# 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

李文学,张凡凯,王江,陈伟,杨宝恒

国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司矿产资源部,新疆哈密,839000

内容提要:罗北凹地钾盐矿是个地下存在多层富钾卤水的大型液体钾盐矿床,一共分为7个富钾卤水层,第一 层为潜卤水W<sub>1</sub>,下部6层(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>、W<sub>5</sub>、W<sub>6</sub>、W<sub>7</sub>)为承压卤水。目前生产开采对象主要为埋藏较浅且易于开 采、富水性较好的潜卤水及部分承压含水层中的弹性释水。随着公司生产规模的扩大,矿区的年采卤量也随之增 加,有的区域将很快面临开采富水性差及较难开采的深部承压卤水,但是承压卤水通常储存于较为致密的结晶盐 层或碎屑层的孔隙或溶隙中,其含水地层水文参数相比潜卤水W<sub>1</sub>要小很多,造成深部富钾的承压含水层卤水疏 干采出难度较大。本文采用爆破法及大气联通法在罗北凹地钾盐矿区不同水文地质区域对深部承压含水层进行 大规模抽水试验研究,确定了不同水文地质区域深部承压卤水合理且经济的开采方法,实现了罗北凹地钾盐矿 (W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)深部含钾承压卤水资源的大规模有效采出,将很难利用的深部富钾承压水变成可利用资源,提高了 罗北凹地液体钾盐矿的深部承压卤水资源的利用率。

关键词:液体钾盐矿;承压含水层;抽水试验;爆破法;大气联通法;罗北凹地

罗布泊盐湖位于新疆若羌县东北 200km 处,罗 北凹地钾盐矿处于罗布泊盐湖东北部的次级凹地内 (Sun Xiaohong et al., 2010, 2016)(图 1), 是个赋 存多层含钾卤水的大型液体钾盐矿矿床(Liu Chenglin et al., 1999, 2003a, 2003b, 2006; Chen Yongzhi et al., 2001; Li Hao et al., 2008b; Jiao Pengcheng et al., 2006), 含矿层的结构是一层潜卤 水和六层承压卤水。目前,罗北凹地液体钾盐矿以 开采潜卤水层 W1 为主,罗北凹地内 W1 潜卤水矿 层平均厚度为17.54m,矿层平均埋深1.89m,矿层 的平均孔隙度为 18.58%, 给水度 11.36%, 卤水平 均比重 1.22,氯化钾平均品位 1.45%,氯化钾孔隙 度储量 8268.03 万 t<sup>●</sup>、给水度储量 3894.97 万 t、占 罗北凹地内储量的 46.5%。随着公司生产规模的 扩大,采卤范围逐渐扩展到深部承压卤水,根据现有 的详查资料,承压卤水的贮存介质为结晶盐层或粗 碎屑层的孔隙或溶隙,呈层状分布<sup>●</sup>,各层之间被细 粒碎屑沉积层分隔,相对独立封闭,疏干采出难度较 大,其中承压卤水钾资源量占罗北凹地钾资源量的 53.5%以上,为了进一步提高承压卤水的资源回收 率,开展罗布泊深部承压含水层卤水抽水试验,使得 深部承压含水层卤水能够实现大规模工业化开采势 在必行。

罗北凹地潜卤水采用井采方式(Li Hao et al., 2008a;Liu Chuanfu,2010;Han Jibin et al.,2015) 进行大规模工业化开采,在国内尚属首次。这是基 于 2005年一年的大规模抽水试验及工业化井采试 验,最终实现大规模工业化开采,但对于那些富水性 差(Xie Xueguang et al.,2010)、渗透系数小的承压 卤水开采,还没有进行过工业化开采试验,缺乏水 文、设备等方面的基础参数。

世界上,地下液体矿开采虽然经历数百年甚至 上千年的历史,但开采条件与罗布泊地下承压卤水 的疏干开采均有不同,没有一种方法是可以在罗布 泊这类条件下直接使用的,虽然深部石油开采可以 借鉴,但往目的层中注水增压的方法在罗布泊不可 行,一方面无水(罗布泊周边无淡水资源)可注,另一 方面,注水将造成卤水稀释且可导致卤水成分的改 变,使得有益成分的含量降低到工业品位以下,成为 不能利用的资源(Tong Yangchun et al.,2009),因

注:中央专项《(矿产资源节约与综合利用专项资金)(新国土资函〔2011〕720号)》项目、国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司《罗布泊深部承 压卤水疏干开采试验》及《罗北承压卤水(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)水文地质参数验证研究》配套研发资金支持项目。

收稿日期:2018-04-03;改回日期:2018-05-18;责任编辑:黄敏。

作者简介:李文学,男,1965年生,高级工程师,主要从事盐湖地质和盐湖钾资源卤水的开发研究工作。通信地址:新疆哈密市建设西路68号。Email:lwx0994@163.com。

2018 年

此,我们必须采取其他实际可行的试验方法(爆破法 及大气联通法)(Li Wenxue et al.,2017a),实现对 于富水性差、渗透系数小的罗布泊深部承压卤水开 采的大规模工业化开采。

### 1 罗北凹地地质特征

### 1.1 罗北凹地构造特征

受喜马拉雅造山运动的影响,罗布泊盐湖区域 构造运动极为强烈,断裂、裂隙构造极发

育。根据罗布泊区域应力场分析(Wang Mili et al.,2001),该区域压性及张性构造带方向为 280° 和 10°,北北东向张性和扭性断裂比较发育<sup>●</sup>,北北 东向断裂组发育于罗布泊干盐湖北部。

尤其是罗北凹地(图1),为新生性张性断裂或断陷带,北北东向断裂及断陷带是控制罗北凹地形成和 发展的主要构造,这些断陷带储存着丰富含钾卤水 (Wang Mili et al.,2006; Liu Chenglin et al.,2009, 2010a,2010c; Jiao Pengcheng et al.,2014; Meng Guixiang et al., 2010)及低品位固体钾盐矿(L Wenxue, ,2016),为找液体钾盐矿提供了新的方向。

### 1.2 罗北凹地沉积地层特征

矿区出露和已揭露的地层全为第四系湖泊化学 盐类和碎屑沉积(图1)。根据地层出露、接触关系 和前人已取得的测年样品资料,将矿区的第四系地 层划分为中更新统、上更新统和全新统。

