J. Lake Sci.(湖泊科学),2027,39(2):000-000
DOI: 10.18307/2027.0223
©2027 by Journal of Lake Sciences

察尔汗盐湖补水溶矿水文地球化学变化特征及效果评价*

秦光雄[1,4,5]，袁小龙[2,3,*]，苏维刚[2,3]，高　品[2,3]，常　政[2,3]，赵　振[1,4,5]，陈惠娟[1,4,5]，朱登贤[6]，李梦玲[2,3]，张西营[2,3]

（1：青海九零六工程勘察设计院有限责任公司，西宁 810008）

（2：中国科学院青海盐湖研究所，盐湖资源绿色高值利用重点实验室，西宁 810008）

（3：青海省盐湖地质与环境重点实验室，西宁 810008）

（4：青海省地质环境保护与灾害防治工程技术研究中心，西宁 810008）

（5：青海省环境地质重点实验室，西宁 810008）

（6：青海盐湖工业股份有限公司，格尔木，816000）

摘　要：补水溶矿作为盐湖钾资源可持续开采的重要方式，对保障国家战略需求具有重要意义。为了揭示补水溶矿过程中储卤层水文地球化学变化，并评价补水溶矿效果，本文以察尔汗盐湖达布逊区段为研究区开展了储卤层矿物组成与卤水水化学时空分布的耦合研究，对其补水模式和钾的富集机制进行了深入探讨。结果表明：储卤层矿物垂向分带明显：浅部（0～4 m）以石盐（含量最高达 95%）为主，中部（4～9 m）为光卤石（含量 10%～31%）富集层，伴生水氯镁石；深部（>8 m）碎屑矿物增多；卤水水体分异受 Na^+、Mg^{2+}、K^+控制，水平方向上 K^+在补水渠至采卤渠之间的高值条带和垂向上 Mg^{2+}、Cl^-、K^+同步升高的“化学拐点”揭示了水位动态是控制钾垂向迁移与富集的关键；研究区存在湖水天然补给与人工渠补水两种模式，前者影响范围广、持续时间长，对浅-中层固体钾盐溶解效果显著，后者是对补水范围的延伸，指向性强但补水范围有限。总体研究表明，当前人工补水溶矿在浅-中层仍有较大潜力，需优化补水布局、增强低矿化度水对目标层位的穿透能力以提升钾盐资源溶采效率。该研究揭示了“矿物-水化学-水动力”耦合机制，为察尔汗盐湖补水溶矿提供了基础科学依据。

关键词：察尔汗盐湖；补水溶矿；水化学；钾盐矿物

Hydrogeochemical characteristics and effective evaluation of water-replenishment-induced mineral dissolution in Qarhan Salt lake*

Qin Guangxiong[1,4,5], Yuan Xiaolong[2,3,*], Su Weigang[2,3], Gao Pin[2,3], Chang Zheng[2,3], Zhao Zhen[1,4,5], Chen Huijuan[1,4,5], Zhu Dengxian[6], Li Mengling[2,3] & Zhang Xiying[2,3]

(1: *Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Qinghai* 810008, *P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Qinghai* 810008, *P.R.China*)

(3: *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai* 810008, *P.R.China*)

(4: *Qinghai Engineering Research Center of Geoenvironmental Protection and Geohazard prevention, Qinghai* 810008, *P.R.China*)

(5: *Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province, Qinghai* 810008, *P.R.China*)

(6: *Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd, Golmud* 816000, *P.R.China*)

* *2026-02-03 收稿;2026-06-10 收修改稿;2026-06-10 录用。
中国科学院战略性先导科技专项（XDB1130201）、中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划（YSBR-039）、青海省自然科学基金青年项目（2025-ZJ-939Q）、青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”项目（2024）和青海省“昆仑英才·科技领军人才”项目联合资助。
**通讯作者；Email: xiaolongy@isl.ac.cn.

Abstract: As an important approach to the sustainable utilization of potassium resources in salt lakes, water-replenishment-induced mineral dissolution is critical to safeguarding national strategic interests. To clarify the hydrogeochemical evolution of brine reservoirs and evaluate the efficiency of water-induced potash dissolution, this study investigated the mineral composition of brine-bearing strata and the spatiotemporal distribution of brine hydrochemistry in the Dabuxun area of Lake Qarhan. The recharge patterns and potassium enrichment mechanisms were further analyzed. The results show that brine-bearing strata exhibit clear vertical mineral zonation. The shallow layer (0–4 m) is dominated by halite, with a maximum content of 95%. The middle layer (4–9 m) is enriched in carnallite, with contents ranging from 10% to 31%, accompanied by bischofite. In the deep layer (>8 m), the proportion of detrital minerals increases. Hydrochemical differentiation of the brine is mainly controlled by Na^+, Mg^{2+}, and K^+. A horizontal high-concentration belt of K^+ between the water replenishment channel and the brine extraction channel, together with a vertical chemical inflection point where Mg^{2+}, Cl^-, and K^+ increase simultaneously, suggests that water level fluctuation is the key factor governing the vertical migration and enrichment of potassium. Two recharge patterns were identified in the study area: natural lake water recharge and artificial channel recharge. Natural lake water recharge has a wide influence range and long duration, and can effectively dissolve solid potassium salts in the shallow and middle strata. Artificial channel recharge expands the overall recharge coverage, with clear directionality but limited spatial extent. This study indicates that the current artificial water replenishment still has considerable potential for mineral dissolution in the shallow and middle strata. Optimizing the recharge layout and improving the infiltration capacity of low-salinity water in target strata are essential for enhancing the dissolution and exploitation efficiency of potash resources. This study clarifies the coupling relationships among mineralogical characteristics, hydrochemical processes, and hydrodynamic conditions, and provides a fundamental scientific reference for the implementation of water-replenishment-induced mineral dissolution in Lake Qarhan.
Keywords: Qarhan Salt Lake, water-replenishment-induced mineral dissolution, hydrochemistry, potash minerals

钾盐是保障国家粮食安全与农业可持续发展的关键战略性矿产资源[1-3]。察尔汗盐湖赋存有储量可观的钾盐资源，主要以松散储层晶间卤水及零星分布的固体钾盐（如光卤石、钾石盐等）形式存在。其中晶间卤水通过采卤井/渠抽取后输送至盐田进行蒸发结晶生产钾肥[4-6]，固体钾矿由于品位低、矿层薄而且分散分布,难以直接利用[7-9]，通过人工引入低矿化度溶剂驱动溶解储卤层中固体钾盐进入液相卤水，再通过采卤系统将赋钾卤水抽取至盐田加工[10-13]。目前，察尔汗盐湖已在别勒滩、达布逊等区段应用了“固液转化”技术，形成了“补水—溶解—采卤”一体化的工程格局。补水溶矿过程中卤水的化学变化规律主要受矿物的溶解-再平衡作用控制[14-16]。察尔汗盐湖的固液转化研究表明：储层卤水中的离子赋存特征主要受石盐、光卤石等蒸发盐矿物溶解析出制约，不同来源的补水对盐类矿物的溶解-沉淀过程存在显著差异[16-17]；王文祥等结合矿物的溶解-沉淀特征建立了离子浓度与固液转化阶段的指向关系[10]；李瑞琴等通过 PHREEQC 反向模拟了溶矿过程中石盐、钾石盐、光卤石等多种矿物的溶解/沉淀量，从机理上解释了水化学的变化机制[18-19]。上述研究表明察尔汗盐湖盐类沉积矿物与其赋存卤水的水化学特征有着密切关系。然而，现有研究多将“水体”与“储层”视为相对独立的系统，缺乏将储卤层空间内矿物组合与卤水动态进行整合的精细刻画。而且实际工程中受储层非均质性、矿物溶解-沉淀动态变化、补水与原卤密度差异等因素共同影响，补水溶矿过程中储卤层水文地球化学变化特征认识不清，溶矿效果难以评价。

