

# 罗布泊盐湖承压卤水开采新技术及可采性研究

李文学, 张凡凯, 于咏梅, 赵亮亮, 马宝成, 王露莎

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:**罗布泊罗北凹地承压卤水主要储集于钙芒硝层, 钾含量高( $>0.5\%$ ), 是该区重要的后备钾盐资源之一。本文利用大气联通法及辅助孔注入卤水法, 对罗布泊罗北凹地钾矿区富水性较差的3~11采卤井进行了改造。五次大规模、长时间段的抽水试验结果表明, 上述技术手段改善了深部承压卤层的储集结构, 有效增强了含水层水力联系, 提高了含水层单位涌水量, 增率达22.7%。由此证实大气联通法及辅助孔注水法, 可以有效提高罗北凹地钾矿区承压卤水采卤率。同时, 辅助孔与采卤井的距离以及辅助孔注水量对采卤率有较大影响。该成果可为矿区承压卤水大规模开采利用提供借鉴和指导。

**关键词:**大气联通法; 注水法; 抽水试验; 承压含水层; 单位涌水量

罗北凹地位于罗布泊盐湖东北部(图1), 发育有特大型液体钾盐矿床(Wang Mili et al., 1996, 1998; Liu Chenglin et al., 1999, 2003; Jiao Pengcheng et al., 2005, 2006; Ma Lichun et al., 2010a, 2010b; Xu Wenli et al., 2011; Li Wenxue et al., 2016, 2017b; Wang Kai et al., 2020)。该区在0~200 m范围内已发现7个含钾卤水层组<sup>①</sup>, 即上部潜卤水层组( $W_1$ )以及下伏6个承压卤水层组( $W_2 \sim W_7$ )。目前, 罗北凹地主要开采利用的是埋藏较浅、开采工艺较为简单的潜卤水及部分承压卤水层中弹性释水。然而, 随着多年大规模开采,  $W_1$ 层组潜卤水资源量迅速减少, 现有采卤井单井出水量显著降低, 对矿山正常生产和可持续发展产生不利影响。

前期勘查结果显示, 罗北凹地钾矿区承压卤水蕴藏钾盐资源量巨大, 占罗北凹地钾盐资源总量的65%以上<sup>②</sup>(Li Wenxue et al., 2018a), 是今后开采利用的主要对象。罗北凹地承压卤水主要储存于较为致密的钙芒硝(钙芒硝岩芯, 图2)晶间孔隙或者溶隙(Liu Chenglin et al., 2002, 2007, 2010a, 2010b; ; Jiao Pengcheng et al., 2003; Nie Zhen et al., 2010; Li Hongpu et al., 2014; Sun Xiaohong et

al., 2016; Li Wenxue et al., 2018b)。这些钙芒硝层通常含黏土或被黏土层分隔, 相对独立封闭, 含水层受地层、岩性及构造等多因素控制(Yue Weihao et al., 2011), 层间水力联系较弱。同时, 相比浅部潜卤水层, 下部承压卤水层富水性较差(Wang Mili et al., 2001; Xie Xueguang et al., 2010; Liu Chenglin et al., 2018), 采出量较低, 利用疏干开采深部承压富钾卤水难度较大。因此, 加强开采技术和开采方式的研究, 实现深部承压富钾卤水高效利用, 是当前亟待解决的问题。

本文以罗北凹地钾矿区承压条件复杂、含水层富水性相对较弱的3~11采卤井为主要研究对象, 开展利用大气联通法以及往辅助孔承压卤水层注入原卤的方法改善单井采卤率的研究, 结合抽水试验数据, 探讨上述技术手段在罗北凹地钾矿区的适用性、影响和控制因素等。研究成果可为矿区后续承压卤水开采提供借鉴和指导。

## 1 采卤井区域地质特征

3~11采卤井位于罗北凹地钾矿区的西北部(图1)。该井所在区域属于深部承压卤水开采条件相对复杂的区段, 且富水性相对较弱( $q < 10 \text{ m}^3/\text{d} \cdot$

注: 本文为国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司“罗布泊盐湖3~11采卤井大口径改造提高单井出水量试验”项目资助的成果。

收稿日期: 2021-01-16; 改回日期: 2021-05-10; 网络发表日期: 2021-07-12; 责任编辑: 李曼。

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。E-mail: lwx0994@163.com。通信作者: 张凡凯, 男, 1964年生。从事盐湖地质研究。E-mail: 564658747@qq.com。

**引用本文:** 李文学, 张凡凯, 于咏梅, 赵亮亮, 马宝成, 王露莎. 2021. 罗布泊盐湖承压卤水开采新技术及可采性研究. 地质学报, 95(7): 2121~2128. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021232.