### 1.2.1 中更新统龙城组(Q<sup>2</sup><sub>ch</sub>)

地表见于矿区的东部的东台地、西部的西台地 和北部雅丹,与罗北凹地形成明显的界线,北部、西 北部呈孤岛状分布。

本组底部为湖滨相的粗砂、细砾等碎屑沉积,含 菱镁矿,代表微咸水一咸水沉积环境;中上部以钙芒 硝、石膏和粘土沉积为主,钙芒硝层和粘土层有规律 的交替重复出现,反映出中更新世以盐湖相化学沉 积和湖相碎屑沉积有规律的形成为特征。

### 1.2.2 上更新统罗北组(Q<sup>3</sup><sub>d</sub>)

地表分布于中更新统龙城组雅丹残丘的顶部, 91°30′



Fig. 1 Geological map of Lop Nur in Xinjiang (after Liu Chenglin et al. ,2003b)

1一全新统冲积物;2一全新统化学和湖积物;3一全新统化学沉积物;4一上更新统和全新统风积物;

5一上更新统和全新统洪积物;6一中上更新统化学沉积物;7一山区基岩;8一钻孔及编号

1-Holocene alluvial sediments; 2-Holocene chemical and lacuatrine sediments; 3-Holocene chemical sediments;

4—Upper Pleistocene and Holocene Aeolian sediments; 5—Upper Pleistocene and Holocene diluvia sediments;

6-Middle Pleistocene and Upper Pleistocene chemical sediments; 7-mountain bedrock; 8-drill hole and its serial number

1607

覆盖于龙城组顶部不连续零星分布,厚0.5m。属上 更新世早期沉积。地下埋深3.3~7.8m,厚69~ 110m,分布较稳定,由南向北厚度增大。以钙芒硝、 粘土沉积为主,上部夹有石膏、白钠镁矾、石盐、杂卤 石和淤泥等沉积,以盐湖相沉积为主,夹湖相碎屑沉 积。其与上覆地层全新统新湖组为整合接触。

### 1.2.3 全新统新湖组(Q<sup>4</sup><sub>dh</sub>)

出露于地表,分布于整个罗北凹地干盐湖区,厚 度 3.3~7.8m,由南部向北部厚度增大。下部为含 淤泥、粉砂的石膏层,埋深 2.1~8.2m,厚 1.66~ 5.15m,遍布全区,分布稳定,为本区的标志地层。 上部为含粉砂的石盐层,厚 0.2~4.2m,本层下部为 含粉砂的石盐,厚 2.0~3.5m,石盐含量占 90%以 上,松散;本层上部为含粉砂的石盐,石盐含量 80% ~85%,致密坚硬,是本矿区主要含水层。

# 2 罗北凹地钾盐矿(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)承 压含水层水文地质特征

### 2.1 罗北凹地水文动力学特征

同位素法(Jiao Xingchun, 2016)能准确地确定 补给水的来源。1996年,中国地质科学院在罗布泊 潜卤水层的上层卤水中检测到近代核爆氘,经过测 定,潜卤水层的上层卤水的平均年龄为 36~80a (Jiao Pengcheng et al., 2004), 说明罗布泊盐湖发 生过大气降水的补给。罗北矿区地下卤水大规模开 采前,罗北凹地地下水系统的径流,受地形地貌、区 域气候、地质构造、含水层结构的控制(Li Wenxue et al., 2017b), 地下水总体流向与地形坡降趋势相 一致,由于水力梯度较小,均小于万分之一,故罗北 凹地液体钾盐矿地下储卤层晶间卤水运动缓慢 (Wang Mili et al., 2001)。储卤层晶间卤水运动规 律符合达西定律(Yu Shengsong et al., 2000),即渗 流速度与水力坡度呈正比,水力坡度越大渗流速度 越快,在察尔汗盐湖晶间卤水运动的研究中也验证 这种现象。

罗北矿区自 2009 年开始大规模抽取地下卤水, 导致罗北凹地钾盐矿区形成降落漏斗,矿区地下水 水力坡度增大,加速了矿区承压含水层中地下卤水 运动,也加速了卤水成分的"新旧更替",这种成分的 "新旧更替"破坏了深部化学沉积承压储卤水层内水 ~盐动态平衡,引起深部化学沉积承压储卤层产生 盐析或者溶蚀等作用(Jiao Pengcheng et al., 2003),这种卤水成分"新旧更替"过程是造成承压储 层晶间空隙发育的重要原因之一,另外,随着埋藏深 度的增加,地层压力增大,承压地层中的孔隙水及结晶水被压榨出来形成承压流体,这些承压流体在钙 芒硝晶体中流动过程中,可以对钙芒硝进行溶蚀,也 可以形成晶洞空隙(Liu Chenglin et al.,2002)。随 着采卤时间的延长,钙芒硝储卤层晶间空隙逐渐增 大,增强了承压钙芒硝储卤层的导水性。

### 2.2 深部承压卤水层结构特征

富钾卤水主要赋存钙芒硝(Liu Chenglin et al.,2007,2010b)的晶间孔隙中,主要为晶间卤水、 少量的赋存于粉砂、细砂中。储卤层均由结晶较好 的厚层钙芒硝层组成,部分为石盐层和石膏层组成, 孔隙发育,一般上部储卤层的孔隙度和给水度较大, 往下逐渐减小,储卤层呈层状、分布稳定。根据岩性 及卤水的赋存条件可将晶间卤水自上而下划分为1 层潜卤水层(W<sub>1</sub>)和6层承压卤水层(W<sub>2</sub>~W<sub>7</sub>)(图 2),ZK0700、ZK0000、ZK0400 钻孔位置(图 3)本文 重点描述 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>储卤层特性。





### 2.2.1 W<sub>1</sub> 潜卤水层

是罗北矿区卤水矿床的主要矿体,赋存于第四 系全新统含粉砂石盐和含粘土、淤泥的石膏等盐类 和上更新统含泥的钙芒硝、石盐等盐类沉积的盐溶 孔隙、晶间孔隙中。矿体呈层状,卤水 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 品位  $1.52\% \sim 2.10\%$ ,平均 1.74%,给水度平均 11.36%;单位涌水量 200.5~17488.6m<sup>3</sup>/d•m,渗 透系数 10.48~2222.27m/d,平均 1018.07m/d。 潜卤水矿分布面积最广,埋藏最浅,矿层最厚,含钾 量较高,富水性极强,联通性极好,储量最大,是目前 开采的主要对象。

### 2.2.2 W2 卤水矿层

赋存于上更新统中上部的结晶较好的钙芒硝层中,为第 I 承压含水层,底板埋深 37.51~40.69m, 平均厚 10.18m。卤水 K<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>平均品位 1.77%;孔 隙度最大 37.8%、最小 4.34%、平均 10.01%;给水 度最大 21.04%、最小 1.08%、平均 5.54%。

