁺、Mg²⁺/Cl⁻-H₂O

本次溶矿采用的是浸泡式溶解方法,即忽略流场条件。2017 年 5 月份开始向实验区输送大量溶剂时,实验区水位为 3 m,经过两个月的补给,渗水渠平均水位抬升 1 m 左右(7 月 12 日观测),从现场观测看,渗水渠和探坑的水位基本持平,至 10 月份共向实验区注入溶剂 8.372×10⁷m³(图7)。

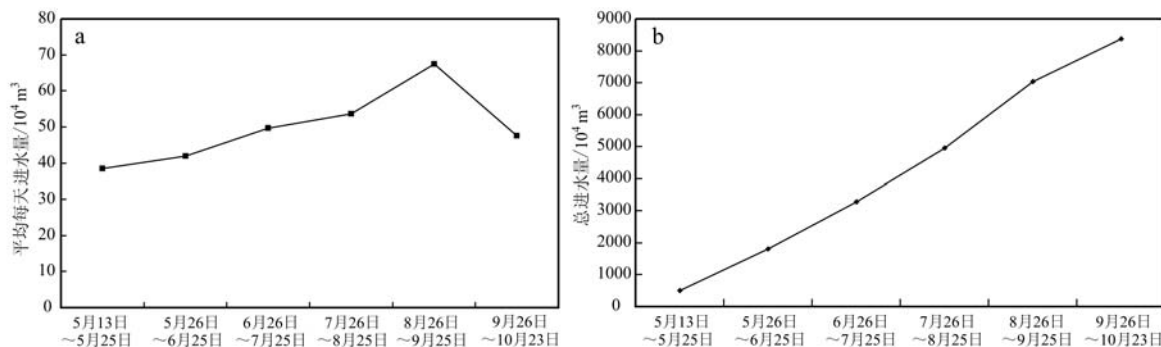


图7 试验区注入溶剂量统计图

Fig. 7 The statistical diagram of the injected solvents in the experimental area

3 溶矿实验过程及讨论分析

3.1 探坑潜水位变化规律

根据试验区重点探坑潜水位历时曲线图(图8)分析可知,6月15日探坑1#~21#平均水位为2.0 m,最浅水位为1#探坑,水位为1.6 m,最深水位为11#探坑,水位为2.2 m;7月28日探坑1#~21#平均水位为1.31 m,最浅水位为3#和4#探坑,水位为0.5 m,最深水位为12#探坑,水位为1.8 m;8月16日探坑1#~21#平均水位为1.17 m,最浅水位为4#探坑,水位为0.38 m,最深水位为12#探坑,水位为1.6 m;9月9日探坑1#~21#平均水位为1.04 m,最浅水位为1#探坑,水位为0.2 m,最深水位为12#探坑,水位为1.4 m。

从图7可知,从5月份开始至9月份每日进水

量是逐渐增大的,若溶矿过程顺利,则探坑水位应按照一定的速度稳步上升,而实际情况并非如此。图8显示,至6月15日进水34 d,试验区探坑平均水位上升约1 m;至7月28日再进水43 d,试验区平均水位上升0.69 m;至8月16日再进水19 d,试验区平均水位上升0.14 m;至9月9日再进水24 d,试验区平均水位仅上升0.13 m。试验区探坑水位变化整体情况表明,平均水位1.31 m以深,溶剂进入试验区含矿层相对比较顺利,然后在1.31 m以浅溶剂量没有减少的情况下水位上升明显减缓。这可能是以下原因导致:1.31 m以浅矿层孔隙度和给水度整体条件较差,物性变差导致溶剂无法在含钾矿层中很好地流通,这不仅降低了溶矿效率,大量的溶剂必然从试验区域内的优势通道向地势低洼处快速迁移,导致在试验区东南侧溶剂大量聚积,形成了一个“溶剂湖”。

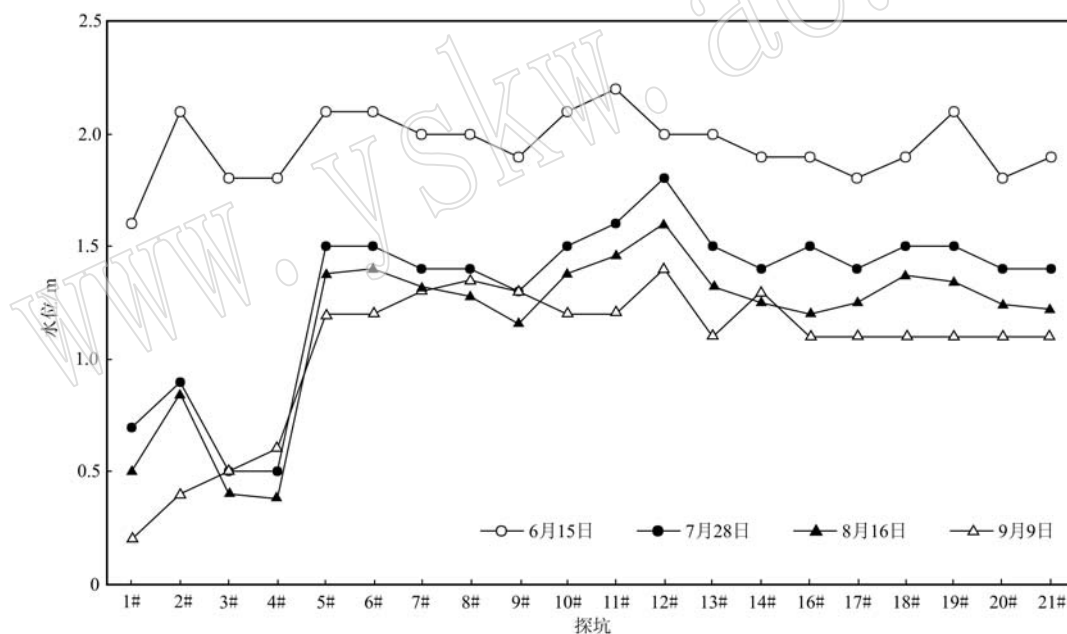


图8 试验区探坑水位变化历时曲线

Fig. 8 The diachronic change curve of the water level in the test hole of the experimental area

