J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0122
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

天山北坡河水氢氧稳定同位素特征及其影响因素分析*

冯中丽[1,2], 郝帅[1,2**], 何定学[1,2], 李国华[1,2], 蒋晓晴[1,2]
（1: 新疆师范大学地理科学与旅游学院,乌鲁木齐 830054）
（2: 干旱区湖泊环境与资源重点实验室,乌鲁木齐 830054）

摘　要：为揭示西北干旱区天山北坡的河水稳定同位素特征及其对水文循环的指示意义，本研究于 2022－2024 年系统采集天山北坡主要河水样品，基于 216 个样品的氢氧稳定同位素数据，分析了天山北坡河水氢氧稳定同位素组成的时空变化特征，利用后向轨迹模型指示研究期间水汽输送路径，结合结构方程模型和地理环境因素探讨了影响河水氢氧稳定同位素组成的主要因素。研究结果表明：（1）天山北坡河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值范围分别为−117.2‰ ~ −46.4‰和−17.84‰ ~ −7.10‰，区域平均值分别为−78.3‰和−13.27‰；天山北坡河水氢氧稳定同位素的时间变化具有明显的河流间差异，其中乌鲁木齐河的变化幅度大于博尔塔拉河与精河；空间呈现显著地域分异，西部河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为−85.8‰和−14.16‰，中部为−71.0‰和−12.28‰，东部为−81.0‰和−13.74‰，呈现中部高、东西低的空间分布格局。（2）天山北坡的河水线（EL）方程为 $\delta^2H = 4.31\delta^{18}O - 21.94$ (R^2=0.72, n=216)，其斜率显著低于局地大气降水线（斜率 7.51）和全球大气降水线（斜率 8），表明天山北坡河水氢氧稳定同位素组成受局地环境影响发生显著蒸发富集。（3）天山北坡河水氢氧稳定同位素组成受气象条件（温度、水汽来源）、局地环境（海拔、植被、地表蒸发、河水理化性质）及河流补给（降水、冰川融雪水）影响。本研究阐述了天山北坡河水氢氧稳定同位素组成的时空分异规律，识别了影响区域河水氢氧稳定同位素组成的主要因素，为深入理解天山北坡河水氢氧稳定同位素组成所指示的水文过程提供了支撑，对维护区域生态安全、保障水资源可持续利用具有科学意义与实践价值。

关键词：氢氧稳定同位素；河水；时空分布；环境因子；天山北坡

Hydrogen and oxygen stable isotopes characteristics of rivers on the northern slope of the Tianshan Mountains and analysis of influencing factors

Feng Zhongli[1,2], Hao Shuai[1,2**], He Dingxue[1,2], Li Guohua[1,2], Jiang Xiaoqing[1,2]
(1: College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054*, P.R. China)*
(2: Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054*, P.R. China)*

Abstract: The Tianshan Mountains are a key area for water resource formation in the arid region of northwest China. Understanding regional hydrological processes is important for managing water resources in arid areas. The northern slope of the Tianshan Mountains is located in the central part of the Eurasian continent. It mainly includes the northern Tianshan Mountains and the southern edge of the Junggar Basin. This area has a typical temperate continental climate. Existing studies on isotopes in arid regions have mostly focused on precipitation and groundwater. However, systematic research on the spatiotemporal characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in river water across the entire northern slope of the Tianshan Mountains is still lacking. This study collected river water samples from major rivers on the northern slope of the Tianshan Mountains between 2022 and 2024. The goal was to clarify the stable isotope characteristics of regional river water and their implications for hydrological cycles. Based on stable hydrogen and oxygen isotope data from 216 river water samples, this paper analyzed the spatiotemporal variations of river water stable isotopes in the study area. A backward trajectory model was used to identify water vapor transport pathways during the

* 2025-12-04 收稿；2026-05-18 收修改稿；2026-05-19 录用。
国家自然科学基金项目（42461006）、中央引导地方财政项目（ZYYD2025ZY03）、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2025D01A55)和博士科研启动基金项目（XJNUBS202409）联合资助。
** 通信作者；E-mail：haoshuai1869@163.com。

sampling period. Using structural equation modeling and multiple geographic and environmental factors, the study further explored the main factors controlling river water stable isotopes. The results show three key findings. First, stable hydrogen and oxygen isotopes in river water show clear spatiotemporal variations. The δ^2H and $\delta^{18}O$ values of river water on the northern slope of the Tianshan Mountains range from −117.2‰ to −46.4‰ and from −17.84‰ to −7.10‰, with average values of −78.3‰ and −13.27‰, respectively. The temporal variations of these two isotopes are generally small, but spatial differences are large across the study area. The average δ2H and δ18O values are −85.8‰ and −14.16‰ in the western region, −71.0‰ and −12.28‰ in the central region, and −81.0‰ and −13.74‰ in the eastern region. This shows a spatial pattern with high values in the central area and low values in the eastern and western areas. Second, the regional evaporation line (EL) is defined as $\delta^2H = 4.31\delta^{18}O - 21.94$ ($R^2 = 0.72$, $n = 216$). Its slope of 4.31 is much lower than that of the local atmospheric precipitation line (7.51) and the global atmospheric precipitation line (8). This indicates that evaporation and isotopic fractionation strongly modify the isotopic composition of river water in the study area. Third, the stable isotopes in river water on the northern slope of the Tianshan Mountains are controlled by multiple interacting factors. The physicochemical properties of river water directly affect isotopic characteristics. Elevation shapes the isotopic baseline of water sources. Temperature and evaporation control isotopic enrichment during runoff. River recharge processes mix different isotopic signals in river water. In addition, water vapor sources and transport pathways determine the isotopic composition of precipitation, which further influences river water isotopes after precipitation recharges surface rivers. All these factors alter regional hydrological processes and ultimately drive variations in river water stable isotopes. This study systematically clarifies the spatiotemporal variation patterns of stable hydrogen and oxygen isotopes in river water on the northern slope of the Tianshan Mountains. Based on field sampling and laboratory analysis, it quantitatively identifies the main factors affecting stable isotope variations in regional river water. This work fills a research gap in mountain-scale isotopic analysis of hydrological processes across the entire northern slope of the Tianshan Mountains. It also provides reliable isotopic evidence for further understanding hydrological cycle processes in Tianshan watersheds.

Keywords: Hydrogen and oxygen stable isotopes; river water; spatio-temporal distribution; environmental factors; northern slope of Tianshan Mountain

水资源是地球上宝贵的自然资源，是人类社会与自然生态系统赖以存在和发展的根基[1]。在气候变化与人类活动加剧的背景下，水资源短缺已成为制约西北干旱区经济社会可持续发展的核心问题[2]。天山山脉被誉为中亚的“水塔”，是其核心产流区，该区域河网系统对维系天山北坡经济带的生态平衡与经济发展至关重要[3]；天山北坡作为西北干旱区有限水资源的重要补给源地，其水文过程与空间格局深刻影响着区域水资源分配、生态安全及协调发展。天山北坡的河流主要补给来源是降水和冰川融雪水，气候变化引起山区冰川和积雪变化加剧了水循环过程的复杂性和水资源的不确定性[4]。因此研究天山北坡地表水以及水循环，对于西北干旱区的水资源保护与管理意义重大。

全球与区域水文循环正深刻受到气候变化的影响，氢氧稳定同位素作为理想的水文示踪剂，已被广泛应用于相关研究，实现了对复杂水文过程的定量解析[5]。全球不同气候区的案例表明了同位素方法的广泛应用：在阿尔卑斯山区，湖水同位素信号表现出显著的高程效应与季节差异，揭示出不同海拔带蒸发分馏模式受地形与气候的控制[6]；在澳大利亚干旱区，植物叶片水同位素结合土壤与大气水汽数据，阐明了冠层与土壤系统的水汽交换过程[7]；在亚马逊流域，多水体同位素监测则证实大河与湖泊是大气蒸发水汽的重要来源，并揭示了小尺度水源的潜在贡献[8]。为实现从区域到全球尺度的系统性研究，国际学界建立了全球降水同位素网络（GNIP）与全球河流同位素网络（GNIR），为不同流域的水文过程比较、模型验证及气候变化响应研究提供了至关重要的数据基础[9]。

