

长江河水氢氧同位素组成示踪流域地表水循环

杨守业, 王朔, 连尔刚, 李超, 杨承帆, 刘鹏飞, 邓凯

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于2012—2015年开展的6次长江干、支流系统采样和南通站3个水文年的连续采样,通过氢氧同位素组成(δD 和 $\delta^{18}O$)分析,研究长江干流河水氢氧同位素时空变化特征及其对流域地表水循环的指示。结合多年同位素数据,长江干流多年平均河水线可以表示为: $\delta D=7.56\delta^{18}O+6.75$, $n=333$, $R^2=0.9399$, $p<0.0001$ 。长江干流河水同位素组成的空间变化受不同来源、蒸发作用以及人类活动的共同影响,并表现出大陆效应、纬度效应和海拔效应。下游河水同位素组成的季节性变化主要受控于季风降水,月际变化则主要受三峡大坝调蓄过程与下游两湖贡献比例的影响;尤其在洪峰事件中河水同位素异常偏正,反映中下游湖泊群、稻田水、地下水等显著贡献。流域大规模的大坝建设对河水的拦蓄和混合均一化作用,显著影响了长江流域水循环过程,其对河流和近海生态环境影响值得深入研究。

关键词: 长江流域;水循环;时空变化;河湖关系;大坝影响;氢氧同位素

中图分类号: X142;P592

文献标志码: A

Hydrogen and Oxygen Isotopes in Yangtze River Water and Its Application in Tracing Basin-Scale Water Cycle

YANG Shouye, WANG Shuo, LIAN Ergang, LI Chao,
YANG Chengfan, LIU Pengfei, DENG Kai

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper reports the temporal and spatial variations of the hydrogen (δD) and oxygen ($\delta^{18}O$) isotopes in the mainstream of the Yangtze River and discusses the basin-scale surface water cycle, with the samples from six sampling campaigns along the mainstream and major tributaries of the Yangtze River

from 2012 to 2015 and from three-year sampling at Nantong Station. Combined with multi-year isotope data, it estimates the multi-year average river water line of the mainstream of the Yangtze River as $\delta D=7.56\delta^{18}O+6.75$, $n=333$, $r^2=0.9399$, $p<0.0001$. The spatial variation of the isotopic composition in the mainstream of the Yangtze River is jointly affected by water sources, evaporation, and human activities, and indicates the integrated influence of continental effect, latitude effect and altitude effect. The seasonal variation of the isotopes in the lower mainstream is mainly controlled by monsoon precipitation, while the inter-month variation is mainly affected by the impoundment of the Three Gorges Dam and the contribution of the two lakes downstream the dam. Especially during the peak flood period, the river water isotope is abnormally enriched, reflecting the significant discharge from the lakes, paddy field water, and groundwater in the middle and lower basins. The massive dam construction in the river basin has a significant impact on the river water retention, mixing and homogenization, and has significantly affected the water cycle in the Yangtze River catchment. Its impact on the river and coastal ecological environment is worthy of in-depth study.

Key words: Yangtze River catchment; water cycle; spatiotemporal variation; river-lake relationship; damming effect; hydrogen and oxygen isotopes

河流系统是地球表面水循环、碳循环和营养物质交换的最主要通道,是陆地水生生物多样性的基础,也是海陆间联系的主要纽带^[1]。河流水循环过程的深入研究对理解流域水文过程、河流入海物质

收稿日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(41706049,41730531,41991324);中国博士后科学基金(2018M642071);上海市科委“一路一带”国际联合实验室项目(18230750600)

第一作者: 杨守业(1971—),男,教授,博士生导师,理学博士,主要研究方向为沉积地球化学和海洋地质学。
E-mail: syyang@tongji.edu.cn

通信作者: 连尔刚(1986—),男,博士后,理学博士,主要研究方向为同位素水文学和同位素地球化学。
E-mail: eglia@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

循环、水环境演化以及全球气候变化和人类活动影响下水质污染控制、水资源利用与管理具有重要研究意义。径流组成是影响河流水循环的基本问题,长期以来传统的水文学方法对河流进行基流分割往往依赖于经验和推理模式,对径流组成的认识停滞多年。直到上世纪50年代氢氧同位素的引入才开始“破冰”,对流域地表水循环有了新的认识。氢氧同位素是自然水体的天然示踪剂,受水体相变过程中平衡分馏和动力分馏影响,不同水体具有不同的同位素组成,被广泛应用于水循环研究,包括指示不同水团和水体的起源和形成、示踪水循环运动过程和途径、估计水循环速率、估算蒸散发通量、判定不同水体之间的相互转换关系等^[2-3]。

随着同位素水文学的发展,氢氧同位素示踪技术已经成为研究河流水循环的最主要手段之一。自2002年国际原子能机构提出建立全球河流同位素观测网络(Global Network of Isotope in Rivers, GNIR),全球约20条大河流域开展了系统的氢氧同位素观测。其中,研究程度较高的世界性大河包括多瑙河(Danube)、亚马逊河(Amazon)、密西西比河(Mississippi)、麦肯逊河(Mackenzie)等^[4-6]。然而,长江作为世界第三大河,亚洲第一大河,具有上游高坝大库、中游河湖交互、下游工业区发达的特色,气候变化与人类活动显著影响流域水循环过程,其水体氢氧同位素研究仍非常薄弱。

长江流域河水氢氧同位素的研究迄今已有40余年。已有研究主要报道了长江干流不同站点河水氢氧同位素的季节性波动及其影响因素^[7-12];分析了干流河水氢氧同位素空间变化特征,发现干流河水同位素组成沿程逐渐偏正的特点^[11, 13-15]。长江中下游湖泊密布,不少研究集中讨论了长江中下游湖泊水体氢氧同位素组成以及河水与湖泊的交互关系^[16-17]。另外,不同年份的河水氢氧同位素组成及空间变化特征对比还用于讨论气候变化对水循环的影响^[18]。然而,关于长江流域河水氢氧同位素高分辨率的连续观测数据却鲜见报道,并且关于大坝建设对流域水循环影响的同位素示踪研究也相对较少。

因此,本研究于2012—2015年6次对长江干流、主要支流系统进行采样,同时在中下游南通站点开展3个水文年的连续观测取样。通过氢氧同位素组成分析,阐述了长江干流河水氢氧同位素组成、空间变化规律以及不同时间尺度的变化特征,重点阐明长江中下游洪峰过程河湖交互关系,大坝建设对长江流域水循环过程的影响。该研究可为人类活动和气候