本文选择察尔汗盐湖达布逊区段矿区作为研究区，基于研究区内补水渠、采卤渠，以及系统布置的 15 口水文钻孔，综合运用矿物学、水文地球化学方法，通过分析察尔汗盐湖达布逊区段的矿物组合特征以及赋存卤水的水位、水化学变化特征，揭示固体钾盐矿物与液体卤水之间的化学反应机制及其宏观空间效应，评价人工补水对储卤层中固体钾的溶解效果，为钾盐资源高效开采提供科学依据。

1 地质背景

察尔汗盐湖位于青藏高原东北缘柴达木盆地的中部(36°37′36″~37°12′33″N, 93°42′36″~96°14′35″E)，湖区呈西北—东南向展布，总面积约 5856 km^2[4]，作为中国最大的盐湖，察尔汗盐湖是一个以钾盐为主，伴生有镁、钠、锂、硼、碘、氯、溴、铷、铯等多种矿产的大型内陆综合性盐湖[5]。湖区由察尔汗干盐湖

和达布逊湖等 10 个地表卤水湖组成（图 1a）。达布逊湖是区内最大的地表卤水湖，湖水矿化度达 319.3 g/L[20]。格尔木河是湖区主要的补给河流，河长 352 km，集水面积 18468 km²[21]。湖区高寒干旱少雨、日照久、蒸发强烈、昼夜温差较大，是典型的高原大陆性气候。研究区多年平均降水量为 47.6 mm，降水多集中在 5—9 月份，多年平均蒸发量为 2173.2 mm[4]。

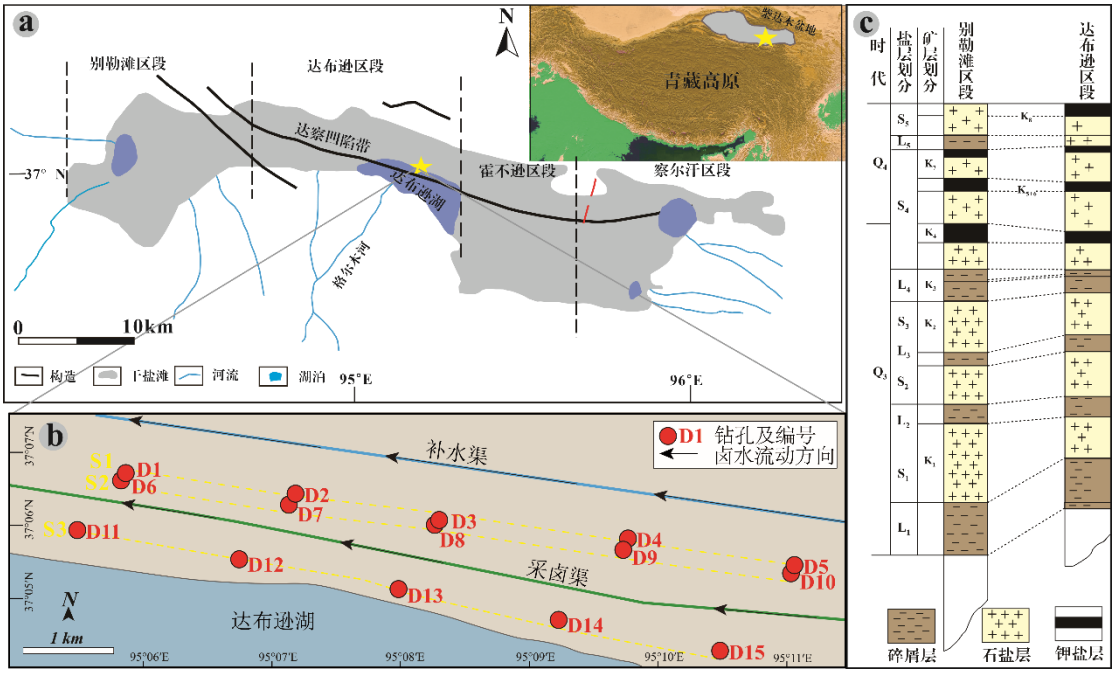

图 1 研究区区域地质及钻孔分布图[5]

Fig. 1 The regional geology and drillhole distribution of the study area

察尔汗盐湖地处柴达木盆地中新生代中央坳陷带，研究区位于察尔汗盐湖达察凹陷带上，达察凹陷呈 NW-SE 走向。湖区发育了巨厚的第四系湖相含盐系地层，由五个盐层（S1、S2、S3、S4、S5）和四个碎屑黏土层组成（图 1c），钾盐层集中分布在 S4、S5 盐层中，主要矿物为石盐、钾石盐和光卤石[22]。上部的岩盐层富含晶间卤水，晶间卤水垂向分异，由上至下可分为石盐—钾石盐水段、光卤石水段和近水氯镁石水段[23]。依照地质和矿产特征将盐湖自西向东依次划分为别勒滩、达布逊、察尔汗和霍布逊区段[4]，后三者为富钾、镁盐液体的区段，本文研究区位于达布逊区段。

2 样品采集与分析

本文以察尔汗盐湖达布逊区段内补水渠、采卤渠，以及布置的 15 个水文钻孔作为研究对象（图 1b），首先对各钻孔岩芯进行取样分析，以获得研究区储层矿物组成和分布特征。在此基础上，对渠道及各钻孔分别在湖水高水位期（2021 年 8 月）和低水位期（2021 年 10 月）进行动态监测和取样分析，评价补水溶解固体钾盐效果。本文以光卤石矿埋深变化作为补水溶矿效果评价指标，以钻孔中光卤石最浅埋深作为补水溶矿前光卤石原始埋深，则溶矿后，埋深增加值与初始光卤石分布厚度之比即为补水溶矿转化效率。

2.1 样品采集

本研究中的岩心样品采自察尔汗盐湖达布逊区段达布逊湖北岸的 15 个水文钻孔，钻孔深度 0~11 m，位置如图 1b 所示，包括 S1 线（D1～D5）、S2 线（D6～D10）和 S3 线（D11～D15）。钻孔在 2020 年 5 月施工，在现场完成钻孔岩心编录，随即根据编录资料，对地层进行分层，并按 50 cm 间距取完整岩心

样品，样品长 10 cm，重要层位加密。各深度岩心样品采集完成后，去除其表面局部风化部分，选择新鲜部分并及时放置于封口袋中。回到室内后，对所采集的样品进一步筛分，选择新鲜且矿物组合较为齐全的典型部分，在烘箱内 40 ℃条件下烘干 48 小时，烘干后将样品在研钵中研磨至 200 目以供 XRD 矿物组成分析。分别在 2021 年高水位期（8 月）和低水位期（10 月）进行不同水文季节的卤水样品采集，地表卤水采集达布逊湖水，钻孔卤水样品采用定深取样器从上至下进行间隔 1m 的分层采集，取样深度均为静止水位下 50cm。每个样品采集 500mL，用聚乙烯塑料采样瓶封装保存，待回到实验室后进行水化学分析测试。

2.2 样品分析

对采集的卤水进行主量元素、pH、比重测试，其中 Cl-采用容量法测定[24]，K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}依据地方标准《卤水中钾、钠、钙、镁、硼、锂含量的测定-电感耦合等离子体发射光谱法》（DB 63/T 1422—2015）采用 ICP-OES（Avio 200 型，美国 PerkinElmer 公司）分析测定，仪器测定结果的精密度（以 RSD 计） 小于 5%，HCO_3^-、CO_3^{2-}通过酸标准溶液滴定法测定。储卤层岩芯样品进行矿物 XRD 衍射分析，分析前，首先将岩心样品烘干并研磨至 200 目。研磨后，采用荷兰帕纳科公司所生产的粉晶 X 射线衍射仪（型号为 X-pert Pro）对样品粉末进行矿物组分及含量的测定。XRD 测试条件为：电压 40 kV，电流 30 mA，铜靶 Kα 辐射（λ=1.5406），扫描角度（2θ）为 5°-80°，扫描速度为 5°/min。矿物组分及含量由软件 X’Pert High Score Plus 计算，半定量分析误差为±2%（相对含量）；重复扫描角度偏差≤0.01°2θ，物相鉴定置信度≥95%。以上分析测试工作全部在中国科学院青海盐湖所盐湖化学分析测试中心完成。