径流是陆地水循环的关键环节[10]，河水中的氢氧稳定同位素组成是反映水文过程的重要指标，可有效揭示径流组成、蒸发效应、水汽来源及流域内含水层连通性等关键水文信息[11][14]。已有较多学者对西北干旱区的水资源展开了研究，其中不少学者应用氢氧稳定同位素的方法研究该区域的不同水体，重点聚焦于地表水与地下水转化关系[15]，河水补给来源解析及其贡献率估算[16]，植物用水策略[17]，降水水汽来源[18]与云下二次蒸发效应[19]等方面。目前天山北坡河水同位素的研究多集中于中小型、数据

易获取的流域，仅有少数研究分析了河水氢氧稳定同位素组成的空间分布特征。例如艾比湖流域地表水同位素值存在季节变化[20]、博尔塔拉河与精河同位素组成沿流程显著富集[21]、呼图壁河河水季节变化差异大且受混合补给导致贫化[22]、伊犁河河水同位素组成呈现由南向北贫化、由东向西富集的特征[23]、榆树沟流域河水流量与水 $\delta^{18}O$ 值呈现负相关关系[24]。以上研究多集中于单个小流域，而从整个天山北坡山系尺度出发，基于河水氢氧稳定同位素开展水文循环过程的研究仍有空缺。

天山北坡采样难度较大，现有河流水样数据地理覆盖不均，尤其缺乏覆盖整个区域的系统性调查。特别是东部河流（如柳条河、白杨河、伊吾河、开垦河、东大龙口河等）的氢氧稳定同位素特征研究尤为薄弱。此外，大型流域水文系统复杂，多种因素共同影响着河水的同位素组成，导致同位素数据解读困难。上述问题阻碍了对天山北坡水文过程的整体理解，在当前及未来气候变化情景下，亟需补充缺失区域的河流同位素组成研究。为此，本研究以天山北坡主要河流为研究对象，旨在（1）揭示天山北坡河水 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 值的时空分布格局；（2）探讨影响河水氢氧稳定同位素组成的因素，以期深入理解天山北坡河流氢氧稳定同位素组成所指示的水文过程。该研究对维护区域生态安全、保障水资源可持续利用具有科学意义与实践价值。

1 研究区概况

天山北坡（79°48′ ~ 96°40′E, 42°30 ~ 47°40′N）地处亚欧大陆腹地，主要包括天山以北、准噶尔盆地南缘地区，地势南高北低，海拔变化范围在 200 m ~ 5000 m 左右，属典型温带大陆性气候，年平均气温为 7.0 ℃。天山山区受到西风气流和北极气团的影响，天山北坡典型流域降水水汽多以亚欧大陆再循环水汽和黑海−里海水汽为主[3]，降水由西向东递减，西部年降水量约 250~350 mm，中部约 150~200 mm，东部约 10~30 mm[25]。天山山区发育有大量冰川，冰川数量和面积分别占中国冰川总数量和总面积的 16.33%和 13.87%[26]，河流以冰雪融水和降水混合补给为主，冰川融水年径流量约为 16.9×10^{8} m^{3}，约占该地区总径流量的 13.5%[27]。河流多数垂直于山脊发育，呈南北走向，年径流量高达 4.7×10^{10} m^{3}，占新疆总径流量的 1/2 以上[28]，河流水量具有显著的季节变化。南坡位于天山以南，塔克拉玛干沙漠北缘，地形地貌复杂多样，有高山、盆地、河流、湖泊、戈壁、沙漠、平原绿洲等，海拔在 1700m~2000 m 之间。天山北坡因西风输送的大西洋水汽而降水明显多于南坡[29]；南坡则因毗连塔里木盆地受沙漠增温影响，且为阳坡辐射更强，故气温整体略高于北坡。

2 材料与方法

2.1 样本采集与处理

2024 年 5 月在天山北坡地区西部的博尔塔拉河、大河沿子河、精河、古尔图河、四棵树河、奎屯河，中部的巴音沟河、金沟河、玛纳斯河、塔西河、呼图壁河、三屯河、头屯河、乌鲁木齐河、水磨河，还有东部的二工河东干渠、渭户沟、白杨河、东大龙口河、碧流河、大河沿河、尾水渠、开垦河、柳条河、伊吾河等 25 条河流共采集 69 个河水样本，东部河流流程较短，采样较少。2022 年 7 月和 8 月对博尔塔拉河、精河展开全流域采样，博尔塔拉河 7 月、8 月分别采集 18 个（B1~B18）、24 个（B1~B24）水样；精河 7 月、8 月分别采集 8 个（J1~J8）、11 个（J1~J11）水样。2023 年 6 月、7 月、8 月对乌鲁木齐河中上游采样，分别采集了 24 个（W1~W24）、38 个（W1~W38）、24 个（W1~W24）水样（采样点分布见图 1）。在采样过程中，记录采样点的经纬度坐标，并使用 Kestrel3000 多功能手持气象仪记录海拔（Alt）信息。采样现场使用便携式水质分析仪（AZ86031）测定河水理化指标：电导率（EC）、pH、水温（T）、总矿化度（TDS）、氧化还原电位（ORP）。

为减少表层河水蒸发的影响，采样深度设于水面以下 10~15 cm 处。用于采样的棕色螺纹口玻璃瓶已经用甲醇超声清洗，并以超纯水反复冲洗后风干以保证洁净度。采样过程中，操作人员全程佩戴无粉乳胶手套，防止皮脂或其他有机污染物进入样品。采样前将 100 mL 棕色螺纹口玻璃瓶用采样点的原水润洗 3 次再装入样品水，然后迅速用 Parafilm 膜密封瓶口，每次封存时将样品编号标注在瓶身，将采

样时间、地点、水样理化指标等信息记录在采样记录本，将水样存放在 4 ℃左右的冷藏环境中保存至测定分析。

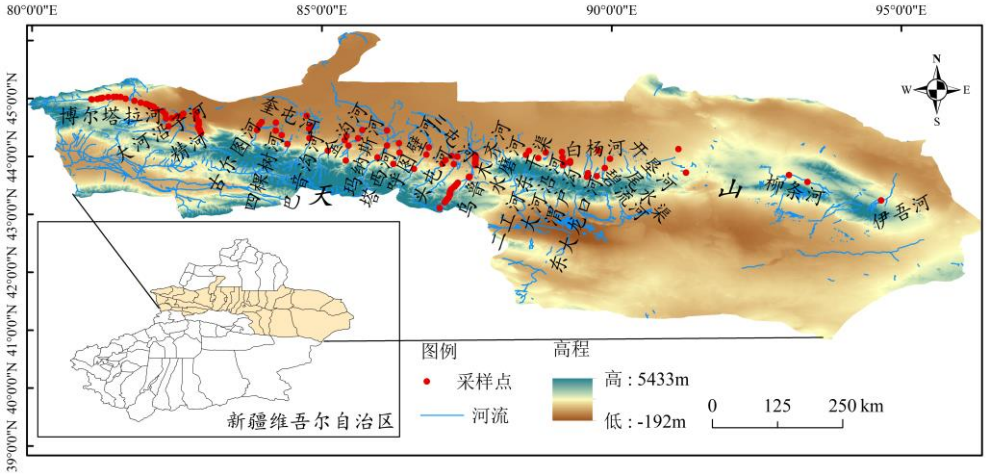

图 1 采样点分布（基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2024）0650 号的标准地图绘制，底图无修改）

Fig. 1 Distribution map of sampling points

2.2 室内样品数据处理

2.2.1 样品氢氧稳定同位素组成测定 室内分析水样前，所有水样采用 0.45 μm 的滤膜过滤，使用液态水稳定同位素分析仪(Model DLT-100)在新疆师范大学“新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室”完成 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值测定，此过程中共设置三个标准样品，按照一个标准样品对应三个水样的测量原则，每个样品均依次注射测试 6 次，前 2 次考虑仪器记忆效应舍弃，将测量结果导入 LWIA - Post Analysis 软件中分析，将最后 4 次测试的算术平均值作为最终结果。测得的数据结果用维也纳标准平均海水（V-SMOW）的千分偏差来表示:

$$\delta(‰)=\frac{R_{sample}-R_{standard}}{R_{standard}}\times 1000 \quad (1)$$

式中：R_{sample}和$R_{standard}$分别为水样和标准样品的^2H或^{18}O的同位素比率（$^2H/^1H$或$^{18}O/^{16}O$），其中δ^2H和$\delta^{18}O$的测定精度分别为0.5‰和0.15‰。

