

刘佳佳, 王宝成, 王蕾, 等. 三峡水库与太湖蒸发特征及其影响因素的对比研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 162-172. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.012

LIU Jiajia, WANG Baocheng, WANG Lei, et al. Comparative analysis of evaporation and influencing factors between Three Gorges Reservoir and Taihu Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 162-172. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.012

# 三峡水库与太湖蒸发特征及其影响因素的对比研究

刘佳佳<sup>1</sup>, 王宝成<sup>2</sup>, 王蕾<sup>1</sup>, 韩松俊<sup>1</sup>, 张宝忠<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038; 2. 长江水利委员会水文局 长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**【目的】峡谷型水库与湖泊或湖泊型水库具有显著不同的形态特征,但在蒸发研究中常简单移植来自湖泊蒸发的认识和估算方法,可能存在显著偏差。旨在对比典型峡谷型水库(三峡水库)与湖泊(太湖)蒸发特征及影响因素的差异,从能量平衡与水汽传输角度揭示其原因,为提升对峡谷型水库蒸发生态的认识和估算精度提供支撑。【方法】基于2014—2021年三峡水库巴东漂浮蒸发站和2014—2018年太湖平台山通量站的长期观测数据,从水体储热变化与水汽传输特征角度出发,通过二者月蒸发量变化、储热变幅、蒸发扩散系数与气象因子之间的关系,对比分析两类水体的蒸发差异及其影响因素。【结果】研究表明:三峡水库巴东段月蒸发量呈现独特的8月和12月双峰特征,而太湖表现为8月单峰且仅滞后1个月;三峡水库巴东段储热变幅(-12.1~14.4 mm/d)显著高于太湖(-0.97~0.97 mm/d),深水储热效应导致二者蒸发与水温季节变化差异明显;三峡水库蒸发扩散系数与水平风速的相关性较弱,未表现出显著依赖关系,在水汽温差为正的情况下保持稳定,而在水汽温差为负的逆温期增强,相比之下太湖蒸发的扩散系数受水平风速显著影响,且随水汽温差的增大而增强。【结论】三峡水库等峡谷型水库的蒸发特征及其能量和动力驱动与湖泊(太湖)具有显著差异,水体传热对能量平衡的影响与峡谷地形导致的河谷风环流可能是其主要原因,在峡谷型水库蒸发的观测和估算等研究中不能直接采用湖泊蒸发的方法,需要构建专门针对峡谷型水库的方法。

**关键词:** 三峡水库; 峡谷型水库; 湖泊; 太湖; 水汽传输; 水体储热; 影响因素; 蒸发特征

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0162-11



听语音  
聊科研

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-05-12; 录用日期: 2025-05-12; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52130906); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室课题(SKL2024YJTS06); 中国水利水电科学研究院五  
大人才计划项目(ID0199A062021)

作者简介: 刘佳佳(2000—),女,硕士研究生,主要从事水面蒸发方面研究。E-mail: iuljj2001@163.com

通信作者: 韩松俊(1981—),男,正高级工程师,博士,主要从事蒸发理论与估算方法研究。E-mail: hansj@iwhr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## Comparative analysis of evaporation and influencing factors between Three Gorges Reservoir and Taihu Lake

LIU Jiajia<sup>1</sup>, WANG Baocheng<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, HAN Songjun<sup>1</sup>, ZHANG Baozhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Three Gorges Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, Hubei, China)

**Abstract** [Objective] Canyon-shaped reservoirs exhibit significantly different morphological characteristics compared to lakes or lake-type reservoirs. However, in evaporation studies, knowledge and estimation method derived from lake evaporation are often directly applied, which may lead to substantial biases. By comparing the evaporation characteristics and influencing factors between a typical canyon-shaped reservoir (Three Gorges Reservoir) and a lake (Taihu Lake), the differences are revealed from the perspectives of energy balance and water vapor transport, providing support for improving the understanding and estimation accuracy of evaporation in canyon-shaped reservoirs. [Methods] Based on long-term observational data from the floating evaporation station at Badong in the Three Gorges Reservoir (2014—2021) and the Taihu Lake Platform Mountain station (2014—2018), the energy balance equation was employed to analyze the heat storage changes and water vapor transport characteristics of the two water bodies. The monthly evaporation, heat storage variations, and the relationships between the evaporation diffusion coefficient, horizontal wind speed, and water-air temperature difference were compared to uncover the driving mechanisms of evaporation in the two systems. [Results] The study revealed that: (1) The monthly evaporation of the Three Gorges Reservoir exhibits a unique bimodal pattern with peaks in August and December, with the December peak lagging five months behind the net radiation peak, while Taihu Lake shows a single peak in August with only a one-month lag. (2) The heat storage variation in the Three Gorges Reservoir (-12.1 to 14.4 mm/d) was significantly greater than that in Taihu Lake (-0.97 to 0.97 mm/d), with deep-water heat storage effects leading to distinct seasonal variations in evaporation and water temperature between the two. (3) The evaporation diffusion coefficient in the Three Gorges Reservoir shows weak correlation with horizontal wind speed and no significant dependency, remaining stable under positive water-air temperature differences but increasing during inversion periods. In contrast, Taihu Lake's vapor transfer coefficient was influenced by wind speed and increased with the water-air temperature difference. [Conclusion] The evaporation characteristics of canyon-shaped reservoirs like the Three Gorges Reservoir and their energy and dynamic drivers differ significantly from those of lakes (e.g., Taihu Lake). The impact of water heat transfer on energy balance and valley wind circulation induced by topographic effects are likely the primary causes. Therefore, lake-based evaporation method should not be directly applied to canyon-shaped reservoirs. Instead, specialized approaches tailored to canyon-shaped reservoirs must be developed for evaporation observation and estimation.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; canyon-shaped reservoir; lake; Taihu Lake; vapor transport; water heat storage; influencing factors; evaporation characteristics

## 0 引言

蒸发是水库(湖泊)水量损失的重要途径,全球蓄水容量仅占5%的6 715座水库的蒸发损失占142万座湖库的16%<sup>[1]</sup>。地表能量再分配的改变在气候变暖的背景下增强了湖库蒸发<sup>[2]</sup>,造成全球53%的大型湖库蓄水量大幅减少<sup>[3]</sup>。蒸发不仅对大型水体的水温结构产生显著影响,还通过改变区域气候减缓水体升温<sup>[4]</sup>。然而,目前对于这些水库蒸发的热点研究并未区分水库类型<sup>[5-6]</sup>,而是将不同类型水库都当作“人工湖泊”。

位于V形或U形河谷、在河谷中筑坝拦截河流而成的峡谷型水库具有狭长流动的深水水体,与湖泊及湖泊型水库具有明显差异。峡谷型水库凭借其显著

的调蓄能力和对河流系统的深远影响,成为水资源管理领域的重要研究对象<sup>[7-10]</sup>。我国长江、黄河和雅鲁藏布江等大江大河上已建、在建和规划的水库多为峡谷型水库。峡谷型水库具有较大的库容,我国二级至四级河流上的449座水库的总库容549 km<sup>3</sup>,占全国97 435座水库总库容的56%<sup>[11]</sup>,其蒸发损失不容忽视。由于兼具防洪、发电等功能,精准的蒸发信息对峡谷型水库调度非常重要。另外,峡谷型水库蒸发过程既通过改变能量分配(抽蓄等)影响水库(电站)水温<sup>[12]</sup>,也通过水汽通量影响局地气候,研究其蒸发规律对分析水库河流水温结构和减缓其环境效应<sup>[13]</sup>也具有重要意义。

