

鄱阳湖典型湿地地下水—河湖水转化关系

许秀丽¹, 李云良^{2*}, 谭志强², 郭强¹ (1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 选取鄱阳湖典型洪泛湿地为研究对象, 分析了2018年4~10月降水、湖水、河水和湿地地下水的氢氧同位素变化特征, 利用 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系确定了不同水文时期湿地各类水体的转化关系, 并结合同位素端元混合模型估算了不同水源对湿地地下水的贡献分量。结果表明, 研究区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值在6~7月份偏小, 其余月份较高, 存在明显季节变化和雨量效应。河水、湖水同位素与降水同位素的季节变化规律基本一致, 但受蒸发分馏影响, 重同位素更为富集, 且变化幅度远小于降水同位素。湿地地下水同位素的季节变化较小, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值(-5.26‰, -31.1‰)高于大气降水(-6.32‰, -40.1‰)、低于湖水(-3.60‰, -26.4‰), 与河水同位素(-5.09‰, -34.4‰)较为接近, 表明湿地地下水受降水、湖水和河水的共同影响。涨水期(4~5月)河水的补给源为降雨和流域内地下径流, 湖水主要受河水和降水共同补给, 湿地地下水主要受前期降水和河水补给的滞后影响, 河水的贡献比重更大。丰水期(6~8月)地下水主要接受湖水和河水共同补给, 湖水的补给贡献比例超过50%, 退水期(9~10月)湿地地下水向河道和湖泊等地表水体排泄。

关键词: 稳定同位素; 地下水; 河水; 湖水; 转化关系; 鄱阳湖湿地

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)04-1824-10

DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0194

Groundwater, river water and lake water transformations in a typical wetland of Poyang Lake. XU Xiu-li¹, LI Yun-liang^{2*}, TAN Zhi-qiang², GUO Qiang¹ (1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2021, 41(4): 1824~1833

Abstract: The characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall, lake water, river water, and wetland groundwater were investigated in a typical delta wetland of Poyang Lake during the period from April to October in 2018. Based on the $\delta^{18}\text{O}$ - δD relationships, the transformations between these different water sources in different hydrological periods were quantified. The contribution rates of different water bodies to wetland groundwater were further calculated using a mixed source model. The results showed that, in general, the rainfall $\delta^{18}\text{O}$ and δD values were lower in June and July and were higher in other months of the year. The rainfall isotopes exhibit obviously seasonal variations and the associated amount effect. The variation trends of isotopes in river water and lake water were consistent with those of the rainfall. In addition, the river water and lake water were isotopic enriched due to intense evaporation, while the variation amplitudes were less than the rainfall isotopes. The results also revealed that the groundwater isotopes in wetland were relatively stable with small seasonal variations. On average, the groundwater $\delta^{18}\text{O}$ and δD values (-5.26‰, -31.1‰) were higher than those of the rainfall (-6.32‰, -40.1‰), and were lower than those of the lake water (-3.60‰, -26.4‰), but were close to the river water (-5.09‰, -34.4‰). This result indicated that the wetland groundwater was jointly influenced by rainfall, river water and lake water. During the water level rising period (April-May), the river water was mainly recharged by the rainfall and the catchment groundwater. During this period, the lake water was mainly supplied by the rainfall and the river water, while the wetland groundwater was mainly replenished by the antecedent precipitation and the river water. However, the contribution of river water to the wetland groundwater was the greatest among these water sources. During the high water level period (June-August), the wetland groundwater was mainly recharged by lake water and the river water, and the contribution rate of lake water was higher than 50%. During the falling water period, results showed that the wetland groundwater discharged to the surrounding river channel and the lake.

Key words: stable isotope; groundwater; river water; lake water; transformation relationship; Poyang Lake wetland

湿地生态系统以水循环过程为主要载体进行物质、能量和信息交换^[1]。湿地水体的来源和组成复杂, 大气降水、河湖等地表水以及地下水的输入和输出, 直接影响湿地土壤理化环境和生物地球化学循环^[2-3], 进而干扰湿地系统的植物组成、空间格局和生态系统演变过程^[4-5]。研究水源补给与水体转化关

系, 是探索变化环境下湿地生态系统演变过程的基础^[1,4], 同时也是区域水资源评价、湿地生物地球化

收稿日期: 2020-08-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409002); 国家自然科学基金资助项目(41601031, 42071036, 41771037); 中科院青年创新促进会项目(Y9CJH01001); 山西省应用基础研究项目(201801D221052)

* 责任作者, 副研究员, yunliangli@niglas.ac.cn

学循环和生态系统保护等研究领域的重点^[6-7].

D 和 ^{18}O 是自然界水中氢和氧的两种稳定同位素,在水循环过程中,不同水体 D 和 ^{18}O 的含量变化受蒸发分馏、凝结和混合作用的影响^[8],故可以通过研究水体中氢、氧同位素组成的差异示踪流域水循环过程^[9-10].氢氧同位素方法在国内东北地区、黄土高原和华北地区水循环研究中得到了非常广泛的应用,主要用于揭示不同地貌区地下水/河水的补给来源^[11-12]、地表水与地下水之间的交互作用关系^[13-14]、水循环各环节中的水分运动机制^[15-16].长期或季节性淹水湿地与地下水、地表水的转化关系密切,目前国内外已经开展的研究多集中于滨海湿地、河流湿地和内陆湖泊湿地^[17].研究发现,洪泛湿地在雨季主要由降水补给,其它季节受地下水和地表水共同补给^[18].对于内陆湖泊湿地,大气降水对湿地地下水补给较弱,而湖水补给比例则超过了一半^[19].这种补给的变化规律与差异性说明湿地水体转化关系同时受区域水文情势、地质/水文地质条件和气候条件等的共同控制.由此可知,同位素示踪技术已然成为研究地下水(地表水)-土壤-植被-大气连续体等复杂系统水体转化过程的重要手段.

鄱阳湖是长江中下游典型的通江湖泊,湖水与流域五河和长江之间复杂的水量交换导致鄱阳湖水位呈现年内高度动态的变化(~12m),由此在湖区漫滩形成了季节性干湿交替极为显著的洪泛湿地生态景观^[20].21 世纪以来,长江中下游江湖关系格局发生了显著的改变,鄱阳湖旱涝急转、退水速率加快等问题凸显^[21-22],这无疑会改变洪泛湿地生态系统的水源补给和稳定性.在当前变化的水情背景下,已有学者利用水文、水化学、同位素等方法探求鄱阳湖湿地地下水与河、湖等地表水的转化关系.研究发现,区域尺度上,洪泛区地下水与河水、湖水之间转化关系密切,但存在一定的滞后性^[23];坡面尺度上,汛期湿地地下水主要受降水和河湖水共同补给^[24-25],枯水期湖水很有可能接受周边湿地地下水的排泄补给^[26-27].