2.2.2 氘盈余 氘盈余（d-excess）作为反映氢氧稳定同位素非平衡分馏程度的重要指标，可用于指示不同区域的水汽来源与水汽循环过程。通常，d > 10‰指示水汽来源于相对湿度较低、蒸发强烈的地区；d < 10‰则指示水汽来源于相对湿度较高的温暖海洋或受二次蒸发影响的地区[30][31]。其公式为：

$$d = \delta^2H-8\delta^{18}O \quad (2)$$

2.2.3 结构方程模型（PLS-SEM） PLS-SEM 的核心算法由非线性迭代偏最小二乘法（NIPALS）构成，融合了多元统计分析、潜变量建模与因果推断。该方法不要求数据服从多元正态分布，且在小样本条件下仍能进行因果关系估计。鉴于天山北坡河水理化性质数据样本量有限且不满足正态分布，本研究采用 PLS-SEM 分析河水理化性质对氢氧稳定同位素（δ^2H 和 $\delta^{18}O$）的影响，分析软件为 SmartPLS 4.0。模型由测量模型和结构模型组成，测量模型中潜变量为河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值，观测变量为河水理化性质。结构模型则用于估计河水理化性质对河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的路径系数，从而识别理化性质对河水氢氧稳定同位素的影响方向与强度。

2.2.4 后向轨迹模型 为探究研究区水汽来源及输送路径，采用美国国家海洋与大气管理局（NOAA）与澳大利亚气象署（BOM）联合开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型（the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model，HYSPLIT）进行后向轨迹模拟。驱动模型的气象数据选用美国

国家环境预报中心（NCEP）的全球资料同化系统（GDAS）再分析资料，空间分辨率为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 6 小时。设定后向模拟时长为 72 小时，以有效识别影响研究区的关键水汽源区，模拟时段涵盖采样期（2024 年 5 月）。本研究以天山北坡西部博尔塔拉河（44°52′N, 82°31′E）、中部乌鲁木齐河(43°31′N, 87°19′E)、东部伊吾河(43°14′N, 94°39′E)为气团运行终点，为反映不同高度层的水汽输送差异，分别设定起始高度为距地面 500 m、1000 m 和 1500 m，通过模拟获得天山北坡西、中、东部采样期间降水的水汽输送路径。

3 结果与分析

3.1 天山北坡河水氢氧稳定同位素组成时间变化特征

天山北坡典型河流河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值随时间变化情况如图 2 所示。博尔塔拉河 8 月 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值（−70.3‰与−10.54‰）较 7 月（−75.6‰与−10.85‰）更为富集。精河的氢氧稳定同位素组成时间变化特征与博尔塔拉河较为相似，7 月 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值（−78.2‰和−11.32‰）略低于 8 月（−77.2‰和−11.08‰）。乌鲁木齐河 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值 7 月最高（−58.4‰和−8.82‰），6 月次之（−65.4‰和−10.21‰），8 月最低（−77.8‰和−14.35‰）。

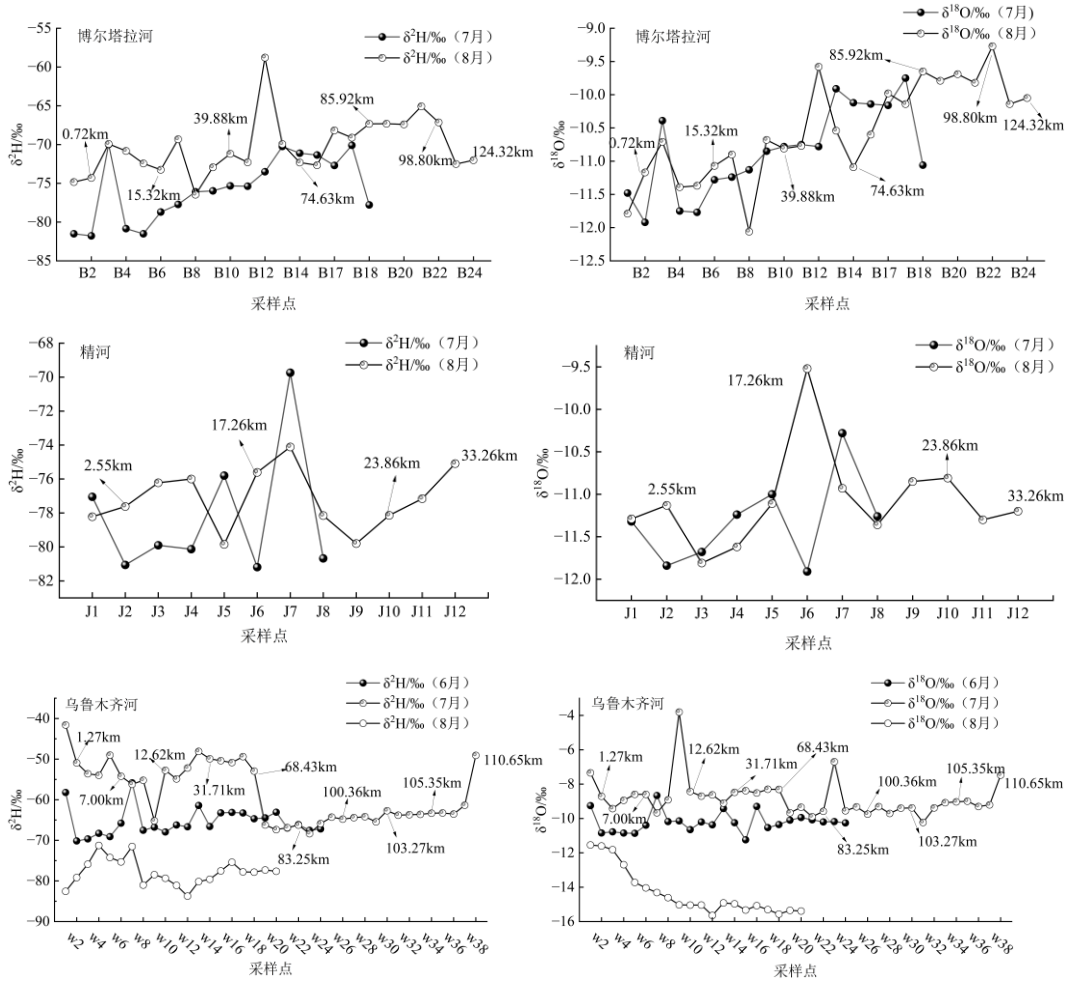

图 2 天山北坡河水氢氧稳定同位素组成时间变化特征（图中数字表示该点沿河流至上游第一个点的距离（km））

Fig. 2 Temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes compositions in rivers on the northern slope of the Tianshan Mountains（The numbers in the diagram indicate the distance (km) from that point upstream along the river to the first point）

结果表明，三条河流河水氢氧稳定同位素组成总体呈乌鲁木齐河最富集、博尔塔拉河次之、精河相对贫化的结果。博尔塔拉河和精河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值时间变化较小，但都呈现 8 月河水氢氧稳定同位素组成较 7 月富集的结果。乌鲁木齐河河水氢氧稳定同位素组成的时间变化较博尔塔拉河与精河更为明显，河水氢氧稳定同位素组成在 7 月最为富集，6 月和 8 月则相对贫化。这种变化主要受冰川融水与局地降水的混合补给影响：6 月，冰川融水补给量逐渐增加，而同期降水量偏少，河水氢氧稳定同位素组成主要受同位素贫化的冰川融水主导，整体呈现贫化特征；7 月，短时强对流降水事件频发，降水下落过程中云下二次蒸发作用强烈，导致降水同位素显著富集，补给河流后使得河水氢氧稳定同位素整体表现为富集特征；8 月，冰川融水对河流补给量最大，同时伴随持续性大气降水，二者混合补给河水，同位素组成整体呈现贫化特征。

3.2 天山北坡河水氢氧稳定同位素组成空间变化特征

天山北坡河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值空间变化明显（5 月），变化范围分别在−117.2‰～−46.4‰和−17.84‰～−7.10‰之间，平均值分别为−78.3‰和−13.27‰。δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的最大值在天山北坡西部的四棵树河中游，分别为−46.4‰和−7.10‰，最小值出现在天山北坡东部的柳条河，分别为−117.2‰和−17.84‰，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的极差分别为 70.80‰ 和 10.74‰。天山北坡中部河水氢氧稳定同位素组成最富集，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的均值分别为−71.0‰和−12.28‰；东部次之，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的均值分别为−81.0‰和−13.74‰；西部河水氢氧稳定同位素组成最贫化，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的均值分别为−85.8‰和−14.16‰。总体上呈现出中部高、东西低的空间分布格局（图 3）。

