

基于氢氧稳定同位素探索喀斯特河-库水混合过程

马 松^{1,2,3}, 魏 榆⁴, 韩翠红⁵, 孙海龙², 鲍 乾⁶,
李 栋^{2,3}, 赵 敏³, 晏 浩^{4,*}

(1. 贵州省分析测试研究院, 贵阳 550014; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023; 5. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130021;
6. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068)

摘 要: 为研究喀斯特地区河流筑坝对水循环过程的影响, 本研究对3个具有不同水动力特征的喀斯特水库进行了调查, 采集了2018年3月至2019年1月期间的5次入库河流和库区剖面水样, 利用稳定同位素(δD , $\delta^{18}O$)揭示河-库水混合过程。结果显示, 在研究区域内, 水体的氢氧稳定同位素组成呈现显著的时空差异。河水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 受控于上游水库截留和排水及降水。水库水体在6月富集重同位素, 在10月富集轻同位素。库区水季节性的 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化主要受河水输入和滞留时间的影响, 蒸发对库区内同位素信号也有影响。水库的分层影响了表层和底层水的交换, 导致库区剖面上 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化。三岔河流域与猫跳河流域之间的 $\delta^{18}O$ 差异主要受水汽从东向西迁移的影响。河水和库区水体氢氧稳定同位素组成的差异可指示河-库水混合过程。受季节性水温变化影响, 河水与库区水在普定水库的水深约20 m处发生混合, 而在平寨水库10 m左右的深度范围内发生混合。在红枫湖水库, 河水沿水深10 m向大坝方向流动混合, 层间流对外部物质的输入起到贡献作用。这些过程导致悬浮颗粒物沉降通量、C/N、 $\delta^{13}C_{POC}$ 和内外源物质比例发生变化, 说明喀斯特河-库水混合过程对水库内营养物质迁移和生物地球化学过程至关重要。

关键词: 喀斯特水库; 梯级水库; 氢氧稳定同位素; 混合过程

中图分类号: P59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2025)02-0222-12 **DOI:** 10.3724/EE.1672-9250.2024.52.041

河流输入是水库(湖泊)生源要素的主要补给来源, 河-库水混合位置和深度影响沉积物、营养物质和污染物的输入, 对水库水质和水化学产生重要影响^[1-2]。世界上超过1 000 km的河流中, 约2/3的河流在其全长范围内受筑坝拦截影响^[3], 导致地表径流平均停留时间增加的“陈化现象”^[4], 水生生态系统的生物地球化学行为很大程度上取决于其中发生的运移和混合的物理过程, 这些过程不仅决定了溶解和悬浮物质在任何给定时刻的空间位置, 还决定了控制生物地球化学过程发生的环境条件^[5], 因此河-库悬浮颗粒物迁移对生物地球化学演化具有重要意义。河水与湖泊的混合主要受动量输入以及河水和湖水之间的密度差控制, 与温度、盐度和悬浮物质浓度有关^[6], 可能出现溢流、层间流和底流3种基本水流。喀斯特水库的水动力条件对溶解无机碳循环生物地球化学过程的影响明显, 强水动力环境下的CO₂排放高于弱水动力环境7倍以上^[7], 但目前对不同

水动力条件下河-库混合过程缺乏详细研究。

准确估计河-库(湖泊)混合过程对沉积物迁移对于了解生物地球化学过程至关重要, 例如预测河流沉积物输送、量化全球海洋沉积物供给^[8]、了解人为因素对河流通量的影响^[9]、模拟未来或理论变化情景^[10]、评估生态影响^[11], 以及为大坝运营提供信息^[12]。目前, 已经开发了几种方法来估计水库的泥沙捕获效率^[13], 如水库容量与流入量之比的流域容量模型^[14]和利用遥感技术来计算水库泥沙捕获效率^[15]。在全球尺度区域尺度的研究证实梯级水库修建后河流沉积物的组成发生了显著变化^[16-18], 大量泥沙被拦截, 并且泥沙上吸附的颗粒性营养物质或可溶性营养物质也可以直接被截留^[12]。例如, 三峡水库每年拦截泥沙约10.8%^[19], 其中生源要素磷、氮和硅分别被拦截44%、1%及46%^[20-22]。实验表明悬浮颗粒物在运输生源要素(磷、氮、硅)方面起着重要作用, 并且生物量总浓度随悬浮颗粒物增加而增

收稿日期: 2024-03-29; 改回日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金委—贵州喀斯特科学研究中心联合基金重大项目(U1612441)。

第一作者简介: 马 松(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为湖泊碳循环。email: 1490258414@qq.com。

*通信作者: 晏 浩(1988—), 男, 博士, 准聘助理教授, 研究方向为同位素地球化学。email: yanhao@nju.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

加^[23]。例如,在白海入海口,悬浮颗粒物浓度与叶绿素含量呈正相关关系^[24]。但悬浮颗粒物的含量也受到流体动力学条件,特别是水流速度的显著影响。悬浮颗粒物含量的时空变化很大程度上与水文交替有关。水文条件变化可以通过养分吸附、光衰减和悬浮颗粒物-藻类异聚集的迁移来影响藻类的密度和分布^[25]。尽管对水库悬浮颗粒物捕获效率的研究很丰富,主要是关注水库整体的沉积过程,但缺乏对不同水动力环境下河-库混合水动力变化控制沉积过程之间的影响研究。

水库氢氧稳定同位素组成的变化主要受大气降水、水体混合、蒸发等过程影响^[26-28]。水的稳定同位素组成为示踪河水迁移、循环和混合过程提供有用的信息,且不受人类活动或生物过程活动影响^[29-30]。氢氧稳定同位素被证实是研究筑坝水循环过程的可靠指标。例如,泰国蒙河氢氧稳定同位素可以指示自然和筑坝对水循环的共同影响^[30];长江、乌江流域梯级水库的氢氧稳定同位素受到温度、筑坝的影响^[26,29];在日内瓦湖研究表明,氢氧稳定同位素可以示踪水源及其混合过程,其垂向观测到7~15 m的层间流及55 km的混合距离^[27]。在三峡水库的研究表明氢氧稳定同位素示踪剂可以准确描述水体混合过程和估算汇流区不同营养源的贡献率,对水库管理具有重要意义^[31]。因此本文利用氢氧稳定同位素研究不同水动力环境下河-库水混合过程,指示混合过程对营养物质迁移和生物地球化学过程的影响。

本文选择不同水动力和营养条件的平寨水库、普定水库和红枫湖水库进行研究,采集河流和库区水体样品,探讨河-库水氢氧稳定同位素组成的影响因素及河-库混合过程,对理解河-库系统物质迁移有重要帮助。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

乌江是长江上游最大的支流,全长1 037 km,流域面积88 267 km²,年降雨量在1 100~1 300 mm,年降雨不均,雨季(5~10月)占全年降雨量的75%^[26],属于雨源性河流,旱季(11~4月)河水主要受地下水补给^[32]。三岔河流域和猫跳河流域是乌江的上游发源地,普定水库和平寨水库位于三岔河流域,红枫湖水库位于猫跳河流域(图1)。猫跳河流域全长180 km,流域面积3 116 km²,海拔500~1 750 m,河流总落差1 250 m,属亚热带温和湿润气候,年均气温13.8℃,年均降雨1 200 mm^[33]。三岔河流域全长325.6 km,流域面积7 264 km²,海拔939~2 271 m^[34],三岔河上游支流坡度大,周边以峡谷为主,