事实上,降水的季节分配、河水的洪枯变化以及水文地质条件的差异,导致湿地水体的转换关系具有较强的区域特性和时间差异^[5].目前关于鄱阳湖湿地水分来源研究虽然取得了一些有价值的结论和发现,但受原位采样条件和复杂湿地水情影响,

研究大多侧重于单一时段的探索分析,缺乏对鄱阳湖不同水文时期(涨水、丰水、退水期)湿地补给水源的完整理解和差异性评估.此外,已有研究对鄱阳湖湿地各类水体转化关系仍以定性认识为主,尤其是尚无法科学评估不同补给来源对湿地地下水的贡献比重,这也成为目前湿地水量平衡研究的难点.数值模拟和传统的水文监测手段尚无法精确刻画这种复杂的湿地水体转换过程^[26-27],给水量模拟带来一定的不确定性.氢氧稳定同位素技术在国内外水循环研究中应用成熟,虽然湿润区不同水源间氢氧同位素的组成和差异相对较小,但这种差异性仍为湿地系统水体转化过程提供了一种非常有效且可靠的方法^[17],而且借助端元混合模型还可以量化不同水源对湿地地下水的补给贡献,弥补以往对湿地水体转化过程的“黑箱”描述,可为深入理解鄱阳湖湿地水体相互转化机制提供一定的参考价值.

本文研究区选定于吴城鄱阳湖国家自然保护区典型洲滩湿地^[28],该湿地系统河流-湿地-湖泊相互作用频繁、季节性干湿交替显著,是一个极具特色的高洪泛湿地系统^[27],能够保证鄱阳湖湿地水体转化关系的研究结果相对更有代表性.本文主要利用氢氧稳定同位素技术,分析鄱阳湖典型湿地降雨、河水、湖水、地下水氢氧稳定同位素的季节变化特征,研究不同水文时期湿地地下水-河湖水之间的转化关系,量化不同水源对湿地地下水的补给贡献.研究结果可为后续湿地生物地球化学循环的研究和变化水文情势下湿地生态系统演变的预测奠定基础.

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

鄱阳湖位于江西省北部,流域内河流纵横,湖水主要受五河来水补给,经湖盆调蓄后由湖口注入长江(图 1).水位呈现高度动态的季节性周期变化,在高低水位之间的消落带发育有大面积的湿地^[20].鄱阳湖流域属于亚热带季风气候区,夏季降水主要受夏季风控制,冬季降水受西伯利亚内陆冷空气控制,多年平均降水量为 1450mm,主要集中在 3~6 月,占全年降水的 54%^[20].多年年均气温 16.3℃,7、8 月份气温最高,平均 33℃,12~2 月气温最低,多年平均水面蒸发量 1024~1218mm^[29].

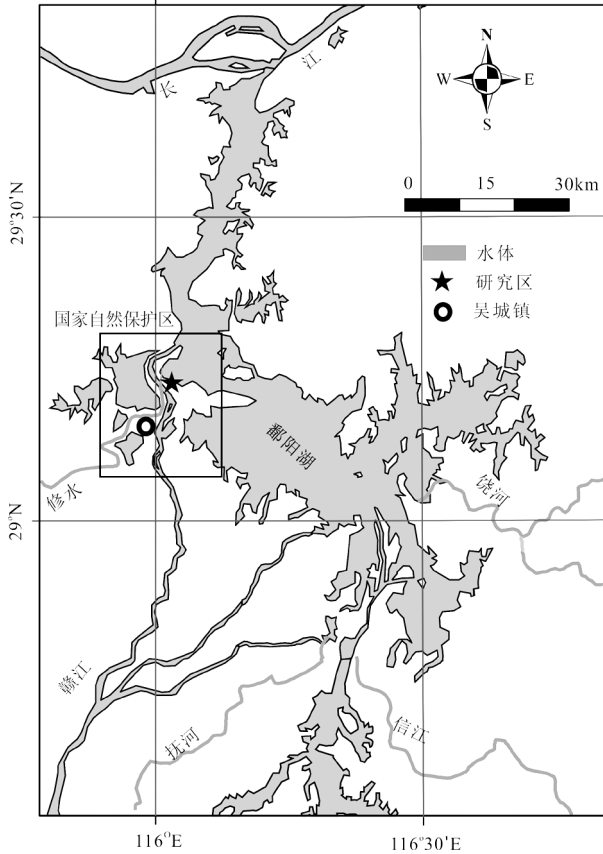


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

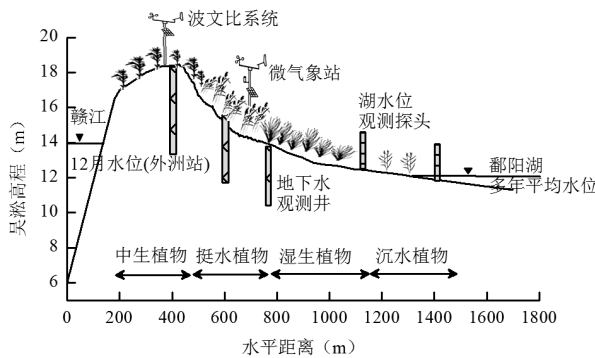


图2 研究区湿地断面示意

Fig.2 Sketch map of the studied wetland transect

鄱阳湖国家自然保护区以江西省吴城镇为中心,管辖范围 224km²,属于包括湖泊、河流、碟形子湖、草本洲滩的内陆型湿地(图 1),是生态水文过程研究的天然实验室.本文研究区为鄱阳湖国家自然保护区内典型的赣江入湖冲积三角洲洲滩湿地(116°00'11"E,29°14'34"N,图 1),整个湿地断面长约 1.8km,高位滩地西侧紧邻赣江,呈陡峭的台地,向东地势逐渐向湖区倾斜(图 2).区内植被沿高程依次分布有中生性草甸、挺水植被带、湿生植被带、沉水

植物等,湿地断面布设有波文比、气象观测系统、地下水水位监测井、湖水水位监测传感器^[28],可为本研究提供日地下水水位和降水数据.

