

基于稳定同位素贝叶斯混合模型的南四湖水量来源定量解析*

白莹¹, 王宗志^{1,2**}, 谭浪¹, 范丽丽¹

(1: 南京水利科学研究院, 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029)

(2: 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

摘要: 为定量解析南四湖水源组成, 厘清本地水与外调水的关系, 精准保护湖泊水资源, 本文建立了基于氢氧稳定同位素的贝叶斯混合模型, 分析比较南水北调东线运行后调水期和非调水期不同水源对南四湖湖区的贡献比例及季节特征。结果表明: (1) 流域降雨受到一定程度局地蒸发的影响, 夏季受海洋蒸发水汽的影响; (2) 南四湖地下水、大气降水、入湖河流和外调水等不同水源对湖区水体的贡献比例受南水北调东线工程运行影响较大, 调水期分别为 5.4%、8.7%、31.2% 和 54.7%, 外调水贡献比例最高; 非调水期分别为 22.9%、53.0%、6.7% 和 17.4%, 大气降水贡献比例最高, 入湖河流贡献相对较少。 (3) 南水北调东线调水实施后, 调水期的外调水量对湖区的贡献占绝对优势, 表明调水对南四湖水量变化发挥了重要作用, 调水活动逐渐取代自然因素成为流域水量变化的主要驱动因子。

关键词: 南四湖; 水源组成; 南水北调东线; 氢氧稳定同位素; 贝叶斯混合模型

Quantification of water sources in Lake Nansi based on stable isotope Bayesian mixing model*

Bai Ying¹, Wang Zongzhi^{1,2**}, Tan Lang¹ & Fan Lili¹

(1: The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R. China)

(2: Yangtze River Protection and Green Development Institute, Nanjing 210098, P.R. China)

Abstract: Quantifying the composition of water sources in Lake Nansi can clarify the relationship between local water and diverted water, and protect lake water resources accurately after the operation of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. A Bayesian mixing model for hydrogen and oxygen stable isotopes is established in this paper. The contribution and seasonal characteristics of different water sources to Lake Nansi were compared and analyzed during the diversion and non-diversion period. Results showed that: (1) Precipitation was influenced by local water vapor, and slightly effected by oceanic water vapor during the summer. (2) Different water sources to Lake Nansi, including groundwater, precipitation, river runoff and diverted water, were all significantly influenced by the operation of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. During the diversion period, the contributions from the above sources were 5.4%, 8.7%, 31.2% and 54.7% respectively, with the highest contribution from diverted water. During the non-diversion period, however, the contributions were 22.9%, 53.0%, 6.7% and 17.4% respectively, with the highest contribution from precipitation. (3) After the implementation of water diversion, the contribution of diverted water during the diversion period was absolutely dominant, which indicated that water diversion played an important role in the water volume changes of Lake Nansi, and replace natural factors as the main driving force.

Keywords: Lake Nansi; water source composition; South-to-North Water Diversion Project; δD and $\delta^{18}O$ stable isotope; Bayesian mixing model

南四湖是我国华北地区最大的淡水湖泊, 是鲁南、苏北地区的重要水源地, 也是南水北调东线工程的重

* 2023-07-05 收稿; 2024-02-26 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52109027)、江苏省自然科学基金项目(BK20211023)、江苏省水利科技项目(2023025)、福建省水利科技项目(MSK202206)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y521006, Y521008)联合资助。

** 通信作者; E-mail: zzwang@nhri.cn。

要调蓄场所,其水生态稳定性对沿线水质安全及调水效益起决定性作用^[1]。南四湖入湖河流 53 条、取水口门 175 处,绝大多数取水口门没有计量监控设施,取水监管难度大。即使南水北调东线工程配套“南四湖水资源监测计量工程建设”实施,也仅能控制南四湖进出水量的 80%,加之南水北调水与南四湖当地水难以区分,为实施水资源统一管理提出了新的挑战^[2]。由于南四湖水量来源不明,严重制约了流域水量分配的科学性和适用性。因此,摸清南四湖水量来源是建立南四湖水资源刚性约束机制、实现南四湖水资源节约集约利用的重要前提。

氢(δD)、氧($\delta^{18}O$)稳定同位素是水分子重要的构成成分,作为示踪元素广泛应用于水循环路径解析及水源划分。1970s 以来,利用环境同位素和水化学方法进行流量过程分割的理论逐渐成熟,其原理是利用不同稳定同位素示踪剂的质量平衡关系,将降雨事件产生的流量过程线分割成不同的水源,被认为是一种具有物理基础的划分方法,对追踪流域水源、揭示径流形成机制、分析水文过程、摸清流域水资源演变规律具有重要作用^[3]。郭亚文等分析了黄土高原沟壑区南小河沟流域地表水和地下水的氢氧稳定同位素和水化学特征,揭示了地表水与地下水之间的相互关系^[4];刘鑫等分析了汾河流域浅层地下水的水化学和氢氧稳定同位素分布特征,揭示了流域水循环过程^[5];魏全等结合水传输时间和同位素端元混合模型,分析了秦岭典型流域不同径流组分特征及补给转化关系^[6];马浩天等利用稳定同位素模型解析了汾河源头水源组成^[7];杨丽娜等利用端元混合模型分析了闪电河流域大气降水、地表水、地下水的转换关系^[8]。

目前,同位素水源贡献分析基本上要借助同位素混合模型来估计不同来源对混合水体的贡献,一般包括线性混合模型和贝叶斯混合模型。杨孩等在分析南水北调中线干渠水体氢氧稳定同位素特征的基础上,采用 3 种方法区分了渠道水体与外部水体^[9],对于了解渠道水体的水资源特征、水体流动过程以及对周边环境的影响具有重要意义。梅亮等讨论了黑河上游葫芦沟流域的各水体稳定同位素特征及水力联系,运用线性混合模型对冻土活动层的水分来源进行了定量分析^[10]。陈希针对高原区实际特点,改进了贝叶斯混合模型的“误差结构”,从定性和定量两方面解析了那曲流域径流水源组成^[11]。刘澄静基于稳定同位素混合模型,结合后向轨迹模型、云下二次蒸发模型以及地下水补给高程分析,定量分析了哈尼梯田区不同尺度下的水循环过程^[12]。马天文等基于降雨事件下不同水体的氢氧稳定同位素特征,利用线性混合模型分析了降雨和流域前期储水对河道径流的贡献比例及其动态变化特征^[13]。刘芳等也利用线性混合模型研究了祁连山南坡主要流域河水的稳定同位素特征及其补给关系^[14]。与线性混合模型相比,贝叶斯混合模型通过蒙特卡罗采样方法和模型的多次迭代运算等统计方法,实现重建各端元同位素值的概率分布,最终确定各源贡献比例的概率分布,从而确定各源最优贡献比例及其不确定性。贝叶斯混合模型可以考虑同位素的时空变异性 and 分馏作用,减少了径流成分同位素的不确定性,在复杂来源贡献比例划分方面较线性混合模型具有显著优势,被广泛运用于植物水分来源、污染物迁移、土壤碳源和动物食物习性等研究领域^[15-19]。但是,目前该方法在人类活动影响显著的湖泊流域水源定量分析中的应用尚不多见,主要原因为外调水、取水水等人类活动影响下,湖泊流域水分来源更为复杂,径流方向改变,“源”“汇”条件存在时间差异,水源概化和划分存在一定难度。