河流落差约1 300 m,流域属于亚热带季风气候,年均降雨1 100 mm^[35]。

红枫湖水库的最大库容6.01×10⁸ m³,属于深水湖泊型水库,1960年投入使用,水体滞留时间119 d,平均水深10.52 m,最大水深45 m,正常蓄水水位1 240 m,汇水面积1 596 km²,汇水区最高海拔1 612 m^[36]。主要入库河流包括羊昌河、桃花园河(麦翁河)和麻线河等^[37]。普定水库、平寨水库属于峡谷型水库,河水主要补给来源为三岔河,普定水库位于平寨水库下游。普定水库库容3.6×10⁸ m³,水体滞留时间40.6 d,修建时间1993年,最大深度50 m,正常蓄水水位1 145 m,汇水区面积5 871 km²^[38],汇水区海拔1 145~2 271 m。平寨水库库容10.97×10⁸ m³,最大水深120 m,水体滞留时间80.4 d,修建时间2015年^[39],汇水区面积3 492 km²,汇水区海拔1 331~2 271 m,回水长度38 km,正常蓄水水位1 331 m。

1.2 样品采集与方法

3个水库分别设置5个采样点。平寨水库2个河流采样点SCH(海拔1 348 m)、YCZ(海拔1 342 m),距离库区分别约17、15 km,库区(海拔约1 131 m)采样点为PZA、BXZ、PZ。普定水库河流采样点为LC(海拔1 148 m)和MC(海拔1 143 m),距离库区约22和14 km,库区(海拔约1 145 m)采样点为PDA、PDM和PD。在红枫湖流域设置两个河流采样点TYH(桃花园河,海拔1 240 m)及HQQ(羊昌河,海拔1 237 m),距离库区约5和1 km,库区(海拔约1 240 m)设置采样点HN、HB和HF(图1)。于2018年3、6、8、10月以及2019年1月分别利用不锈钢深水采样器进行样品采集。库区水体样品采集于不同深度(0.5~120 m,依据水深确定采样深度分别为0.5、10、15、20、25、30、40、80和120 m)。水化学参数水温(*t*)和电导率(EC)使用法国PONSEL ODEON测定,其精度分别为±0.01℃和±0.01 μS/cm。水样经0.45 μm的醋酸纤维膜过滤后装入25 mL高密度聚乙烯瓶中,去除气泡。

氢氧稳定同位素组成在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行分析测试。采用美国LGR(Los Gatos Research)公司的DLT-100型液体水同位素分析仪, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 测试标准差分别为±0.1‰和±0.5‰,所有样品的同位素组成均是相对于Vienna-Standard Mean Ocean Water标准(V-SMOW)。本文选用Craig^[41]建立全球大气降水线(GMWL) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$,Hu等^[42] $\delta\text{D}=8.56\delta^{18}\text{O}+17.14$ 作为普定水库和平寨水库地区大气降水线(LMWL),朱磊等^[43] $\delta\text{D}=8.82\delta^{18}\text{O}+22.07$ 作为红枫湖的LMWL。

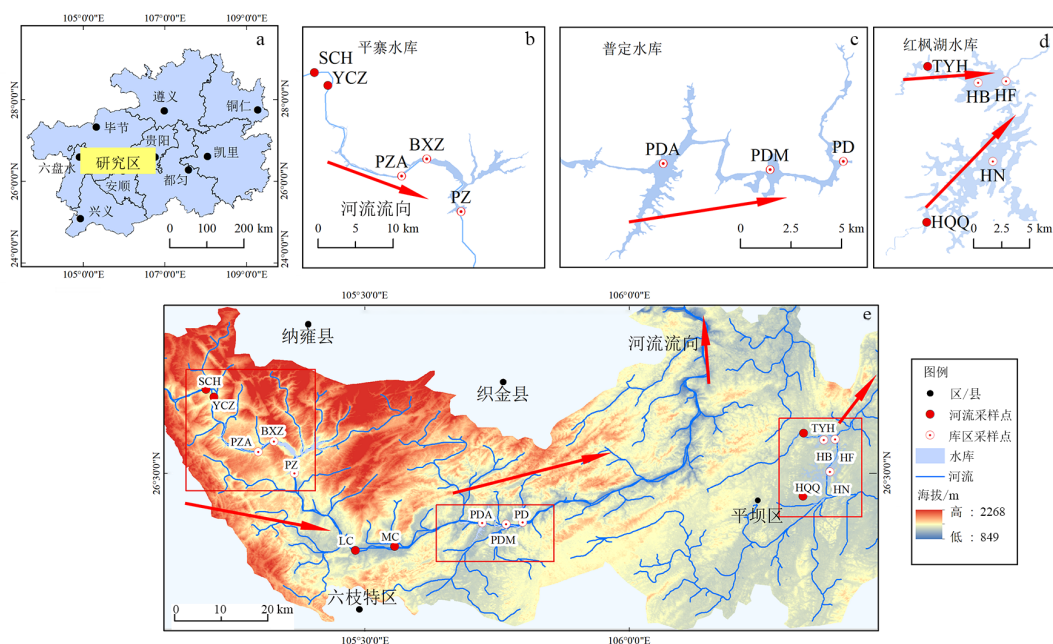


图1 研究区域概况及采样分布(据文献[40]修改)

Fig.1 The locations of the studied reservoirs and water sample collecting sites (Modified after ref. [40])

2 结果

三个水库水化学参数显示在夏秋季(5~10月)均出现明显分层,而冬春季(11~4月)垂向上均一(图2)。平寨水库、平定水库、红枫湖水库水温(t)范围分别为10.54~26.40、9.17~27.53、6.86~29.07 $^{\circ}\text{C}$,平均值分别为16.32、16.98、17.77 $^{\circ}\text{C}$;电导率(EC)分别为250.80~483.10、315.80~455.10、247.40~521.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$,平均值分别为399.38、404.68、371.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

水库水体的氢氧稳定同位素组成存在显著季节和空间变化。总体上,分层期的氢氧稳定同位素组成平均值较混合期偏高。在空间上,氢氧稳定同位素组成的平均值为平寨水库<平定水库<红枫湖水库,且下游较上游氢氧稳定同位素值偏正,入库河流较库区水体偏正(表1)。1月平寨水库、平定水库和红枫湖水库的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为-9.86‰~-9.39‰、-9.80‰~-9.25‰与-7.93‰~-6.63‰,平均值分别为-9.60‰、-9.59‰、-6.98‰;平寨水库、平定水库和红枫湖水库在8月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为-10.69‰~-9.13‰、-10.02‰~-8.56‰、-9.31‰~-6.39‰,平均值分别为-9.87‰、-9.50‰、-7.13‰。

3 讨论

3.1 河水和水库水体氢氧稳定同位素组成的时空变化特征

如图3所示,河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在3月至8月先偏高再偏

低,8月为最小值,8月至1月 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐变高。由于研究区河水源自大气降水,西南地区夏季水汽大部分来自阿拉伯海、孟加拉湾和印度洋水汽,冬季水汽来源西风带水汽,夏季水汽来源 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低、冬季水汽来源 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高^[44],因此河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化一方面反映了降水的同位素组成的变化,另一方面可能受到后期的蒸发及地下水补给的影响。前人对平定地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的研究发现,雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在雨量效应,在雨季偏负,旱季偏正,且雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在5月开始负偏,而在10月份开始正偏^[45]。虽然河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值也表现出雨季低,旱季高的特征,但是其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化相对于降水呈现明显的滞后。河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在6月仍然偏正,且在10月份偏负。前人研究显示,喀斯特地区地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对降水存在滞后现象且 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变幅被削弱^[45],因此河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对雨水的滞后可能是由于降水入渗形成的地下水对河水的补给导致的。并且,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变幅也小于雨水(图3),也反映出地下水对河水的补给。在空间上,平寨水库、平定水库、红枫湖水库入库河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐升高。张明亮^[46]研究发现,在滇东黔西地区,海拔每上升100 m,地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值下降0.259‰,水汽自东向西迁移^[44,46],通过河水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值简单计算,平寨水库与平定水库、红枫湖水库入库河流海拔落差分别为235、1 000 m,计算结果与实际集水区海拔落差199.5、977 m接近(图1)。此外,由于研究区的低海拔地区气温更高,蒸发更强,也会导致河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随海拔降低而升高。由于本研究