1.2 样品采集与分析方法

为了研究鄱阳湖典型湿地降水、湖水、河水和地下水的转换关系,本文于 2018 年 4 月(雨季)~10 月(湖泊退水期)开展样品采集.地下水样品通过典型湿地各植被群落内布设的 3 口地下水水位观测井采集,利用抽水泵抽取无杂质和泥沙沉积的水样.湖水样品在与研究区湿地下缘地带直接相连的鄱阳湖主湖区的开阔水域处采集,河水样品采集紧邻研究区的赣江水,采样位置为水面 0.5m 以下,采样前先用原水充分润洗采样瓶,每个水样取 3 个重复,充分混合后作为一个混合样.降雨样品依托吴城气象站在每次降雨期间收集,共收集雨水样 32 组.所有水样采集后迅速装入 30mL 聚乙烯瓶中,尽量装满,确保无气泡,并立即用封口膜密封好,放入冷藏装置中运送到实验室,以冷藏方式保存.

样品的室内处理与分析在清华大学研究院稳定同位素分析实验室进行,采用同位素比率质谱仪(MAT253,USA)测定水样中 δ¹⁸O 和 δD 的含量,分析精度分别为 ±0.5‰ 和 ±2‰.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 ⁸O/¹⁶O 的比值, R_{sta} 为 V-SMOW 标准物质中 D/H 或 ⁸O/¹⁶O 的比值.

采用 Excel2007 对文中数据进行统计分析,并利用直观比较法对比不同时期降水、湖水、河水和地下水 δ¹⁸O、δD 同位素值,判断各类水体之间的转化关系及地下水的可能补给来源^[14-15].同时,利用基于同位素质量平衡原理的端元混合模型^[30],对湿地地下水补给来源的贡献比例进行估算,计算过程分别采用 δ¹⁸O、δD 进行计算,然后取其平均值,计算公式如下.

$$\delta_g = f_p \delta_p + f_r \delta_r + f_l \delta_l \quad (2)$$

$$f_p + f_r + f_l = 1 \quad (3)$$

式中: δ_g 为地下水的氢、氧同位素值; δ_p、δ_r、δ_l 分别为降水、河水、湖水氢氧同位素值; f_p、f_r、f_l 分别为降水、河水、湖水对湿地地下水的补给贡献比例.

2 结果与分析

2.1 大气降水同位素变化特征

从鄱阳湖 2018 年 4~10 月降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 组成随时间的变化可以看出,降水氢氧稳定同位素变化范围较大(图 3), δD 介于 -72.59‰ ~ 3.02‰ 之间,均值为 -31.48‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -10.22‰ ~ -1.11‰ 之间,均值为 -5.18‰ 。利用最小二乘法拟合出 4~10 月当地大气降水线方程: $\delta\text{D} = 7.63\delta^{18}\text{O} + 8.21 (R^2 = 0.94, n = 31)$ (图 3)。国际原子能委员会求得的全球大气降水线为 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ [31], 1983 年郑淑惠等 [32] 得出我国大气降水线为 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ 。研究区大气降水线的斜率和截距与我国雨水线接近,略小于全球大气降水线,说明降雨过程水汽受到蒸发分馏的影响而出现同位素富集。

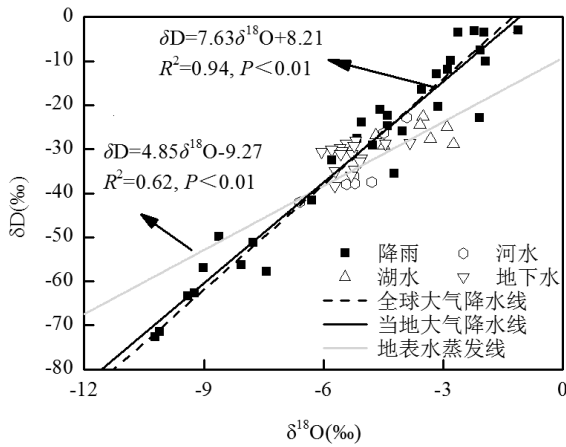


图 3 降雨、地下水、河湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 关系
Fig.3 Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in rainfall, groundwater, river water and lake water

研究区降雨同位素在 6~7 月贫化,其余月份富集,呈现明显季节变化(图 4),这与华南地区南昌、长沙等城市的降水同位素变化规律基本一致 [33-34]。主要原因与我国降水水汽来源路径和蒸发、凝结过程中的同位素分馏有关 [35]。3~6 月为鄱阳湖的雨季,长江以南降雨频繁且雨量较大,随着大气水的多次冷凝,降雨中重同位素越来越贫化,导致雨季后期 6~7 月份的降雨同位素值偏低。然而,9 月开始夏季风逐渐减弱,研究区主要受冬季风影响,来自高纬度内陆气团所携带的水汽源本身 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 偏高,加之气温高、空气干燥蒸发强,因此其余月份的降雨同位素相对富集。进一步对本研究区降雨量(P)和对应测得的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行线性回归分析,发现二者呈较为显著的负相关关系 ($\delta^{18}\text{O} = -0.15P - 2.24, R^2 = 0.55, P < 0.01$) (图 5),表现出明显的雨量效应。

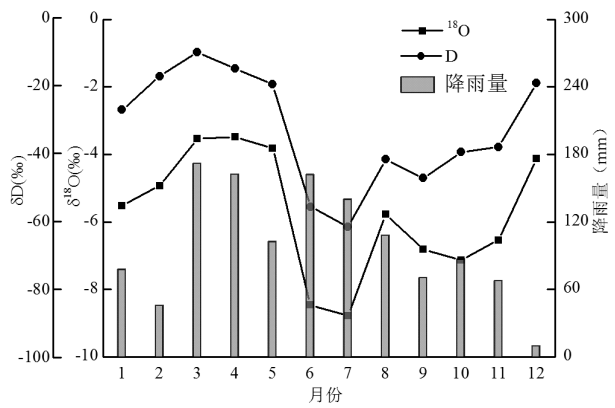


图 4 2018 年降雨量与降水同位素加权平均值月变化
Fig.4 Monthly variations of rainfall amount and the weighted average values of rainfall isotopes during 2018
12~3 月降雨数据来自 GNIP 长沙站 [23]

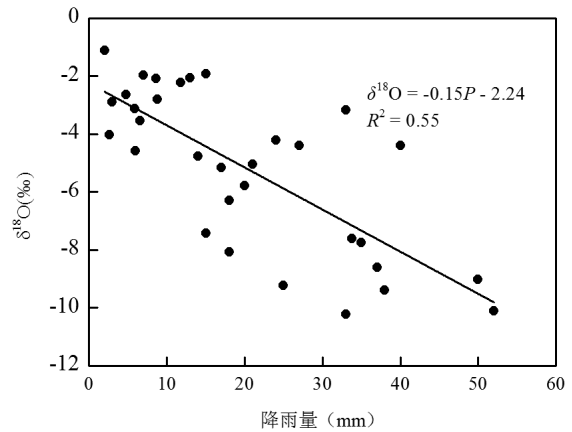


图 5 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降雨量的相关关系
Fig.5 Correlations between rainfall $\delta^{18}\text{O}$ and the rainfall amount

