

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.005

格尔木河水氢氧稳定同位素与 Cl^- 含量年内变化特征及对河水补给与蒸发的指示

饶文波¹, 李子怡¹, 谭红兵¹, 温川², 李永国³, 张西营⁴, 拓万全⁵

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 青海省水文水资源测报中心格尔木分中心, 青海 格尔木 816099; 3. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008; 4. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 5. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为深入理解高寒干旱流域水文循环过程并科学指导当地水资源管理和利用, 分析了格尔木河水氢氧稳定同位素和 Cl^- 质量浓度月变化特征, 探究了河水补给来源, 并利用 MixSIAR 模型定量分析了河水初始来源贡献, 利用瑞利分馏模型评估蒸发程度。结果表明: 7 月河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 明显高于其他月份但其 Cl^- 质量浓度较低; 不同月份的河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均在小南川最低、野牛沟较高, 自纳赤台起随流向逐渐升高, Cl^- 质量浓度自小南川最低递增至东支最高; 河水 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系点落在当地大气降水线右下方且 lc-excess 值最低达到 -19.03‰ ; 河水补给平均高度大于 4 700 m; 各月冰川融水和地下水为河流主要补给源, 其中 7 月降水补给比例增高; 河流蒸发损失平均约为 9%, 下游东支蒸发损失最高, 达 25% 以上, 这一结果与 lc-excess 和 Cl^- 质量浓度的变化有较好的一致性, 验证了蒸发评估方法的有效性。

关键词: 高寒干旱河流; 河水; 氢氧稳定同位素; 蒸发评估; 补给来源; 格尔木河

中图分类号: P342 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0034-13

Inter-annual variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl^- concentration in the Golmud River and implications for river recharge and evaporation

RAO Wenbo¹, LI Ziyi¹, TAN Hongbing¹, WEN Chuan², LI Yongguo³, ZHANG Xiyang⁴, TUO Wanquan⁵

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Qinghai Golmud Hydrology and Water Resources Survey Sub-center, Golmud 816099, China;

3. Hydrogeology and Engineering Geology Environmental Geology Prospecting Institute of Qinghai Province, Xining 810008, China;

4. Qinghai Institute of Salt Lakes, CAS, Xining 810008, China;

5. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To gain an in-depth understanding of hydrological cycle processes in alpine and arid watersheds and provide scientific guidance for local water resources management and utilization, a study was conducted on the monthly variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl^- concentrations in the Golmud River. Water recharge sources were identified, water recharge contributions were quantitatively assessed using the MixSIAR model, and evaporation degrees were evaluated through the Rayleigh fractionation model. The results reveal that river water in July has exhibited significantly higher $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values with lower Cl^- concentration compared to other months; the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values are the lowest in Xiaonanchuan but higher in Yeniugou across different months and gradually increase along river flow from Nachitai, while Cl^- concentration gradually increases from Xiaonanchuan at the lowest value to the east branch at the highest value; the $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ relationship point falls lower right below the local meteoric water line with the minimum lc-excess of -19.03‰ . The mean water recharge elevation exceeds 4 700 m. Glacier meltwater and groundwater are primary recharge sources of river water, with an increasing precipitation contribution in July. There is a 9%

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406601)

作者简介: 饶文波(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事同位素水文与环境地质学研究。E-mail: raowenbo@163.com

引用本文: 饶文波, 李子怡, 谭红兵, 等. 格尔木河水氢氧稳定同位素与 Cl^- 含量年内变化特征及对河水补给与蒸发的指示[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 34-46.

RAO Wenbo, LI Ziyi, TAN Hongbing, et al. Inter-annual variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl^- concentration in the Golmud River and implications for river recharge and evaporation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 34-46.

evaporation loss on average along the river, peaking at >25% in the downstream east branch. These results demonstrate strong agreements between the variations of δC -excess and Cl^- concentration, validating the effectiveness of the evaporation evaluation method.

Key words: alpine and arid river; river water; stable hydrogen and oxygen isotope; evaporation assessment; water recharge source; the Golmud River

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大的高原,对全球气候变化和水循环有重要影响^[1-2]。格尔木河位于该高原北缘,流经格尔木市,是流入柴达木盆地的第二大河流^[3],维系着当地居民生活、农业灌溉、工业生产,在格尔木市社会与经济发展中充当了重要角色^[4-6]。因此,开展格尔木河水文过程研究不仅对理解青藏高原水资源分布和演变有较高的学术价值,对当地水资源管理也有实际指导意义^[4]。

氢(²H)和氧(¹⁸O)稳定同位素是水分子的主要组成,可以指示水体形成和运动信息(如水源补给和蒸发影响),是流域、区域及全球尺度水文研究的有力工具^[7-9]。水化学也是水文循环研究中经典且流行的研究方法,特别是 Cl^- ,由于其单一的物质来源与稳定的地球化学行为,在示踪水体蒸发方面优势显著^[10-11]。近年来,特别在干旱区及高寒流域中,利用上述研究方法开展河流水文和气候研究已成为热点^[11-14]。与其他地区不同,青藏高原独特的气候特征(寒冷、干旱)和地形地貌(山多、坡陡)造就了独特的水文循环特征。另外,青藏高原不同区域在水分来源、气候条件和植被覆盖等方面存在显著不同^[15-19]。水分来源上,印度季风主导高原西南部,亚洲季风控制东南区,而北部受西风和大陆水循环影响^[16-17]。气候条件上,从高原南部到北部由暖湿向干冷转变^[18]。植被覆盖上,高原西部和南部为草原,中部分布高寒草甸,东部和东南部以高山灌木为主^[19]。这些自然条件决定了青藏高原各区域水文循环的差异性^[20]。因此,一个区域的研究成果较难表征另一个区域的水文循环特征。截至目前,不少学者对格尔木河流域开展了相关研究^[21-22],但多数集中在冲积扇区域,缺乏对流域的整体性分析,对河水同位素时空变化与水文过程也缺乏系统分析,在评价河水补给和蒸发上还存在较大空间。这些问题的存在阻碍了对格尔木河水文循环的深入理解,不利于当地水资源管理决策。

近年来,由于气候变化和人类活动的影响,格尔木河水文过程发生显著变化,改变了流域地表水和地下水形成机制和演化路径^[22]。格尔木河流域水资源管理面临严峻挑战:①流域上游冰雪消退加剧,地表产流增加,水资源原有平衡被破坏^[22];②降水常年少且不均,下游河道水量减少,水资源短缺、洪涝灾害频发、水质下降^[23];③随着盐湖化工产业的发展,工业用水量从 2000 年的 0.9 亿 m³ 增长至 2019 年的 3.83 亿 m³,占水资源总量的 40% 以上^[24-25],对其他需水产业的水资源保障带来巨大压力。由此,本文对格尔木流域年内不同月份河水氢氧稳定同位素空间变化规律及其影响因素进行研究,并基于 δC -excess、瑞利分馏模型、MixSIAR 模型等确定河水蒸发程度和补给来源,深入认识高寒干旱河流水文循环规律,以期为流域水资源管理和生态安全保障提供参考。

1 研究区概况

格尔木河流域(35°01′~37°07′N, 93°01′~96°54′E)位于青海省柴达木盆地南部,海拔在 2 671~6 141 m 之间,流域面积为 4.5 万 km²(图 1)。流域纳赤台以上为上游,纳赤台至出山口为中游,出山口以下为下游,地貌上,从南到北分为山区、冲洪积扇、细土平原和湖积平原(图 1);构造上,由昆仑山北部隆起带及柴达木盆地凹陷带组成,其中野牛沟、小南川、东昆仑断裂活动性较强^[26]。昆仑山南部出露元古界至新近系地层,海拔 4 200 m 以上构造侵蚀强烈,第四纪地层及岩浆岩出露明显,山前大部分地区第四系厚度由南向北逐渐增厚,岩性主要为泥岩、粉砂岩、砾石黏土等,湖积平原以砂砾岩、砂泥岩为主^[27]。流域气温低、降水少、蒸发强烈,年均气温为 5.16℃,年均降水量为 42.5 mm,年均蒸发量为 1 541 mm,山区降水量大于 200 mm/a,平原降水量小于 50 mm/a,降水多集中在 6—8 月,降水量随海拔的降低而减小,气温和蒸发量则随之升高^[25]。2019 年,纳赤台水文站月均气温为-2.7℃,月均蒸发量为 80 mm,月均降水量为 18 mm;格尔木水文站月均气温为 0.8℃,月均蒸发量为 103 mm,月均降水量为 5.3 mm,2 个站点的月均蒸发量均远大于月均降水量(图 2,数据由格尔木水文局提供)。流域冰川和积雪分布少,仅在玉珠峰等山峰出现^[26]。土壤类型从南到北依次为冻漠土、草甸土、灰棕漠土、盐渍土,植被以半荒漠化、荒漠、寒生植物为主^[28]。