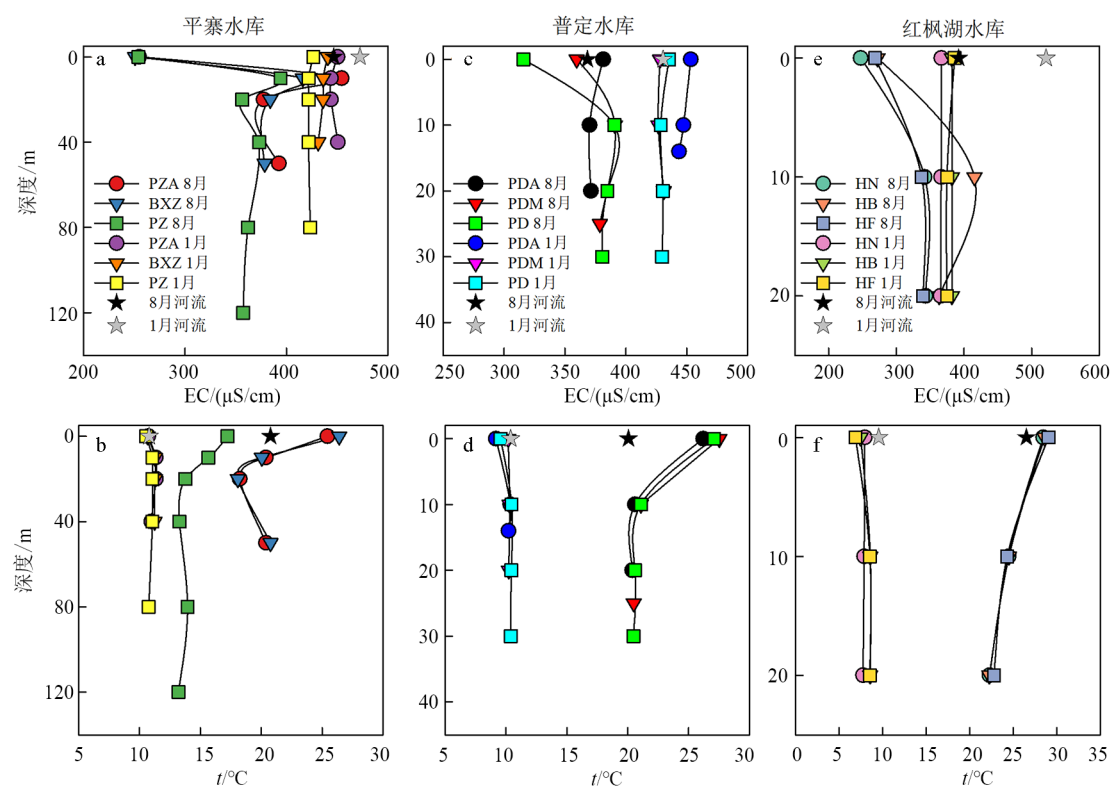


图2 平寨水库(a,b)、普定水库(c,d)和红枫湖水库(e,f)在8月与1月的t,EC剖面变化

Fig.2 Changes of t and EC profiles in Pingzhai reservoir(a,b), Puding reservoir(c,d) and Hongfenghu reservoir(e,f) in January and August

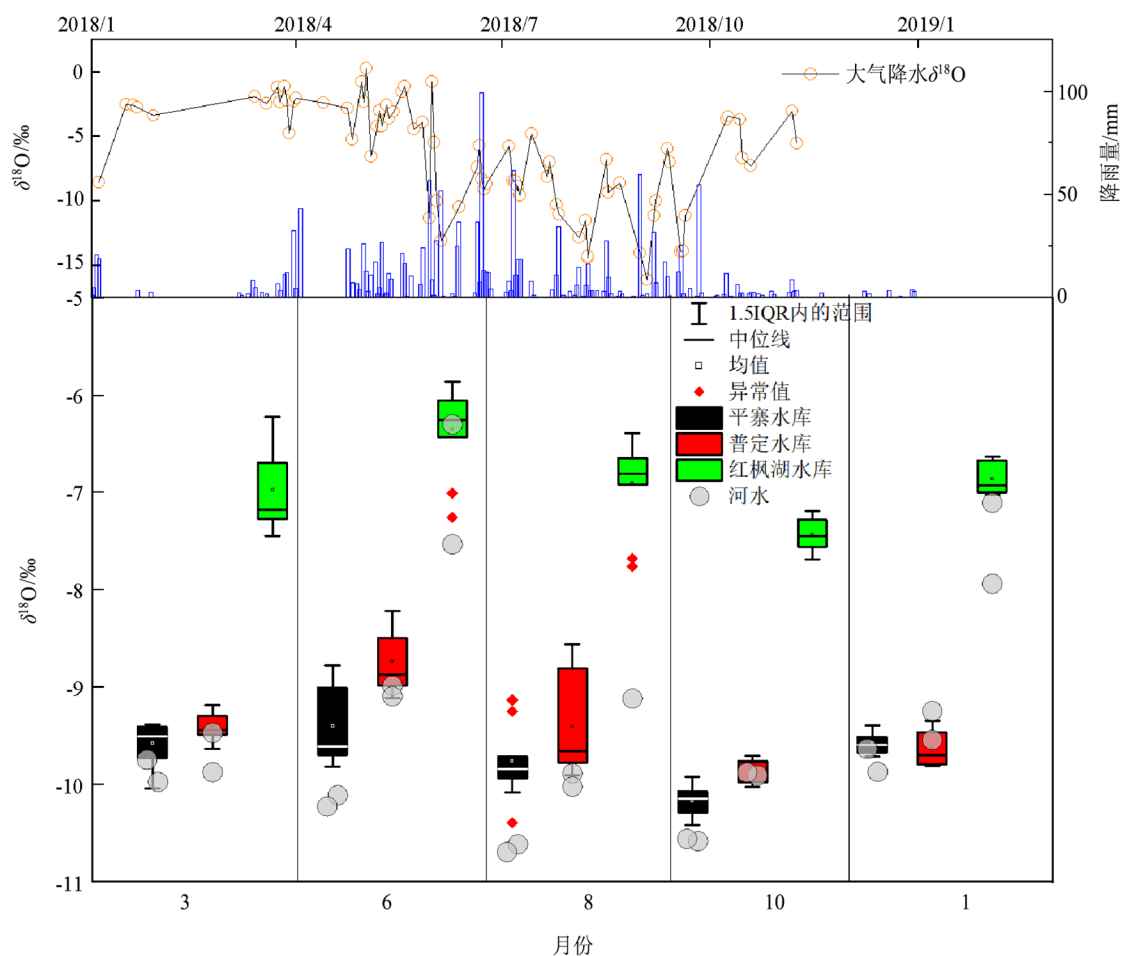
表1 红枫湖水库、普定水库和平寨水库 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 、 t 、EC特征