3 结果

3.1 察尔汗盐湖钻孔岩芯矿物组成与空间分布特征

各钻孔岩心样品 XRD 矿物组分及含量测试结果显示（附表 1），盐类和碎屑矿物在垂向上具有明显的分带性，为便于描述，根据矿物整体分布特征分析，将钻孔岩心样品采样层位分为上部层位（0~4.00 m）、中部层位（4.00~9.00 m）和下部层位（>9 m）。

上层（0~4.00 m）的岩心样品中石盐含量较高，整体>90%，石膏也普遍分布在该层位，含量为 3%~10%。中层（4.00~9.00 m）石盐含量整体波动下降至 40%~70%之间，此层位中分布有硬石膏，含量约为 8%。钾盐矿物中，钾石盐在上层和中层均有分布，但含量极低且不连续。光卤石在中层含量在 10%~25%，呈现出局部富集的特征。水氯镁石与光卤石伴生，含量在 3~10%之间。下层（>9 m）石盐含量下降至 20%以下，存在少量方解石（1%~6%），碎屑矿物石英和钠长石含量升高。碎屑矿物白云母在约 1.90~9.00 m 范围内普遍分布，含量为 15%~22%，极少白云石和霰石在岩心样品中零星分布。

3.2 察尔汗盐湖储卤层地下卤水化学时空分布特征

3.2.1 基本水化参数的时空变化特征　研究区补水水源主要为达布逊湖水，人工补水渠水为引自达布逊的湖水，对比图 2 发现，地下卤水端元呈现比重和 TDS 大、pH 低的特点，补水端元，即湖水和渠水比重和 TDS 小、pH 高。由于沿途溶解储卤层矿物，并受到蒸发作用的影响，渠水化学参数介于湖水和地下卤水之间。端元混合可能使水化参数在空间上呈差异性分布。

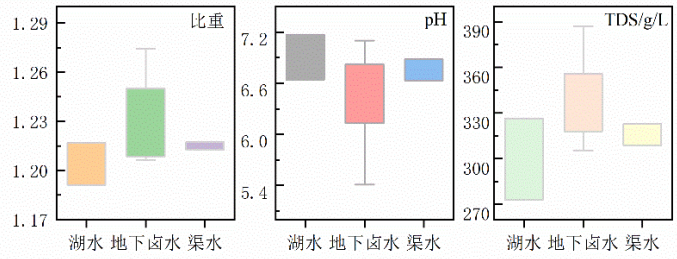

图 2 不同端元水体的水化参数

Fig.2 Hydration parameters of differen tend-member water

对比高低湖水位期的水文参数在水平方向的空间分布特征（图 3），研究区靠近湖岸的 S3 线和靠近补水渠的 S1 线钻孔水位埋深整体较小，位于 S1 和 S3 之间的 S2 线钻孔水位埋深最大，且以 D13 钻孔为中心的离岸方向上形成逐渐收缩的低水位埋深条带，D13 钻孔水位埋深在 0.76~0.78 m。8 月湖水高水位期，研究区的东部边缘区域水位埋深大于西部，可达 1.32 m，10 月低水位时期，研究区西部边缘区域水位埋深最大，达 1.5 m，采卤泵站位于研究区西南方向，水位埋深的调整可能跟泵站采卤方案有关，高水位期持续补水，西部水位抬升，低水位期停止补水，西部水位降低。在 S1~S2 线呈现自东向西的 pH 的低值带、比重和 TDS 的高值过渡带，上述三个特征带具有位置重合的特征，说明这一区域为受补水影响较小的区域。且相较于 8 月高水位期，10 月低水位期该条带沿着水流方向进一步扩张，说明补水范围进一步收缩，至低水位期未受到补水影响的范围最大。此外 D11 钻孔在 8 月与近湖岸的其他钻孔呈现差异性分布，呈现 TDS 和比重的高值现象。

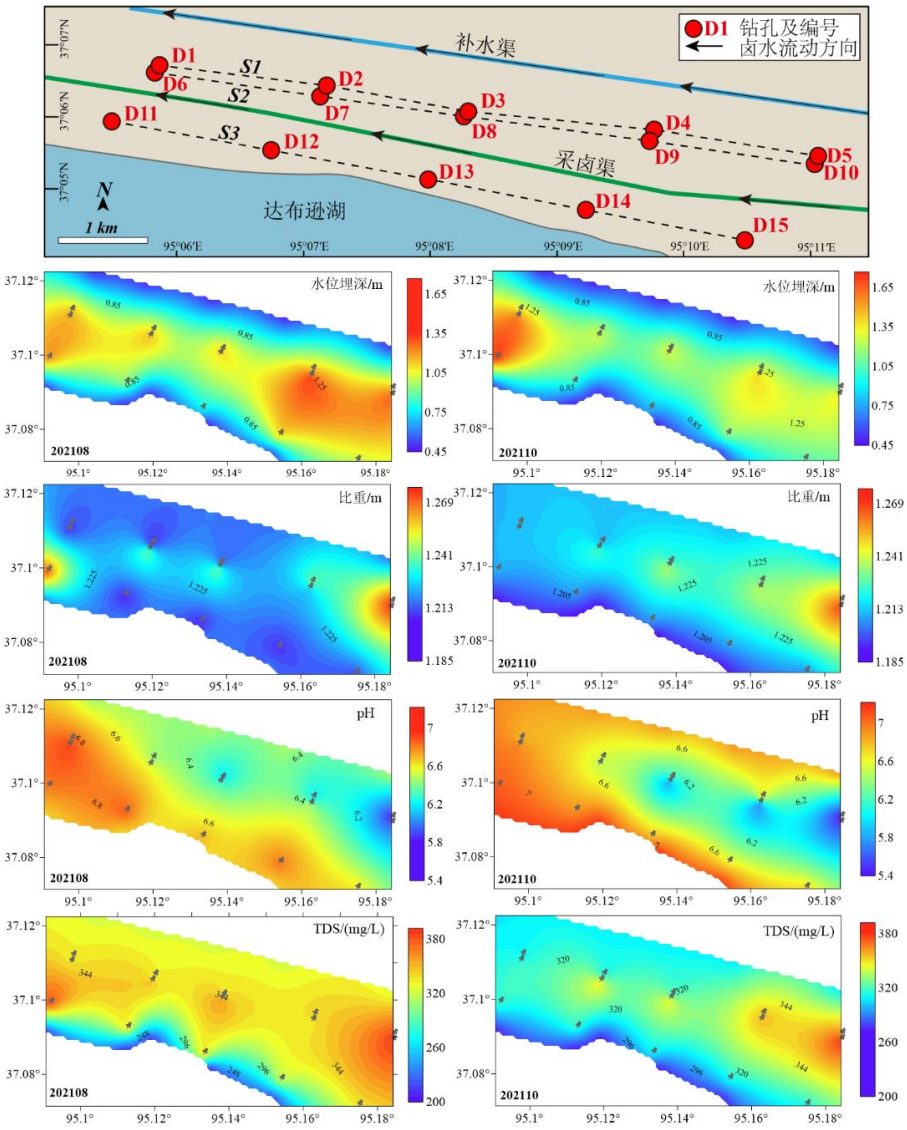

图 3 地下卤水水化参数的空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of hydration parameters in underground brine