本研究在充分分析南四湖径流组成、水分来源及其变化特征的基础上,采用氢氧稳定同位素作为示踪剂,首次将贝叶斯同位素混合模型 MixSIAR^[20]引入湖泊流域水资源系统水源划分研究,对调水影响下南四湖流域大气降水、入湖河流、外调水、地下水等不同水源的贡献率进行量化分析,进一步分析了调水对南四湖水源贡献的影响,以期为流域水资源高效管理及合理利用提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南四湖流域总面积约 3.17 万 km^2 ,地势自北向南降低,东、西、北三面承纳鲁、豫、苏、皖四省 32 个县市区来的水,多年平均降水量 695.2 mm,汛期 6—9 月降水量占年降水量的 72%。南四湖湖区南北长约 125 km,东西宽 5~25 km,环湖大堤内面积 1266 km^2 ,平均水深 1.46 m。湖泊中部建有二级坝枢纽工程,把湖泊分成上级湖和下级湖,其中上级湖由南阳湖、独山湖和昭阳湖(大部分)组成,面积 606 km^2 ;下级湖由昭阳湖(小部分)和微山湖组成,面积 660 km^2 。上级湖正常蓄水位 34.2 m,死水位 33.0 m,正常蓄水位时库容为 7.7

亿 m^3 ,死库容 1.9 亿 m^3 ,调节库容 5.8 亿 m^3 。下级湖正常蓄水位 32.5 m,死水位 31.5 m,正常蓄水位时库容 7.7 亿 m^3 ,死库容 3.1 亿 m^3 ,调节库容 4.6 亿 m^3 。南四湖直接入湖河流有 53 条,集水面积大于 1000 km^2 的河流有白马河、泗河、洸府河、东鱼河、洙赵新河、梁济运河、复新河、大沙河和万福河 9 条,全部位于上级湖。河流同时用于行洪、农灌、纳污,主要入流河道宽浅,水流较缓,并且修建了较多的水库及闸坝工程,起到拦蓄调洪作用,湖滨区沟渠串通严重,引进、引出水量不能全面控制,加之受闸门调节影响,入湖河流上、下游各测站流量对应关系不明显,大部分河流无径流量记录,无法精确控制入湖水量。南水北调东线工程建韩庄闸泵站抽韩庄运河水入下级湖,建二级坝泵站抽下级湖水入上级湖,建长沟泵站抽上级湖水入梁济运河;上级湖只输水不调蓄,下级湖作为调蓄湖泊^[21]。

1.2 样品采集与测试分析

考虑季节变化、水文情势及调水期影响,选择调水期(5 月)和非调水期(11 月)分别进行了南四湖流域地表水和地下水样品的采集,采样点分布见图 1。于 2021 年 1—12 月进行降水样品收集,在韩庄闸水文站、二级闸水文站共收集降水样品 7 个。地表水样品分为湖区、入湖河流和外调水。其中湖区包括南阳、独山、沙堤、二级坝闸上、二级坝闸下、微山、韩庄闸上 7 个采样点,入湖河流包括白马河、泗河、洸府河、梁济运河、洙赵新河、万福河、东鱼河、复兴河、大沙河、沿河、新薛河 11 个采样点,外调水包括韩庄闸下 1 个采样点;地下水包括寿张、泗河、姚西村、李营、唐口、王因、颜店供水站、姚村、孙庄水文站、万张、城关、苑庄、马营 13 个采样点。研究区域及采样点分布见图 1。

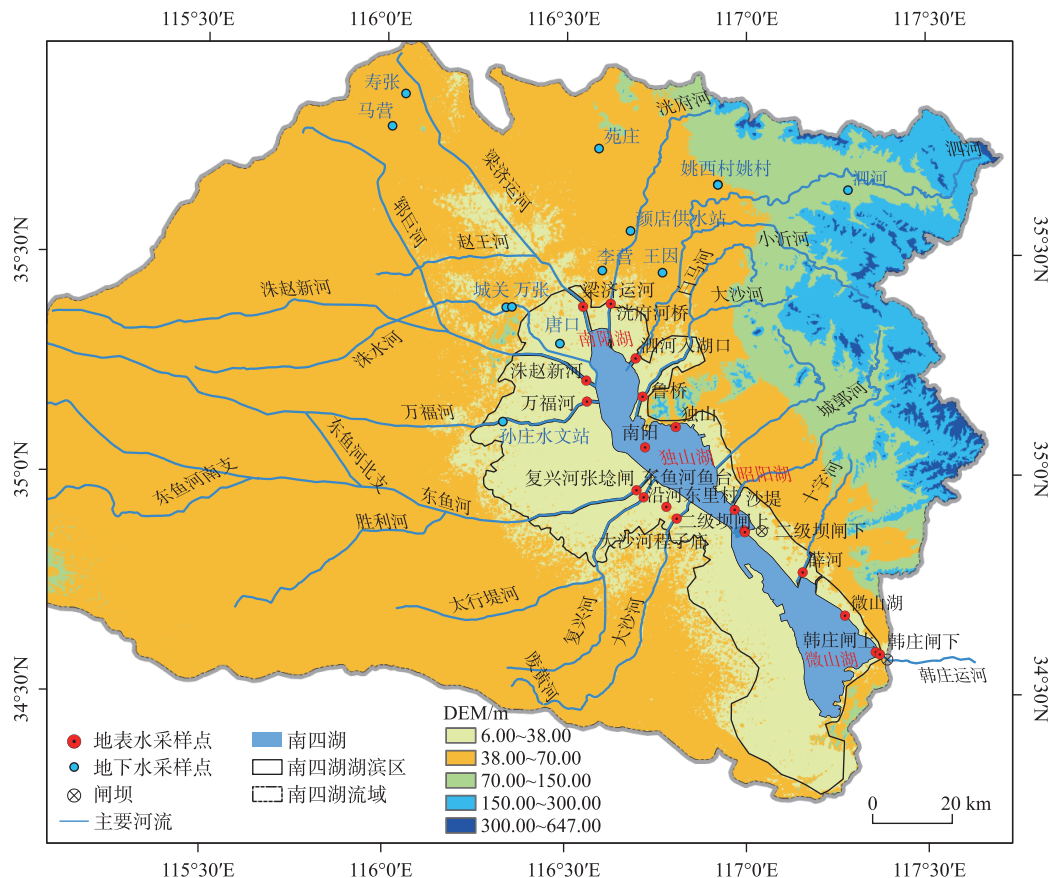


图 1 研究区及采样点分布

Fig.1 Research area and sampling sites

大气降水、地表水、地下水样品采集后迅速装入 100 mL 聚乙烯瓶中, 尽量装满, 于 4 °C 冷藏保存, 尽快送回实验室分析。采用液态水同位素分析仪 (DLT-100, LGR, USA) 测定水样中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 。采用氢氧同位素标准物质 (908-0008, LGR) 进行样品标定, 标准物质规格为 30 mL/瓶, 其中标样 1 (908-0008-9101) $\delta\text{D} = -150\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -19.5\text{‰}$, 标样 2 (908-0008-9102) $\delta\text{D} = -115\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -15.5\text{‰}$, 标样 3 (908-0008-9103) $\delta\text{D} = -80\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -11.5\text{‰}$, 标样 4 (908-0008-9104) $\delta\text{D} = -45\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -7\text{‰}$, 标样 5 (908-0008-9105) $\delta\text{D} = -10\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -3\text{‰}$ 。同一个样品采用多次重复进样测试, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 重复测定的外精度分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.6\text{‰}$ 。所有水样测定结果以 V-SMOW (维也纳标准海洋水) 为标准的千分差表示:

$$\delta R(\text{‰}) = (R_{\text{sam}}/R_{\text{sta}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_{sam} 代表样品中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{sta} 为 V-SMOW 标准物质中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值。

1.3 数据分析方法

本文采用稳定同位素混合模型进行南四湖水源组成定量分析。其基本假设中, 对于给定的稳定同位素, 混合水体 (δ_{M}) 的稳定同位素值计算公式为:

$$\delta_{\text{M}} = f_1(\delta_1 + \gamma_1) + f_2(\delta_2 + \gamma_2) \cdots f_i(\delta_i + \gamma_i) \quad (2)$$

其中, f_i 是第 i 种水源对混合水体的贡献比例, δ_i 是第 i 种水源的稳定同位素值, γ_i 是第 i 种水源的稳定同位素分馏系数。基于贝叶斯理论的同位素混合模型可以实现水源分割的准确量化, 得到的水源贡献比例为概率分布密度函数, 其原理是将各水源的贡献比例作为待求解值, 依据水源贡献比例的先验信息和水源同位素样本信息得到水源贡献比例的后验信息。贝叶斯理论通过数值积分估计各水源贡献比例的后验概率分布, 过程中会随机生成 q 个可能的水源贡献比例矢量 f_q , 其中所有元素 f_i 之和为 1, 具体见式 (3):

$$1 = f_1 + f_2 + \cdots + f_i \quad (3)$$

基于贝叶斯定理, f_q 的概率计算公式见式 (4):

$$P(f_q | x) = \frac{L(x | f_q) \cdot p(f_q)}{\sum L(x | f_q) \cdot p(f_q)} \quad (4)$$

式中, x 为混合水体的稳定同位素观测值, f_q 为 q 个可能的水源对径流的贡献率, $L(x | f_q)$ 是给定 f_q 下混合水体稳定同位素观测值的似然, $p(f_q)$ 表示基于先验信息在自然状态出现 f_q 的先验概率, 分母 $\sum L(x | f_q) \cdot p(f_q)$ 表示混合水体稳定同位素观测值边际概率的似然, 分子 $L(x | f_q) \cdot p(f_q)$ 表示基于数据和先验信息情况下所给定 f_q 的非标准化似然。

假设利用 j 种稳定同位素估计 i 种水源对混合水体的贡献比例, 在贝叶斯混合模型中, 混合水体和各水源的稳定同位素丰度值总体服从正态分布, 通过定义各类水源稳定同位素分布的均值和方差, 各类水源稳定同位素的不确定性被纳入模型。在这里, 关于水源贡献比例的先验概率分布 $p(f_q)$, 以分布在 $[0, 1]$ 区间内的 Beta 分布或狄利克雷 (Dirichlet) 分布来确定, 具体为:

$$\text{Beta 分布: } L(f_q | \alpha_i, \beta_i) = \prod_{i=1}^n \frac{f_i^{\alpha_i-1} \cdot (1-f_i)^{\beta_i-1}}{B(\alpha_i, \beta_i)} \quad (5)$$

$$\text{Dirichlet 分布: } L(f_q | \alpha) = \frac{\Gamma(\alpha_0)}{\Gamma(\alpha_1) \cdots \Gamma(\alpha_i)} \prod_{i=1}^n f_i^{\alpha_i-1} \quad (6)$$

式中, α 和 β 分别为 Beta 分布和 Dirichlet 分布的参数。

为了计算给定 f_q 下混合水体稳定同位素观测值的似然 $L(x | f_q)$, 将各水源贡献比例与其稳定同位素信息的分布相结合, 形成混合水体稳定同位素联合分布函数。每一个混合水体的稳定同位素丰度值所服从的分布通过数学期望 ($\hat{\mu}_j$) 和标准方差 ($\hat{\sigma}_j$) 来确定, 表达形式见式 (7):

$$\begin{cases} \hat{\mu}_j = \sum_{i=1}^n [f_i(m_{j_{\text{source}_i}} + m_{j_{\text{fract}_i}})] \\ \hat{\sigma}_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n [f_i^2(s_{j_{\text{source}_i}}^2 + s_{j_{\text{fract}_i}}^2)]} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $m_{j_{\text{source}_i}}$ 为第 i 个水源的第 j 种稳定同位素的数学期望, $m_{j_{\text{fract}_i}}$ 为第 i 个水源第 j 种稳定同位素分馏系数的数学期望, $s_{j_{\text{source}_i}}$ 为第 i 个水源的第 j 种稳定同位素的标准方差, $s_{j_{\text{fract}_i}}$ 为第 i 个水源第 j 种稳定同位素分馏系

数的标准方差。给定混合水体的稳定同位素丰度的似然值计算公式为：

$$L(x|\hat{\mu}_j,\hat{\sigma}_j)=\prod_{k=1}^n\prod_{j=1}^n\left[\frac{1}{\hat{\sigma}_j\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{(x_{kj}-\hat{\mu}_j)^2}{2\hat{\sigma}_j^2}\right)\right]$$
 (8)

式中, x_{kj} 表示第 k 个混合水体中第 j 种稳定同位素丰度值。

最后,基于先验信息在自然状态出现 f_q 的先验概率 $p(f_q)$ 与给定 f_q 下混合水体稳定同位素丰度值似然 $L(x|f_q)$ 的乘积,可求出最终目标值。本研究采用 MixSIAR 模型,利用 R 语言进行模型构建和数据分析。模型使用 Dirichlet 分布来指定水源贡献的先验值,其分布的参数是一个向量 $\alpha=(1,1,1)$,定义为“无信息的/广义先验”,即假设各水源贡献比例等可能。模型采取马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)方法估计每个变量的整个后验分布。设定模拟次数为 200000 次,用以得到准确的后验分布估计,并判断链条是否已经收敛。模型构建、求解使用 R 语言完成,单因素方差检验、作图等 在 Origin 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同水源稳定同位素特征