不同监测时间点各探坑潜水位平面等值线图见图9。由于受取样数据所限,导致在点位一致的情况下,图9中部分等值线范围不一致。在溶剂注入过程中,探坑1#~4#始终是水位埋深的一个低值区域,水位稳步上升;7月13日之前,另一个水位上升较快的区域为探坑15#的东北侧,而其他区域水位则上升较慢;至7月13日,除探坑7#~15#外,其它区域都有较明显的水位抬升;7月28日,试验区内水位

抬升最高的位置为探坑1#~4#,水位抬升最差的为探坑12#,此时,试验区东北部大片区域水位埋深都比较深,进水效果较差;8月16日,东北部依然是试验区水位抬升效果最差的区域;至9月9日,试验区西南部区域整体水位都抬升至埋深1.1 m以浅,但东北部效果依然不好。截止11月中旬,在6号渠西南一侧出现了大量溶剂沿优势通道向6号渠方向快速推进的问题,给试验区的溶矿工作带来较大压力,

水位抬升每天仅仅能达到 1 cm,而且在 6 号渠出现了多个涌水点,为了保证安全生产,溶剂不得不停止注入。其主要原因可能是 6 号渠西南侧大片区域浅

部含矿层(约 1.5 m 以浅)溶矿效果不佳,溶剂无法注入含矿层与固体钾矿发生反应,随着注水量的增大而选择从优势通道向 6 号渠方向快速运移。

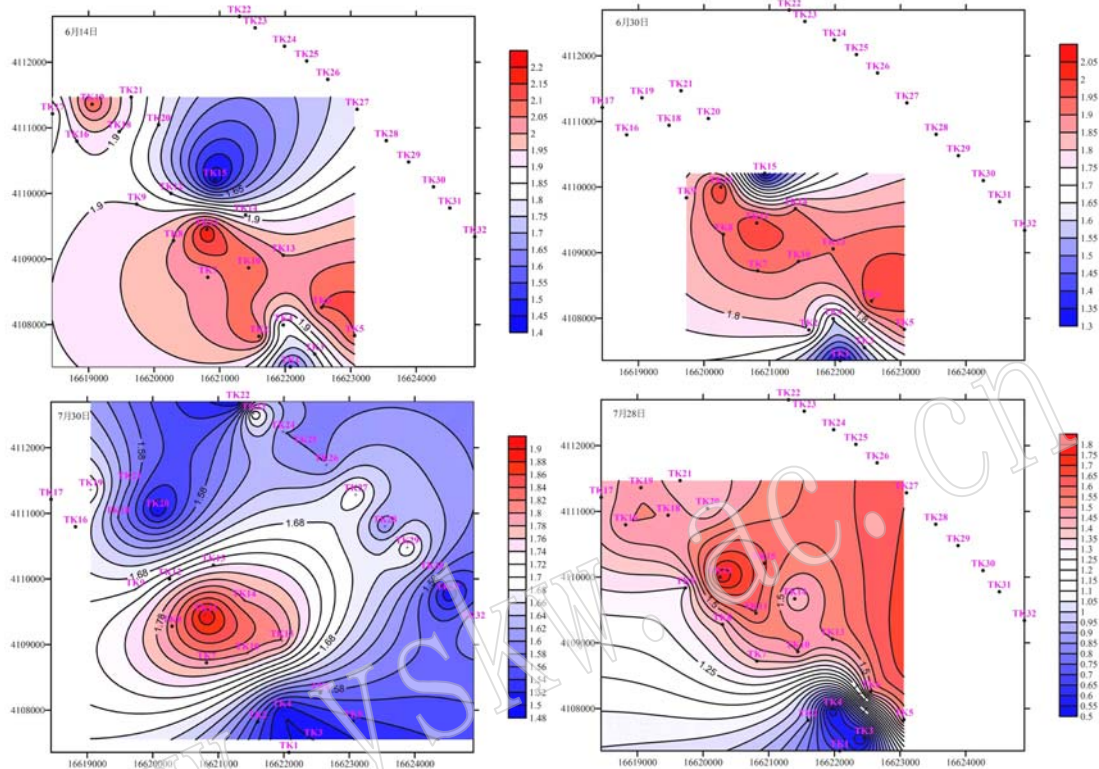


图 9 试验区水位埋深等值线图

Fig. 9 The contour map of the water level in the experimental area

水位埋深变化的等值线图表明,试验区含矿层以埋深约 1.5 m 为界,在地质结构、构造、孔隙度方面存在较大差异,特别是晶间孔隙的连通性等卤水储集空间的质量方面发生了明显变化,导致水位抬升的进程在 7 月中旬以后发生了明显变化。