变化影响下的长江水污染治理、地表水时空调配、水资源的可持续开发模式提供科学指导,并促进长江水循环和水环境研究深入交叉,推动长江大保护背景下的流域水资源科学管理。

1 研究区域概况

长江是中国第一大河,发源于“世界屋脊”青藏高原的唐古拉山脉格拉丹冬峰西南侧,其干流流经11省、市、自治区。长江干流全长6 300余公里,流域面积达 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。长江分为3个主要河段:源头至宜昌段为上游,长 $4.5 \times 10^3 \text{ km}$,流域面积 $1.0 \times 10^6 \text{ km}^2$;宜昌至湖口段为中游,长950 km,流域面积 $6.8 \times 10^5 \text{ km}^2$;湖口以下为下游,长938 km,流域面积 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1)。长江中下游地区湖泊密布,湖泊总库容约为 46 km^3 。长江流域的水利工程发达,目前已修建了近50 000余个水库,总库容高达 288 km^3 ,相当于长江年平均流量的28%。长江流域气候分别属于青藏高寒区、西南热带季风区和华中亚热带季风气候区。长江流域降雨时空差异显著,多年平均降雨量约为1 100 mm,主要集中在5—10月,约占全年70%~90%以上。长江流域上游源区以草地为主,中下游以耕地为主。长江流域集中了全国40%的经济总量,提供了我国36.5%的水资源,50%的内河通航里程,是全国重要的经济走廊、水电开发的主要基地、水资源配置的战略水源地、连接东中西部的“黄金水道”。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

本研究分别于2012、2013、2014年4月,2013年6、7月,以及2014年7月系统采集长江流域干流及主要支流河水样品、湖水样品;于2012年11月至2015年11月期间,在长江下游南通站采集了123个干流河水时间序列样品。共计采集河水样品259个,湖水样品18个,采样站位如图1所示。现场采用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径的醋酸纤维滤膜进行过滤,滤液快速转移至50 mL的聚乙烯(HDPE)瓶,装满、密封并 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷藏保存。

所有水样的稳定氢氧同位素组成均在同济大学海洋地质国家重点实验室用LGR公司的液态水同位素分析仪(型号:TWIA-45EP)进行测试分析。采用LGR公司提供的据V-SMOW(维也纳标准平均

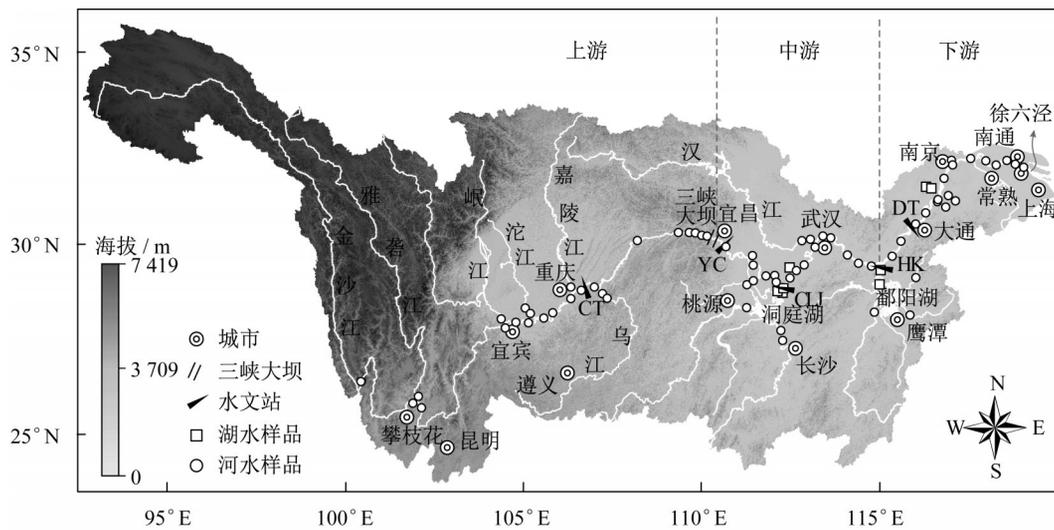


图1 长江流域及样品站位置示意图

Fig.1 Map of the Yangtze River catchment and the locations of sampling

海水)配置的二级工作标样(LGR3B、LGR4B、LGR5B)。按照LGR3B(3个样品)-LGR4B(3个样品)-LGR5B(3个样品)序列进行测试,每个样品进行8次重复分析,剔除前3次避免记忆效应,后5次取平均值,测试精度: $\delta^{18}\text{O} < 0.1\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} < 0.5\text{‰}$ 。所有测试结果 δ 用相对于VSMOW的千分差来表示

$$\delta = \left(\frac{R_s}{R_{V-SMOW}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: R_s 和 R_{V-SMOW} 分别为水样和V-SMOW中的氢氧同位素比值。

2.2 其他数据来源

前人报道的长江干流、主要支流河水以及湖水的氢氧同位素数据来源于文献[7-11, 13-15]。长江干流宜昌(YC)、大通(DT)水文站,支流域陵矶(CLJ)、湖口(HK)水文站的逐日径流资料来源于长江水利网。大气降水氢氧同位素资料主要来源于全球降水同位素观测网数据(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)和中国大气降水观测网(Chinese Network of Isotopes in Precipitation, GHNIP)的数据^[19]。三峡库区水位数据来源于全国水雨情信息网。

3 结果与讨论

3.1 长江干流河水氢氧同位素组成与河水线

依据2012—2014年期间长江流域干流不同季节的100个氢氧同位素数据,结合文献报道的2003—2009年期间233个干流河水氢氧同位素数据,研究结果显示,长江干流河水自上游到下游,氢氧同位素总体呈现

逐步偏正的特征。其中, δD 变化为 $-112.0\text{‰} \sim -28.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 变化为 $-15.4\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$;汛期 δD 变化为 $-110.8\text{‰} \sim -38.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 变化为 $-15.3\text{‰} \sim -6.3\text{‰}$ (图2)。

由此,重新计算了长江干流枯季、汛期以及多年平均河水线方程。其中,多年平均河水线方程为: $\delta\text{D} = 7.56 \pm 0.11\delta^{18}\text{O} + 6.75 \pm 1.04$, $R^2 = 0.9399$, $p < 0.0001$;枯季河水线方程为: $\delta\text{D} = 7.64 \pm 0.13\delta^{18}\text{O} + 7.42 \pm 1.24$, $R^2 = 0.9486$, $p < 0.0001$;汛期河水线方程为: $\delta\text{D} = 7.44 \pm 0.18\delta^{18}\text{O} + 5.75 \pm 1.85$, $R^2 = 0.9257$, $p < 0.0001$ 。如图2所示,长江流域多年平均河水线方程的斜率、截距与长江流域多年平均大气降水线方程 $\delta\text{D} = 7.54\delta^{18}\text{O} + 7.34$ ^[7]基本一致,表明河水主要来源于大气降水。长江流域大气降水线的斜率、截距均比全球大气降水线(GMWL)低,与长江流域降水在未饱和大气中降落时重同位素的蒸发富集作用有关^[20]。前人报道的长江流域干流河水线斜率变化为4.18~9.0,这是由于长江干流河水受大气降水、地下水补给、蒸发、支流汇入等诸多因素影响,不同年份、季节乃至不同采样时期的水文条件差异所致^[7, 11, 13-15]。此外,枯季河水线的斜率变化大(4.18~9.00),而汛期河水线的斜率波动较小(5.36~7.93),表明枯季干流河水受蒸发作用、不同来源水体补给影响显著,而汛期则主要来源于大气降水,斜率与大气降水比较接近。

