

气候变化与人类活动对察尔汗盐湖矿-水关系的影响

韩积斌^{1,2**}, 王建萍^{1,2**}, 曹毅章⁴, 赵春涛^{1,2}, 霍语睿^{1,2,3}, 张璐茜^{1,2,3}, 马洪奎^{1,2}

(1. 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)

(2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008)

(3. 中国科学院大学, 北京 100049)

(4. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 格尔木 816000)

摘要: 察尔汗盐湖是我国重要的钾肥生产基地, 其水-矿平衡关系对资源可持续开发与钾肥保障安全至关重要。本研究在气候暖湿化与强烈人类活动背景下, 针对矿区水-矿关系演化机制不清的关键问题, 基于收集的近30多年(1990-2024)的水文气象数据, 查明了察尔汗盐湖矿区影响水-矿关系的自然和人类活动的关键因素; 采用 Pearson 相关性分析法, 揭示了察尔汗盐湖矿区水-矿系统的演变规律与驱动因素。研究表明: 近20年来(2000-2024年), 矿区气候呈现“暖干”向“暖湿”的转变, 流域径流量增加了20%以上, 矿区温度上升1.5~2.0℃, 蒸发量则减小了18.5%。资源大规模开发活动, 导致矿区补排水量呈负、潜卤水水位大幅下降及KCl品位降低的负面影响, 而人工补水溶矿作用, 缓解了这些负面影响的加剧。将水-矿关系演变分为三个阶段: 由自然状态下的“水文气象因素主导”到“自然因素和人类活动共同作用”, 最终演变为“人类活动影响主导”的轨迹, 气候暖湿化、卤水开采和补水溶矿是驱动这一转变的关键, 其中卤水开采和补水溶矿是水-矿平衡调控的首选条件。研究成果为实现察尔汗盐湖矿区水-矿平衡和管理方面提供科学依据。

关键词: 水-矿关系; 演变; 气候暖湿化; 大规模开采; 察尔汗盐湖

Influence of climate change and human activities on the water-salt relationship in Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin

Han Jibin^{1,2**}, Wang Jianping^{1,2**}, Cao Yizhang⁴, Zhao Chuntao^{1,2}, Huo Yurui^{1,2,3}, Zhang Luxi^{1,2,3}, Ma Hongkui^{1,2,3}

(1: Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P.R. China)

(2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008, P.R. China)

(3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China)

(4. Qinghai Provincial Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud 816000, P.R. China)

Abstract: Abstract: The Qarhan Salt Lake is pivotal to potassium fertilizer production in China, underpinning the fundamental water-salt relationship (Here, the term “water-salt” refers to the coupled mass balance of water (liquid) and potash (solid + dissolved) in the Qarhan playa-lake system) for sustainable resource management and stable

*2025-10-23 收稿; 2026-01-08 收修改稿; 2026-04-08 录用。

青海省应用基础研究项目(2025-ZJ-754)、国家自然科学基金项目(U24A20598)联合资助。

** 通信作者。E-mail: jbhan@isl.ac.cn; wangjianping@isl.ac.cn

potassium fertilizer supply. This study explores the complex evolutionary mechanisms of the water-salt relationship in the mining area under the combined impacts of climate change and human activities. Based on nearly three decades of hydrometeorological datasets spanning 1990–2024, this study identified the evolutionary trends of key factors controlling the water-salt relationship in the Qarhan Salt Lake mining area. Pearson correlation analysis was applied to elucidate the evolutionary patterns and driving mechanisms of the regional water-salt system. The results show that the climate of the mining area has shifted from a “warm and dry” regime to a “warm and humid” regime over the past two decades (2000–2024), with the recharge river runoff increasing by more than 20% and regional temperature rising by 1.5–2.0 °C, while the evaporation rate decreasing by 18.5%. Large-scale resource exploitation has adversely altered regional water replenishment, resulting in a pronounced decline in confined brine levels and reduced KCl grade. Artificial water replenishment and mineral dissolution practices can effectively mitigate these adverse ecological and hydrological impacts. The evolution of water-mineral interactions in the study area can be classified into three successive stages. The system initially transitioned from a natural hydrometeorological-dominated state to a co-dominated state by natural processes and human activities, and eventually evolved into a human-dominated evolutionary trajectory. Climate warming, brine mining, and artificial water recharge for mineral dissolution are the primary drivers responsible for this staged evolution, among which brine extraction and artificial water recharge constitute the core regulatory conditions for regional water-salt balance. These findings provide a robust scientific basis for the targeted regulation and sustainable management of water-salt balance in the Qarhan Salt Lake mining area.

Keywords: Water-salt relationship; Evolution; Climate warming; Large-scale mining; Qarhan Salt Lake.

盐湖卤水资源是农业、新能源、化工、航空等领域的工业原料，是我国重要的战略资源。盐湖资源的开发利用对保障我国的粮食安全和 K, Li, B, Rb, Cs 等战略资源安全具有十分重要的意义。现代盐湖作为流域终端的尾间湖，河水-地下水-盐湖卤水（湖表水）-地下卤水之间存在动态的水力交换，通过补给与强烈蒸发排泄过程，在自然状态下使矿区的水-矿关系维持动态稳定，保证了地下卤水品位的稳定性，有利于地下卤水资源的可持续开采。随着青藏高原气候环境的暖湿化^[1,2]，改变了盆山水文气象条件，进而影响蒸发量、降水量及水-矿动态平衡关系^[3]。同时，盐湖资源大规模开发、人工补水溶矿、截流建堤以及防洪蓄水等人类活动的加剧，导致盐湖矿区的补排关系发生显著变化，造成矿区水-矿关系失衡，影响矿区卤水的品位、水位埋深、元素迁移富集路径等，进而间接影响盐湖卤水资源的可持续开采，给钾肥资源安全带来严峻的挑战。分析不同开发阶段气候变化与人类活动对水-矿关系的影响大小，查明影响水-矿关系的关键因素，对盐湖资源合理开发和保护具有十分重要的意义。