3.2.2 水化学组分的时空变化特征　根据瓦里亚什科分类[25]，所有水体均为卤水演化晚期的氯化物型（附表 2），水体中的主要阴离子均为 Cl^-，主要阳离子为 Na^+、Mg^{2+}和 K^+，水体的分异主要源自阳离子为 Na^+、Mg^{2+}和 K^+浓度的变化。8 月高水位期，在水平方向上，除了以 D11 钻孔为核心的西南边缘区域和以 D05 和 D10 为中心的东北边缘区域呈现高 Mg^{2+}和低 Na^+的特征，研究区整体呈现 Na^+浓度两边高（S1 和 S3 线）中间低（S2 线），Mg^{2+}浓度两边低（S1 和 S3 线）中间高（S2 线）。K^+浓度存在一个高值带，从 S1 线的 D04 孔开始沿着采卤渠水流方向逐步靠近 S2 线在 D07 孔趋于结束（图 4）。

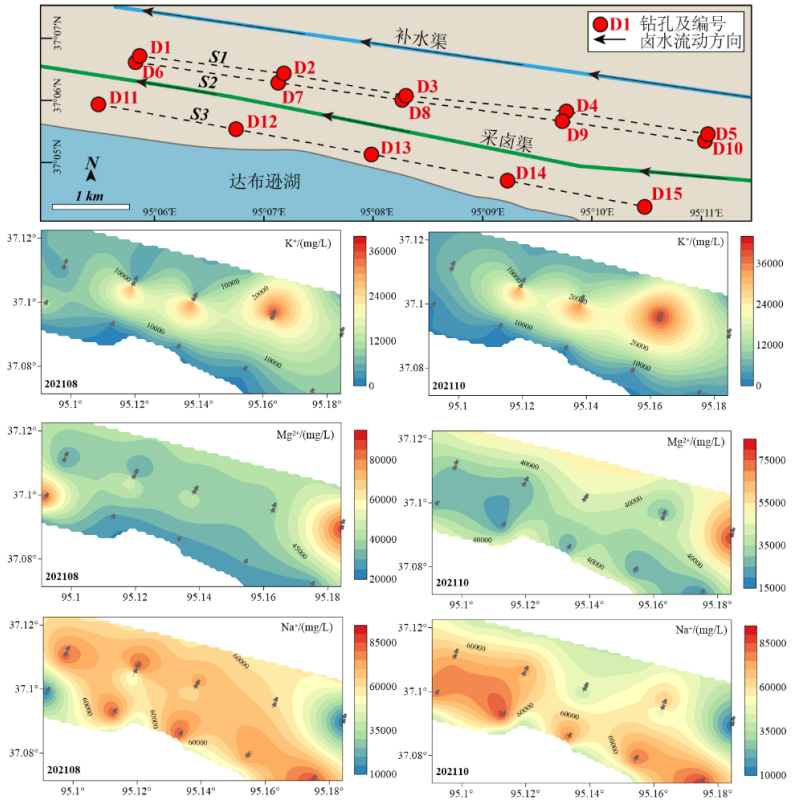

图 4　地下卤水水化学组分的空间变化特征

Fig.4 Spatial variation characteristics of the chemical components in underground brine

由于钻孔成孔后大部分塌陷，除 D01 钻孔外，其余钻孔采样深度均<3 m，因此选择采样深度最大的 D01 钻孔进行垂向上的水化学特征分析（图 5），随着深度增加，四种离子浓度均在水深 4~5 m 的位置出现较大变化，K^+、Mg^{2+}、Cl^-同步增大，Na^+减小。其中 K^+不同于其他离子，从平均约 1.0 g/L 增大至 2.6 g/L，之后又恢复至平均浓度。相较于 8 月，10 月低水位期以 D05 和 D10 为核心的高 Cl^-、Mg^{2+}和低 Na^+的区域沿着 S1 和 S2 线进一步扩大至 D02 和 D07 钻孔位置。而以 D11 钻孔为核心的异常区域消失，K^+浓度的高值带持续存在。在垂向上，10 月四种离子浓度变化的深度区间更大，范围达到 4~7 m。

4 讨论

4.1 矿物组成变化对补水溶矿效果的指示意义

察尔汗盐湖固相钾盐资源达到 2.96 亿吨，人工补水溶矿（固液转化）是该盐湖区低品位固体钾盐（光卤石和钾石盐）开采的有效方法[10,13,18]。补水溶矿本质上是易溶盐层与高浓度多组分卤水系统之间发生的水动力对流扩散-化学平衡-孔隙结构演化相互耦合的物理化学过程，该过程时刻伴随着卤水水化学组成特征的变化[27]，这对于人工补水溶矿效果评价具有关键的指示意义。

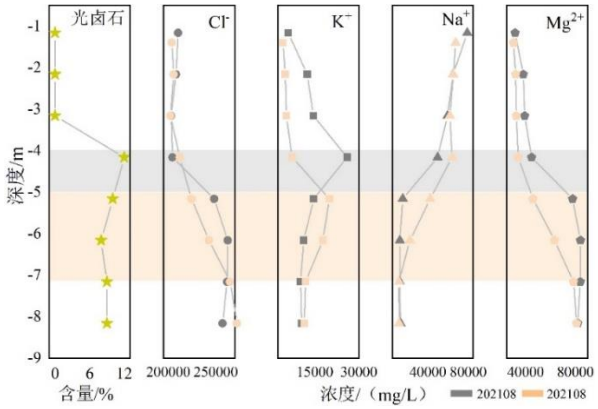

图 5 D01 钻孔卤水水化学组分的垂向分布特征

Fig.5 Vertical distribution characteristics of chemical components of brine in D01 borehole

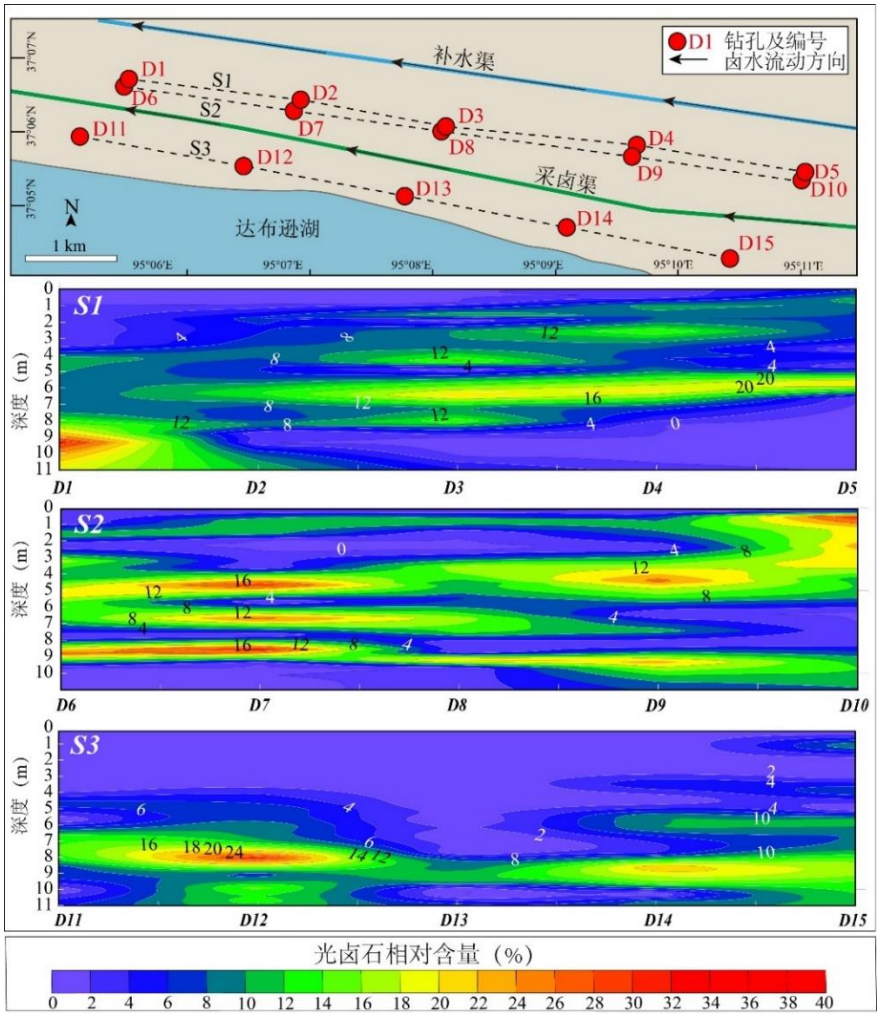

图 6 研究区钻孔岩心样品光卤石随钻孔位置及深度含量分布

Fig.6 Distribution of carnallite in borehole core samples from the study area by location and depth

