

# 基于稳定同位素的策勒河流域山区河流蒸发损失估算

吕雯改<sup>1,2,3</sup>, 刘云飞<sup>1,2,3</sup>, 殷昌军<sup>1,2,3</sup>, 桂东伟<sup>1,2,3</sup>, 王鹏<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 策勒 848300; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为探究昆仑山北坡山区流域水体蒸发损失垂直变化情况, 基于2016年5-12月昆仑山北坡中段策勒河流域不同水体同位素数据, 运用蒸发富集模型和稳定同位素(<sup>18</sup>O和<sup>2</sup>H)方法, 研究了流域内不同水体的同位素时空变化特征, 分析了策勒河流域的补给来源, 并根据蒸发富集模型估算了流域内不同海拔地区同位素的蒸发损失。结果表明: 流域内不同水体同位素的特征呈高山区贫化、荒漠区富集的趋势; 策勒河河水与地下水存在密切的水力联系; 策勒河流域在不同海拔的平均蒸发损失: 高山区为24.99%、中山区为29.04%、荒漠区为35.00%。研究结果对理解区域水平衡及其对山区生态系统气候变化的响应具有重要意义。

**关键词:** 河流蒸发损失; 稳定同位素; 蒸发富集模型; 策勒河流域

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0062-07

## Estimation of river evaporation loss in the Cele River Basin based on stable isotopes

LÜ Wengai<sup>1,2,3</sup>, LIU Yunfei<sup>1,2,3</sup>, YIN Changjun<sup>1,2,3</sup>, GUI Dongwei<sup>1,2,3</sup>, WANG Peng<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Cele National Station of Observation & Research for Desert Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele 848300, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to explore the vertical variation of water evaporation losses in the river basin of the northern slope of Kunlun Mountains, the evaporation enrichment model and stable isotope (<sup>18</sup>O and <sup>2</sup>H) methods were used to analyze the isotope data of different water bodies in the Cele River Basin from May to December, 2016. The temporal and spatial variation characteristics of isotopes in different water bodies was studied, the recharge sources of the basin was analyzed, and the evaporation losses of isotopes in different altitude areas were estimated using the evaporation enrichment model. The results showed that the isotope characteristics of different water bodies in the basin showed a pattern of dilution in the high mountainous area but enrichment in the desert area. There was a close hydraulic connection between the of Cele River water and groundwater; the average evaporation loss of the Cele River Basin at different altitudes was 24.99% in the high mountainous area, 29.04% in the middle mountainous area and 35.00% in the desert area. The results are of great significance for understanding regional water balance and its response to climate change in mountain ecosystems.

**Key words:** river evaporation loss; stable isotope; evaporation enrichment model; the Cele River Basin

## 1 研究背景

陆面蒸发是影响陆地生态系统水平衡和能量交换的重要变量,也是陆地水循环的重要环节之一,主

要包括水体蒸发、植物蒸腾和土壤蒸发<sup>[1-2]</sup>。其中,地表水体蒸发对区域气候调节和水分交换具有重要作用,是影响陆地水文循环的重要因素<sup>[3-4]</sup>。因此,分析地表水体蒸发损失以及时空变化对区域环境演

收稿日期:2022-04-15; 修回日期:2022-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(42171042); 国家基础资源调查专项(2019FY100205)

作者简介:吕雯改(1996-),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者:桂东伟(1977-),男,新疆乌鲁木齐人,研究员,研究方向为水文及水资源。

变研究具有重要的意义。

山区是河流的主要集水区域,其水文过程会影响下游生态景观的演替和水资源的利用,研究山区流域水文过程变化有助于对区域水资源进行规划与管理<sup>[5-7]</sup>,其中由于山区区域蒸发损失影响着河流的水资源量,反映了流域的气候环境变化过程,因此蒸发损失是流域水文过程研究的关键部分。然而,由于山区布设水文气象站点难度较大,站点稀少,气象水文数据稀缺,故难以对山区河流蒸发损失进行全面的分析<sup>[8-9]</sup>。同时,山区水体蒸发受气候条件和下垫面条件等多种因素的影响,在缺少连续气象水文监测数据的情况下,利用传统方法分析山区流域蒸发损失存在困难,从而影响了流域内水体蒸发损失的估计<sup>[10-11]</sup>。