察尔汗盐湖是我国目前探明储量最大的可溶性钾镁锂矿床，是最为重要的钾肥生产基地，承载着我国 80% 以上的钾肥供应，肩负着保障我国钾肥安全和建立世界级盐湖产业基地的重要使命^[4]。受青藏高原气候变化的影响，近十几年来察尔汗盐湖周缘山区降水明显增多^[5]，察尔汗盐湖矿区主要补给河——格尔木河径流显著增大，洪水频次增加。在 1989 年、2009 年、2010 年、2018 年、2019 年夏季，察尔汗盐湖遭遇严重水灾，大面积盐田被淹，局部地区卤水品位大幅下降，生产中断数月，给卤水开采工艺带来巨大冲击，盐湖企业损失惨重^[6,7]。在这种背景下，2009 年通过修建长达 90 km 的防洪堤抵御洪水，截流建堤使矿区的补水方式由原来的河流自然补给转变为现在的人工控制补给。与此同时，随着钾肥产量的不断增大，察尔汗盐湖卤水开采量也急剧增大，由 90 年代的年均 5000 m³/a 增长至 2019 年的约 5.0×10⁸ m³/a，大规模开采已造成矿区水位埋深严重下降，破坏了水-矿动态平衡关系；此外，为了开发低品位的固体钾矿，通常将老卤（尾液，富含 Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻）与淡水（或较低浓度的湖表卤水）按照一定比例混合后，将混合后的溶剂（不饱和溶液）通过人工开挖的渗水渠入渗补给至盐层中，缓慢溶解固体盐层中的 K⁺，将固相中的 K⁺ 转化到液相中，从而提升了液相中 K⁺ 浓度的过程。由此可见，造成察尔汗盐湖矿区水-矿关系失衡，是受气候变化和人类活动多因素的复杂作用的结果。目前，针对气候变化和人类活动如何影响矿区的水-矿关系，以及关键影响因素有哪些？这方面的研究目前仍然不清楚，亟需深入研究。

目前，国内外学者常用的驱动因素分析方法有主成分分析法（PCA）、因子分析法、线性回归法、相关性法、灰色关联法以及机器学习法等，其优缺点及应用情况如表 1 所示。由于研究区缺少长观水文气象和水文地质观测资料，本文通过收集整理察尔汗盐湖典型年份 1967 年（原始状态）、2008 年（正常开采阶段+气候暖湿化）、2010 年（防洪堤+正常开采阶段+气候暖湿化）、2018 年（防洪堤+人工补水溶矿+大规模开

采阶段+气候暖湿化)的水文气象资料,采用 Pearson 相关性分析方法对矿区卤水补排变化规律进行深入分析,探讨补排驱动变化对卤水水化组分和潜层卤水水位的影响,查明不同开发阶段矿区水-矿关系的主要影响因子。

表 1 相关性分析的主要方法及优缺点

Tab.1 Main Methods of Correlation Analysis and Their Advantages and Disadvantages

方法	优点	缺点	主要用途
主成分分析	基于降维思想减少变量维度,去除部分非综合指标可解释性差,对异常数据关键信息,数据分析效率高。	敏感,数据需求量大	适用于地下水水化学特征分析、污染来源以及水资源承载力评价等 ^[8-10] 。
因子分析	揭示因子的潜在结构,降维与简化模型,可解释性强。	假设限制较强、因子数量难以确定、计算复杂、解释主观性强,易受异常值影响	水质评价、地下水污染物溯源等 ^[11,12] 。
回归分析	量化变量间的关系,可对后续数据进行预测,计算高效,适应多种场景。	数据要求高,易受异常值影响,忽略地下水涌水量预测、地下水水质	分析与预测等 ^[13] 。
Pearson 相关性	标准化度量变量间的关系,适用于多种维度的数据,结果易于理解,对数据样本数的影响下可能产生伪相关,结果易下水量要求低,支持统计显著性检验。	不适用于分类等数据,在混杂因素地下水储量变化的驱动因素、地	等 ^[14] 。
灰色关联度	适用于小样本,对数据要求低,计算简便,可同时分析多个参考序列与比较序列。	不适用于高维数据,关联度解释性不适用于地下水相关研究,主要有限且主观性强,结果易受数据处于大气污染分析、生态环境评	价等 ^[15] 。
机器学习	数据解析能力强,适应多类型数据,可处理复杂的非线性关系,进行多因素分析,分析方法众多。	数据需求量庞大,模型数据解释性差,与实际情况可能不一致,“训练-验证-测试”过程需大量算力与标注数据。	随机森林法和决策树法被广泛应用于水资源变化驱动因素分析等 ^[16,17] 。

1 研究区概况

察尔汗盐湖位于柴达木盆地中南部(图 1a),地理坐标范围为 93°42'36"~96°14'35" E, 36°37'36"~37°12'33" N,东西长约 168 km,南北宽 20~40 km,矿区主要由干盐滩和卤水湖(达布逊湖和涩聂湖)构成,面积约为 5856 km²^[18],其中包括干盐滩面积约 4224 km²。察尔汗盐湖由东向西依次划分为:霍不逊、察尔汗、达布逊以及别勒滩四个区段,矿区内地形整体平坦,自北向南有微小倾斜,矿区海拔高约 2678~2682 m。矿区气候类型属于典型的高原温带大陆性干旱气候,多年平均气温 5.1 °C,多年平均降水量约 25 mm,集中于 5~9 月,年蒸发量高达 3000 mm 以上^[18]。研究区域位于青藏铁路以西的矿区,即察尔汗(部分区域)、达布逊以及别勒滩 3 个区段(图 1b)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

收集了研究区 2005~2019 年的卫星遥感、格尔木气象站的气象、矿区水文地质等数据(表 2)。

2.2 研究方法

2.2.1 湖泊面积提取法 Landsat 系列卫星遥感数据共有 9 个系列的数据,本文选用 Landsat5 和 Landsat8 系列中的绿波段与近红外波段的遥感影像,先使用 ENVI5.3 软件对遥感影像进行辐射定标和大气校正的预处理,再在 Arcgis10.5 软件中进行达布逊湖泊面积的提取与计算。

采用 Mcfeeters 在 1996 年提出的归一化差分水体指数(NDWI)进行达布逊湖泊面积的获取。NDWI 使用绿波段与近红外波段的遥感影像进行归一化差值处理,用以获取水体信息,其表达式为公式 1^[22]:

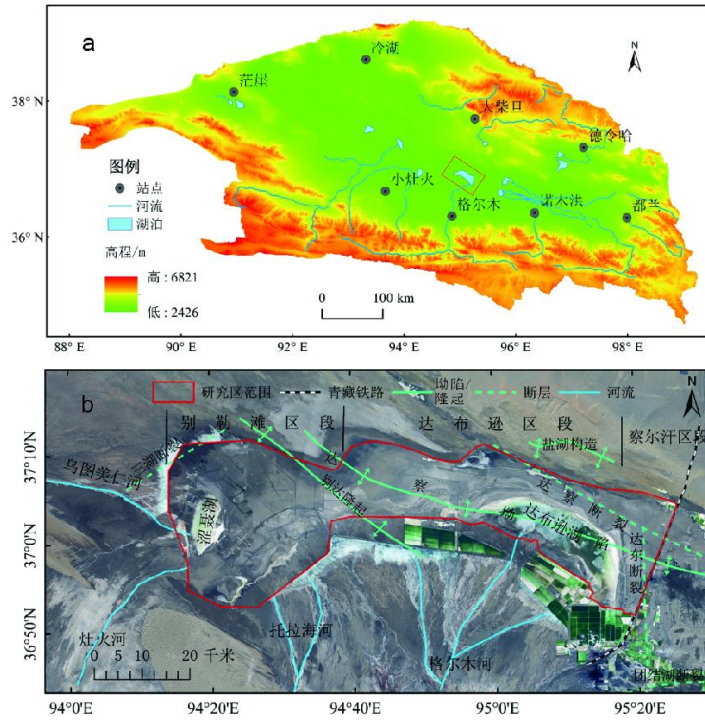


图 1 察尔汗盐湖地理位置 (a) 和水系分布图 (b)