### 2.2.3 W3 卤水矿层

赋存于上更新统中部的结晶较好且比较致密的 钙芒硝层中,为第 II 承压含水层,为主要矿层之一, 底板埋深 40.53~72.27m,平均厚 8.50m。卤水 K<sub>2</sub> SO4平均品位 1.81%;孔隙度最大 19.97%、最小 2.85%、平均 9.86%;给水度最大 13.37%、最小 1.1%、平均 6.57%。

### 2.2.4 W<sub>4</sub> 卤水矿层

赋存于上更新统中下部的结晶较好且比较致密 的钙芒硝层中,为第Ⅲ承压含水层,为主要矿层之 一,底板埋深 86.09~103.57m,平均厚 7.28m。卤 水 K<sub>2</sub>SO₄平均品位 1.63%;孔隙度最大 24.72%、最 小 5.22%、平均 12.54%;给水度最大 9.91%、最小 1.03%、平均 6.1%。

浅层承压含水层组( $W_{2\sim4}$ )单位涌水量一般在 2.91~1053m<sup>3</sup>/d·m,含水层渗透系数一般 0.028 ~122.6m/d、平均 108.45m/d,( $W_{2\sim4}$ )该层组承压 水储水层富水性差、渗透系数小,理论上来说:比较 难以开采,是本次抽水试验的目的层位。根据本含 水层组富水性可将其分为 3 个区:

① 开 采 条 件 容 易 区 段 (富 水 性 强): q > 100m<sup>3</sup>/d·m

②开采条件较容易区段(富水性中等) $q=10\sim 100 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 

③开采条件相对复杂区段(富水性弱):q<10m<sup>3</sup>/d•m

单位涌水量  $q > 100 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ,主要分布在以 ZK1201为中心大约  $30 \text{km}^2$ 区域范围内,其富水性 极强。单位涌水量  $q = 10 \sim 100 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 的区域主 要分布在 08 勘探线南部及 16 勘探线北部,其富水 性属中等,含水层渗透系数一般 0.34~73.45m/d, 平均渗透系数为 16.52m/d,影响半径一般为 7~ 185m,平均为 89.17m,其分布范围与含水层富水性 分布相似,主要与地下水补给、径流条件有关。开采 条件相对复杂区段(富水性弱): $q < 10 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 的 区域主要分布在 08 勘探线和 16 勘探线之间,含水 层渗透系数一般 0.08~0.065m/d(图 3)。



图 3 采卤井与辅助孔布置图

Fig. 3 The layout of the production wells and auxiliary holes

### 3 深部承压卤水抽水试验

### 3.1 前期工作

罗布泊罗北凹地液体钾盐矿采用井采方式进行 工业化大规模开采盐湖地下潜卤水,经过了大规模 抽水试验、工业化井采试验,逐步走到了工业化开 采。罗北矿区的( $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )承压含水层卤水是 本次设计中的开采对象,因开采技术条件较 $W_1$ 差, 如从上至下逐层开采,则平均单井流量仅为100m<sup>3</sup>/ h左右,所以3层卤水合采是必然的选择,但3层卤 水合采时采卤井内的水面降深须到达 $W_4$ 层的卤水 层位中,水位平均降深约40m左右,采卤泵扬程在 100m左右,井内 $W_2$ 至 $W_4$ 层的矿层中还要保持一 定的水跃值,这在实际抽卤当中能否实现,有待于试 验验证,也就是说从技术角度说,有必要进行试验研 究,找到合适的方法进行开采。

### 3.2 爆破法及其大气联通法实验研究

### 3.2.1 试验原理与设计

相对封闭的罗布泊盐湖深部承压卤水在疏干开 采的起始阶段因弹性释水原因向开采井中的渗透, 水量较大,井中水头较高,一旦弹性释水过程完成 后,继续对致密承压卤水层进行疏干时,晶间空隙卤 水逐步流出,形成"空置空间",含水层中会形成负 压趋势,阻止晶间空隙卤水的流出,加上卤水含盐量 高,黏度大,会导致晶间水流出缓慢甚至不能流出, 必须要找到一个合适的方法进行驱动,使得比较致 密承压含水层中的这部分卤水全部快速顺利流出, 从而达到提高资源利用率的目的。

本试验思路是:通过建立承压储水层与大气层 的直接连通关系,消除承压含水层中负压的影响,使 得含水层中卤水顺利快速流出,或通过在承压储卤 层爆破作业使承压储卤地层形成裂缝,增强地层的 导水性,使得开采井单井出水量增加,达到顺利快速 疏干承压水含水层的目的。

选择一处不受目前采卤影响或影响较小的区段 布置一眼开采井和8眼"辅助孔"(设置辅助孔使得 承压卤水与大气层直接连通,消除承压含水层中负 压的影响,使得承压含水层中卤水顺利流出),先对 上层潜卤水进行止水,然后开采承压含水层,并通过 观测在不同的辅助的孔径、不同的采卤井与辅助孔 之间的距离、不同的辅助孔的数量等条件下的单井 采卤量以及地层中水流速度等参数,总结相关规律, 研究单井出水能力与"辅助孔"孔径、孔数、孔井间距 的关系,探求出未来生产中合理的"辅助孔"孔数、孔 径、孔井间距,以最小的工程代价实现快速疏干承压 含水层的目的,并且使资源利用率达到最高。

### 3.2.2 抽水试验

2013年,选择单位涌水量 q=10~100m<sup>3</sup>/d·m 区域(ZK0601 附近)对(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水 层使用(爆破法及其大气联通法)采用定流量抽水试 验(Nie Qinglin et al.,2009)的方法,共进行了7个 落程的抽水试验。涌水量~降深曲线与单位涌水量 ~降深曲线均呈指数型,为正常曲线类型,表明抽水 试验过程正常,求得的(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水 层组水文地质参数可靠,可作为计算水文地质参数 的基础数据。

本次深井采卤试验共布置 1 眼采卤井(开孔孔 径  $\Phi$ 1000mm,终孔孔径  $\Phi$ 600mm,孔深 103.30m) 和 8 眼辅助井(开孔孔径  $\Phi$ 375mm,终孔孔径  $\Phi$ 150mm,孔深 170m),并对采卤井及 8 眼辅助观测 孔的 W<sub>1</sub>进行止水,以(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水 层作为实验对象,采用流量 400m<sup>3</sup>扬程 100m 深水 潜水泵作为抽水工具,水泵下至 W<sub>4</sub> 层位 90m 深度 位置,抽水试验工程布置图(图 4)。