分析结果表明，研究区主要固体钾盐矿物组成为光卤石，局部存在极少量钾石盐（表 1 和图 6）。由图 6 可知，靠近补水渠的 S1 线(钻孔 D1~D5)中，光卤石埋深沿着补水渠卤水流动方向（D5→D1）逐渐增加，从接近地表（0 m）增加至 4 m。以地下卤水面（1.1～1.17 m）区分，在地下卤水面以下为饱和带，而地下卤水自由面以上为非饱和带。D1、D2 和 D3 中光卤石均位于饱和带，非饱和带没有发现光卤石矿物，钻孔 D4 和 D5 中，非饱和带与饱和带均有光卤石出现。S2 线，仅有位于最西侧的 D6 孔中光卤石位于地下水位以下。S3 线，所有光卤石均位于水位以下的饱和带。饱和带内所存在的光卤石指示卤水化学条件满足光卤石的析出条件，而非饱和带光卤石的存在指示卤水化学条件的改变未造成光卤石的有效溶解。由此可见，光卤石埋深可以作为受到补水影响程度大小的重要判据，当埋深位于地下水位以上，则未受到补水影响；当光卤石埋深位于地下水位以下，则补水溶矿效果与储层光卤石埋深之间存在正比关系，即埋深越深则溶矿效率越大。以上光卤石含量分布特征表明，目前受到人工补水溶矿的区域仅有 S1 线 D1、D2、D3 和 S2 线 D6 钻孔所在区域，其他区域均未受到补水渠的影响。浅部仍存在大量待溶固体钾盐资源，溶矿效果不理想。与 S1 和 S2 线（D1~D5 和 D6~D10 钻孔）中光卤石含量分布特征具有明显区别的是，位于达布逊湖北岸和采卤渠之间的 S3 线钻孔（D11~D15）光卤石均位于地下水位以下，且在 6 m 以浅的含水层中，光卤石的含量明显较低，指示了达布逊湖湖水对于光卤石补水溶矿强烈的补给作用。通过汇总以上光卤石含量组成分布特征，可圈定较为有效的补水溶矿的大致范围为 D1~D3、D6 及 D11~D14，其中 D11~D14 主要受达布逊湖湖水的补给影响，人工补水溶矿范围主要为 D1~D3、D6。

除补水溶矿目标矿物光卤石外，其他矿物的含量变化也对人工补水溶矿的效果具有一定的指示意义。从钻孔中盐类矿物的含量分布特征来看，水氯镁石、方解石、石膏和硬石膏与光卤石具有一定程度上相似的含量分布特征（图 6 和图 7），无论补水影响与否，整体来看，石盐矿物从疏干层含量高值区迅速降低至水位以下的低值区，且与碎屑矿物呈明显的反相关关系。水位以上层位主要以石盐沉积为主，少碎屑矿物，其产生是受到地下卤水蒸发过程中毛细作用的结果，在毛细作用下，卤水上升并蒸发浓缩，析出石盐及光卤石晶体，而碎屑矿物由于难溶于水沉淀于水位以下的石盐晶体孔隙中。在补水入渗过程中，补给水体首先溶解大量石盐矿物，直至石盐饱和，之后，石盐饱和的补给水体溶解光卤石矿物，并发生石盐矿物结晶析出，表现为石盐矿物含量略有上升的趋势。这一特征在主要受达布逊湖湖水补给的 S3 线 D11~D14 号钻孔中也有所体现。在 S2 线 D7~D10 钻孔中，浅层光卤石与石盐整体上呈现一致的含量分布特征，进一步指示了该区域补水溶矿效果不佳。各钻孔中-下层（>4 m）光卤石和石盐也基本具有这一含量分布特征，表明研究区中-下层光卤石受补水作用微弱，有待加强开采。

4.2 储卤层水化学时空分异特征及其指示意义

综合储层岩芯矿物组成和地下卤水水化学特征，水体的阴离子主要为 Cl^-，水体分异主要是 Na^+、Mg^{2+}和 K^+等阳离子浓度的变化，储卤层盐类矿物主要为石盐，其次为光卤石。不同的离子比值可以有效表征水体的混合及矿物的溶解沉淀特征[19,28]。结合前述岩心矿物和卤水水化学结果，钻孔 D05 和 D10 代表了未受补水影响的初始地下卤水端元，其 Cl^-/Na^+和 Cl^-/K^++Mg^{2+}摩尔比值分别为 15.5 和 2.0，补水端元的比值均值分别为 2.3 和 3.2。其他钻孔中卤水的 Cl^-/Na^+摩尔比值从 18.6 下降至 1.4；Cl^-/K^++Mg^{2+}摩尔比值从 1.9 升高到 6.4，TDS 也轻微下降，表明地下卤水受到低矿化度水体的混合，指示了湖水和渠水的侧向补给，而且图 8 中可以看出 S1 线的 Cl^-/Na^+比值更低，Cl^-/K^++Mg^{2+}比值整体更高，侧面反映了持续的湖水补给使得地下卤水中补给水体占比更高。

结合 2021 年 8 月（高水位期）与 2021 年 10 月（低水位期）的卤水水化学时空分布特征，靠近湖岸线（S3 线）与补水渠（S1 线）的区域水位埋深较小，卤水中 Na^+浓度相对较高，Mg^{2+}、Cl^-较低；而靠近采卤渠（S2 线）区域水位埋深较大，呈现低 Na^+、高 Mg^{2+}、高 Cl^-特征（图 3 和图 4），K^+在 S1 线至 S2 线之间形成自东向西的高值条带，推测 S1 线区域主要跟人工补采引起的水动力条件变化及局部固体钾盐溶解有关[13]，而 S3 线主要受达布逊湖水的天然补给影响[27]。补水过程中，低矿化度的湖表水进入储卤层，与石盐、钾石盐、光卤石等易溶盐类矿物发生溶解–再平衡作用[4,10,29]。低水位期（10 月），地下水位普遍下降，采卤渠水位下降达 0.7 m，高 Mg^{2+}、Cl^-区域向采卤渠方向扩展，K^+高值带依然存在，表明采卤活动增强，并可能形成局部降落漏斗，人工补采持续影响卤水化学组成。