格尔木河发源于东昆仑山北坡,由野牛沟、小南川内河流以及雪水河等汇流而成,自南向北,途经纳赤台和格尔木市区,最终流入柴达木盆地的达布逊湖,全长 446.3 km,年径流量约为 6.9 亿 m³^[25-26]。2019 年,纳

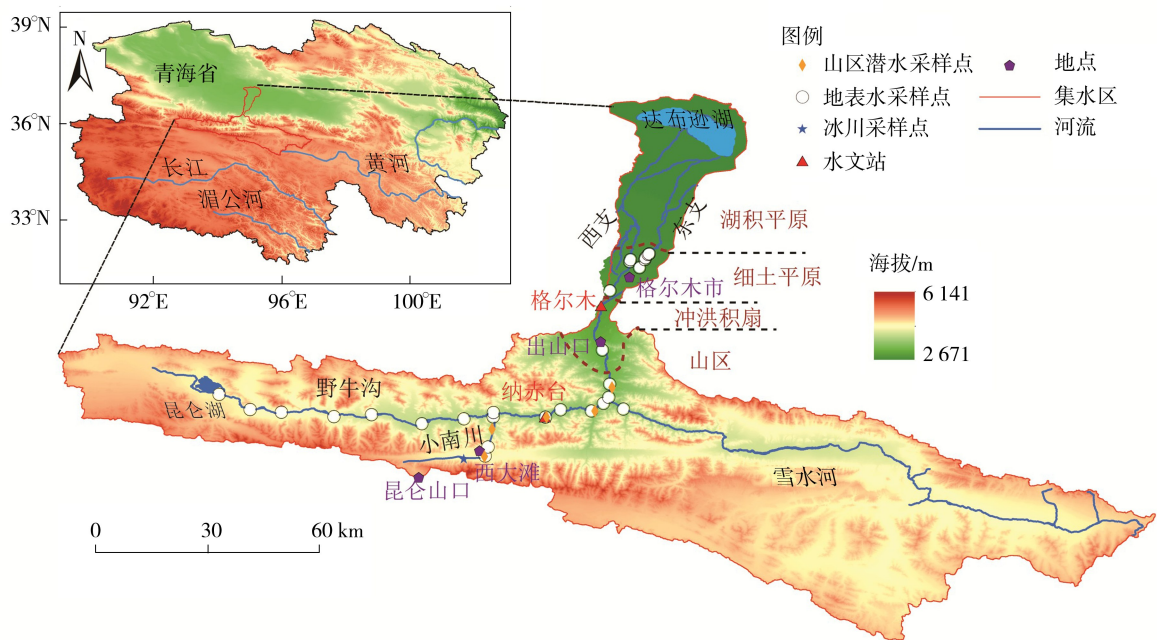


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Overview and sampling point distribution in study area

赤台水文站月均流量为 $20.6\text{ m}^3/\text{s}$, 格尔木水文站月均流量为 $29.9\text{ m}^3/\text{s}$, 夏季(6—8月)流量最高(图 2)。上游山区河水至出山口后近 70% 入渗补给地下水, 在细土平原前缘溢出, 最终与地表径流一起流入湖泊^[29]。河水补给来源包括降水、冰川融水及地下水^[3,30]。农牧业、城镇生活和盐湖化工产业是流域主要用水单元, 2019 年格尔木市总用水量达到 3.47 亿 m^3 ^[24,31]。总之, 随着气候振荡加剧和人类活动加强, 近年来降水和冰川融水的变异性增加了河流水文循环的复杂性^[32]。

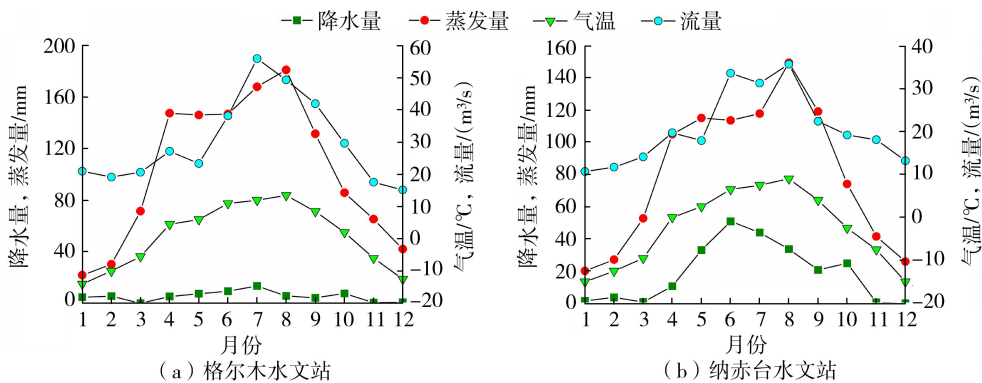


图 2 2019 年格尔木河流域水文站气象水文参数变化特征

Fig. 2 Variation of meteorological and hydrological parameters at hydrological stations of the Golmud River Watershed in 2019

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

于 2019 年 4 月、5 月、7 月、9 月、10 月、12 月开展野外考察与河水、冰川及山区潜水取样工作。4 月共采集 25 件河水样品、5 件潜水样品、1 件冰川样品, 5 月采集 18 件河水样品, 7 月、9 月及 10 月份均采集 24 件河水样品, 7 月也采集了 4 件潜水样品和 1 件冰川样品, 12 月采集 16 件河水样品、3 件潜水样品、1 件冰川样品, 采样点分布如图 1 所示。用不锈钢采样器在主河道表层 20 cm 以下采集河水样品。用不锈钢铲清除表面冰川 5 cm 后采集冰川样品。沿程选取 5 个山区潜水采样点, 用便携式抽水泵在井水位 5 m 以下采集潜水样品。同时, 于 2019 年 6—10 月在纳赤台水文站采用水利部认证的降水收集器收集 51 件日降水样品。水样装满于洗净的 100 ml HDPE 样品瓶中, 使用分子生化级石蜡膜对瓶口进行密封。所有样品运回同位素实

验室后在分析测试之前保存在冰箱 4℃ 条件下。

2.2 分析测试

室内将水样用孔径 0.22 μm 的玻璃纤维滤膜过滤。Cl⁻ 质量浓度采用离子色谱仪(ICS-2000)进行测量,误差小于 5%。氢氧稳定同位素测试采用 LGR 水分同位素光谱仪(IWA-45EP, Los Gatos Research 公司,美国)进行测量。测量结果用相对于 V-SMOW(维也纳标准平均海水)标准的 δ(‰)表示,δ¹⁸O 和 δ²H 的测量精度分别为±0.1‰和±1‰。

2.3 降水同位素与 Cl⁻ 质量浓度加权值计算

本文基于日降水氢氧稳定同位素数据^[33] 计算格尔木河流域 2019 年降水同位素加权值。同时,计算采样期降水 Cl⁻ 质量浓度加权值。

2.4 lc-excess 计算

Landwehr 等^[34] 将水体中 δ²H 和 δ¹⁸O 与当地大气降水线(LMWL)的偏差定义为 lc-excess。lc-excess 能直接表征河水相对于当地降水的蒸发强度^[29,35]。lc-excess 值越负,河水蒸发越强^[36-37]。

2.5 MixSIAR 模型

MixSIAR 是评估混合物来源贡献的 R 语言环境开源软件包,基于稳定同位素数据,通过受体模型评估和质量守恒方程可以量化混合样品中潜在来源的比例^[38-39]。该模型结合马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)分析后分布问题并减少同位素分离误差,同时考虑了多个源、分馏和同位素特征间的不确定性^[40]。与传统的端元混合模型相比,其优势在于可以将固定效应和随机效应合并为协变量来解释混合比率的可变性^[41]。MixSIAR 模型目前广泛用于探索水文研究中的溯源问题,如污染源识别、水体转化补给贡献等^[40-43]。本文基于 δ²H、δ¹⁸O 指标用 MixSIAR 模型进行格尔木河水补给源定量评价。