2.2 河水、湖水、地下水稳定同位素特征

由图 3 可知,河水和湖水同位素点据均位于当地大气降水线右下方,对河水和湖水氢氧同位素进行回归拟合,得出研究区地表水蒸发线方程为: $\delta\text{D} = 4.85\delta^{18}\text{O} - 9.27 (R^2 = 0.62, P < 0.01)$ 。蒸发线斜率小于当地大气降水线,表明研究区地表水体受蒸发分馏作用影响强烈,水分蒸发时轻同位素(H 和 ^{16}O)更易蒸发,导致河湖水中的重同位素(D 和 ^{18}O)更为富集。湿地地下水氢氧同位素多分布于当地大气降水线上方,说明受蒸发分馏影响较小,且部分点分布于河、湖水同位素点据之间,表明湿地地下水受降水、河水和湖水三者的共同影响。

比较鄱阳湖降水、河水、湖水和湿地地下水氢氧同位素值的月变化(图 6),可以看出,4 种水体

中降水的氢氧同位素值最小,且季节性变化幅度最大, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化幅度分别为5.29‰和51.3‰.河水、湖水同位素与降水同位素的季节变化规律基本一致,均表现为夏季6、7月份贫化,说明地表水体的初始来源均为大气降水.但是,河水同位素比湖水同位素更为贫化,季节性变化幅度更大,两者差异明显(图6).河水 $\delta^{18}\text{O}$ 介于-6.60‰~-3.92‰之间,均值为-5.09‰(图6a); δD 变化范围在-42.0‰~-22.8‰之间,均值为-34.4‰(图6b).河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值变化幅度仅次于降水,分别为2.69‰和19.2‰.这主要是因为研究区湿地为赣江冲积三角洲湿地,河水是来自赣江子流域的地表径流,受

大气降水补给的影响最大,但可能还受流域周边地下水补给的影响,而地下水对河流的补给主要为相对稳定的基流.湖水氢氧同位素值最大, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围在-4.69‰~-2.74‰之间,均值为-3.6‰, δD 介于-29.2‰~-22.6‰之间,均值为-26.4‰,且 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 季节性变化幅度较小,分别为1.95‰和6.57‰.主要原因是湖水为五河径流、长江水、地下水等多水源的混合体,且湖泊水域面积广阔,流速相对较缓,强烈蒸发分馏导致重同位素过度富集.综上,河水、湖水同位素组成的差异说明河流和湖水的水源构成、流动和更新过程不同,氢氧同位素技术能够很好的区分两种不同的水源.

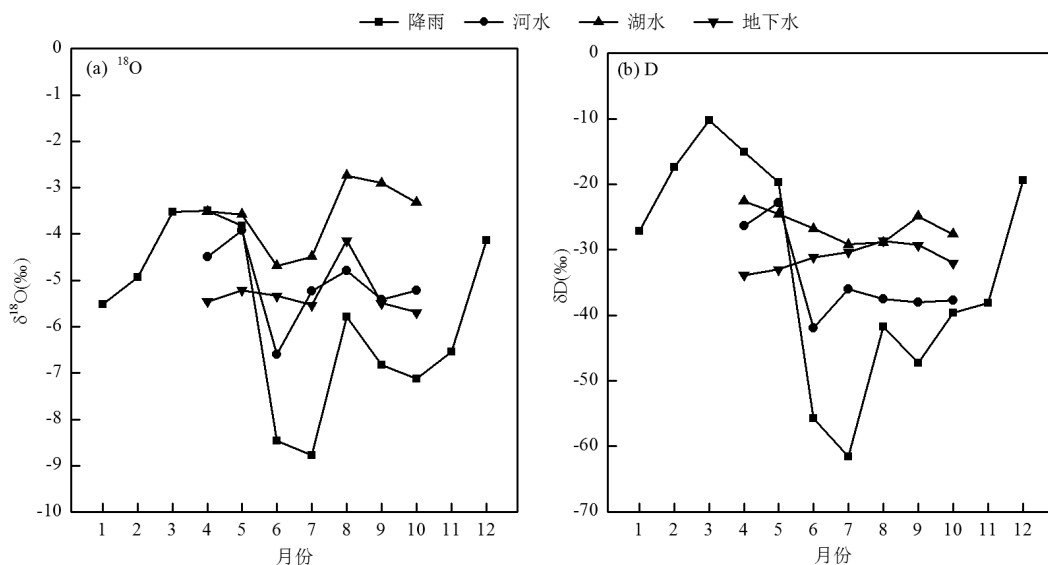


图6 2018年降水、湖水、河水、地下水 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、 δD (b)月变化

Fig.6 Monthly variations of $\delta^{18}\text{O}$ (a) and δD (b) in rainfall, lake water, river water and groundwater during 2018

湿地地下水氢氧同位素组成并无明显的季节性差异, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值仅在8月份较大,其余月份则较为稳定(图6). $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为-5.26‰和-31.1‰,季节性变化幅度最小,分别为1.5‰和5‰.这可能是因为降水在由大气降落到土壤表层,再通过入渗补给到地下水的过程中,大大削弱了降水的季节性变化.而且湿地地下水埋深较大(年平均埋深2.9~4.8m)^[28],受蒸发作用的影响较小,仅在汛期地下水浅埋时存在蒸发分馏,说明湿地地下水同位素整体较为稳定.

总结上述分析可知,研究区降水、河水、地下水和湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素组成差异显著,各类水源的氢、氧同位素变化范围明显不同,且变化幅度

(1.5‰~9.1‰,5‰~69.5‰)均远大于 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的测试精度($\pm 0.5‰$, $\pm 2‰$).这种同位素特征差异能够满足氢氧同位素示踪技术应用的条件,为进一步探求鄱阳湖湿地降水-河湖水-地下水的转化关系提供了基础.此外,从均值变化来看,全年降水同位素均值(-6.32‰,-40.1‰)最小,河水(-5.09‰,-34.4‰)和湿地地下水(-5.26‰,-31.1‰)次之,湖水同位素均值(-3.60‰,-26.4‰)最大.湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值与河水更为接近,说明相比其它水源,湿地地下水与河水之间的水力联系可能更强.