抽水试验结果表明:使得深部承压卤水与大气 接触接触,消除了地层疏干中负压的影响,改善承压 卤水的储存流通环境,使得开采井单井出水量增加, 该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合含水层的单位涌水量由 857.86m<sup>3</sup>/d·m上升到939.49m<sup>3</sup>/d·m,该(W<sub>2</sub>、 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合含水层渗透系数也由49.53m/d上升 到55.1m/d,采卤主井的稳定水位也由18.3m上升 到16.7m,该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水层单位涌 水量提高8.69%。随着对深部承压含水层单位涌 水量提高8.69%。随着对深部承压含水层单位涌 水量提高8.69%。随着对深部承压含水层单位通 涌水量 939.49m<sup>3</sup>/d·m上升到 987.35m<sup>3</sup>/d·m,
(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合含水层渗透系数也由 55.1m/d 上升到 57.68m/d,采卤主井稳定水位也由 16.71m 上升到 15.9m,该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水层单 位涌水量提高 4.85%。说明使得深部承压卤水与 大气接触以及采取爆破手段使承压卤含水地层形成
裂缝等手段增大深部承压卤水的开采量是可行的。

同时在本次抽水试验过程中也发现了些新问 题:本轮抽水试验所取得的 $(W_2, W_3, W_4)$ 混合承压 含水层的单位涌水量为 857.86m<sup>3</sup>/d•m 与 2006 年 罗北凹地钾盐矿详勘时的 61.8m<sup>3</sup>/d•m 相比大了 约 14 倍左右(Li Wenxue et al., 2017a)。为了验证 2013年抽水试验得出的结论,罗北凹地钾盐矿区  $(W_2, W_3, W_4)$ 承压含水层单位涌水量及渗透系数 的增大是否具有普遍性,2016年,选择单位涌水量q <10m<sup>3</sup>/d • m 区域(ZK1802 附近及 ZK1205 附近) 对深部承压含水层组(W2、W3、W4)进行了抽水试 验,各进行了3个落程,两次试验合计6个落程抽水 试验。试验结果表明:罗北凹地钾盐矿区经过长时 间大流量抽取地下卤水后,矿区深部承压含水层 (W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)单位涌水量比 2006 年详勘时都有明 显的增大趋势,两处深部承压含水层( $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ ) 单位涌水量比详勘时附近区域深部承压水地层单位 涌水量大了 755~800 倍,LBSK1、LBSK2 两次抽水 试验取得的水文参数基本验证了 2013 年抽水试验 取得的结果。

# 4 依据抽水试验数据设计不同地质条 件下的采卤井及采卤方法

根据罗北凹地钾盐矿区承压含水层的富水性、 导水系数或渗透系数、影响半径等有关水文地质参数,结合含水层的介质、厚度、水位及水化学特征,将 罗北凹地钾盐矿区承压含水层( $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )分为3 类采区:开采条件容易区段, $q > 100m^3/d \cdot m$ ;开采 条件较容易区段, $q = 10 \sim 100m^3/d \cdot m$ ;开采条件相 对复杂区段, $q < 10m^3/d \cdot m$ 。根据分区情况及以往 抽水试验取得的数据,采取不同的布井方案及采卤 方法。

4.1 単位涌水量 q > 100m<sup>3</sup>/d・m 及 q = 10~
100m<sup>3</sup>/d・m 区域承压水采卤井的设计

单位涌水量  $q > 100 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  的区域分布面积 也只有  $30 \text{ km}^2$ ,因此把它和单井单位涌水量 q = 10~ $100 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  区域一起描述。单位涌水量 q > $100 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ,主要分布在以 ZK1201 为中心大约





 $30 \text{ km}^2$ 区域范围内,其富水性极强。单位涌水量  $q = 10 \sim 100 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 的区域主要分布在 08 勘探线南 部及 16 勘探线北部,其富水性属中等至极强,含水 层渗透系数一般 0.34 ~ 73.45 m/d,平均渗透系数 为 16.52 m/d,影响半径一般为 7 ~ 185 m,平均 为 89.17 m。

根据 2013 年《罗北凹地钾盐矿区深部承压卤水 疏干开采抽水试验》数据,现阶段该区域深部承压含 水层单位涌水量为 857.86 m<sup>3</sup>/d•m 比 2006 年详 勘时的 61.8 m<sup>3</sup>/d•m 大了约 14 倍,单井出水量达 到 15700m<sup>3</sup>/d,说明该区域现阶段混合(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、 W<sub>4</sub>)含水地层富水性极强,因此我们将采卤井设计 成上下同径混合采卤井,具体施工方案如下:

(1)由于现阶段罗布泊深部承压含水层(W<sub>2</sub>、 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)单位涌水量相比罗布泊浅部潜水(W<sub>1</sub>)单 位涌水量小10~20余倍,导致罗布泊深部承压含水 层单井出水量较潜水(W<sub>1</sub>)小,为了维持目前的采卤 量,将现在2km井间距改为1km,采取多打井、多抽 取地下富钾承压卤水的方法,维持目前矿区采卤量。

(2)为了确定采卤井施工区域各深部承压含水

层的位置及厚度,在设计采卤井位置施工了一个取 芯钻孔,设计取芯孔径 150mm,配套取芯钻具采用 直径 150mm 肋骨合金及直径 127mm 岩芯管。取 芯要求:正循环回转钻进,回次进尺长度不能超过 4m,遇到钻进取芯困难的地层,严格控制回次进尺 长度,全孔地层取芯回次采取率大于或等于 85%。

(3) 开孔口径  $\Phi$ 1000mm, 井深至  $W_4$  底板以下 5m。井管选用裸眼钢管, 抗腐蚀的不锈钢, 管径  $\Phi$ 850 mm, 打眼孔隙率 22%~27%, 壁厚 6~8 mm, 底部下入沉淀管 5m, 0~10m 采用实管, 10m~ $W_4$ 底板以上采用打眼花管,  $W_4$  底板以下下入 5m 采用 实管(图 5)。

(4)罗北矿区的(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)承压含水层卤水 是本次设计中的开采对象,根据前期所做抽水试验: 因开采技术条件比W<sub>1</sub>差,如从上至下逐层开采,则 平均单并流量仅为100m<sup>3</sup>/h左右,(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)3 层卤水合采是必然的选择,我们采用扬程100m深 水潜水泵作为抽水工具(泵的流量根据承压含水层 水文参数确定),水泵下至W<sub>4</sub>层位(下降深度根据 实际情况确定)。