湖库蒸发受两个重要过程影响,一是水体热量变化影响可利用的能量;二是水体与周围陆地差异引起

的局地环流影响水汽传输。比热容大和对流传热能力强的特点使水体的储热和放热潜力巨大,湖库在春夏季(白天)吸收并储存太阳辐射能量并在秋冬季(夜晚)释放,驱动蒸发相比净辐射发生季节和日内的相位偏离<sup>[14]</sup>。湖泊或湖泊型水库的水体储热主要受垂向传热影响,其程度与水深相关,然而峡谷型水库的狭长流动深水水体存在复杂的纵向热输送<sup>[15]</sup>,其通过能量收支显著影响蒸发过程。水体与邻近陆地之间的热力差异引起的水陆风显著影响湖库蒸发,如地中海海风显著影响了 Kinneret 湖的夏季蒸发<sup>[16]</sup>,导致死海日蒸发呈双峰变化<sup>[17]</sup>。坡面与大气之间热差异驱动的山谷风对山地湖库蒸发具有重要影响,如洱海的湖风在白天占主导地位,而夜间盛行的山谷风促进了蒸发<sup>[18]</sup>。水陆风与山谷风在峡谷型水库的河谷中叠加而成的局地环流显著区别于具有开阔水面的湖泊<sup>[19]</sup>,其通过改变大气的动力条件而影响蒸发水汽湍流传输<sup>[20]</sup>,造成山谷内水体蒸发过程都与湖泊或湖泊型水库存在显著差异<sup>[18, 21-23]</sup>。

受限于直接观测的困难,目前对峡谷型水库蒸发特征的认识非常有限,仅从水深角度考虑将其作为“人工湖泊”推测其滞后效应等蒸发特征<sup>[24-25]</sup>,并移植来自湖泊或湖泊型水库蒸发的方法,如 TIAN 等<sup>[5]</sup>和 ZHAO 等<sup>[6]</sup>在估算我国和美国水库蒸发中都未区分水库类型,直接采用开阔水面蒸发估算方法估算三峡水库等峡谷型水库的蒸发量。移植来自湖泊蒸发的理解和方法对峡谷型水库必然造成偏差,峡谷型水库的蒸发特征与湖泊或湖泊型水库究竟有何差异?其差异的主要影响因素是什么?为了回答这两个关键问题需要首先对比峡谷型水库与湖泊蒸发特征及其影响因素的差异。

本研究以具有长期蒸发观测的三峡水库和太湖为对象对比分析峡谷型水库与湖泊的蒸发特征及其影响因素的差异。利用三峡水库巴东站 2014—2021 年和太湖平台山站点 2014—2018 年的观测数据,首先对比蒸发量的季节变化特征,然后对比水温变化差异和水汽传输特征的差异,最后分别从水体储热变化对能量平衡的影响和河谷风环流对水汽传输的影响角度分析探讨了峡谷型水库与湖泊蒸发特征差异的原因。本文能够增进对峡谷型水库蒸发特征及其影响因素的深入理解,为构建专门针对峡谷型水库的蒸发估算方法提供基础。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究数据

三峡水库是我国最大的峡谷型水库,最大水面面

积 1 084 km<sup>2</sup>,干流河道长 660 km,水面宽仅 1 km 左右,其中 250 km 段最大水深超过 100 m 且水位变幅达 30 m。为研究水面蒸发特性,2013 年 8 月 1 日起三峡水文水资源勘测局在距三峡大坝约 71 km 的巴东河段设立了漂浮水面蒸发实验站(后称巴东站)。巴东站(110°22′32″E,31°02′56″N)位于 V 型峡谷,两岸坡面陡峭,左岸平均坡度 16.7°(山顶高程 838 m),右岸平均坡度 16.3°(山顶高程 1 160 m)(见图 1),水面宽不足 1 km,水深在 114.9~144.7 m 间浮动。距岸边约 40 m 水面上设有 270 m<sup>2</sup>的等腰三角形水面钢结构漂浮筏,高程受三峡水库运行影响在 143.3~173.3 m 之间变化。在漂浮筏上采用改进后的 E601B 型蒸发皿进行水面蒸发的观测,蒸发皿直接与江水接触能够反映水体热量变化的影响<sup>[24]</sup>,能够有效观测水库蒸发<sup>[26]</sup>。漂浮筏上设有气象站同步进行日照时数、地面以上 1.5 m 气温和湿度以及水面 4 m 以上风速的观测。考虑到三峡水库干流水体充分混合<sup>[27]</sup>,利用距漂浮筏约 100 m 处巴东水文站观测的水面 0.5 m 以下处水温作为巴东断面的水面温度。本研究收集了 2014 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日的观测数据,并利用实测的日照时数和水面温度估算净辐射<sup>[28]</sup>。

位于长江三角洲的太湖是我国第三大淡水湖,湖表面积约为 2 338 km<sup>2</sup>,湖面最大宽度为 56 km,平均水深为 1.9 m。太湖周边被农田和城市区域所环绕,地形平坦,与三峡水库形成鲜明对比(见图 1)。南京信息工程大学自 2013 年 6 月在太湖中心建立了涡度通量网进行蒸发、风速、水温、辐射等气象因子的观测<sup>[29]</sup>。平台山站(120°06′31″E,31°14′56″N)位于太湖中心,设有涡度相关(EC)观测系统、四分量净辐射传感器、小气候观测系统和水温梯度观测系统各一套,观测设备均位于 4 m×4 m 的观测台上。小气候观测系统由温湿度传感器(HMP155A, Vaisala Inc.)和风速风向传感器(5103, R. M. Young Company)构成,架设于距湖面 8.5 m 高度处。四分量净辐射传感器安装高度距离水面 2 m,表面水温利用观测的长波辐射计算<sup>[30]</sup>,并同步观测水下 20 cm、50 cm、100 cm、150 cm 4 个深度水温的观测,选取 0.5 m 水温数据对比。本研究将 2014 年 1 月 1 日 0 时至 2018 年 12 月 31 日 24 时期间平台山站半小时尺度观测数据,转换为日尺度和月尺度数据进行分析。