Li Wenxue, Zhang Fankai, Yu Yongmei, Zhao Liangliang, Ma Baocheng, Wang Lusha. 2021. Study of a new mining technology and recoverability of confined brine in the Lop Nur salt lake. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2121~2128.





图 2 罗北凹地储集富钾卤水的钙芒硝岩芯  
Fig. 2 Glauberite rock-core potassium-rich brine in Luobei sag

厚度 43.85 m。上部含水层 G1 顶板埋深 23.70 m, 底板埋深 49.20 m, 厚度 25.50 m。岩性为灰褐色、灰绿色钙芒硝, 钙芒硝以中粗晶为主, 含少量粉质黏土, 含量小于 10%, 目测孔隙度 5%~10% 不等, 孔隙不发育, 富水性较弱。下部含水层 G2 顶板埋深 67.81 m, 底板埋深 86.16 m, 厚度 18.35 m, 岩性为灰褐色、灰绿色钙芒硝与含粉质黏土钙芒硝互层, 孔隙不发育, 目测孔隙度小于 5%, 含水层单位涌水量为 183.59 m<sup>3</sup>/d·m, 含水层之间联通性及富水性一般。

## 2 抽水试验

### 2.1 试验目的

(1) 在抽取埋藏浅且较易开采的 W<sub>1</sub> 层潜卤水时发现: 在抽取地下潜卤水过程中, 由于潜卤水钙芒硝晶间含水层结构不是很稳定, 钙芒硝晶间碎屑也随着快速流动的卤水一起被带出, 并进入采卤井被潜水泵抽出, 排入输卤渠。由于含水层钙芒硝晶间碎屑被水流带出扩充了含水层孔隙, 改善了目标含水层空隙连通情况, 增强了卤水的经流条件, 使得潜卤水采卤井单井出水量有所增大。此次试验目的是验证长时间大流量抽取地下卤水, 是否也对深部比较致密的承压钙芒硝晶间含水层结构产生影响, 为今后在富水性相对较弱, 开采条件较为复杂的深部承压卤水区进行大规模开采提供理论依据。

(2) 验证 2013 年在 ZK0601 附近利用爆破法及大气联通法(Li Wenxue et al., 2017a)所做的抽水试验结论, 及确定大气联通辅助孔与采卤井距离远近对含水层单位涌水量大小的影响。

### 2.2 试验理论依据

根据 Yu Shengsong et al. (2000) 在对察尔汗盐湖晶间卤水运动的研究中发现: 盐湖储卤层晶间卤水运动规律符合达西定律即卤水的渗流速度与水力坡度呈正比, 水力坡度越大, 卤水的渗流速度越快。根据此原理, 在离 3~11 采卤井 15 m 的辅助孔内注入卤水, 通过潜水泵抽取采卤井卤水, 降低采卤井中卤水水位, 使得辅助孔与 3~11 采卤井形成近 30~50 m 的水位差, 人为增大地下水水力坡度, 驱使承压钙芒硝晶间含水层中卤水加速运动, 破坏承压钙芒硝晶间含水层结构, 迫使深部承压钙芒硝晶间孔隙内细粒碎屑(盐屑、晶屑等)进入开采井, 扩充目标含水层的孔隙度, 改善目标含水层孔隙连通情况, 增强卤水径流条件。

## 3 抽水试验设计与工程布置

本次共设计辅助孔 1 眼, 位于 3~11 主井北侧 15 m 处, 辅助孔要求全孔取芯, 施工辅助孔时, 要求对上层潜卤水进行下套管止水, 使得深部承压钙芒硝储卤层晶间空隙中的卤水与地表空气直接连通, 从而改善深部承压钙芒硝储卤层晶间卤水的储存流通环境。止水材料采用黏土球及水泥浆等, 辅助孔与主井同样深度, 实地测得主井深 86 m, 因此辅助孔单孔进尺也设计成 86 m 深度, 施工完成后在 3~11 采卤井开展抽水试验, 抽水试验工程布置图见(图 3)。

根据不同试验手段, 分别在 3~11 采卤井中进行单孔稳定流抽水试验, 降深次数不少于 3 个, 降距应均匀合理。抽水试验过程中参照相应规范, 及时观测抽水井水位和出水量等, 即开泵前, 测初始静水位, 开泵后第 1、2、4、6、8、10、20、30、40、50、60、80、100、120 min 各测一次, 之后每隔 30 min 测一次, 稳定后可放宽至 60 min 观测一次, 直至试验结束, 抽水稳定后延续时间不小于 8 h, 抽水试验其他具体要求需严格参照相关规范执行。根据抽水试验数据, 算出使用大气联通法以及往辅助孔注水采卤井区域承压含水层水文地质参数, 分析不同试验条件下单位涌水量的变化趋势, 找出变化规律, 为后期试验及采卤工程设计提供依据。