**4.2** 単位涌水量 q<10m<sup>3</sup>/d・m 区域承压水采卤 井的设计

单位涌水量 q<10m<sup>3</sup>/d·m 的区域主要分布 08 勘探线和 16 勘探线之间,处于罗北凹地钾盐矿 区中部。弱富水性。含水层渗透系数一般 0.08~ 0.065m/d,影响 半 径 一 般 为 3 ~ 100m,平均 为 51.5m。

根据本区域水文地质情况及 2016 年《国投罗钾 公司罗北承压水(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)水文参数验证研究》 抽水试验数据:单位涌水量 q<10m<sup>3</sup>/d·m 的区域 深部承压含水地层的单位涌水量相比 2006 年详勘 时大 755~800 倍,经过计算目前该区域平均单井出 水量为 2030m<sup>3</sup>/d,说明该区域现阶段混合(W<sub>2</sub>、 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)含水地层富水性中等,依据现在本区域水 文地质条件,我们将采卤井设计成上下同径混合采 卤井,50 米外再施工一个联通大气的辅助孔,具体 施工方案如下:

(1)由于现阶段罗布泊深部承压含水层(W<sub>2</sub>、 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)单位涌水量相比罗布泊浅部潜水(W<sub>1</sub>)单 位涌水量小一百余倍,导致罗布泊深部承压含水层 单井出水量普遍偏少,为了维持目前的采卤量,将现 在输卤渠 2km 井间距改为 1km,采取多打井、多抽 取地下富钾承压卤水方法,维持目前矿区采卤量。

(2)主采卤井开孔口径 Φ1000mm,井深至 W<sub>4</sub>



(Single brine well)

底板以下 5m。井管选用裸眼钢管,抗腐蚀的不锈 钢,管径 Φ850 mm,打眼孔隙率 22%~27%,壁厚 6 ~8 mm,底部下入沉淀管 5m,0~10m 采用实管, 10m~W4 底板以上采用打眼花管,W4 底板以下下 入 5m 采用实管。采卤井旁边 50m 再设计一个辅助 孔(裸孔),用以释放深部承压含水地层的压力及方 便对含深部承压含水层进行爆破,辅助孔直径 450mm,辅助孔孔深至 W4 底板以下 1m(图 6)。

(3)施工辅助孔时,对上层潜卤水 W<sub>1</sub>进行止 水,使得(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)承压卤水与大气层直接连 通,改善承压卤水的储存流通环境。根据每个辅助 孔承压含水地层的厚度确定不同的单井爆破用药 量,依次对第一承压含水层 W<sub>2</sub>、第二承压含水层 W<sub>3</sub>、第三承压含水层 W<sub>4</sub> 分层进行爆破,使用爆破 作业手段使深部承压含水地层形成裂缝,增大深部 承压含水层的导水性,增大主井的单井涌水量。

设计辅助孔的目的:①使得(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)承压 水与大气连通,消除地层疏干中负压的影响,改善承 压卤水的储存流通环境,使开采井出水量增加,达到 顺利快速疏干承压水含水层的目的。②然后再分别 对辅助孔第一承压含水层(W<sub>2</sub>)、第二承压含水层 (W<sub>3</sub>)、第三承压含水层(W<sub>4</sub>)进行爆破,使承压卤水 地层形成裂缝,增大承压含水层的导水性。由 2013 年深部卤水疏干开采抽水试验结果得知,采用承压 卤水与大气联通手段及通过对承压含水层进行爆破 使得承压含水层形成裂隙等手段能提高单井出水量



图 6 采卤井结构图示意图(主井加辅助孔) Fig. 6 Structure diagram of brine production well (Main shaft and auxiliary hole)

15.11%,使得单井出水量达到 2336.7m<sup>3</sup>/d,出水量 增加效果是显著的。

(4)罗北矿区的(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)承压含水层卤水 是本次设计中的开采对象,根据前期所做抽水试验: 因开采技术条件较W<sub>1</sub>差,如从上至下逐层开采,则 平均单井流量仅为 60m<sup>3</sup>/h 左右,(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)3 层卤水合采是必然的选择,我们采用扬程 100m 深 水潜水泵作为抽水工具(泵的流量根据承压含水层 水文参数确定),水泵下至W<sub>4</sub> 层位(下降深度根据 实际情况确定)。

5 讨论

### 5.1 根据大型抽水试验结果确定采卤井间距及采 卤井结构

采用大口径井采方式工业化大规模开采罗布泊 盐湖 W<sub>1</sub> 潜卤水,是在 2005 年经过了一年的大规模 抽水试验,在充分了解卤水的水化学性质及矿区 W<sub>1</sub> 潜水含水层水文参数后,确定合理的井距、井 径、合适抽水工具,逐步实现了罗布泊盐湖 W<sub>1</sub> 潜卤 水大规模工业化开采,而对于富水性差、渗透系数小 的深部承压储水层中富钾卤水的开采,采用往(W<sub>2</sub>、 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)目的层中注水增压的方法在罗布泊不可 行,注水将造成深部承压富钾卤水稀释且可导致卤 水成分的改变,使得有益成分的含量降低到工业品 位以下,成为不能利用的资源,因此,必须采取其他 实际可行的试验方法。

2013年,洗择单位涌水量  $q=10\sim 100 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{d}\cdot\mathrm{m}$ 区域(ZK0601 附近)对( $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )混合承压含水 层使用(爆破法及其大气联通法)进行了抽水试验, 抽水试验结果表明;现阶段该区域深部承压含水层 单位涌水量为 857.86 m³/d • m 比 2006 年详勘时 的 61.8 m<sup>3</sup>/d • m 大了约 14 倍。为了验证 2013 年 抽水试验得出的结论, 2016年,选择单位涌水量 q <10m<sup>3</sup>/d·m区域(ZK1802 附近及 ZK1205 附近) 对深部承压含水层组(W2、W3、W4)进行了抽水试 验。试验结果表明:罗北凹地钾盐矿区经过长时间 大流量抽取地下卤水后,水文地质情况相同区域,深 部承压含水层( $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ )单位涌水量相比 2006 年详勘时都有明显的增大趋势,两次抽水试验取得 的水文参数基本验证了 2013 年抽水试验取得的结 果。根据 2013 年及 2016 年抽水试验结果,我们对 单位涌水量 q=10~100m<sup>3</sup>/d·m 区域及单位涌水 量 q<10m<sup>3</sup>/d·m 区域深部承压卤水采卤井间距及 结构做了不同的设计,在充分利用现有采输卤工程 的基础上,实现了罗北凹地钾盐矿区深部富钾承压 卤水资源经济有效地大规模采出。