### 1.2 方法

研究中首先利用巴东站和平台山站的日/月尺度蒸发量数据对比分析三峡水库与太湖蒸发的季节变化

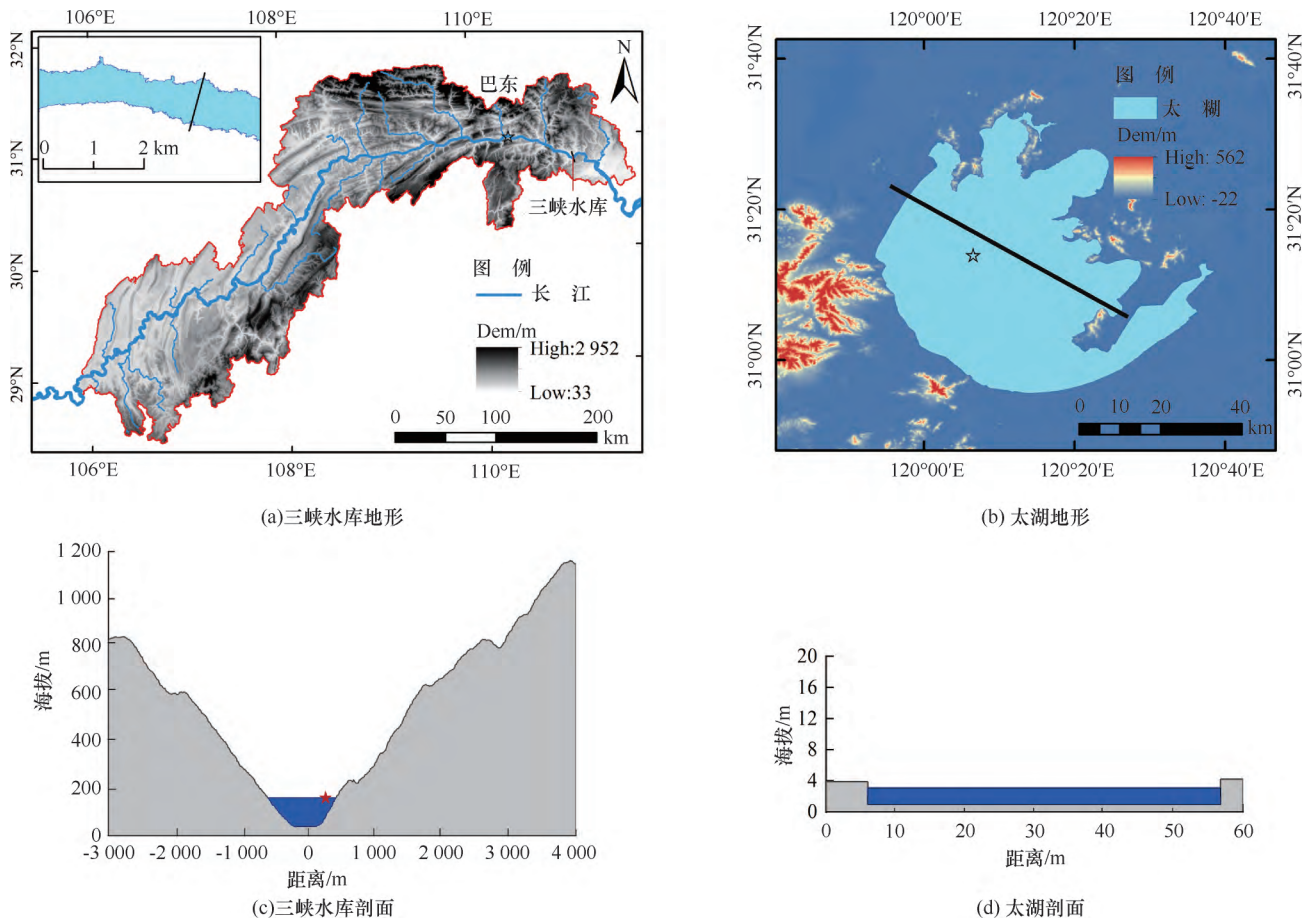


图 1 三峡水库与太湖地形及剖面图

Fig. 1 Topographic and Cross-Sectional Diagrams of the Three Gorges Reservoir and Taihu Lake

特征, 然后从能量平衡的角度对比蒸发相对净辐射的滞后时间差异。湖库等水体的能量平衡可表示为

$$R_n - \Delta Q = LE + H \quad (1)$$

式中,  $R_n$  为净辐射;  $H$  为显热通量;  $LE$  为潜热通量;  $\Delta Q$  为水体储热变化量, 受水体传热影响, 与水深等有关。

水体温度变化是反映其热量收支的重要指标, 研究中将对分析三峡水库与太湖水体储热变化。由于三峡水库干流水体充分混合, 水温不分层<sup>[15,31]</sup>, 分析中利用巴东水文站表层水温代表整个水体平均水温。太湖则分析了表面水温与 0.5 m 水温的变化。研究中进一步计算三峡水库和太湖水体储热变化并进行对比, 其中水体储热由水温计算

$$\Delta Q = \rho_w c_p \frac{\sum_{i=1}^n T_{wi} \Delta z_i}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $\bar{T}_w$  为湖泊(水库)的平均水温( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{wi}$  为湖泊(水库)每层的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta z_i$  为湖泊(水库)每层的厚度(m);  $z$  为湖泊(水库)的深度(m)。

根据湍流扩散理论, 水面蒸发可以表示为

$$E = K_e (e_s - e_a) \quad (3)$$

式中,  $K_e$  为扩散系数( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ), 反映风速、大气稳定度等气象因子对蒸发的影响;  $e_s$  和  $e_a$  分别为水面的饱和水汽压与和上部大气的实际水汽压(hPa)。

$e_s$  通过水面温度  $T_s$  计算得出

$$e_s = 6.108 e^{\frac{17.27T_s}{T_s+237.3}} \quad (4)$$

湖库水面的湍流传输通常在不稳定条件时增强, 而稳定条件下减弱<sup>[32-33]</sup>, 水气温差( $T_s - T_a$ ) 常被用于表征标准大气稳定性。研究中从水汽传输的角度对比三峡水库与太湖蒸发与水汽压饱和差( $e_s - e_a$ ) 的关系, 并分析扩散系数  $K_e$  与水平风速  $u$  和( $T_s - T_a$ ) 之间相关性的差异。

## 2 结果分析

### 2.1 蒸发量及相关气象要素的季节变化差异

三峡水库与太湖的蒸发量( $E$ ) 表现出不同的季节变化特征。三峡水库的  $E$  年均值为 876 mm(日均

2.4 mm/d), 呈现8月和12月双峰特征, 峰值分别达3.07 mm/d和3.18 mm/d, 3月为最低值(1.65 mm/d),  $E$  第二个峰值滞后7月份的净辐射峰值(5.54 mm/d) 5个月。太湖的  $E$  年均值更高(1 093 mm, 日均3.0 mm/d), 季节变化呈单峰型, 8月达峰值(5.82 mm/d), 1月为最低值(1.01 mm/d)。净辐射峰值同样在7月(5.44 mm/d),  $E$  较其仅滞后1个月。

三峡水库水汽压饱和差( $e_s - e_a$ )的季节变化也具有8月和12月的双峰特征, 但( $e_s - e_a$ )在3—7月相对更低。且水平风速较低(1.6 m/s), 不存在明显季

节分异, 变化平缓。相比之下, 太湖水汽压饱和差( $e_s - e_a$ )峰值出现在8月, 与  $E$  变化趋势一致。太湖处风速整体高于三峡水库, 均值3.9 m/s, 在春季(3—5月)风速较大达4.1 m/s。

### 2.2 影响蒸发的水温及水储热变化差异

三峡水库和太湖的水温和水体储热变化存在显著差异。三峡水库表层水温在3—8月上升, 9月一次年2月下降, 最高水温出现在8月(26.1 °C), 最低水温出现在2月(11.9 °C), 气温在2—8月上升, 9月一次年1月下降, 最高气温出现在8月(27.8 °C), 最低气温出现在1月(8.6 °C); 太湖表面水温和