## 4 采卤井抽水试验

前期开采实践表明, 由于赋存浅部潜卤水的钙芒硝晶间含水层结构稳定性较差, 在抽取 W<sub>1</sub> 潜卤水过程中, 钙芒硝晶间充填物被快速流动的卤水带出, 导致含水层孔隙增大, 地下水流动更为畅通, 导

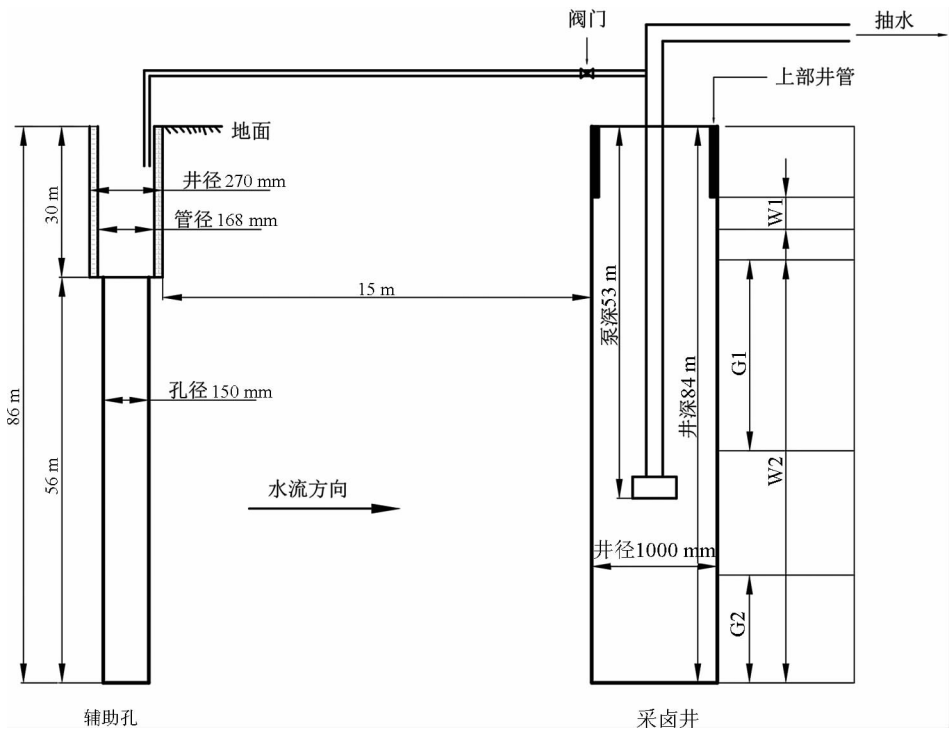


图 3 罗北凹地采卤井与辅助孔布置图

Fig. 3 The layout of the brine well and auxiliary orifice in Luobei sag

致潜卤水采卤井单井出水量增大。此次抽水试验目的是,验证长时间、大流量抽取地下卤水条件下,是否也对深部比较致密的承压钙芒硝晶间含水层结构产生影响,同时验证前期在 ZK0601 井附近利用爆破法及大气联通法所做的抽水试验,及确定大气联通辅助孔与采卤井距离远近对含水层单位涌水量大小的影响,以期为今后在富水性相对较弱、开采条件较为复杂的深部承压卤水区进行大规模开采提供理论依据。

3~11 采卤井井深 84 m,井径 1000 mm。3~11 采卤井 0~10 m 下入  $\Phi 1000$  mm 钢管作为护壁井管,10~84 m 无井管,井壁地层裸露;该井贯穿  $W_1$  潜水和  $W_2$  承压含水层,采卤井井内为浅部的潜水和深部的承压水的混合水。

依据已有数据资料,目前该区域承压钙芒硝含水层平均单位涌水量为  $183.59 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 、单井出水量为  $2030 \text{ m}^3/\text{d}$ 。据此本次抽水试验选定沈阳深井潜水泵有限责任公司的潜水泵作为抽水工具,型号 250QJ80-80/4,潜水泵额定流量  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 、额定扬程 80 m。水泵下潜深度为 53 m,抽出卤水直接排入采卤井以东 15 m 的输卤渠中。在正式开始抽水试验前,使用潜水泵做了 3 次大流量、大降深、反复震荡抽水洗井,直至达到抽出的卤水水净砂清。抽出的卤水