Fig 1 Geographic Location (a), Water System Distribution (b) of Qarhan Salt Lake

表 2 数据来源

Table 2 The original data source of this study

编号	数据名称	来源
1	1990~2024 年 Landsat 系列卫星遥感、气象数据	地理空间数据云
2	1991~2024 年格尔木河径流量数据	青海省水文水资源局
4	2014~2019 年别勒滩、达布逊和察尔汗区段的平均水位 观测数据	
5	2005~2019 年储卤层降落漏斗面积	中国盐湖工业集团公司
6	2008~2019 年别勒滩、达布逊和察尔汗区段 TDS、KCl 品位	
7	1980 年别勒滩、达布逊和察尔汗区段 TDS、KCl 品位	张彭熹, 1987 ^[18]
8	2008~2018 达布逊湖水位	刘斌山, 刘万平, 张娟, 等, 2020 ^[19]
9	2005~2019 年格尔木气象站气象数据	韩进军, 2023 ^[20] ; 黄金廷, 李宗泽, 王文科, 等, 2021 ^[21]
10	1967 年察尔汗盐湖源汇项数据	
11	2005~2019 年卤水开采量	中国盐湖工业集团公司
12	2005~2019 年溶剂补给量	

$$NDWI = \frac{p(\text{Green}) - p(\text{NIR})}{p(\text{Green}) + p(\text{NIR})} \quad (1)$$

式中: $p(\text{Green})$ 为绿波段遥感影像值, $p(\text{NIR})$ 为近红外波段遥感影像值。

2.2.2 Pearson 相关系数法 皮尔逊相关系数用于分析定量数据之间的关系及关联程度, 其值介于 -1 与 1 之间, 相关系数 r 绝对值越大, 则因变量与自变量之间的相关性越高, 其中 0~0.09 为无相关性, 0.1~0.3 为

弱相关性, 0.3~0.5 为中等相关性, 0.5~1 为强相关性, 且只有显著性水平小于 0.05 时, 因变量与自变量之间才存在相互影响关系, 反之则不存在, 相关系数计算公式 2 如下^[23]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为两个连续的相关变量序列。

在进行相关性分析之前, 为了消除各类数据之间存在的量纲和单位的差异, 需要先对原始数据进行归一化处理, 然后再使用 IBM SPSS Statistics27 软件进行 Pearson 相关性分析。归一化公式 3:

$$X = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式中: X 为归一化后的值, x 为原始值; x_{\min} 和 x_{\max} 为原始变量数据中的最小值和最大值。

3 结果分析

3.1 气象水文要素变化特征

通过收集并分析格尔木河水文站的气象数据, 结果表明(图 2a), 从 1991 年至 2024 年(剔除 2010 年的极端降水年), 格尔木河径流量呈波动上升趋势, 近 33 年的多年平均径流量为 $7.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。径流量变化大致可分为四个阶段, 在 1991-1999 年期间, 多年平均径流量为 $5.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 远低于多年平均径流量; 在 2000-2009 年期间, 年平均径流量为 $7.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 略低于多年平均径流量; 在 2010-2015 年与 2016-2024 年两阶段, 年平均径流量分别为 $10.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, $9.55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 此两阶段径流量显著大于多年平均径流量, 增幅分别为 33.88%, 19.82%。格尔木河流域降水主要集中在 6-9 月(图 2b), 年平均降水量在 1990-2009 年之间呈波动上升趋势, 径流量与降水量变化趋势有较好的相关性(图 2c), 显著性为 0.41, 说明区域的降水量变化会引起径流量的变化。然而, 从 2011-2022 年期间径流量变化呈动态平稳趋势, 它与降水量变化趋势的相关性减弱, 显著性为 -0.38, 说明在此期间区域径流量增大不完全与降水量增大有关。研究表明, 受气候暖湿化的影响, 近 20 年来青藏高原及周边地区冰川正经历着不同程度的消融与退缩, 冰川融水对河流径流的补给是不可忽视的因素之一^[24,25]。因此, 即使降雨量稳定的情况下, 冰川融水补给也可能导致径流量增大。

从温度变化趋势来看(图 3a), 1990-2022 年格尔木地区年平均温度呈上升趋势, 该期间温度上升了约 2.0 °C。在 1990-1999 年期间, 最低年平均温度为 4.93 °C, 最高年平均温度为 6.58 °C, 10 年间平均温度为 5.61 °C。在 2000-2009 年期间, 最低年平均温度为 5.74 °C, 最高年平均温度为 7.10 °C, 10 年间平均温度为 6.36 °C。在 2010-2015 年期间, 最低年平均温度为 5.92 °C, 最高年平均温度为 6.92 °C, 多年平均温度为 6.55 °C。在 2016-2022 年期间, 最低年平均温度为 6.21 °C, 最高年平均温度为 7.18 °C, 多年平均温度为 6.64 °C。综合以上各阶段数据可以看出, 升温速率存在明显差异, 前 20 年为快速升温期, 后 10 年为缓慢升温期。

格尔木地区蒸发量呈波动下降趋势(图 3b), 从 1990-2020 年期间, 蒸发量累计下降了 1248 mm。在 1990-1999 年期间, 最低年平均蒸发量为 2080 mm, 最高年平均蒸发量为 2748 mm, 10 年平均蒸发量为 2404 mm。在 2000-2009 年期间, 最低年平均蒸发量为 2005 mm, 最高年平均蒸发量为 2342 mm, 10 年平均蒸发量为 2177 mm。在 2010-2015 年期间, 最低年平均蒸发量为 1975 mm, 最高年平均蒸发量为 2050 mm, 5 年平均蒸发量为 1990 mm。在 2016-2020 年期间, 最低年平均蒸发量为 1500 mm, 最高年平均蒸发量为 2002 mm, 5 年平均蒸发量为 1775 mm。温度与蒸发量的关系显示(图 3b), 格尔木地区温度增加并不会导致蒸发量增大的趋势, 呈现“蒸发悖论”现象^[26], 表明格尔木地区气候从“暖干”向“暖湿”转变^[21, 27]。