2.3 不同水文时期各类水体的转化关系

鄱阳湖水位具有显著的季节性动态变化,每年4月初受流域入湖河流的补给,湖水位开始逐渐抬升,

至 7、8 月份达到最高水位,9 月之后开始退水,水落滩出、湖水归槽^[20]。湖泊水情的动态变化直接影响湿地各类水体在季节尺度上的相互转换,根据鄱阳湖长期水文节律,本文将 4~5 月、6~8 月、9~10 月分别划分为涨水期、丰水期、退水期^[22],研究不同水文时期鄱阳湖典型湿地各类水体的相互转换关系,及其对湿地地下水的补给贡献比例。

第一阶段,涨水期鄱阳湖湖水、河水、湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值分别为 $(-3.55\%, -23.6\%)$ 、 $(-4.21\%, -24.6\%)$ 、 $(-5.34\%, -33.5\%)$,各水体氢氧稳定同位素值排序为:湖水>河水>地下水。比较河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值发现其与 1~5 月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-4.25%) 接近,而此时前期降水已经充分入渗到地下补给区域地下水。因此可以认为,河水的主要补给源是当期降雨和流域内地下径流,这与文献^[23,36]的研究结果基本一致:鄱阳湖流域的河水由 23%的降水和 77%的浅层地下水构成。湖水 δD 与河水的 δD 值几乎相等(小于分析精度 2‰),表明湖水主要接受河水的补给,4~6 月正值鄱阳湖的雨季,湖水位受流域入湖河流的补给而抬升。此外,湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 值还与 3~5 月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-3.62%) 大致接近,考虑到强降水时期土壤含水率较高,湖区周边降水易转换成地表径流,说明湖水可能还接受降水的补给。洲滩湿地地下水同位

素最为贫化,甚至小于同期所有降水、河湖水的同位素值,陈建生等也发现 4 月份赣江附近井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 明显比河水同位素贫化^[23],这一现象表明前期地下水曾受到同位素更加贫化的水源补给。比较地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,发现其与 11 月~次年 2 月降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值 (-5.28%) 相近,考虑到此阶段湿地地下水埋深较深(4.1~6.6m),说明降雨入渗补给地下水可能存在滞后性,这与前期研究相印证,水文观测显示鄱阳湖湿地地下水位峰值出现时间滞后年内降水峰值约 3~4 个月^[28]。此外,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与 6~8 月河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-5.54%) 和 δD (-38.5%) 接近。以往监测显示湿地地下水位大幅抬升的时期为每年汛期的 6~8 月^[28],而且此阶段河水同位素为全年最低,考虑到地下含水层蓄水能力强,地下水同位素季节变化较小,说明水体更新速度较慢,滞留时间较长。由此综合推断,湿地地下水可能受到前期降水和河水补给的滞后影响,地下水中保留了更多早期贫化的“老水”(图 7a)。基于同位素质量平衡的三元混合模型计算显示,汛期河水、前期降水和湖水对此阶段洲滩湿地地下水的补给贡献率分别约为 75%、13%和 12%(表 1)。这说明降水入渗直接补给地下水的比例有限,湿地地下水中保留了更早期的河水和降水。

表 1 湿地地下水补给水源贡献比计算结果(均值±SD)

Table 1 Contribution rate of different water sources to the wetland groundwater (mean and standard deviation)

水源	涨水期(4~5月)			丰水期(6~8月)			平均贡献(%)
	据 $\delta^{18}\text{O}$ 算(%)	据 δD 算(%)	平均贡献(%)	据 $\delta^{18}\text{O}$ 算(%)	据 δD 算(%)	平均贡献(%)	
降水 f_p	11±7	14±9	13±4	14±8	4±2	9±3	11
河水 f_r	83±5	69±2	75±3	33±19	9±6	21±5	48
湖水 f_l	6±4	17±10	12±4	53±11	87±3	70±4	41

第二阶段,丰水期湖水、河水、湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值分别为 $(-3.97\%, -28.3\%)$ 、 $(-5.54\%, -38.5\%)$ 、 $(-5.00\%, -30.0\%)$,各水体同位素值排序为:湖水>地下水>河水。地下水同位素值介于湖水和河水之间,部分 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 点据与河水、湖水同位素几乎重合(图 6),说明洲滩湿地地下水在丰水期受鄱阳湖上涨的湖水和流域入湖河水的共同补给(图 7b)。虽然从流域-湖泊水文过程来看,湖水大部分来自河水补给,但两者同位素组成的差异说明河水与湖水的水源构成及影响因素不同。

主要因为 7、8 月份是长江中上游的主汛期,长江对鄱阳湖的水量倒灌是湖泊与长江相互作用的重要特征,倒灌作用可影响至鄱阳湖最上游的康山站,北部主湖区河道影响最为显著^[37]。本文研究区湿地位于湖区北部,湖水是流域五河和长江水量相互作用的混合水体^[37-38],主要受五河径流、长江径流及江湖作用强度的影响;而河水主要受赣江流域降水条件的影响。经三元混合模型计算,河水、湖水和降水对湿地地下水的补给贡献率分别为 21%、70%和 9%(表 1)。河水同位素比同期降水

同位素值(-7.68‰)显著偏大,说明河水除了受当季降水补给的影响,可能还受到前期降雨入渗形成的壤中流或河道两侧地下径流的补给,并经历强烈的蒸发分馏。

第三阶段,退水期鄱阳湖入湖河流的流量减少,湖泊水位降低,逐渐进入枯水期.湖水、河水、洲滩湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 排序关系为:湖水(-3.11‰)>河水(-5.31‰)>地下水(-5.59‰), δD 值排序为:湖水(-26.2‰)>地下水(-30.6‰)>河水(-37.9‰).此阶段

湖水同位素较其它时段最为富集,主要是因为退水后湖水归槽,大湖面被高低起伏的湖底地形分割成许多个独立的子湖,湖水流动性变差,加之秋季高温少雨,蒸发分馏作用强烈.此外,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值略高于湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,湖水 δD 与地下水 δD 值较相近,考虑到退水初期湿地地下水位下降速率可达 10cm/d ^[28],因此可以认为退水期湿地地下水迅速向河道和湖泊排泄(图 7c),而河水和湖水接受湿地地下水的补给后,均受到二次蒸发的影响。