排入输卤渠中,输卤渠采取了防渗措施,确保抽出卤水不会回灌入采卤井中影响抽水试验数据的准确性。

5 试验结果及数据分析

2017 年 4 月 16 日至 2017 年 5 月 28 日,对 3~11 采卤井共进行了 5 次大规模抽水试验,抽水试验数据见表 1。

根据抽水试验数据,分别绘制  $S-Q$ (图 4)和  $S-q$  曲线图(图 5)。可以看出:第一次抽水试验三个落程差距合理,抽水试验数据满足计算要求, $S-Q$  曲线和  $S-q$  曲线形态符合抽水试验特征。第五次抽水试验  $S-Q$  曲线符合抽水试验特征, $S-q$  曲线出现异常,主要原因是最小落程与中间落程水位差不够,但最大落程和中间落程抽水试验数据满足计算要求。

此外,从水位恢复曲线来看(图 6),需要至少 1.5 h 才能恢复至接近静水位,3~11 采卤井水位恢复较慢,说明该采卤井附近深部承压钙芒硝含水层富水性一般。

6 讨论

6.1 辅助孔与主采卤井的距离对单位涌水量的影响

笔者团队前期利用爆破法及大气联通法对南部

表 1 3~11 采卤井抽水试验数据

Table 1 Data of pumping test of brine well 3~11

| 抽水试验 |          | 单位涌水量<br>( $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ) | 单井涌水量<br>( $\text{m}^3/\text{d}$ ) | 采卤井降深<br>( $\text{m}$ ) | 延续时间<br>( $\text{h}$ ) | 稳定时间<br>( $\text{h}$ ) | 辅助孔降深<br>( $\text{m}$ ) | 辅助孔注水量<br>( $\text{m}^3/\text{d}$ ) |
|------|----------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 第一次  | 最大落程     | 24.09                                           | 795.14                             | 33.01                   | 14.5                   | 8.5                    | 未完成                     | 不注水                                 |
|      | 中间落程     | 42.26                                           | 723.00                             | 17.11                   | 32.5                   | 10                     |                         |                                     |
|      | 最小落程     | 87.48                                           | 287.80                             | 3.29                    | 15.0                   | 8.5                    |                         |                                     |
| 第二次  | 最大落程(第一) | 25.94                                           | 780.88                             | 30.10                   | 16.5                   | 8.5                    | 0.2                     | 不注水                                 |
|      | 最大落程(第二) | 30.66                                           | 887.07                             | 28.93                   | 38.0                   | 8.0                    | 0.43                    |                                     |
|      | 最大落程(第三) | 28.62                                           | 935.37                             | 32.68                   | 13.0                   | 7.0                    | —                       |                                     |
|      | 最大落程(第四) | 28.70                                           | 935.37                             | 32.59                   | 10.0                   | 7.0                    | —                       |                                     |
| 第三次  | 最大落程(第一) | 24.32                                           | 780.88                             | 32.11                   | 8.0                    | 3.0                    | 0.64                    | 不注水                                 |
|      | 最大落程(第二) | 27.80                                           | 887.07                             | 31.91                   | 12.5                   | 3.0                    | 0.65                    |                                     |
|      | 最大落程(第三) | 29.44                                           | 935.37                             | 31.77                   | 11.5                   | 2.0                    | 0.67                    |                                     |
| 第四次  | 最大落程(第一) | 29.32                                           | 935.37                             | 31.90                   | 10.5                   | 1.0                    | —10.61                  | 3.4                                 |
|      |          |                                                 |                                    |                         |                        |                        | (稳定)                    |                                     |
|      | 最大落程(第二) | 28.99                                           | 935.37                             | 32.26                   | 11.5                   | 4.0                    | —3.91                   | 2.6                                 |
|      |          |                                                 |                                    |                         |                        |                        | (稳定)                    |                                     |
| 第五次  | 最大落程(第三) | 29.60                                           | 935.37                             | 31.60                   | 11.0                   | 4.0                    | —3.43                   | 2.6                                 |
|      |          |                                                 |                                    |                         |                        |                        | (稳定)                    |                                     |
|      | 最大落程     | 31.15                                           | 935.37                             | 30.03                   | 16.5                   | 7.5                    | 0.94                    | 不注水                                 |
|      | 中间落程     | 37.60                                           | 887.07                             | 23.59                   | 15.5                   | 8.5                    | 0.98                    |                                     |
|      | 最小落程     | 39.52                                           | 765.16                             | 19.36                   | 15.0                   | 8.0                    | 0.99                    |                                     |