2.6 瑞利分馏模型

瑞利分馏模型是定量描述蒸发过程中稳定同位素分馏的经典模型^[44]。其假定在平衡状态下从水体蒸发出来的水汽迅速逃逸且液气相之间的平衡始终维持在水和水汽界面^[45-46]。该模型可以量化水体的蒸发比和模拟不同蒸发比下水体 δ²H 和 δ¹⁸O 值的变化特征,充分考虑了平衡和非平衡分馏对水体蒸发过程的影响,更适合于干旱区河流蒸发评估^[44-47]。具体的河水蒸发计算公式参见文献^[48]。

在瑞利分馏过程中,温度和湿度是控制氢氧同位素分馏的主要因素,平衡分馏系数 α_(w-v) 与温度 T,动力分馏系数与湿度之间的关系式参见文献^[49]。本文采用交点法^[50](河水蒸发线与 LMWL 的交点)计算河水同位素初始值,相关气象参数在格尔木流域内气象站获取。

3 结果与分析

3.1 流域降水、冰川和地下水氢氧稳定同位素与 Cl⁻ 质量浓度特征

冰川 δ²H、δ¹⁸O、ρ(Cl⁻)(ρ 为质量浓度)不同月份之间差异不大(表 1)。与冰川相比,格尔木河流域山区潜水 δ²H、δ¹⁸O、ρ(Cl⁻)范围均较宽(表 1)。纳赤台水文站降水 δ²H 和 δ¹⁸O 的范围分别为-158.64‰~30.5‰和-23.38‰~-2.55‰^[33],而 ρ(Cl⁻)范围为 1.90~46.52 mg/L,经计算,采样期间降水 δ²H、δ¹⁸O、ρ(Cl⁻)加权值分别为-46.6‰、-8.14‰和 5.81 mg/L。δ²H、δ¹⁸O 均值从大到小排序为降水、潜水、冰川,ρ(Cl⁻)排序相反。

表 1 格尔木河流域冰川和地下水氢氧稳定同位素和 Cl⁻ 质量浓度特征统计结果

Table 1 Statistical results of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl ⁻ concentration characteristics of glacial meltwater and groundwater in the Golmud River Watershed										
样品类型	统计值	δ ² H/‰			δ ¹⁸ O/‰			ρ(Cl ⁻)/(mg/L)		
		4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月
冰川		-78.60	-75.60	-76.36	-12.03	-11.72	-11.53	36.31	35.62	38.89
山区潜水	最大值	-67.87	-67.82	-66.50	-9.93	-9.83	-9.77	273.44	276.00	242.00
	最小值	-70.29	-70.78	-70.05	-10.98	-10.88	-11.18	37.40	59.10	81.20
	平均值	-69.02	-68.95	-68.08	-10.57	-10.40	-10.58	144.48	162.48	183.40
	标准差	0.94	1.22	1.47	0.39	0.48	0.59	102.72	94.84	72.52

3.2 河水氢氧稳定同位素与 Cl⁻ 质量浓度年内变化特征

3.2.1 月际变化

河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 lc-excess 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 范围分别为 $-45.18\text{‰} \sim -71.59\text{‰}$ 、 $-5.28\text{‰} \sim -11.84\text{‰}$ 、 $-19.03\text{‰} \sim 5.98\text{‰}$ 和 $22.28 \sim 704 \text{ mg/L}$, 随月份变化而变化(图3)。4月河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 lc-excess 变化范围与9月、10月接近, 明显小于7月。相同河段不同月份同位素数据标准偏差在 $0.51\text{‰} \sim 5.51\text{‰}$ 之间, 其中, 东支最大, 西支最小。均值上, 河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 自4月到12月呈现低、高、低的变化趋势, 其中7月最高而12月最低。河水 lc-excess 月均值都小于0, 其中9月最低而10月最高。河水 $\rho(\text{Cl}^-)$ 变化范围在7月最宽, 12月最窄, 其均值从大到小排序为9月、4月、5月、7月、10月、12月。这些结果反映了河流水文在时间上的差异性^[34]。

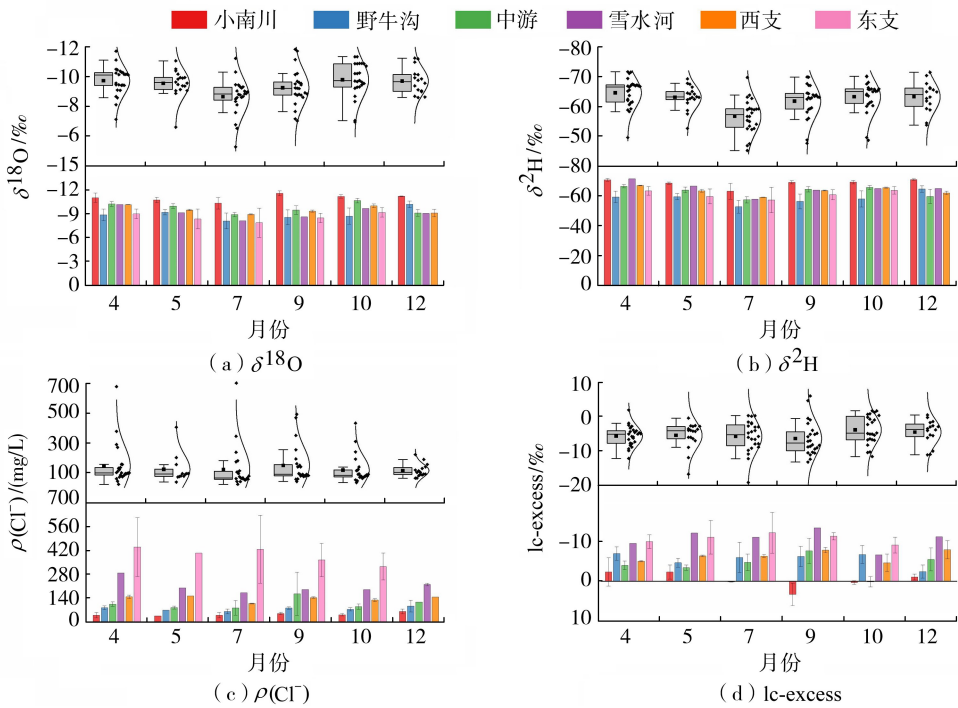


图3 格尔木河水氢氧稳定同位素与 Cl⁻ 质量浓度月变化特征

Fig. 3 Monthly variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes and Cl⁻ concentrations in the Golmud River

3.2.2 空间变化

由图3和图4可知,4月、5月、7月、9月和10月的河水氢氧稳定同位素组成呈现相似的空间变化特征, 即 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在小南川最低(接近冰川的值), 在野牛沟较高, 在中下游(纳赤台至东支)较低, 在雪水河稍高于临近干流的值, 在下游东支又升高, 而河水 lc-excess 值表现正好相反。相同月份, 小南川氢氧稳定同位素值低于其他河段。河水同位素特征并不随高程变化而有规律的变化(图4), 可能反映了如下关键信息: ①小南川河水明显受玉珠峰冰雪融化影响; ②野牛沟河水与昆仑湖水体长时间滞留与强烈蒸发有关; ③中下游河水是多元补给混合的结果, 雪水河输入影响不大; ④东支河水遭受强烈的蒸发作用。

这些月上游2个支流河水氢氧稳定同位素空间变化差异也非常明显: 随高程下降, 小南川河段河水 $\delta^{18}\text{O}$ 增大、 lc-excess 减小, 而野牛沟呈现与之相反的趋势(图4)。其原因可能有①野牛沟河水源自水体遭受蒸发且长期滞留的昆仑湖, 沿途冰雪融水或/和地下水输入, 导致其 $\delta^{18}\text{O}$ 减小和 lc-excess 增大; ②小南川河水来自玉珠峰冰川融水, 不存在滞留蒸发的情形, 顺着流向, 其氢氧同位素变化遵循瑞利分馏理论。另外, 野牛沟和小南川河水在纳赤台附近汇合后, 流至中下游其同位素组成没有明显变化, 其可能的原因有: ①纳赤台一出山口河段河水流速较大, 短时间的流动过程中蒸发对河水同位素影响较小; ②这条河段河水存在可观的地下水补给, 平衡了由蒸发带来的同位素变化。大部分月份雪水河水 $\delta^{18}\text{O}$ 高于邻近主干流的值, 而 $\delta^2\text{H}$ 值相反, 可能与该河流所处的自然条件有关。12月河水的空间变化特征与其他月份不同: 上游2个支流河水同

