

金沙江梯级水库氢氧同位素指示的分层及累积效应*

周容丹^{1,2}, 包宇飞², 王雨春², 杜彦良^{2**}, 王世岩², 刘畅², 毕二平¹, 温洁²

(1: 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

(2: 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038)

摘要: 梯级大坝的建设对河流水文循环和水生态环境产生了深远的影响。本文对金沙江下游 4 个梯级深大水库(水深 > 150 m), 依次为乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝, 在丰水期热分层期间的氢、氧同位素值(δD 和 $\delta^{18}O$) 进行垂向测定, 探究同位素指示下水源、气象及水库建设的分层动力学等对河流水循环的作用。通过 MixSIAR 模型对研究区水体来源进行定量分析, 得到偏枯年份(2023 年)的丰水期大气降水和冰川融水为金沙江下游的主要水源补给, 占比分别为 89.8% 和 10.2%。水源的占比在丰、枯水年, 以及年内的丰、枯水期内发生变化, 表现为丰水期水库入流的氢氧同位素值相对高于枯水期。热分层期间, 受蒸发、地下水和支流等因素的综合影响, 库区同位素值在垂向剖面上呈现复杂的差异性。层化现象导致水体垂向交换减弱, 通过垂向二维数值模型反演, 表温层水域流动性快, 携带丰水期水体信息, 而深层的滞温层水体表现为混合期冬、春季节枯水期水体的滞留特性。上游乌东德库区位于干热河谷区, 表层水体的氘盈余均值低至 -26.40‰ , $\delta^{18}O$ 均值为 -11.15‰ , 表层蒸发效应显著高于其余 3 个水库。此外, 部分垂线底层水体 δD 值的变化反映了乌东德水库坝前、白鹤滩近库尾及溪洛渡坝前的底层水体均受地下水入渗影响。大坝拦截增加了水体的水力停留时间, 加强了蒸发富集作用, 从库尾至坝前, 乌东德、白鹤滩和向家坝水库的 $\delta^{18}O$ 值均具有逐渐上升的趋势。梯级水库的累积效应主要表现为表层水体的 δD 均值从上游(-115.62‰)至下游(-100.66‰)逐渐升高, $\delta^{18}O$ 均值呈先降低后升高的波动增长趋势, 乌东德水库的 $\delta^{18}O$ 均值最高, 而白鹤滩水库的 $\delta^{18}O$ 均值(-15.36‰)最低。本研究可为流域系统调度管理提供理论参考。

关键词: 梯级水库; 氢氧同位素; 分层效应; 累积效应; 分层水动力; 蒸发富集; MixSIAR 模型

Hydrogen and oxygen isotope indicated thermal stratification and accumulation effects of cascade reservoirs in Jinsha River*

Zhou Rongdan^{1,2}, Bao Yufei², Wang Yuchun², Du Yanliang^{2**}, Wang Shiyang², Liu Chang², Bi Erping¹ & Wen Jie²

(1: School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, P.R.China)

(2: Department of Water Ecology and Environment China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

Abstract: The construction of cascade dams had profound impacts on the riverine hydrological cycle and ecological environment. In this study, vertical measurements of hydrogen (δD) and oxygen ($\delta^{18}O$) isotope were carried out in 4 deep reservoirs (water depth > 150 m) in the lower Jinsha River, named Wudongde Reservoir (WDD), Baihetan Reservoir (BHT), Xiluodu Reservoir (XLD), and Xiangjiaba Reservoir (XJB), during the wet season with thermal stratification, to investigate the roles of water sources, stratification dynamics, and meteorology, as indicated by the isotope values. Based on the quantitative analysis of water sources area by using the MixSIAR model, the results showed that in the dry year (2023), atmospheric precipitation and ice-melt were the main water sources of the lower reaches of the Jinsha River, accounting for 89.8% and 10.2%, respectively. The proportions of these two sources changed in the wet and dry years, as well as the dry and wet seasons in a year. $\delta^{18}O$ and δD in runoff were typically higher

* 2024-04-18 收稿; 2024-08-26 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U2040211, U2340224, 42107283)资助。

** 通信作者; E-mail: duy1@iwhr.com。

during wet seasons compared to dry seasons. The vertical profiles of these values showed complex variability influenced by thermal stratification, evaporation, groundwater inflow, and tributaries. Thermal stratification impaired vertical exchanges. The 2D numerical model results indicated that the rapid flow in the middle and lower epilimnion carried the information of the wet period, while water in the hypolimnion reflected stagnant conditions of the previous months during dry seasons. WDD Reservoir, situated in a dry-hot valley, experienced significant surface evaporation effects. The average deuterium excess of surface water was low at -26.40‰ , and the average $\delta^{18}\text{O}$ was -11.15‰ . The surface evaporation effect was significantly higher than other reservoirs. In addition, changes in vertical δD indicated influence from groundwater infiltration in bottom waters near WDD, reservoir tail of BHT, and XLD. Dam interception increased hydraulic retention time and enhanced evaporation. $\delta^{18}\text{O}$ of WDD, BHT and XJB gradually increased downstream from the reservoir end to the dam front. Cascade reservoirs cumulatively caused surface water δD to increase from -115.62‰ of upstream to -100.66‰ of downstream, while average $\delta^{18}\text{O}$ initially decreased and then raised. WDD had the highest average $\delta^{18}\text{O}$, with BHT the lowest (-15.36‰). This study can provide theoretical references for the basin management of the reservoir regulations.

Keywords: Cascade reservoirs; hydrogen and oxygen isotopes; stratified effect; accumulation effects; stratified hydrodynamics; evaporation enrichment; MixSIAR model

河流是陆海水循环的通道,水库大坝拦截破坏了河流的连续性,增加了水力停留时间(HRT)和水分蒸发^[1-3],水库群对径流的调节改变了河流生物地球化学循环过程,影响河流生态系统^[4-5]。长江流域至2017年已建大坝52601座,占全国已建大坝的一半以上^[6],大坝建设产生的累积效应及其对流域水循环、物质循环和生态环境演变的影响一直是国内外关注的热点。

河流中的氢氧稳定同位素对当地环境条件的变化敏感,通常用作水体迁移、转化的溯源和追踪,以及水汽来源的指示^[7-10]。具有区域同位素信息的支流及通江湖泊汇入长江干流,总体上干流同位素值具有沿程增加的趋势^[2],中下游的洞庭湖和鄱阳湖因滞水和蒸发效应,出湖同位素值均高于长江干流^[11-12]。水库建设运行体现类似湖泊的滞留和蒸发效应。长江干流库容最大的三峡水库调和了上游支流带来的不均匀性,在水库下游表现出均匀特性^[13]。嘉陵江梯级水库表层水体的同位素值沿程有偏正的趋势,梯级水库的多次拦截导致末级草街水库的氢同位素值(δD)和氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)的年内均值(-55.5‰ 和 -8.7‰)高于首级亭子口水库(-61.7‰ 和 -9.5‰)^[14]。乌江4座梯级水库出流水体相比入流的同位素值发生改变, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈阶梯式增加^[15]。与1980s相比,21世纪前15年长江流域水库群的建设使水循环在出海口处滞后一个月^[16]。长江上中游干支流电站的陆续完工将持续对长江下游水循环产生深远影响。