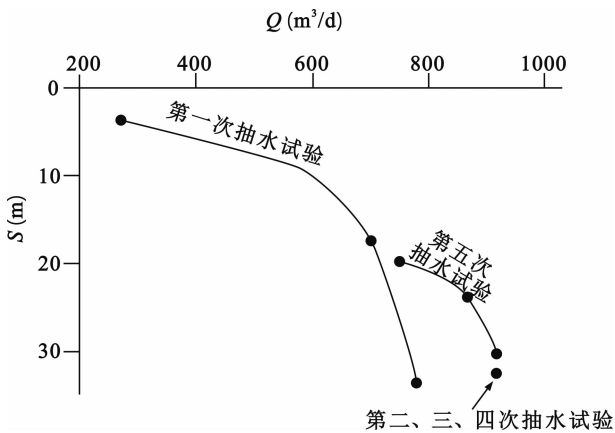


图 4 罗北凹地降深(S)-单井涌水量(Q)曲线图

Fig. 4 Drawdown (S)-single well water inflow (Q) curve diagram in Luobei sag

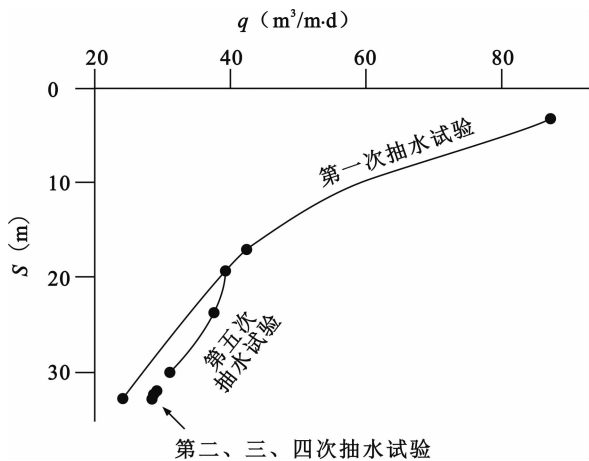


图 5 罗北凹地降深 S-单位涌水量  $q$  曲线图

Fig. 5 Drawdown (S)-specific inflow ( $q$ ) curve diagram in Luobei sag

ZK0601 深部承压卤水层进行了改造,辅助孔距离抽水试验井 80 m。抽水试验结果表明,深部承压混合钙芒硝含水层( $W_2\sim W_4$ )的单位涌水量由  $857.86\text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$  增加至  $939.49\text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ,提高率为  $8.69\%$ 。本次在 3~11 采卤井分别使用大气联通法及注水法做了 5 次大规模抽水试验,辅助孔距离 3~11 采卤井 15 m,第三次抽水试验使得大气与深部承压含水层卤水连通,求得最大降深单位涌水量为  $29.44\text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ,与第一次抽水试验求得的最大降深单位涌水量  $24.09\text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$  相比,单位涌水量增大了  $5.35\text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ ,单位涌水量提高了  $18.27\%$ 。因此,此次抽水试验基本验证了大气联通

法在罗北凹地钾盐矿区深部承压卤水开采过程中的有效性。通过此次试验也确定了辅助孔距离采卤井远近与承压含水层单位涌水量大小密切相关。与 2013 年相比,本次试验中单位涌水量提高的更多,说明辅助孔与采卤井的距离越近,效果越好,但大气联通辅助孔与采卤井的最佳距离数值仍需通过后期的抽水试验才能确定。

此外,在 3~11 采卤井进行的五次 259 h 的抽水试验结果表明:辅助孔的实施建立起深部承压钙芒硝储卤层晶间卤水与地面空气的连通关系对采卤井出水量有一定的影响。因此,后期可以考虑在 3