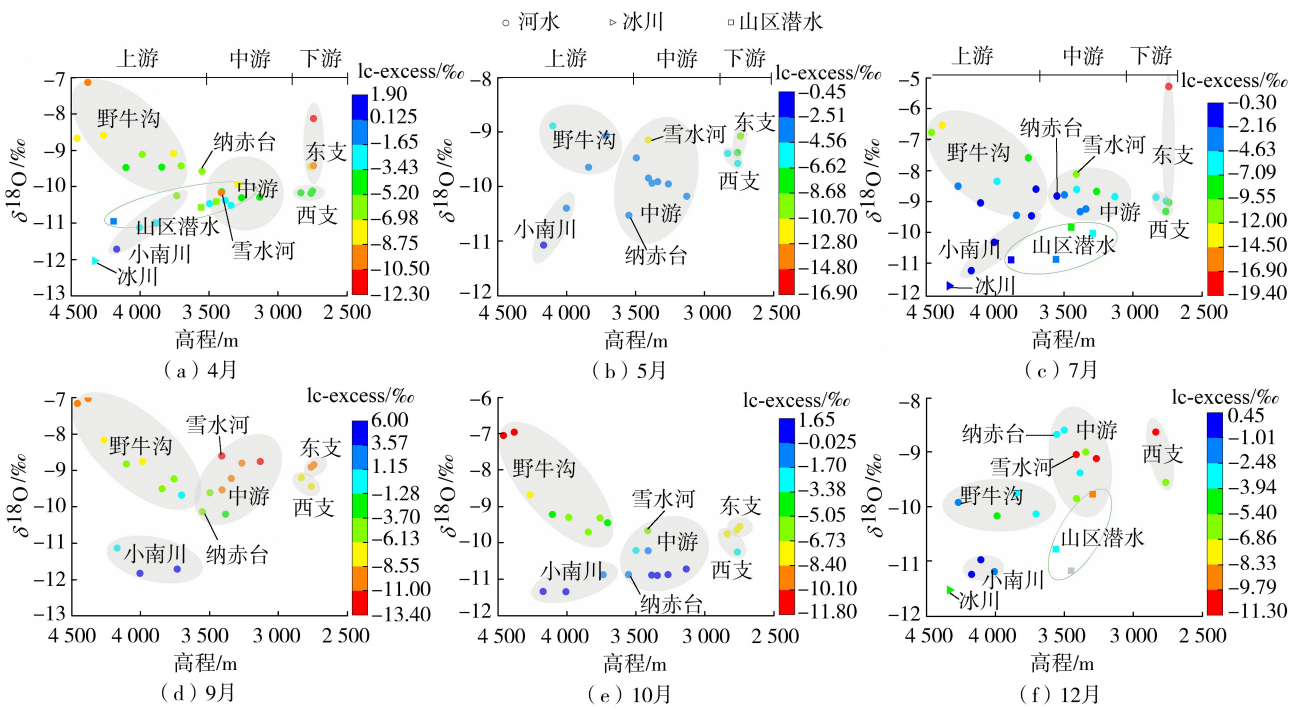


图 4 格尔木河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 lc-excess 随高程的变化特征

Fig. 4 Variation of $\delta^{18}\text{O}$ and lc-excess in the Golumd River with elevation

位素组成并未表现随高程变化的趋势,中下游河水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 明显高于上游,可能与中下游的地表蒸发或地下水补给有关。

与氢氧稳定同位素不同,从上游到下游,不同月份河水 Cl^- 质量浓度总体上呈现增加的趋势,反映了河流蒸发强度的变化^[11]。

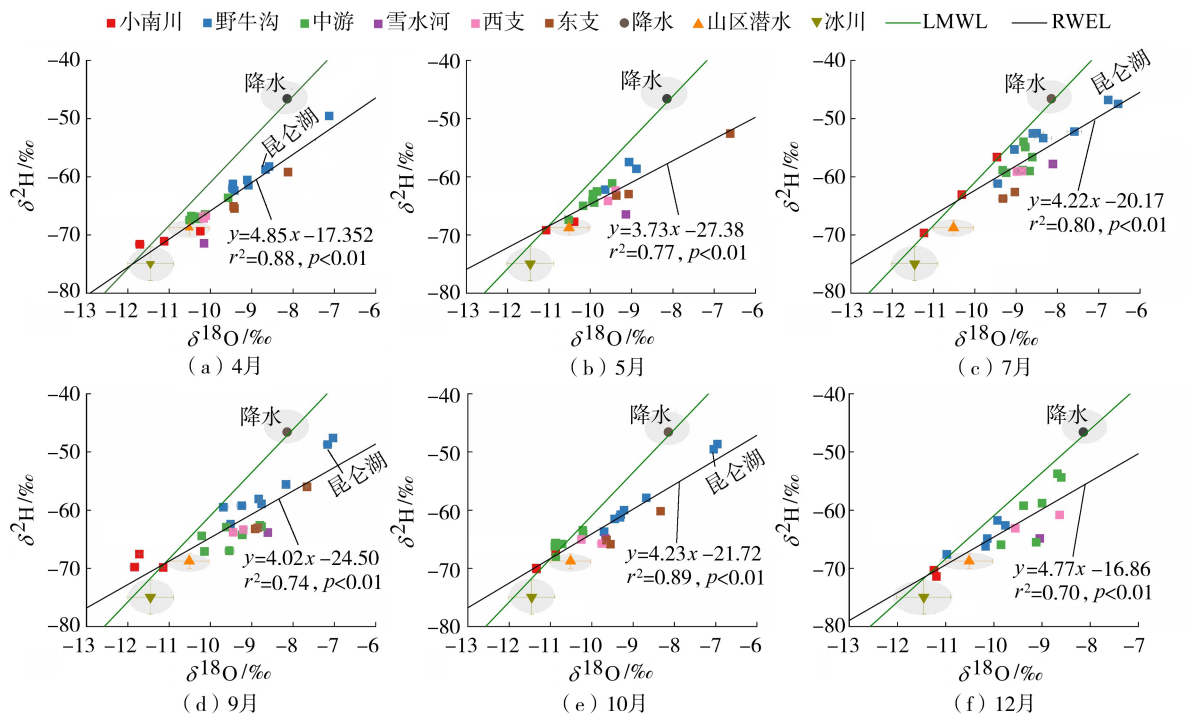
3.3 补给高程与补给来源

3.3.1 补给高程

2019 年月平均降水量在格尔木水文站约 5 mm,在纳赤台水文站约 18 mm(图 2)。野外观测发现,纳赤台以下日降水事件仅湿润表层土壤而对河流输入甚微,有效降水事件通常发生纳赤台以上区域^[22]。同时,格尔木流域中下游没有冰川和积雪分布(图 1)。因此,中下游河水补给源应位于纳赤台以上区域。

当地大气降水线(LMWL)与河水蒸发线(RWEL)的交点通常被视为河水补给初始值,借助流域降水同位素与高程的关系方程,可计算河水的平均补给高程^[50]。饶文波等^[33]基于 2019 年的纳赤台 51 个日降水样品的同位素实测数据,建立了格尔木河流域大气降水线: $\delta^2\text{H}=7.4\delta^{18}\text{O}+13.2$ 。王涛等^[51]基于多源数据模拟也提出了一条较为接近的流域大气降水线: $\delta^2\text{H}=7.74\delta^{18}\text{O}+5.56$ 。本文采用饶文波等^[33]建立的大气降水线方程,如图 5 所示。不同月份格尔木河水蒸发线与流域大气降水线的交点有所差异。前人对格尔木河流域降水同位素的高程效应进行了分析^[52-53]:海拔 4 500 m 的西大滩新雪 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -58.3‰ 和 -9.64‰ ,海拔 2 820 m 的格尔木市降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -15.1‰ 和 -3.82‰ ^[52]。基于这组数据,降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的高程梯度每 100 m 分别为 -2.6‰ 和 -0.35‰ 。李健等^[53]测得的昆仑山北坡海拔 4 500 m 降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均值分别为 -61.9‰ 和 -10.45‰ ,格尔木平原海拔 2 820 m 降水的均值分别为 -25.3‰ 和 -4.8‰ ,由此算得降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的高程梯度每 100 m 分别为 -2.17‰ 和 0.34‰ 。这 2 项研究的 $\delta^{18}\text{O}$ 高程梯度结果均在全球降水同位素高度梯度范围(每 100 m 为 $-0.1\text{‰}\sim-0.5\text{‰}$)^[54] 内。