研究区		$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			$\delta\text{D}/\text{‰}$			$d\text{-excess}/\text{‰}$			$t/^{\circ}\text{C}$			EC/($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
平寨水库	库区	-8.78	-10.42	-9.71	-59.57	-71.54	-66.95	13.02	6.65	10.71	26.40	10.54	16.40	454.30	250.80	394.78
	河流	-9.63	-10.69	-10.20	-62.83	-73.16	-67.96	17.92	10.05	13.65	20.76	10.79	15.78	483.10	379.10	430.70
普定水库	库区	-8.21	-10.02	-9.40	-55.69	-67.51	-63.60	13.78	7.73	11.63	27.53	9.17	17.15	455.10	315.80	407.45
	河流	-8.98	-10.02	-9.59	-58.77	-67.97	-64.43	14.82	9.88	12.30	20.72	10.38	16.13	430.6	368.50	390.84
红枫湖水库	库区	-5.86	-7.76	-6.90	-34.59	-53.74	-47.42	14.21	4.58	7.80	29.07	6.86	17.54	487.00	247.40	362.33
	河流	-6.30	-9.12	-7.60	-44.67	-63.61	-52.48	9.40	5.72	8.30	28.61	8.16	18.77	521.30	272.10	414.31

缺少不同海拔的降水及其对应的河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值数据,尚无法定量蒸发效应对河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响。

各水库水体氢氧稳定同位素组成存在显著季节变化(图3、4)。总体上,冬春季库区水富集重同位素,夏秋季富集轻同位素。且其季节变化与河水在2个月的采样时间间隔上同步(图3)。库区水在6月 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高,10月 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低(图3)。如果将降雨量与滞留时间进行比例换算($365/T=P_{\text{总}}/P$, $P_{\text{总}}$ 为年降雨量, P 为一个滞留时间的降雨量, T 为滞留时间),2018年6月3个水库主要继承来自旱季大气降水输入,导致6月相对富集重同位素。同理,

2018年10月主要来自雨季的大气降水输入,库区10月相对富集轻同位素。这表明水库的拦截作用会导致其同位素组成的季节变化滞后于河水。值得注意的是,库区水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在6月相对1月偏高,且10月相对8月偏低,但这种现象并未在河水中观测到。这指示库区水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对河水在季节上存在滞后。此外,库区水较河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正,且 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化幅度较河水更小。这种差异可能是水库蓄水产生的“陈化现象”和库区水体蒸发(详见3.2节)导致的。对于前者而言,按照同位素质量平衡模型推导(未考虑输入动态变化),湖水稳定同位素



大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、降雨量数据来源于参考文献 [45])

图3 各水库和普定县大气降水不同月份 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

Fig.3 The $\delta^{18}\text{O}$ changes of atmospheric precipitation in different reservoirs and Puding County in different months

在一个滞留时间周期溶质完成约63%的交换,两个滞留时间周期完成约86%的交换^[47-48]。MacCready等^[49]的研究发现,在河-海混合过程中,利用箱式模型(将混合与输入-输出路径联系起来的概念从河口扩展到具有多个输入/输出的场景,这种方法允许估计每个输入-输出路径对一定体积内总混合的相对贡献)计算入海口溶质的迁移时间比滞留时间长两倍甚至更多,这种迁移时间的增加主要是由于示踪剂回流和示踪剂在整个体积中不均匀分布,与推导结果一致。“陈化现象”导致库区水体氢氧稳定同位素响应延迟且变幅变小。因此,库区水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对河水削弱的季节变幅也反映了“陈化现象”。Wu等^[36]在红枫湖的水文模型结果表明在6月水库水体滞留时间最长达406.1 d,与本文研究结果一致。此外,1月平寨水库、普定水库、红枫湖水库入库河水 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为-9.75‰、-9.39‰、-7.52‰,库区水分别为-9.58‰、-9.63‰、-6.86‰,3个水库库区与8月河水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值(-9.76‰、-9.41‰、-6.90‰)接近,旱季库区水继承雨季

水体同位素信号,同样指示库区水体受“陈化现象”影响。

在空间上,不同水库的氢氧同位素组成存在显著差异,其规律为红枫湖>普定水库>平寨水库,与河水相同,可能受海拔效应和蒸发作用(详见3.2节)的影响。此外,普定水库和平寨水库表层水在夏季存在 $\delta^{18}\text{O}$ 沿流向升高(约0.1‰~0.2‰)的现象,而冬季其表层水的空间变化不明显(图4)。两个水库表层水温沿流向没有明显差异,说明温度不是控制的原因。在五里峡水库的研究也观测到 $\delta^{18}\text{O}$ 沿流向升高^[50],可能是由于下游表层水体滞留时间相较于上游更长,蒸发作用时间更长,从而引起流向上富集重同位素。而冬季由于水体充分混合,且蒸发作用减弱,沿流向没有明显变化。

3.2 蒸发对水库氢氧稳定同位素组成的影响

大气降水是河水的主要来源,受到蒸发作用会导致河水的氢氧稳定同位素组成偏离至LMWL右侧,蒸发作用会使氢氧稳定同位素组成的拟合斜率减小,小于

LMWL斜率指示受到蒸发作用影响^[51]。河流入库后,水域面积增大,流速减缓,会导致蒸发作用变强。根据库区水体氢氧稳定同位素组成与LMWL进行对比(图5),普定水库和平寨水库氢氧稳定同位素值基本落在LMWL附近,但表层水偏向蒸发作用方向,红枫湖水库的氢氧稳定同位素值大部分都偏离LMWL。这表明红枫湖水体的氢氧稳定同位素组成受蒸发的影响比普通定水库和平寨水库大,以及表层水相对于底层水受到的影

响也更大。夏季水库表层水体较河水 $\delta^{18}\text{O}$ 显著偏高(1‰),冬季略偏高(0.5‰)(图4),指示夏季高温和热分层作用导致库区表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值受蒸发作用的影响更大(图5)。

在平寨水库、普定水库和红枫湖水库,全年入库河流 $\delta^{18}\text{O}$ 值较库区偏低约0.49‰、0.19‰和0.7‰(表1),虽然水库水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都受到蒸发的影响,但程度不同。且受蒸发影响程度与库区海拔变化不一致,反而与水体

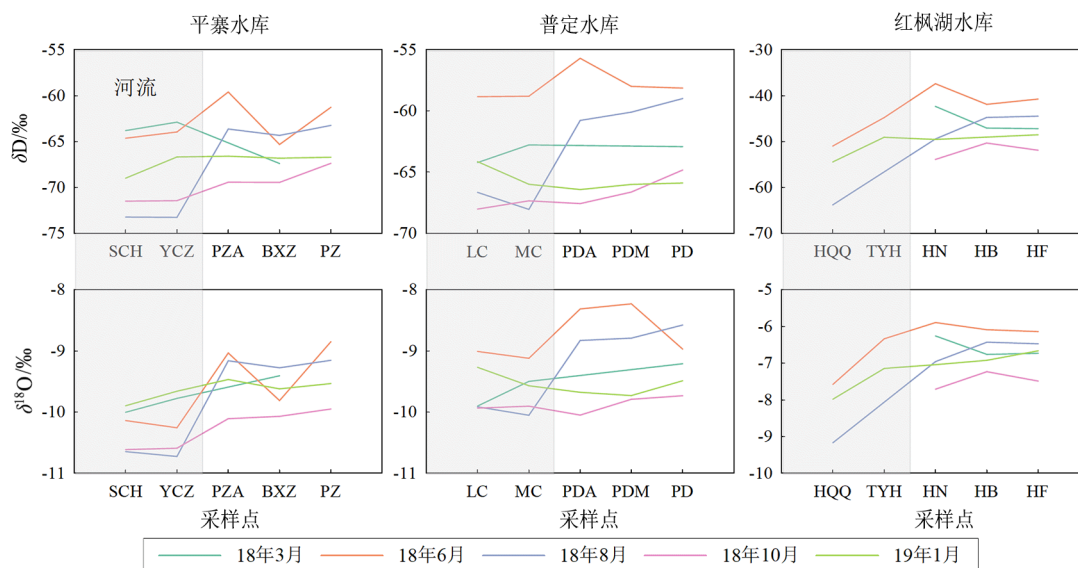


图4 平寨水库、普定水库和红枫湖水库在表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化

Fig.4 $\delta^{18}\text{O}$ and δD changes in surface water of Pingzhai reservoir, Puding reservoir and Hongfenghu reservoir