受降雨、季节性蒸发和水文流入等因素作用,河、湖水体的氢氧同位素值在年内丰、枯水期呈现显著的差异性,与1月相比,5月长江中下游的大部分湖泊(鄱阳湖、巢湖等)受到较强的蒸发富集作用^[17]。深大水库分层期,表层水体受蒸发富集影响,底层水体受分层取水措施(缓解低温水下泄)的影响,滞留时间增加,当分层结束,水体垂向均匀混合,底层水体得到更新^[18]。五里峡分层水库的氢氧同位素值呈现表层水>入库水体>变温层>底层水>出库水体的垂向分布特征^[19]。泸沽湖 $\delta^{18}\text{O}$ 值在垂向上呈现出明显的季节变化,丰水期 $\delta^{18}\text{O}$ 值的垂向分层与热分层位置基本一致,在垂向上的最大差值约为 1.5‰ ,相关性分析表明水温、pH和DO等都不是影响其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的主要因素^[20]。热分层导致乌江梯级水库的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着深度的增加而减小,然而,影响水体同位素值垂向变化的机理较为复杂,针对分层梯级水库水体的运动及混合特性,关于氢氧同位素值的垂向分布特征及驱动鲜有研究。水库表层水体受外界降水、蒸发及水动力条件等影响,深层水体受地下水、滞留时间等影响,要探究梯级水库同位素值时空分布的机理相当复杂,同时对于水库调度及其方式对水循环影响的认识也并不充分。

为了定量分析水体来源,可通过模型进行计算,如两端元线性混合模型^[21]。但对于多个来源的复杂水体系统,线性混合方法适用性降低,贝叶斯混合模型(MixSIAR)包含与多种来源有关的判别因子,能够辨别各类水体的转化关系,考虑各类来源的不确定性和复杂性,更加精确地计算出水源的贡献率^[22-23],相比于传统的线性混合模型更具优势^[24],被广泛运用。

本文以金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝4座梯级水库为研究对象,对丰水期分层水体进行采集,测定分析氢氧同位素,结合数值模型结果,以期明晰热分层水库中氢氧同位素值的空间分布特征,

揭示热分层水库在水深上的变化驱动,进一步厘清大型梯级水库对水循环的累积效应,增进认识水库大坝拦截和热分层对河流水文过程的影响,提高水库调度管理能力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样方法

选择长江—金沙江下游的 4 座大型梯级水库展开研究,上游至下游依次为乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝水库,水库基本呈首尾相联,位于川、滇两省交界处(图 1),其中乌东德库区属于典型的干热河谷气候区,年均气温较高,在 20~27 ℃ 之间,年均降水量小,仅为 600~800 mm,年均潜在蒸发量约为 3850 mm,远大于降水量^[30]。

乌东德和白鹤滩水电站于 2021 投入生产,分别是世界第 7 和第 2 大水电站。溪洛渡和向家坝水电站分别于 2015 年和 2012 年建造完成,溪洛渡是世界第三大水电站。4 座水库中,白鹤滩水库的正常蓄水库容 (190.06 亿 m³) 最大,HRT(57.44 d) 最长。从上游到下游,4 个梯级水库在各坝址断面的年平均流量分别为 3830、4090、4380 和 4570 m³/s。

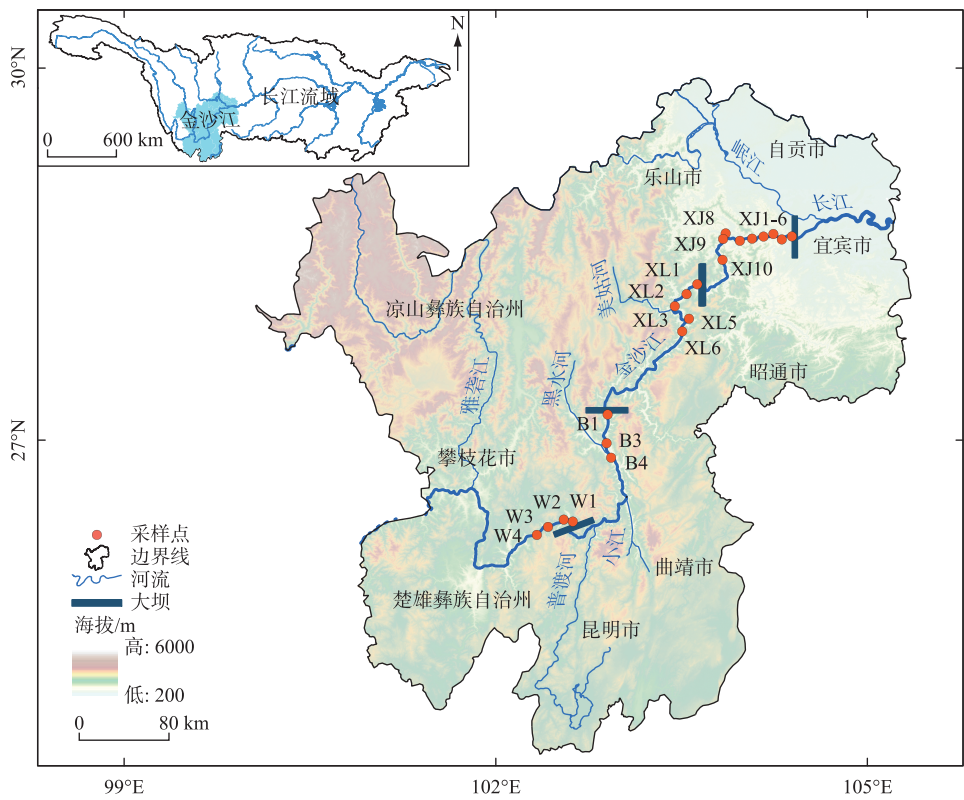


图 1 研究区域采样点分布 (W、B、XL、XJ 依次代表乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝,下同)
Fig.1 Distribution of sampling sites in the study area (W, B, XL, XJ represents Wudongde, Baihetan, Xiluodu and Xiangjiaba in turn, the same below)

2023 年 6 月底至 7 月初,对 4 个梯级水库进行分层采样,水库中沿程共计 21 个采样断面(图 2),4 座梯级水库均为狭长形河谷型水库,纵向上考虑河流形态变化及支流的汇入影响,在有支流汇入的干流下游水域布设监测采样点。现场采用多参数分析仪(YSI)测定垂向水库水温、溶解氧和 pH 等。

为了解深大水库氢氧同位素在深度上的变化,首先通过 YSI 测定垂向水温,确定变温层深度,分别在表层、底层及变温层内进行水样采集。20 m 以上深度分为 4 层,分别为表层、5 m、10 m 和 20 m,20 m 以下深度

分 1~3 层不等,详见图 2。

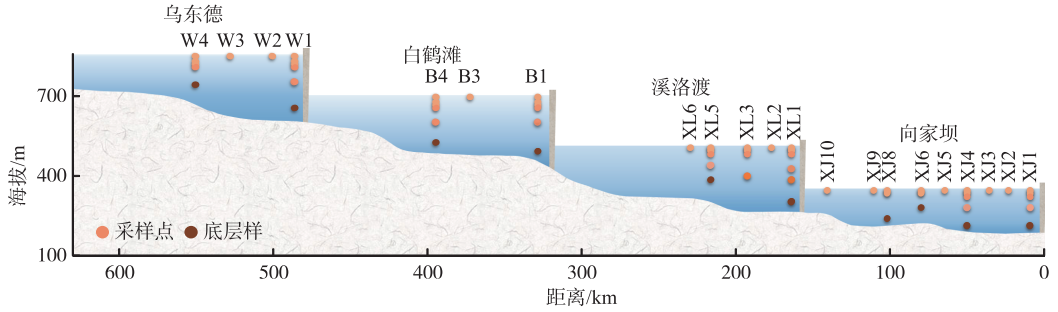


图 2 采样点垂向剖面示意图(标号为 1 的垂线表示近坝位置)