3.2 探坑水化学变化规律

探坑中水位与 KCl 含量变化见图 10。单元 1 内探坑水位整体上随着时间变化稳步上升,特别是探坑 1#~4#水位埋深高过 0.5 m。不同的是,8 月 16 日之后,探坑 3#和 4#水位埋深有一定幅度的下降;9 月 9 日,探坑 5#和 6#水位埋深为 1.2 m,且其水位变化趋势基本一致。因此,在溶矿过程中,虽然单元 1 整体上水位上升情况最佳,但不同区位之间也存在一定差异。探坑中水质的变化明显与水位不同,各探坑水质都表现为一定幅度的波动,1#和 2#探坑中 KCl 含量呈先升后降的趋势,4#和 5#探坑中 KCl 含量呈先降后升的趋势,3#探坑中 KCl 含量波动最大,整体上没有统一的变化规律,这可能与盐层的均质

性和该区域固体钾矿的类型及含量有关。

单元 2 内除探坑 15#水位埋深以较快速度在 8 月 16 日上升至 0.2 m 外,7#~14#探坑的水位埋深变化相对较为一致,不同之处在于 7#、8#、9#和 14#探坑在 8 月 16 日之后水位埋深略有下降,其原因可能是由于该区域探坑中溶剂没有得到补充,而探坑中卤水强烈蒸发引起水位埋深逐步下降。单元 2 内,从进溶剂开始至 9 月 9 日水位埋深最高 1.1 m,且多数探坑在 7 月 28 日之后没有明显变化,表明该单元在埋深 1.1 m 以浅溶矿效果较差,这可能是矿层地质特征有差异的原因。该单元探坑水质在 7 月 28 日之前波动幅度较小,之后 7#和 14#探坑 KCl 含量明显增高,7#探坑从 1.13%增加至 2.40%,在 9 月 9 日又降低至 1.18%;14#探坑从 0.8%增加至 2.14%,在 9 月 9 日又降低至 0.57%。探坑 11#、12#和 13#则正好相反,KCl 含量先急剧降低再急剧增加至 1.83%~2.49%。单元 2 内,各探坑水质变化无统一规律。

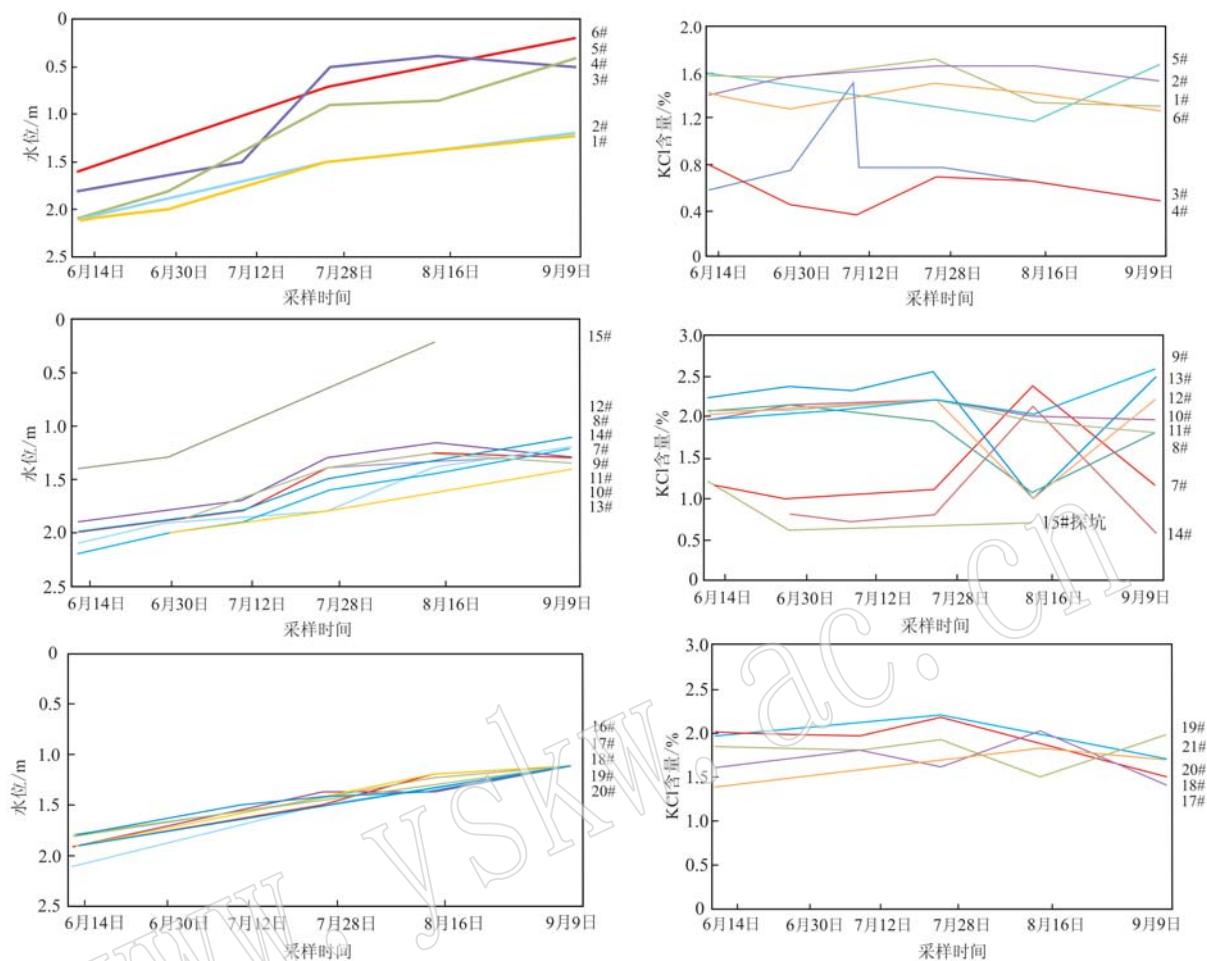


图 10 溶矿过程中试验区探坑中水位和 KCl 含量变化图

Fig. 10 The changes of the water level and KCl content in the dissolution process of the experimental area