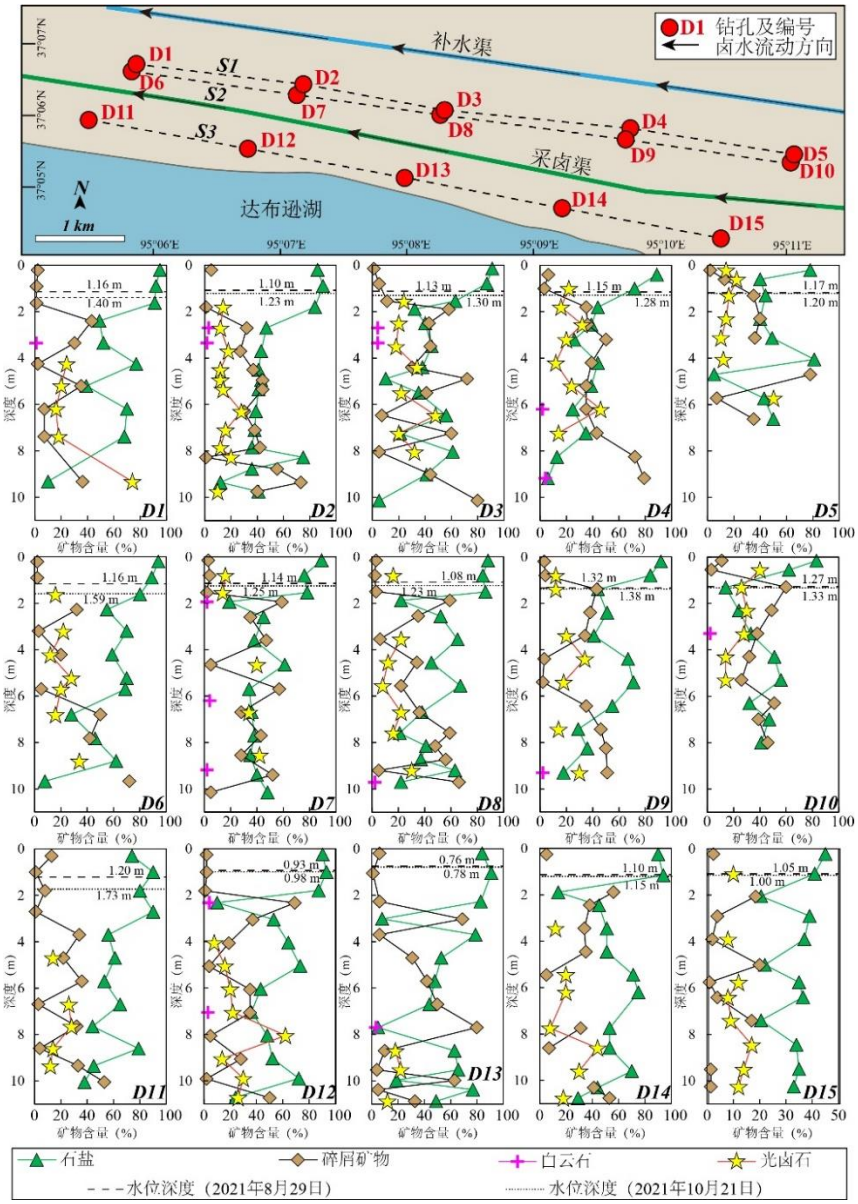

图 7 研究区主要矿物含量随钻孔位置及深度含量分布

Fig.7 Distribution of main mineral contents with borehole location and depth in the study area

卤水化学组成在垂向上呈现明显的“拐点”变化（图 6），即 4～5 m 深度附近 Mg^{2+}、Cl^-浓度显著升高，Na^+相应降低，与察尔汗盐湖典型卤水垂向分带特征一致，即上部为石盐–钾石盐水段，下部逐渐过渡为光卤石–水氯镁石水段[23]。低水位期该“拐点”下移至 4～7 m，说明随着水位下降，上部低矿化度卤水向下迁移，促进深部盐类矿物进一步溶解。而 K^+在“拐点”位置的突增可能指示了补水溶钾的核心富集带，光卤石在 4m 的位置含量从 0 突增至 10%左右，也进一步指示了补水溶钾的位置深度。对比高、低水位时期的主要阳离子浓度变化，发现低水位期卤水中 K^+、Mg^{2+}浓度相对升高，尤其是在采卤渠附近及垂向“拐点”以下层段，表明补水促进了固体钾盐（主要为钾石盐与光卤石）的溶解的同时，稀释了卤水中 K^+、Mg^{2+}浓度[17,19]。

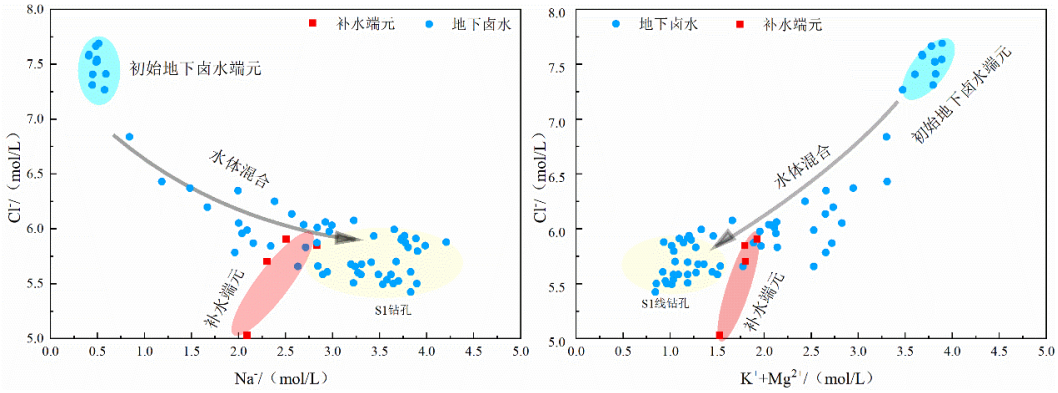

图 8 端元水体混合的离子比值变化

Fig.8 Variations in ion ratios during end-member water mixing

4.3 补水溶矿过程中地下卤水的补水模式与钾的富集机制

4.3.1 补水溶矿过程中地下卤水的补给模式　基于前述水化学与矿物组成的空间特征，察尔汗盐湖达布逊区段在补水溶矿过程中，地下卤水的补给主要受两种模式控制：一是人工补水渠引水驱动的侧向入渗补给，二是达布逊湖水的天然侧向补给。二者在影响范围、水动力强度及水化学效应上具有明显差异。人工补水渠侧渗补给主要发生在 S1-S2 线，研究区西部（S1-S2 线）受人工补水影响显著，低矿化度渠水入渗导致近渠区域（D1–D3 孔、D6 孔）水位埋深较浅，卤水中 Na^+相对富集，Mg^{2+}、Cl^-浓度相对较低，Cl^-/Na^+比值较低，钻孔岩心中光卤石矿物埋深低于卤水水位，反映渠水入渗并溶解了水位附近光卤石矿物，但溶解矿层厚度有限，溶解厚度最大不超过 3.0 m。S1-S2 线其他钻孔光卤石未发生明显溶解。但在靠中部的区域（D4 孔，D7-9 孔），其水化学与矿物组成在空间分布上存在解耦性，该区域存在光卤石矿物，同时又是卤水钾的高值带，其 Na^+、Mg^{2+}、Cl^-等离子浓度处于两水体端元过渡阶段，反映了补水与储层卤水较低程度的混合，补水程度低使得光卤石发生部分溶解，释放 K^+、Mg^{2+}、Cl^-等离子。由于石盐（NaCl）在同期可能发生局部析出，导致 Na^+浓度相对下降，K^+与 Mg^{2+}在孔隙卤水中相对富集。但由于开采过程中水位波动受人工调控明显，补水强度受局部降落漏斗及溶解优势通道的影响，对固体钾盐的溶解范围和溶解效果均有限。湖水天然侧渗补给主要发生在研究区近湖岸区域（S3 线）。该补给方式补给范围广、持续时间长，使得近湖区域（如 D11–D15 孔）水位埋深亦较小，卤水化学组成表现为 Na^+较高、Mg^{2+}与 Cl^-较低，且光卤石仅在 D15 的浅部有分布，而在垂向上，补水溶矿范围最深可达 8m，说明湖水长期渗流补给对表层乃至较深部的固体钾盐具有较好的溶解效果。