Fig.2 Schematic illustration of vertical profile of sampling sites
(The vertical line with the label 1 indicates the location of the near dam)

1.2 测试与分析方法

1.2.1 氢氧同位素测定 在中国水利水电科学研究院水生态环境研究所进行氢氧同位素测定,将水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,用 LGR 液态水同位素分析仪(DLT-100,型号: 908-0008)测试分析氢氧同位素组成,测量的结果 δ 用 V-SMOW 的千分之差来表示, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.2.2 同位素溯源模型 采用贝叶斯混合模型(MixSIAR),来计算氢氧同位素中不同水源的贡献率。MixSIAR 模型由 3 个子模型构成,每个子模型有一个给定参数的数据采样模型和先验分布,并使用 $g(\cdot)$ 来识别一般的概率分布^[25]。基本方程详见公式(1)~(4):

$$L_s = \prod_{s=1}^s g(\mathcal{D}_s | \delta_s, \Sigma_s) g(\delta_s, \Sigma_s) \quad (1)$$

$$L_D = \prod_{e=1}^E g(\mathcal{D}_{Te} | \delta_{Te}, \Sigma_{Te}) g(\delta_{Te}, \Sigma_{Te}) g(\mathcal{D}_{De} | \delta_{De}, \Sigma_{De}) g(\delta_{De}, \Sigma_{De}) \quad (2)$$

$$L_c = g(\mathcal{B} | \pi, \Sigma_b, \Theta) g(\pi) g(\Sigma_b) \quad (3)$$

$$\Theta = (\delta_1, \dots, \delta_s, \delta_1, \dots, \delta_{De}, \delta_1, \dots, \delta_{Te}) \quad (4)$$

式中, L_s 代表来源, $\mathcal{D}_s$ 为来自第 s 个源总体的随机样本,样本大小为 K_s , δ_s 为来源中的氢氧同位素值, $g(\mathcal{D}_s | \delta_s, \Sigma_s)$ 是 K_s 个多元正态密度的乘积,先验 $g(\delta_s, \Sigma_s)$ 需要指定, L_D 代表被富集/消耗的量, $\mathcal{D}_{De}$ 和 $\mathcal{D}_{Te}$ 的同位素值分别在 $N(\delta_{De}, \Sigma_{De})$ 和 $N(\delta_{Te}, \Sigma_{Te})$ 分布, L_c 代表混合数据。

1.2.3 α 指标法 通过年平均径流量和水库总库容的比值判断水库结构类型,了解水库水温分层的稳定性。

$$\alpha = \frac{\text{年平均径流量}}{\text{水库总库容}} \quad (5)$$

当 $\alpha < 10$ 时,为稳定分层型水库;当 $10 \leq \alpha \leq 20$ 时,为过渡型水库;当 $\alpha > 20$ 时,为混合型水库。

1.2.4 同位素补给高程计算方法 根据同位素值与高程变化曲线,可以求得某一采样点的补源给高程,计算公式为:

$$H = \frac{\zeta_s - \zeta_p}{k} + h \quad (6)$$

式中, H 代表补给源高程(m), h 代表采样点标高(m), k 代表同位素随高度的变化梯度(n‰/m), ζ_s 代表采样点的同位素值, ζ_p 代表大气降水的同位素值。

1.2.5 库区垂向二维水动力-水温模型 为探究同位素垂向分异的动力学驱动机制,构建了溪洛渡水库垂向二维模型(CE-QUAL-W2),对年内的水动力、水温等进行模拟。流量、水位及气象等数据来源于水文年鉴和中国长江三峡集团有限公司。同时,采用 ERA5 数据集分析研究区的蒸发作用。

2 结果分析与讨论

2.1 水库同位素来源及量化分析

2.1.1 水库同位素来源 研究区域 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的变化范围分别在 $-15.91\text{‰} \sim -10.38\text{‰}$ 和 $-128.30\text{‰} \sim -96.40\text{‰}$ 之间, 平均值分别为 -13.72‰ 和 -106.86‰ 。图 3 中大部分的数据点分布在金沙江下游流域大气降水线 (CLMWL) 右下方, 水库主要受到大气降水的作用。水库 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 数据点离散程度较大, 重同位素富集, 表明梯级水库中的氢氧同位素可能受到蒸发富集作用的影响。

Craig 于 1961 年首次提出全球大气降水线 (GMWL): $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ^[7]。Dansgaard 于 1964 年提出了降水稳定同位素的 5 大效应: 温度效应、纬度效应、大陆效应、高程效应以及降水量效应^[36]。金可等根据金沙江下游流域大气降水中氢氧同位素数据, 得出 CLMWL: $\delta\text{D} = 6.98\delta^{18}\text{O} - 1.33$ ($R^2 = 0.91$, $n = 221$)。CLMWL 的截距和斜率小于 GMWL, 说明当地大气降水受到了非平衡的二次蒸发作用^[26,30]。

丰水期, 水库水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值显著低于流域大气降水和上游攀枝花丰水年丰水期水体的同位素值, 但与枯水年丰水期攀枝花水体的同位素值相近 (表 1、图 3), 表明除了大气降水, 水库还存在其他水源补给。金沙江发源于格拉丹冬雪山, 受到冰川的融水补给, 源头雪山 (格拉丹东、普若岗日冰原、可可西里马兰) 的冰川 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -15.2‰ ^[27], 低于水库水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值, 表明冰川融水是水库水体的另一补给来源。

表 1 丰、枯水年攀枝花水体氢氧同位素组成

Tab.1 Hydrogen (δD) and oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) in water of Panzhihua in wet and dry years

年份	典型年	水期	$\delta^{18}\text{O} / \text{‰}$	$\delta\text{D} / \text{‰}$	d-excess/ ‰	文献来源
2006 年 4 月	枯水年	枯水期	-15.40	-112.00	11.20	[29]
2006 年 8 月	枯水年	丰水期	-14.40	-107.20	8.00	[28]
2018 年 8 月	丰水年	丰水期	-12.67	-89.30	12.06	[26]

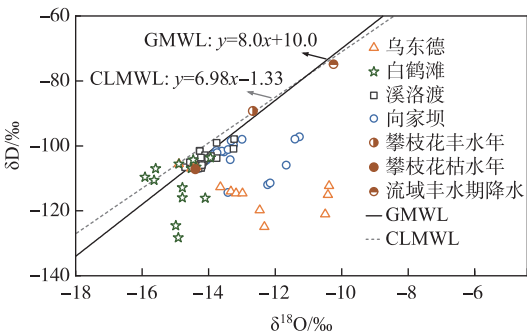


图 3 丰水期研究区内 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 之间的关系 (金沙江下游流域丰水期大气降水数据来自文献 [28])

Fig.3 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the study area during wet season (Data on atmospheric precipitation during the wet season in the lower reaches of Jinsha River are from literature [28])