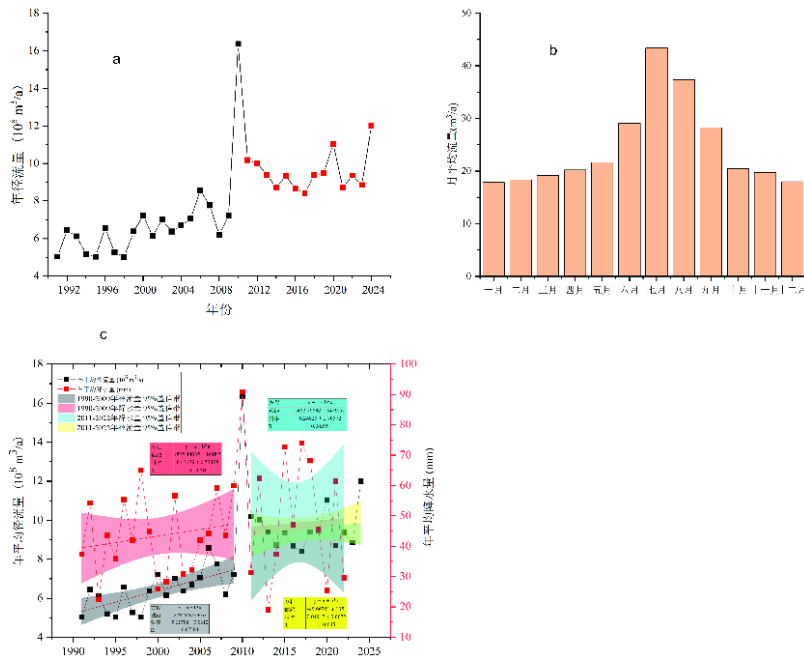


图2 格尔木河年径流量变化 (a), 月平均流量 (1991-2024 年) (数据来源: 格尔木河水文四站) (b), 径流量与降水量的相关性 (c)

Fig.2 Annual runoff variation (a), monthly average runoff (b) of Golmud River (1991-2024) (Data source: the 4th Hydrological Station of Golmud River), correlation between runoff and the precipitation (c)

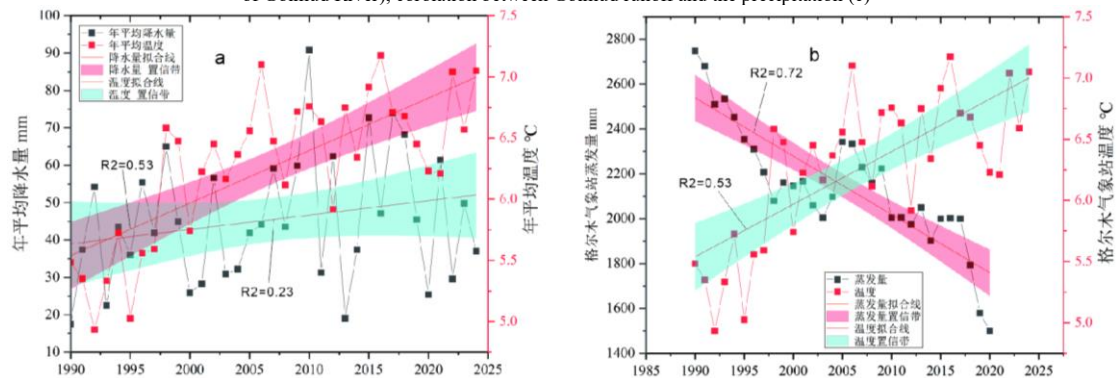


图3 格尔木河气象站降水量 (a) 与蒸发量 (b) 的变化时间序列

Fig. 3 Time series of precipitation (a) and evaporation (b) at Golmud River Meteorological Station

3.2 人类活动要素变化特征

察尔汗盐湖矿区人类活动的影响因素主要包括卤水资源开采、人工补水溶矿和截流建堤。如图4所示, 卤水资源开采量呈明显上升趋势。1990-1999年的开采初期, 卤水多年平均开采量为 $0.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 钾肥产业规模维持在万吨级。进入2000年后, 随着钾肥工业规模和技术的突破, 钾肥产量突破百万吨, 卤水开采量急剧上升, 在2000-2009年, 多年平均开采量达 $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从2010年开始, 察尔汗盐湖卤水资源开发利用正式进入大规模开采阶段, 在2010-2015年期间, 多年平均开采量为 $2.84 \times 10^8 \text{ m}^3$, 在此阶段人工补水溶矿处于初步阶段, 年平均人工补水量约为 $2.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2016-2022年期间, 多年平均开采量达 $4.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 每年钾肥生产维持在约550万吨, 该阶段平均人工补水量达 $4.76 \times 10^8 \text{ m}^3$, 与卤水开采量基本持平。

此外, 为了防止洪水直接进入矿区, 破坏钾盐矿床品位、厂房设施、盐田等, 于2009年在察尔汗盐湖矿区外围修建了一条长×宽×高分别为 $40 \text{ km} \times 6 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$ 的防洪堤, 将格尔木河及其支流截流, 在矿区外围形成了湿地景观。据遥感影像资料显示, 人工湿地面积从2000年至2020年呈现出明显增加的趋势, 面积由2000年的 191.15 km^2 增大至2020年的 218.88 km^2 , 年均增幅为 0.74% [28]。

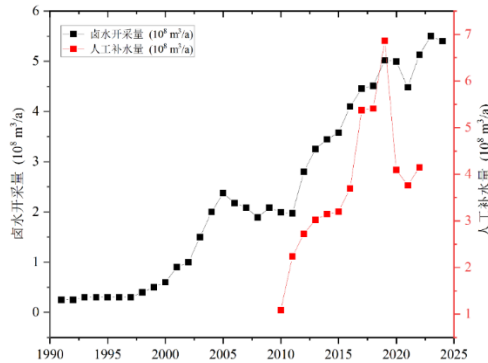


图4 察尔汗盐湖卤水资源开采与人工补水的时间变化序列

Fig.4 Time series of brine mining and artificial replenishment in Qarhan Salt Lake

4 讨论

4.1 气候变化与人类活动对矿区水-矿平衡关系的影响

4.1.1 对矿区水量补给与排泄平衡的影响 盐湖矿区典型年份的补给与排泄水量计算结果如表3所示。1967年盐湖矿区的补给项有大气降水($1.811 \times 10^8 \text{ m}^3$)、地下水($0.014 \times 10^8 \text{ m}^3$)和入湖河流($6.414 \times 10^8 \text{ m}^3$)，此阶段盐湖处于未开发状态，排泄仅以蒸发($6.674 \times 10^8 \text{ m}^3$)为主，其中包括卤水湖蒸发($5.644 \times 10^8 \text{ m}^3$)和干盐滩蒸发($1.030 \times 10^8 \text{ m}^3$)，盐湖矿区水量平衡为正，约为 $1.565 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

进入盐湖卤水开采阶段后，2008年河流对盐湖矿区补给量下降至 $2.920 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，地下水补给量为 $0.034 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；卤水湖蒸发量因湖泊面积减小而下降至 $3.200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，潜卤水水位下降导致大气降水入渗补给($0.012 \times 10^8 \text{ m}^3$)和干盐滩陆面蒸发($0.199 \times 10^8 \text{ m}^3$)大幅减弱，卤水开采量增加至 $1.892 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，此阶段人工补水溶矿还处于试验阶段，溶矿补水量仅为 $0.296 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2010年在防洪堤-资源开发-洪水的三重影响下，河流对盐湖矿区的补给量大幅增加至 $6.884 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，降雨增大导致降水入渗补给量增大至 $0.036 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，地下水补给量受影响较小，约 $0.030 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。潜卤水水位有不同程度的恢复，潜卤水蒸发量为 $0.320 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；资料表明^[3]，卤水湖面积增加至 405.0 km^2 ，卤水湖蒸发量大幅增长至 $5.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；然而，受洪水的影响，卤水开采量并没有显著增长。