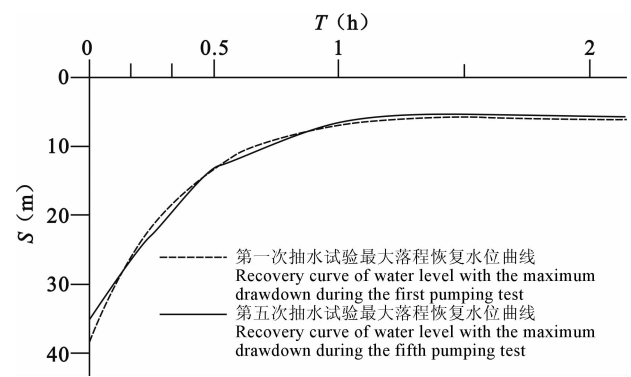


图 6 罗北凹地水位恢复曲线图

Fig. 6 Curve diagram of water level recovery in Luobei Sag

~11 采卤井周边再施工辅助孔,并对 W1 层潜卤水止水,增加采卤井区域深部承压钙芒硝储卤层中晶间卤水与大气层的连通,通过抽水实验,从而获得增加辅助孔数量对深部承压钙芒硝储水层单位涌水量的影响程度,通过对出水能力较差的 3~11 采卤井进行提高单井出水量抽水试验研究,为罗布泊盐湖深部化学沉积钙芒硝承压储层中的承压卤水开采积累经验,为国投罗钾公司深部承压卤水开采规划、开采方法提供技术支撑,从而在减少工程投入、降低生产成本的前提下,提高卤水钾资源利用率,最终实现罗北凹地钾盐矿区深部承压卤水的大规模生产性开采。

6.2 往辅助孔注入卤水对单位涌水量的影响

第四次试验开始往辅助孔注入卤水,抽水试验延续时间为 33 h,本次注水试验后,第五次抽水试验求得的最大降深单位涌水量  $31.15 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ,与没有注入卤水的第三次抽水试验求得的单位涌水量  $29.44 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$  相比,单位涌水量增大了  $1.71 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ ,承压含水层单位涌水量提高了  $5.49\%$ 。本次往辅助孔内注入部分从 3~11 采卤井采出的卤水,并通过潜水泵抽取采卤井卤水,降低采卤井中卤水水位,使得辅助孔与 3~11 采卤井形成近 30~50 m 的水位差,人为增大地下水水力坡度,驱使承压钙芒硝晶间含水层中卤水加速运动,迫使深部承压钙芒硝晶间孔隙内碎屑进入开采井,改良承压钙芒硝晶间含水层结构,扩充目标含水层的孔隙度,改善目标含水层孔隙连通情况,增强卤水径流条件,提高了单井出水量,达到了提高承压含水层单位涌水量的目的。但本次抽水试验往辅助孔深部承压钙芒硝储卤层注入卤水,是以常压固定水头方式注入的,注水量为  $2.6 \sim 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,注入承压钙芒硝储水层卤水量较小。因此,建议下一步采用有压注水方式试验,加大注入压力和注入卤水的量,进一步揭示有压

注水条件下对深部承压钙芒硝储卤层晶间孔隙及孔隙连通性的影响。

7 结论

(1)试验证明,在罗北凹地钾矿区采用大气联通法增加采卤井单井出水量是可行的。通过对辅助孔 W1 层潜卤水进行止水,使承压卤水与地面空气直接连通,可有效消除承压卤水在流出过程中形成的负压影响,从而改善承压卤水的流通性,提高承压水层的单位涌水量,实现增大深部承压卤水层单位涌水量目的。

(2)增加辅助孔往承压储卤层中注入原卤的方法可承压卤水层的连通性,可以为后期开采技术研究提供借鉴。同时,辅助孔和采卤井之间的距离对提高单位涌水量具有控制作用,但其最适宜距离需后期大量试验进行论证确定。

**致谢:**野外钻探取芯及抽水试验由新疆地矿局第二水文地质大队钻探一公司完成。在成文过程中,得到了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、第二水文地质大队张磊、姜善斌、吴宝东等给予的帮助、指导,在此一并表示深深地谢意。

注 释

- ① 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.
- ② 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.

References

Gu Xinlu, Yan Hui, Jiang Shanbin, Qi Wanqiu, Zeng Yonggang. 2011. Aquifers hydrogeological characteristics of Kuntay salt lake. *Journal of Salt Lake Research*, 19(2): 1~6 (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, Liu Chenglin, Bai Daming, Wang Mili, Chen Yongzhi. 2005. Application of self-potential technique to the exploration of potassium-rich brine in Lop Nur, Xinjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(4): 381~385 (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.): 225~228 (in Chinese with English abstract).