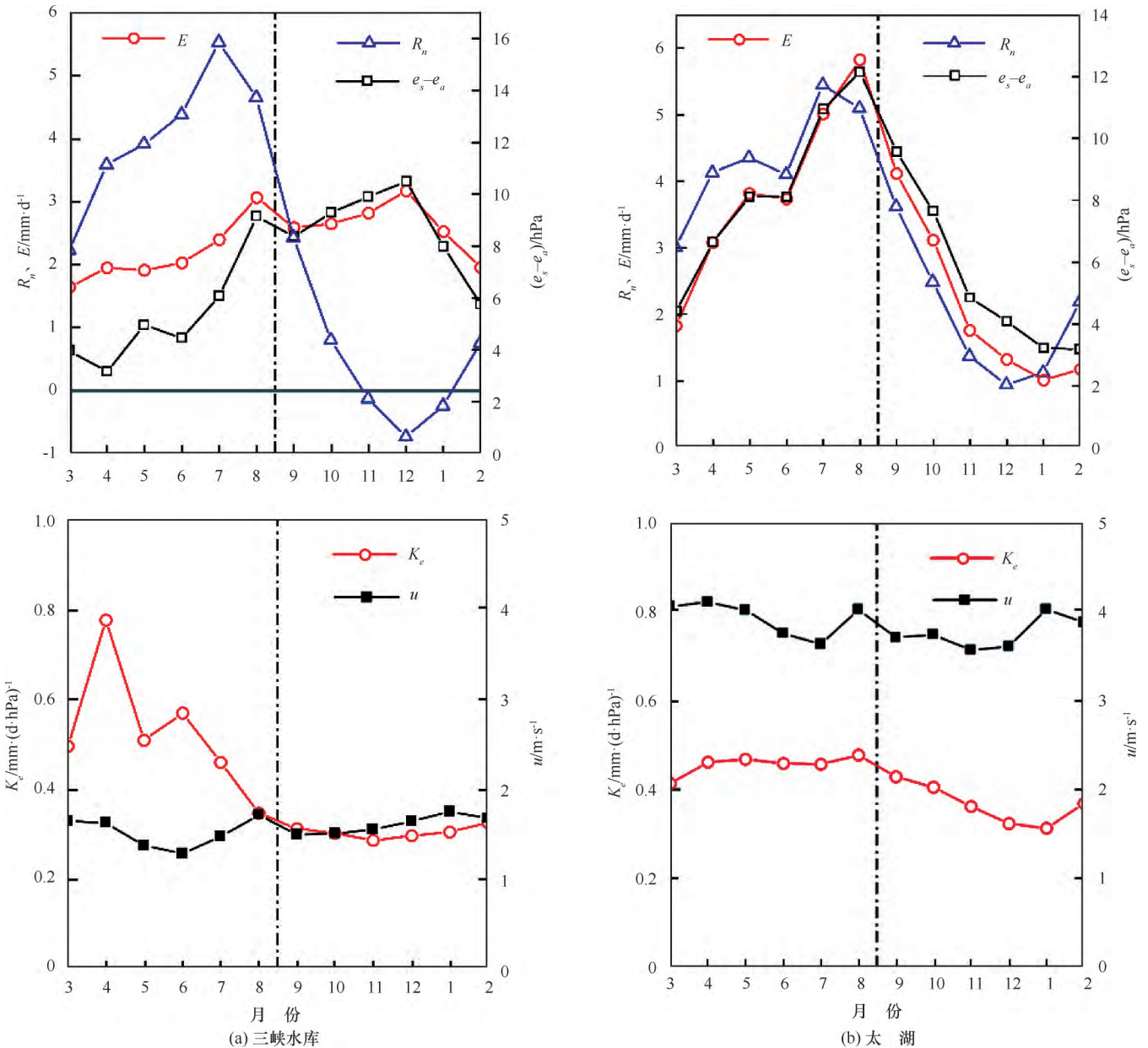


图2 三峡水库与太湖多年平均月净辐射( $R_n$ )、蒸发量( $E$ )和水汽压饱和差( $e_s - e_a$ )扩散系数( $K_e$ )与水平风速( $u$ )的季节变化  
 Fig. 2 Seasonal Variations of net radiation ( $R_n$ ), evaporation ( $E$ ), vapor pressure deficit ( $e_s - e_a$ ), and the diffusion coefficient ( $K_e$ ) in relation to horizontal wind speed ( $u$ ) in the Three Gorges Reservoir and Lake Taihu

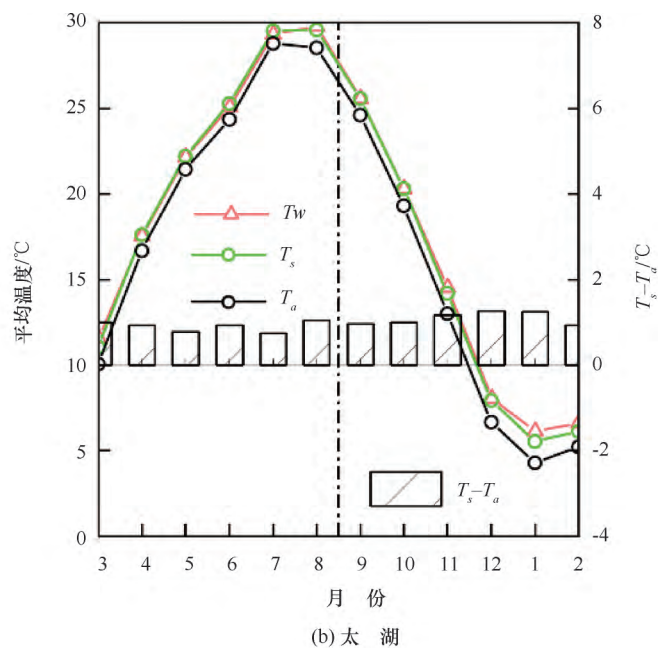
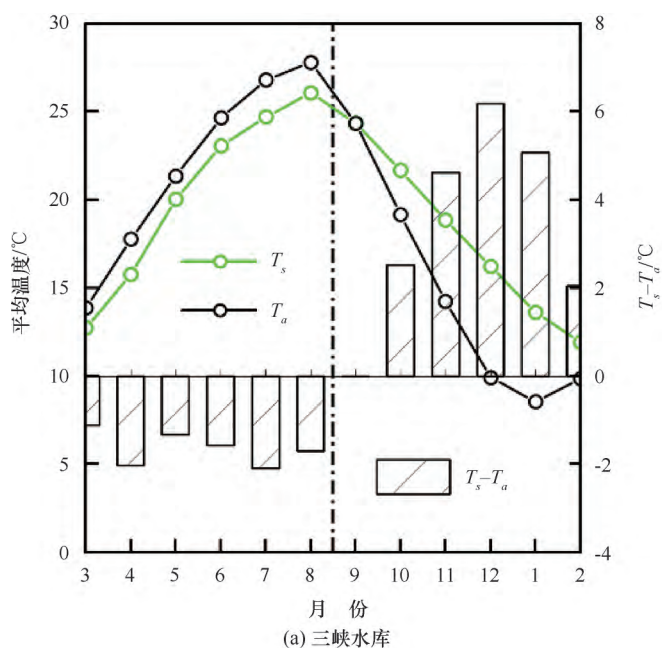


图3 三峡水库与太湖多年平均水温  $T_s$ 、气温  $T_a$  及水气温差  $T_s-T_a$  的月变化过程

Fig.3 Seasonal Variations of  $T_s$ ,  $T_a$ , and  $T_s-T_a$  in the Three Gorges Reservoir and Taihu Lake

0.5 m处水温在2—8月上升,9月—次年1月下降,最高水温出现在8月(25.6℃),最低水温出现在1月(5.6℃),气温在2—7月上升,8月—次年1月下降,最高气温出现在7月(28.8℃),最低气温出现在1月(4.3℃),水温峰值较气温滞后一个月。两站水气温差  $T_s-T_a$  的差异显著:三峡水库处水温在3—8月低于气温( $T_s-T_a$  均值为-1.65℃),在9月—次年2月则是水温高于气温( $T_s-T_a$  均值为3.40℃),而太湖处水温在月尺度上均高于气温( $T_s-T_a$  均值为1.0℃)。