对于化学沉积岩承压卤水的开采,每一种开采 方法的取得都是在大型抽水试验的基础上完成的, 通过试验研究总结出罗布泊盐湖深部承压卤水疏干 开采的相关规律,掌握深部承压储水层渗透系数、单 位涌水量、孔隙率、单井涌水量、影响半径等水文参 数,根据深部承压地层的水文参数,建立理论模型, 提出生产中"辅助孔"的布孔方案,建立开采模型,模 拟生产状态,为深部承压卤水疏干开采提供技术 支持。

### 5.2 罗北凹地承压储卤层单位涌水量增大的原因

2013年及2016年,通过在罗北凹地液体钾盐 矿对不同水文地质区域的深部承压含水层组(W<sub>2</sub>、  $W_3$ 、 $W_4$ )进行的两次大型抽水试验,我们发现;罗北 凹地液体钾盐矿床经过长时间大规模的抽取地下卤 水后,钾盐矿深部承压储水层的单位涌水量与渗透 系数都有普遍增大的趋势,这种现象与其它碎屑沉 积类型液体矿相比具有很大的差异性,这种差异性 表现在:其它类型碎屑沉积液体矿的含水层地质结 构稳定,水文参数一般不随开采时间的变化而变化, 具有很强的稳定性。罗北凹地钾盐矿位于塔里木盆 地东段(Wu Xiaoli et al., 2017), 发育有大量的全 新统化学沉积蒸发岩,其属于蒸发化学沉积类型矿 床,承压储卤层岩性是以化学沉积钙芒硝晶体为主, 石膏晶体及石盐晶体次之,液体钾盐矿床经过长时 间大规模的抽取地下卤水,导致罗北凹地钾盐矿区 形成降落漏斗,矿区地下水水力坡度增大,加速了矿 区承压含水层中地下卤水运动,也加速了卤水成分 的新旧更替,这种卤水成分的新旧更替,使得深部化 学沉积承压储卤水层内水-盐动态平衡被破坏,可 能引起深部化学沉积承压储卤层产生析盐或者溶蚀 等作用,这种"新旧更替"过程可能是造成承压储层 晶间空隙发育的重要机理,随着大规模抽水时间的 延长,储卤层晶间空隙逐渐增大,导致深部地下承压 储层的地质结构及化学结构发生变化,改善深部承 压含水地层(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)的导水性能,使得罗北凹 地钾盐矿区深部承压储水层水文参数变大。

罗布泊干盐湖罗北凹地深部承压晶间孔隙度、 储水层单位涌水量、渗透系数及影响半径等因素随 着抽水时间的增长而增大这一结果,是在野外进行 大型抽水试验的基础上取得的。国内外研究机构关 于卤水成分的改变、卤水流速的变化、卤水的开采时 间的长短、承压储卤层与大气联通等因素对深部承 压储水层钙芒硝晶间结构的影响以及微观晶间空隙 形成的机理的研究成果还是很少,因此有必要加强 此方面的研究工作,找到影响罗布泊干盐湖深部化 学沉积承压储水层晶间空隙大小变化的主要因素, 为将较难开采的罗布泊盐湖深部化学沉积承压储层 晶间卤水经济有效的开采提供技术支持。 间大规模的抽取地下卤水,加速了承压含水层晶间 卤水的运动,导致卤水的新旧更替加快,使得深部化 学沉积承压储卤水层内水-盐动态平衡被破坏,导致 深部地下承压储层的地质结构及化学结构发生变 化,造成储层晶间空隙发育,改善承压含水地层 (W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)的导水性能,使得罗北凹地钾盐矿区 深部承压储水层水文参数增大。

(2)通过大气联通法抽水试验,使得深部承压卤 水与大气接触,消除了地层疏干中负压的影响,增强 承压含水地层的导水性,使得该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合 含水层的单位涌水量由 857.86m<sup>3</sup>/d•m上升到 939.49m<sup>3</sup>/d•m,该混合承压含水层单位涌水量提 高 8.69%。通过爆破法抽水试验,通过爆破作业使 (W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水地层形成裂缝,增强承 压含水地层的导水性,使得该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合含 水层的单位涌水量由 939.49m<sup>3</sup>/d•m上升到 987.35m<sup>3</sup>/d•m,该(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub>)混合承压含水层 单位涌水量提高 4.85%。

(3)通过抽水试验结果确定:(单位涌水量 q> 100m<sup>3</sup>/d·m和单位涌水量 q=10~100m<sup>3</sup>/d·m) 的区域的采卤井设计成上下同径混合采卤井。单位 涌水量 q<10m<sup>3</sup>/d·m 的区域主要分布 08 勘探线 和 16 勘探线之间,依据本区域现阶段水文地质条 件,我们将该区域采卤井设计成上下同径混合采卤 井,50 米外再施工一个联通大气及实施爆破的的辅 助孔,采用承压卤水与大气联通手段及通过对承压 含水层进行爆破使得承压含水层形成裂隙等手段能 提高单井出水量。

**致谢**:本论文主要依托《罗布泊深部承压卤水疏 干开采抽水试验》及《罗北承压卤水(2.3.4)水文地 质参数验证研究》这两个项目完成,在野外施工及论 文编写过程中,中国地质科学院矿产资源研究所刘 成林研究员、焦鹏程研究员、国投罗钾公司总经理助 理颜辉,新疆地矿局第二年水文地质大队张磊高级 工程师等给予帮助、指导和大力支持,在此一并表示 深深地谢意。

注 释

- 新疆地矿局第二水文地质大队.2006.新疆若羌县罗北凹地钾盐 矿详查报告.
- 新疆地矿局第三地质大队.1999.新疆若羌县罗布泊地区钾盐资源调查报告.
- 3 焦鹏程,颜辉等.2011.罗布泊盐湖深部钾盐资源调查研究.