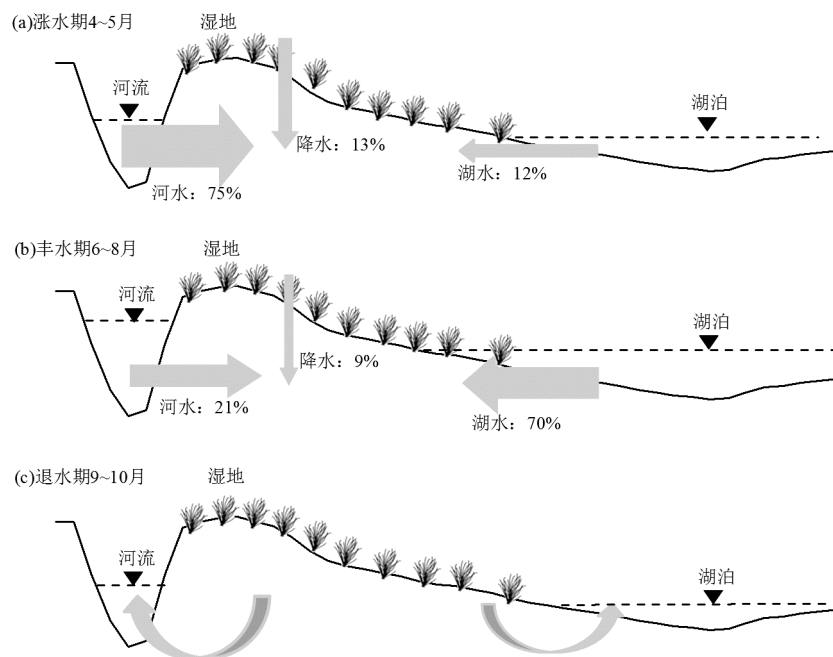


图 7 不同水文时期典型洲滩湿地降水、河湖水与地下水转换关系示意

Fig.7 Schematic diagram of the transformations between rainfall, river water, lake water and the wetland groundwater for different hydrological phases

3 讨论

不同水体同位素组成的差异是研究水体转化关系的基础,本文鄱阳湖大气降水样品采集虽然不足 1a,但仍呈现出明显的季节变化,而湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的季节变化较小,整体高于大气降水、河水同位素,低于湖水同位素.这与七里海湿地、扎龙湿地、呼伦湖湿地地下水同位素特征基本一致^[19,39-40].如张兵等^[39]研究发现,天津七里海湿地地下水同位素组成严重贫化,年内变化很小,河水和湖沼水受蒸发分馏的影响同位素较为富集.王磊等^[19]在扎龙湿地研究发现,地下水同位素介于降水、河水和湖水同位素之间,存在富集现象.地下水氢氧同位

素的组成与多种因素有关,如海拔高程、补给水源组成、气候条件等^[12-14].山地区域地下水氧同位素值具有随高程的增加而减小的特点^[41],这是因为地下水同位素表现出的高程效应是降水同位素高程效应的间接体现,不同海拔处地下水的补给范围和径流路径不同.而本文研究区属于坡面尺度,高差小(13~18m,图 2),故地下水同位素的空间差异很小.此外,地下水埋深、植被类型、覆盖度和土壤特性等均是影响浅层地下水蒸发强度的主要因素,地下水蒸发越强,重同位素更富集^[25,41].本研究地下水氢氧同位素在茵陈蒿(-5.32‰,-29.5‰)、芦苇(-5.14‰,-31.6‰)和灰化藁草(-5.49‰,-34.5‰)群落间并未表现出显著性差异($P=0.598>0.05$).这可能是因为研

究区地下水整体埋深较大,地下水同位素受蒸发分馏效应的影响较弱,且地表均是致密草本植物,植被蒸腾对地下水蒸发强度的影响差异较小.这也说明湿地不同群落地下水的补给来源和经历的水循环过程具有相似性.

研究发现,虽然鄱阳湖地处湿润区,但湿地地下水接受大气降水直接补给较弱(占比<13%),河水和湖水是湿地地下水的主要补给来源.王磊等^[19]研究发现,河水和湖水是补给扎龙湿地地下水的主要来源.梁丽娥等^[40]研究发现内蒙古呼伦湖湿地除了受大气降水和河水补给外,裂隙地下水也是重要的来源.这可能是因为洲滩湿地地下水仅在汛期埋深小于 2m,雨季地下水平均埋深在 4~5m^[28],且土壤主要为冲积湖积粉细砂和淤泥,降水直接穿透包气带有效补给地下水的量较少.湖水和河水等自由水体,可以与湿地地下水之间形成水头差,对湿地地下水的影响更大.事实上,水头差的存在是地表水与地下水相互作用产生的前提,水力梯度决定了源、汇项及径流路径,进而表现为不同的作用模式^[5].根据 Jolly 等^[42]基于水力特征划分的 4 种湿地作用模式,鄱阳湖湿地地表水与地下水相互作用模式呈现明显的时间分异,丰水期河水和湖水补给洲滩湿地地下水,属于饱和流—补给型作用模式,而退水期湿地地下水向河道和湖泊排泄,属于饱和流—排泄型作用模式,这与鄱阳湖周期性的水文情势变化有关.

此外,研究发现鄱阳湖洲滩湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与河水同位素值更接近,河水对湿地地下水的平均补给比重约 48%.这与邓志明等^[25]在鄱阳湖赣江入湖洲滩湿地的研究结果一致,发现 4 月份洲滩湿地地下水与赣江水同位素几乎接近.说明相比湖水而言,涨水期鄱阳湖湿地地下水与赣江河水的水力联系和转换更为紧密.这可能与洲滩湿地沿高程梯度的土壤质地差异有关,胡春华等研究发现鄱阳湖湿地越靠近湖区的低洼处,土壤粒径越细、泥质含量越高^[43],本文前期调研也发现毗邻湖区的泥滩地带多存在黏性土层^[44],这些弱透水层可能会导致湖水与地下水之间的相互作用减弱.然而,高位滩地紧邻入湖河流,土壤以粒径较粗的砂土为主,河水水流速度快,长期对湿地岸滩的冲刷使得淤泥颗粒不易沉积,河水和湿地地下水之间的渗流通道能够保持畅通.

湿地不同水体之间的转换过程非常复杂,本文

探讨了鄱阳湖典型洲滩湿地降水、地表水与地下水之间的转换关系,揭示了不同水文时期湿地地下水补给来源,并量化了各水源的补给贡献比重.必须明确指出的是,湿地水体的相互作用具有一定的时空变异性,本研究仅能反应局部湿地地下水流系统与河湖等地表水体的水力接触与交换过程,此外,本文基于同位素数据和水文观测提出湿地地下水受早期降水和河水滞后补给的假设,但目前尚不能精确区分湿地地下水中的老水与新水及其混合过程,可能量化计算结果会有一些的不确定性,但并不会改变不同水源之间转换关系及其对湿地地下水相对贡献的结论.未来工作将加强多尺度系统研究,开展不同入湖三角洲湿地、碟形湖湿地以及湖区尺度的水文、水化学、同位素多手段联合监测,通过不同时空尺度信息的整合,更精准的定量研究地下水中的新旧水混合问题,全面揭示变化环境下鄱阳湖湿地水体相互作用的响应机制.