三峡水库巴东断面的表层水温在3—8月上升,是水体储热期,9月—次年2月呈下降,是水体放热期。三峡水库巴东站蓄能期水面蒸发场气温(17.8℃)显著低于陆面(22.0℃),而放能期则相反(20.4℃ vs 14.3℃)。太湖的表面水温和0.5 m水温在2—7月上升,8月—次年1月下降,水体的储热和放热期都比三峡水库早一个月。计算的三峡水库储热量在-12.1~14.4 mm/d之间变化,变幅远大于水面净辐射(-0.23~5.54) (mm/d)。而计算的太湖储热量在-0.97~0.97 mm/d之间变化,变幅小于水面净辐射(0.94~5.44) (mm/d)。蓄能期水面温度(22.6℃)略高于气温(21.7℃),放能期水面气温(13.3℃)仍高于陆面(12.2℃)。从热量收支看,三峡水库蓄能期  $\Delta Q$  均值为7.80 mm/d,放能期为-8.83 mm/d;太湖蓄能期  $\Delta Q$  均值达0.69 mm/d,放能期为-0.69 mm/d。

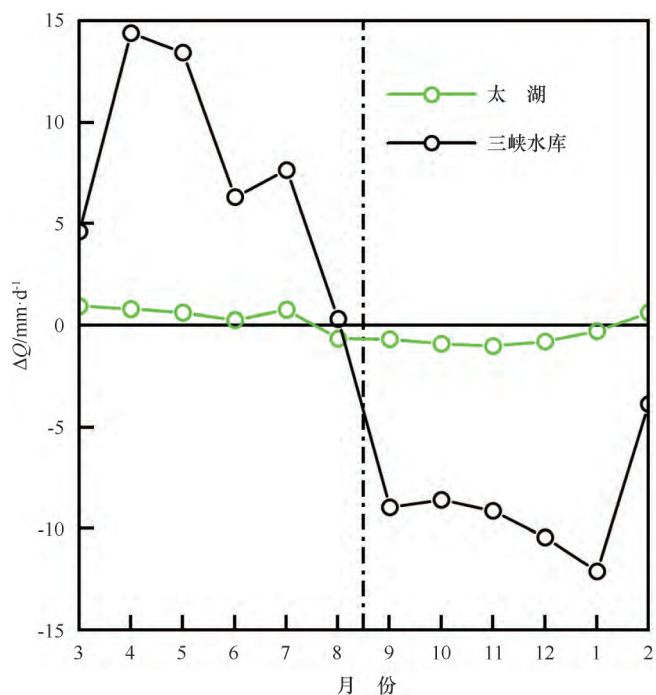


图4 三峡水库与太湖储热量 ( $\Delta Q$ ) 的季节变化

Fig.4 Seasonal variations in heat storage ( $\Delta Q$ ) between Three Gorges Reservoir and Taihu Lake

### 2.3 影响蒸发的气汽传输特征差异

三峡水库的扩散系数  $K_e$  在9月—次年2月保持平稳,均值为0.31 mm/(d·hPa),而在3—8月较大[0.53 mm/(d·hPa)]。虽然太湖3—8月的水汽扩散系数  $K_e$  [0.46 mm/(d·hPa)]也高于9月—次年2月

[0.37 mm/(d·hPa)], 但两个阶段相差较小。三峡水库在3—8月风速(1.5 m/s)小于9—2月平均风速(1.6 m/s), 而太湖在3—8月风速(3.9 m/s)略大于9月一次年2月(3.8 m/s), 这表明水平风速不能解释三峡水库蒸发扩散系数的季节变化。进一步分析日尺度  $K_e$  与水平风速  $u$  的关系可以发现, 在太湖二者显著线性相关( $y=0.09x+0.05, R^2=0.53, p<0.01$ ), 而在三峡水库没有相关性( $y=0.04x+0.23, R^2=0.07, p>0.05$ ) (见图5)。

三峡水库蒸发扩散系数  $K_e$  与水气温差( $T_s-T_a$ )在3—8月和9月一次年2月都具有显著差异(见图2和图3), 提示两者之间可能存在关联。研究期间三峡水库52个月份  $T_s-T_a$  为负, 43个月份  $T_s-T_a$  为正, 相关月份平均的蒸发量分别为  $2.23\pm0.59$  mm/d、 $2.60\pm0.50$  mm/d, 由于  $T_s-T_a$  为负月份的  $e_s-e_a$  明显低于  $T_s-T_a$  为正月份, 因此扩散系数  $K_e$  在  $T_s-T_a$  为负条件下更高(见表1)。在日尺度, 1246个  $T_s-T_a$  为负的逆温日与1563个  $T_s-T_a$  为正的逆温日的蒸发量相近[均值分别为( $2.44\pm1.17$ ) mm/d与( $2.41\pm1.14$ ) mm/d], 但由于水汽压饱和差存在显著差异( $p<0.01$ ) [均值分别为( $5.82\pm3.44$ ) hPa和( $8.21\pm3.04$ ) hPa], 因此日尺度  $K_e$  也在  $T_s-T_a$  为负条件下更高。相比之下, 太湖在研究期间月尺度上未出现  $T_s-T_a$  为负现象, 而在日尺度上逆温占比仅8.2%, 且逆温程度较小, 均值仅-0.35℃, 在逆温情况下  $K_e$  [0.42 mm/(d·hPa)] 略小于非逆温情况

[0.46 mm/(d·hPa)]。

对比分析三峡水库与太湖逆温与非逆温日的水汽传输特征可以发现, 当  $T_s-T_a<0$  时, 三峡水库  $K_e$  与  $T_s-T_a$  显著负相关( $y=-0.07x+0.32, p<0.01$ ) (见图6), 即水面逆温越强, 蒸发扩散系数越大, 但  $K_e$  与风速( $u$ ) 无显著相关性; 在  $T_s-T_a\geq 0$  条件下,  $K_e$  与  $T_s-T_a$  无显著相关性,  $K_e$  保持稳定且显著低于逆温情况。无论在逆温还是非逆温条件下, 太湖的  $K_e$  与  $T_s-T_a$  呈正相关, 即水面逆温越强蒸发扩散系数越小, 这与三峡水库明显不同。另一方面, 太湖  $K_e$  与水平风速呈显著相关性, 在非逆温条件下( $y=0.09x+0.05$ )  $R^2$  达0.56。

### 3 结果讨论

三峡水库与太湖蒸发特征及水体储热的差异表明峡谷型水库在蒸发的能量驱动上与湖泊具有不同特征。三峡水库这类峡谷型水库的深水水体储热量变化大, 导致蒸发峰值较净辐射峰值具有明显滞后, 而水气温差呈现显著的季节特征。太湖这类浅水湖泊的水体储热量变化较小, 蒸发滞后效应弱, 而水气温差无季节变化。相比浅水湖泊, 深水湖泊的储热量变化大, 导致蒸发峰值的显著滞后。如平均深度148 m、最大深度406 m的苏必利尔湖的蒸发峰值存在5个月的滞后时间<sup>[34]</sup>; 平均深度为44 m、最大深度为101 m的次北极环境的混合湖泊其潜热通量与净辐射之间存在3个月的滞后<sup>[35]</sup>, 无论浅水湖泊还是深水湖泊,