由表 2 可知,基于孙存煜^[52]的数据,根据 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别计算的河水平均补给高程接近,而基于李健等^[53]的数据计算的河水平均补给高程差异明显。因此,基于孙存煜^[52]的数据计算得到的结果较为合理。不同月份河水平均补给高度有一定的差别,总体上高于 4 700 m,明显高于纳赤台水文站的高程(3 552 m)。



注:山区潜水和冰川数据为本文所测得的山区潜水和冰川同位素均值±标准偏差,降水数据源于纳赤台降水同位素月加权值^[33]。

图5 河水、山区潜水、降水、冰川的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$

Fig. 5 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ relationship in river water, phreatic water, precipitation, and glacial meltwater

表2 格尔木河水补给初始同位素值和平均补给高程

Table 2 Initial isotope values and mean elevations of water recharge in the Golmud River

月份	LMWL 与 RWEL 的交点		河水平均补给高程 1/m		河水平均补给高程 2/m	
	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	基于 $\delta^{18}\text{O}$	基于 $\delta^2\text{H}$	基于 $\delta^{18}\text{O}$	基于 $\delta^2\text{H}$
4	-11.91	-75.1	5 156	5 154	4 935	5 107
5	-11.02	-68.5	4 899	4 897	4 669	4 803
7	-10.43	-64.2	4 729	4 728	4 495	4 604
9	-11.12	-69.2	4 927	4 925	4 698	4 836
10	-10.98	-68.2	4 887	4 886	4 657	4 790
12	-11.39	-71.2	5 004	5 003	4 778	4 928

注:补给高程1基于孙存煜^[52]的数据计算,补给高程2基于李健等^[53]的数据计算。

3.3.2 补给来源

高寒河流主要由冰川融水、降水和地下水补给^[55-56],已有研究对格尔木河的分析也得到相似结果^[21]。由图5可知,小南川河水氢氧稳定同位素7月较分散并有趋向降水的态势,而其他月份处在冰川和地下水之间,表明该河段河水补给7月受降水影响明显而其他月份与冰川和地下水密切相关。与小南川一样,7月野牛沟河水可能受降水影响较大,因为一个月该河段河水同位素值更偏向降水(图5)。4月、5月、9月、10月中下游河水氢氧稳定同位素值不同程度地接近地下水,暗示了地下水对该河段河水的补给,而7月和12月该河段河水氢氧稳定同位素信息更趋向于当地大气降水线附近,与这2个月流域上游降水(雪)较多有关。由于降水输入少,下游河水除了与中游来水有关还与地下水密切联系(图5)。

河流水文研究时通常通过河水与补给端元氢氧稳定同位素值对比确定河水的补给来源组成,并采用不同的模型定量评价各补给端元的贡献比例^[13,38]。由于未考虑蒸发影响,这个方法获得的结果存在较大误差。由于河水蒸发线和流域降水线的交点可视为河水补给初始值,基于该交点同位素值,利用模型可定量计算不同月各来源对河水补给的贡献^[7]。该方法的优点在于消除了河水氢氧稳定同位素的蒸发影响并能获得河水补给来源的整体信息,但不能得到不同点位河水补给的初始信息。目前还未有较好的方法精确恢复不同点位河水补给的同位素初始值,因此本文仅对格尔木河水补给来源的整体信息进行探讨。

由图5可知,各月格尔木河水补给的同位素值更靠近冰川与地下水而与降水相距更远。因此,冰川和地

下水是格尔木河水补给的主要来源。河水补给初始值随月份有一定的变化,4 月接近冰川而远离其他两个端元,5 月靠近地下水,7 月上移至地下水与降水的范围之间,随后又下移至地下水和冰川之间(图 5),这些结果反映了河水补给来源组成比例的变化。

基于 MixSIAR 模型计算了各月格尔木河水补给来源贡献。计算时用玉珠峰山麓冰川同位素均值($\delta^2\text{H}=-76.86\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-11.76\text{‰}$)代表冰川端元,山区潜水同位素均值($\delta^2\text{H}=-68.68\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-10.51\text{‰}$)代表地下水端元,纳赤台降水同位素月加权值($\delta^2\text{H}=-46.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-8.14\text{‰}$)代表降水端元^[33]。如图 6(a)所示,冰川对河水的补给占有重要比例,尤其在 4 月,冰川贡献高达 57.5%;地下水对河水补给也有重要贡献,7 月高达 46.8%;降水贡献较低,最高为 24.2%,出现在 7 月。基于 MixSIAR 模型结果和格尔木河流量数据,进一步计算了各端元的绝对补给流量,结果如图 6(b)所示。各月冰川绝对补给流量在 $7.4\sim18.9\text{ m}^3/\text{s}$ 之间,地下水补给绝对流量在 $4.34\sim26.2\text{ m}^3/\text{s}$ 之间,降水绝对补给流量在 $3.5\sim13.5\text{ m}^3/\text{s}$ 之间,12 月降水、冰川、地下水绝对补给流量均最低。不同月份各端元对河水补给的贡献差异实际上与气候变化密切相关^[24]。春季融雪期,尤其在 4 月,气温回升,降水少,冰川开始融化,其绝对补给流量为 $15.64\text{ m}^3/\text{s}$,成为春季河水主要贡献者。夏季,气温继续升高,降水增大,冰川融水增多和冻土层明显解冻^[57],导致降水和地下水的贡献比例增大,其绝对补给流量显著增加,而冰川尽管其补给比例下降但绝对补给量略有升高。自 9 月后,随着气温下降和降水减少,冰川融水减少^[57],各端元对河水的补给比例和绝对补给流量呈现下降的趋势。总体上,冰川和地下水的总贡献在 75.8%~86.9%之间,绝对补给总流量达到 $11.7\sim42.4\text{ m}^3/\text{s}$,是格尔木河既主要又稳定的水源,在下游的社会工农牧等行业中发挥重要作用^[23]。Yang 等^[58]对那曲河径流补给的研究得出地下水和冰川融水是河流的主要来源,占总流量的 72%。在格尔木河流域附近的祁连山和昆仑山也进行了类似的研究:Wang 等^[59]对祁连山山区径流来源的研究表明,黑河上游河流径流 80.2%来自冻土、雪、冰川地区;昆仑山口河中冰川融水对河流流量的贡献高达 56.64%^[60]。这些研究有力地支持了本文结论。

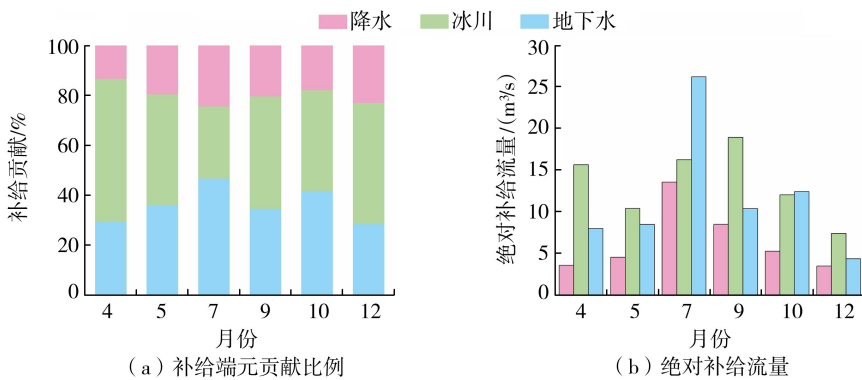


图 6 不同月份河水补给端元贡献比例和绝对补给流量

Fig. 6 Proportion of contribution from river water recharge sources and absolute flow of recharge in different months