4 结论

4.1 鄱阳湖降雨氢氧同位素在夏季 6、7 月份贫化,其余月份较为富集,表现出明显季节变化和降雨量效应.河水和湖水氢氧同位素与降水同位素季节性变化规律一致,湿地地下水同位素季节性差异较小,整体较为稳定.

4.2 研究区大气降水的氢氧同位素值最小,湖水氢氧同位素最为富集,河水和湿地地下水同位素值居中,两者均值接近.表明洲滩湿地地下水受大气降水、河水和湖水共同影响,但地下水接受大气降水直接补给较弱,河水和湖水是湿地地下水的主要补给来源.相比湖水而言,湿地地下水与入湖河流之间的水力联系可能更为密切.

4.3 水文情势的周期性变化导致鄱阳湖典型洲滩湿地各类水体的转化关系存在明显的时间分异.涨水期(4~5 月)湿地地下水可能受前期降水累积作用以及河水补给的滞后影响,河水的贡献比重最大;丰水期(6~8 月)湿地地下水主要受湖水和河水的共同补给,湖水的贡献超过 50%;退水期(9~10 月)湿地地下水向周边河流和湖泊排泄.

参考文献:

[1] 邓伟,潘响亮,栾兆擎.湿地水文学研究进展 [J]. 水科学进展,

- 2003,14(4):521–527.
- Deng W, Pan X L, Luan Z Q. Advances in wetland hydrology [J]. *Advances in Water Science*, 2003,14(4):521–527.
- [2] 刘景双. 湿地生物地球化学研究 [J]. *湿地科学*, 2005,3(4):302–309.
- Liu J S. Wetland Biogeochemistry Research [J]. *Wetland Science*, 2005,3(4):302–309.
- [3] 郝敏, 吕宪国. 沟渠对湿地生物地球化学循环影响初析 [J]. *水土保持通报*, 2006,26(5):43–45.
- Xi M, Lv X G. Effects of drainage ditches on biogeochemical cycling in wetland-taking wetlands in the Sanjiang Plain as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006,26(5):43–45.
- [4] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题 [J]. *湿地科学*, 2008,6(2):105–115.
- Zhang G X, Yin X R, Feng X Q. Review of the issues related to wetland hydrology research [J]. *Wetland Science*, 2008,6(2):105–115.
- [5] 范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水—地下水交互作用的研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2012,27(4):413–423.
- Fan W, Zhang G X, Li R R. Review of groundwater-surface water interactions in wetland [J]. *Advances in Earth Science*, 2012,27(4):413–423.
- [6] Venterink H O, Davidsson T E, Kiehl K, et al. Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil [J]. *Plant and Soil*, 2002,243(1):119–130.
- [7] Ridolfi L, D'Odorico P, Laio F. Effect of vegetation-water table feedbacks on the stability and resilience of plant ecosystems [J]. *Water Resources Research*, 2006,42(1):314–324.
- [8] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964,16(4):436–468.
- [9] 吴华武, 李小雁, 赵国琴, 等. 青海湖流域降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征 [J]. *自然资源学报*, 2014,29(9):1552–1564.
- Wu H W, Li X Y, Zhao G Q, et al. The variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and river water, Qinghai Lake Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014,29(9):1552–1564.
- [10] 王贺, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵沟壑区流域不同水体氢氧同位素特征——以纸坊沟流域为例 [J]. *水土保持学报*, 2016,30(4):85–90.
- Wang H, Li Z B, Ma B, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different waters of the Loess Hilly and Gully Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(4):85–90.
- [11] 范百龄, 张东, 陶正华, 等. 黄河水氢、氧同位素组成特征及其气候变化响应 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1906–1914.
- Fan B L, Zhang D, Tao Z H, et al. Compositions of hydrogen and oxygen isotope values of Yellow River water and the response to climate change [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(5):1906–1914.
- [12] 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 [J]. *环境科学*, 2019,40(7):3030–3038.
- Zhang H H Z, Yu K X, Li Z B, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2019,40(7):3030–3038.
- [13] 杨永刚, 孟志龙, 秦作栋, 等. 采矿对山西水资源破坏过程的同位素示踪研究 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(8):1447–1453.
- Yang Y G, Meng Z L, Qin Z D, et al. Water resource destruction processes of mining in Shanxi province combining isotopic and hydro-chemical tracer [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(8):1447–1453.
- [14] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 小昌马河流域地表水-地下水同位素与水化学特征及转化关系 [J]. *冰川冻土*, 2012,34(3):698–705.
- Hou D J, Qin X, Wu J K, et al. Isotopic chemical characteristics and transforming relationship between surface water and groundwater in the Xiaochangma River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012,34(3):698–705.
- [15] 邓文平, 章洁, 张志坚, 等. 北京土石山区水分在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中的稳定同位素特征 [J]. *应用生态学报*, 2017,28(7):2171–2178.
- Deng W P, Zhang J, Zhang Z J, et al. Stable hydrogen and oxygen isotope compositions in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) in rocky mountain area of Beijing, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(7):2171–2178.
- [16] 王锐, 刘文兆, 宋献方. 黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2014,28(3):134–184.
- Wang R, Liu W Z, Song X F. Study on soil water dynamics on Loess Tableland based on stable hydrogen and oxygen isotopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(3):134–184.
- [17] 魏佳明, 崔丽娟, 李一伟, 等. 稳定同位素在湿地水文研究中的应用现状与前景 [J]. *湿地科学与管理*, 2016,12(1):62–65.
- Wei J M, Cui L J, Li W, et al. Present status and perspectives of application of stable isotopes in wetland hydrology research [J]. *Wetland Science and Management*, 2016,12(1):62–65.
- [18] Nyarko B K, Kofi Essumang D, Eghan M J, et al. Use of isotopes to study floodplain wetland and river flow interaction in the White Volta River basin, Ghana [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2010,46(1):91–106.
- [19] 王磊, 章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水化学联系研究 [J]. *湿地科学*, 2007,5(2):166–173.
- Wang L, Zhang G X. Hydrochemical interaction between surface water and groundwater in Zhalong wetland [J]. *Wetland Science*, 2007,5(2):166–173.
- [20] 刘信中, 叶居新. 江西湿地 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000:184–217.
- Liu X Z, Ye J X. *Jiangxi Wetland* [M]. Beijing: China Forestry Press, 2000:184–217.
- [21] 刘元波, 赵晓松, 吴桂平. 近十年鄱阳湖区极端干旱事件频发现象成因初析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014,23(1):131–138.
- Liu Y B, Zhao X S, Wu G P. A primary investigation of the formation of frequent droughts in the Lake Poyang Basin in recent decade [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014,23(1):131–138.
- [22] Zhang Q, Ye X C, Werner A D, et al. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake, comparison of Yangtze River and local catchment impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,517:425–434.
- [23] 陈建生, 彭靖, 詹泸成, 等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析 [J]. *水资源保护*, 2015,31(4):1–7.
- Chen J S, Pen J, Zhan L C, et al. Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang Lake Basin [J].