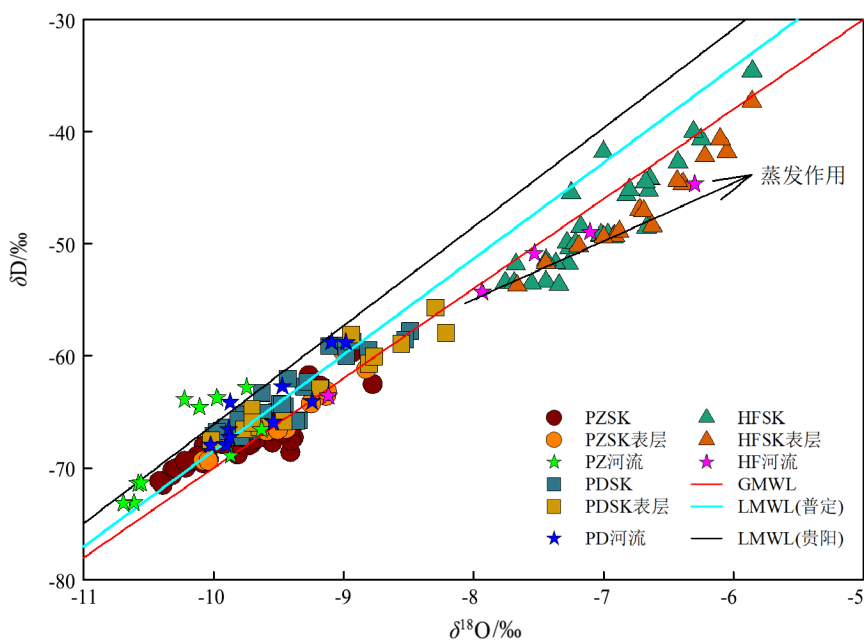


图5 研究区水样氢氧稳定同位素组成与LMWL、GMWL的比较

Fig.5 Comparison of hydrogen and oxygen isotopes of water samples in the study area with LMWL and GMWL

滞留时间有关。水体滞留时间越长,蒸发导致库区水相对河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高幅度更大。

氘盈余(d -excess)是示踪水汽来源和蒸发作用的有效指标,即蒸发作用会使 d -excess值降低^[42],经历强烈蒸发的地表水具有较低的 d -excess^[52]。8月,平寨水库、普定水库、红枫湖水库表层水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -9.17‰ 、 -8.71‰ 、 -6.58‰ ,底层水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -9.83‰ 、 -9.71‰ 、 -7.06‰ ,表层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 显著高于底层水。三个水库在8月表层水的 d -excess值均较底层水体偏小,指示夏季库区表层水受蒸发作用影响。红枫湖水库6月水滞留时间最长^[36],表层的氢氧同位素组成相对底层也更偏正,表明水滞留时间红枫湖水库(119 d)>平寨水库(80.4 d)>普定水库(40.6 d),水滞留时间越长,

蒸发作用影响越大,库区水相对河水越富集重同位素,且表层水相对底层水也富集重同位素。

3.3 河-库水混合过程及对生源要素迁移的影响

利用河水和库区水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异可以用来判断水体的混合过程。富集轻同位素较多的河水在分层期间通过水体中下层侵入水库(图6)。例如,平寨水库在分层期,其10 m深度处水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较其上下层水均偏负约1‰,且接近河水的值,这表明河水在水体10 m深度以下与库区水发生混合。此外,10 m深度处水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿大坝方向(PZA-BXZ-PZ)与下层水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异逐渐减小。但是在分层期平寨水库表层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿流向的增量仅约0.2‰,这说明表层水的蒸发作用不是导致表层水 $\delta^{18}\text{O}$ 与10 m深度水产生差异的原因。 t 、EC

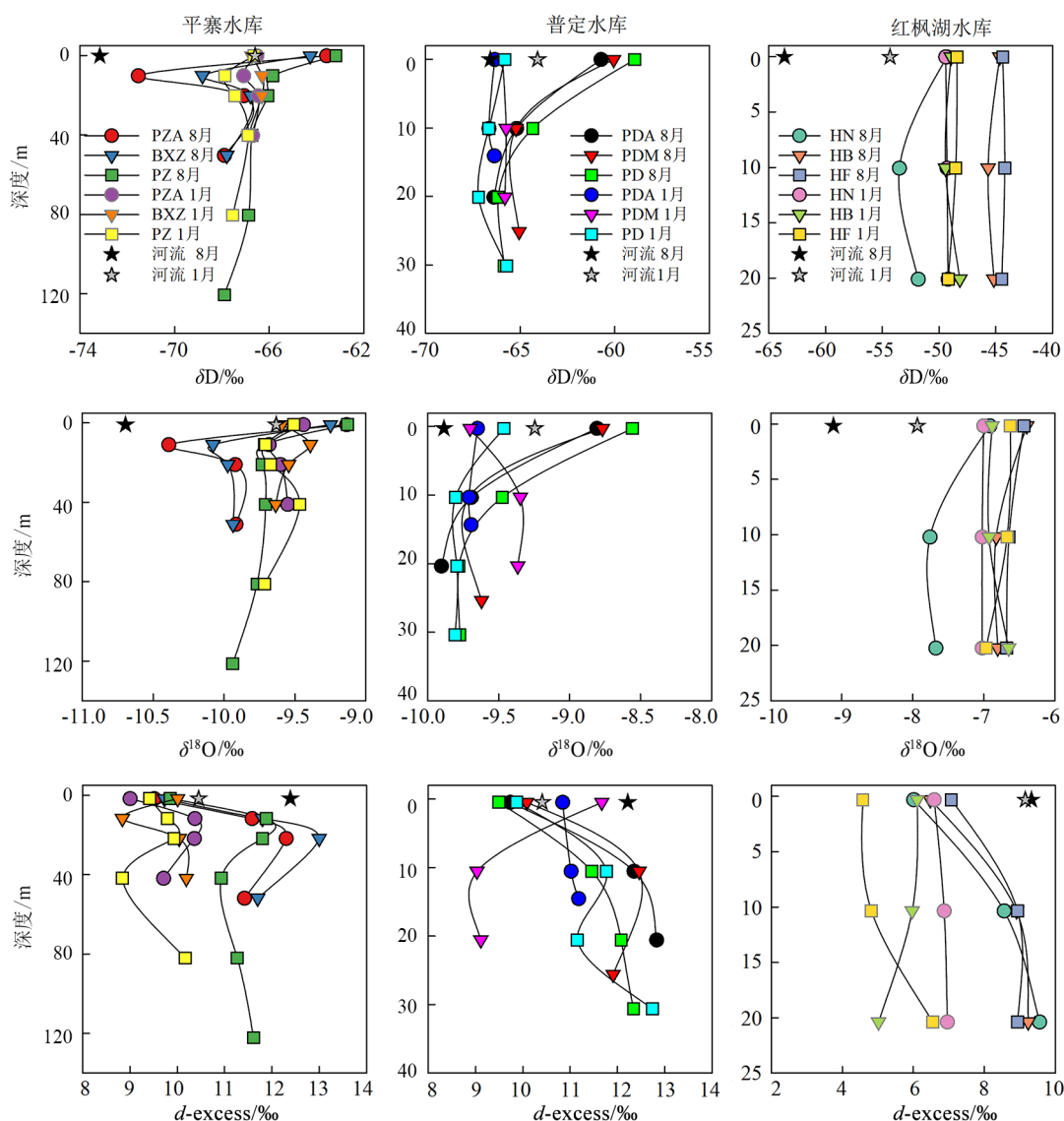


图6 平寨水库、普定水库和红枫湖水库在1月与8月的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d -excess剖面变化