丰、枯水年/期不同补给来源的占比发生变化, 金沙江下游水体的氢氧同位素值具有明显的年际变化和季节变化特征。枯水年高温干旱, 降雨产流减小, 冰川消融强烈, 水库上游攀枝花断面水体的同位素值呈现丰水年高于枯水年的年际变化特征 (图 3)。2023 年为偏枯水年, 丰水期水库水体的同位素均值与枯水年丰水期攀枝花水体的同位素值相近, 推测水库水体同位素值具有与攀枝花水体相似的丰水年高于枯水年的特征。同样, 丰水期大气降水占比增加, 攀枝花丰水期 (2006 年 8 月) 水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值^[29] 高于枯水期 (2006 年 4 月) (表 1)^[30]。丰水期, 离攀枝花最近的、受梯级水库影响相对小的乌东德库尾 W4 垂线的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值 (-13.7‰ 和 -107.7‰) 与攀枝花枯水年的丰水期水体同位素值接近, 水库水体与上游攀枝花水体具有相似的季节变化特征, 即丰水期水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值高于枯水期。

2.1.2 水源的量化分析 因一期采样数据量有限,本次监测时段代表了金沙江下游段枯水年的丰水期,采用 MixSIAR 模型来量化丰水期研究区两大主要水源:大气降水和冰川融水的贡献率。将丰水期监测的所有数据输入模型,丰水期雷波和元谋大气降水同位素值作为大气降水来源^[31-32],因缺乏源头雪山的 δD 值,以丰水期横断山脉明永冰川的同位素值^[33]代替源头雪山作为冰川来源,得到研究区调查时段大气降水和冰川融水的贡献率分别为 89.8% 和 10.2%。

丁梯平等估算枯水年(2007 年 7 月)上游青海玉树的直门达水文站冰川融水比例为 40%^[34]。根据收集的径流资料做线性推算,直门达水文站 2007 年的径流量为 $4.35 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$,乌东德水库上游的三堆子站和向家坝水库附近的屏山站当年的径流量约为直门达水文站径流量的 2.4 和 3 倍,估算出三堆子站冰川融水比例约为 17.0%,屏山站约为 13.5%,与 MixSIAR 模型结果大致相近,体现了计算的合理性。

2.2 水库同位素空间分布及分层

根据 α 指标法判定水库分层类型,白鹤滩水库属于稳定分层型,溪洛渡水库属于过渡型,乌东德和向家坝水库属于混合型。对 4 个深大水库的监测表明,6 月底水库出现了垂向的热分层现象,水库分层稳定性由高至低分别为:白鹤滩、溪洛渡、乌东德和向家坝水库。

受到水库的热分层影响,表层水体同位素富集,将水库同位素值按深度进行分层,除了溪洛渡水库外,其他水库的同位素组成没有明显的分层现象(图 4)。乌东德水库 HRT 相对较短(17.71 d),同位素值分层不明显, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值波动范围分别为 $-14.89\text{‰} \sim -10.38\text{‰}$ 和 $-124.97\text{‰} \sim -105.59\text{‰}$ 。除表层水体外,坝前 W1 垂线的各层水体均显示出一定的氧漂移和较低的 δD 值。

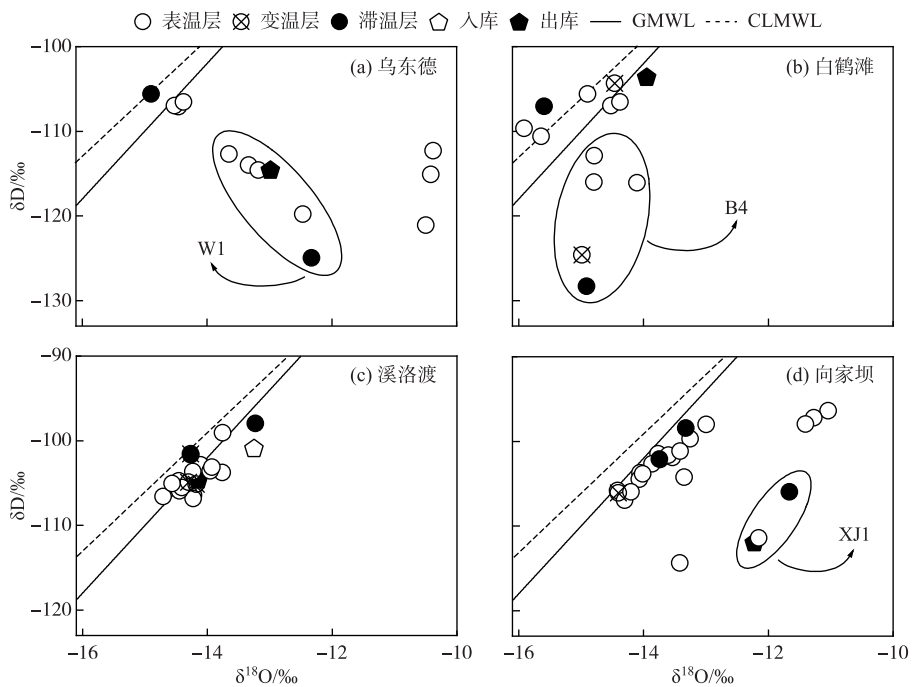


图 4 金沙江梯级水库分层期间不同位置 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的相关关系

Fig.4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD at different areas in the stratified cascade reservoirs in Jinsha River

白鹤滩水库的热分层最稳定,但同位素值分层不明显。在相对较长的 HRT(57.44 d)下,蒸发作用不断累积,白鹤滩出库水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值(-14.89‰ 和 -105.59‰)大于入库水体(-15.64‰ 和 -110.60‰), $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的变化区间分别为 $-15.51\text{‰} \sim -13.95\text{‰}$ 和 $-128.3\text{‰} \sim -103.68\text{‰}$ 。忽略与 W1 垂线具有相似特征的库尾 B4 垂线的数据,白鹤滩的采样点大致沿 CLMWL 分布,在垂向上表现出:出库水体>变温层>表温层>滞温层>入库水体的分层特征(>表示偏正),与前人研究结果相似,即水库同位素值从表层向底部逐渐

贫化^[35]。

大库容的白鹤滩水库对下游起调和作用,使得溪洛渡水库的同位素值波动较小,水样点分布较为集中, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值波动范围分别为 $-14.71\text{‰} \sim -13.23\text{‰}$ 和 $-106.84\text{‰} \sim -97.95\text{‰}$ 。同时溪洛渡水体具有乌东德水库两倍的 HRT,为水库的分层创造了良好的条件。溪洛渡水库的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值在垂向上的分布特征均为:滞温层>入库水体>出库水体>变温层>表温层,同位素值从入库到出库,从底层到表层逐渐偏负。

水深和 HRT 最小的向家坝水库同位素值无明显的分层现象, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的变化区间分别为 $-14.42\text{‰} \sim -11.04\text{‰}$ 和 $-114.36\text{‰} \sim -96.40\text{‰}$ 。向家坝水库大部分采样点沿着 GMWL 分布,部分表层和坝前 XJ1 垂线的水体发生了氧漂移,同位素特征表现为出库水体>入库水体。