3.2 长江流域河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的沿程变化

如图3所示,由于 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的沿程变化趋势基本一致,故本研究仅讨论长江流域干、支流水体 $\delta^{18}\text{O}$ 从源头到河口的沿程变化特征。自源头到河口,长

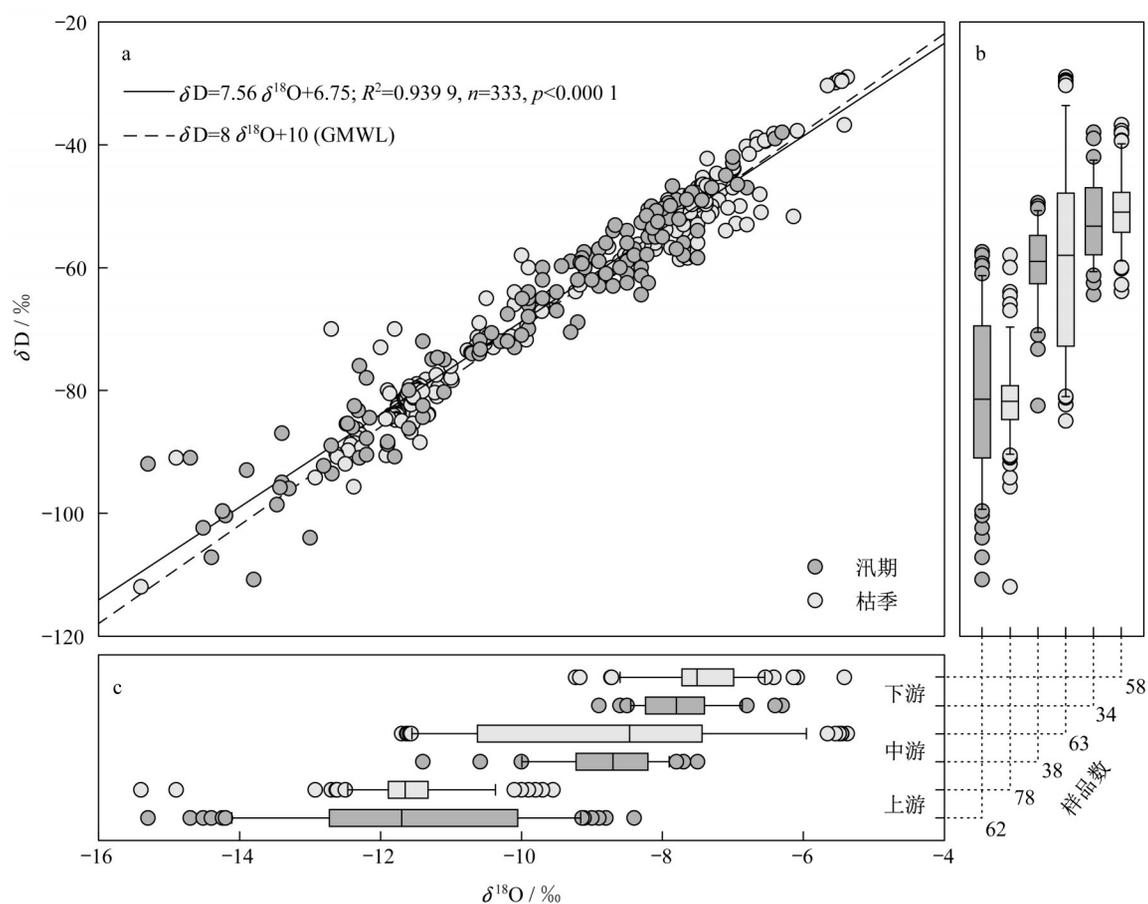


图2 长江流域干流多年平均河水线方程(a)及上中下游洪枯季 δD (b)和 $\delta^{18}O$ (c)同位素组成箱式图

Fig.2 Multi-year average river water line of the mainstream of Yangtze River (a); Box plots of δD (b), and $\delta^{18}O$ (c) in upper, middle and lower mainstream of the Yangtze River

江流域干流、支流河水的 $\delta^{18}O$ 总体上表现为逐步升高的趋势,与大气降水同位素组成由海向内陆逐渐偏负的空间变化趋势一致,河水的 $\delta^{18}O$ 同位素也存在大陆效应^[6,14]。值得注意的是,从攀枝花到长江源区,长江干流河水 $\delta^{18}O$ 同位素变化趋势与大气降水不同,表现出逐渐偏正的规律。源区沱沱河河水 $\delta^{18}O$ 平均值为 -10.2‰ ,较区域大气降水同位素($\delta^{18}O$ 约为 $-14.0\text{‰}\sim-12.0\text{‰}$)略偏正,这是由于长江源区广泛发育高原湖泊和沼泽^[21],在气候干燥、日照强烈的条件下,经过长期蒸发作用湖水同位素偏正,源区干流河水受湖泊补给的影响而略显偏正^[14]。从源头到攀枝花,该河段河水主要受大气降水和冰雪融水的补给,且样品采集正值7月份,受同位素偏负的冰雪融水补给影响,导致河水表现出“反大陆效应”的特点(图3b),在攀枝花达到最低值($\delta^{18}O$ 为 $-12.7\text{‰}\sim-15.4\text{‰}$)。

另外,不同季节之间干流河水氢氧同位素的沿程变化也基本一致。其中,枯季上、中、下游干流河水 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $(-11.7\pm 1.0)\text{‰}$ 、 $(-8.9\pm$

$2.0)\text{‰}$ 和 $(-7.4\pm 0.8)\text{‰}$,汛期上、中、下游干流河水 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $(-11.6\pm 1.8)\text{‰}$ 、 $(-8.9\pm 0.9)\text{‰}$ 和 $(-7.7\pm 0.7)\text{‰}$ 。然而,枯季从宜宾到三峡大坝河段,同位素组成沿程变化较平缓(变化约为 2‰),而在汛期该河段显著性偏正约 4‰ ,反映了三峡大坝拦蓄作用的显著影响。蓄水时三峡库区从重庆到宜昌逐渐混合均一化, $\delta^{18}O$ 沿程变化平缓;而汛期三峡大坝排水,三峡库区重庆到宜昌水体滞留时间短,水体混合弱, $\delta^{18}O$ 沿程变化较显著(图3)。