Fig.6 Changes of $\delta^{18}\text{O}$, δD and d -excess profiles in Pingzhai reservoir, Puding reservoir and Hongfenghu reservoir during January and August

在10~20 m也沿流向逐渐降低,与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势一致。因此,氢氧稳定同位素组成的垂向变化并非完全是热分层控制,还反映了水的来源。据此,可以推断河水以层间流的形式于10 m左右深度流动与库区水发生混合,这一发现与前人在日内瓦湖的和新安江水库研究一致^[27,53]。平寨水库1月 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 指示垂向较为均一,可能是由于温度、溶解或悬浮物质的浓度或两者的组合的差异造成密度变化引起层间流深度变化^[6]。在平寨水库,沉降通量沿流向逐渐降低,垂向上沉降通量在水深40 m处达到最大值^[54],在垂向剖面上悬浮颗粒物C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 变化也与氢氧稳定同位素的变化一致(图7)。Sun等^[55]在平寨水库的研究表明,悬浮颗粒物的总磷含量沿流向逐渐降低,生源要素迁移受水动力条件影响。因此,氢氧同位素反映的水体混合与其他指标的结果一致。

普定水库 t 、EC及氢氧稳定同位素组成的垂向剖面在分层期并未表现出层间流的现象,且在分层期底部水的氢氧稳定同位素组成与河水一致。相反的是平寨水

库在20 m以下水体的氢氧稳定同位素高于河水,呈现更为明显的“陈化现象”。这种差异产生的原因是普定水库相对于平寨水库有更强的水动力(更短的滞留时间)和更浅的深度,导致河水进入普定水库后一部分以底流的形式流动。这得到悬浮颗粒物沉降通量变化的支持,在普定水库,颗粒沉降通量随水深增加而增大^[54],指示颗粒物在水体底层输入,与水体的氢氧稳定同位素组成相一致。

红枫湖水库1月和8月 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值在剖面变化没有平寨水库和普定水库显著。8月在HB10 m和HN10 m处 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均偏低,在HB10 m处EC存在明显变化。因此,可以推断8月红枫湖南湖和北湖可能沿水深10 m流向大坝。Wu等^[36]在红枫湖的水文-水动力耦合模型结果表明,夏季河水以底流侵入水库混合,春季以溢流侵入水库混合,南湖的流入在红枫湖水库的总流入量中占主导地位,与我们的研究结果一致。张和喜等在红枫湖的研究表明南湖羊昌河多年平均径流约是北湖麦翁河的3倍^[37],南湖较北湖入库河流径流量大、水动力更强,南

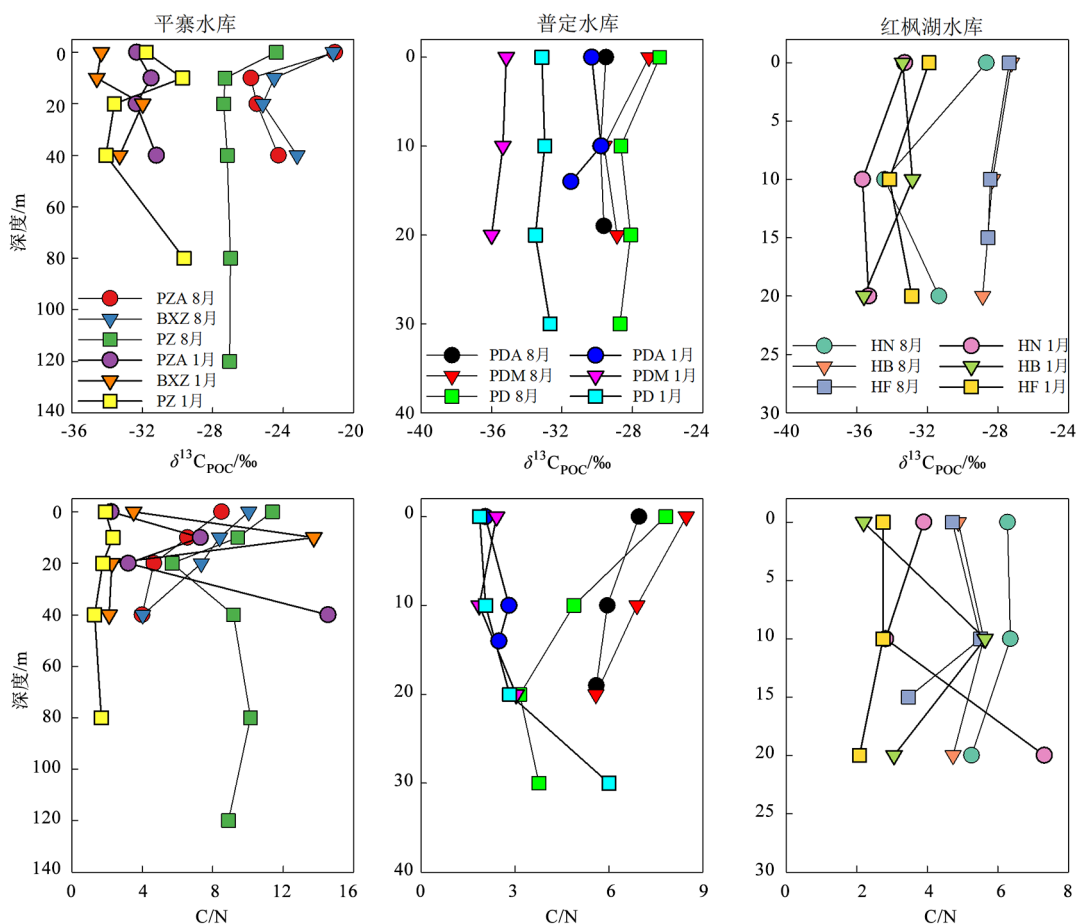


图7 平寨水库、普定水库和红枫湖水库在1月与8月的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 、C/N剖面变化(据文献[54])

Fig.7 Changes of $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 、C/N profiles in Pingzhai reservoir, Puding reservoir and Hongfenghu reservoir during January and August (from ref. [54])

湖的沉降通量远高于北湖,且其外源输入可能更多^[54]。Liu等^[56]在红枫湖水深10 m位置发现C/N、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 发生突变,外源有机颗粒物也在10 m深度处的输入。

值得注意的是,在混合期,表底层水体充分混合,入库河水与库区水体密度差异小,垂向上水体充分混合,水库垂向 $\delta^{18}\text{O}$ 没有显著差异。并且,在1月河-库水体通过氢氧稳定同位素数据显示河水输入对库区水体影响微弱。水库的水体垂向氢氧同位素均一的特征,指示冬季河水在入库之后便已经跟库区水体混合均一,与分层期混合模式不同。