2018年在防洪堤-气候暖湿化-大规模资源开发-人工补水溶矿的四重影响下，大气降水入渗补给量下降至 $0.018 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，河流对盐湖矿区的补给量为 $4.098 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，冲洪积扇前地下水对盐湖矿区的侧向补给量基本保持不变，溶剂补给量增大至 $3.833 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。干盐滩蒸发量下降至 $0.064 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；卤水开采量成倍增长至 $4.514 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从矿区补给与排泄量变化趋势来看，在人为干扰较小的自然状态下，矿区的补给与排泄主要依赖河水补给与自然蒸发排泄，二者占总补给量和总排泄量的80%左右(表3)，随着人类活动的大幅扰动，人工开采量和溶剂补给量所占比例上升，2018年二者的比值分别为25%~51%，9%~48%(表3)。矿区补给与蒸发排泄方式的变化，导致矿区的水均衡逐渐转为负值。

图5显示，别勒滩、达布逊和察尔汗区段的潜层卤水TDS浓度发生了不同变化。别勒滩区段潜层卤水水平平均TDS浓度从1980年的 358.0 g/L 下降至2011年的 335.4 g/L ，在2011~2019年未呈现明显变化趋势。据实地勘查发现，人工补水溶矿工程主要分布在别勒滩区段，持续的补水溶矿向潜层卤水中输入了大量盐分(Na, Mg, Cl)，使别勒滩区段潜层卤水TDS浓度在2011~2019年并没有明显的变化趋势。达布逊区段与察尔汗区段潜层卤水的TDS浓度较1980年呈缓慢下降趋势，且达布逊区段TDS浓度年际波动变化明显，一方面，这与达布逊湖水补给潜层卤水有关。据研究^[18]，达布逊湖水由于受到水力梯度和西北向风力作用，优先补给达布逊区段东北向的潜层卤水。另一方面，人工补水溶矿的溶剂和达布逊湖水为非饱和浓度的卤水，当二者补给潜层卤水时，强烈的蒸发浓缩作用及水-岩作用导致卤水快速达到饱和，这是卤水TDS浓度长期稳定且缓慢下降的关键。此外，与潜卤水的循环速度有关。尽管潜卤水与湖水-河水-地下水

具有水力联系^[29]，然而，研究显示^[30]，察尔汗盐湖潜卤水的年龄约为上万年，更新速率及其缓慢，水动力驱动过程十分微弱，导致多年来保持了较为稳定的 TDS 浓度。

表 3 察尔汗盐湖矿区典型年份的水均衡

Tab.3 The water budget of Qarhan Salt Lake in typical years

年份 要素	1967 年		2008 年		2010 年		2018 年		
	水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	百分比	水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	百分比	水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	百分比	水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	百分比	
补给项	大气降水	1.811	22%	0.012	0.00	0.036	0.00	0.018	0.00
	入湖河水	6.414	78%	2.92	90%	6.884	90%	4.098	51%
	地下水	0.014	0.00	0.034	1%	0.03	0.00	0.034	0.00
排泄项	溶剂	0	0.00	0.296	9%	0.65	9%	3.833	48%
	卤水湖蒸发	5.644	85%	3.2	60%	5.62	71%	4.238	48%
	干盐滩蒸发	1.03	15%	0.199	4%	0.32	4%	0.064	1%
	采卤量	0	0.00	1.892	36%	1.99	25%	4.514	51%
补给总量	8.239		3.262		7.61		7.983		
排泄总量	6.674		5.291		7.93		8.816		
补给项-排泄项	1.565		-2.029		-0.322		-0.834		

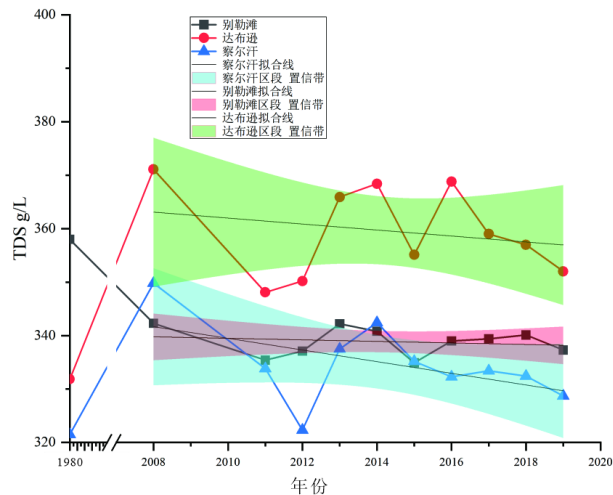


图 5 1980~2019 年潜层卤水的 TDS 浓度变化

Fig.5 The variation in TDS concentration of subsurface brine from 1980 to 2019

4.1.2 对矿区水化学组分的影响 图 6 显示，大规模开采后潜卤水的 KCl 品位下降较为明显。别勒滩区段潜卤水的 KCl 品位从 3.56% 大幅度下降至 1.37% (2019 年)，其中在 2002~2011 年平均每年下降约 0.19%，远大于 2011~2019 年的平均下降幅度 (0.06%)。达布逊区段潜卤水 KCl 品位从 2.98% 下降至 1.69% (2019 年)，多年平均降幅约 0.15%，且无明显的波动。察尔汗区段作为卤水钾资源的首采区，从上世纪七十年代开采至今，KCl 品位长期处于缓慢下降的趋势，多年平均下降幅度为 0.014%。从 2011 年后，三个区段潜卤水 KCl 品位变化趋势呈缓慢下降状态，这可能与补水溶矿有关。补水溶矿是指，将矿区尾液 (老卤) 和低 TDS 的水体 (淡水或达布逊湖水) 按照一定的配比，配制成高 Na、Mg，低 K 的溶浸剂，在保证储卤层孔隙结构的稳定和防止储卤层的溶塌等次生灾害的发生的前提下，将溶浸剂通过人工输卤渠输送至补给区，通过入渗补给至储卤层中，促进固体盐层钾矿的溶解，达到了“固转液”的目的，该方法广泛用于当前柴达木盆地盐湖资源的开采。研究表明，溶矿过程与溶浸剂的配比、溶浸剂波美度、补水方式 (单程