单元 3 内有 6 个探坑在溶剂注入过程中水位埋深变化几乎完全一致,至 9 月 9 日探坑水位埋深均为 1.1 m,表明该单元浅部(1.1 m 以浅)溶矿效果较差,但区域内 3 m 以浅矿层均质性较好。与该单元内探坑的水位波动趋势一致,在溶剂注入过程中探坑内卤水水质的变化相对单元 1 和单元 2 明显较小,6 个探坑在监测时间内 KCl 含量平均值分别为 6 月 1.70%、7 月 2.02%、8 月 1.76%和 9 月 1.49,表明该单元溶矿效果相对比较稳定。不足之处在于水位在 1.1 m 以浅上升难度较大,造成浅部低品位固体钾矿开采困难。

试验区不同时间段探坑内卤水的 KCl 含量变化等值线图详见图 11(该图受取样数据所限,导致在点位一致的情况下,部分等值线范围不一致)。探坑内卤水的 KCl 含量变化与水位埋深变化基本上相反,水位抬升效果最好的 1#~4#探坑(单元 1 西南部),卤水品质始终较差;试验区的东北部水位抬升

效果较差,但该区域卤水品质较好;9 月 9 日,试验区内探坑中 KCl 含量平均值约 1.3%,且不同单元探坑之间差异较小。随着溶剂的不断补充,经过一段时间的反应,区内卤水 KCl 含量整体趋于平均,但整体上含量均较低,可能是因为“青海盐湖低品位钾盐增程驱动开采技术”及“青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发关键技术”两大课题曾在该区做过野外溶矿实验,加之青海盐湖集团近几年的开采,地层中钾盐矿物含量降低,因此溶矿后区内卤水中 KCl 含量相对偏低。

3.3 应用 PHREEQC 软件分析溶矿过程

饱和度指数(saturation indices,缩写为 SI)是水文地球化学研究中应用最多的一个指标,它研究的是矿物在水溶液中的饱和状态。矿物在水溶液中的饱和度指数(SI)定义为: $SI = \lg IAP - \lg K_{sp}$,式中, IAP 为矿物溶解反应中相关离子的活度积, K_{sp} 为矿物在某温度下溶解反应的平衡常数。当 $SI = 0$ 时,矿物在水溶