图3显示,在雅砻江、岷江、沱江、乌江、洞庭湖、鄱阳湖等主要支流汇入之后,长江干流河水 $\delta^{18}O$ 显著升高,尤其是枯季中下游洞庭湖、鄱阳湖受蒸发作用影响, $\delta^{18}O$ 偏正的湖水汇入造成的影响最显著,这表明长江干流河水 $\delta^{18}O$ 的沿程变化显著受支流汇入的影响。此外,长江北侧的支流如雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江与汉江,其河水 $\delta^{18}O$ 明显比长江南侧的支流如乌江、清江、洞庭湖、鄱阳湖的 $\delta^{18}O$ 偏负,反映了大气降水的纬度效应。沱江、嘉陵江与岷江纬度相当,而岷江较沱江、嘉陵江河水 $\delta^{18}O$ 显著性偏负,主

要是由于岷江的海拔较沱江和嘉陵江高,反映了大气降水的海拔效应。

综上,长江流域河水主要来源于大气降水,干流、主要支流河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布特征继承了大气降水的大陆效应、纬度效应以及海拔效应。同时,长江干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的沿程变化规律表明,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布区域上的差异主要受不同来源、蒸发作用、人类活动(大坝调蓄)的共同影响。

3.3 长江干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

根据流域内河水与降水的同位素组成以及季节性变化,可以了解流域内的水文过程。图 4 为南通站长江河水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化特征。在观测期间,南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 5 月份最高,10 月份最低,枯季 11 月至次年 5 月逐渐升高,而汛期 6 月至 10 月逐渐降低。流域加权平均大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化表现为 8 月至次年 4 月逐渐升高,5 月至 7 月逐步降到最低^[12]。在枯季,南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对大气降水偏负,而在 5 月之后,随着长江中下游季风降雨的爆发,降水量增强,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 急剧下降,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 也随之急剧下降。季风降雨期间,河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 基本一致(差异 $< 1.0\text{‰}$)且略显偏正,这表明汛期河水主要受季风降水补给^[7, 8, 14],且受夏季高温条件下蒸发作用的影响导致同位素组成略偏正^[14]。比较大气降水和河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化幅度,南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均变化幅度为 2.6‰ ,而大气降水的平均变化幅度为 6.1‰ ,这表明河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化不仅受到大气降水的影响,还受到诸多其他因素的影响,如与土壤水、地下水、水库以及湖泊水的交换^[5, 6, 22]。

南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化主要受季风降水的控制,还受不同支流贡献的影响。长江中下游的湖泊受蒸发作用影响而明显富集重同位素^[16, 17, 23],湖泊水体的汇入会导致下游河水同位素组成的显著变化^[7, 14]。因此,本文结合湖泊贡献的季节性变化来分析长江下游河水同位素组成与湖泊贡献的关系。湖泊贡献可以简单地通过流量近似计算,即

$$\text{湖泊贡献} = \frac{\text{湖泊流量}}{\text{湖泊流量} + \text{宜昌流量}} \quad (2)$$

式中:湖泊流量为长江中下游洞庭湖与鄱阳湖的流量值和;宜昌流量为上游来水的贡献。

如图 5 所示,南通站河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与湖泊贡献的变化基本一致,随着湖泊贡献的增加,南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏正,表明长江下游河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的月际变化显著受长江上游和湖泊来水比例的控制,上游来水比例的变化反映了三峡大坝的季节性蓄排水过程。

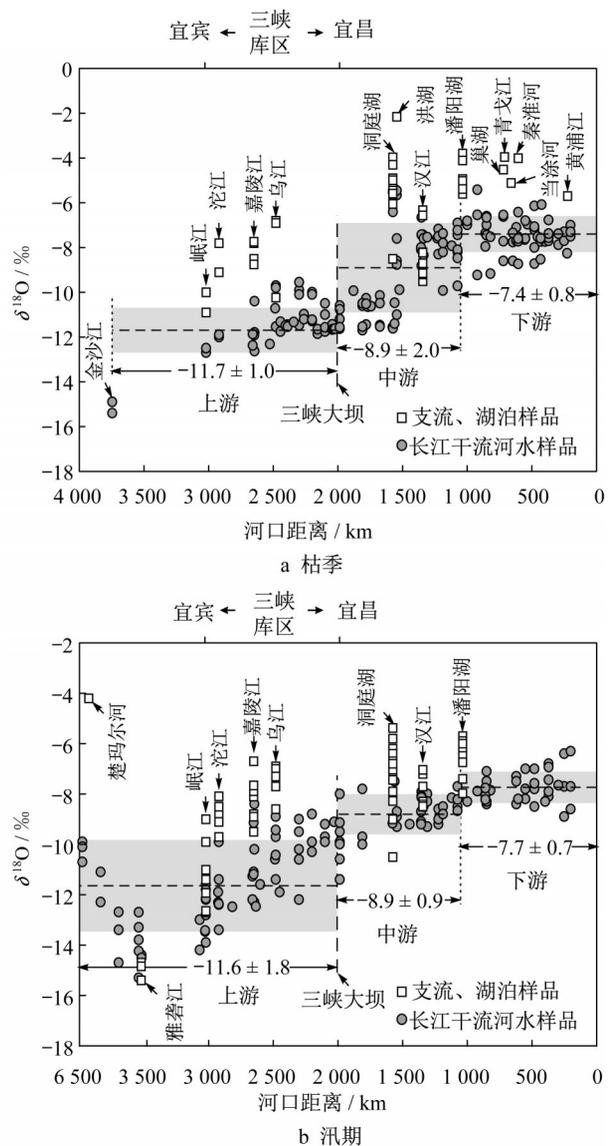


图 3 长江干、支流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 空间变化特征

Fig.3 Spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ in the mainstream and major tributaries of the Yangtze River

此外,南通站河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与湖泊贡献的月际变化存在约 17 d 的相位滞后,非线性拟合的 $R^2=0.70$ 表明其相关关系非常好,且枯季和汛期河水同位素极值与流量比值过程线的极值均吻合较好,与前人报道的研究结果一致^[12]。这表明宜昌至南通干流河水的平均运移时间约为 17 d,可为点源污染物的扩散,下游河口区盐水入侵的响应研究提供参考。