3.4 河水蒸发评价

格尔木河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 基本落在当地大气降水线之下(图 5),表明河水受蒸发影响或其补给源遭受蒸发影响^[61-62]。 $\delta^{18}\text{O}$ 通常被视为衡量流域水体蒸发的经典指标,其值越大,蒸发越强^[63]。与 $\delta^{18}\text{O}$ 一样, $\rho(\text{Cl}^-)$ 也是衡量流域水体蒸发的重要指标^[11]。如图 3 和图 4 所示,各月份格尔木河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的空间分布表明沿流向河水蒸发呈现增强的趋势,其中东支河水的蒸发程度最高。基于 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的月分布特征,夏秋季河水蒸发相对高而冬春季节较低(图 3),与格尔木河流域纳赤台和格尔木水文站监测的蒸发数据(图 2)一致。格尔木河水 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间存在的一定正相关关系进一步证明了两者的指示河水蒸发的潜力(图 7(a), r 为相关系数, p 为显著性, n 为样品数)。近年来,学者提出一个衡量水体蒸发的新指标——lc-excess,其值越小,表明水体蒸发越大^[61]。格尔木河流中,lc-excess 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 呈现较显著的负相关关系(图 7(b)),其空间和月变化特征所反映的信息也与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的基本一致(图 3 和图 4)。相对而言,lc-excess 指标由流域降水线方程计算得到,示踪原理清晰,能较直观地反映蒸发信息但不能量化河水蒸发损失^[32,55]。相反,利用瑞利分馏模型计算能得到水体蒸发损失率^[61]。

用瑞利分馏模型评价格尔木河水体蒸发程度,计算中采用格尔木流域不同月份河水蒸发线与流域降水

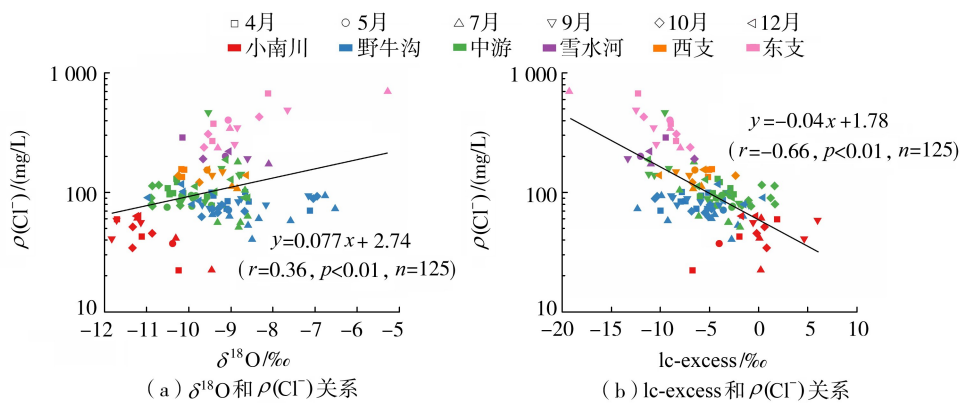


图7 不同月份格尔木河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、lc-excess 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的关系

Fig. 7 Relationship of $\delta^{18}\text{O}$ and lc-excess with $\rho(\text{Cl}^-)$ in the Golmud River in different months

线的交点作为河水补给初始值(表2)。由图8可知,上游两条支流(小南川和野牛沟)河水蒸发损失率及空间分布差异明显。小南川蒸发损失率大多小于5%,与当地蒸发潜力低关系较大。受昆仑湖影响,野牛沟蒸发损失率较大,但沿流向蒸发损失降低,在4月、9月、10月表现较明显,与周边冰雪融水和地下水输入有关。格尔木河中游蒸发损失率多在8%左右,按损失率均值从大到小排序为12月、9月、7月、4月、5月、10月。中游区降水少,也不存在冰雪覆盖,如果该河段河水仅为上游来水,河水可能由于蒸发影响存在损失。然而,自纳赤台到出山口,河水蒸发损失率在4月、5月、7月、10月和12月没有增加反而有降低的趋势,而且雪水河蒸发损失率很高。据此,高海拔冰川融水可能通过断裂、裂隙等通道补给中游河段。9月中游河水蒸发损

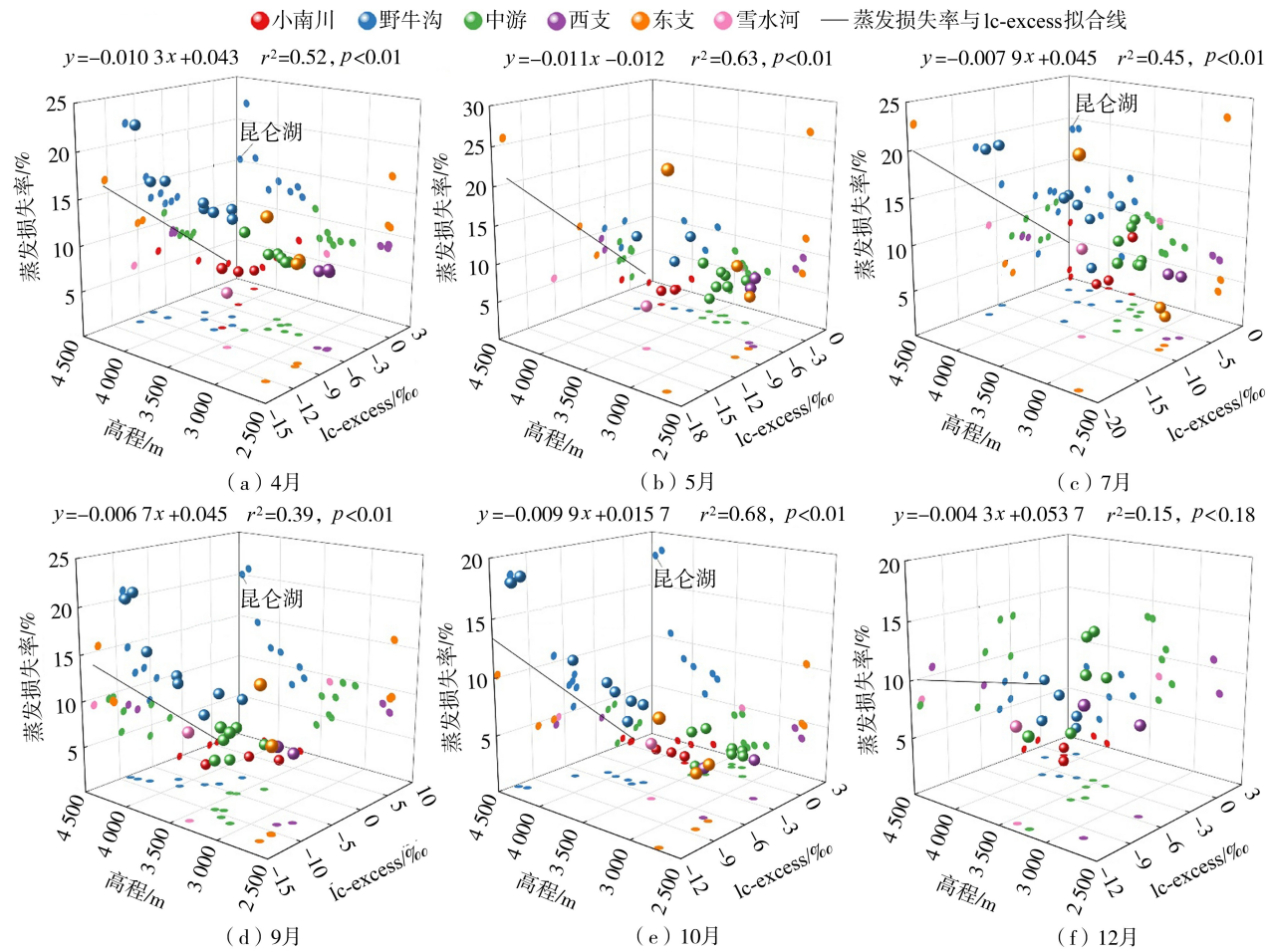


图8 格尔木河蒸发损失率与 lc-excess、高程的关系

Fig. 8 Relationship between evaporation loss rate, lc-excess, and elevation in the Golmud River

失率自纳赤台至出山口存在升高的趋势,与其他月份不同,其原因需后期研究进一步探究。12 月气温极低、冰雪封冻,河流量小,中游少量蒸发会导致河水蒸发损失率升高。另外,除 7 月之外,其他月份东支河水蒸发损失率稍高于西支,这与东支采样点向北更靠近达布逊湖且有较强的蒸发有关。

总之,小南川各月份蒸发损失率均小于 5%,野牛沟月均蒸发损失率在 11%左右,中游月蒸发损失率在 8%左右,下游东支蒸发损失高于西支,最高可达 25.8%。通过瑞利分馏模型结果与 lc-excess 值的对比发现,12 月格尔木河流蒸发损失率与 lc-excess 未表现出明显相关性,可能与该月气温较低、蒸发强度较弱有关(图 2),而 lc-excess 是反映蒸发过程同位素分馏效应的指标,在低蒸发条件下不明显^[36]。除 12 月外,其他月份模型计算的蒸发损失率与 lc-excess 表现显著负相关性(图 8),进一步验证 lc-excess 是评估河水蒸发的有效指标。