#### References

(1)罗布泊钾盐矿床深部承压储水层经过长时

6

结论

Strontium and Sulfur Isotopic Geochemistry and Potash  $\sim$  forming Material Sources of LOP salt lake, Xinjiang. Mineral Deposits, 18(3): 268 $\sim$ 275(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. 2003a. 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, Jiao Pengcheng, Wang Mili, Li Shude, Chen Yongzhi. 2003b. Ascending brine fluids in Quaternary salty lake of Lop Nur in Xinjiang and their significance in potash formation. Mineral Deposits, 22(4): 386~392 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Chen Yongzhi, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2006. Crystallizing experiments and probing of chemical reaction of glauberite Lop Nur salt lake, Xinjiang, China. Mineral Deposits, 25(supp.): 233~236 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, Chen Yongzhi. 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China. Mineral Deposits, 26(3): 322~329 (inChinese 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, Wang Mili. 2010a. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China. Mineral Deposits, 29(4):  $581 \sim 592$  (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Ma Lichun, Jiao Pengcheng, Sun Xiaohong, Chen Yongzhi. 2010b. Chemical sedimentary sequence of Lop Nur salt lake in Xinjiang and its controlling factors. Mineral Deposits, 29 (4): 625~630 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, Wang Mili. 2010c. Formation Mechanism of Potash~bearing Brine Fault Belts of Lop Nur Lake, Xinjiang. Mineral Deposits. 29(4):602~608(in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Wang Mili, Chen Yongzhi, Wang Xinmin. 2003. Characteristics and Dynamic analysis of inter~ crystal brine movement in the Lop Nur salt lake. Acta Geoscientia Sinica, 24(3):255~260(in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Wang Mili and Liu Chenglin. 2004. Charateristics and origin of tritium in the potassium~rich brine in Lop Nur, Xinjiang. Nuclear Techniques, 27(9):710~715(in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Wang Mili, Chen Yongzhi. 2006.

Geochemistry of salt lake potash deposits in the Lop Nur, Xinjiang. Mineral Deposits,  $25(supp.): 225 \sim 228$  (in Chinese with English abstract).

- Jiao Pengcheng, Liu Chengling, Yan Hui, Chen Yongzhi, Gu Xinlu, Sun Xiaohong, Xuan Zhiqiang, Zhao Haitong, Li Wenxue. 2014. New progress of potassium prospecting in the deep salt lake of Lop Nur region in Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 88(6):1012~1024(in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue. 2016. Distribution characteristics and mining laws discussion of the low~grade carnallite in Lop Nur. Geology of Chemical Minerals, 38(2): 93~98 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue, Ma Baocheng, Chen Wei, Zeng Yonggang. 2017a. The effect of bursting method and atmospheric unicom method on hydrology conditions of the confined brines in the Lop Nur. West~China exploration Engineering, 29(250): 153~156(in Chinese without English abstract).
- Li Wenxue, Zhao Liangliang, Ma Baocheng. 2017b. The study on the dynamic characteristics of the underground potassium brine and its influencing factors in the Lop Nur salt lake. Geology of Chemical Minerals, 39(3): 163~167 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Han Weitian, Song Songshan, Chen Yongzhi, Yang Zhichen, Fan Weidong, Li Tingqi, Li Changhua, Feng Jinxing, Chen Jiandong, Wang Xinmin, Yu Zhihong, Li Yawen. 2001. Saline lake poatsh resources in the Lop Nur, Xinjigang. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. 2006. Investigation and Scientific research progress and exploition present situation of Lop Nur salty lake potash deposits, Xinjiang, China. Geological Review, 52(6):757~764(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaohong, Liu Chenglin, Xuan Zhiqiang. 2010. Study of minerals inpotassium-bearing strata of Lop Nur salt lake Xinjiang, by means of scanning electron microscopy. Mineral Deposits, 29(4):631~639(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaohong, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Yan Hui, Chen Yongzhi, Ma Lichun, Zhang Yongming, Wang Chunlian, Li Wenxue. 2016. A further discussion on genesis of potassium\_rich brine in Lop Nur: Evaporating experiments for brine in gypsum\_ bearing clastic strata. Mineral Deposits, 35(6): 1190~1204(in Chinese with English abstract).
- Li Hao, YanHui. 2008a. discussion of brine mining process and project arrangement at the valley ore district of the north of Luobopo salt lake. Geology of Chemical Minerals, 30(4):223~ 226. (in Chinese with English abstract).
- Li Hao, Tang Zhongfan, Liu Chuanfu, Lei Guangyuan. 2008b. Comprehansive Exploitation and Research of Brine Resources in the LopNur Salt Lake Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 29 (4):517~524(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongzhi, Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. 2001. The making of patasg bearing salt mixtures

through the processing of magnesium sulfate sub type brine in Lop Nur suline lake, xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 22(5):  $465 \sim 470$ (in Chinese with English abstract).

- Liu Chuanfu. 2010. Application of exploition technology by well in development of Lop Nur Salt Lake. Industrial Minerals & Processing, 39 (295):  $31 \sim 33$  (in Chinese with English abstract).
- Han Jibin, Xu Jianxin, An Chao, Ma Haizhou, Han Fengqing. 2015. Research advance of the salt lake underground brine extraction technology. Journal of Salt Lake Research, 23(1):67 ~72(in Chinese with English abstract).
- Nie Qinglin, Gao Guangdong, Xuan Huashan, Nie Qiuyue, Nie Shizhan, Ye Qiang. 2009. Methods of determining parameters of a confined aquifer with pumping tests. Hydrogeology &. Engineering Geology, 36(228): 37~40+49 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xueguang, Wang Youde, Ma Deren, Xia Zejun. 2010. Discussion on extracting process test for pressure brinf in Mahai potash Area, Qinghai. Industrial Minerals & Processing, 39 (302):17~18+40(in Chinese with English abstract).
- Jiao Xingchun. 2016. Groundwater Quality assessment and Groundwater resource Management. A Review on Hydrogeochemical and stable isotope Approaches. Acta Geologica Sinica, 90(9):2476~2489. (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengsong et al. 2000. Variation and prediction of brine in the first exploiting area of Qarhan salt lake. Beijing: science publication House,  $142 \sim 143$  (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaoli, Li Rongxi, Hu Jianmin, Cheng Jinghua, Zhao Bangsheng, Liu Futian, Li Delu, Qin Xiaoli, Li Jiajia, Liu Bobiao. 2017. Late paleogene saline Lake evolution of the Ningnan Basin Northern China and its regional significance. Acta Geologica Sinica, 91 (4):954~967(in Chinese with English abstract).
- Meng Guixiang, Yan Jiayong, Lu Qingtian, Jiao Pengcheng, Yan Hui, Liu Chuanfu, Liu Chenglin. 2010. New discovery of Lop Nur salt basin structure and its significance for potash deposit exploration. Mineral Deposts, 29(4):609~615 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yangchun, Zhou Yuan. 2009. New technologies of modern mining for Salt lake brine deposits. Metal Mine, S1(suppl.);316 ~319. (in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

- 刘成林,王弭力,焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地 球化学及钾矿成矿物质来源.矿床地质,18(3)268~275.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程,陈永志,李树德.2002.罗布泊第四纪卤水 钾矿储层空隙成因与集卤机制研究.地质论评,48(4):437 ~443.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力,杨志琛,李树德,陈永志.2003a.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,焦鹏程,王弭力,李树德,陈永志.2003b.新疆罗布泊第四纪

盐湖上升流体及其成钾意义.矿床地质,22(4):386~392.