3.4 河水 $\delta^{18}\text{O}$ 指示洪峰过程河湖关系

在全球变暖的背景下,水循环加剧,极端气候事件增多,如洪水、干旱等灾害频发。极端气候事件对人类社会和生态系统均产生重大影响。长江中下游地区人口稠密、经济发达,洪涝灾害是长江流域长期以来备受关注的热点问题。近 10 年来长江中下游

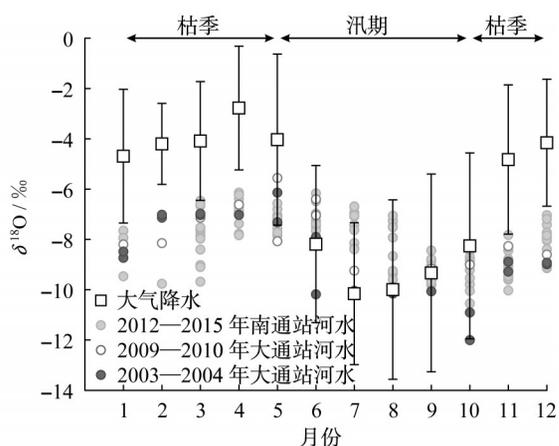


图4 长江下游干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 与流域平均大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化

Fig.4 Seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ in river water in the lower Yangtze River reaches and in precipitation over the Yangtze River catchment

地区频繁发生一系列大洪水事件(如2016和2020年夏季“50年一遇”的大洪水),严重危害人民财产、社会经济以及生态安全。因此,了解天气尺度下河湖交互关系,对理解长江流域强降水洪峰过程的产流机制及其输送的溶解物质来源解析至关重要。

为便于对比南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 与流量关系,将观测期间大通水文站的流量进行标准偏差标准化,即

$$\Delta Q = \frac{Q - \chi}{\sigma_Q} \quad (3)$$

式中: ΔQ 为标准化流量(量纲一); Q 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; χ 为流量平均值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; σ_Q 为流量的标准偏差, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于大通到河口基本没有大型支流或者湖泊的汇入,且徐六泾站年平均流量较大通站仅多 $240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [24],

与计算得到的多年(2003—2019)平均流量 $27318.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 相比,基本可以忽略不计,因此南通站的流量采用大通站的流量进行讨论。如图6所示,定义 $-0.5 < \Delta Q < 0.5$ 代表正常的流量状态, $-1.5 < \Delta Q < -0.5$ 代表低流量状态, $0.5 < \Delta Q < 1.5$ 代表高流量状态,而 $\Delta Q < -1.5$ 或者 $\Delta Q > 1.5$ 代表极端流量(洪峰过程)状态。

如图6所示,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 随着流量的增加先逐渐偏正后逐渐偏负,反映了上游来水与中下游支流来水相对贡献比例的变化。然而,在流量极值(即洪峰事件)过程中,河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏正, $\delta^{18}\text{O}$ 变化为 $-7.0\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$,这与长江中下游季风降雨时期降水同位素的“雨量效应”相矛盾。汛期长江流域中下游的常熟、桃源、鹰潭等诸多GNIP、CHNIP站点的大气降水加权平均值为 $-5.4\text{‰} \sim -10.7\text{‰}$ [19];且长江中下游大气降水5月至7月降雨量效应明显,强降水事件雨水同位素一般偏负 [25],强降水过程径流一般继承了降水“雨量效应”引起的同位素偏负信号 [7],而这些洪峰过程的径流却表现出同位素值偏正,显然洪峰过程的径流不是直接来源于大气降水。

前人研究表明,强降水过程中的水力联通与暴雨水力挤压,会导致流域内经历蒸发作用的湖泊、湿地、水稻田积水、农业灌溉下渗水以及地下水泄出,这些水体 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正及对河水的贡献显著增加往往造成径流洪峰河水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正的现象 [26-27]。长江流域中下游广泛发育中小型湖泊和湿地,广泛种植水稻田,且3月至6月是长江中下游农灌的高峰期 [21, 24],这些水体受蒸发作用影响明显富集重同位素 [17, 23]。因此,洪峰过程对应河水同位素偏正,很可能是强降水导致中下游密布的湖泊群、湿地、水稻田、小型水库

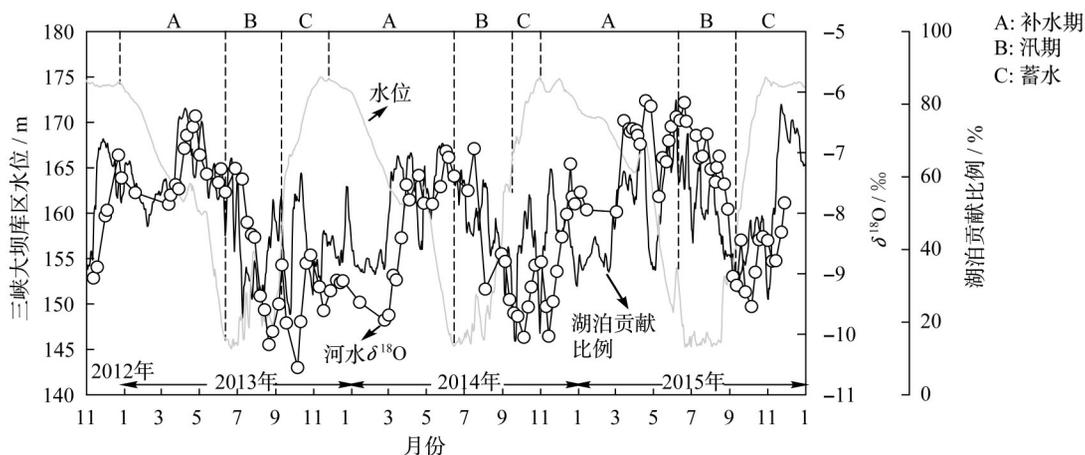


图5 三峡水库水位、南通站河水 $\delta^{18}\text{O}$ 以及湖泊流量贡献时间序列变化

Fig.5 Time series of water level at the Three Gorges Reservoir, temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in the Yangtze River water and the lake contribution at Nantong Station

以及地下水等的显著贡献造成的;尤其是输送的氮、磷和碳很可能对长江中下游河段以及长江口海域的生物地球化学过程具有不容忽视的影响。前人观测表明,洪水中的氮磷输送通量比常态增加几倍到几十倍,流域内部一年内几场强降雨事件就能贡献50%以上的营养盐年通量^[28],显著改变了流域内乃至河口系统营养盐的形态结构及其生物地球化学循环过程,可影响初级生产力、食物网、生物多样性乃至整个水生生态系统的结构和功能^[29]。全球极端天气事件加剧背景下,长江流域洪峰过程的水循环-营养盐与碳循环及通量耦合分析,需加强不同时空尺度的洪峰过程的氢氧同位素观测。值得注意的是,本研究的采样频率为每月2~6个样品,亟待开展更高分辨率河水的氢氧同位素连续监测工作。