在南四湖水源组成定量解析过程中,湖区水体被分割为 4 种水源,包括入湖河流、大气降水、外调水和地下水。各类水源氢氧稳定同位素丰度统计信息见表 1 和图 2。

表 1 南四湖不同水源稳定同位素丰度的统计信息

Tab.1 Statistical information of stable isotope abundance in different water sources of Lake Nansi

水源类别	n	$\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}/\text{‰}$				$\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}/\text{‰}$			
		最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
湖区	14	-6.19	-4.17	-5.12	0.77	-45.98	-34.40	-39.08	3.50
入湖河流	22	-7.66	-3.90	-5.84	1.08	-55.62	-33.19	-45.11	6.18
大气降水	7	-15.13	-0.95	-7.43	4.95	-99.19	10.08	-41.26	36.73
外调水	2	-5.63	-2.20	-3.91	1.72	-41.86	-25.43	-33.65	8.22
地下水	28	-9.88	-5.53	-7.73	1.05	-73.72	-45.99	-56.59	6.90

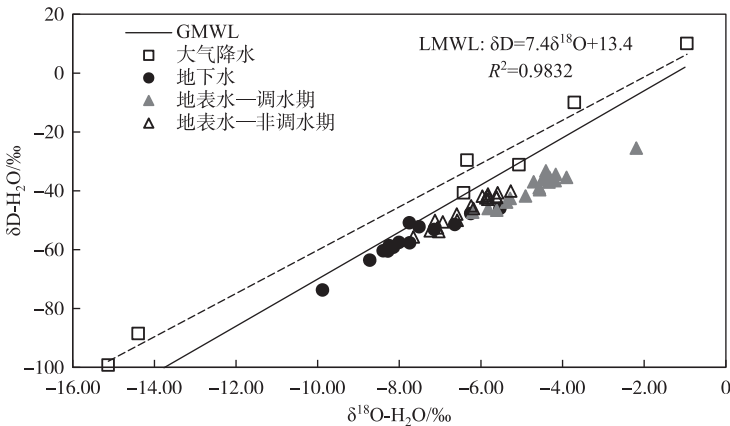


图 2 南四湖不同水源稳定同位素的关系

Fig.2 Stable isotope abundance in different water sources of Lake Nansi

统计结果显示,大气降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-15.13\text{‰}\sim-0.95\text{‰}$,平均值为 -7.43‰ ; δD 的变化范围为 $-99.19\text{‰}\sim10.08\text{‰}$,平均值为 -41.26‰ ; δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在较好的线性关系,拟合出区域大气降水线(LMWL)为 $\delta\text{D}=7.4\delta^{18}\text{O}+13.4$ ($R^2=0.9832$)。湖区 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-6.19\text{‰}\sim-4.17\text{‰}$,平均值为 -5.12‰ ; δD 的变

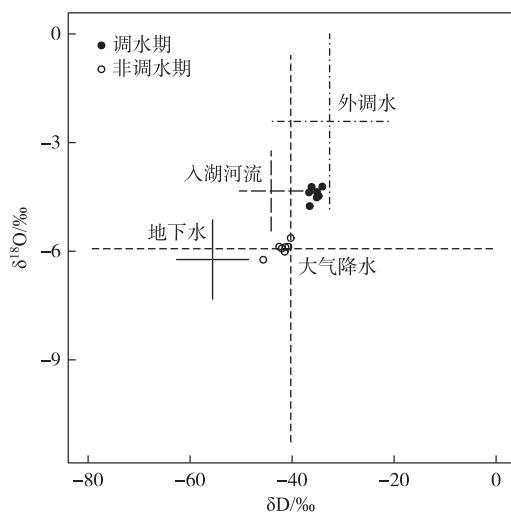


图3 不同水源稳定同位素的溯源分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of stable isotope in different water sources

化范围为 $-45.98\text{‰} \sim -34.40\text{‰}$,平均值为 -39.08‰ ;入湖河流 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-7.66\text{‰} \sim -3.90\text{‰}$,平均值为 -5.84‰ ; δD 的变化范围为 $-55.62\text{‰} \sim -33.19\text{‰}$,平均值为 -45.11‰ ;外调水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-5.63\text{‰} \sim -2.20\text{‰}$,平均值为 -3.91‰ ; δD 的变化范围为 $-41.86\text{‰} \sim -25.43\text{‰}$,平均值为 -33.65‰ 。地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-9.88\text{‰} \sim -5.53\text{‰}$,平均值为 -7.73‰ ; δD 的变化范围为 $-73.72\text{‰} \sim -45.99\text{‰}$,平均值为 -56.59‰ 。

2.2 基于氢氧稳定同位素的水源组成特征

2.2.1 基于氢氧稳定同位素的水源组成空间特征 模型输入数据的不同水源稳定同位素溯源分布特征见图3,其中不同水源类型数据样点的误差条代表数据均值和方差。由图3可知,调水期和非调水期湖区水体稳定同位素分布特征差异显著($P < 0.01$);外调水、入湖河流、大气降水和地下水各水源稳定同位素分布特征差异较为显著($P < 0.05$)。不同水源贡献比例的先验分布见图4。

氢氧稳定同位素贝叶斯混合模型输出的各水源后验分布及其统计信息(包括中位数、均值、方差等)见表2。根据该结果,将水源贡献比例后验分布的平均值定义为不同水源贡献比例,则南四湖入湖河流、大气降水、外调水和地下水对湖区水体的贡献比例分别为24.6%、24.8%、29.0%和21.6%,其中外调水贡献最高,其次为入湖河流和大气降水,地下水贡献相对较少。

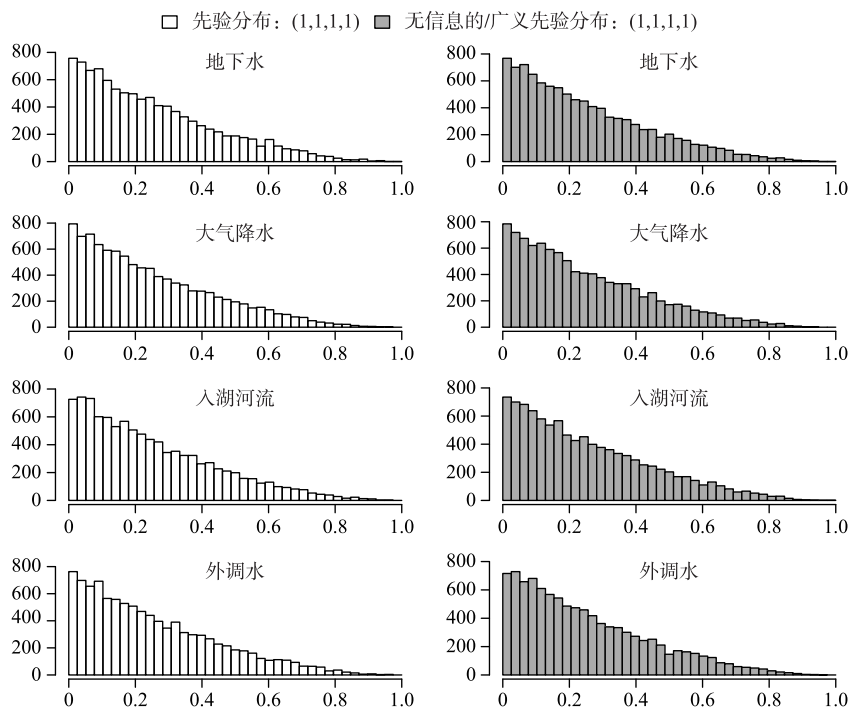


图4 水源贡献比例的先验分布

Fig.4 Prior distribution of water source contribution proportions

表 2 南四湖不同水源对湖区水体贡献的模拟结果
Tab.2 Modeling outcome of different water sources's contribution to Lake Nansi