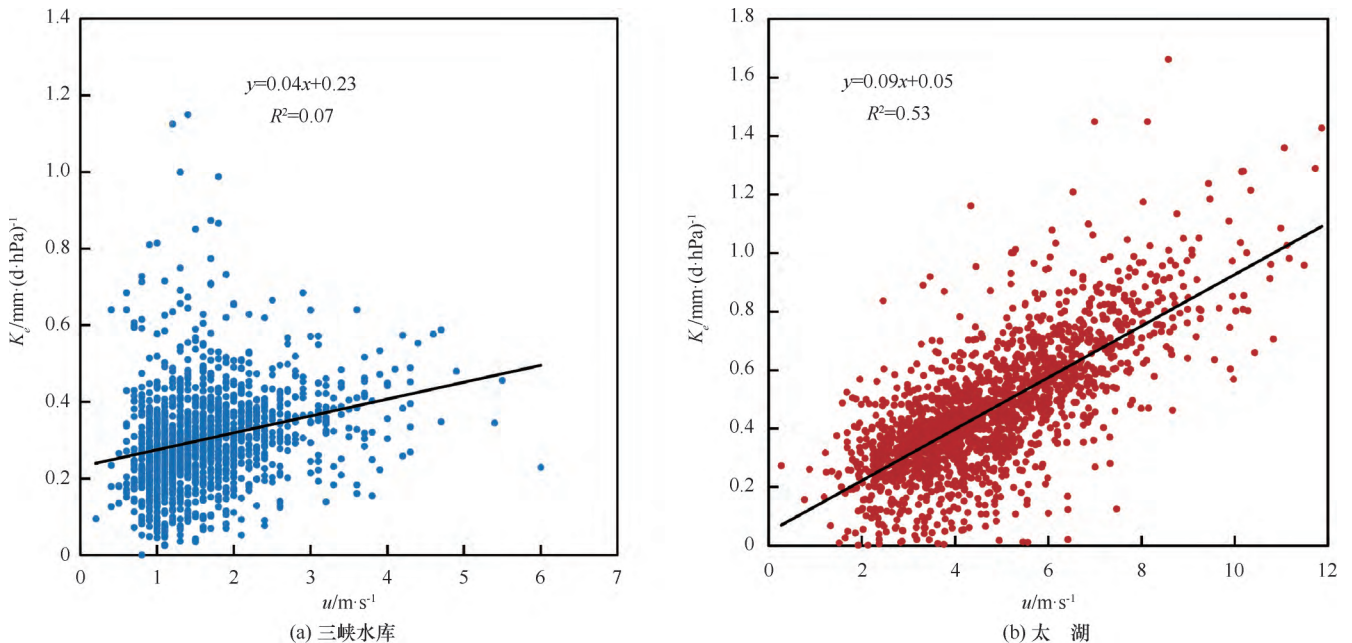


图5 三峡水库与太湖扩散系数  $K_e$  与风速  $u$  的相关性

Fig. 5 Correlation between  $K_e$  and wind speed ( $u$ ) at the Three Gorges Reservoir and Taihu Lake

表 1 三峡水库逆温与非逆温条件下蒸发量及相关气象因子的日均值与月均值对比

Table 1 Comparison of daily and monthly mean values of evaporation and related meteorological factors under inversion and non-inversion conditions in the Three Gorges Reservoir area

时 间	分 组	数据 个数	$E$ /mm · d <sup>-1</sup>	$T_s - T_a$ /°C	$e_s - e_a$ /hPa	$u$ /m · s <sup>-1</sup>	$K_e$ /mm · d <sup>-1</sup> · hPa <sup>-1</sup>
日	I	1 246	2.44±1.17	-2.25±1.39	5.82±3.44	1.39±0.62	0.47±0.29
	II	1 562	2.41±1.14	3.63±2.49	8.21±3.04	1.46±0.67	0.30±0.12
月	I	52	2.23±0.59	-1.55±0.75	5.50±2.77	1.38±0.22	0.52±0.29
	II	43	2.60±0.50	3.89±1.93	8.62±2.03	1.47±0.27	0.31±0.04

注: I 和 II 分别代表了  $T_s - T_a < 0$  与  $T_s - T_a \geq 0$  的日月组。

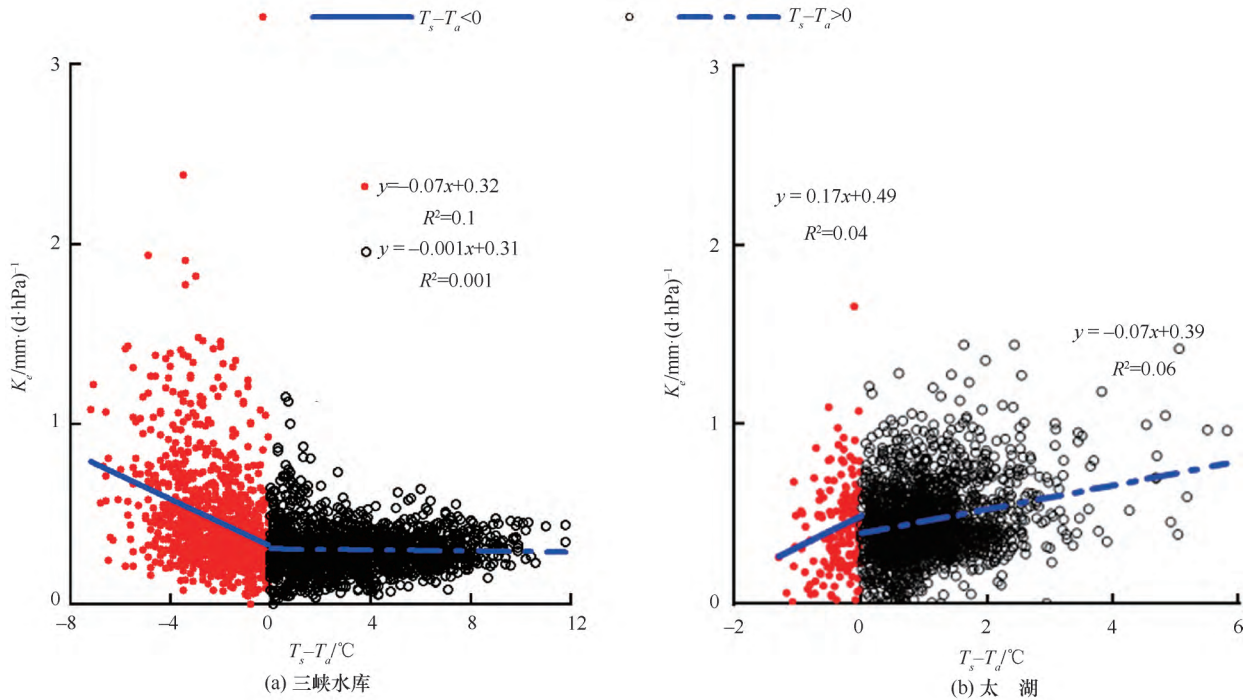


图 6 三峡水库和太湖在  $T_s - T_a < 0$  和  $T_s - T_a \geq 0$  条件下的扩散系数  $K_e$  与水汽温差  $T_s - T_a$  的散点图

Fig. 6 Scatter plots of vapor transfer coefficient ( $K_e$ ) versus water-air temperature difference ( $T_s - T_a$ ) under  $T_s - T_a < 0$  and  $T_s - T_a \geq 0$  conditions for the Three Gorges Reservoir and Lake Taihu

入流和出流引起的热输送对水体能量平衡的影响较小, 而对于峡谷型水库, 出入流引起的纵向传热过程显著影响水体的能量平衡<sup>[15]</sup>, 导致三峡水库巴东河段月平均水体储热的变幅远大于水面净辐射, 而三峡水库蒸发的 8 月和 12 月的双峰特征也可能受到纵向传热对能量平衡的影响。已有研究发现三峡干流水温具有显著沿程变化特征, 下游的巴东水温在 3—7 月低于上游寸滩, 而在 8 月—次年 2 月高于上游寸滩, 水温相对气温的滞后效应也受水深影响而沿程增强<sup>[36-37]</sup>, 这也表明纵向传热过程的重要作用。因此, 在分析三峡水库这类峡谷型水库的能量平衡及蒸发特征时不能如湖泊蒸发研究那样仅考虑垂向传热过程, 需要分析纵向传热过程的影响。