或增程驱动)、温度、时间、注入速率等复杂因素有关^[31]。在过去,盐湖区实行“采富弃贫”的开采模式,造成矿区 KCl 品位急剧下降,如果按照以往的开采模式,再加上大规模开采,势必会造成 KCl 品位的严重下降。理论上,卤水资源大规模开采,肯定会造成品位的持续降低,然而从 KCl 品位变化趋势来看(图 6),即使从 2011 年开始受大规模卤水资源开采和气候暖湿化双重影响,卤水 KCl 品位并没有显著下降,这主要得益于矿区的补水溶矿,不断促进了浅层固体钾盐矿中 K^+ 的溶解,从而维持了潜层卤水中较为稳定的 KCl 品位。因此,评估卤水资源的开采量阈值,设计科学的水资源补给与排泄方式,尤其是制定合理的人工补水溶矿模式(包括溶剂配比,补水周期,补水量)是未来盐湖水文地质研究的重要课题。

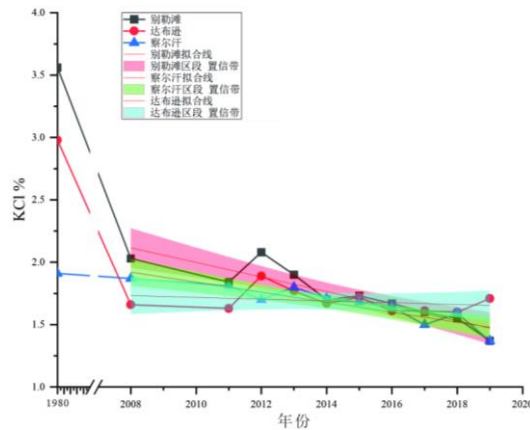


图 6 1980~2019 年潜层卤水的 KCl 品位变化

Fig. 6 The variation in KCl grade of subsurface brine from 1980 to 2019

4.1.3 对矿区潜卤水水位的影响 在自然状态下,潜卤水水位与湖水水位基本一致,根据季节波动,二者之间相互补给(图 7a)。在进入 2000 年后,随着人类活动的加剧,这种动态补给状态被破坏,潜卤水水位持续降低,而湖水水位受气候暖湿化的影响显著上升,湖水水位与潜卤水水位差值达 6 m 左右,水动力过程转变为常年湖水补给潜卤水的模式(图 7a)。研究表明,湖水与潜卤水的动态补给过程有助于溶解固体矿物中的 K^+ ^[31]。因此,矿区水动力条件的彻底改变将不利于盐矿层 K^+ 的溶解。从各区段潜卤水的水位年内变化趋势来看(图 7b),每年 1 月~6 月潜层卤水平均水位上升,在 7 月~12 月平均水位下降,这与河流补给、钾肥生产期等有关。从年际变化趋势来看,别勒滩区段潜卤水平均水位在年缓慢下降,达布逊区段潜卤水平均水位基本保持不变,而察尔汗区段潜卤水平均水位呈先下降(2014~2017 年)后又上升的趋势(2018~2019 年)。上述变化表明矿区溶矿补水使潜卤水水位缓慢提升,但溶矿补水带来的负面影响短期内会存在。

4.2 气候变化与人类活动对水-矿关系的相关性分析

热图结果显示(图 8a),自然状态下(1967-1989 年)降雨量、蒸发量和潜卤水水位是影响水-矿平衡关系的主要因素, Pearson 相关性分析结果显示,降雨量与径流量有较强的相关性,相关系数为 0.39;蒸发量与温度呈负相关,与潜卤水水位呈正相关,相关系数分别为 -0.70 和 0.64,说明自然状态下影响水-矿关系的主要为水文气象因素(图 8b)。在 1990-1999 年和 2000-2009 年期间,温度、达布逊湖面积、湖水水位、卤水开采量逐渐成为水-矿关系的主要影响因素,其中温度与蒸发量呈负相关(-0.70),达布逊湖面积和湖水水位均与径流量正相关(0.24, 0.48),卤水开采量又与蒸发量、温度、径流量、湖水水位相关(-0.84, 0.75, 0.72, 0.56)(图 8c, d),其中达布逊湖水水位和面积大小与矿区修建防洪堤、入湖补给量的管控等行为有关,表明在这一阶段人类活动干预对矿区的影响开始显现。在 2011-2015 年与 2016-2022 年期间(图 8e, f),人类活动对水-矿关系的影响越来越明显,除了温度等气象因素之外,人类活动(包括:湖水水位、卤水开采量、人工补水溶矿)成为这一时期的关键影响因素,相关性结果显示,湖水水位与径流量相关,相关系数为 0.48;卤水开采量与人工补水溶矿均与径流量、湖水水位呈较好的正相关性。

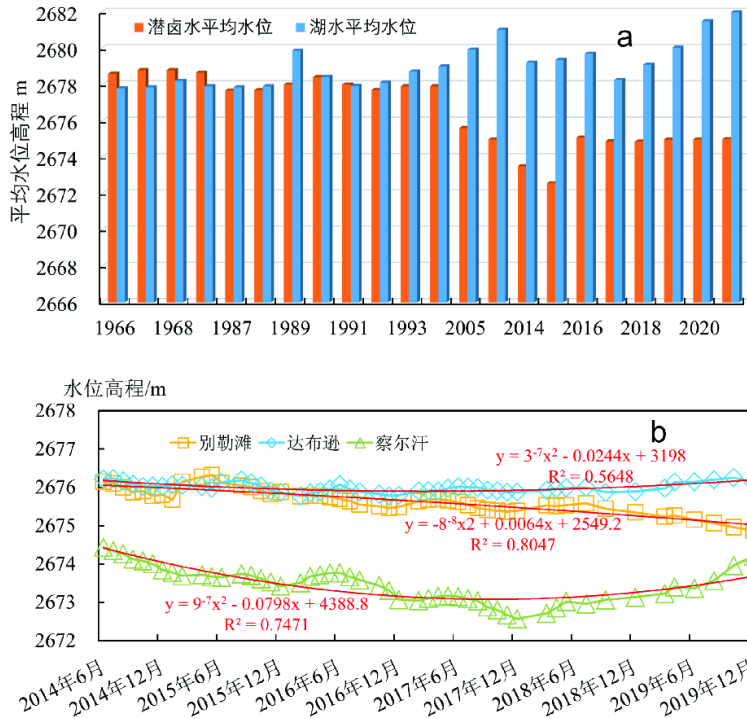


图7 1966-2022年湖水与潜层卤水水位高程变化 (a) 和 2014-2019年不同区段水位高程变化 (b)
Figure 7 The variation in water level elevation of lake water and subsurface brine from 1966-2022 (a); and in different sections from 2014-2019 (b)

总之，维持察尔汗盐湖矿区水-矿关系的平衡对潜卤水可持续开发利用至关重要，在自然状态下，水-矿关系主要受河流补给与蒸发排泄作用控制，其中降水量是径流变化的关键，而蒸发量则主要受温度和潜卤水水位影响。随着时间推移，人类活动的干预日益增强并逐渐成为主导。在1990-2009年期间，卤水开采量开始成为影响矿区排泄项的重要因素，并与达布逊湖水水位、面积大小等受人类干扰程度高的因素高度关联。进入2011-2022年，在气候与人类活动复杂交织的背景下，水-矿系统发生了根本性转变，此时，人工补水溶矿与卤水开采量成为关键驱动因素，二者又反过来影响矿区的水文地质条件，如水位、湖水面积、蒸发、径流量等。总体上，察尔汗盐湖矿区水-矿关系经历了从九十年代“自然因素主导”到二十世纪初的“人类活动与自然因素共同作用”，最终演变为“人类活动影响主导”的轨迹，其中气候变化（温度上升）、卤水开采和人工补水溶矿是驱动这一转变的关键。