对于本研究区的3个水库,氢氧稳定同位素指示的水体混合模式很好地解释了沉降颗粒物迁移过程,揭示了河-库水混合对外源悬浮颗粒物沉降的主要控制。在层间流流动深度沉降通量增加、C/N增大、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$ 偏高、内源有机碳占比下降,解释了其变化的控制因素。前人在三峡水库的研究表明,可以利用 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 解析三峡干流与典型支流大宁河的混合过程,以及量化汇流区硝酸盐的来源和干支流混合程度^[31]。并通过基于氢氧稳定同位素和优化的端元混合模型分析,解释了溶解氮的来源、转化和去向,以及其对水库生态系统的影响^[57]。Launay等^[58]利用数学模型对水库中的颗粒迁移进行研究的结果表明,悬浮颗粒物通量和沉积物累积速率的质量对颗粒参数,特别是粒度分布和水库的运行规律高度敏感,且水动力条件对水库悬浮颗粒物迁移、沉降过程具有重要影响。值得注意的是,尽管喀斯特地区的水库主要由河水补给,但地下水也有一定的贡献,并且可能会对水库的水体、沉积物及生态系统产生一定的影响^[32]。Zeng等^[59]研究表明平寨水库流域内大部分大气降水转化为地表径流,只有少量大气降水渗入地下并转化为地下水。河水主要受大气降水补给,河水通常继承降水

的氢氧同位素特征^[60]。由于本文主要讨论河水-库区水的混合过程,因此地下水与河水的相互作用对讨论结果影响较小,基于氢氧稳定同位素探讨的河水-库区水的混合过程依旧是可靠的。氢氧稳定同位素有着不受生物和化学过程影响的优势^[29-30],并且氢氧稳定同位素与水文-水动力耦合模型研究混合过程结果有很好的的一致性,这表明水的氢氧稳定同位素是示踪水体混合的有效指标。

4 结论

1) 水库氢氧稳定同位素组成时空差异的影响因素。在季节上,3个水库 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 存在季节性周期变化,库区水体夏秋季富集轻同位素,冬春季富集重同位素,受水汽来源、蒸发作用和“陈化现象”影响,河水季节性 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化受水汽来源影响。在空间上,河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 沿河流流向富集,受水库拦截和排水及海拔效应影响,水库热分层现象影响剖面上水体交换,蒸发作用导致库区表层水体富集重同位素,三岔河流域与猫跳河流域 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 差异主要受水汽自东向西迁移降雨过程的影响。

2) δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 可以示踪河-库水体混合过程。河-库水体的混合存在季节变化,可能受水体温度变化导致层间流发生上下迁移,平寨水库层间流在水深10 m附近向大坝流动,普定水库层间流在水深20 m及以下向大坝流动,红枫湖层间流在水深10 m附近向大坝流动。层间流控制水体中外源悬浮颗粒物的迁移和沉降过程,氢氧稳定同位素组成很好地解释了垂向上悬浮颗粒物沉降通量、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和内外源物质比例发生变化,对研究水库营养物质迁移过程及生物地球化学过程具有重要意义。在未来的水库研究中需要考虑层间流对生源物质迁移的影响。

参 考 文 献

- [1] Piton V, Soullignac F, Lemmin U, et al. Tracing unconfined nearfield spreading of a river plume interflow in a large lake (lake Geneva): hydrodynamics, suspended particulate matter, and associated fluxes[J]. *Frontiers in Water*, 2022, 4: 943242.
- [2] Zhao B L, Zeng Q H, Wang J H, et al. Impact of cascade reservoirs on nutrients transported downstream and regulation method based on hydraulic retention time[J]. *Water Research*, 2024, 252: 121187.
- [3] Grill G, Lehner B, Thieme M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215–221.
- [4] Vörösmarty C J, Sahagian D. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle[J]. *BioScience*, 2000, 50(9): 753–765.
- [5] Rueda F, Moreno-Ostos E, Armengol J. The residence time of river water in reservoirs[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 191(2): 260–274.
- [6] Üneş F, Joksimovic D, Kisi O. Plunging flow depth estimation in a stratified dam reservoir using neuro-fuzzy technique[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(9): 3055–3077.
- [7] Shi W H, Wang W F, Yu S D, et al. Influences of hydrodynamics on dissolved inorganic carbon in deep subtropical reservoir: insights from hydrodynamic model and carbon isotope analysis[J]. *Water Research*, 2024, 250: 121058.

- [8] Cohen S, Kettner A J, Syvitski J P M. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: continental trends and intra-basin sensitivity[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 115: 44–58.
- [9] Yin S H, Gao G Y, Ran L S, et al. Extreme streamflow and sediment load changes in the Yellow River Basin: impacts of climate change and human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129372.
- [10] Dethier E N, Renshaw C E, Magilligan F J. Toward improved accuracy of remote sensing approaches for quantifying suspended sediment: implications for suspended-sediment monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(7): e2019JF005033.
- [11] Ye L, Chen K F, Cheng J J, et al. Ecological water quality of the Three Gorges Reservoir and its relationship with land covers in the reservoir area: implications for reservoir management[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1196089.
- [12] Shi W Q, Qin B Q. Sediment and nutrient trapping by river dams: a critical review based on 15-year big data[J]. *Current Pollution Reports*, 2023, 9(2): 165–173.
- [13] Vörösmarty C J, Meybeck M, Fekete B, et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 169–190.
- [14] Brune G M. Trap efficiency of reservoirs[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1953, 34(3): 407–418.
- [15] Moragoda N, Cohen S, Gardner J, et al. Modeling and analysis of sediment trapping efficiency of large dams using remote sensing[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(6): e2022WR033296.
- [16] Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 681–686.
- [17] Guo X J, Zhu X S, Yang Z J, et al. Impacts of cascade reservoirs on the longitudinal variability of fine sediment characteristics: a case study of the Lancang and Nu Rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124343.
- [18] Wu X L, Xiang X H, Chen X, et al. Effects of cascade reservoir dams on the streamflow and sediment transport in the Wujiang River basin of the Yangtze River, China[J]. *Inland Waters*, 2018, 8(2): 216–228.
- [19] Liu S W, Li D X, Liu D C, et al. Characteristics of sedimentation and sediment trapping efficiency in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Catena*, 2022, 208: 105715.
- [20] Ran X B, Chen H T, Wei J F, et al. Phosphorus speciation, transformation and retention in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2016, 67(2): 173.
- [21] Liu X C, Joost van Hoek W, Vilmin L, et al. Exploring long-term changes in silicon biogeochemistry along the river continuum of the Rhine and Yangtze (Changjiang)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 11940–11950.
- [22] Ran X B, Bouwman L, Yu Z G, et al. Nitrogen transport, transformation, and retention in the Three Gorges Reservoir: a mass balance approach[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(5): 2323–2337.
- [23] Grimm C, Martinez R E, Pokrovsky O S, et al. Enhancement of cyanobacterial growth by riverine particulate material[J]. *Chemical Geology*, 2019, 525: 143–167.
- [24] Kravchishina M D, Lisitsyn A P, Klyuvitkin A A, et al. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes[M]//Lisitsyn A P, Demina L L, eds. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Cham: Springer, 2018: 13–48.
- [25] Kang L, He Y X, Dai L C, et al. Interactions between suspended particulate matter and algal cells contributed to the reconstruction of phytoplankton communities in turbulent waters[J]. *Water Research*, 2019, 149: 251–262.
- [26] Wang B L, Zhang H T, Liang X, et al. Cumulative effects of cascade dams on river water cycle: evidence from hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 604–610.
- [27] Halder J, Decrouy L, Vennemann T W. Mixing of Rhône river water in Lake Geneva (Switzerland-France) inferred from stable hydrogen and oxygen isotope profiles[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 152–164.
- [28] Wu H W, Huang Q, Fu C S, 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.
- [29] Wu H W, Song F, Li J, et al. Surface water isoscapes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) reveal dual effects of damming and drought on the Yangtze River water cycles[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127847.
- [30] Yang K H, Han G L. Controls over hydrogen and oxygen isotopes of surface water and groundwater in the mun river catchment, northeast Thailand: implications for the water cycle[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(3): 1021–1036.
- [31] Zhao Y Y, Zheng B H, Wang L J, et al. Characterization of mixing processes in the confluence zone between the Three Gorges Reservoir mainstream and the daning river using stable isotope analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(18): 9907–9914.
- [32] 刘小龙. 梯级水库开发对流域氮的生物地球化学过程的影响:以乌江中上游干流及支流猫跳河为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [33] Peng J, Xu Y Q, Cai Y L, et al. The role of policies in land use/cover change since the 1970s in ecologically fragile karst areas of southwest China: a case