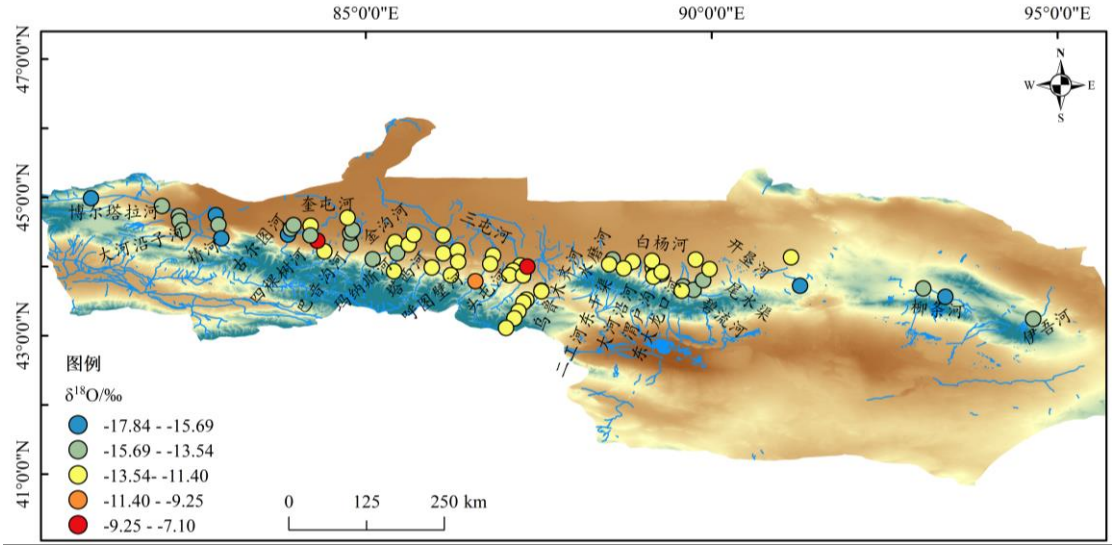

图 3 天山北坡河水氢氧稳定同位素组成空间分布特征（以 $\delta^{18}O$ 值为例）

Fig. 3 Spatial distribution map of river water isotope composition in rivers on the northern slope of the Tianshan Mountains (Taking $\delta^{18}O$ values as an example)

3.3 天山北坡河水 $\delta^{18}O$ 值与海拔的关系

天山北坡流域地形起伏显著，海拔高差可达 2000 m 以上，天山北坡河水 $\delta^{18}O$ 值与海拔的关系如图 4 所示。5 月期间天山北坡河水 $\delta^{18}O$ 值并未随海拔升高或降低呈现规律性变化，这可能与样本来源于不同河流且经度跨度较大有关，复杂的因素共同影响着河水的氢氧稳定同位素组成[32]。6 月乌鲁木齐河水的 $\delta^{18}O$ 值和海拔没有明显的线性关系（R^2=0.04）；7 月博尔塔拉河水的 $\delta^{18}O$ 值和海拔的关系为 $\delta^{18}O$=−0.00126Alt−9.93（R^2=0.46，P<0.05），河水的 $\delta^{18}O$ 值随海拔上升呈逐渐降低的趋势；精河水的 $\delta^{18}O$ 值随海拔的变化非常小（R^2=0.18）；乌鲁木齐河水 $\delta^{18}O$ 值与海拔几乎没有相关性（R^2=0.09）。8 月则是不同的情况，博尔塔拉河河水氢氧稳定同位素组成和海拔呈显著的负相关关系，关系式为 $\delta^{18}O$=−0.00165 Alt −9.33（R^2=0.63，P<0.05），河水 $\delta^{18}O$ 值随海拔升高而降低；而乌鲁木齐河水 $\delta^{18}O$

值与海拔显著相关，关系式为 $\delta^{18}O=0.00202\,Alt-18.86$（$R^2=0.88$，$P<0.05$），河水 $\delta^{18}O$ 值随海拔升高而升高，与一般的情况相反。有研究指出乌鲁木齐河流域降水同位素值[33]以及乌鲁木齐河源 1 号冰川东支表层雪同位素值[34]都存在反高程效应，而 8 月乌鲁木齐河主要接受降水与冰雪融水补给，这可能会导致乌鲁木齐河水 $\delta^{18}O$ 值随海拔升高而升高。

尽管不同月份不同河流的 $\delta^{18}O$ 值和海拔关系存在差异，但 7 月（博尔塔拉河，$R^2=0.46$，$P<0.01$）和 8 月（乌鲁木齐河，$R^2=0.88$，$P<0.01$。博尔塔拉河，$R^2=0.63$，$P<0.01$）的河水 $\delta^{18}O$ 值都和海拔呈现出较强的相关性。

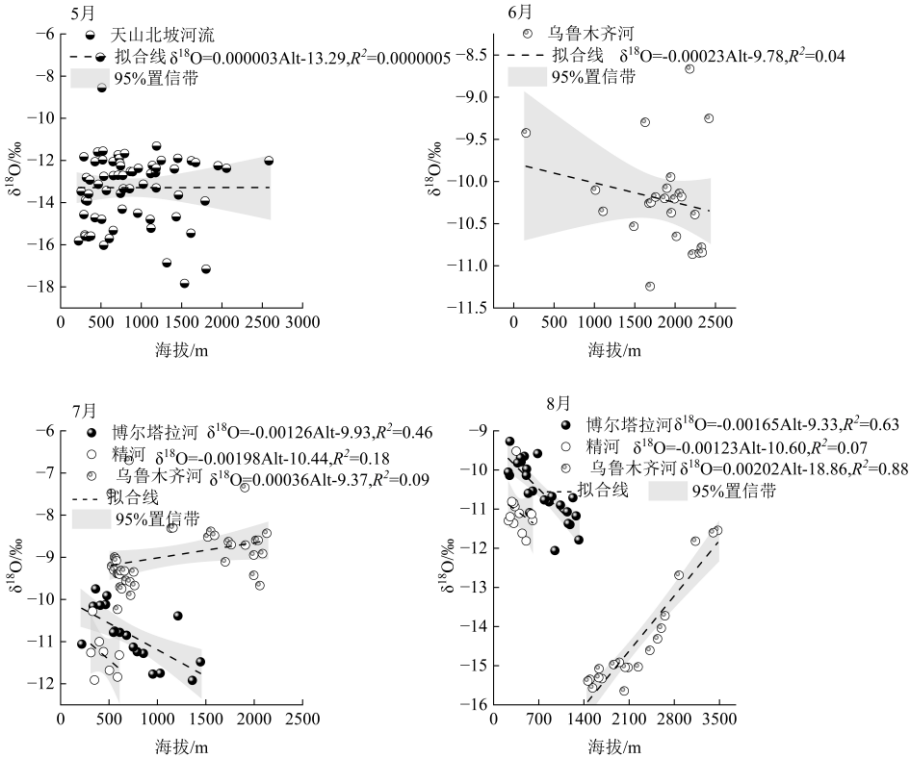

图 4 天山北坡不同月份河水 $\delta^{18}O$ 值随海拔的变化特征

Fig. 4 Variations in river water $\delta^{18}O$ values with altitude across different months on the northern slope of the Tianshan Mountains

3.4 天山北坡河水 $\delta^{2}H$ 和 $\delta^{18}O$ 的关系

对天山北坡河水的 δ^2H 与 $\delta^{18}O$ 数据进行线性回归拟合，得到天山北坡的河水线方程为 $\delta^2H=4.31\delta^{18}O-21.94$（$R^2=0.72$，$n=216$）。与 Wang 等[25]建立的北坡局地大气降水线 $\delta^2H=7.51\delta^{18}O+1.95$（$R^2=0.97$，$n=430$）相比，当地河水线斜率（4.31）显著低于局地降水线斜率（7.51）和全球大气降水线斜率（8）。河水线方程的斜率和截距小于当地大气降水线，这是由于河水受到降水补给后，受到不同程度的蒸发导致河水线的斜率和截距偏小，这与天山北坡降水集中在夏季且采样时段为夏季的特征相符。由图 5 可见，天山北坡的河水整体上表现出较强的蒸发，但蒸发的强度在各区河流有所不同。东部河流同位素数据偏离大气降水线最为显著，所有点均位于大气降水线的上方，结合该区域水系流程短、流量较少的特征，反映出河水氢氧稳定同位素组成受蒸发分馏作用较强。其次是中部河流，除少部分样点外，整体偏离程度较东部河流小。西部河水同位素数据与大气降水线的偏离程度明显小于中、东部河水，因为西部冰川积雪储量较高且西风带水汽输入丰沛[35]，使得河流补给量较大，降水和冰雪的同位素信号得以有效保留。