Li Hongpu, Zheng Mianping, Hou Xianhua, Sun Bintao, Liu Guotai, Dou Quancheng. 2014. Hydrochemistry characteristics and origin of new brine sandy gravel in early Pleistocene of Heibei concave in Qaidam basin. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(10): 1433~1442 (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 with 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).
- Li Wenxue, Zhang Fankai, Wang Jiang, Chen Wei, Yang Baoheng. 2018a. Research on the characteristics and the mining method of deep artesian brine-potash in Luobei depression. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1605~1616 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue, Zhang Fankai, Yu Yongmei, Wang Jiang, Ma Baocheng, Zhao Liangliang, Chen Wei, Yang Baoheng. 2018b. Preliminary studies on variation regulation and genetic of hydrologic parameter of brine reservoirs in playa Lop Nur during potash exploitation. *Journal of Salt Lake Research*, 26(3): 45~51 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng. 1999. Hydrogen, Oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash-forming material sources of Lop salt lake, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 18(3): 268~275 (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, Li Shude, Chen Yongzhi. 2003. 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, 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 (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): 581~592 (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 Chenlin, Jiao Pencheng, Lv Fenglin, Wang Yongzhi, Sun Xiaohong, Zhang Hua, Wang Licheng, Yao Fojun. 2015. The impact of the linked factors of provenance, tectonics and climate on potash formation: an example from the potash deposits of Lop Nur depression in Tarim basin, Xinjiang, Western China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(6): 2030~2047.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Sun Xiaohong, Lv 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).
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Zhang Hua, Sun Xiaohong, Zhang Yongming. 2018a. Carbon and oxygen isotopic compositions of the lacustrine carbonate in Lop Nur since the Mid-Pleistocene and their paleoenvironment significance. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1589~1604 (in Chinese with English abstract).
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Zhang Hua, Sun Xiaohong. 2018b. Provenance of the Quaternary lake basin and tectonic evolution of the basin in Lop Nur; evidence from detrital zircon U-Pb age of core LDK01. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1571~1588 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lichun, Li Baoguo, Jiang Pinan, Zhong Junping, Sheng Jiandong, Qiu Honglie, Wu Hongqi. 2010a. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of potassium in Lop Nur Great Ear Playa. *Mineral Deposits*, 29(4): 616~624 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lichun, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi. 2010b. A Preliminary discussion on geological conditions and indicator pattern of potash in typical Playas of Xinjiang. *Mineral Deposits*, 29(4): 593~601 (in Chinese with English abstract).
- Nie Zhen, Bu Lingzhong, Liu Jianhua, Wang Yunsheng, Zheng Mianping. 2010. Status of potash Resources in salt lake and progress in potash technologies in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6): 869~874 (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 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).
- Wang Mili, Li Tingqi, Liu Chenglin, Yang Zhichen, Li Changhua. 1996. Important discovery of a potash deposits in Luobei subbasin of the Lop Nur, Xinjiang, China. In: *Geological Society of China, ed. Selected Papers Presented to the Academic Exchange Meeting of Major Achievements of the Geological Sciences Obtained in the Eighth Five-Year Plan Period*. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Yang Zhichen and Li Yawen. 1998. Characteristics of the Luobei subbasin superlagre potash deposit in the Lop Nur and its development prospects. *Mineral Deposits*, 17(sup.): 433~435 (in Chinese).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. 2001. *Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Kai, Sun Mingguang, Ma Lichun, Tang Qingfeng, Yan Hui, Zhang Yu. 2020. Spatial variability in the geochemical characteristics of the K-rich brines in the Lop Nur. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1183~1191 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xueguang, Wang Youde, Ma Deren, Xia Zejun. 2010. Discussion on extracting process test for pressure brine in Mahai potash area, Qinghai. *Industrial Minerals & Processing*, 39(302): 17~18+40 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenli, Yang Geng, Li Jianbin, Chen Shouchun, Wen Qibing, Xu Fabo, Zhu Yixin. 2011. Mineralization conditions of Sylvite in the Western Tarim basin. *Geology and Exploration*, 47(6): 1099~1106 (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 Press (in Chinese with English abstract).
- Yue Weihao, Gao Jianguo, Li Yuncan, Liu Yinghui, Liu Kaixin. 2011. The prospecting model and prediction of the Mengyejing-type potash deposits in Yunnan Province. *Geology and Exploration*, 47(5): 809~822 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Jiao Pengcheng, Li Botao, Qian Zuohua. 2010. Geological characteristics and resource potential of soluble potash in China. *Mineral Deposits*, 29(4): 649~656 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

- 顾新鲁, 颜辉, 江善斌, 齐万秋, 曾永刚. 2011. 罗布泊干盐湖富水性分区特征与控制因素分析. *盐湖研究*, 19(2): 1~6.
- 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, 刘成林, 白大明, 王弭力, 陈永志. 2005. 应用自然电场法寻找地下富钾卤水的探讨. 地球学报, 26(4): 381~385.

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.