液中处于平衡状态;当 $SI < 0$ 时,表明矿物在水溶液中未达到饱和状态,矿物将发生溶解反应;当 $SI > 0$

时,表明矿物在水溶液中处于过饱和状态,矿物将会沉淀析出(Mark and Nicolas, 1984)。

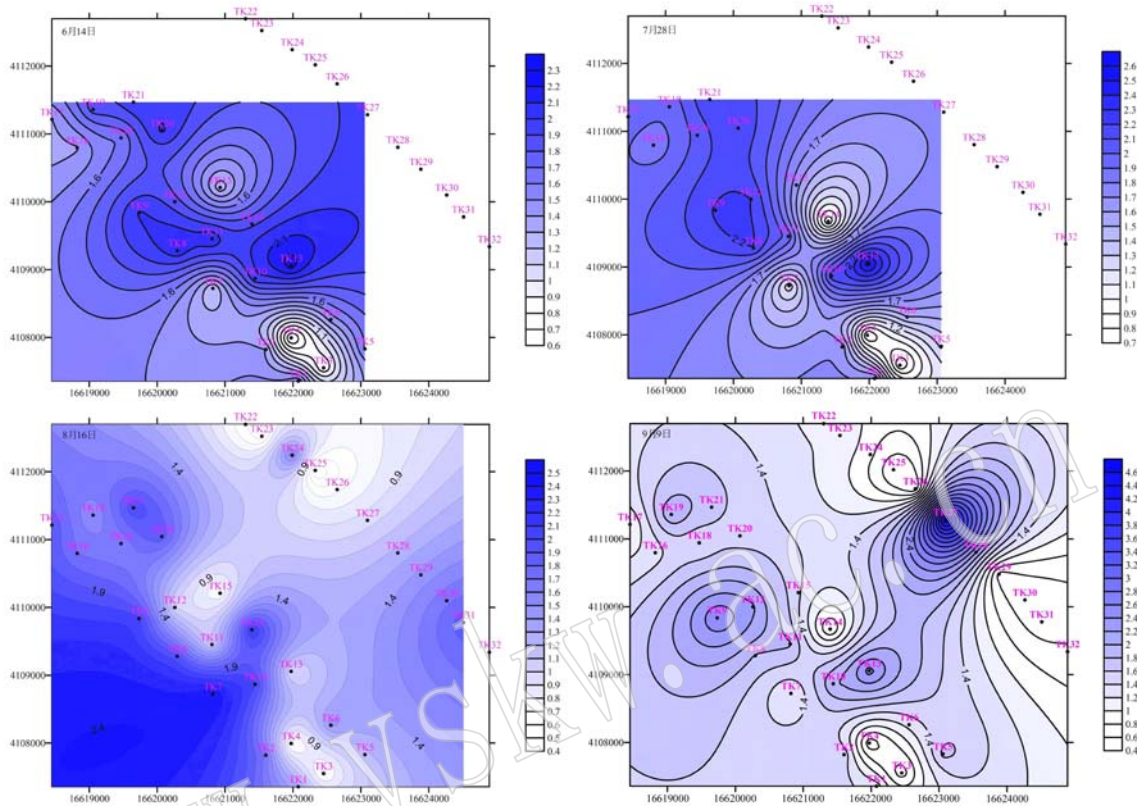


图 11 试验区探坑中 KCl 含量变化等值线图

Fig. 11 The contour map of the KCl content in the test hole of the experimental area

PHREEQC 软件可计算矿物在水溶液中的饱和状态,计算之前需要确定可能的矿物相。察尔汗盐湖最常见的盐类矿物为石盐、杂卤石、光卤石、石膏、钾石盐,偶见极少量的方解石和白云石,碎屑矿物有石英、云母、钠长石、绿泥石(李波涛等, 2010, 2012; 中国地质科学院矿产资源研究所, 2013^①; 王文祥, 2010, 2013a; 牛雪, 2014; 牛雪等, 2015)。碎屑矿物为难溶矿物,方解石和白云石为非贯通性矿物且量极少,因此确定察尔汗盐湖的矿物相为石盐、杂卤石、光卤石、钾石盐。溶矿过程中 1#~21#探坑溶液中各矿物相的饱和指数变化情况详见图 12。

图 12 中 5 月份代表的是原溶剂中各矿物相的饱和指数。从图 12 中可以看出,各探坑溶液中石盐的矿物饱和指数整体上较高且呈上升趋势,说明溶剂进入地层后溶解了微量的石盐,部分探坑中石盐矿物饱和指数呈先升后降再上升趋势,主要是受溶

剂补给影响。光卤石和钾石盐的矿物饱和指数整体上呈增高趋势,溶剂进入地层后溶解了盐层中的光卤石和钾石盐;部分探坑中光卤石和钾石盐的矿物饱和指数有一定的波动,主要是受溶剂补给的影响。

杂卤石的矿物饱和指数整体上呈先增加后下降的趋势,主要是因为光卤石和钾石盐为易溶蒸发岩矿物,溶剂进入地层后先溶解这两种矿物,随着光卤石和钾石盐的矿物饱和指数的增加,但溶液对钾盐矿物并未达到饱和,理论上溶液对杂卤石的溶解能力增强,部分探坑中杂卤石的矿物饱和指数有一定的波动,主要是受溶剂补给的影响。

由上述分析可知,溶矿后卤水中钾盐矿物未达到饱和,因此推测本次溶矿后溶液 KCl 含量整体偏低的原因与地层中钾盐矿物含量有关。

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2013. 青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术.