- study on the Maotiaohe watershed[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(4): 408–418.
- [34] Gao J B, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of Karst soil erosion: a case study of a peak-cluster depression basin in southwest China[J]. *Catena*, 2019, 172: 369–377.
- [35] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征[J]. *科学通报*, 2008, 53(16): 1935–1941.
- [36] Wu B B, Wang G Q, Wang Z G, et al. Integrated hydrologic and hydrodynamic modeling to assess water exchange in a data-scarce reservoir[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 15–30.
- [37] 张和喜, 黄维, 梁俐, 等. 基于小波分析的红枫湖年径流变化研究 [J]. *科技通报*, 2019, 35(3): 31–38.
- [38] 向鹏, 王仕禄, 卢玮琦, 等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. *地球与环境*, 2016, 44(5): 492–501.
- [39] 肖晶, 王宝利, 张海涛, 等. 乌江河流-水库体系浮游植物功能群演替及其环境影响因子辨识[J]. *地球与环境*, 2019, 47(6): 829–838.
- [40] 马松, 魏榆, 韩翠红, 等. 喀斯特水库水化学特征及对无机碳沉积通量的指示[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1701–1713.
- [41] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- [42] Hu Y D, Liu Z H, Zhao M, et al. Using deuterium excess, precipitation and runoff data to determine evaporation and transpiration: a case study from the Shawan test site, Puding, Guizhou, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 242: 21–33.
- [43] 朱磊, 范弢, 郭欢. 西南地区大气降水水中氢氧稳定同位素特征与水汽来源 [J]. *云南地理环境研究*, 2014, 26(5): 61–67.
- [44] Zhang C, Tang Q H, Chen D L, et al. Tracing changes in atmospheric moisture supply to the drying Southwest China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(17): 10383–10393.
- [45] Hu Y D, Liu Z H, Ford D, et al. Conservation of oxygen and hydrogen seasonal isotopic signals in meteoric precipitation in groundwater: an experimental tank study of the effects of land cover in a summer monsoon climate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 284: 254–272.
- [46] 张明亮. 滇东黔西地下水氢氧同位素特征[J]. *四川地质学报*, 2019, 39(3): 508–511.
- [47] Jones M D, Cuthbert M O, Leng M J, et al. Comparisons of observed and modelled lake $\delta^{18}\text{O}$ variability[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 131: 329–340.
- [48] Gibson J J, Birks S J, Yi Y. Stable isotope mass balance of lakes: a contemporary perspective[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 131: 316–328.
- [49] MacCready P, McCabe R M, Siedlecki S A, et al. Estuarine circulation, mixing, and residence times in the Salish Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(2): e2020JC016738.
- [50] 蒲俊兵, 李建鸿, 吴夏, 等. 热分层效应控制的水库水体氢氧同位素特征[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 561–568.
- [51] Pang Z H, Kong Y L, Li J, et al. An isotopic geoinicator in the hydrological cycle[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17: 534–537.
- [52] Peng T R, Huang C C, Wang C H, et al. Using oxygen, hydrogen, and tritium isotopes to assess pond water's contribution to groundwater and local precipitation in the pediment tableland areas of northwestern Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450/451: 105–116.
- [53] Luo J J, Hu Z H, Chen X P, et al. Chlorophyll maxima layer in a large subtropical reservoir (Xinjiang Reservoir): spatial development process and limitation by CO_2 and phosphorus[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118912.
- [54] Wei Y, Yan H, Liu Z H, et al. The ballast effect controls the settling of autochthonous organic carbon in three subtropical karst reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151736.
- [55] Sun H L, Han C H, Liu Z H, et al. Nutrient limitations on primary productivity and phosphorus removal by biological carbon pumps in dammed karst rivers: implications for eutrophication control[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127480.
- [56] Liu X L, Li S L, Wang Z L, et al. Sources and key processes controlling particulate organic nitrogen in impounded river-reservoir systems on the Maotiao River, southwest China[J]. *Inland Waters*, 2018, 8(2): 167–175.
- [57] Wang D, Han G L, Hu M M, et al. Biogeochemical processes of dissolved nitrogen in the backwater zone of a tributary in Three Gorges Reservoir, China: implications from the hydrologic processes and isotopic tracing[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2022, 6(8): 2104–2113.
- [58] Launay M, Dugué V, Faure J B, et al. Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 591–605.
- [59] Zeng C, He C, Liu Z H, et al. Storage capacity of a karst groundwater reservoir associated with a large dam in a humid subtropical canyon karst area in southwestern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2022, 30(7): 1989–2012.
- [60] Kendall C, Coplen T B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1363–1393.

Investigating River-reservoir Mixing Processes Using Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes

MA Song^{1,2,3}, WEI Yu⁴, HAN Cuihong⁵, SUN Hailong², BAO Qian⁶,
LI Dong^{2,3}, ZHAO Min³, YAN Hao^{4,*}

(1. Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang 550014, China; 2. China State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. College of construction Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China; 6. Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: Investigating the impact of river dams on the water cycle in karst regions, stable isotope compositions of hydrogen and oxygen (δD , $\delta^{18}\text{O}$) were employed to elucidate the river-reservoir water mixing dynamics. Water samples from rivers and reservoir profiles were collected five times between March 2018 and January 2019 from three karst reservoirs with varying hydrodynamic conditions. Significant spatial and temporal variations in stable hydrogen and oxygen isotope compositions within the study area were found. δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of river water are controlled by upstream reservoir trapping and discharge and precipitation. The water in reservoirs was enriched in heavy isotopes in June and depleted in October. Seasonal variations in δD and $\delta^{18}\text{O}$ in reservoirs were mainly controlled by riverine input and the residence time, and affected by evaporation. Stratification within the reservoir limited the exchange between surface and bottom water, leading to the observed δD and $\delta^{18}\text{O}$ variations in the water columns. Discrepancies in $\delta^{18}\text{O}$ between the Sancha River Basin and the Maotiao River Basin primarily stemmed from different water vapors from east to west. Differences in stable hydrogen and oxygen isotope compositions between river and reservoir waters could be used to trace the river-reservoir mixing processes. Due to the seasonal variations in water temperature, mixing occurred at the depth of approximately 20 m in the Puding Reservoir, whereas it was around 10 m in the Pingzhai Reservoir. Similarly, in the Hongfenghu Reservoir, the river water flowed at the depth of 10 m towards the dam, with interlayer flow contributing to the influx of external substances. These processes have impacted the spatial patterns of suspended particulate sedimentation fluxes, C/N ratios, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ values, and endogenous and exogenous compositions, implying the river-reservoir mixing processes is important for nutrient migration and biogeochemical transformations within reservoir waters.

Keywords: karst reservoir; cascade reservoirs; hydrogen and oxygen isotopes; mixing process