4 讨论

4.1 天山北坡河水氢氧同位素组成的影响因素

4.1.1 河水理化性质　水体理化性质——包括水温、pH、溶解氧、氧化还原电位和电导率是影响河水氢氧稳定同位素组成变化的重要因素[36]。水温越高，同位素的分馏系数越大，河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值越偏正[37]；pH 通过改变水体溶解无机碳的形态分布，影响碳酸盐体系与水的氧同位素平衡分馏，从而间接影响河水的 $\delta^{18}O$ 组成[38]；水体环境由氧化转为还原时指示水体交换减缓，蒸发增强，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值升高[39]。水体的电导率越大，水体的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值越小，溶解氧含量越大水体的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值越大[37]。

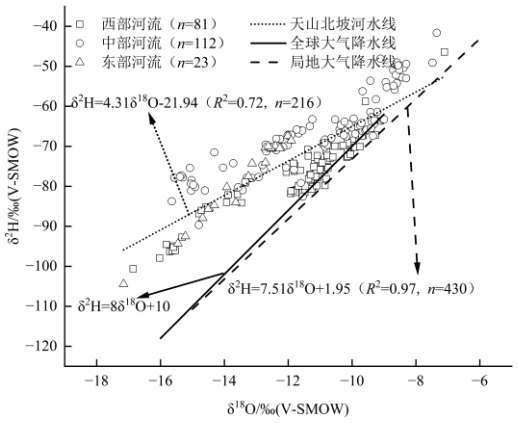

图 5 天山北坡河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 5 Relationship between δ^2H and $\delta^{18}O$ in rivers on the northern slope of the Tianshan Mountains

在天山北坡，选取乌鲁木齐河作为代表河流，运用结构方程模型分析河水理化性质对河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的影响（图 6）。结果显示乌鲁木齐河水的物理性质（T、TDS、EC）对河水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值均有正向影响（路径系数为 0.47 和 0.61），且水温对于物理性质整体的正向影响较大（路径系数大于 0.8），说明水温是影响水体 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的主要因素。此外，物理性质对化学性质表现为负向影响，并通过化学性质间接影响同位素值。尽管结构方程模型显示河水理化性质对河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值具有直接路径系数（正或负），本质上天山河水的理化性质并非直接影响河水氢氧稳定同位素组成，但可以改变水体蒸发程度，间接影响氢氧同位素组成，因此二者往往表现出协同变化特征。

4.1.2 环境因子　天山北坡河流多发育于天山山区，主要依靠冰川融雪水补给，其氢氧稳定同位素组成通常偏负。夏季，该区域降水虽受云下二次蒸发作用影响而呈现同位素富集特征，但在汇入河流后，和同位素偏负的冰川融雪水混合，从而使得河水氢氧稳定同位素组成整体趋于贫化。

水体中氢氧稳定同位素组成因海拔、温度的影响而表现出不同的分布特征[40][41]。天山北坡的河水氢氧稳定同位素组成会随着海拔的升高或降低而呈现出有规律的变化（图 4），7、8 月博尔塔拉河水的 $\delta^{18}O$ 值表现出随海拔上升而逐渐降低的趋势，实际上也是受海拔和温度共同影响的结果。河水中 $\delta^{18}O$ 的空间分布主要受温度控制，从低纬到高纬、从低海拔到高海拔，随着温度降低，河水同位素值偏负[42]；在时间上，河水的氢氧稳定同位素组成会呈现出与气温同步的季节性波动，夏季偏正、冬季偏负[43]。

天山云杉林主要分布在海拔 1500 m~2800 m 的中山带，冠层茂密，林冠截留降水能力强；根系以发达的侧根为主，能深入岩缝固着植株，并储存大量水分。具体而言，植被根系吸水和蒸腾作用直接参与水循环，并通过冠层截留降水改变其再分配过程[44]。植被涵养水源的作用能够延缓地表径流的形成，导致径流中 $\delta^{18}O$ 和 δ^2H 值偏正[45]。

地表蒸发与局地水汽再循环共同调控大气水汽同位素及降水再分配，深刻影响区域水循环同位素特征[46]。夏季地表温度上升会进一步加剧蒸发，蒸发导致同位素发生分馏，改变河水同位素组成[47]；蒸散量增加意味着更多水分通过蒸散作用返回大气[48]，增强局地水汽循环强度。姚俊强等[49]利用

Brubaker 二元模型和降水同位素平衡模型研究表明天山地区水汽再循环率为 9.32%，局地蒸发再循环降水量达 41.8 mm，显示蒸发对区域降水及径流补给的重要作用。

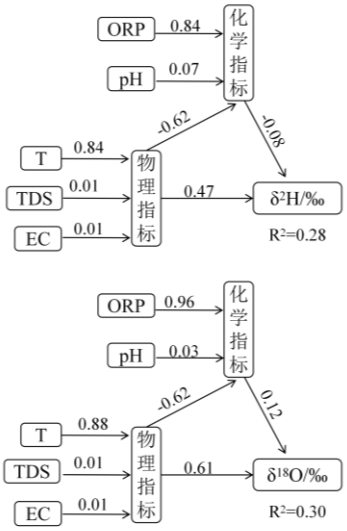

图 6 结构方程模型（正数表示正向影响，负数表示负向影响，R^2 为变量解释度）

Fig. 6 Structural Equation Model (Positive numbers indicate a positive impact, while negative numbers indicate a negative impact, R^2 represents the coefficient of determination)

综上所述，降水、冰川融雪水补给河水使其氢氧稳定同位素组成贫化；海拔较低、温度较高时导致河水氢氧稳定同位素组成富集；植被截留降水延缓径流形成，地表蒸发参与水汽再循环都会造成河水氢氧稳定同位素组成富集的结果。这些因素通过参与水循环过程影响天山北坡河水氢氧稳定同位素组成。

4.2 天山南北坡河水氢氧稳定同位素组成比较分析

天山北坡河流 $\delta^{18}O$ 变化范围在−17.84‰~−7.10‰之间，平均值为−13.27‰，塔里木河下游河水 $\delta^{18}O$ 变化范围在−7.27‰~−8.40‰[50]，开都河水 $\delta^{18}O$ 变化范围在−8.64‰~−9.57‰[51]，比较表明天山北坡河水的氢氧稳定同位素组成较南坡（塔里木河下游和开都河）贫化。水汽输送路径与机制的差异与南北坡不同的气候与地理条件，共同影响了降水及河水的同位素分布格局。天山南坡降水的氢氧稳定同位素值通常高于北坡[52]，主要归因于南坡降水量较少、蒸发更为强烈，导致降水同位素富集。此类降水在形成径流并汇入河流后，进一步引起河水同位素值的升高[25]。塔里木河位于天山南麓，干流由阿克苏河（西风带降水和冰川融水补给）、和田河（降水和地下水补给）及叶尔羌河（高山冰雪融水补给）等多源支流汇合而成。尽管部分支流受冰雪融水补给导致河水同位素相对贫化，但干流流程长、蒸发强烈，使得水体在向下游输送过程中经历显著的同位素富集，最终表现为塔里木河下游河水氢氧稳定同位素组成富集。

此外，天山南北坡河水氢氧稳定同位素组成的空间差异还与水汽来源及地理环境密切相关，已有研究表明，天山北坡典型流域降水水汽多以亚欧大陆再循环水汽和黑海－里海水汽为主[3]。氘盈余也可指示水汽来源，是大气降水稳定同位素的示踪剂[53]。结合天山北坡河水氘盈余值（图 7d），5 月天山北坡水汽来源主要为西风带和局地再循环水汽（图 7a~图 7c）。西部河流氘盈余值较大，可能是在水汽移动过程中受蒸发影响；中部河流的氘盈余相对较低，因为 5~9 月是乌鲁木齐河的主要降水时间[54]，降水过程导致氘盈余值出现偏负变化[55]，东部河流的水汽来源主要局地水汽循环，蒸发的水汽在途经

山区时会再次凝结降水使东部河流的氘盈余值较大。而南坡则主要依赖局地再循环水汽，大西洋远距离输送的水汽贡献较弱[40]。

综上所述，天山南北坡河水氢氧稳定同位素组成的差异不仅受局部降水蒸发条件控制，还受到多源径流补给、水汽来源与输送路径等多种因素的综合影响，体现了西北干旱区河流同位素的地域特性。