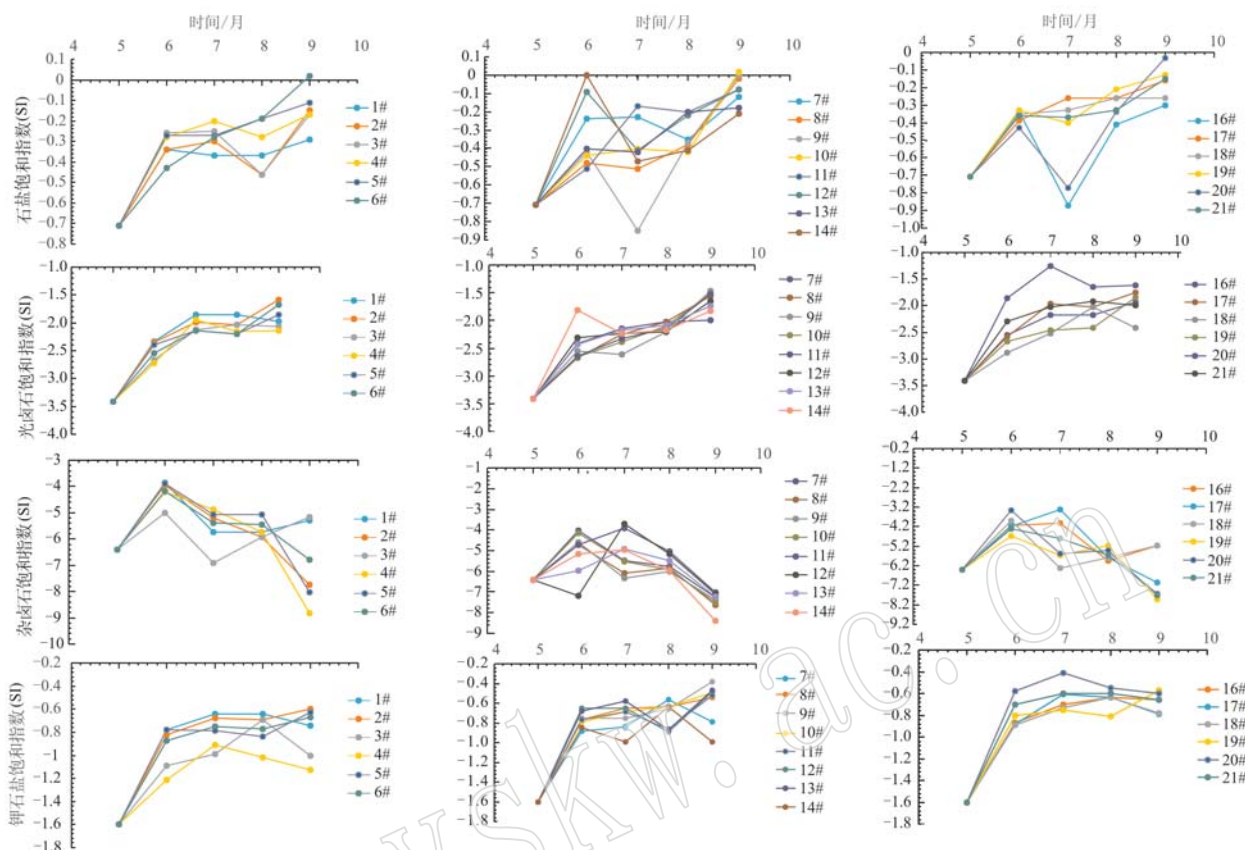


图 12 试验区探坑溶液中各矿物饱和指数历时曲线图

Fig. 12 The diachronic change curve of the saturation indices of the minerals in the test hole of the experimental area

4 结论

(1) 溶矿过程中, 试验区内不同时间不同单元水位变化有较大区别, 探坑中水位变化的等值线图表明, 实验区内含矿层以埋深约 1.5 m (或 1.31 ~ 1.5 m) 为界, 表明别勒滩地区在地质结构、构造, 特别是孔隙度等方面存在较大差异。

(2) 溶矿过程中, 试验区内不同时间不同单元卤水的 KCl 含量有差异; 在溶矿初期, 探坑内卤水的 KCl 含量变化与水位埋深呈相反趋势, 水位抬升效果最好的区域其卤水品质较差。随着溶剂的不断补充, 与固体钾盐矿物反应时间的增加, 区内卤水 KCl 含量整体趋于平均, 但含量均较低。

(3) 试验区探坑中卤水 KCl 含量较低, 可能是以下原因的结果。一是因为“青海盐湖低品位钾盐增程驱动开采技术”及“青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发关键技术”两大课题曾在该区做过野外溶矿实验, 加之青海盐湖集团近几年的开采, 导致地层

中钾盐矿物含量降低, 本次溶矿后卤水中 KCl 含量低; 二是因为可能与盐层的均质性和该区域固体钾矿的类型及含量有关。

5 问题与建议

(1) 溶矿时, 溶剂注入过程中试验区水位变化表明不同深度和不同区域内卤水储层的连通性存在较大差异。因此, 必须在大规模工业化开发前加大对储卤层特征研究, 以此为基础开展溶采单元的划分, 并根据储层结构在垂向上的变化控制溶剂进入的总量和速度。

(2) 该区域已经过多轮溶采, 固体钾矿的品位发生了较大变化, 这导致溶剂注入后卤水的水质变化较慢, 溶矿效果较差, 因此目前必须对浅部固体钾矿矿床地质特征进行精准评估, 精细化管理, 以避免盲目补给溶剂造成无效溶解, 使得溶采工程低效率运行, 生产成本提高。

(3) 存在明显的优势通道。6 号渠在溶剂注入

过程中出现多处“管涌”现象,明显存在优势通道,优势通道的存在造成溶剂与矿体的接触时间较短,使溶矿后水质达不到工业要求就直接进入采卤渠。建议根据地质情况,补充一定的工程勘查,对溶采区优势通道情况进行摸底,进行技术攻关,变弊为利。