估算水面蒸发损失的方法主要有能量平衡法<sup>[12]</sup>、质量传输法<sup>[13]</sup>、水量平衡法和经验方法<sup>[14]</sup>等,然而,这些方法需要长期的站点观测数据,且对整个流域蒸发损失计算较为困难<sup>[15]</sup>。与这些方法相比,稳定同位素(<sup>18</sup>O和<sup>2</sup>H)技术不需要大量连续的气象参数,便于获取与分析,适合于数据缺乏的偏远地区的水文研究。随着稳定同位素技术的发展,它被更多地应用在区别水分来源<sup>[16]</sup>、水体蒸发<sup>[17]</sup>和同位素分馏模拟<sup>[18]</sup>等方面。Craig等<sup>[19]</sup>最早提出利用稳定同位素方法计算水面蒸发,建立一个水面蒸发模型用来评估蒸发过程中水的蒸发通量的同位素组成;Murad等<sup>[20]</sup>利用稳定同位素对阿联酋的地下水蒸发损失进行了估算,并用碳同位素进行地下水循环研究;Wassenaar等<sup>[21]</sup>利用稳定同位素对加拿大欧肯纳根湖的同位素蒸发损失进行估算,得出约有35%上的湖水因蒸发而损失的结论;郭鑫等<sup>[22]</sup>基于稳定同位素质量平衡法对达里湖水体蒸发进行计算,发现湖水蒸发损失量约为初始水体的41%~46%;Mohammed等<sup>[23]</sup>根据稳定的同位素组成估算出尼罗河流域旧冲积平原地下水蒸发损失为31%~36%;Sun等<sup>[24]</sup>基于同位素方法对石羊河流域地表水蒸发损失进行了计算。但大多数研究集中在湖泊,对干旱区山区河流垂直变化研究较少,尚不清楚山区流域地表水随海拔变化的蒸发损失情况。

位于昆仑山北坡中段的策勒河流域为典型的极端干旱区内陆河流,是维系策勒绿洲生存和发展的重要河流,是发展当地社会经济和保护生态环境的重要资源,此外,昆仑山对全球气候变化敏感,该区域河流水文研究对了解山区生态系统机制及其对全球气候变化的响应具有重要意义。根据上述背景,

本文将策勒河流域按海拔分为高山区、中山区和荒漠区(包括绿洲和山前荒漠),首先,分析不同海拔、不同水体稳定同位素特征及空间变化;其次,结合不同水体同位素特征,明确策勒河主要补给来源;最后,利用蒸发富集模型估算策勒河流域不同海拔水体蒸发损失的变化,这些研究可以确定流域内不同海拔蒸发损失的情况,能够更好地揭示极端干旱区内陆河流域的水循环机制。

## 2 资料来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

策勒河流域(80°07'E~81°00'E,36°02'N~37°08'N),发源于中国新疆维吾尔自治区南部的昆仑山北坡中段,自南向北流入塔里木盆地。流域面积为2 905.16 km<sup>2</sup>,景观格局自北向南为干旱区典型的沙漠-绿洲-山区,流域内山地与绿洲气候差异大,山区气温较绿洲地区低,降水量较绿洲地区大。该流域属于温带大陆性气候,昼夜温差大,多年平均气温为12℃,降水稀少,蒸发量大。策勒河流域地理位置及水样采样点分布见图1。

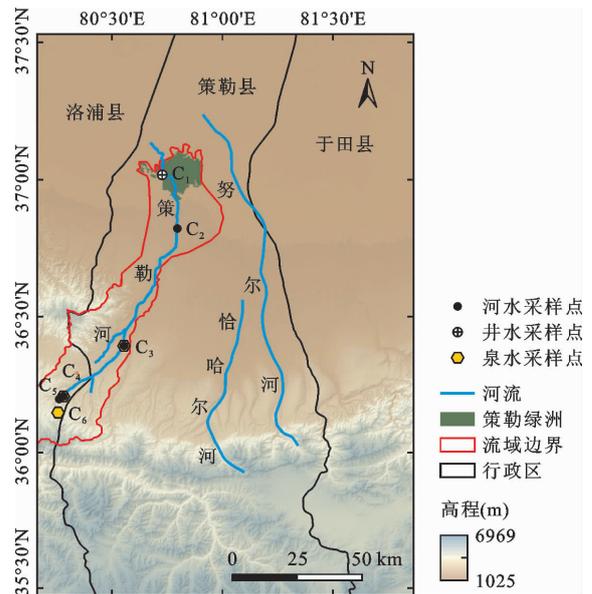


图1 策勒河流域地理位置及水样采样点分布

### 2.2 样品采集与测试

本文选取策勒河流域为研究区域,于2016年5-12月的每月月初按照不同点位C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>进行野外水样采集,由于流域降水主要集中在夏季,因此在5-9月定点收集水样。研究周期内共采集样品175个,其中降水样品117个、井水样品6个、泉水样品21个、河水样品31个,各采样点分

布见图1,采样点具体信息见表1。所有的降水样本均在降雨事件期间采集。在进行取样之前,将所有的盛样瓶现场清洗3次,取完样品后立即将盛样瓶

密封于塑料袋中,并储存在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验室冰箱中。样品在分析前置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中逐渐解冻,避免蒸发损失。

表1 策勒河流域水样采样点信息

编号	样品名称	经度	纬度	高程/m	采样频率	样品数量
C <sub>1</sub>	井水(井深17.11m)	80°43'00"	37°01'00"	1331	每月一次	6
	降水	80°43'00"	37°01'00"	1331	降雨后采集	10
C <sub>2</sub>	河水	80°47'05"	36°49'29"	1672	每月一次	8
	河水	80°33'15"	36°23'45"	2329	每月一次	8
C <sub>3</sub>	泉水	80°33'15"	36°23'45"	2329	每月一次	8
	降水	80°33'15"	36°23'45"	2329	降雨后采集	35
C <sub>4</sub>	泉水	80°16'43"	36°12'35"	3128	每月一次	7
	河水	80°16'43"	36°12'35"	3128	每月一次	7
C <sub>5</sub>	降水	80°15'04"	36°12'00"	3203	降雨后采集	39
	泉水	80°15'02"	36°09'02"	3513	每月一次	6
C <sub>6</sub>	降水	80°15'02"	36°09'02"	3513	降雨后采集	33
	河水	80°15'02"	36°09'02"	3513	每月一次	8