李洪普, 郑绵平, 侯献华, 孙斌涛, 刘国泰, 窦全成. 2014. 柴达木黑北凹地更早新世新型砂砾层卤水水化学特征与成因. 地球科学—中国地质大学学报, 39(10): 1433~1442.

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.

李文学, 张凡凯, 王江, 陈伟, 杨宝恒. 2018a. 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.

李文学, 张凡凯, 于咏梅, 王江, 马宝成, 赵亮亮, 陈伟, 杨宝恒. 2018b. 罗布泊盐湖储卤层水文参数在钾盐开发过程中的变化规律及其成因探讨. 盐湖研究, 26(3): 44~51.

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, 李树德, 陈永志. 2003. 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, 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, 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, 孙小虹, 吕凤琳, 张华. 2018b. 罗布泊盐湖成钾规律研究与找矿进展. 地质学报, 92(8): 1551~1570.

王弭力, 李廷祺, 刘成林, 杨智琛, 李长华. 1996. 新疆罗布泊罗北

凹地钾矿的重大发现.“八五”地质科学重要成果学术交流会议论文选集, 北京:冶金工业出版社, 446~449.

王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 杨智琛, 李亚文. 1998. 罗布泊罗北凹地超大型钾盐矿床特征及其开发前景. 矿床地质, 17(sup): 433~435.

王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京:地质出版社, 177~186.

吕凤琳, 刘成林, 焦鹏程, 张华, 孙小虹, 张永明. 2018a. 罗布泊中更新世以来盐湖碳酸盐碳氧同位素组成以及故环境意义. 地质学报, 92(8): 1589~1604.

吕凤琳, 刘成林, 焦鹏程, 张华, 孙小虹. 2018b. 罗布泊第四季湖盆物源与盆地构造演化特征:来自 LDK01 孔碎屑锆石 U-Pb 年龄证据. 地质学报, 92(8): 1571~1588.

马黎春, 李保国, 蒋平安, 钟骏平, 盛建东, 邱宏烈, 武红旗. 2010a. 罗布泊大耳朵湖区钾元素地球化学与富集机理. 矿床地质, 29(4): 616~624.

马黎春, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志. 2010b. 新疆典型干盐湖成钾条件对比与指标模型初探. 矿产地质, 29(4): 593~601.

乜贞, 卜令忠, 刘建华, 王云生, 郑绵平. 2010. 我国盐湖钾盐资源现状及提钾工艺技术进展. 地球学报, 31(6): 869~874.

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.

王凯, 孙明光, 马黎春, 汤庆峰, 颜辉, 张瑜. 2020. 罗布泊富钾卤水矿床地球化学空间分布特征. 地质学报, 94(4): 1183~1191.

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采工艺试验探讨. 化工矿物与加工, 39(302): 17~18+40.

徐文礼, 杨更, 李建兵, 陈守春, 文其兵, 徐发波, 朱宜新. 2011. 塔里木盆地西部钾盐成矿条件分析. 地质与勘探, 47(6): 1099~1106.

于升松, 等. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及预测. 北京:科学出版社. 142~143.

岳维好, 高建国, 李云灿, 刘应辉, 刘心开. 2011. 云南省勐野井式钾盐矿找矿模型及预测. 地质与勘探, 47(5): 809~822.

赵元艺, 焦鹏程, 李波涛, 钱作华. 2010. 中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价. 矿床地质, 29(4): 649~655.

## Study of a new mining technology and recoverability of confined brine in the Lop Nur salt lake

LI Wenxue, ZHANG Fankai\*, YU Yongmei, ZHAO Liangliang, MA Baocheng, WANG Lusha

SDIC Xinjiang Lop Nur potash resources Limited liability company, Hami, Xinjiang 839000, China

\* Corresponding author: 564658747@qq.com

### Abstract

The Luobei Sag in the northeast of Lop Nur bears abundant confined potassium-rich brine that is one of the most important reserve resources of potash. In this study, an improved mining technology for confined brine from areas of weak water abundance in the brine well 3~11 was conducted using method of atmospheric connection and water injection in the auxiliary well. The obtained data from five group and long-term pumping tests shows that the application of these methods can increase the reservoir space and enhance hydraulic connection of confined aquifers, and thus increase specific capacity by up to 22.7%. It further confirms the validity of using method of atmospheric connection and water injection in improving mining production for confined brine in the Luobei sag. The mining rates are associated with the distance between auxiliary well and mining well and the injected volume of water into the auxiliary well. Our result can provide a reference for the next large-scale mining of confined brine in the Luobei sag.

**Key words:** atmospheric connection; water injection; pumping test; confined aquifer; specific inflow