4 结 论

a. 河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 lc-excess 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 范围分别为 $-45.18\text{‰} \sim -71.59\text{‰}$ 、 $-5.28\text{‰} \sim -11.84\text{‰}$ 、 $-19.03\text{‰} \sim 5.98\text{‰}$ 和 $22.28 \sim 704 \text{ mg/L}$ 。这些参数呈现不同的空间和季节变化特征。空间上, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 小南川最低,在野牛沟较高, lc-excess 呈相反趋势; $\rho(\text{Cl}^-)$ 从上游到下游沿程增加。时间上, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在 7 月最高而在 12 月最低; lc-excess 在 9 月最低而在 10 月最高; $\rho(\text{Cl}^-)$ 在 9 月最高而在 12 月最低。

b. 格尔木上游受不同水文因素控制:小南川受冰川融化影响明显而野牛沟受降水影响显著。纳赤台以下河水由上游来水和地下水补给。MixSIAR 模型结果表明冰川融水和地下水对河流的贡献在 75.8%以上。瑞利分馏模型结果发现,小南川蒸发损失率最小($<5\%$),野牛沟和下游东支蒸发损失率最大,中游蒸发损失率在 8%左右。瑞利分馏模型计算结果与 lc-excess 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 能相互印证,验证了蒸发评估结果的可靠性。中下游较低的蒸发损失暗示高海拔冰川融水和山区降水通过断裂或裂隙等渗漏补给河水的可能性。

参考文献:

[1] SHAO Lili, TIAN Lide, CAI Zhongyin, et al. Driver of the interannual variations of isotope in ice core from the middle of Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2017, 188: 48-54.

[2] CHENG Yaping, FAN Qishun, CHEN Tianyuan, et al. Influencing mechanism and hydrogeological implications of water level fluctuation of lakes in the northern Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2023, 41(4): 1243-1257.

[3] 刘小宝, 易磊, 马喆, 等. 格尔木河流域水文气象要素变化特征及其遥相关分析[J]. 盐湖研究, 2023, 31(4): 39-52. (LIU Xiaobao, YI Lei, MA Zhe, et al. Characteristics of changes in hydrometeorological elements of the Golmud River basin and their teleconnection analysis[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(4): 39-52. (in Chinese))

[4] HUANG Jinting, WANG Wenke, CUI Xudong, et al. Environmental risk-based hydroeconomic evaluation for alluvial aquifer management in arid river basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134655.

[5] YANG Nuan, WANG Guangcai. Spatial variation of water stable isotopes of multiple rivers in southeastern Qaidam Basin, Northeast Qinghai-Tibetan Plateau: insights into hydrologic cycle[J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: 130464.

[6] 汪生斌, 祁泽学, 王万平, 等. 格尔木河水化学特征及成因[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 93-98. (WANG Shengbin, QI Zexue, WANG Wanping, et al. Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 93-98. (in Chinese))

[7] 陶士勇, 张翔, 夏军强, 等. 鄱阳湖湿地碟形湖-河流水稳定同位素变化特征及其指示意义[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 487-498. (TAO Shiyong, ZHANG Xiang, XIA Junqiang, et al. Variations of stable isotopic characteristics of shallow lake-river water system and its indicative significance in Lake Poyang wetland, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2): 487-498. (in Chinese))

[8] 郑欣虹, 陈建生. 苏北灌南地下水补给源同位素地球化学分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 24-30. (ZHENG Xinhong, CHEN Jiansheng. Isotope geochemistry analysis of groundwater recharge source in Guannan, northern Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 24-30. (in Chinese))

[9] 詹沪成, 赵娜, 陈建生. 雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 10-17. (ZHAN Lucheng, ZHAO Na, CHEN Jiansheng. Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 10-17. (in Chinese))

- [10] 郑玉慧,李小慧,白曜宇,等. 香格里拉地区温泉水化学特征及成因分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):158-164. (ZHENG Yuhui,LI Xiaohui,BAI Yaoyu,et al. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of hot springs in Shangrila Region[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):158-164. (in Chinese))
- [11] DOGRAMACI S,FIRMANI G,HEDLEY P,et al. Evaluating recharge to an ephemeral dryland stream using a hydraulic model and water,chloride and isotope mass balance[J]. Journal of Hydrology,2015,521:520-532.
- [12] YANG Kunhua,HAN Guilin,ZENG Jie,et al. Spatial variation and controlling factors of H and O isotopes in Lancang River Water,Southwest China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(24):4932.
- [13] LI Zongjie,LI Zongxing,SONG Lingling,et al. Hydrological and runoff formation processes based on isotope tracing during ablation period in the source regions of Yangtze River[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(8):4169-4187.
- [14] 孙从建,周思捷,陈亚宁,等. 中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):111-121. (SUN Congjian,ZHOU Sijie,CHEN Yaning,et al. Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):111-121. (in Chinese))
- [15] HUANG Xianglin,AN Ru,WANG Huilin,et al. Differential effects of climatic and non-climatic factors on the distribution of vegetation phenology trends on the Tibetan plateau[J]. Heliyon,2023,9(10):e21069.
- [16] 李虎,潘小多. 青藏高原水汽输送过程及水汽源地研究方法综述[J]. 地球科学进展,2022,37(10):1025-1036. (LI Hu,PAN Xiaoduo. An overview of research methods on water vapor transport and sources in the Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science,2022,37(10):1025-1036. (in Chinese))
- [17] 李宗省,张百娟,冯起,等. 我国西部高寒山区同位素生态水文研究进展[J]. 地球科学,2023,48(3):1156-1178. (LI Zongxing,ZHANG Baijuan,FENG Qi,et al. A review of isotope ecohydrology in the cold regions of western China[J]. Earth Science,2023,48(3):1156-1178. (in Chinese))
- [18] YU Wusheng,YAO Tandong,TIAN Lide,et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research,2008,87(2):158-169.
- [19] LIU Lina,WANG Nannan,ZHANG Yanrong,et al. Spatial and temporal variations of vegetation cover on the central and eastern Tibetan Plateau since the last glacial period[J]. Global and Planetary Change,2024,240:104536.
- [20] ZHONG Ruida,HE Yanhu,CHEN Xiaohong. Responses of the hydrological regime to variations in meteorological factors under climate change of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research,2018,214:296-310.
- [21] XIAO Yong,SHAO Jingli,FRAPE S K,et al. Groundwater origin,flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds:a case study from the Qaidam Basin,northwestern China[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(8):4381-4400.
- [22] YANG Nuan,WANG Guangcai,HOU Enke,et al. Triple isotopes ($\delta\text{D},\delta^{18}\text{O},\delta^{17}\text{O}$) characteristic of river water and groundwater in an arid watershed from Qaidam Basin,northwestern China: implications for hydrological cycle[J]. Science of the Total Environment,2024,927:172229.
- [23] 邵理想,饶文波,檀涛,等. 基于格尔木河流域的 SWAT 模型水文特征情景模拟研究[J]. 水文,2023,43(2):46-51. (TAI Lixiang,RAO Wenbo,TAN Tao,et al. Scenario simulation research on hydrological characteristics of the Golmud River Basin based on SWAT model[J]. Journal of China Hydrology,2023,43(2):46-51. (in Chinese))
- [24] 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[J]. 盐湖研究,2023,31(4):30-38. (HAN Jibin,WANG Jianping,YI Lei,et al. The potential analysis of rain-flood resources in the Golmud River Catchment based on climate change and human interventions,Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research,2023,31(4):30-38. (in Chinese))
- [25] SHEN Huigui,RAO Wenbo,TAN Hongbing,et al. Controlling factors and health risks of groundwater chemistry in a typical alpine watershed based on machine learning methods[J]. Science of the Total Environment,2023,854:158737.
- [26] 陈艺鑫,张梅,李川川,等. 末次冰盛期后格尔木河下切的时空变化及其构造意义[J]. 地理学报,2011,66(11):1540-1550. (CHEN Yixin,ZHANG Mei,LI Chuanchuan,et al. Fluvial incision process and its tectonic implications of Golmud River since last glaciation maximum[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(11):1540-1550. (in Chinese))
- [27] 沈回归,饶文波,谭红兵,等. 高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):9-17. (SHEN Huigui,RAO Wenbo,TAN Hongbing,et al. Chemical characteristics,influencing factors and human health risks of groundwater in a typical alpine watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):9-17. (in Chinese))

[28] 张京. 格尔木河流域土壤湿度的遥感反演[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.