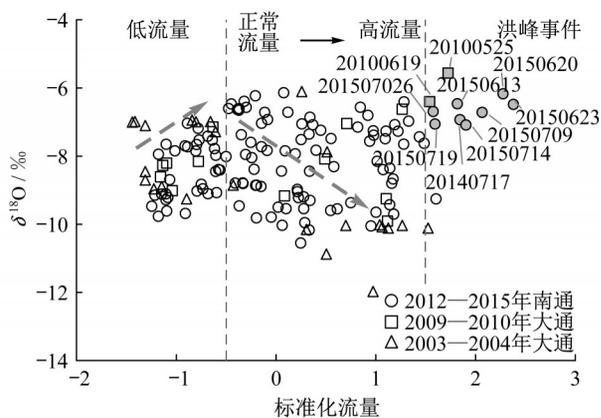


图6 长江下游干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 与标准化流量关系图

Fig.6 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and discharge anomaly (ΔQ) in the lower mainstream of the Yangtze River

3.5 大坝建设对长江水循环的影响

水电工程已经对全球陆地水循环产生了显著的影响^[30]。截至目前,长江流域已建不同规模的水库5万余座^[31]。三峡大坝是世界上最大的水电工程之一,对下游流域、长江三角洲和东海环境具有重大的影响,主要体现在水文泥沙过程、水质、生态环境以及区域气候变化等方面^[32],而流域内部大坝建设对长江地表水循环的影响却鲜见报道。

图7为三峡大坝建设前后长江流域大气降水和长江干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值距平季节性变化模式^[33]。从图7可以看出,1980年代以来,长江流域大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化模式保持不变,都表现为12月至5月份同位素月平均的距平值偏正,而6月至11月偏负,与长江流域季风降水同位素变化特征相吻合。然而,2004年以来,长江干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 月

平均值距平相对于1980年代其季节性转换时间从6月至7月之间滞后到现在的7月至8月之间,滞后约1个月左右。河水同位素信号滞后于大气降水同位素信号与诸多因素有关,包括温度、土壤与植被蒸发、与地下水交换,以及由渗透过程引起的降水在流域内部的通过时间。1980年代,长江流域几乎没有大型水利工程建设,河水同位素季节性转换时间相对于大气降水同位素季节性转换时间滞后约1个月,这表明长江河水对大气降水的响应时间滞后约1个月,是流域内降水经多种途径进入河水的滞留时间背景。然而,2003年三峡大坝建设后河水同位素变化则滞后于大气降水约2个月。长江流域过去30多年流量相对稳定,且气温和相对湿度基本保持不变,河水同位素季节性变化模式的改变,推测为1990年以后长江流域大规模大坝建设导致^[33]。

同时,前期研究结果显示,长江流域水库平均河水年龄在1981—1990年间保持不变,约为 (0.26 ± 0.03) 月;而到了2003年三峡大坝蓄水以来,库区河水的年龄则逐渐变大,变化范围为 $1.06 \sim 2.38$ 月,平均约 (1.67 ± 0.38) 月^[33]。2003年以后,大坝建设导致的河水平均年龄较20世纪80年代约增加了 (1.41 ± 0.41) 月,与河水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性转换时间滞后1个月相吻合,表明长江流域大规模的大坝建设,使长江流域储水能力呈指数型增长,大坝的拦蓄作用导致河水滞留时间增加了约1个月。由于水库蒸发作用占中国水消耗量的22%^[34],因此大坝的拦蓄作用除了改变长江流域水循环季节性变化模式,也会影响长江流域的蒸发作用从而影响流域水循环过程。

此外,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 沿程变化也表明大坝的拦蓄作用会导致上游来水在三峡库区滞留时间变长,水体混合均一化(图3)。Deng等^[35]对比了三峡大坝建设过程中不同年份枯季干流河水过量氘($\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$)沿程变化规律,结果显示在2003—2006年期间,长江干流河水过量氘的沿程波动较大,而2008年之后长江干流河水过量氘的沿程波动较小,反映了三峡大坝蓄水过程中随着库容的增大,其对上游来水的滞留与均一化作用也逐步增强^[35](图8)。大坝的建设导致河流湖库化,尤其是长江上游梯级电站的开发将显著影响河水滞留时间,改变河流水文和生物地球化学过程,从而调整营养盐从流域向海洋输送的过程与通量,如三峡大坝对溶解硅来源的调节^[36],库区水体富营养化加速碳循环过程并排放温室气体等^[37]。此外,在利用地表水同位素空间变化梯度进行气候模型的研究时需要考虑人类活动的影响。