通过光卤石埋深变化计算湖水天然补给及人工渠补溶矿效率，湖水天然补给区 S3 线光卤石埋深在 1 ~ 9 m，溶矿效率 10% ~90%，平均溶矿效率 43.9%。人工渠补区 S1 线光卤石埋深 0 ~ 4 m，溶矿效率 0 ~44.4%，平均溶矿效率为 18.2%，表明人工渠补存在溶矿不均匀和溶矿效率低的问题，后续在补水优化方面应考虑增设补水井点，缩小补水间距以提高溶矿均匀性，同时在低水位期适当延长采卤强度，利用水位降深促进深部光卤石溶解。

4.3.2 补水溶矿过程中钾的迁移富集机制　高水位期（8 月），采卤渠渠水位为 2.11 m，S1-S2 线钻孔水位埋深在 1.08 ~ 1.32 m，整体水力梯度较小，约 0.002，渗流速度缓慢。低水位期（10 月），采卤渠持续抽水导致水位降深达 0.7 m，水位达到 2.8m，水力梯度增大至 0.003 左右，渗流速度增大。沿 S1-S2-采卤渠方向形成定向水流，驱动溶解态 K^+向采卤渠迁移，并在 D4-D7 孔一带形成 K^+高值条带（图 4）。该条带的位置与水力梯度最大区域吻合，表明水力梯度是 K^+发生侧向迁移并局部富集的首要驱动力，K^+高值条带反映出补水渠-采卤渠之间的水力梯度促进了溶解态钾的侧向迁移与局部滞留。而在垂向上，卤水存在明显的化学分带，在高水位期（8 月），约 4~5m 深度出现 Mg^{2+}、Cl^-、K^+同步升高的“拐点”，与光卤石-水氯镁石矿物组合层位相对应。该层位为钾的主要富集带。低水位期（10 月），“拐点”下移、K^+富

集层厚度增大至 4~7m。随着卤水位下降，低矿化度水体向下迁移，打破光卤石矿物的溶解-平衡状态，光卤石溶解，K^+、Mg^{2+}、Cl^-同时进入液相，导致卤水中 Mg^{2+}、Cl^-、K^+同步升高。水位下降越大，低矿化度水垂向穿透深度越大，固体钾盐的溶解层位越深，K^+富集带厚度也随之增大。因此，水位动态不仅通过增大水力梯度促进 K^+侧向迁移，还通过增强垂向对流扩大溶解带厚度，二者共同控制了 K^+在空间上的迁移和富集格局。

根据水化学分析（附表 2），补水端元（湖水和渠水）具有低 Mg^{2+}、低 Cl^-、高 Na^+/Mg^{2+}比的特点，而地下卤水端元则为高 Mg^{2+}、高 Cl^-、低 Na^+。在 25 ℃下的 Na^+、K^+、Mg^{2+} // Cl^-体系相图中（图 9），卤水中盐类矿物结晶顺序整体由石盐（NaCl）向光卤石（$KCl·MgCl_2·6H_2O$）演化。当低矿化度的补水端元进入储卤层并与高浓度地下卤水混合时，混合溶液的组成点将沿两者连线移动。光卤石由稳定态转为不饱和，原有的溶解平衡被打破，光卤石溶解，K^+、Mg^{2+}、Cl^-同时进入液相，K^+在卤水中富集。

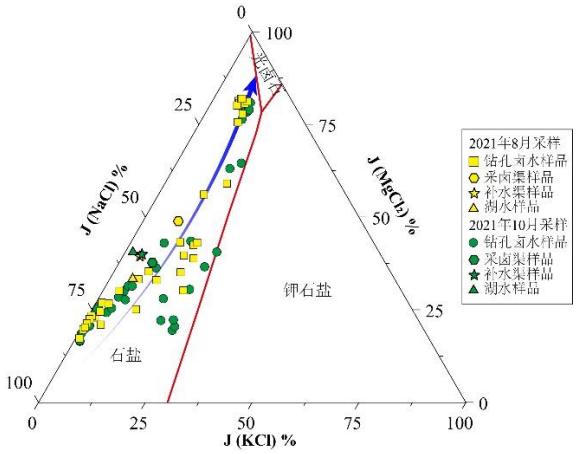

图 9 Na^+、K^+、Mg^{2+} // Cl^-体系相图

Fig.9 Na^+, K^+, Mg^{2+} // Cl^- System Phase Diagram

综上所述，水位动态通过水力梯度驱动 K^+向采卤渠定向迁移，同时水动力与水化学的耦合作用驱动光卤石的溶解，水位下降强化垂向对流，促使光卤石溶解带向下扩展，二者共同控制了 K^+在空间上的迁移路径与富集格局。

5 结论

本研究以察尔汗盐湖达布逊区段为研究对象，通过分析钻孔岩心矿物组成与地下卤水水化学的时空分异特征，探讨了补水溶矿过程中的固液转化机制及钾盐富集规律，主要得出以下结论：

1)光卤石埋深有效指示了补水溶矿的影响范围与效果。研究表明，光卤石的埋深变化是判断补水影响程度的重要判据。受补水影响显著的区域（如补水渠附近的 S1 线及 S2 线西侧），光卤石均位于地下水位以下，光卤石的溶解与石盐的析出呈现明显的反比关系。相比之下，未受明显影响的区域（S1 和 S2 线的中部及东部），光卤石在非饱和带及浅层仍有分布，指示溶矿效果尚不理想。此外，湖水天然补给区（S3 线）光卤石贫化带深达 6 m，显示了强烈的天然溶矿作用。

2)卤水水化学空间变化指示补水溶矿的核心位置。储卤层卤水以 Cl^-为主，阳离子 Na^+、Mg^{2+}和 K^+分异显著，近湖岸与近补水渠区域 Na^+相对富集、Mg^{2+}和 Cl^-较低；卤水在垂向上存在显著化学分异现象，4~5 m 深度存在水化学“拐点”，上部为石盐-钾石盐水段、下部过渡为光卤石-水氯镁石水段，水位下降时拐点下移，指示补水溶矿作用向深部延伸。

3)水位动态是补水溶矿过程促进 K^+迁移富集的重要控制因素。人工渠补水与湖水天然补给是主要的补水模式，水力梯度驱动 K^+向低水位方向发生侧向迁移富集，同时从高水位期到低水位期，水位下降增大了 K^+的垂向溶解富集深度。

4)渠补-渠采溶矿工艺转化效率偏低。目前的补水溶矿工程溶矿范围小，仅在补水渠近端个别区域溶矿效率达到44%，且湖岸补给区域溶矿效率显著大于前者。而研究区大部分区域的中-深层（> 4 m）仍赋存大量未被有效开采的光卤石资源。现有的水动力条件尚未能充分驱动溶剂波及深部储层，说明人工补水溶矿工艺仍有较大的优化提升空间，未来应重点向“更宽更深”补水目标调整溶矿方案。

6 参考文献

[1] Brownlie WJ, Alexander P, Maslin M *et al*. Global food security threatened by potassium neglect. *Nature Food*, 2024, **5**(2): 111-115. DOI: 10.1038/s43016-024-00929-8.

[2] Wang SL, Qi CJ, Cui BJ *et al*. Analysis and prospect of exploration trends of potassium salt resources in China. *Acta Geologica Sinica*, 2024, **98**(10): 2978-2988. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024318. [王淑丽，祁才吉，崔博京等. 中国钾盐资源勘查趋势分析与展望. 地质学报, 2024, **98**(10): 2978-2988.]

[3] Wang Y, Liu QY, Zheng HY *et al*. Supply and demand situation and security guarantee degree of potash in China. *Geology in China*, 2026, **53**(2): 507-516. DOI: 10.12029/gc20250422002. [王莹，刘秋颖，郑厚义等. 中国钾盐资源供需形势与安全保障程度研究. 中国地质, 2026, **53**(2): 507-516.]

[4] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖. 北京：科学出版社，1987.

[5] 于升松，谭红兵，刘兴起等. 察尔汗盐湖资源可持续利用研究. 北京：科学出版社，2009.