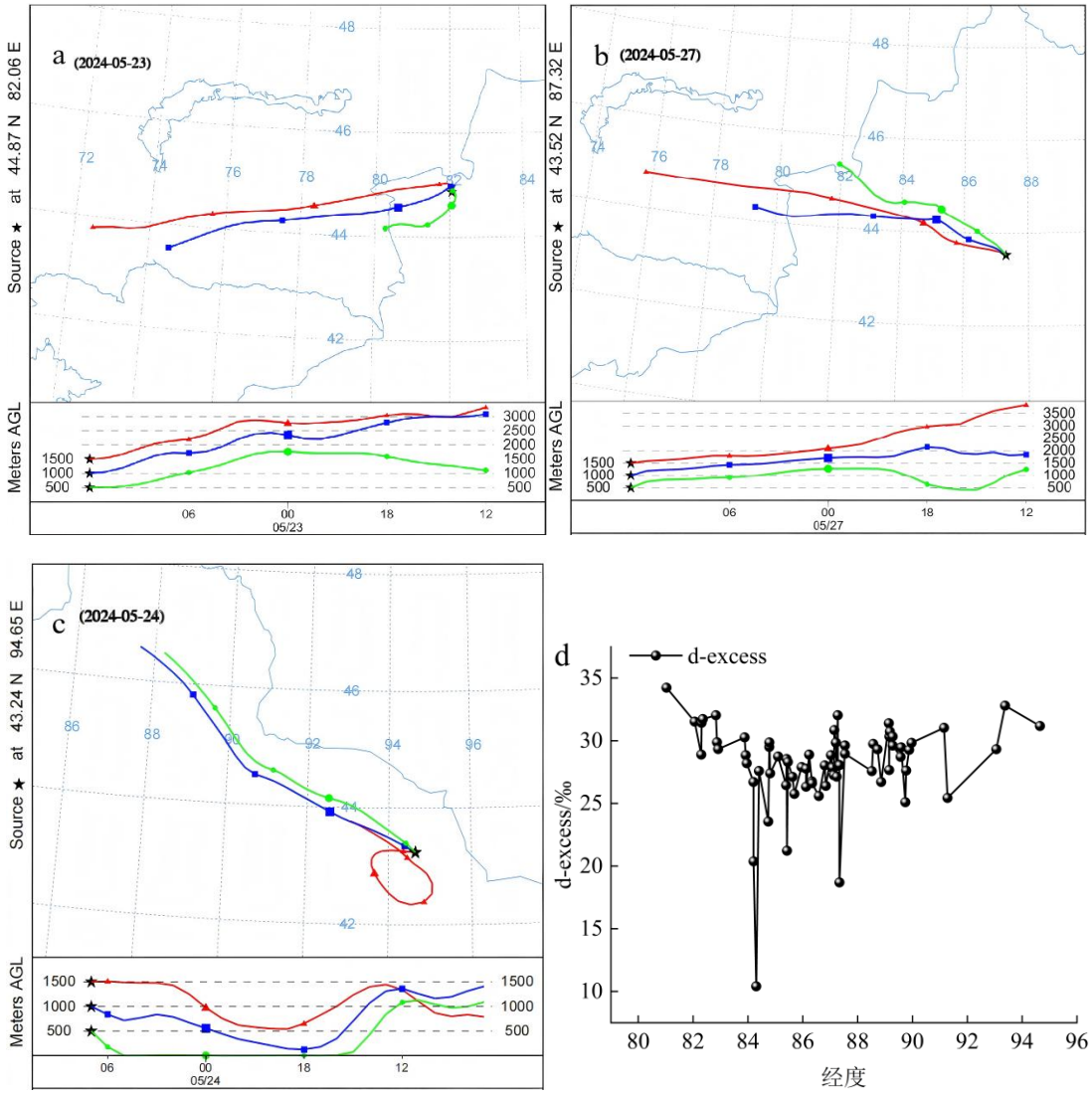

图 7 天山北坡 5 月水汽来源与氘盈余空间变化图

（红色、蓝色、绿色分别代表研究区地面上空 1 500 m、1 000 m、500 m 高度上的气团轨迹，a 图为西部河流，b 图为中部河流，c 图为东部河流，d 图为研究区 5 月氘盈余空间变化图）

Fig. 7 Map showing the sources of moisture in may and d-excess spatial variation map on the northern slope of Tianshan Mountain

（Red, blue, and green represent air mass trajectories at altitudes of 1,500 m, 1,000 m, and 500 m above the study area's surface, respectively. Figure a shows western rivers, figure b shows central rivers, figure c shows eastern rivers, and figure d shows may d-excess spatial variation map for the study area.）

4. 3 河水同位素组成对天山北坡水循环过程的指示

天山北坡的整体水循环过程呈现干旱区典型的“山区产水—绿洲耗水—荒漠缺水”模式。河水氢氧稳定同位素特征清晰反映了该区域河流的不同河段在不同补给源与蒸发强度条件下的响应差异。

西风输送的水汽在降水过程中受到云下二次蒸发影响[56]，使得降水的同位素组成发生富集，天山北坡大气降水线斜率（7.51）接近全球大气降水线（8），但截距（1.95）显著偏低[25]。河水的氢氧稳定同位素组成在高海拔地区较贫化（图 4），很大程度上是因为当降水转化为地表径流时，高山冰川与积雪融水的补给会使河水氢氧稳定同位素组成相对贫化[57]，径流沿河道向下游流动过程中伴随持续蒸发效应，使同位素值逐渐富集[58]。此外，天山北坡河流上游多建有水库，水库拦截导致水体滞留时间延长，进而影响地表水与地下水的交互过程[59]，地表水与地下水相互转化也会使得河水氢氧稳定同位素信号出现混合特征[15]。绿洲区大规模农田灌溉导致地下水位上升，改变了地表与地下水的交换关系[60]，从而对河水的氢氧稳定同位素组成产生影响。在最终进入荒漠区的内流河中，河水及其下泄地下水几乎完全受强蒸发作用控制[61]，表现出同位素显著富集的特征。

因此，天山北坡河水稳定同位素组成系统记录了河流不同水源的补给特征及其沿程演化，综合反映了区域水循环过程。这一认识对于揭示干旱区复杂水文过程以及制定科学的水资源管理策略具有重要意义。

5 结论

本文以天山北坡河水为研究对象，分析了天山北坡河水氢氧稳定同位素的时空特征，进一步探究了影响河水氢氧稳定同位素组成的因素，主要结论如下：

1）天山北坡河水氢氧稳定同位素组成的时间变化在不同流域有差异。博尔塔拉河与精河 δ^2H、$\delta^{18}O$ 时间变化较小，但都是 8 月较 7 月富集。乌鲁木齐河变化较为明显，7 月最富集，6 月与 8 月相对贫化，与局地强降水和冰川融水补给有关。天山北坡河水氢氧稳定同位素组成空间变幅较大，δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别在−117.2‰ ~ −46.4‰和−17.84‰ ~ −7.10‰之间，平均值分别为−78.3‰和−13.27‰。西部河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为−85.8‰和−14.16‰，中部为−71.0‰和−12.28‰，东部为−81.0‰和−13.74‰，整体上呈现中部高，东西低的空间分布格局。这一格局是受气象条件、局地环境、及河流补给综合影响的结果。

2）天山北坡河水的氢氧稳定同位素组成随着海拔呈现出有规律的变化。7 月博尔塔拉河河水氢氧稳定同位素组成随海拔升高逐渐贫化，呈现显著海拔效应；而 8 月乌鲁木齐河河水氢氧稳定同位素则随海拔升高相对富集，呈现反海拔效应。天山北坡河水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 关系线为 $\delta^2H=4.31\delta^{18}O-21.94$（$R^2=0.72$，$n=216$），河水线斜率（4.31）显著低于局地降水线斜率（7.51）和全球大气降水线斜率（8），表明天山北坡河水氢氧稳定同位素组成受局地环境影响发生显著蒸发富集。

3）天山北坡河水氢氧稳定同位素组成受气象条件（温度、水汽来源）、局地环境（海拔、植被、地表蒸发、河水理化性质）及河流补给（降水、冰川融雪水）影响。温度、海拔、地表蒸发决定了径流过程中的富集程度；水汽来源与输送路径决定降水同位素组成，汇入河水后影响河水氢氧稳定同位素组成；植被截留降水延缓径流形成使河水氢氧稳定同位素组成富集；河水理化性质通过改变水体蒸发程度间接影响河水氢氧稳定同位素组成；降水、冰川融雪水补给河流使河水氢氧稳定同位素趋于贫化。这些因素通过参与不同的水循环环节来影响河水氢氧稳定同位素组成。

6 参考文献

[1] Ahmed A A, Sayed S, Abdoulhalik A *et al*. Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 441: 140715. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140715.