峡谷型水库在水汽传输方面与湖泊同样存在不同

特征。对于太湖等平坦地形上的水体, 扩散系数随水平风速的增强而增大, 且受大气稳定度影响, 一般情况下当水温高于气温时, 近水面层易形成不稳定层结, 增强水汽湍流交换; 反之, 若水温低于气温, 稳定层结会抑制水汽湍流输送。三峡水库与太湖明显不同的水汽传输特征可能与其水体位于峡谷中有关。三峡水库独特的 V 形峡谷地形导致其风场系统呈现复杂特征, 存在昼夜交替的山谷风环流, 白天受太阳辐射加热形成上坡风, 夜间地表冷却引发下坡风; 由于水体与陆地热容差异, 昼间风向由水面吹向岸边, 夜间反向; 湖陆风与山谷风在河谷叠加, 三峡水库干流的巴东、奉节、万州区和涪陵河谷<sup>[38]</sup>与香溪河支流河谷<sup>[39]</sup>都观测到显著河谷风环流。LOBOS-ROCO 等<sup>[40]</sup>通过涡动协方差观测与 WRF 模式模拟发现在

3 500 m 的高海拔盐湖中, 峡谷地形与区域环流的耦合作用导致蒸发过程呈现显著日周期变异, 安第斯山脉-盐湖盆地系统的热力差异会驱动交替的山风与谷风环流, 进而调控蒸发动态。河谷风环流产生的垂直风速会显著影响峡谷型水库蒸发的水汽湍流传输, 这可能是其扩散系数与水平风速没有显著相关性且在逆温情况下增强的主要原因, 在分析峡谷型水库蒸发中需要认真考虑。

近地表的水汽平流是影响水面蒸发的一个关键过程, 不饱和气团从干燥的陆地运移到水面上时, 由于下垫面湿度、粗糙度和温度等发生突变, 水面上的水汽、风速和温度廓线等都会发生剧烈变化, 形成的内部边界层高度和空气湿度随离岸距离增加, 蒸发速率则沿水平方向显著衰减<sup>[41]</sup>。平流对水面蒸发速率的影响体现在水汽传输系数上, 水面的风区长度越大, 传输系数越小, 对于蒸发皿和湖泊(包括湖泊型水库)等多采用蒸发速率与水面面积  $A$  之间的幂函数关系<sup>[42]</sup>。GUSEVA 等<sup>[43]</sup>对 8 座湖泊型水库与 23 个湖泊的蒸发研究中发现水汽传输系数与面积密切相关。韩松俊等<sup>[44]</sup>利用我国面积在 0.005~3 000 km<sup>2</sup> 之间的 6 个湖泊的数据拟合出水汽传输系数对水面面积的幂指数为 0.038。MCJANNET 等<sup>[42]</sup>据此将观测数据的幂函数关系拓展到以风区长度为底数, ZHAO 等<sup>[6]</sup>进一步以水库面积除以与风向垂直的水面宽度确定风区长度, 这种方法广泛应用于表征全球<sup>[1 44-45]</sup>和我国<sup>[5]</sup>水库蒸发平流影响。河道型水库水面狭长且蜿蜒变化, 风向受到地形和局地环流等因素影响而多变, 不同时期不同河段的风区长度变化明显, 再加上水面上大气稳定性和岸边地面粗糙度的影响, 平流的影响更为显著且异常复杂, 因此, 不能简单以水面面积作为指标, 需要考虑风区长度的时空变化进行深入研究。

三峡水库和太湖的水体流速具有显著差异, 分别近似为动水与静水, 且三峡水库流速具有显著季节变化。流速从两个方面影响水体蒸发: 一方面水体表面流速与风速及其形成的波浪影响水-气界面的湍流交换<sup>[46]</sup>, 进而影响水面蒸发速率, 有研究表明水面蒸发速率随表面流速的增加而增强<sup>[47]</sup>; 另一方面, 流速与水温梯度通过传热过程影响水体能量平衡<sup>[15]</sup>, 进而影响水面蒸发。三峡水库的流速具有显著季节变化, 7—8 月的汛期流速明显高于其他月份<sup>[27]</sup>。然而流速相对较低的 3—6 月的扩散系数明显高于其他月份, 而汛期 8 月份与流速较低的 9 月一次年 2 月的扩散系数差异不大(见图 2), 这表明流速并不是三峡水

库水面蒸发扩散系数季节变化的主要因素。另一方面, 巴东河段水体储热变化量在汛期的 8 月份明显低于其他月份, 这也表明流速并不是影响三峡水库水体传热的关键因素。因此, 流速差异并不影响本文的主要结论。

在以往研究水库湖泊蒸发方法中, 多直接将湖泊与峡谷型水库的蒸发过程直接统一计算, 忽略了峡谷型水库蒸发驱动机制的独特性峡谷型水库蒸发的能量平衡和湍流传输与湖泊及湖泊型水库都存在显著差异, 复杂的水体纵向传热过程导致三峡水库等峡谷型水库断面的能量收支难以确定, 峡谷地形导致的复杂风场及河谷风环流可能导致波文比法<sup>[48]</sup>和涡度相关系统等蒸发观测方法失效<sup>[49]</sup>, 而湖泊蒸发估算中基于水平风速的水汽传输公式对峡谷型水库产生显著偏差。因此, 进行峡谷型水库蒸发的观测和估算等研究不能直接采用湖泊蒸发的方法, 需要构建专门针对峡谷型水库的方法。本研究主要选取典型峡谷型水库与湖泊进行对比, 三峡水库和太湖的长期观测数据具有一定的代表性, 但仍存在一定的局限性, 例如, 未考虑水库运行调度(如水位变化、流动过程、水流流速)对蒸发的影响, 也未深入水体形态(静水与动水)对蒸发的影响; 同时未来应搜集更多峡谷型水库与不同类型湖泊进行更深入研究, 结合多源数据(如遥感数据、地面观测和数值模拟), 深化对峡谷型水库蒸发机制的理解, 进行更深入全面的研究。

## 4 结论

本文基于蒸发观测数据, 从蒸发量的季节变化、影响蒸发的水温及水体储热变化以及水汽传输特征三个方面对比分析了三峡水库与太湖特征的差异, 得出如下结论。

(1) 三峡水库与太湖蒸发具有显著不同的季节变化特征。三峡水库月蒸发量呈现 8 月和 12 月双峰特征(峰值 3.07 mm/d 和 3.18 mm/d), 第二个峰值较净辐射峰值滞后 5 个月; 而太湖水体储热变化小(变幅仅 -0.97~0.97 mm/d), 蒸发呈单峰型(峰值 5.82 mm/d)仅滞后净辐射 1 个月。

(2) 三峡水库受水体传热显著影响而与太湖具有不同的水温和水体储热变化特征。受三峡水库深水水体储热影响效应(变幅达 -12.1~14.4 mm/d), 三峡水库水气温差( $T_s - T_a$ )在 3—8 月为负(均值 -1.65 °C), 9 月一次年 2 月为正(均值 3.40 °C), 而太湖水体储热变幅小(-0.97~0.97 mm/d), 全年水温高于气温( $T_s - T_a$ 均值 1.0 °C)。

(3) 三峡水库与太湖蒸发的水汽传输特征具有显著差异。水汽传输机制上, 三峡水库扩散系数  $K_e$  与水平风速  $u$  无显著相关性, 但在逆温条件下  $K_e$  显著增大  $[(0.47 \pm 0.29) \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{hPa})]$ , 非逆温条件下  $K_e$  为  $(0.30 \pm 0.12) \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{hPa})$ , 即水面逆温程度越强, 蒸发扩散系数  $K_e$  越大。而太湖蒸发的扩散系数  $K_e$  与水平风速  $u$  显著相关 ( $R^2 = 0.53$ ), 且逆温时  $K_e$   $[0.42 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{hPa})]$  略低于非逆温  $[0.46 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{hPa})]$ , 反映湖泊水平风驱动的湍流交换机制。