2.3 表层水体同位素变化特征及影响因素

水库表层水体容纳大气降水和蒸发富集,氢氧同位素组成沿河流方向呈现出特定的变化模式。水库表层水温有先升高后降低的趋势,其中白鹤滩的平均水温($27.72\text{ }^{\circ}\text{C}$)明显高于其他水库(图 5)。通常,大气降水中的同位素受水汽来源、降水量、温度和高程等因素的共同作用^[36-37]。金可等^[30]的研究表明金沙江下游流域大气降水中的同位素值受气温和降水量的影响较大,并给出金沙江流域的大气降水氢氧同位素值与高程梯度的线性方程: $\delta^{18}\text{O} = -0.0015\text{H} - 6.04$ (图 6),即金沙江流域海拔每升高 100 m , $\delta^{18}\text{O}$ 值降低 0.15‰ 。然而,水库 $\delta^{18}\text{O}$ 值均落在高程梯度线性方程的下方,且 $\delta^{18}\text{O}$ 值与海拔呈正相关关系($R^2 = 0.21$),与高程效应相悖,表明高程效应对水库的影响不大。

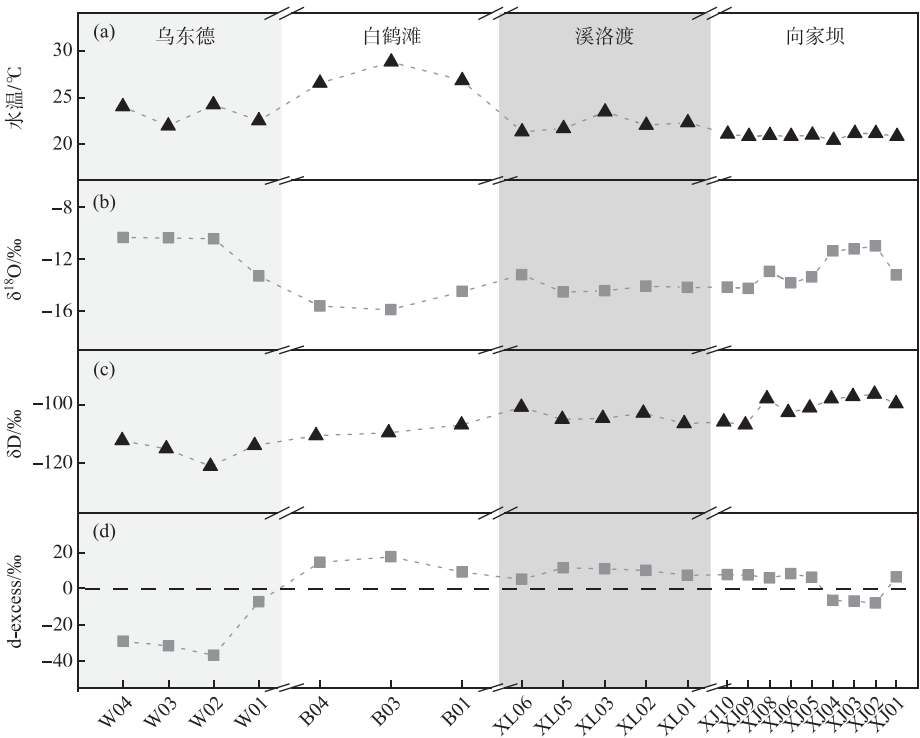


图 5 金沙江梯级水库表层水温、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d-excess 值沿程变化

Fig.5 Variations of surface water temperature, $\delta^{18}\text{O}$, δD and d-excess of cascade reservoirs in Jinsha River

在雨水“反温度效应”和“降水量效应”的共同作用下, $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出与水温相反的先降低后升高的趋势,乌东德水库 $\delta^{18}\text{O}$ 均值(-11.15‰)最高,白鹤滩水库 $\delta^{18}\text{O}$ 均值(-15.36‰)最低,乌东德与白鹤滩 $\delta^{18}\text{O}$ 值的较大差异,体现了乌东德水库受到较强的蒸发富集作用。筑坝后蒸发作用加强,在一些景观水体也表现出同位素值比自然河流更富集^[38]。

水库所有采样点的氘盈余 ($d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}O$) 均值为 2.88‰ , 低于全球 $d\text{-excess}$ 均值 (10‰), 表层水体 $d\text{-excess}$ 值从小到大依次为: 乌东德 (-26.40‰)、向家坝 (2.21‰)、溪洛渡 (8.93‰)、白鹤滩 (13.77‰), 乌东德的蒸发分馏效应最强 (图 5)。 $d\text{-excess}$ 值可以反映区域水体受到蒸发富集的程度^[36]。 降水中 $d\text{-excess}$ 值比 $\delta^{18}O$ 值更加稳定, 随着蒸发量的增加 $d\text{-excess}$ 值减小^[39]。 $d\text{-excess}$ 出现负值表明水库水体受到了强烈的蒸发分馏作用。 乌东德和向家坝水库的表层水体 $d\text{-excess}$ 存在负值, 并在坝前显著上升, 表明在水库的中下段水体蒸发作用最强, 在坝前区域相对减弱。 采用 ERA5 数据集, 金沙江下游流域月均水面蒸发量依次为乌东德>白鹤滩>溪洛渡>向家坝 (图 7)。

2.4 分层水库同位素垂向分布及驱动分析

2.4.1 垂向分层特征 水库发生热分层后, 水体混合减弱, 同位素值在垂向上差异较大 (图 8)。 乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝的变温层分别在 $80\sim 100$ 、 $50\sim 80$ 、 $60\sim 90$ 和 $60\sim 90$ m 之间。 乌东德和白鹤滩水库均具有双层变温结构 (10 m), 乌东德水库表层 10 m 处水温由水面的 $23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 白鹤滩水库水面与 10 m 处的温差较大 ($5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$), 溪洛渡水库变温层温差为 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 向家坝水库变温层平均水温为 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温差为 $2.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

乌东德和白鹤滩水库的 10 m 处 $\delta^{18}O$ 值显著降低, 随后呈不同程度上升, 溪洛渡和向家坝水库也具有类似的特征 (图 8)。 与 $\delta^{18}O$ 值不同的是, 乌东德和白鹤滩水库在 10 m 处的 δD 值明显上升, 推测这一现象与水库的水动力特征有关。 由于水文资料滞后, 以溪洛渡水库为例对 2021 年水文和水温过程进行模拟, 揭示深大水库于丰水期热分层后垂向同位素值的动力学驱动机制。

通过对溪洛渡水库水动力和水龄进行模拟, 发现水库形成稳定的分层后, 水库表温层存在流速较快的水平流, 同一垂线中 10 m 处的水体相对较新, 同位素值表现出不同的特征。 乌东德库尾附近 W4 垂线的 $\delta^{18}O$ 值总体上小于坝前 W1 垂线, W1 垂线 10 m 处 $\delta^{18}O$ 值相对较低, 继承了上游 W4 垂线较低的 $\delta^{18}O$ 值, δD 值变化同理。

表温层的中下水域纵向流速相对较高, 同样水体更新较快, 丰水期 6 月下旬来水在库尾 XL5 垂线的流速大于近坝 XL1 垂线, 而 XL1 垂线的滞温层水体几乎未受到丰水期来水的影响, 水体滞留, 比表温层水体滞后了近 3 个月 (图 9), 与谢奇珂的模拟结果相似^[40]。