所有样品均在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室进行分析,使用 Thermo Finnegan MAT-253 质谱仪测定  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的精密度分别为  $0.02\text{‰}$  和  $0.2\text{‰}$ 。测试结果相对于维也纳标准平均海水 (Vienna standard mean ocean water, VSMOW) 的千分偏差,用  $\delta$  表示:

$$\delta_{\text{sample}} = \frac{(R_{\text{sample}} - R_{\text{VSMOW}})}{R_{\text{VSMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: $\delta_{\text{sample}}$  为样品的同位素浓度值,‰;  $R_{\text{sample}}$  为水样中同位素丰度比值 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  或  $^2\text{H}/\text{H}$ );  $R_{\text{VSMOW}}$  为维也纳标准平均海水中同位素丰度比值 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  或  $^2\text{H}/\text{H}$ )。

### 2.3 蒸发损失估算

利用蒸发富集模型来估算策勒河水流中稳定同位素的平均蒸发损失,该模型虽然不能量化某一特定水体的蒸发损失量,但可以通过水体中的稳定同位素的蒸发损失来反映水体的蒸发强度。用以下公式表示<sup>[20-25]</sup>:

$$\delta^{18}\text{O}_i - \delta^{18}\text{O}_p = \varepsilon^{18}\text{O}_{\text{total}} \cdot \ln f = \Delta^{18}\text{O} \quad (2)$$

式中:下标  $i, p$  分别表示河水、降水;  $f$  为剩余水比率,%,蒸发损失为  $(1-f)$ ;  $\varepsilon^{18}\text{O}_{\text{total}}$  为同时考虑平衡和动力学效应的同位素分馏系数,可采用公式(3)进行计算<sup>[26]</sup>。

$$\varepsilon^{18}\text{O}_{\text{total}} = \varepsilon^{18}\text{O}_{v-l} + \Delta\varepsilon^{18}\text{O}_{v-bl} \quad (3)$$

公式(3)中动力学分馏因子 ( $\Delta\varepsilon^{18}\text{O}_{v-bl}$ ) 受湿度

$h$  的影响,可用公式(4)估计<sup>[27]</sup>:

$$\Delta\varepsilon^{18}\text{O}_{v-bl} = -14.2(1-h) \quad (4)$$

公式(3)中平衡分馏系数 ( $\varepsilon^{18}\text{O}_{v-l}$ ) 在瑞利分馏过程中取决于温度  $T(\text{K})$  的变化,可采用公式(5)进行计算<sup>[28]</sup>:

$$\varepsilon^{18}\text{O}_{v-l} = -\left(1.137\left(\frac{10^6}{T^2}\right) - 0.4156\left(\frac{10^3}{T}\right) - 0.2667\right) \quad (5)$$

根据由策勒河流域气象站获取的月平均温度和湿度等气象资料和水体同位素数据,估算了夏季策勒河不同海拔地区的平均蒸发损失情况。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同水体的稳定同位素组成特征

表2给出了策勒河流域不同海拔地区水体的稳定同位素值。由表2可知,高山区河水的稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-11\text{‰} \sim -5.29\text{‰}$ ,平均值为  $-7.72\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  的变化范围为  $-74.66\text{‰} \sim -32.02\text{‰}$ ,平均值为  $-43.46\text{‰}$ ;中山区河水的稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-9.28\text{‰} \sim -5.68\text{‰}$ ,平均值为  $-7.34\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  的变化范围为  $-60.75\text{‰} \sim -30.08\text{‰}$ ,平均值为  $-39.58\text{‰}$ ;荒漠区河水的稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-8.93\text{‰} \sim -5.98\text{‰}$ ,平均值为  $-6.81\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  的变化范围为  $-58.61\text{‰} \sim -30.11\text{‰}$ ,平均值为  $-35.67\text{‰}$ 。表明河水的稳定

同位素从高山区到荒漠区逐渐富集,高山区的同位素较为贫化,而荒漠区较为富集。策勒河流域从高山区到中山区再到荒漠区,降水和地下水(泉水和井水)中的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  和氡盈余值呈现相似的变化趋势,即随着海拔的降低而逐渐增大。