水源类别	<i>n</i>	平均值	标准差	后验分布概率						
				2.5%	5%	25%	50%	75%	95%	97.5%
入湖河流	22	24.6	19.1	0.4	0.9	9.1	21.1	36.4	61.3	69.3
大气降水	7	24.8	17.6	1.4	2.3	9.9	22.0	36.5	58.3	63.4
外调水	2	29.0	20.5	1.8	3.0	12.2	25.3	42.0	69.3	76.7
地下水	28	21.6	18.5	7.0	1.1	6.2	16.8	33.5	58.5	65.9

2.2.2 基于氢氧稳定同位素的水源组成时间特征 根据氢氧稳定同位素贝叶斯混合模型输出结果,南四湖流域湖区不同时期水源贡献比例后验概率密度分布见图 5。由图 5 可知,南四湖地下水、大气降水、入湖河流和外调水在调水期对湖区水体的贡献比例分别为 5.4%、8.7%、31.2% 和 54.7%,外调水最高,其次是入湖河流,地下水贡献相对较少。非调水期贡献比例分别为 22.9%、53.0%、6.7% 和 17.4%,大气降水最高,其次是地下水,而入湖河流贡献相对较少。

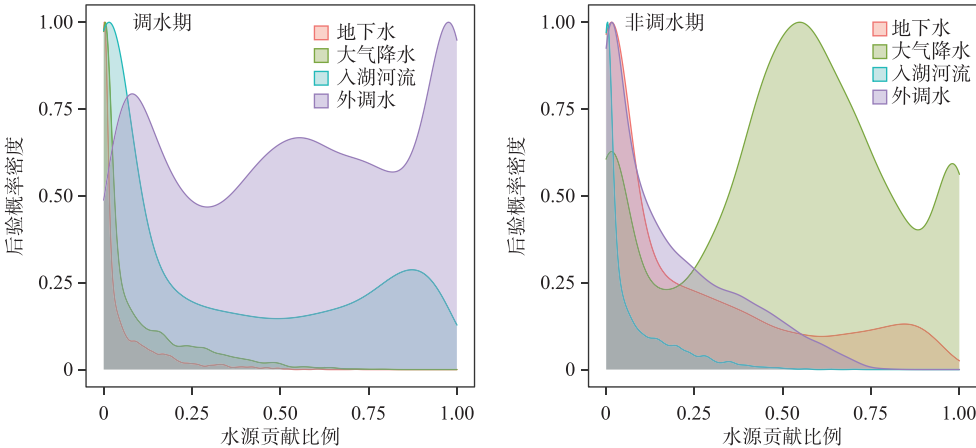


图 5 南四湖不同时期各水源贡献比例的后验概率密度

Fig.5 Posterior probability density of contribution proportions from different water sources in Lake Nansi during different periods

3 讨论

3.1 大气降水对南四湖水源组成的影响

自然因素往往是影响湖泊水源最直接、最基础的要素。孙盈通过分析南四湖水量与气象因子的相关关系,发现气温是影响水量变化的主要自然驱动因子,而降水量是次要自然驱动因子,在 2000—2020 年与湖泊水量呈显著正相关($P<0.05$),且在 2000—2010 年的影响更强^[22]。南四湖的天然水资源主要是由大气降水形成的河川径流。张经之等经过还原计算,求得 1956—1979 年湖东区多年平均年径流总量为 20.6 亿 m^3 ,湖西区多年平均年径流总量为 16.4 亿 m^3 ,流域多年平均天然年径流量为 35.5 亿 m^3 ,但丰枯水年地表径流量相差极为悬殊;汛期径流量占年径流总量的 70%~80%,而 7—8 月又占汛期的 60%~70%,年内分配不均^[23]。2013 年南四湖流域平均产水深度为 138.67 mm,产水总量为 40.82 亿 m^3 ,且产水量年际变化与降雨量变化趋势一致,表明降雨量为流域生态系统产水功能空间分布的重要驱动因素^[24]。

另一方面,大气降水是水循环的重要环节,对区域水源组成及转化具有重要影响,降水稳定同位素可作为判定区域水汽来源、分馏程度的直接证据。高宗军等发现我国不同区域大气降水线斜率具有明显的区域

特征,结合水汽来源可大体分为东南沿海区、西南区、青藏高原区、西北内陆区、东北及华北内陆区等。华北地区大气降水线斜率最低,其值可接近 5 甚至更小,华南地区偏高,有的高达 9;800 mm 年等降水量线以南以西,大气降水线斜率值绝大多数大于 7.8,该线东北部则小于 7.8^[25]。南四湖区域大气降水线斜率为 7.36,截距为 13.4‰。根据水汽来源及区域大气降水线特征,南四湖流域属于东北及华北内陆区,区域大气降水线斜率低于 7.8,远距离水汽经过强烈的动力分馏作用,同时降水的多次蒸发在当地水汽来源中占很大比例。降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 夏季贫化、冬季富集的特点在我国季风气候区广泛存在^[26]。较低的斜率和截距表明雨滴降落过程受到了二次蒸发的影响,同位素发生了不平衡分馏^[27]。据此可以进一步推断南四湖流域降水受到一定程度局地蒸发影响。

氕盈余($d = \delta D - 8\delta^{18}O$)受水汽源地的温度、相对湿度、风速等气象条件以及水汽路径中大陆蒸发水汽的影响,可直观反映地区降水蒸发凝结过程的不平衡程度,是示踪水汽源区的一个重要参数,由低纬海面水汽形成的降水中 d 值较低^[28]。局地蒸发水汽来源形成的降水一般 d 值大于 10‰^[29]。南四湖流域各水源及大气降水不同季节氕盈余 d 值特征见图 6。由图 6 可知,南四湖大气降水 d 值平均为 18.19‰ (9.44‰ ~ 26.69‰),进一步印证了南四湖流域降水受局地蒸发水汽来源影响强烈的结论;南四湖流域大气降水不同季节平均氕盈余 d 值呈现显著差异($P < 0.01$),冬、春季 d 值远高于 10‰,而夏季受海洋蒸发水汽的影响,降低到 10‰。另外,本研究中大气降水、地表水和地下水同位素取样数量及时间系列有待延长,以全面分析南四湖流域水汽的输送路径和水源转化的关系。