- 刘成林,陈永志,焦鹏程,王弭力.2006.罗布泊盐湖钙芒硝结晶试验 与化学反应探讨.矿床地质,25(增刊):233~236.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 陈永志. 2007. 罗布泊巨量钙芒硝沉积及其 成钾效应分析. 矿床地质, 26(3): 322~329.
- 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,王弭力.2010a. 盆地钾盐找矿模型探讨. 矿床地质, 29(4):581~592.
- 刘成林,马黎春,焦鹏程,孙小虹,陈永志.2010b.罗布泊盐湖化学沉 积序列及其控制因素.矿床地质,29(4):625~630.
- 刘成林,焦鹏程,陈永志,王弭力. 2010c. 罗布泊断陷带内形成富钾 卤水机理研究.矿床地质,29(4):602~608.
- 焦鹏程,刘成林,王弭力,陈永志,王新民.2003.罗布泊盐湖晶间卤 水运动特征及其动力学分析.地球学报,24(3):255~260.
- 焦鹏程,王弭力,刘成林.2004.新疆罗布泊盐湖卤水的氚同位素特 征及其地质意义.核技术,27(9):710~715.
- 焦鹏程,刘成林,王弭力,陈永志.2006.罗布泊盐湖钾盐矿形成的地 球化学研究.矿床地质,25(增刊):225~228.
- 焦鹏程,刘成林,颜辉,陈永志,顾新鲁,孙小虹,宣之强,赵海彤,李 文学.2014.新疆罗布泊盐湖深部钾盐找矿新进展.地质学报, 88(6):1012~1024.
- 李文学.2016.罗布泊低品位光卤石矿分布特点及其找矿规律探讨. 化工矿产地质,38(2):93~98.
- 李文学,马宝成,陈伟,曾永刚. 2017a. 爆破法及大气联通法对罗布 泊深部含承压卤水地层水文参数的影响研究.西部探矿,29 (250):153~156.
- 李文学,赵亮亮,马宝成.2017b.罗布泊盐湖地下含钾卤水动态特征 及其影响因素研究.化工矿产地质,39(3):163~167.
- 王弭力,刘成林,焦鹏程,韩蔚田,宋松山,陈永志,杨志琛,樊卫东, 李廷祺,李长华,冯金星,陈建东,王新民,于志鸿,李亚文. 2001.罗布泊盐湖钾盐资源.北京:地质出版社.
- 王弭力,刘成林,焦鹏程.2006.罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展 与开发现状.地质论评,52(6):757~764.
- 孙小虹,刘成林,宣之强.2010.新疆罗布泊含钾地层矿物扫描电镜 研究.矿床地质,29(4):631~639.
- 孙小虹,刘成林,焦鹏程,颜辉,陈永志,马黎春,张永明,王春连,李 文学.2016.罗布泊盐湖富钾卤水成因再探讨~碎屑层卤水蒸 发实验分析.矿床地质,35(6):1190~1204.
- 李浩,颜辉.2008.罗布泊罗北凹地矿区卤水开采工艺及工程布置探 讨.化工矿产地质,30(4):223~226.
- 李浩,唐中凡,刘传福,雷光元. 2008.新疆罗布泊盐湖卤水资源综合 开发研究.地球学报,29(4):517~524.
- 陈永志,王弭力,杨志琛,刘成林,焦鹏程.2001.罗布泊硫酸镁亚型 卤水制取钾混盐工艺试验研究.地球学报,22(5):465~470.
- 刘传福.2010. 井采技术在罗布泊盐湖开发中的应用.化工矿物与加 工,39(295):31~33.
- 韩积斌,许建新,安朝,马海州,韩凤清.2015. 盐湖地下卤水的开采 技术及其展望. 盐湖研究,23(1):67~72.
- 聂庆林,高广东,轩华山,聂秋月,聂士展,叶强.2009.抽水试验确定 承压含水层参数方法探讨.水文地质工程地质,36(228):37~ 40+49.

谢学光,王友德,马德仁,夏泽军. 2010.青海马海钾矿区承压卤水开	李佳佳,刘博彪.2017.北方宁南盆地古近晚期咸化湖盆演化及
采工艺试验探讨.化工矿物与加工,39(302):17~18+40.	其区域地质意义.地质学报,91(4):954~967.
焦杏春.2016.地下水水质评价与水资源管理:水文地球化学与同位	孟贵祥,严加永,吕庆田,焦鹏程,颜辉,刘传福,刘成林.2010.罗布
素方法的应用研究进展.地质学报,90(9):2476~2489.	泊盐湖盆地结构新发现及找钾意义.矿床地质,29(4):609
于升松等. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及预测. 北京:科学	$\sim$ 615.
出版社.142~143.	童阳春,周源. 2009. 现代盐湖卤水矿床开采新技术. 金属矿山, S1
吴小力,李荣西,胡建民,程敬华,赵帮胜,刘福田,李得路,覃小丽,	(增刊):316~319.

## Characteristics and Mining Method Experiment of Deep Artesian Brine in Potash Deposit in the Luobei Depression

LI Wenxue, ZHANG Fankai, WANG Jiang, CHEN Wei, YANG Baoheng

SDIC Xinjiang Lop Nor potash mineral resources limited liability company, Hami, Xinjiang, 839000

#### Abstract

Potash deposit in the Luobei depression is a large-sized underground liquid potash deposit, and contains seven aquifers of potassium-rich brines, with the first  $(W_1)$  being K-rich brine aquifer and others  $(W_2, W_3, W_4, W_5, W_6 \text{ and } W_7)$  being confined brine aquifers. At present, the main mining target concentrates on phreatic brine aquifer which is shallow buried and easily mined, and elastic yield in part of confined aquifer. With expanding production scale and increasing annual yield for brine in the mining area, some area will face difficulty in mining the deep confined aquifers with poor water. But confined brine layers often occur in relatively tight salt crystallization layers or pore or solution cracks of detrital layers. Their hydrological parameters are lower than that of phreatic brine aquifer  $(W_1)$ , which causes much difficulty in mining the deep potassium-rich brine. In this study, a large-scale pumping test was carried out in the deep confined aquifer in different hydrogeological areas of the Luobei depression by using blasting method and atmospheric connection method. The reasonable and economic mining method was determined for deep confined brine in different hydrogeological areas, and the deep confined brine  $(W_2, W_3, W_4)$  resources have been effectively mined. This method turned unrecoverable deep confined potassium-rich brine.

Key words: liquid potash mine; confined aquifer; pumping test; blasting method; atmospheric connection method; Luobei Depression