表 2 策勒河流域不同海拔地区各类型水体的稳定同位素特征值

地区	水体类型	特征值	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	氡盈余/ $\text{‰}$
高山区	河水	最大值	-5.29	-32.02	23.16
		最小值	-11.00	-74.66	10.29
		平均值	-7.72	-43.46	18.34
	泉水	最大值	-6.90	-33.70	22.86
		最小值	-7.80	-42.09	16.06
		平均值	-7.36	-38.46	20.40
	降水	最大值	3.32	33.35	27.77
		最小值	-12.98	-92.48	4.07
		平均值	-2.60	-0.65	20.16
中山区	河水	最大值	-5.68	-30.08	23.74
		最小值	-9.28	-60.75	13.45
		平均值	-7.34	-39.58	19.15
	泉水	最大值	-7.03	-37.35	21.51
		最小值	-7.58	-39.70	18.26
		平均值	-7.31	-38.54	19.94
	降水	最大值	4.14	43.64	28.52
		最小值	-8.28	-56.46	0.19
		平均值	-1.18	7.30	16.71
荒漠区	河水	最大值	-5.98	-30.11	23.35
		最小值	-8.93	-58.61	12.81
		平均值	-6.81	-35.67	18.80
	降水	最大值	0.79	24.51	30.19
		最小值	-4.94	-38.85	0.68
		平均值	-1.14	7.94	20.08
	井水	最大值	-6.40	-34.02	19.54
		最小值	-6.80	-36.66	14.95
		平均值	-6.58	-34.92	17.71

根据策勒河流域不同海拔地区降水的稳定同位素数据,得到高山区、中山区、荒漠区当地大气降水线(local meteoric water line, LWML) 方程分别为:  $\delta D = 6.4185\delta^{18}\text{O} + 18.732$ 、 $\delta D = 6.3463\delta^{18}\text{O} + 16.009$ 、 $\delta D = 5.6244\delta^{18}\text{O} + 19.530$ ,如图 2 所示。可见从高山区到荒漠区,不同海拔地区的当地大气降水线的斜率呈减小趋势,且均小于全球降水线(global meteoric water line, GWML),即  $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 。主要是由于研究区处于极端干旱区,雨水在降落过程中会产生一定程度的蒸发,从而表现出降水中重同位素富集现象。

当地蒸发线(local evaporation line, LEL)通常指一个地区的地表水体随着  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta D$  值的增加而表现出的低斜率曲线,斜率一般在 4 ~ 7 之间,这取决于蒸发季节的当地大气条件,主要是相对湿度、温度等气象要素<sup>[29]</sup>。高山区、中山区、荒漠区的当地蒸发线见图 2。由图 2 可知,策勒河流域高山区与中山区的当地蒸发线斜率较为接近,而荒漠区当地蒸发线斜率较小,且与当地大气降水线相差较大,这主要与荒漠区的温度和蒸发条件有关。

### 3.2 策勒河补给源分析

图 3 为策勒河流域不同水体的  $\delta D - \delta^{18}\text{O}$  关系。由图 3 可看出,策勒河流域大气降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta D$  之间存在显著的线性关系,回归得到当地大气降水线(LWML)方程为  $\delta D = 7.3651\delta^{18}\text{O} + 17.830$  ( $R^2 = 0.9185$ ),符合干旱区降水的同位素特征。策勒河流域 LWML 斜率和截距均小于全球降水线,表明同位素动态分馏存在明显的不平衡,这主要是由于二次蒸发的增加和受局部再循环水汽的影响。河水与地下水的同位素主要集中在 LWML 的左下方,降水与河水的同位素有明显的分离,这可能是由于在降雨从云层落到地面的过程中发生了云下蒸发的过程。河水、地下水的同位素组成均分布在当地大气降水线附近,说明河水和地下水受到降水一定程度上的补给;河水与地下水采样点分布集中,表明两者之间存在水力联系。