致谢 感谢青海盐湖工业股份有限公司王罗海、严群雄、刘斌山等在本次研究中提供的大力支持,并对其他为本文的完成做出贡献的工作者一并表示感谢。

References

- An Lianying, Yin Hui'an and Tang Minglin. 2010. Feasibility study of leaching mining of deeply buried polyhalite and kinetic leaching modeling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1 690~1 696(in Chinese with English abstract).
- An Lianying, Yin Hui'an, Tang Minglin, *et al.* 2005. Study on transformation of potassium between minerals and brine from Qarhan Salt Lake, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 32(1): 75~77(in Chinese with English abstract).
- Guo Haifei. 2014. Agricultural Technology Department: The problem of soil potassium deficiency and acidification is serious[N]. *Economic Observation News*, 2014-01-13(in Chinese).
- Hao Aibing and Li Wenpeng. 2003. The application of Pitzer theory in the geochemical equilibrium study of high concentration brine system with variable temperature [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 11(3): 24~30(in Chinese with English abstract).
- Li Botao, Zhao Yuanyi, Qian Zuohua, *et al.* 2010. A comparative study of material composition of solid sylvite before and after liquefaction and its significance in Bieletan area of Qarhan Salt Lake, Qinghai, China[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 669~683(in Chinese with English abstract).
- Li Botao, Zhao Yuanyi, Ye Rong, *et al.* 2012. Composition in solid potash deposits of Qarhan Salt Lake, Qinghai Province and its significance[J]. *Geoscience*, 26(1): 71~84(in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2020. The effect of solvent chemistry on potassium dissolution extraction from low-grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake, China[J]. *Applied Geochemistry*, 115: 1~11.
- Li Wenpeng. 1991. The Model of Dissolving and Driving Exploitation and the Software Development in Qarhan Salt Lake[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Li Wenpeng. 2008. Numerical modelling of dissolving and driving exploitation of potash salt in the Qarhan Playa—A coupled model of reactive sloute transport and chemical equilibrium in a multi-component underground brine system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 1 070~1 082.
- Li Wenpeng and Liu Zhenying. 1994. The model research of dissolving and driving exploitation in Qarhan Salt Lake[A]. *Proceeding of the Sixth International Salt Lake Conference* [C]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Liang Weiguo, Zhao Yangsheng and Wang Ruifeng. 2003. Back analysis of rock salt cavity in solution mining [J]. *Mining Research and Development*, 23(4): 11~14(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiye, Li Yonggang, Zhang Xingru, *et al.* 2014. Dissolution experiment and numerical simulation on surface salt of Qarhan Salt Lake [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 46(8): 18~20(in Chinese with English abstract).
- Mark R and Nicolas S. 1984. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1 479~1 492.
- Niu Xue. 2014. Solid Potash Mineral Characteristics and Genesis Mechanism Studies in the Bieletan Section of Qarhan Salt Lake[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Sun Dapeng and Lock D E. 1988. The formation problem of sylvite deposition in Qaidam Basin[J]. *Chinese Science*, (12): 1 323~1 333(in Chinese with English abstract).
- Sun Dapeng and Lü Yaping. 1995. A preliminary investigation on carnallite-resolving experiment for intercrystal brines in the first exploitation area of Qarhan Salt Lake, Qinghai, China[J]. *Journal of Salt Lake Science*, 3(4): 40~43(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaohong. 2013. Characteristics and Genesis of Salt Minerals, and Potash Formation in the Lop Nur Playa[D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Wang Dong. 2019. Verification of the law of one-price in international potassium fertilizer market[J]. *China Mining Magazine*, 28(5): 37~44 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dong, Feng Mingwei and Li Huiying. 2017. The current status of China's potash resources development[J]. *China Mining Magazine*, 26(S2): 5~9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2001. Potash Resource in Lop Nur Salt Lake[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Shijun and Wang Xingfu. 2013. Influence of solvent composition on dissolving solid potassium deposits of Qarhan Salt Lake[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 42(4): 20~24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenxiang. 2010. Research about Liquefy Exploitation of Low-grade Solid Potassium in Qarhan Salt Lake [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenxiang. 2013. Driving and Dissolving Exploitation of Low-grade Solid Potassium Resource in Qarhan Salt Lake [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Zhengying, *et al.* 2010. A tentative discussion on in-situ experimental liquefaction and exploitation of low grade solid potassium resources in Qarhan Salt Lake [J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 697~703 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Zhenying, *et al.* 2013a. The amount of dissolving and driving exploitation of solid potassium by Seniehu Lake water[J]. *China Mining Magazine*, 22(4): 102~105 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Zhenying, *et al.* 2013b. Hydrodynamic and hydrochemical condition analysis of low-grade solid potassium liquefy exploitation experiment [J]. *China Mining Magazine*, 22(7): 114~119 (in Chinese with English abstract).
- Wang Youde. 2006. Preliminary study on the method for dissolution mining of the low grade solid potassium deposit in Mahai Salt Lake [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 14(1): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qian and Han Xiaoting. 1993. *Geology of Potash Deposit in Qarhan Salt Lake* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~3 (in Chinese).
- Yu Shengsong. 2000. Dynamics and Prediction of Potassium-bearing Brine in the First Mining Area of Qarhan Salt Lake [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng, *et al.* 1995. *The Formation Conditions of Potash Deposits in Qarhan Salt Lake* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhou Huan, Wang Pin, Bai Xiaoqin, *et al.* 2015. Rules of leaching recovery of potassium in Dalangtan low-grade potash [J]. *Industrial Minerals and Processing*, (9): 1~5 (in Chinese).
- Zhou Xun, Fang Bin, Chen Mingyou, *et al.* 2006. Numerical simulation of brine in crystalline halite in the Bieletan area of the Qarhan Salt Lake region, Qinghai Province [J]. *Arid Zone Research*, 23(1): 258~263 (in Chinese).