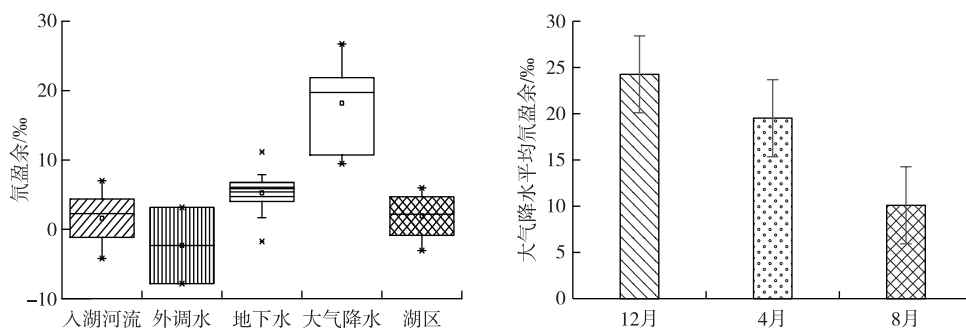


图 6 南四湖流域不同水源及大气降水不同季节氕盈余特征

Fig.6 Characteristics of deuterium excess in different water sources and atmospheric precipitation in different seasons in Lake Nansi Basin

3.2 蒸发对南四湖稳定同位素比值的影响

湖泊蒸发和入湖水量是影响湖泊水体氢氧同位素的重要因素。其中,湖泊表面水体同位素变化的基础是蒸发过程中发生在汽-液界面的同位素分馏,其强度取决于气温、相对湿度、天然降水和蒸发率等气象条件^[30]。Saxena 经过实验得出湖泊蒸发水中稳定同位素比率 δ_e 约为 1.013,刘晓旭计算得到达里诺尔湖蒸发水汽中稳定同位素比率 δ_e 约为 -7.97‰^[31]。根据湖泊水量平衡方程和稳定同位素物质平衡方程,南四湖正常蓄水位库容为 7.7 亿 m^3 ,2021 年蒸发量为 734.4 mm,按照蒸发水面面积为 1266 km^2 ,蒸发水量约合 92.98 万 m^3 。在入湖水量、地下水交换量、大气降水量、外调水量不变的情况下,湖区蒸发对湖水稳定同位素组成的影响不足 1‰。对蒸发强烈且无出流排泄的内陆湖泊,湖区蒸发对湖水稳定同位素组成的影响一般更为显著^[32]。湖泊蒸发的动力学分馏系数取值是同位素质量守恒法中一个不确定性较大的系数,也会对湖泊蒸发量影响程度估算结果产生明显偏差^[33]。另外,降水、蒸发、出入湖水量过程的年内差异导致使用水源年均稳定同位素比率进行水量平衡分析时造成 1% ~ 14% 不等的相对误差^[34]。

3.3 外调水对南四湖水源组成的影响

根据《南水北调东线工程规划》(2001 年修订),东线工程一期调水量为 89.37 亿 m^3 ,已于 2013 年 11 月正式通水;二期规模为 148.17 亿 m^3 (含一期规模)。受南水北调东线运行影响,南四湖水源特征发生了显著变化。陶佳辉等研究发现南水北调东线山东受水区 2001—2016 年天然径流量较 1956—2000 年减少了

5.8%,分析可能是人类活动影响造成的^[35]。周石等通过遥感影像数据分析南四湖流域水体面积变化规律,结果表明2006—2013年间降雨量与该年内水体面积呈正相关关系,但2013年南水北调东线运行以后,受调水影响,南四湖水体面积变化与降雨关系减弱,表明外调水也在一定程度上影响了南四湖的蓄水量^[36]。南水北调东线工程运行以来(2014—2020年),南四湖调水总量、韩庄闸泵站径流量与月平均调水量见图7。

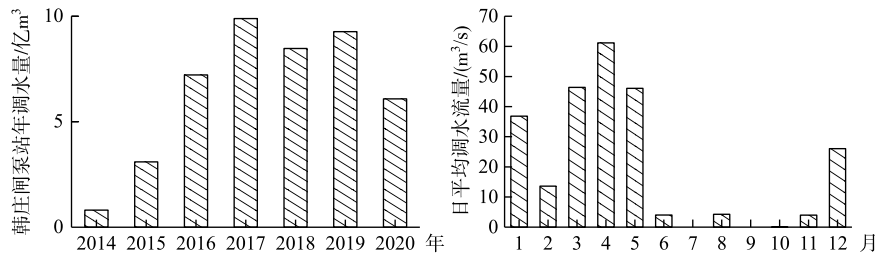


图7 南四湖韩庄闸泵站年调水量与日平均调水流量

Fig.7 Relationship between runoff and water diversion at Hanzhuang Pump Station in Lake Nansi

由图7可知,2016—2020年南四湖年平均调水量约为7.15亿m³,2016年以来南四湖调水期(12月—次年5月)集中了全年92%~100%的调水量。2014年南四湖全年降水量偏少,尤其是在汛期之后雨水不足往年的50%,而湖水蓄水甚至不到往年同期的20%,致使蓄水位长期处于死水位以下。为缓解本次旱情,2014年8月5日—8月24日实施紧急应急调水,向南四湖调水0.807亿m³。有研究利用多源遥感数据对南四湖水量变化进行了估算,结果表明2014—2020年南四湖水量有所增加,但其与年降水量的相关系数明显下降,表明2013年南水北调东线工程调水实施后,调水对南四湖水量变化发挥着重要作用,人类活动逐渐取代自然气象因素成为湖区水量变化的主要驱动因子^[22]。本研究中,集中在调水期的外调水量对湖区的贡献占绝对优势,与以上分析结果较为吻合。将调水行为作为水源贡献比例的协变量进行分析,分为调水期和非调水期定量解析调水对不同水源贡献比例的影响程度,具体见图8。总体来看,南四湖流域各水源贡献比例受一定程度的调水影响,影响值均值为5.455。

3.4 水源划分的不确定性分析

由于贝叶斯混合模型输出结果为水源贡献的后验分布,并不是一个准确值,因此存在一定的不确定性。将水源贡献比例后验分布的标准差定义为不同水源贡献的不确定程度,则地下水、大气降水、入湖河流和外调水对南四湖水源贡献比例的总体不确定性分别为18.5%、17.6%、19.1%和20.5%。调水期地下水、大气降水、入湖河流和外调水贡献比例的不确定程度分别为9.3%、13.2%、34.7%和33.2%;而非调水期4种水源贡献比例的不确定程度分别为28.4%、29.3%、10.1%和17.8%。总体而言,非调水期的各水源贡献比例不确定性较高,其中大气降水贡献的不确定性最高,主要是由气候变化导致的降水时空分布不均造成的。

在此基础上,进一步得到南四湖流域湖区不同水源贡献比例后验概率密度分布和配对图,如图9所示。在图9中,右图对角线4幅为各水源贡献比例直方图,对角线以下3幅图表示不同水源比例之间的相关性($P < 0.05$)。由此可知,南四湖4种水源贡献比例均呈负相关,其中地下水 and 外调水之间的负相关性较高,表明各水源之间存在较为明显的竞争关系。