乌东德、溪洛渡和向家坝水库坝前垂线的 $\delta^{18}O$ 值随深度的增加而增大, 白鹤滩水库坝前的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值呈现出随深度的增加而减小的趋势, 符合强蒸发富集作用的垂向特征。 溪洛渡水库近库尾的 XL5 垂线受同位素值偏正的丰水期来水的影响, 变温层附近的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值明显升高。 相对于 XL5, 近坝 XL1 垂线受丰水期来水影响较小, 在变温层附近仅 δD 值明显升高。 XL1 垂线的底层水体滞留, 理应具有偏枯水期的较低同位素值, 但其呈现出接近甚至高于变温层的 δD 值, 因此, XL1 垂线的底层可能存在地下水输入。 乌东德水库近坝 W1 垂线的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值具有与溪洛渡水库近坝 XL1 垂线相似的变化特征, 乌东德坝前区域也

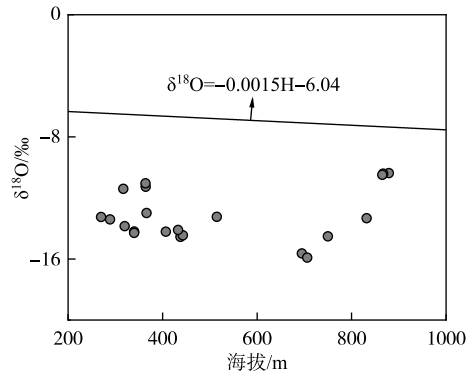


图 6 金沙江梯级水库 $\delta^{18}O$ 同位素高程效应

Fig.6 Elevation effect of $\delta^{18}O$ of cascade reservoirs in Jinsha River

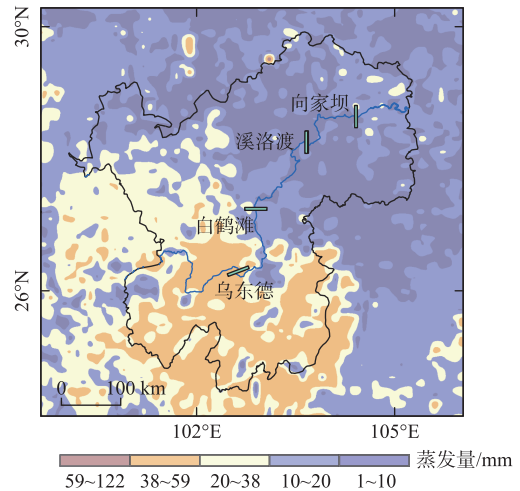


图 7 金沙江下游流域 6 月水面蒸发量

Fig.7 Water surface evaporation in the lower Jinsha River basin in June

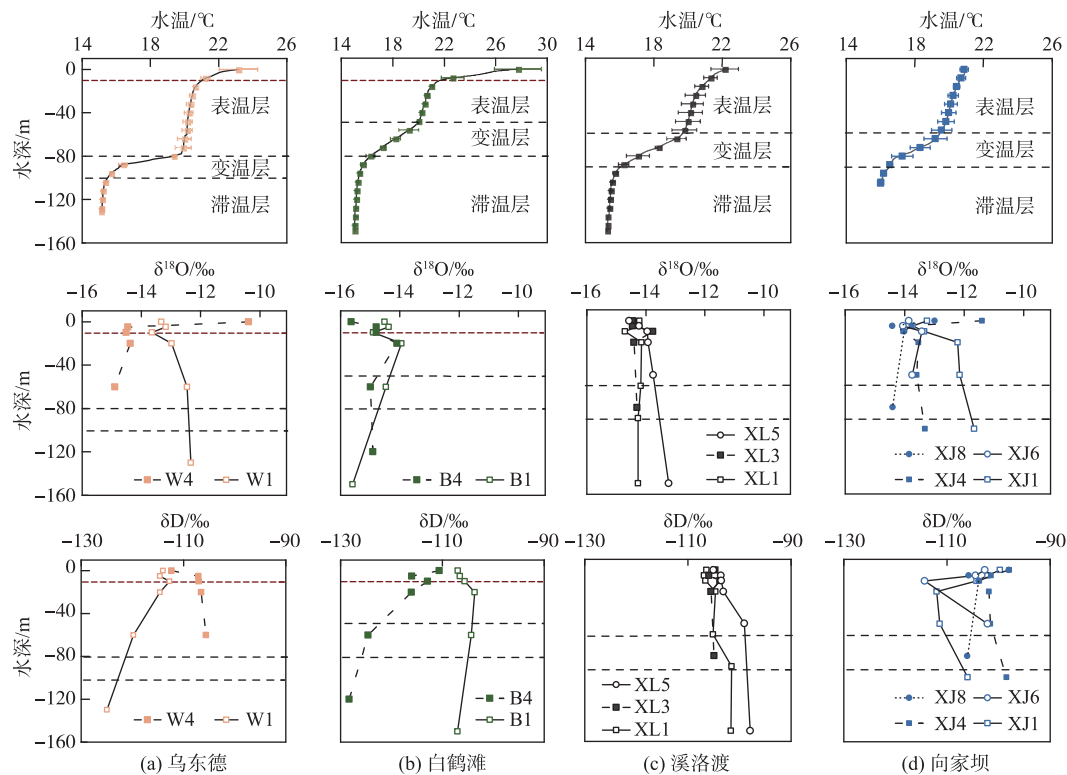


图 8 金沙江水库水温、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的垂向变化

Fig.8 Vertical variation of water temperature, $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the cascade reservoirs in Jinsha River

可能存在地下水的入渗。热分层最稳定的白鹤滩水库,近坝 B1 垂线受丰水期来水影响,水深 10 m 以下的表温层 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值逐渐升高,滞温层水体滞留,同位素值偏负。向家坝水库的同位素值在变温层附近也呈现出上升的趋势。

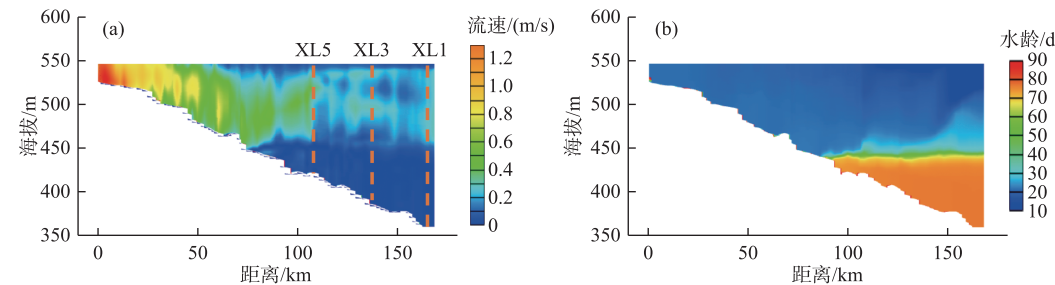


图 9 2021 年 6 月 30 日溪洛渡水库流速 (a) 和水龄 (b) 分布

Fig.9 Profile of velocity (a) and water age (b) distribution of Xiluodu Reservoir on June 30, 2021

2.4.2 地下水输入影响 通常,沿河流方向同位素值会因蒸发作用的影响和 HRT 的增长而呈现上升的趋势。在乌东德近坝 W1 垂线的 δD 值明显低于库尾附近 W4 垂线,此外, W1 垂线和白鹤滩近库尾 B4 垂线的 δD 值随水深的增加而显著降低, W1 垂线的 δD 值从表层的 -114‰ 降低至底层的 -124.97‰ 。表明乌东德水库的坝前区域和白鹤滩库尾区域可能存在地下水汇入,导致水库底层水体的 δD 值异常偏低。