附中文参考文献

- 安莲英, 殷辉安, 唐明林. 2010. 溶浸开采深埋藏杂卤石可行性及溶浸动力学模拟[J]. *地质学报*, 84(11): 1 690~1 696.
- 安莲英, 殷辉安, 唐明林, 等. 2005. 察尔汗盐湖固液矿转化实验研究[J]. *成都理工大学报(自然科学版)*, 32(1): 75~77.
- 郭海飞. 2014. 农技处: 土壤缺钾、酸化问题严重[N]. *经济观察网*, 2014-01-13.
- 郝爱兵, 李文鹏. 2003. Pitzer 理论在变温高浓卤水体系地球化学平衡研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 11(3): 24~30.
- 李波涛, 赵元艺, 钱作华, 等. 2010. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段固体钾盐液化前后物质组成对比及意义[J]. *矿床地质*, 29(4): 669~683.
- 李波涛, 赵元艺, 叶 荣, 等. 2012. 青海察尔汗盐湖固体钾盐物质组成及意义[J]. *现代地质*, 26(1): 71~84.
- 李文鹏. 1991. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李文鹏, 刘振英. 1994. 察尔汗盐湖溶解驱动开采钾盐的数值模型研究——多组分地下水系统反应溶质运输和平衡化学耦合模型研究[A]. 第六届国际盐湖会议论文集[C]. 北京: 地质出版社.
- 梁卫国, 赵阳升, 王瑞凤. 2003. 水溶开采岩盐溶腔形成的反演分析[J]. *矿产研究与开发*, 23(4): 11~14.
- 刘喜业, 李勇刚, 张兴儒, 等. 2014. 察尔汗盐湖表层低品位钾矿溶矿实验及数值模拟分析[J]. *无机盐工业*, 46(8): 18~20.
- 牛 雪. 2014. 察尔汗盐湖别勒滩区段固体钾盐特征及成因机理研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 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.
- 孙大鹏, Lock D E. 1988. 柴达木盆地钾盐沉积的形成问题[J]. 中国科学, (12): 1 323~1 333.
- 孙大鹏, 吕亚萍. 1995. 察尔汗盐湖首采区卤水溶解光卤石实验的初步研究[J]. 盐湖研究, 3(4): 40~43.
- 孙小虹. 2013. 罗布泊盐湖盐类矿物特征、成因与成钾作用[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 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.
- 王栋. 2019. 国家钾肥市场“一价定律”的验证[J]. 中国矿业, 28(5): 37~44.
- 王栋, 冯明伟, 李慧英. 2017. 中国钾盐资源发展现状及建议[J]. 中国矿业, 26(S2): 5~9.
- 王弭力, 刘成林, 等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社.
- 王石军, 王兴富. 2013. 盐湖固体钾矿溶解转化溶剂组成对资源开发的影响[J]. 化工矿物与加工, 42(4): 20~24.
- 王文祥. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾盐液化开采试验研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王文祥. 2013. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿驱动溶解液化开采试验研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王文祥, 李文鹏, 刘振英, 等. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场实验研究探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 697~702.
- 王文祥, 李文鹏, 刘振英, 等. 2013a. 涩聂湖湖水驱动溶解固体钾矿固液转化量计算[J]. 中国矿业, 22(4): 102~105.
- 王文祥, 李文鹏, 刘振英, 等. 2013b. 别勒滩低品位钾盐固液转化试验水动力与水化学条件分析[J]. 中国矿业, 22(7): 114~119.
- 王有德. 2006. 马海盐湖低品位固体钾矿溶解开采方法初步探讨[J]. 盐湖研究, 14(1): 24~28.
- 杨谦, 韩效亭. 1993. 察尔汗盐湖钾盐矿床地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 于升松. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测[M]. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 周桓, 王品, 白晓琴, 等. 2015. 大浪滩低品位钾矿溶浸富钾规律研究[J]. 化工矿物与加工, (9): 1~5.
- 周训, 方斌, 陈明佑, 等. 2006. 青海省察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水数值模拟[J]. 干旱区研究, 23(2): 258~263.

致 谢

2020年度,许多专家在百忙之中抽出时间,接受编辑部邀请为本刊评审了稿件,他们对文章的学术质量进行了严格把关,付出了辛勤的劳动,为提高刊物质量做出了贡献。在此,编辑部特代表主编及主办单位,向这些专家表示衷心的感谢!这些专家有(以姓氏拼音为序):

柏道远 卜涛 曾令森 柴凤梅 陈雷 陈懋弘 陈锰 陈涛 陈友良 陈振宇 陈正乐
 代晶晶 邓久帅 丁正江 董磊磊 范建军 丰成友 付长垒 高顺宝 葛文春 郭庆银 郭小波
 郭晓璐 韩宝福 韩张雄 何丽娟 何小虎 贺振宇 侯明才 胡文俊 皇甫鹏鹏 黄河 黄可可
 江思宏 姜耀辉 金永新 赖绍聪 雷绍民 李福春 李国武 李华明 李锦轶 李俊 李荣社
 李婉婷 李益龙 李永军 梁亚运 林锦荣 刘彬 刘函 刘汇川 刘建辉 刘磊 刘亮
 刘文浩 刘小洪 刘琰 刘铮 刘正宏 罗静兰 骆文娟 马昌前 聂文林 裴秋明 裴先治
 钱青 邱昆峰 商朋强 石玉若 史仁灯 宋玉财 孙德有 孙红娟 孙克克 孙晓辉 谭红兵
 陶仁彪 童英 汪灵 汪智军 王保弟 王保良 王春连 王吉平 王加昇 王金荣 王立本
 王立成 王瑞 王文祥 王晓霞 王长秋 巫翔 吴柏林 吴越 夏群科 夏炎 夏瑛
 谢桂青 谢磊 谢志鹏 徐九华 徐夕生 徐学义 许博 许庆林 续海金 薛传东 薛春纪
 闫臻 颜茂都 杨德江 杨富全 杨光树 杨群 杨瑞东 杨永强 杨主明 叶宇 衣龙升
 殷科 殷宗军 尹帅 于炳松 于胜尧 余晓艳 张传恒 张道涵 张东阳 张贵山 张华锋
 张建新 张金阳 张进 张旗 张拴宏 张廷斌 张西营 张招崇 张正伟 赵国春 赵葵东
 赵太平 赵希林 赵艳军 郑厚义 周建波 周利敏 周永章 周征宇 朱江 朱正杰 宗克清