5 结论与展望

近20年来，流域径流量显著增大，增幅大于20%；矿区温度显著上升，平均升温约1.5~2.0℃；而矿区蒸发量显著减小，平均减幅达18.5%，表明矿区气象条件从“暖干”向“暖湿”转变。气候暖湿化、大规模资源开发、人工补水溶矿、截流建堤等气候变化与人类活动的耦合作用，导致察尔汗盐湖矿区多年水量平衡为负，其中入湖补给量、人工溶矿补水量、卤水开采量、湖泊蒸发量是维持矿区补排平衡的关键；大规模卤水资源的开采，导致卤水TDS值、KCl品位降低，潜卤水平均水位大幅下降，水动力条件发生变化，而补水溶矿作用有效缓解了上述负面现象的加剧。

察尔汗盐湖矿区水-矿关系经历了一个从“自然因素主导”到“人类活动与自然因素共同作用”，最终在2010-2022年期间演变为“人类活动影响主导”的轨迹，其中气候暖湿化、卤水开采和补水溶矿是驱动这一转变的关键。在水-矿平衡调控时，应优先考虑维持卤水开采量与溶矿补水量之间的平衡，二者比例大致为1:1；其次通过控制入湖水量来调节矿区补给与排泄的平衡关系。

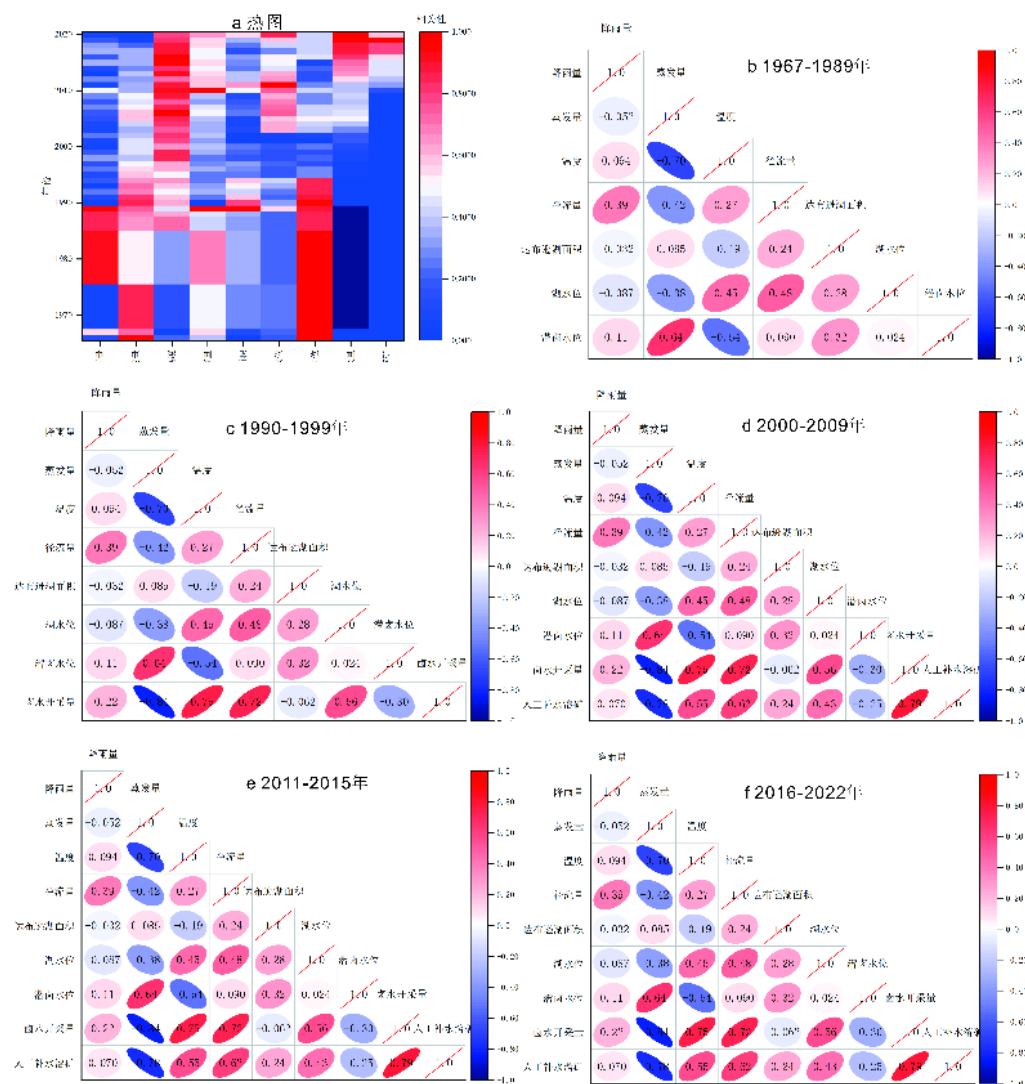


图8 气象条件与人类活动影响因素对水-矿关系的相关性分析
Fig.8 Correlation analysis of meteorological conditions and human activity factors on water-salt relationships

水资源强约束是察尔汗盐湖矿区的先天劣势。在未来，卤水资源开采时，需考虑矿区的水-矿平衡关系，有效地人工补水和湖表水蒸发量控制是维持水-矿平衡的关键。因此，应加强研究溶浸剂远距离输送或补水入渗过程中减少无效水耗的技术，以及达布逊湖水水位或面积阈值的确定。此外，在进行卤水资源开采量与人工溶矿补水量优化调控时，需结合矿区地表水-地下水的耦合，同时还要考虑盐湖矿区水量-水质（品位）的水动力和水化学过程。因此，进一步建立矿区水量-水质-水位的耦合模型，优化人工补水、开采量阈值的研究是今后研究的重要内容。

6 参考文献

- [1] Zhao WT, Cheng YZ, Jian JS, et al. Water erosion changes on the Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate variability and human activities during 1982-2015. *Catena*, 2023, 229: 107207
- [2] Weng BS, Xia KB, Gong XY, et al. Groundwater storage change and its response to climate warming in Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2025, 662: 134045.