金沙江下游流域 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的高程梯度分别为 $-0.15\text{‰}/100\text{ m}$ 和 $-1.05\text{‰}/100\text{ m}$ ^[28],根据氢氧同位素

与高程的关系,得出水库水体的补给源高程(表 2)。乌东德水库近坝 W1 垂线和溪洛渡水库近库尾 B4 垂线的底层水体补给高程接近,比 W4 和 B1 垂线高出 1 km 以上,即 W1、B4 垂线和 W4、B1 垂线的补给来源不同。溪洛渡水库近坝前 XL1 垂线的补给高程略高于近库尾 XL5 垂线。

乌东德水库蓄水前后,坝址区域均受到地下水的影 响,近坝址 W1 垂线和白鹤滩近库尾 B4 垂线的 δD 值变化特征与地下水的输入有关。在乌东德水电站施工过程中,坝址区域存在稳定流量达 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 的岩溶地下水^[41]。在水库蓄水之后,于 2020 年 6 月发现渗漏问题,渗漏水来源主要为远源地下水补给^[42]。

2.5 梯级水库的累积效应

从库尾至坝前,乌东德、白鹤滩和向家坝库区内的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均具有逐渐升高的趋势(图 8)。这与前人研究一致,如三峡水库干流的同位素值从上游(宜宾)到下游(巫山)逐渐富集重同位素^[43]。丰、枯水期,澜沧江云南段水体 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均有沿程升高的趋势^[44]。乌东德近坝前 W1 垂线的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -12.99‰ ,高于库尾 W4 垂线的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值(-13.72‰)。白鹤滩近坝前 B1 垂线的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值(-14.63‰)高于库尾 B4 垂线(-14.87‰),向家坝的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值从大到小依次为:库尾 XJ1 垂线(-12.73‰)>XJ4 垂线(-13.27‰)>XJ6 垂线(-13.77‰)>坝前 XJ8 垂线(-13.96‰)。

梯级水库蓄水后,随着水体滞留时间的增加,库区水体的蒸发富集作用增强,在梯级水库群的累积下,同位素值具有沿程增加的趋势(图 5)。

4 座梯级水库的总 HRT 约为 4 个月(125 d),水体中氢氧同位素的富集程度相对增强,整体上, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值从上游到下游逐渐升高,类似乌江蓄水后梯级水坝的累积效应使河段的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 从上游到下游呈现锯齿状增强^[15]。在梯级大坝的累积作用下, δD 值从乌东德到向家坝水库逐渐升高,表层水体的 δD 均值依次为乌东德(-115.62‰)<白鹤滩(-109.08‰)<溪洛渡(-104.00‰)<向家坝(-100.66‰)。表层水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现阶梯式上升,在较强的蒸发分馏作用下,乌东德的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值最高, $\delta^{18}\text{O}$ 均值依次为白鹤滩(-15.36‰)<溪洛渡(-14.12‰)<向家坝(-12.86‰)<乌东德(-11.15‰)。

3 结论

本文对金沙江下游 4 座梯级水库丰水期分层期间的氢氧稳定同位素进行采样分析,探究了热分层水库中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的空间分布特征,结合数值模型,揭示了梯级水库的层化和累积效应的驱动及影响因子。

1)金沙江下游乌东德一向家坝段,在枯水年的丰水期表现出较低的同位素值, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值变化范围分别在 $-15.91\text{‰} \sim -10.38\text{‰}$ 和 $-128.30\text{‰} \sim -96.40\text{‰}$ 之间,主要来源为大气降水和冰川融水,占比分别为 89.8% 和 10.2%。

2)水库分层期间,受蒸发、地下水入渗及支流等影响,同位素值呈现垂向异质化,表层主要为蒸发效应,乌东德水库最显著,表层水体 d-excess 均值低至 -26.40‰ ,低于全球 d-excess 均值,某些区域受支流汇入影响,表层水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值低于变温层。表温层中下水域水体流速较快,HRT 较短,携带上游丰水期的同位素值,而底部滞温层表现为冬、春季枯水期的同位素滞留特性。同时,乌东德水库坝前、白鹤滩近库尾和溪洛渡坝前的底部水域存在地下水的入渗作用。

3)梯级水库不断累积蒸发效应和 HRT,导致乌东德、白鹤滩和向家坝水库的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值呈现出坝前高于库尾的特征,且表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿河流方向呈先降低后升高的波动增长趋势。表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 均值依次为白鹤滩(-15.36‰)<溪洛渡(-14.12‰)<向家坝(-12.86‰)<乌东德(-11.15‰)。 δD 值从上游到下游逐渐升高, δD 均值依次为乌东德(-115.62‰)<白鹤滩(-109.08‰)<溪洛渡(-104.00‰)<向家坝(-100.66‰)。

表 2 底层水体的补给源高程

Tab.2 Recharge source elevations of the bottom water

位置	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	补给高程/m
W4 底层	-105.59	-14.89	3805.75
W1 底层	-124.97	-12.32	5604.06
B4 底层	-128.30	-14.91	5784.31
B1 底层	-107.04	-15.59	3815.20
XL5 底层	-97.95	-13.23	2637.10
XL1 底层	-101.66	-14.27	2959.15