[6] Wang SJ, Wang XF. Study of solid potassium mineable ore reserves and recoverable scale of chaerhan salt lake. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2013, **42**(12): 4-7. DOI: 10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2013.12.007. [王石军，王兴富. 察尔汗盐湖固体钾矿储量分析与可采规模研究. 盐业与化工, 2013, **42**(12): 4-7.]

[7] Wang SJ. Prospects for tapping the resources of the chaerhan salt lake. *Geology of Chemical Minerals*, 1999, **21**(3): 175-180. [王石军. 察尔汗盐湖资源开发前景展望.化工矿产地质, 1999, **21**(3): 175-180.]

[8] Zhao YJ, Wang M, Li JL *et al*. Dissolving exploitation of solid potassium deposit east of Qarhan Salt Lake railway. *Applied Chemical Industry*, 2016, **45**(2): 260-264. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20151224.017. [赵有璟，王敏，李锦丽等. 察尔汗盐湖铁路以东固体钾矿的溶采试验. 应用化工, 2016, **45**(2): 260-264.]

[9] Wang XF, Wang SJ, Wang LH *et al.* Relationship of Conversion rate with Solid Potash Content for Qaidam Low grade Solid Potash. *Journal of Salt Lake Research*, 2020, **28** (3): 61-65. DOI: 10. 12119 /j. yhyj. 202003007. [王兴富，王石军，王罗海等. 柴达木低品位固体钾矿溶解转化率与品位关系. 盐湖研究, 2020, **28** (3): 61-65.]

[10] Wang WX, Li WP, Liu ZY *et al*. Hydrodynamic and hydrochemical condition analysis of low grade solid potassium liquefy exploitation experiment. *China Mining Magazine*, 2013, **22**(7): 114-119. [王文祥，李文鹏，刘振英等. 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.中国矿业, 2013, **22**(7): 114-119.]

[11] Wang WX, Li WP, Liu ZY *et al*. A tentative discussion on *in-situ* experimental liquefaction and exploitation of low grade solid potassium resources in Qarhan salt lake. *Mineral Deposits*, 2010, **29**(4): 697-703. DOI: 10.16111/j.0258-7106.2010.04.004. [王文祥，李文鹏，刘振英等. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场试验研究探讨. 矿床地质, 2010, **29**(4): 697-703.]

[12] Song G, Zhao YY, Ma HT *et al.* Research on these dimentary characteristics of solid sylvite after Liquefaction in the Bieletan area of Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 2024, **98** (10): 2873-2882. DOI:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024204. [宋高，赵元艺，马宏涛等. 柴达木盆地别勒滩区段固体钾盐液化后矿物沉积特征. 地质学报, 2024, **98** (10): 2873-2882.]

[13] Wang SJ. Discussion on characteristics of workable reserves of potassium and magnesium salt deposit in Chaerhan Salt Lake and its mining. *Industrial Minerals & Processing*, 2005, **34**(1): 30-32. DOI: 10.16283/j.cnki.hgkwyjg.2005.01.010. [王石军. 察尔汗盐湖钾镁盐矿床可采储量特征及其开采探讨. 化工矿物与加工, 2005, **34**(1): 30-32.]

[14] Qin ZJ, Li QK, Li WX *et al*. Elemental variations and mechanisms of brines in the context of large-scale exploitation: A case study of xitaijnar salt lake, Qaidam Basin. *Aquatic Geochemistry*, 2024, **30**(3): 121-141. DOI: 10.1007/s10498-023-09419-y.

[15] Kong ZH, Wang GC, Li QY *et al*. Dynamic characteristics and evolution laws of underground brine in Mahai salt lake of Qaidam Basin during mining process. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 10778. DOI: 10.1038/s41598-024-61196-y.

[16] Duan R, Chang L, Gu XF *et al*. The hydrogeochemical processes of groundwater in the bieletan area, the western potash production region in China.

Water, 2024, **16**(13): 1833. DOI: 10.3390/w16131833.

[17] 李梦玲. 察尔汗盐湖卤水动态变化特征及其对固液转化过程的指示作用. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2023.

[18] Li RQ, Liu CL, Jiao PC *et al*. Numerical simulation analysis on potash dissolution extraction from low-grade solid potash ore in modern salt lake—a case study from Bieletan mining area in the Qarhan salt lake. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(7): 2150-2159. [李瑞琴, 刘成林, 焦鹏程等. 现代盐湖低品位固体钾盐溶矿数值模拟研究——以察尔汗盐湖别勒滩矿区为例. 地质学报, 2021, **95**(7): 2150-2159.]

[19] Li RQ, Liu CL, Jiao PC *et al*. Simulation study on the mining conditions of dissolution of low grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake. *Scientific Reports*, 2021, **11**: 10539. DOI: 10.1038/s41598-021-88818-z.

[20] Mo M, Gu SQ, Zheng WZ *et al*. Characteristics and genesis of modern potash deposits on the southern bank of the dabuxun lake, Qinghai Province. *Geological Review*, 1986, **32**(2): 160-164. DOI: 10.16509/j.georeview.1986.02.010. [莫珉, 谷树起, 郑文忠等. 达布逊湖南岸现代钾盐沉积特征及其成因分析. 地质论评, 1986, **32**(2): 160-164.]

[21] Tan HB, Yu SS. The study on water environment geochemistry in Golmud River watershed. *Journal of Salt Lake Research*, 2001, **9**(2): 66-67. [谭红兵, 于升松. 格尔木河流域水环境地球化学研究. 盐湖研究, 2001, **9**(2): 66-67.]

[22] Cai KQ, Gao JH. Formation conditions of potash deposit in Chaerhan Salt Lake. *Earth Science Frontiers*, 1994, **1**(4): 231-233. [蔡克勤, 高建华. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件. 地学前缘, 1994, **1**(4): 231-233.]

[23] Zeng ZR. Vertical hydrochemical zoning of intercrystalline brine in Chaerhan Salt Lake and its formation mechanism. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 1983, **5**(2): 59-64. DOI: 10.19814/j.jese.1983.02.008. [曾章仁. 察尔汗盐湖晶间卤水水化学垂直分带及其形成机理. 长安大学学报: 地球科学版, 1983, **5**(2): 59-64.]

[24] 中国科学院青海盐湖研究所. 卤水和盐的分析方法. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2025.

[25] Val'yashko NM. Genetic classification of salt deposits. Moscow: Nauka Publishers, 1965.

[26] Han G, Fan QS, Xu JX *et al*. Characteristics of deep brine reservoirs and origin of enrichment of lithium and boron resources in the eboliang Ⅱ structure in the western Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, **30**(2): 70-78. DOI: 10.12119/j.yhyj.202202008. [韩光, 樊启顺, 许建新等. 柴达木盆地西部鄂博梁Ⅱ号构造深层卤水储层特征与锂硼资源富集成因. 盐湖研究, 2022, **30**(2): 70-78.]

[27] Ngombe OGD, Walter J, Chesnaux R *et al*. Application of hierarchical cluster analysis and principal component analysis to identify compositional trends of brine in crystalline basements and sedimentary basins. *Applied Geochemistry*, 2024, **169**: 106030. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106030.

[28] Liu BS, Liu WP, Zhang J *et al*. Analysis on the effective utilization of lake water in dabuxun lake. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2020, **49**(10): 8-10. DOI: 10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2020.10.003. [刘斌山, 刘万平, 张娟等. 达布逊湖湖水有效利用浅析. 盐科学与化工, 2020, **49**(10): 8-10.]

[29] Chang WJ, Yuan XL, Liu JB *et al*. Research on the changes in physical properties during the seepage-dissolution process of potassium salt-bearing reservoir in qarhan salt lake. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, **32**(1): 99-106. [常文静, 袁小龙, 刘久波等. 察尔汗盐湖含钾盐储层介质渗流-溶解过程中物性参数变化特征研究. 盐湖研究, 2024, **32**(1): 99-106.]