本研究可一定程度上为南四湖流域水源结构解析提供新的思路和工具,但氢氧同位素在计算多源混合

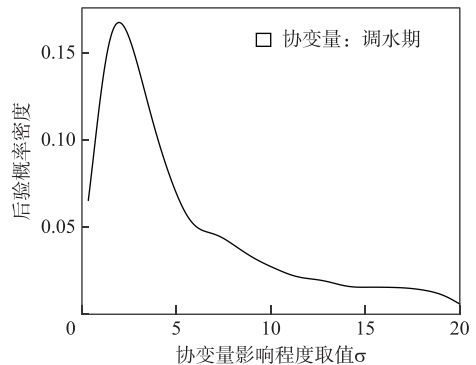


图8 调水对南四湖水源贡献比例影响值后验概率密度分布

Fig.8 Posterior probability density distribution of the impact of water diversion on water sources contribution proportions in Lake Nansi

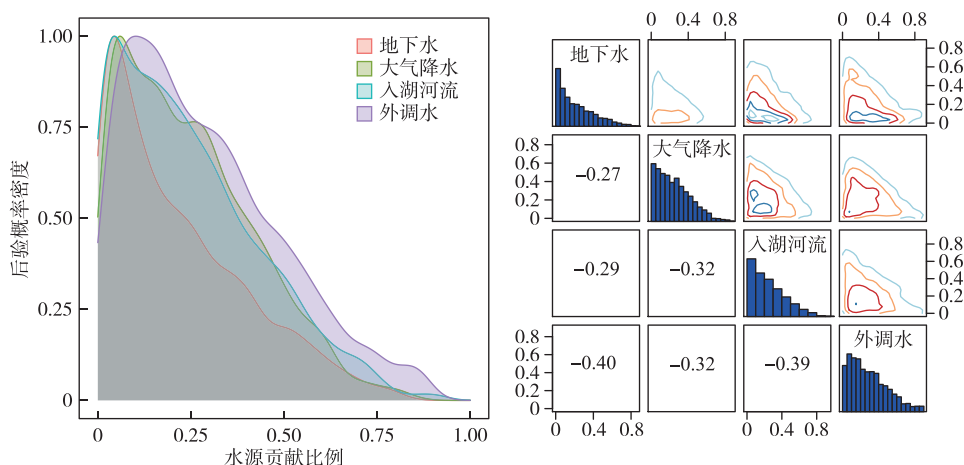
图9 各水源贡献比例后验概率密度及其配对图($P < 0.05$)

Fig.9 Posterior probability density and pairwise plot of various water sources' contribution

过程中仍然具有限制性,在研究湖泊等水源复杂的内陆水域时,通过局部研究、利用水化学特征、添加其他示踪剂等手段,可以弥补此方面的不足。后期可进一步结合调水后南四湖水生态系统的演变,解析调水对水生态系统的胁迫及其适应机制,为调水影响下南四湖流域的水资源安全调控提供理论依据。

4 结论

本文基于稳定同位素的贝叶斯混合模型,分析了调水影响下南四湖流域各种水源的贡献率,得出以下主要结论:

1) 南四湖流域大气降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 存在较好的线性关系,拟合出区域大气降水线(LMWL)为 $\delta D = 7.4\delta^{18}O + 13.4$;南四湖流域降雨受到一定程度局地蒸发的影响,夏季受海洋蒸发水汽的影响。

2) 不同水源对湖区水体的贡献比例受南水北调东线工程运行影响较大。调水期,南四湖地下水、大气降水、入湖河流和外调水在对湖区水体的贡献比例分别为 5.4%、8.7%、31.2% 和 54.7%,外调水贡献比例最高,其次是入湖河流,地下水贡献相对较少;非调水期,南四湖地下水、大气降水、入湖河流和外调水在对湖区水体的贡献比例分别为 22.9%、53.0%、6.7% 和 17.4%,大气降水贡献比例最高,其次是地下水,而入湖河流贡献相对较少。

3) 南水北调东线调水实施后,调水期的外调水量对湖区的贡献占绝对优势,表明调水对南四湖水量变化发挥了重要作用,调水活动逐渐取代自然因素成为湖区水量变化的主要驱动因子,这将对南四湖流域水资源分布格局和调配需求产生深远影响。

5 参考文献

- [1] Yang Y, Yin L, Zhang QZ. Quantity versus quality in China's south-to-north water diversion project: A system dynamics analysis. *Water*, 2015, 7(5): 2142-2160. DOI: 10.3390/w7052142.
- [2] Yang ZH, Wen GY. Problems and thoughts on water resources management of Nansi Lake after the implementation of South-to-North Water Transfer Project. *Zhihuai*, 2015, (12): 32-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9243.2015.12.014. [杨朝晖, 温国玉. 南水北调实施后南四湖水资源管理问题与思考. 治淮, 2015, (12): 32-33.]
- [3] Ye ZY. Preliminary study on the application of hydrogen and oxygen stable isotopes in the calculation of water mass mixing. *Technology Innovation and Application*, 2017, (8): 47-48. [叶振亚. 氢氧稳定同位素在水团混合计算中的应用初探. 科技创新与应用, 2017, (8): 47-48.]
- [4] Guo YW, Tian FQ, Hu HC *et al.* Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaohogou Basin. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 682-690. DOI: 10.13227/j.hjks.201905184. [郭亚文, 田富强, 胡宏昌等.