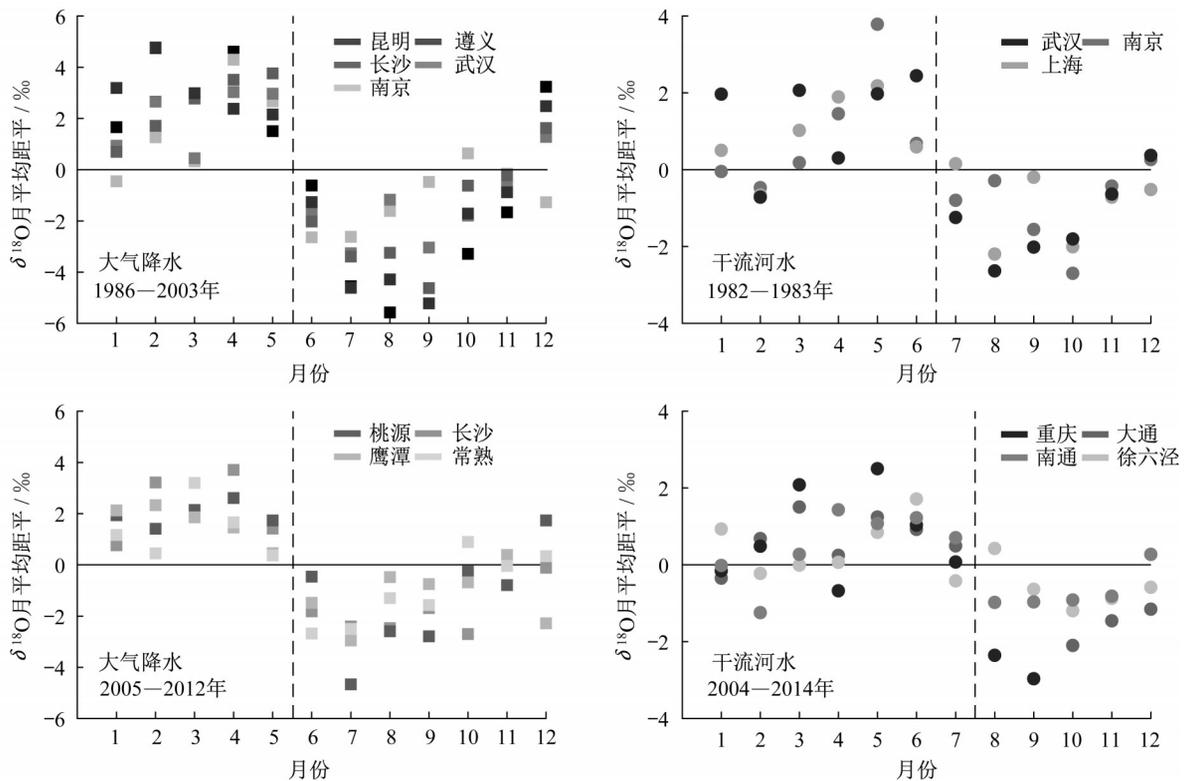


图7 1980—1990年与2003年后长江流域大气降水、干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值距平季节性变化特征

Fig.7 Monthly $\delta^{18}\text{O}$ anomaly in the precipitation and Yangtze River water in 1980s-1990s and after 2003

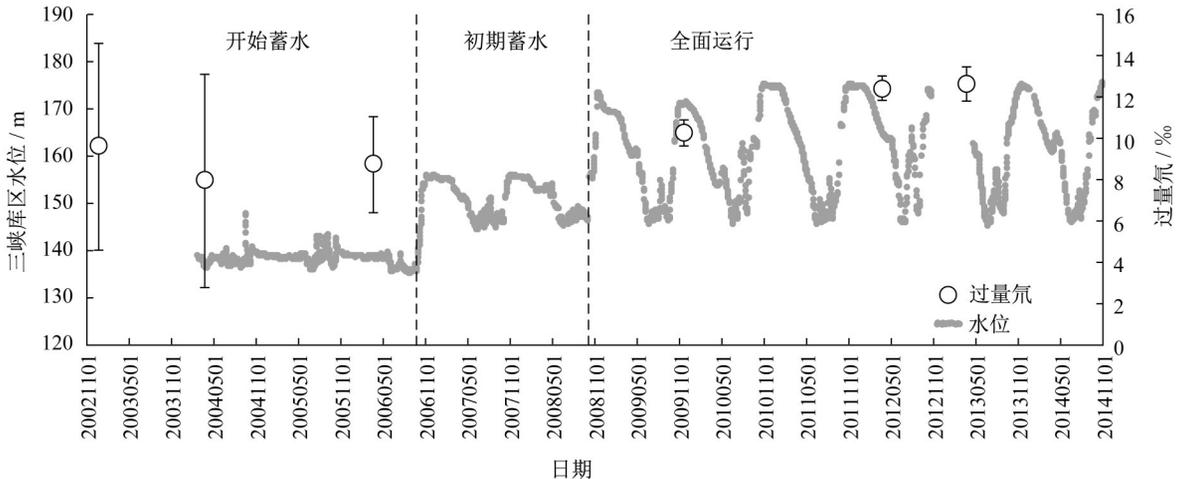


图8 长江中下游过量氘波动范围的年际变化与三峡库区水位的关系

Fig.8 Correlation between the fluctuations of d-excess along the mid-lower mainstream of the Yangtze River and the water level at the Three Gorges Reservoir

4 结论

本文系统汇总了过去多年长江干、支流水体的氢氧同位素组成,通过高分辨率的时空变化分析,取得主要认识如下:

(1) 长江干流河水枯季 δD 为 $-112.0\text{‰} \sim -28.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-15.4\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$; 汛期 δD 为

$110.8\text{‰} \sim -38.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-15.3\text{‰} \sim -6.3\text{‰}$ 。重新计算得到长江干流多年平均河水线方程: $\delta\text{D} = 7.56 \pm 0.11\delta^{18}\text{O} + 6.75 \pm 1.04$, $n = 333$, $R^2 = 0.9399$, $p < 0.0001$ 。

(2) 长江干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的空间变化受不同来源(降水、融雪、地下水、支流混合等)、蒸发作用以及人类活动的共同影响,并表现出大陆效应、纬度效

应和海拔效应。长江河水同位素组成的季节性变化主要受季风降雨和三峡大坝调蓄影响。季节尺度上,下游干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 波动主要取决于季风降水补给影响,枯季偏正汛期偏负;月际尺度上下游干流河水 $\delta^{18}\text{O}$ 波动受到三峡大坝蓄排水、湖泊贡献的影响;天气尺度上,洪峰事件可以导致河水 $\delta^{18}\text{O}$ 异常偏正,反映中下游湖泊群、农业灌溉水、土壤下渗水以及地下水等的显著贡献。

(3)利用南通站连续观测同位素资料和长江流量资料,估算长江河水从宜昌流到南通的运移时间约为17 d,可以为点源污染物的迁移扩散、下游河口区盐水入侵的响应研究提供参考。

(4)长江流域的大规模大坝建设显著影响长江流域地表水循环过程。三峡大坝的蓄水导致长江干流河水过量氧沿程变化逐步趋于均一化。河水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化相位较大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节性变化的相位从1980—2000年的滞后1月延长到2000年以后的滞后约2个月,反映了近20年流域大坝建设对长江流域水体的显著滞留作用,水体在河流系统中的滞留时间增加了约1个月。

目前,伴随着长江上游多座超大型水库的建设,长江上游已经形成了世界上规模最大的流域梯级水库群。长江干流梯级水库以及支流密布的中小型水电站共同产生的累积效应,包括水体滞留时间变化、对洪水脉动的扰乱以及改造降水—河水—湖水—地下水—土壤水—植物水的相互转化关系等,都将显著改变流域水循环和生物地球化学过程,进而显著影响河口与近海水环境与生态系统。如何处理水库巨大社会效益和潜在生态风险的矛盾,是一个具有全球意义的科学难题。在长江大保护背景下,需要将河流—水库湖泊—河口—近海系统视为连团体,开展陆海的水循环—生源要素循环—碳循环耦合研究。氢氧同位素方法作为经典的水循环示踪指标,可为不同时空尺度人类活动与气候变化背景下的大河流域水循环变化过程提供更多数据约束。今后亟需加强长时间尺度和高分辨率的多种同位素联合观测,促进多学科交叉,将筑坝河流生态系统的复杂性和异质性进行参数化(如水体滞留时间、流域新水比例等),科学评估世界性大河的水循环过程及其生态环境影响,为制定和落实水环境保护政策和流域综合治理提供科学依据。