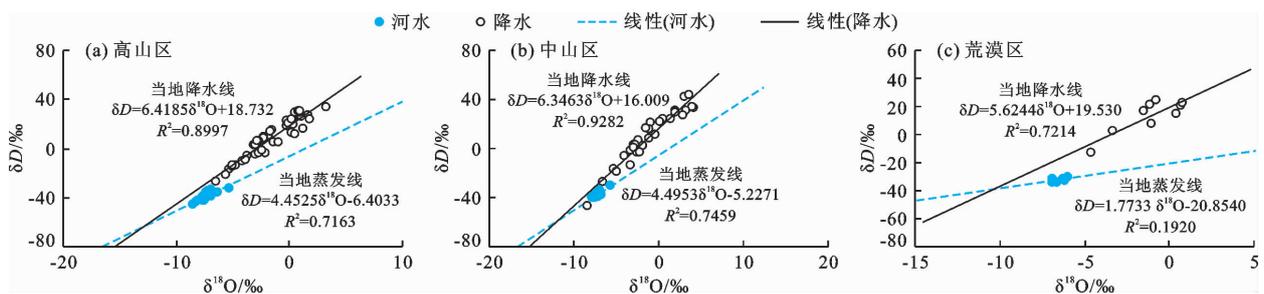


图 2 策勒河流域不同海拔地区当地大气降水线及当地蒸发线

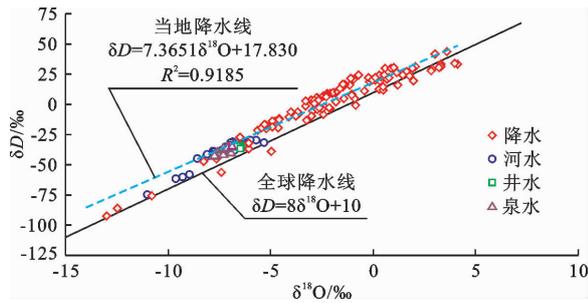


图3 策勒河流域不同水体  $\delta D - \delta^{18}O$  关系

图4为策勒河流域不同水体的 $\delta^{18}O$ 随海拔变化趋势。图4表明,流域内降水、河水和地下水的 $\delta^{18}O$ 值随海拔的升高大致呈减小趋势,不同水体同位素的高程效应较为明显,海拔对于策勒河流域不同水体同位素含量的影响较大。图4还显示出策勒河流域大气降水的同位素值比地下水和河水的值更为富集,这可能是由于干旱区在降雨过程中受到云下蒸发作用的影响。由于海拔3500m位于高山区,地形复杂,降水丰富,地下水在海拔3500m处的 $\delta^{18}O$ 值有所升高,表明此处地下水受到了降雨补给。在海拔1500~3000m范围内,流域内河水和地下水的混合作用较为显著,河水与地下水的 $\delta^{18}O$ 值较为相近,表明两者之间存在一定的水力交换,与 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系图得出的结论一致。同时河水在沿程汇流过程中受蒸发作用的影响,其 $\delta^{18}O$ 值随海拔降低而逐渐增大,在约1500m处河水 $\delta^{18}O$ 值有所回落,表明此处受到了地下水的补给。

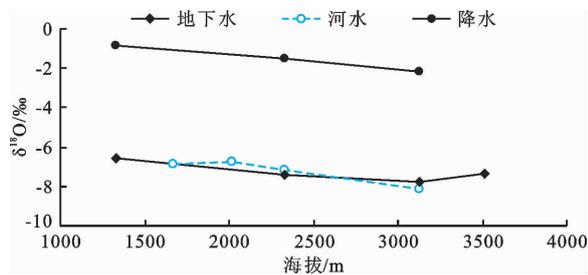


图4 策勒河流域不同水体的 $\delta^{18}O$ 随海拔变化趋势

图5为策勒河流域河水和地下水中氘盈余与TDS(total dissolved solids)浓度的关系。由图5可知,流域内河水中氘盈余的变化范围为10.29‰~23.74‰,地下水的氘盈余变化范围为14.95‰~22.86‰。由于水体中氘盈余值大小与 $\delta D / \delta^{18}O$ 分馏速率相关,在瑞利平衡条件下,随着温度的升高,水体受到强烈蒸发,发生动力同位素分馏效应,因而 $\delta D / \delta^{18}O$ 逐渐变小,氘盈余值也随之减小。地下水的TDS随氘盈余的减小而增大,两者呈负相关,地

下水的TDS空间差异显著,变化范围明显,可能是由于研究区内除主河流策勒河外,支流较少,地表多封闭洼地,水分易聚集,加之地下循环不发达,蒸发强烈,使其同位素富集,同时地下水化学成分发生变化,盐分增高。河水的氘盈余与TDS无相关性,其TDS变化相对稳定。

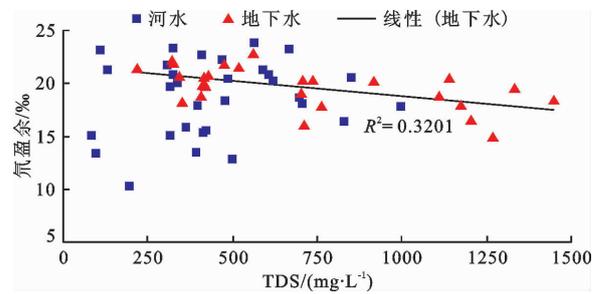


图5 策勒河流域氘盈余与TDS的关系图

### 3.3 策勒河流域蒸发损失计算

2016年6-9月策勒河流域不同海拔地区蒸发损失变化如图6所示。由图6可以看出,高山区在7月蒸发损失达到最大,为31.66%,中山区、荒漠区在6月蒸发损失达到最大,分别为34.97%、43.27%;2016年6-9月策勒河流域高山区、中山区及荒漠区的平均蒸发损失分别为24.99%、29.04%和35.00%;从高山区到荒漠区河流的同位素蒸发损失呈增大趋势,高山区蒸发损失最小,荒漠区蒸发损失最大,说明荒漠区河水蒸发是造成河流水分损失的主要原因。

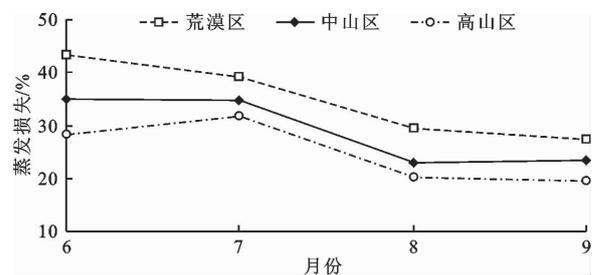


图6 2016年6-9月策勒河流域不同海拔地区蒸发损失变化

## 4 讨论

2016年5-12月策勒河流域降水及河水的 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系如图7所示。分析图7可知,降水与河水稳定同位素 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 在5月主要集中在左下角(图中以虚线椭圆标出),明显偏离其他月份的同位素数据,说明策勒河流域5月份降水和河水同位素有明显的贫化现象,可能受到了其他气团的影响。根据Kong等<sup>[30]</sup>的研究,研究区在该时段内可能受