- Water Resources Protection, 2015,31(4):1-7.
- [24] 张翔,邓志民,潘国艳,等.鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7580-7588.
Zhang X, Deng Z M, Pan G Y, et al. Variation in stable isotope composition in soil water in Lake Poyang Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(22):7580-7589.
- [25] 邓志民,张翔,张华,等.鄱阳湖湿地土壤-植物-地下水稳定氧同位素组成分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):989-995.
Deng Z M, Zhang X, Zhang H, et al. Analysis of stable oxygen isotopes of soil-plant-groundwater in Poyang Lake wetland [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(6):989-995.
- [26] 李云良,姚静,谭志强,等.鄱阳湖洪泛区碟形湖域与地下水转化关系分析[J].水文,2019,39(5):1-7.
Li Y L, Yao J, Tan Z Q, et al. Interactions between typical sub-lakes and groundwater in floodplains of Lake Poyang [J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(5):1-7.
- [27] Li Y L, Yao J, Zhao G Z, et al. Evidences of hydraulic relationships between groundwater and lake water across the large floodplain wetland of Poyang Lake, China [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2018,18(2):698-712.
- [28] 许秀丽,张奇,李云良,等.鄱阳湖典型洲滩湿地土壤含水量和地下水位年内变化特征[J].湖泊科学,2014,26(2):260-268.
Xu X L, Zhang Q, Li Y L, et al. Inner-annual variation of soil water content and groundwater level in a typical islet wetland of Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2014,26(2):260-268.
- [29] 闵骞,苏宗萍,王叙军.近50年鄱阳湖水蒸发变化特征及原因分析[J].气象与减灾研究,2007,30(3):17-20.
Min Q, Su Z P, Wang X J. Characteristics and causes of Poyang Lake surface evaporation variation in recent 50 years [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2007,30(3):17-20.
- [30] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. Oecologia, 2003,136(2):261-269.
- [31] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465):1702-1703.
- [32] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄.我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J].科学通报,1983,14(13):801-806.
Zhen S H, Hou F G, Ni B L. Study on hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in China [J]. Science Bulletin, 1983,14(13): 801-806.
- [33] 刘萍.江西省酸雨的氢、氧、硫同位素特征及成因探讨[D].南昌:东华理工大学,2012.
Liu P. The acid rain in Jiangxi Province of hydrogen, oxygen, sulfur isotope characteristics and origin [D]. East China Institute of Technology, 2012.
- [34] 吴华武,章新平,孙广禄,等.湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J].长江流域资源与环境,2012,21(5):540-546.
Wu H W, Zhang X P, Sun G L, et al. Variations of stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Changsha, HuNan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012,21(5):540-546.
- [35] 卫克勤,林瑞芬.论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J].地球化学,1994,23(1):33-41.
Wei K Q, Lin R F. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China [J]. Geochimica, 1994, 23(1):33-41.
- [36] Hu C H, Froehlich K, Zhou P, et al. Seasonal variation of oxygen-18 in precipitation and surface water of the Poyang Lake Basin, China [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2013,49(2):188-196.
- [37] 李云良,姚静,张奇.长江倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的数值模拟[J].湖泊科学,2017,29(5):1227-1237.
Li Y L, Yao J, Zhang Q. Numerical study on the hydrodynamic influences of the Yangtze River backflow into Poyang Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(5):1227-1237.
- [38] 詹沪成,陈建生,黄德文,等.长江干流九江段与鄱阳湖不同季节的同位素特征[J].水利学报,2016,47(11):1380-1388.
Zhan L C, Chen J S, Huang D W, et al. Stable isotope characteristics in the Poyang Lake region at Jiujiang section of the Yangtze River in different seasons [J]. Shuli Xuebao, 2016,47(11):1380-1388.
- [39] 张兵,陈清,王中良,等.天津七里海湿地水体的同位素和水化学特征[J].湿地科学,2016,14(6):847-853.
Zhang B, Chen Q, Wang Z L, et al. Isotopics and hydrochemical characteristics of water in Qilihai Wetlands, Tianjin [J]. Wetland Science, 2016,14(6):847-853.
- [40] 梁丽娥,李畅游,史小红,等.内蒙古呼伦贝尔流域地表水与地下水氢氧同位素特征及湖水来源分析[J].湿地科学,2017,15(3):385-390.
Liang L E, Li C Y, Shi X H, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of surface and ground water and the analysis of source of lake water in Hulun Lake Basin, Inner Mongolia [J]. Wetland Science, 2017,15(3):385-390.
- [41] 宋献方,刘相超,夏军,等.基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J].中国科学,2007,37(1):102-110.
Song X F, Liu X C, Xia J, et al. Researches on the surface water and groundwater interaction in Huaisha River Basin based on environmental isotopes [J]. Sciences in China, 2007,37(1):102-110.
- [42] Jolly I D, McEwan K L, Holland K L. A review of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology [J]. Ecohydrology, 2008,1(1):43-58.
- [43] 胡春华,朱海虹.鄱阳湖典型湿地沉积物粒度分布及其动力解释[J].湖泊科学,1995,7(1):21-32.
Hu C H, Zhu H H. Granulometric characteristics and their dynamic interpretation on present deposits of typical wetland in Poyang Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1995,7(1):21-32.
- [44] 李云良,许秀丽,赵贵章,等.鄱阳湖典型洲滩湿地土壤质地与水分特征参数研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(8):1200-1207.
Li Y L, Xu X L, Zhao G Z, et al. Research of soil-water characteristic parameters in a typical wetland of Poyang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(8):1200-1207.

作者简介: 许秀丽(1987-),女,山西忻州人,副教授,博士,主要从湿地生态水文过程研究.发表论文9篇.