作者贡献声明:

杨守业:制定整个研究方案,论文撰写和审阅。

王 朔:数据处理及论文撰写。

连尔刚:设计思路,样品采集与分析,论文撰写和审阅。

李 超:样品采集,论文审阅及修改。

杨承帆:样品采集与分析。

刘鹏飞:样品采集与分析。

邓 凯:数据分析和论文审阅。

参考文献:

- [1] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, 313 (5790): 1068.
- [2] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, 24 (1): 225.
- [3] GIBSON J, AGGARWAL P, HOGAN J, *et al.* Isotope studies in large river basins: a new global research focus [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(52): 613.
- [4] VITVAR T, AGGARWAL P K, HERCZEG A L. Global network is launched to monitor isotopes in rivers [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2007, 88(33): 325.
- [5] HALDER J, TERZER S, WASSENAAR L, *et al.* The Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR): integration of water isotopes in watershed observation and riverine research [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(8): 3419.
- [6] KENDALL C, COPLEN T B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1363.
- [7] LU B, SUN T, WANG C, *et al.* Temporal and spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ along the main stem of Yangtze River, China [C]// *Monitoring Isotopes in Rivers: Creation of the Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR)*. Vienna:IAEA, 2012: 211-219.
- [8] MÜLLER B, BERG M, PERNET-COUDRIER B, *et al.* The geochemistry of the Yangtze River: seasonality of concentrations and temporal trends of chemical loads [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): GB2028.
- [9] 顾镇南,金德秋,周锡煌,等. 长江水中氢氧同位素组成的季节性变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1989, 25(4): 408.
GU Zhennan, JIN Deqiu, ZHOU Xihuang, *et al.* The seasonal variation of isotopic content in the water of Yangtze River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1989, 25(4): 408.
- [10] 连尔刚. 氢氧稳定同位素在长江—东海陆架水循环研究中的示踪应用[D]. 上海: 同济大学, 2016.
LIAN Ergang. Tracing implication of stable hydrogen and oxygen isotopes in water cycle from the Changjiang River to East China Sea shelf [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [11] 孙婷婷. 长江流域水稳定同位素变化特征研究[D]. 南京: 淮海大学, 2007.
SUN Tingting. Study on the variable characteristic of the water stable isotopic compositions in Yangtze River Basin [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.

- [12] LI C, LIAN E, YANG C, *et al.* Seasonal variability of stable isotopes in the Changjiang (Yangtze) river water and its implications for natural climate and anthropogenic impacts [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32(1): 84.
- [13] 陈新明,甘义群,刘运德,等. 长江干流水体氢氧同位素空间分布特征[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(5): 110.
CHEN Xinming, GAN Yiqun, LIU Yunde, *et al.* Spatial distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the mainstream of Yangtze River [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(5):110.
- [14] 丁梯平,高建飞,石国钰,等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 661.
DING Tiping, GAO Jianfei, SHI Guoyu, *et al.* Spacial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5):661.
- [15] LI S L, LIU C Q, LI J, *et al.* Assessment of the Sources of Nitrate in the Changjiang River, China using a nitrogen and oxygen isotopic approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(5): 1573.
- [16] HU C, 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.
- [17] WU H, HUANG Q, FU C, *et al.* Stable isotope signatures of river and lake water from Poyang Lake, China: implications for river-lake interactions [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125619.
- [18] WU H, LI J, SONG F, *et al.* Spatial and temporal patterns of stable water isotopes along the Yangtze River during two drought years [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32 (1): 4.
- [19] LIU J, SONG X, YUAN G, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. *Tellus B*, 2014, 66: 22567.
- [20] ARAGUÁS-ARAGUÁS L, FROEHLICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28721.
- [21] YANG X, LU X X. Delineation of lakes and reservoirs in large river basins: an example of the Yangtze River Basin, China [J]. *Geomorphology*, 2013, 190: 92.
- [22] MCDONNELL J J, MCGUIRE K, AGGARWAL P, *et al.* How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12):1745.
- [23] 吴敬禄,林琳,曾海鳌,等. 长江中下游湖泊水体氧同位素组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 53.
WU Jinglu, LIN Lin, ZENG Haiao, *et al.* Characteristics of oxygen isotopic composition of the lakes along the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3):56.
- [24] 唐建华,刘玮玮,赵升伟. 长江口徐六泾流量与大通流量间关系的探讨[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(7): 4.
TANG Jianhua, LIU Weiyi, ZHAO Shengwei. Discharge relationships between Xulujing of Yangtze River Estuary and Datong [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(7): 4.
- [25] LIU J, SONG X, YUAN G, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(2): 200.
- [26] YI Y, GIBSON J J, HÉLIE J F, *et al.* Synoptic and time-series stable isotope surveys of the Mackenzie River from Great Slave Lake to the Arctic Ocean, 2003 to 2006 [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 383(3/4): 223.
- [27] SHOPE C L. Disentangling event-scale hydrologic flow partitioning in mountains of the Korean Peninsula under extreme precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 399.
- [28] CHEN N, MO Q, KUO Y, *et al.* Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 301.
- [29] 陈能汪. 全球变化下九龙江河流-河口系统营养盐循环过程、通量与效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 23.
CHEN Nengwang. Nutrient cycling process, fluxes and effects in the Jiulong river-estuary system under global change [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 23.
- [30] VÖRÖSMARTY C J, SAHAGIAN D. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle [J]. *BioScience*, 2000, 50(9): 753.
- [31] CHEN J, FINLAYSON B L, WEI T, *et al.* Changes in monthly flows in the Yangtze River, China-with special reference to the Three Gorges Dam [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 293.
- [32] YANG S, XU K, MILLIMAN J, *et al.* Decline of Yangtze River water and sediment discharge: impact from natural and anthropogenic changes [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12581.
- [33] LI C, YANG S, LIAN E, *et al.* Damming effect on the Changjiang (Yangtze River) river water cycle based on stable hydrogen and oxygen isotopic records [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 165: 125.
- [34] LIU J, ZHAO D, GERBENS-LEENES P, *et al.* China's rising hydropower demand challenges water sector [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11446.
- [35] DENG K, YANG S, LIAN E, *et al.* Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: evidence from H-O isotopes [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 562: 89.
- [36] WANG X, YANG S, RAN X, *et al.* Response of the Chanjiang (Yangtze River) water chemistry to the impoundment of Three Gorges Dam during 2010–2011 [J]. *Chemical Geology*, 2018, 487: 1.
- [37] 刘丛强,汪福顺,王雨春,等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 384.
LIU Congqiang, WANG Fushun, WANG Yuchun, *et al.* Responses of aquatic environment to river damming-from the geochemical view [J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2009, 18(4): 384.