- [3] Han JB, Wang JP, Li LY, et al. Multi-objective optimization for brine mining water balance in the Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin. *Journal of Environmental Management*, 2025, 389: 126099.
- [4] Wang SJ, Wang XF, Wang LH, et al. Discussion on sustainable development of China's potash industry and construction of overseas potash base. *Industrial Minerals & Processing*, 2019, 44(1): 66-69. [王石军,王兴富,王罗海等.浅议我国钾肥工业可持续发展与境外钾肥基地建设.化工矿物与加工, 2019, 48(1): 66-69.]
- [5] Kong N, Qu T, Tan HB, et al. Distribution of isotopes and runoff variation of the rivers in the Qaidam Basin. *Arid Zone Research*, 2014, 31(5): 948-954. [孔娜,渠涛,谭红兵等.柴达木盆地河流同位素分布特征及径流变化.干旱区研究, 2014, 31(5): 948-954.]
- [6] Hu DS. A catastrophic flood in Qarhan Salt Lake during 1989. *Arid Zone Research*, 1991, 14(02): 41-47. [胡东生.1989年察尔汗盐湖地区暴发的特大洪水.干旱区地理, 1991, (02): 41-47.]
- [7] Han JB, Wang JP, Yi L, et al. The potential analysis of rain-flood resources in the Golmud River Catchment based on climate change and human interventions, Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2023, 31(04): 30-38. [韩积斌,王建萍,易磊等.气候变化与人类活动影响背景下格尔木河流域雨水洪水资源化潜力分析.盐湖研究, 2023, 31(4): 30-38.]
- [8] Sun YL, Gao B, Ma L, et al. Multiple water quality assessment methods based on principal component analysis. *Geology and Resources*, 2024, 33(6): 813-821. [孙艳玲,高博,马力等.基于主成分分析的多种水质评价方法综合研究——以伊通河中游浅层地下水为例.地质与资源, 2024, 33(6): 813-821.]
- [9] Tiziano B, Younes H, Rihab H, et al. Using principal component analysis to distinguish sources of radioactivity and nitrates contamination in Southern Tunisian groundwater samples. *Journal of Geochemical Exploration*, 2025, 271: 107670.
- [10] He JY, Zhang RX, Ding SB, et al. Characteristics and sources of nitrate pollution in groundwater of lower reaches and tributaries of Ganjiang River under extreme drought climate. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(1): 111-119. [何景媛,张茹星,丁水波,等.极端干旱气候下赣江下游及支流流域地下水硝酸盐污染特征及来源.环境工程技术学报, 2025, 15(1): 111-119.]
- [11] Davide S, Chiara Z, Alice P, et al. Assessing data variability in groundwater quality monitoring of contaminated sites through factor analysis and multiple linear regression model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2025, 269: 104471.
- [12] Chen Z, He JT, He BN, et al. A new approach combining principal component factor analysis and K-means for identifying natural background levels of NO₃-N in shallow groundwater of the Huaihe River Basin. *Science of The Total Environment*, 2024, 975: 177120.
- [13] Zhang GD, Liu XH, Lu SY, et al. Occurrence of typical antibiotics in Nansi Lake's inflowing rivers and antibiotic source contribution to Nansi Lake based on principal component analysis-multiple linear regression model. *Chemosphere*, 2020, 242: 125169.
- [14] Feng TF, Shen YZ, Chen QJ, et al. Groundwater storage change and driving factor analysis in north China using independent component decomposition. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127708.
- [15] Zhang YM, Shang KJ. Evaluation of mine ecological environment based on fuzzy hierarchical analysis and grey relational degree. *Environmental Research*, 2024, 257: 119370.
- [16] Zhang X, Wu X, Zhao R, et al. Identifying the facts and driving factors of deceleration of groundwater table decline in Beijing during 1999-2018. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127475.
- [17] Wu C, Wu X, Lu CY, et al. Characteristics and driving factors of lake level variations by climatic factors and groundwater level. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127645.
- [18] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 科学出版社, 1987.
- [19] 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. [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.]
- [20] 韩进军. 气候变化背景下柴达木盆地荒漠化时空演变及驱动力研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2023.
- [21] Huang JT, Li ZZ, Wang WK, et al. Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment.

- Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, 48(3): 31-37. [黄金廷, 李宗泽, 王文科等. 格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 31-37.]
- [22] McFeeters SK. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [23] Song W, Yinglan A, Wang YT, et al. Landsat Satellite Image-Derived Area Evolution and the Driving Factors Affecting Hulun Lake from 1986 to 2020. *Remote Sensing*. 2023, 15(10): 2682.
- [24] Wang NL, Yao TD, Xu BQ, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [25] Xu XD, Ma YM, Sun C, et al. Effect of energy and water circulation over Tibetan Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1293-1305. [徐祥德, 马耀明, 孙婵等. 青藏高原能量、水分循环影响效应. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1293-1305.]
- [26] Brutsaert W, Parlange MB. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30-31.
- [27] Ma RX, Huang JT, Tian H, et al. Characteristics of precipitation, evaporation and temperature at the Golmud River catchment in recent 60 years. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1005-1012. [马日新, 黄金廷, 田华等. 格尔木河流域近 60 a 降水、蒸发及温度变化特征分析. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1005-1012.]
- [28] Chen L, Wang JP, Han JJ, et al. Changes and trends of landscape pattern in Qarhan Salt Lake region in recent 20 years. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, 30(2): 19-26. [陈亮, 王建萍, 韩进军等. 近 20a 察尔汗盐湖区景观格局变化与趋势分析. 盐湖研究, 2022, 30(2): 19-26.]
- [29] Han JB, Xu JX, Wang GQ, et al. The material sources and it's hydraulic migration in the Gas Hure Salt Lake, Qaidam Basin, China. *Journal of Lake Science*, 2017, 29(6): 1551-1560. [韩积斌, 许建新, 王国强等. 柴达木盆地尕斯库勒盐湖区成盐物质的来源与水力迁移作用. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1551-1560.]
- [30] Cui YL, Liu F, Hao QC, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and renewability of groundwater in the Nuomuhong alluvial fan. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42(06): 1-7. [崔亚莉, 刘峰, 郝奇琛等. 诺木洪冲洪积扇地下水氢氧同位素特征及更新能力研究. 水文地质工程地质, 2015, 42(06): 1-7.]
- [31] Zhang YM, Zhao YJ, Hu YF. Experimental study on indoor dissolution of low-grade solid potassium ore in the Mahai Salt Lake, Qinghai Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2023, 42(05): 745-756. [张宇萌, 赵艳军, 胡宇飞. 青海马海盐湖低品位固体钾矿室内溶矿实验研究. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(05): 745-756.]
- [32] Wang WX, Li WP, An YH, et al. Research on comparison of ore one channel and multiple channel dissolving and driving solid potassium in Qarhan Salt Lake. *Geological Review*, 2015, 61(05): 1177-1182. [王文祥, 李文鹏, 安永会等. 察尔汗盐湖单级与增程驱动溶解固体钾矿试验对比研究. 地质论评, 2015, 61(5): 1177-1182.]
- [33] 常文静. 不同因素对察尔汗盐湖低品位固体钾矿的渗流-溶解影响研究[学位论文]. 中国科学院青海盐湖研究所
- [34] 胡东升. 察尔汗盐湖研究[M]. 湖南师范大学出版社, 2000.