到其他湿润气流的影响,使得水体的同位素值偏负。另外,水汽来源差异影响着降水同位素的空间变化,策勒河流域处于特殊的地理位置,受多个气团尤其是西风带的影响,在不同季节还会受到太平洋和印

度洋湿润气流的影响,带来少量的降雨,与代述勇等<sup>[31]</sup>和 HAN 等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。未来可对昆仑山北坡中段其他流域大气降水同位素进行分析,可以进一步明确影响该区域的主导气团。

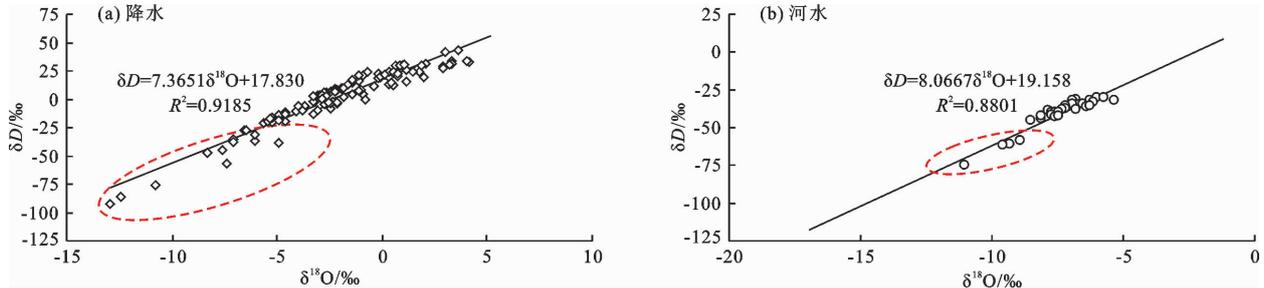


图7 2016年5-12月策勒河流域降水及河水的 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系

从蒸发富集模型来看,温度和相对湿度是影响水体同位素蒸发富集的两个主要因素,策勒河的长期气象数据显示,高山区、中山区及荒漠区的 $0^{\circ}\text{C}$ 以上的累积气温分别为 $1\ 784.78$ 、 $3\ 417.52$ 和 $4\ 841.16^{\circ}\text{C}$ ,多年平均相对湿度分别为 $50.85\%$ 、 $40.36\%$ 和 $33.36\%$ 。流域内从高山区到荒漠区的海拔在 $3\ 513 \sim 1\ 672\ \text{m}$ 之间,温度随海拔的降低而升高,相对湿度随海拔的降低而减小。流域内河水在高山区、中山区及荒漠区的平均蒸发损失分别为 $24.99\%$ 、 $29.04\%$ 及 $35.00\%$ ,反映出流域内河水蒸发损失具有明显的垂直差异,与Chen等<sup>[33]</sup>对开都河流域的研究结果相似。

除气候条件外,人类活动如农业灌溉、水库建设等也对河水的蒸发损失有一定的影响<sup>[34]</sup>。策勒河流域地处极端干旱区,降水稀少,河水是维系策勒地区人民生存和经济发展的主要水源<sup>[35]</sup>,策勒绿洲使用的河水主要是通过先锋水库调配,其总库容量为 $566 \times 10^4\ \text{m}^3$ ,根据Yin等<sup>[36]</sup>的研究,水域面积的增大会使得水体的蒸发量增加。对于干旱区而言,随着绿洲的不断扩张和农业经济的迅速发展,农业灌溉也成为影响蒸发损失的一个重要因素。策勒绿洲农作物的灌溉方式主要是以大水漫灌为主,这种灌溉模式既耗费大量的水资源,又导致水体蒸发损失<sup>[37-38]</sup>。

## 5 结论

本文以昆仑山北坡中段策勒河流域为研究区,基于稳定同位素数据分析了策勒河流域不同海拔地区的水体同位素特征变化,并结合水化学数据明确策勒河流域主要的补给来源和各水体之间的水力联系,通过蒸发富集模型估算了夏季期间策勒河流域

不同海拔地区的水分损失情况,主要结论如下:

(1)基于策勒河流域不同海拔地区的水体稳定同位素数据,分别得到了不同海拔地区的当地大气降水线方程(高山区: $\delta D = 6.4185\delta^{18}O + 18.732$ ;中山区: $\delta D = 6.3463\delta^{18}O + 16.009$ ;荒漠区: $\delta D = 5.6244\delta^{18}O + 19.530$ ),并分析了其空间变化特征,从高山区到中山区再到荒漠区,策勒河水体的 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和氘盈余值呈现出随着海拔的降低而逐渐增大的趋势。

(2)建立策勒河流域当地大气降水线为: $\delta D = 7.3651\delta^{18}O + 17.830$ ( $R^2 = 0.9185$ ),通过对不同水体随海拔变化趋势的分析得出:地下水与河水水力联系密切,降水对河水的补给较弱;结合水化学数据得出:地下水的TDS随氘盈余的减小而增大,两者呈负相关。

(3)基于蒸发富集模型估算出策勒河流不同海拔的稳定同位素蒸发损失,高山区的蒸发损失最小,平均值为 $24.99\%$ ,荒漠区的蒸发损失最大,平均值为 $35.00\%$ ,蒸发损失呈现出从高山区到中山区再到荒漠区递增的趋势。蒸发损失主要受气象要素和人类活动因素的影响。

本研究对了解山区河流水资源垂直变化机制和生态环境保护具有重要作用,可为策勒河流域水资源管理与绿洲农业可持续发展提供参考依据,同时也为其他干旱区山区河流水文研究提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 孙爽. 中国陆地蒸散发时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [2] SCHLESINGER W H, JASECHKO S. Transpiration in the global water cycle[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189 - 190: 115 - 117.