[2] Chen YN, Li ZQ, Xu JH *et al*. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(3): 385-393. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230120005. [陈亚宁, 李忠勤, 徐建华等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议. 中国科学院院刊, 2023, **38**(3): 385-393.]

[3] Chen Y, Li Z, Fang G. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Arid Zone Geography*, 2022, **45**(1):1-8. DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2021.535. [陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展. 干旱区地理, 2022, **45**(1): 1-8.]

[4] Sorg A, Bolch T, Stoffel M *et al*. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2012, **2**(10): 725-731. DOI: 10.1038/nclimate1592.

[5] Ma H Y, Zhao Z H, Wang D *et al*. Research progress of fractionation mechanism of stable hydrogen and oxygen isotope during water body evaporation. *Advanced Materials Research*, 2012, 550: 2588-2592. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.550-553.2588.

[6] Flaim G, Camin F, Tonon A *et al*. Stable isotopes of lakes and precipitation along an altitudinal gradient in the Eastern Alps. *Biogeochemistry*, 2013, **116**(1): 187-198. DOI: 10.1007/s10533-013-9855-z.

[7] Walker C D, Brunel J P. Examining evapotranspiration in a semi-arid region using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology*, 1990, **118**(1-4): 55-75. DOI: 10.1016/0022-1694(90)90250-2.

[8] Martinelli L A, Victoria R L, Sternberg L S L *et al*. Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. *Journal of hydrology*, 1996, **183**(3-4): 191-204. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02974-5.

[9] Aggarwal P K, Araguás-Araguás L J, Groening M et al. Global hydrological isotope data and data networks. *Isoscapes: understanding movement, pattern, and process on earth through isotope mapping,* 2009: 33-50. DOI: 10.1007/978-90-481-3354-3-2.

[10] Shi M, Wang S, Argiriou A A *et al*. Stable isotope composition in surface water in the upper Yellow River in Northwest China. *Water*, 2019(5). DOI: 10.3390/W11050967.

[11] Wang S, Song C, Cheng W *et al*. Assessing water resource risks in inland river basins of Northwest China from water chemistry and runoff. *Acta Geographica Sinica*, 2023, **78**(11): 2763-2780. DOI: 10.11821/dlxb202311008. [王诗语, 孙从建, 陈伟等. 基于水化学及径流组成的中国西北内陆河流域水资源风险评估. 地理学报, 2023, **78**(11): 2763-2780.]

[12] Hao S, Zhang T, Lyu G *et al*. Stable isotope-indicated evaporation ratios of summer water bodies in the Urumqi River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, **39**(10): 77-90. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2025.171. [郝帅, 张同文, 吕光辉等. 稳定同位素指示的乌鲁木齐河夏季水体蒸发比例研究. 干旱区资源与环境, 2025, **39**(10): 77-90.]

[13] Lin J, Wang Z, Zhang Y. Spatial distribution characteristics of stable isotopes in river water in Hainan Island: Implication for water vapor delivery path. *Earth Science*, 2024, **49**(12): 4622-4634. DOI: 10.3799/dqkx.2023.204. [林杰, 王照翻, 张云锺. 海南岛河水稳定同位素空间分布特征及其对水汽输送的指示. 地球科学, 2024, **49**(12): 4622-4634.]

[14] Li Y-N, Huang L, Gan J-L *et al*. Hydrogeochemical characteristics and hydraulic connection identification of aquifer in the northern mining area of Zhungeer Coalfield. *China Environmental Science*, 2025, **45**(8): 4538-4550. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250403.001. [李艳娜, 黄磊, 甘俊礼等. 准格尔煤田北部矿区含水层水文地球化学特征及水力联系辨识. 中国环境科学, 2025, **45**(8): 4538-4550.]

[15] Lei M, Zhou J-L, Zhang J *et al*. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River basin, Xinjiang. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1873-1884. DOI: 10.13227/j.hjkx.202108055. [雷米, 周金龙, 张杰等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系. 环境科学, 2022, **43**(4): 1873-1884.]

[16] Wang XL, Sun L, Zhang YQ *et al*. Estimation of glacier melt contribution to streamflow using a distributed hydrologic model for the Kumaric River. *Tien Shan. Resources Science*, 2015, **37**(3): 475-484. [王晓蕾, 孙林, 张宜清等. 用分布式水文模型识别流域冰川融水对径流的贡献——以天山库玛拉克河为例. 资源科学, 2015, **37**(3): 475-484.]

[17] Yu J, Li Y. Uncertainties in the usage of stable hydrogen and oxygen isotopes for the quantification of plant water sources. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(22): 7942-7949. DOI: 10.5846/stxb201802080345. [于静洁, 李亚飞. 稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析. 生态学报, 2018, **38**(22): 7942-7949.]

[18] Yuan R-F, Jia W-X, Li Z-X *et al*. Precipitation stable isotope regional difference in Shiyang River basin. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4945-4956. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0547. [袁瑞丰, 贾文雄, 李宗省等. 石羊河流域降水稳定同位素变化的区域差异. 中国环境科学, 2020, **40**(11): 4945-4956.]

[19] Xiao H-Y, Zhang M-J, Wang S-J *et al*. Sub-cloud secondary evaporation effect of precipitation isotope in Shaanxi-Gansu-Ningxia region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(11): 3814-3822. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202011.013. [肖涵余, 张明军, 王圣杰等. 陕甘宁地区降水同位素云下二次蒸发效应. 应用生态学报, 2020, **31**(11): 3814-3822.]

[20] Hao S, Li FD, Li YH *et al*. Stable isotopes characteristics of precipitation, surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin. *Arid Zone Geography*, 2021, **44**(4): 934-942. DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2021.04.06. [郝帅, 李发东, 李艳红等. 艾比湖流域降水、地表水和地下水稳定同位素特征. 干旱区地理, 2021, **44**(4): 934-942.]

[21] Zhu S, Zhang F, Zhang H *et al*. Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1707-1721. DOI: 10.18307/2018.0622. [朱世丹, 张飞, 张海威等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1707-1721.]

[22] Yao J, Liu Z, Guo X *et al*. Characteristics of water stable isotopes (^{18}O and ^{2}H) in the Hutubi River basin, Northwestern China. *Journal of Desert Research*, 2016, **36**(5): 1443-1450. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00103. [姚俊强, 刘志辉, 郭小云等. 呼图壁河流域水体氢氧稳定同位素特征及转化关系. 中国沙漠, 2016, **36**(5): 1443-1450.]

[23] Wang H, Gu HB, Jiang JX *et al*. Hydrochemical characteristics and origin including isotope technique of the river water in the Yili River basin, Xinjiang. *Quaternary Sciences*, 2016, **36**(6): 1383-1392. DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2016.06.04. [王贺, 谷洪彪, 姜纪沂等. 新疆伊犁河流域河水同位素与水化学特征及成因. 第四纪研究, 2016, **36**(6): 1383-1392.]

[24] Wang X, Li Z, Ross E *et al*. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the spring flood period in Yushugou River basin, Eastern Tianshans, *China. Journal of Earth System Science*, 2015, **124**(1): 115-124. DOI: 10.1007/s12040-014-0517-x.

[25] Wang S, Zhang M, Hughes C E *et al*. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: An observation network in the Tianshan Mountains, central Asia. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2016, **68**(1): 289-299. DOI: 10.3402/tellusb.v68.26206.

[26] Xing W, Li Z, Zhang H *et al*. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(9): 1594-1605. DOI: 10.11821/ dlxb201709005. [邢武成, 李忠勤, 张慧等. 1959 年来中国天山冰川资源时空变化. 地理学报, 2017, **72**(9): 1594-1605.]

[27] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1983.

[28] Tang QH, Liu XC, Zhou YY *et al*. Climate change and water security in the northern slope of the Tianshan Mountains. *Geography and Sustainability*, 2022 **3**(3), 246–257. DOI: 10.1016/j.geosus.2022.08.004.

[29] Chen D, Huang F, Li Q *et al*. Spatial variation of humidity and its influencing factors in the north and south slopes of the Tianshan Mountains, China during 1966-2015. *Climate Change Research*, 2018, **14**(6): 11. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.061. [陈迪桃, 黄法融, 李倩等. 1966—2015 年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素. 气候变化研究进展, 2018, **14**(6): 11.]