[29] ZHANG Xianghui,ZHANG Changmin,FENG Wenjie,et al. Application of remote sensing in the description of fluvial system in dryland;a case study of Golmud distributive fluvial system,Qaidam Basin,NW China[J]. Journal of Palaeogeography,2022,11(4):601-617.

[30] 饶天兴,周刚,张世强. 青藏高原北部格尔木河流域水文过程的模拟与预估[J]. 冰川冻土,2024,46(4):1113-1127. (RAO Tianxing,ZHOU Gang,ZHANG Shiqiang. Simulation and projection of hydrological processes in Golmud River basin,northern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2024,46(4):1113-1127. (in Chinese))

[31] 国家统计局. 2020 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020.

[32] XIE Cong,LIU Hang,LI Xingru,et al. Spatial characteristics of hydrochemistry and stable isotopes in river and groundwater,and runoff components in the Shule River Basin,northeastern of Tibet Plateau[J]. Journal of Environmental Management,2024,349:119512.

[33] 饶文波,李焱炜,谭红兵,等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源:以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报,2021,52(9):1116-1125. (RAO Wenbo,LI Yaowei,TAN Hongbing,et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region;a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(9):1116-1125. (in Chinese))

[34] LANDWEHR J M,COPLEN T B. Line-conditioned excess:a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems[C]//Proceedings of the International Conference on Isotopes in Environmental Studies. Vienna:IAEA,2006:132-135.

[35] EVARISTO J,JASECHKO S,MCDONNELL J J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow[J]. Nature,2015,525(7567):91-94.

[36] LANDWEHR J M,COPLEN T B,STEWART D W. Spatial,seasonal,and source variability in the stable oxygen and hydrogen isotopic composition of tap waters throughout the USA[J]. Hydrological Processes,2014,28(21):5382-5422.

[37] HAMANI A K M,LIU Junming,SI Zhuanyun,et al. The relationship of δD and $\delta^{18}O$ in soil water and its implications for soil evaporation across distinct rainfall years in winter wheat field in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2024,304:109092.

[38] TORRES-MARTÍNEZ J A,MAHLKNECHT J,MORA A,et al. Unveiling nitrate origins in semiarid aquifers:a comparative analysis of Bayesian isotope mixing models using nitrate and boron isotopes and a Positive Matrix Factorization model[J]. Journal of Hydrology,2024,639:131622.

[39] MAO Lulu,REN Wenbo,LIU Xitao,et al. Tracking the multiple Hg sources in sediments in a typical river-lake basin by isotope compositions and mixing models[J]. Journal of Hazardous Materials,2023,459:132166.

[40] XIA Yun,XIAO Jun,WANG Wanzhou,et al. Nitrate dynamics in the streamwater-groundwater interaction system:sources,fate,and controls[J]. Science of the Total Environment,2024,918:170574.

[41] ZHANG Chi,RAO Wenbo,WU Zhihua,et al. Anthropogenic impacts and quantitative sources of nitrate in a rural-urban canal using a combined PMF, $\delta^{15}N/\delta^{18}O-NO_3^-$,and MixSIAR approach[J]. Environmental Research,2024,251(Pt 1):118587.

[42] LI Murong,BIAN Jianmin,WANG Yu,et al. Identifying interactions of linked irrigated lake-groundwater system by combining hydrodynamic and hydrochemical method[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2023,30(40):91956-91970.

[43] MOORE J W,SEMMENS B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. Ecology Letters,2008,11(5):470-480.

[44] JIANG Xiaoqing,HAO Shuai,LI Fadong,et al. Tracking seasonal evaporation of arid Ebinur Lake,NW China:isotopic evidence[J]. Environmental Earth Sciences,2024,83(18):543.

[45] ZHAO Xin,LI Fadong. Isotope evidence for quantifying river evaporation and recharge processes in the lower reaches of the Yellow River[J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(3):123.

[46] WANG Shiqin,TANG Changyuan,SONG Xianfang,et al. The impacts of a linear wastewater reservoir on groundwater recharge and geochemical evolution in a semi-arid area of the Lake Baiyangdian watershed,North China Plain[J]. Science of the Total Environment,2014,482-483:325-335.

[47] 吕雯改,刘云飞,殷昌军,等. 基于稳定同位素的策勒河流域山区河流蒸发损失估算[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(6):62-68. (LYU Wengai,LIU Yunfei,YIN Changjun,et al. Estimation of river evaporation loss in the Cele River Basin based on stable isotopes[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2022,33(6):62-68. (in Chinese))

[48] JIN Jin, LIU Tiejun, LIAO Zilong, et al. Interaction between intermittent river and groundwater in arid and semiarid basin considering the influence of evaporation on isotopic compositions[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2024, 54:101876.

[49] 郭鑫,李文宝,孙标. 氢氧稳定同位素对达里湖水体蒸发与补给来源的指示作用[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4):930-938. (GUO Xin, LI Wenbao, SUN Biao. Indication of hydrogen and oxygen stable isotopes in Dali Lake for evaporation and replenishment sources[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4):930-938. (in Chinese))

[50] BOWEN G J, PUTMAN A, BROOKS J R, et al. Inferring the source of evaporated waters using stable H and O isotopes[J]. *Oecologia*, 2018, 187(4):1025-1039.

[51] 王涛,李其发,张茜,等. 基于多源数据的柴达木盆地降水同位素特征研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2):29-38. (WANG Tao, LI Qifa, ZHANG Xi, et al. Study on isotope characteristics of precipitation in Qaidam Basin based on multi-source data[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(2):29-38. (in Chinese))

[52] 孙存煜. 格尔木地区同位素水文地质[J]. *青海地质*, 1991(1):26-31. (SUN Cunyu. Isotope hydrogeology of the Golmud region[J]. *Qinghai Geology*, 1991(1):26-31. (in Chinese))

[53] 李健,王辉,魏丽琼. 格尔木河流域平原区地下水同位素及水化学特征[J]. *西北地质*, 2007, 40(4):94-100. (LI Jian, WANG Hui, WEI Liqiong. Isotopic and hydrochemical characteristics of groundwater in the Golmud River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(4):94-100. (in Chinese))

[54] PAGE CHAMBERLAIN C, POAGE M A. Reconstructing the paleotopography of mountain belts from the isotopic composition of authigenic minerals[J]. *Geology*, 2000, 28(2):115-118.

[55] 覃超,吴保生,汪舸,等. 青藏高原山区河流广义河相关系与多频率沿程河相关系[J]. *水利学报*, 2022, 53(2):176-187. (QIN Chao, WU Baosheng, WANG Ge, et al. Generalized hydraulic geometry and multi-frequency downstream hydraulic geometry of mountain rivers originated from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(2):176-187. (in Chinese))

[56] PENNA D, VAN MEERVELD H J, ZUECCO G, et al. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537:382-397.

[57] 周秉荣,袁佳双,乔斌,等. 青藏高原气候与冰冻圈变化研究进展[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(9):1885-1896. (ZHOU Bingrong, YUAN Jiashuang, QIAO Bin, et al. Research progress on climate and cryosphere changes in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(9):1885-1896. (in Chinese))

[58] YANG Yuheng, WENG Baisha, YAN Denghua, et al. Tracing potential water sources of the Nagqu River using stable isotopes[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2021, 34:100807.

[59] WANG Ninglian, ZHANG Shibiao, HE Jianqiao, et al. Tracing the major source area of the mountainous runoff generation of the Heihe River in Northwest China using stable isotope technique[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16):2751-2757.

[60] YANG Yuzhong, WU Qingbai, JIN Huijun. Evolutions of water stable isotopes and the contributions of cryosphere to the alpine river on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1):49.

[61] REN Xiaofei, LI Peiyue, HE Xiaodong, et al. Tracing the sources and evaporation fate of surface water and groundwater using stable isotopes of hydrogen and oxygen[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 931:172708.

[62] HAO Zhou, GAO Yang, ZHANG Qingwen, et al. Isotopic insights on quantitative assessments of interaction of eco-hydrological processes in multi-scale karst watersheds[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(1):156-170.

[63] VYSTAVNA Y, HARJUNG A, MONTEIRO L R, et al. Stable isotopes in global lakes integrate catchment and climatic controls on evaporation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):7224.

(收稿日期:2024-12-21 编辑:刘晓艳)