- [3] OGILVIE A, RIAUX J, MASSUEL S, et al. Socio - hydrological drivers of agricultural water use in small reservoirs [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 218: 17 - 29.
- [4] FAN Y, CLARK M, LAWRENCE D M, et al. Hillslope hydrology in global change research and earth system modeling [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55 (2): 1737 - 1772.
- [5] 常启昕,孙自永,潘钊,等. 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展[J/OL]. *地球科学*, 2022: 1 - 15. [2022-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220407.1648.008.html>
- [6] IMMERZEEL W W, LUTZ A F, ANDRADE M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers [J]. *Nature*, 2020, 577: 364 - 369.
- [7] ZHANG Lanhui, HE Chansheng, ZHANG Mingmin, et al. Evaluation of the SMOS and SMAP soil moisture products under different vegetation types against two sparse in situ networks over arid mountainous watersheds, Northwest China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 703 - 718.
- [8] YUAN Ruiqiang, WANG Shiqin, YANG Lihu, et al. Hydrologic processes of groundwater in a small monsoon-influenced mountainous watershed [J]. *Hydrology Research*, 2018, 49(6): 2016 - 2029.
- [9] 常启昕. 高寒山区河道径流水分来源及其季节变化规律[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [10] 宁锋伟,张兰慧,曾璇,等. CLM5.0对高寒山区蒸散发模拟的适用性评估[J/OL]. *冰川冻土*, 2022: 1 - 11. [2022-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20220408.0804.006.html>
- [11] 程文举,席海洋,司建华,等. 河西内陆河浅山区流域蒸散发估算及干旱特性研究[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1105 - 1115.
- [12] MAJIDI M, ALIZADEH A, FARID A, et al. Development and application of a new lake evaporation estimation approach based on energy balance [J]. *Hydrology Research*, 2017, 49(5): 1528 - 1539.
- [13] MUHAMMAD M K I, NASHWAN M S, SHAHID S, et al. Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: A case study of Peninsular Malaysia [J]. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4267.
- [14] CAI Wanyuan, ULLAH S, YAN Lei, et al. Remote sensing of ecosystem water use efficiency: A review of direct and indirect estimation methods [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2393.
- [15] MAJIDI M, ALIZADEH A, FARID A, et al. Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29: 3711 - 3733.
- [16] 孙从建,陈伟,王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 113 - 122.
- [17] 高宏斌,李畅游,孙标,等. 呼伦湖流域氢氧稳定同位素特征及其对水体蒸发的指示作用[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 211 - 219.
- [18] 华明权. 自由水面蒸发过程中稳定同位素分馏效应的实验与模拟[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
- [19] CRAIG H, GORDON L I, HORIBE Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water: 1. Low-temperature experimental results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(17): 5079 - 5087.
- [20] MURAD A A, KRISHNAMURTHY R V. Factors controlling stable oxygen, hydrogen and carbon isotope ratios in regional groundwater of the eastern United Arab Emirates (UAE) [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(12): 1922 - 1931.
- [21] WASSENAAR L I, ATHANASOPOULOS P, HENDRY M J. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan Valley, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 411(1 - 2): 37 - 48.
- [22] 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.
- [23] MOHAMMED A M, KRISHNAMURTHY R V, KEHEW A E, et al. Factors affecting the stable isotopes ratios in groundwater impacted by intense agricultural practices: A case study from the Nile Valley of Egypt [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 707 - 715.
- [24] SUN Zhigang, ZHU Guofeng, ZHANG Zhuanyxia, et al. Identifying surface water evaporation loss of inland river basin based on evaporation enrichment model [J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(3): e14093.
- [25] CLARK I D, FRITZ P. *Environmental isotopes in hydrogeology* Lewis [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [26] GIBSON J J, REID R. Stable isotope fingerprint of open-water evaporation losses and effective drainage area fluctuations in a subarctic shield watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1 - 2): 142 - 150.
- [27] GONFIANTINI R. *Environmental isotopes in lake studies* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1986.
- [28] KISHIMA N, SAKAI H. Oxygen - 18 and deuterium determination on a single water sample of a few milligrams [J]. *Analytical Chemistry*, 1980, 52(2): 356 - 358.