[30] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *tellus*, 1964, 16(4): 436-468. DOI: 10.3402/tellusa.v16i4.8993.

[31] Rozanski K, Araguás‐Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate change in continental isotopic records*, 1993, 78: 1-36. DOI: https://doi.org/10.1029/GM078p0001.

[32] Wu H, Wu J, Song F *et al*. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$) across Kazakhstan, Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 53-61. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.389.

[33] Kong Y, Pang Z. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains: Effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 222-230. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.007.

[34] Zhang X-P, Yao T-D, Jiao K-Q *et al*. The Temporal and Spatial Variations of the $\delta^{18}O$ in Firn of the Glacier No.1 at the Headwaters of the arümqi River during Summer. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002,(1):57-62. [章新平, 姚檀栋,

焦克勤等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川夏季积雪中 $\delta^{18}O$ 的时空变化. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2002.0009. 冰川冻土, 2002, **24**(1): 57-62.]

[35] Hu J, Yao X, Liu Y *et al*. A dataset of glacier inventory on the northern slope of the Tianshan Mountains from 1990 to 2020. *China Scientific Data*, 2025,**10**(1):362-373. DOI: 10.12072/ncdc.xjkk.db6569.2024. [胡家瑜, 姚晓军, 刘一丹等. 1990–2020 年天山北坡冰川编目数据集. 中国科学数据(中英文网络版), 2025, **10**(1): 362-373.]

[36] Wu HB, Zhao Q, Qin XB *et al*. Temporal and spatial variations of hydrogen and oxygen isotopes in Tuojia River and its influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(5): 1461-1469. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201805.020. [吴红宝, 赵强, 秦晓波等. 脱甲河氢氧同位素组分时空分布特征及其影响因素. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1461-1469.]

[37] Cheng Y-T, Li P, Xu G-C *et al*. Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Danjiang Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,**28**(5):129-133. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2014.05.023. [成玉婷, 李鹏, 徐国策等. 丹江流域氢氧同位素变化特征. 水土保持学报, 2014, **28**(5): 129-133.]

[38] Hansen M, Scholz D, Schöne B R *et al*. Simulating speleothem growth in the laboratory: Determination of the stable isotope fractionation ($\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$) between H_2O, DIC and $CaCO_3$. *Chemical geology*, 2019, 509: 20-44. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.12.012.

[39] Yang Z, Gao L, Chen J *et al*. Identification of interaction boundary during the river-groundwater interactions based on geochemical characteristics of riparian zone: A case study in the Liuxi River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,**39**(6):1842-1851. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2019.0115. [杨志刚, 高磊, 陈建耀等. 基于河岸带地球化学特征的河水-地下水交互边界识别——以广州市流溪河为例. 环境科学学报, 2019, **39**(6): 1842-1851.]

[40] Li Z, Feng Q, Yong S *et al*. Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain, Northwestern China. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 87-101. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.07.023.

[41] Wang S Y, Wang Q L, Wu J K *et al*. Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwaters of the Yangtze River. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2615-2623. DOI: 10.13227/j.hjkx.201811140. [汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源. 环境科学, 2019, **40**(6): 2615-2623.]

[42] Bershaw J, Penny S M, Garzione C N. Stable isotopes of modern water across the Himalaya and eastern Tibetan Plateau: Implications for estimates of paleoelevation and paleoclimate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D2). DOI: 10.1029/2011jd016132.

[43] Schürch M, Kozel R, Schotterer U *et al*. Observation of isotopes in the water cycle—the Swiss National Network (NISOT). *Environmental Geology*, 2003, **45**(1): 1-11. DOI: 10.1007/s00254-003-0843-9.

[44] Wang YJ, Yu DY, Zhou ZY. Review of research progress and modeling of hydrological processes in the cold regions of the Qinghai-Xizang Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, **46**(4): 1312-1328. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2024.0104. [王奕钧, 于德永, 周祉蕴. 青藏高原寒区水文过程研究进展及模型述评. 冰川冻土, 2024, **46**(4): 1312-1328.]

[45] Xu Q, Li H, Chen J *et al*. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach. *Ecohydrology*, 2011, **4**(2): 236-244. DOI: 10.1002/eco.179.

[46] Shi YD, Wang SJ, Zhang MJ *et al*. Spatial distribution characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in surface waters on the northern slope of the Kunlun Mountains. *Arid Land Geography*, 2024, **47**(7): 1127-1135. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2024.105. [石玉东, 王圣杰, 张明军等. 昆仑山北坡地表水氢氧稳定同位素空间分布特征. 干旱区地理, 2024, **47**(7): 1127-1135.]

[47] Du C, Kong X, Sun D *et al*. Stable isotope characteristics and recharge mechanisms of river, lake and groundwater by precipitation in the Hulun Lake Basin. *Hydrological Processes*, 2025, **39**(6): e70174. DOI: 10.1002/hyp.70174.

[48] Liao HJ, Chai Y, Jiao YM *et al*. Spatial pattern and formation mechanism of surface water recharge sources in plateau mountain-lake region during the rainy season. *Acta Geographica Sinica*, 2024, **79**(7): 1862-1879. DOI:

10.11821/dlxb202407014. [廖会娟, 柴勇, 角媛梅等. 高原山地—湖泊地区雨季地表水补给来源的空间格局及形成机制. 地理学报, 2024,**79**(7): 1862-1879.]

[49] Yao JQ, Yang Q, Wu LK *et al*. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of Tianshan Mountain. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, **10**(5): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2016.05.006. [姚俊强, 杨青, 伍立坤等. 天山地区水汽再循环量化研究. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(5): 37-43.]

[50] Wang X, Xu H, Yan J *et al*. Conversion of river water to groundwater based on oxygen isotope (δ^{18O}) in the lower reaches of Tarim River. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(2): 84-89. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.14. [王希义, 徐海量, 闫俊杰等. 基于氧同位素($\delta^{18}O$)的塔里木河下游河水向地下水的转化研究. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(2): 84-89.]

[51] 刘延锋, 江贵荣, 靳孟贵等. 新疆焉耆盆地水环境氢氧同位素特征及其指示作用. 地质科技情报, 2009, **28**(6): 89-93.

[52] Zhang MJ, Wang SJ. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, **10**(1): 27-37. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2018.00027.

[53] Cui BL, Li XY. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2015, 527: 26-37. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.105.

[54] Yao TD, Masson V, Jouzel J *et al*. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and surface air temperature in the Urumiqi River Basin, east Tianshan Mountains, *China. Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(23):3 473-3476. DOI: 10.1029/1999GL006061.

[55] Fang L-J, Gao R-Z, Jia D-B *et al*. Characteristics and environmental driving factors of water transformation in the Balaguer River watershed of Inner Mongolia steppe. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(3): 860-868. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202103.24. [房丽晶, 高瑞忠, 贾德彬等. 内蒙古草原巴拉格尔河流域不同水体转化特征及环境驱动因素. 应用生态学报, 2021, **32**(3): 860-868.]

[56] Unnikrishnan Warrier C, Praveen Babu M. A study on the spatial variations in stable isotopic composition of precipitation in a semiarid region of Southern India. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(25): 3791-3799. DOI: 10.1002/hyp.8453.

[57] Zhang Y, Tan H, Cong P *et al*. Isotopic variations in surface waters and groundwaters of an extremely arid basin and their responses to climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, **27**(21): 4019-4038. DOI: 10.5194/hess-27-4019-2023.

[58] Kumar A, Sanyal P, Agrawal S. Spatial distribution of $\delta^{18}O$ values of water in the Ganga river basin: Insight into the hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 225-234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.044.

[59] 刘兵, 杨广, 何新林等. 山区水库调蓄对玛纳斯河流域地下水补排规律的影响机理研究. 中国水利水电出版社: 202312:115.

[60] Li M, Zhang K, Bao W *et al*. Deciphering spatio-seasonal impacts of agricultural irrigation on water quality evolution and surface water-groundwater interaction in a large irrigation district, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 2025: 134423. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.134423.

[61] Wang L, Dong Y, Xie Y *et al*. Hydrological processes and water quality in arid regions of Central Asia: Insights from stable isotopes and hydrochemistry of precipitation, river water, and groundwater. *Hydrogeology Journal*, 2024, **32**(1): 131-147. DOI: 10.1007/s10040-023-02654-1.