4 参考文献

- [1] Jiang DJ, Li Z, Luo YM *et al.* River damming and drought affect water cycle dynamics in an ephemeral river based on stable isotopes: The Dagu River of North China. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**: 143682. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143682.
- [2] Wu HW, 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. *Journal of Hydrology*, 2022, **610**: 127847. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127847.
- [3] Xiong YJ, Yin J, Paw UKT *et al.* How the three Gorges Dam affects the hydrological cycle in the mid-lower Yangtze River: a perspective based on decadal water temperature changes. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(1): 014002. DOI: 10.1088/1748-9326/ab5d9a.
- [4] Zhou T, Nijssen B, Gao HL *et al.* The contribution of reservoirs to global land surface water storage variations. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, **17**(1): 309-325. DOI: 10.1175/jhm-d-15-0002.1.
- [5] Liu CQ, Wang FS, Wang YC *et al.* Responses of aquatic environment to river damming—From the geochemical view. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 384-396. [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. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 384-396.]
- [6] Xu HZ, Pittcock J. Policy changes in dam construction and biodiversity conservation in the Yangtze River Basin, China. *Marine and Freshwater Research*, 2021, **72**(2): 228. DOI: 10.1071/mf20011.
- [7] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.
- [8] Ye ZY, Wang YC, Hu MM *et al.* Hydrogen and oxygen stable isotope tracing of eco-hydrological processes in water bodies mixing the mainstream and a tributary of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2358-2366. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201708.026. [叶振亚, 王雨春, 胡明明等. 三峡水库干-支流作用下生态水文过程的氢氧同位素示踪. 生态学杂志, 2017, **36**(8): 2358-2366.]
- [9] Wang YS, Yin DC, Qi XF *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1920-1929. DOI: 10.13227/j.hjxx.202108202. [王雨山, 尹德超, 祁晓凡等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义. 环境科学, 2022, **43**(4): 1920-1929.]
- [10] Wang ZG, Li XY, Deng YH *et al.* Stable isotope tracing internal recycling and evaporation losses in saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2023, **903**: 166614. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166614.
- [11] Wu HW, Huang Q, Fu CS *et al.* Stable isotope signatures of river and lake water from Poyang Lake, China: Implications for river-lake interactions. *Journal of Hydrology*, 2021, **592**: 125619. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125619.
- [12] Zhang YN, Gan YQ, Li XQ *et al.* Water chemical characteristics and controlling factors of the Yangtze River in the wet season, 2013. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(4): 645-654. [张亚男, 甘义群, 李小倩等. 2013 年长江丰水期河水化学特征及控制因素. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(4): 645-654.]
- [13] Deng K, Yang SY, Lian EG *et al.* Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) River water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 89-97. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.213.
- [14] Zhang J, Cui GY, Li QK *et al.* Effects of dam interception on hydrogen and oxygen isotope compositions in cascade reservoirs: A case of Jialing River. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 679-687. [张俊, 崔高仰, 李亲凯等. 筑坝拦截对梯级水库水体氢氧同位素组成的影响: 以嘉陵江为例. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 679-687.]
- [15] Wang BL, Zhang HT, Liang X *et al.* Cumulative effects of cascade dams on river water cycle: Evidence from hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2019, **568**: 604-610. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.016.
- [16] Li C, Yang SY, Lian EG *et al.* Damming effect on the Changjiang (Yangtze River) river water cycle based on stable hydrogen and oxygen isotopic records. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **165**: 125-133. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.03.006.
- [17] Li J, Song F, Bao ZC *et al.* Insights into shallow freshwater lakes hydrology in the Yangtze floodplain from stable water isotope tracers. *Water*, 2022, **14**(3): 506. DOI: 10.3390/w14030506.
- [18] Du YL, Liu XW, Liu XB *et al.* Turnover characteristics and dissolved oxygen responses in a large stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, **54**(7): 785-793, 805. [杜彦良, 刘小蔚, 刘晓波等. 大型分层水库翻库特性及溶解氧响应研究. 水利学报, 2023, **54**(7): 785-793, 805.]
- [19] Pu JB, Li JH, Wu X *et al.* Hydrogen and oxygen isotope characteristics controlled by thermal stratification effect in a subtropical reservoir, SW China. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 561-568. [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. 水科学进展, 2016, **27**(4): 561-568.]
- [20] 文新宇. 泸沽湖热力学及其水体稳定同位素研究[学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2019.
- [21] Dawson TE, Pate JS. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation. *Oecologia*, 1996, **107**(1): 13-20. DOI: 10.1007/BF00582230.
- [22] Moore JW, Semmens BX. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 2008, **11**(5):

- 470-480. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01163.x.
- [23] 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.
- [24] Wang J, Lu N, Fu BJ. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 685-693. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.262.
- [25] Erhardt EB, Bedrick EJ. A Bayesian framework for stable isotope mixing models. *Environmental and Ecological Statistics*, 2013, **20**(3): 377-397. DOI: 10.1007/s10651-012-0224-1.
- [26] Wu HW, Fu CS, Zhang CC *et al.* Temporal variations of stable isotopes in precipitation from Yungui Plateau: Insights from moisture source and rainout effect. *Journal of Hydrometeorology*, 2022, **23**(1): 39-51. DOI: 10.1175/jhm-d-21-0098.1.
- [27] Kang SC, Zhang YJ, Qin DH *et al.* Ice core evidence of recent sharp warming in the source area of the Yangtze River on the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(4): 457-462. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2007.04.014. [康世昌, 张拥军, 秦大河等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据. 科学通报, 2007, **52**(4): 457-462.]
- [28] Li SL, Liu CQ, Li J *et al.* Assessment of the sources of nitrate in the Changjiang River, China using a nitrogen and oxygen isotopic approach. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(5): 1573-1578. DOI: 10.1021/es902670n.
- [29] Ding TP, Gao JF, Tian SH *et al.* Chemical and isotopic characteristics of the water and suspended particulate materials in the Yangtze River and their geological and environmental implications. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2014, **88**(1): 276-360. DOI: 10.1111/1755-6724.12197.
- [30] Jin K, Yu J, Zhang QZ *et al.* Hydrogen and oxygen stable isotopic characteristic and moisture sources of precipitation in the lower Jinsha River Basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(5): 26-34. [金可, 于江, 张乾柱等. 金沙江下游流域大气降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源. 长江科学院院报, 2024, **41**(5): 26-34.]
- [31] 罗芳芳. 云南元谋干热河谷水分特征的环境同位素研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [32] Han QZ, Zeng KF, Liang X. Study on δD and $\delta^{18}O$ isotopes of precipitation in the Leibo Area, Southwest Sichuan. *Geological Science and Technology Information*, 1998, (S2): 107-111. [韩庆之, 曾克峰, 梁杏等. 川西南雷波地区降水的 D 和 ^{18}O 同位素研究. 地质科技情报. 1998, (S2): 107-111.]
- [33] Kong YL, Wang K, Pu T *et al.* Nonmonsoon precipitation dominates groundwater recharge beneath a monsoon-affected glacier in Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(20): 10913-10930. DOI: 10.1029/2019JD030492.
- [34] Ding TP, Gao JF, Shi GY *et al.* Spatial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 2013, **87**(5): 661-676. [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. 地质学报, 2013, **87**(5): 661-676.]
- [35] Sang LY, Zhu GF, Xu YX *et al.* Effects of agricultural large-and medium-sized reservoirs on hydrologic processes in the arid Shiyang River Basin, Northwest China. *Water Resources Research*, 2023, **59**(2): e2022WR033519. DOI: 10.1029/2022WR033519.
- [36] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
- [37] Zhang XP, Guan HD, Zhang XZ *et al.* Simulations of $\delta^{18}O$ in precipitation using isotopic atmospheric water balance model. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(5): 1058-1068. [章新平, 关华德, 张新主等. 利用稳定同位素大气水平衡模式模拟降水中 $\delta^{18}O$ 的分布. 冰川冻土, 2014, **36**(5): 1058-1068.]
- [38] Zhu GF, Sang LY, Zhang ZX *et al.* Impact of landscape dams on river water cycle in urban and peri-urban areas in the Shiyang River Basin: Evidence obtained from hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2021, **602**: 126779. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126779.
- [39] Hu YD, Liu ZH, 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, **242**: 21-33. DOI: 10.1016/j.gca.2018.08.049.
- [40] 谢奇珂. 河流水深水库水温结构昼夜性与季节性变化规律研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2020.
- [41] 章旭. 乌东德水电站坝址左岸地下水系特征及地下水环境影响研究[学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [42] Tang XD, Wang JJ, Wang ZF *et al.* Analysis on the source of local leakage in the construction branch tunnel of Wudongde hydropower station. *Yangtze River*, 2023, **54**(S1): 62-67. [唐晓丹, 王建军, 王梓帆等. 乌东德水电站施工支洞局部渗漏来源分析. 人民长江, 2023, **54**(S1): 62-67.]
- [43] Wang D, Han GL, Hu MM *et al.* Evaporation processes in the upper river water of the Three Gorges Reservoir: Evidence from triple oxygen isotopes. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021, **5**(10): 2807-2816. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00207.
- [44] Yu JY, Ma J, Yang ZJ *et al.* An analysis of the water body traceability of the total phosphorus sources and retention effects of cascade reservoirs in the Lancang River. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (3): 94-101, 119. [余君妍, 马骏, 杨正健等. 基于水体溯源的澜沧江梯级水库水体总磷来源及滞留效应分析. 中国农村水利水电, 2023, (3): 94-101, 119.]