(下转第76页)

## 参考文献:

- [1] 赵文刚,刘晓群,宋雯,等.基于PSO-BP神经网络的西洞庭湖南咀站径流预测[J].人民长江,2019,50(3):124-130.
- [2] 周有荣,崔东文.基于混合核SHTS-SVM的年径流预测[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):66-72.
- [3] 崔东文,郭荣.基于随机漂移粒子群优化的随机森林预测模型及水文应用实例[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(2):6-10.
- [4] 胡顺强,崔东文.基于海洋捕食者算法优化的长短期记忆神经网络径流预测[J].中国农村水利水电,2021(2):78-82+90.
- [5] 包苑村,解建仓,罗军刚.基于VMD-CNN-LSTM模型的渭河流域月径流预测[J].西安理工大学学报,2021,37(1):1-8.
- [6] 席东洁,赵雪花,张永波,等.基于经验模态分解与Elman神经网络的月径流预测[J].中国农村水利水电,2017(7):112-115.
- [7] 桑宇婷,赵雪花,祝雪萍,等.基于CEEMD-BP模型的汾河上游月径流预测[J].人民黄河,2019,41(8):1-5.
- [8] 徐冬梅,庄文涛,王文川.基于CEEMDAN-WD-PSO-LSSVM模型的月径流预测研究[J].中国农村水利水电,2021(8):54-58+66.
- [9] 王丽丽,李新,冉有华,等.基于奇异谱分析-灰狼优化-支持向量回归混合模型的黑河正义峡月径流预测[J].遥感技术与应用,2020,35(2):355-364.
- [10] 孙望良,周建中,彭利鸿,等.DFA\_VMD\_LSTM组合日径流预测模型研究[J].水电能源科学,2021,39(3):12-15.
- [11] 黄景光,吴巍,程璐瑶,等.基于小波支持向量机特征分类的日径流组合预测——以宜昌三峡水库为例[J].中国农村水利水电,2018(6):33-39.
- [12] 黄巧玲,粟晓玲,杨家田.基于小波分解的日径流支持向量机回归预测模型[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):211-217.
- [13] 任化准,陈琼,何有良,等.WPSO-SVR耦合日径流预测模型研究及应用[J].人民长江,2017,48(10):40-43.
- [14] 张亚杰,崔东文.基于EMD-FBI-ELM模型的径流预测研究[J].人民珠江,2022,43(6):94-100+107.
- [15] 徐冬梅,张一多,王文川.基于小波包分解的LS-SVM-ARIMA组合降水预测[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):71-77.
- [16] 杨琼波,崔东文.基于小波包分解的AJS-GMDH月径流时间序列预测研究[J].水力发电,2022,48(6):45-51.
- [17] 朱刘柱,王绪利,马静,等.基于小波包分解与循环神经网络的综合能源系统短期负荷预测[J].电力建设,2020,41(12):135-142.
- [18] 叶瑞丽,郭志忠,刘瑞叶,等.基于小波包分解和改进Elman神经网络的风电场风速和风电功率预测[J].电工技术学报,2017,32(21):103-111.
- [19] 李新华,崔东文.基于WPD-RSA-ELM模型的水文时间序列多步预测[J/OL].水利水电技术(中英文). (2022-05-05) [2022-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20220505.1017.004.html>.
- [20] NARUEI I, KEYNIA F, MOLAHOSSEINI A S. Hunter-prey optimization: Algorithm and applications [J]. Soft Computing, 2021, 26: 1279-1314.
- [21] 姚芳,姜涛,刘明宇,等.基于GWO-ELM的逆变器开路故障诊断[J].电源学报,2020,18(1):45-53.
- [22] 王珂珂,牛东晓,甄皓,等.基于WOA-ELM模型的中国碳排放预测研究[J].生态经济,2020,36(8):20-27.
- [23] 程国森,崔东文.黑猩猩优化算法-极限学习机模型在富水性分级判定中的应用[J].人民黄河,2021,43(7):62-66+103.
- [29] GIBSON J J, EDWARDS T W D, BURSEY G G, et al. Estimating evaporation using stable isotopes: Quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in Northern Canada [J]. Hydrology Research, 1993, 24(2-3): 79-94.
- [30] KONG Yanlong, WANG Ke, LI Jie, et al. Stable isotopes of precipitation in China: A consideration of moisture sources [J]. Water, 2019, 11(6): 1239.
- [31] 代述勇,雷加强,赵景峰,等.策勒河出山径流特征及其趋势[J].干旱区地理,2009,32(2):204-210.
- [32] HAN Yongxiang, FANG Xiaomin, SONG Lianchun, et al. A study of atmospheric circulation and dust storm causes of formation in the Tarim Basin—The restructured wind field by shapes of dune and observed prevailing wind [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(4): 627-635.
- [33] CHEN Haiyan, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Identifying evaporation fractionation and streamflow components based on stable isotopes in the Kaidu River Basin with mountain-oasis system in north-west China [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(15): 2423-2434.
- [34] 钱剑平,赵建平,桂东伟,等.策勒绿洲生态与灌溉用水对地下水埋深的影响[J].水土保持通报,2018,38(1):96-102.
- [35] 刘毅.塔里木盆地南缘绿洲灌区地表水与地下水联合利用研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2019.
- [36] YIN Changjun, LIU Yunfei, GUI Dongwei, et al. A Study on evaporation calculations of agricultural reservoirs in hyper-arid areas [J]. Agriculture, 2022, 12(5): 612.
- [37] 韩兴胜.新疆策勒县水资源现状及对策探析[J].地下水,2017,39(6):184-185+194.
- [38] 陆婷.南北疆典型小流域遥感蒸散发及生态耗水对比研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.

(上接第68页)