- 南小河流流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义. 环境科学, 2020, **41**(2): 682-690.]
- [5] Liu X, Xiang W, Si BC. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River Basin and indicative significance. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1739-1749. DOI: 10.13227/j.hjxx.202008315. [刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义. 环境科学, 2021, **42**(4): 1739-1749.]
- [6] Wei Q, Zhao CZ, Mao JS *et al.* Study on the characteristics of different runoff components and recharge relationship in Qinling water source basin. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(S1): 142-146. [魏全, 赵超志, 毛金沙等. 秦岭水源地流域不同径流组分特征与补给关系研究. 环境工程, 2023, **41**(S1): 142-146.]
- [7] Ma HT, Zhen ZL, Wu XG. Stable isotope characteristics of the headstream region of Fenhe River and water resource analysis. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(11): 3432-3442. [马浩天, 甄志磊, 武小钢. 汾河源头水源稳定同位素特征及水源解析. 环境化学, 2021, **40**(11): 3432-3442.]
- [8] Yang LN, Jia DB, Gao RZ *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics and influencing factors of “three waters” in Shandian River Basin. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3855-3863. DOI: 10.13227/j.hjxx.202207230. [杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠等. 闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析. 环境科学, 2023, **44**(7): 3855-3863.]
- [9] 杨孩, 许彬, 李慧星等. 基于氢氧稳定同位素区分南水北调中线工程渠道水体与外部水体的研究. 中国水利学会 2019 学术年会论文集第三分册. 宜昌, 2019: 293-297.
- [10] Mei L, Kuang XX, Liang SH *et al.* Stable isotope characteristics of different water bodies in the Hulugou catchment of the upper Heihe River. *Yellow River*, 2019, **41**(11): 30-35, 64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.11.007. [梅亮, 匡星星, 梁四海等. 黑河上游葫芦沟流域不同水体稳定同位素特征. 人民黄河, 2019, **41**(11): 30-35, 64.]
- [11] 陈希. 基于环境示踪剂的那曲高寒区雨季径流水源及路径解析[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [12] 刘澄静. 基于氢氧稳定同位素的哈尼梯田景观多尺度水循环过程研究[学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [13] Ma TW, Xu GC, Zhao CZ *et al.* Water source analysis of runoff in Qinling forest small watershed, China based on H-O stable isotope tracing. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, **44**(3): 545-557. DOI: 10.19814/j.jese.2022.02023. [马天文, 徐国策, 赵超志等. 基于氢氧稳定同位素示踪的秦岭森林小流域径流水源解析. 地球科学与环境学报, 2022, **44**(3): 545-557.]
- [14] Liu F, Cao GC, Cao SK *et al.* Research on stable isotope characteristics and recharge relationship of the main river on the southern slope of Qilian Mountains. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(6): 151-161. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00085. [刘芳, 曹广超, 曹生奎等. 祁连山南坡主要流域河水稳定同位素特征及补给关系. 中国沙漠, 2020, **40**(6): 151-161.]
- [15] Parnell AC, Inger R, Bearhop S *et al.* Source partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation. *PLoS One*, 2010, **5**(3): e9672. DOI: 10.1371/journal.pone.0009672.
- [16] Phillips DL, Inger R, Bearhop S *et al.* Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies. *Canadian Journal of Zoology*, 2014, **92**(10): 823-835. DOI: 10.1139/cjz-2014-0127.
- [17] Rothfuss Y, Javaux M. Reviews and syntheses: Isotopic approaches to quantify root water uptake: A review and comparison of methods. *Biogeosciences*, 2017, **14**(8): 2199-2224. DOI: 10.5194/bg-14-2199-2017.
- [18] Sun SF, Huang JH, Lin GH *et al.* Application of stable isotope technique in the study of plant water use. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(9): 2362-2371. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2005.09.032. [孙双峰, 黄建辉, 林光辉等. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用. 生态学报, 2005, **25**(9): 2362-2371.]
- [19] Yu JJ, Li YF. 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.]
- [20] Stock BC, Jackson AL, Ward EJ *et al.* Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *PeerJ*, 2018, **6**: e5096. DOI: 10.7717/peerj.5096.
- [21] Tan L, Wang ZZ, Bai Y *et al.* Variation characteristics of algae density and water environment factors in Lake Nansi before and after division of the water transfer. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1802-1813. DOI: 10.18307/2022.060. [谭浪, 王宗志, 白莹等. 调水前后南四湖藻密度及水环境要素变化特征. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1802-1813.]
- [22] 孙盈. 基于多源遥感数据的南四湖水量变化及驱动因子研究[学位论文]. 济南: 济南大学, 2022.
- [23] Zhang JZ, Yuan SY. The characteristic and rational utilization of Nansihu water resources. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1986, (1): 26-38. [张经之, 袁淑英. 关于南四湖水资源特点及合理利用问题. 海洋湖沼通报, 1986, (1): 26-38.]
- [24] Sun XY, Guo HW, Lian LS *et al.* The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(4): 669-679. DOI: 10.11849/zrzyxb.20160460. [孙小银, 郭洪伟, 廉丽妹等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析. 自然资源学报, 2017, **32**(4): 669-679.]
- [25] Gao ZJ, Yu C, Tian Y *et al.* Slope zoning of atmospheric precipitation line and its water vapor source in China's mainland. *Ground Water*, 2017, **39**(6): 149-152, 177. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2017.06.054. [高宗军, 于晨, 田禹等. 中国大陆大气降水线斜率分区及其水汽来源研究. 地下水, 2017, **39**(6): 149-152, 177.]

- [26] Hu YB, Xiao W, Qian YF *et al.* Effects of water vapor source and local evaporation on the stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 573-581. DOI: 10.13227/j.hjks.201805227. [胡勇博, 肖薇, 钱雨妃等. 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响. 环境科学, 2019, **40**(2): 573-581.]
- [27] Chen X, Li Z, Cheng LP *et al.* Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 98-106. [陈曦, 李志, 程立平等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源. 生态学报, 2016, **36**(1): 98-106.]
- [28] Tian LD, Yao TD, Sun WZ *et al.* The relationship between δD and $\delta^{18}O$ and the water vapor cycle in the northern and southern precipitation of Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Sinica: Terrae*, 2001, **31**(3): 214-220. [田立德, 姚檀栋, 孙维贞等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系及水汽循环. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2001, **31**(3): 214-220.]
- [29] Zhang YH, Wu YQ. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China. *Arid Land Geography*, 2008, **31**(3): 403-408. [张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析. 干旱区地理, 2008, **31**(3): 403-408.]
- [30] Hu HY, Bao WM, Wang T *et al.* Application of isotopic technology in hydrology of lakes. *Water Resources and Power*, 2008, **26**(1): 13, 40-42. [胡海英, 包为民, 王涛等. 同位素技术在湖泊水文学中的应用研究. 水电能源科学, 2008, **26**(1): 13, 40-42.]
- [31] 刘晓旭. 达里诺尔湖氢氧同位素与水质水量关系研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [32] Gulibositan TXJ, Pang ZH, Shang YJ. The source of lake water supply from the comparison of isotopic and hydrochemical in desert area: Taking Mukainao Lake in Ordos Basin as an example. *Xinjiang Geology*, 2020, **38**(4): 546-551. [古丽波斯坦·吐逊江, 庞忠和, 尚彦军. 从同位素和水化学成分对比看沙漠地区湖泊水补给来源——以鄂尔多斯盆地木凯淖湖为例. 新疆地质, 2020, **38**(4): 546-551.]
- [33] Xie CY, Xiao W, Xu JZ *et al.* Comparison of using hydrogen and oxygen isotopes in tracing water evaporation in Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, **50**(1): 74-85. [谢成玉, 肖薇, 徐敬争等. 氢和氧稳定同位素示踪湖泊蒸发的对比研究. 海洋与湖沼, 2019, **50**(1): 74-85.]
- [34] Guo X, Li WB, Sun B. Indication of hydrogen and oxygen stable isotopes in Dali Lake for evaporation and replenishment sources. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(4): 930-938. DOI: 10.13866/j.azr.2021.04.04. [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. 干旱区研究, 2021, **38**(4): 930-938.]
- [35] Tao JH, Bian JY, Ao TQ *et al.* Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of east route of the South-to-North Water Transfer Project. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(1): 133-141. [陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征. 水资源保护, 2023, **39**(1): 133-141.]
- [36] Zhou S, Li YB. Water extraction and change analysis of Nansihu based on landsat. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, (9): 38-43, 47. [周石, 李英冰. 2006—2020 年南四湖水体面积变化分析. 中国农村水利水电, 2021, (9): 38-43, 47.]