(4) 三峡水库等峡谷型水库多为位于深谷中的狭长流动水体, 其蒸发过程相比湖泊或湖泊型水库受水体传热和局地环流的深刻影响, 湖泊蒸发的方法和估算模型难以适用, 需要构建专门针对峡谷型水库的方法。

#### 参考文献(References):

- [1] ZHAO G, LI Y, ZHOU L M, et al. Evaporative water loss of 1.42 million global lakes [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3686.
- [2] WANG W, LEE X H, XIAO W, et al. Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(6): 410-414.
- [3] YAO F, LIVNEH B, RAJAGPPALAN B, et al. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage [J]. *Science*, 2023, 380(6646): 743-749.
- [4] TONG Y, FENG L, WANG X C, et al. Global lakes are warming slower than surface air temperature due to accelerated evaporation [J]. *Nature Water*, 2023, 1(11): 929-940.
- [5] TIAN W, LIU X M, WANG K W, et al. Estimation of reservoir evaporation losses for China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126142.
- [6] ZHAO G, GAO H L. Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 226: 109-124.
- [7] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. *science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [8] LATRUBESSE E M, ARIMA E Y, DUNNE T, et al. Damming the rivers of the Amazon basin [J]. *Nature*, 2017, 546(7658): 363-369.
- [9] LI R, ZHU G F, LU S Y, et al. Effects of cascade hydropower stations on hydrologic cycle in Xiying river basin, a runoff in Qilian mountain [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 646: 132342.
- [10] 阮利民. 发挥长江经济带关键骨干作用 促进三峡工程安全运行和库区高质量发展 [J]. *水利发展研究*, 2024, 24(2): 22-26.  
RUAN Limin. Giving full play to the key role of the Three Gorges Project and the Three Gorges Reservoir Area while ensuring the project's safe operation and supporting the area's high-quality development [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(2): 22-26.
- [11] SONG C Q, FAN C Y, ZHU J Y, et al. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(9): 4017-4034.
- [12] 李璘君, 杨世伟, 王远铭, 等. 混合式抽水蓄能电站水温影响研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 133-143.  
LI L, YANG S, WANG Y, et al. Study on the impact of water temperature in hybrid pumped-storage power stations [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 133-143.
- [13] 周建军, 杨倩, 张曼. 长江上游水库群的热环境效应与修复对策 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 1-17.  
ZHOU J J, YANG Q, ZHANG M. Thermal-effect of the upper Yangtze reservoirs and countermeasures [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1): 1-17.
- [14] CUI Y, LIU Y, GAN G, et al. Hysteresis behavior of surface water fluxes in a hydrologic transition of an ephemeral lake [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(12): e2019JD032364.
- [15] SUN J, ZHANG M, ZHOU J J, et al. Investigation on hydrothermal processes in a large channel-type reservoir using an integrated physics-based model [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2019, 21(3): 493-509.
- [16] SHILO E, ZIV B, SHAMIR E, et al. Evaporation from Lake Kinneret, Israel, during hot summer days [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 264-275.
- [17] LENSKY N G, LENSKY I M, PERETZ A, et al. Diurnal Course of evaporation from the dead sea in summer: A distinct double peak induced by solar radiation and night sea breeze [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 150-160.
- [18] XU L J, LIU H Z, DU Q, et al. Characteristics of lake breezes and their impacts on energy and carbon fluxes in mountainous areas [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38: 603-614.
- [19] 田越, 苗峻峰. 中国地区山谷风研究进展 [J]. *气象科技*, 2019, 47(1): 41-51.  
TIAN Y, MIAO J F. Overview of mountain-valley breeze studies in China [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(1): 41-51.
- [20] 王浩. 河谷风演变过程的数值模拟 [J]. *高原气象*, 1993, 12(1): 1-11.  
WANG H. Numerical simulation of the evolution process of valley wind [J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(1): 1-11.
- [21] BISCHOFF-GAUB I, KALTHOFF N, FIEBIG-WITTMACK M. The influence of a storage lake in the Arid Elqui Valley in Chile on local climate [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2006, 85: 227-241.
- [22] LAITI L, ZARDI D, DE FRANCESCO M, et al. Analysis of the diurnal development of a lake-valley circulation in the Alps based on airborne and surface measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(18): 9771-9786.
- [23] STAVER D, MIHANOVIĆ H, KLAIĆ Z B. Lake-land breezes over a small elongated lake (Kozjak, Plitvice Lakes, Croatia) [J]. *Geofizika*, 2022, 39(1): 51-70.
- [24] 王晓春, 闫金波, 吕超楠, 等. 三峡水库水面蒸发年内滞后效应分析 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(3): 890-900.  
WANG X C, YAN J B, LYU C N, et al. Analysis of the intra-annual

- hysteresis effect of water surface evaporation in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(3): 890-900.
- [25] 程海云, 冯宝飞, 张俊, 等. 三峡库区水陆水面蒸发量差异特性及其原因探讨[J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 387-399.  
CHENG H Y, FENG B F, ZHANG J, et al. Analysis of pan evaporation characteristics over land and water surfaces in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 387-399.
- [26] MCJANNET D, HAWDON A, VAN NIEL T, et al. Measurements of evaporation from a mine void lake and testing of modelling approaches [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 631-647.
- [27] 龙良红, 黄宇攀, 徐慧, 等. 近 20 年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究: 回顾与展望 [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 383-399.  
LONG L H, HUANG Y B, XU H, et al. Research on hydrodynamic characteristics and water environment effects of the Three Gorges Reservoir in recent 20 years: Review and prospects [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 383-399.
- [28] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56 [J]. Rome: food and agriculture organization of the United Nations, 1998, 56(97): e156.
- [29] LEE X H, LIU S D, XIAO W, et al. The Taihu eddy flux network: An observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(10): 1583-1594.
- [30] ZHANG Z, ZHANG M, CAO C, et al. A dataset of microclimate and radiation and energy fluxes from the Lake Taihu eddy flux network [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2020, 2020: 1-30.
- [31] LONG L H, XU H, JI D B, et al. Characteristic of the water temperature lag in Three Gorges Reservoir and its effect on the water temperature structure of tributaries [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1-13.
- [32] YUSUP Y, LIU H P. Effects of atmospheric surface layer stability on turbulent fluxes of heat and water vapor across the water-atmosphere interface [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(11): 2835-2851.
- [33] GRANGER R J, HEDSTROM N. Modelling hourly rates of evaporation from small lakes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 267-277.
- [34] BLANKEN P D, SPENCE C, HEDSTROM N, et al. Evaporation from Lake Superior: 1. Physical controls and processes [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37(4): 707-716.
- [35] PIERRE A, NADEAU D F, THIBOULT A, et al. Characteristic time scales of evaporation from a subarctic reservoir [J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37(3): e14842.
- [36] SCHERTZER W M, ROUSE W R, BLANKEN P D, et al. Over-lake meteorology and estimated bulk heat exchange of Great Slave Lake in 1998 and 1999 [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(4): 649-659.
- [37] 李凌波, 王启明, 赵忠伟, 等. 具有时滞效应的 air2stream 河流水温模型及应用研究 [J]. *水文*, 2024, 44(4): 45-51.  
LI L B, WANG Q M, ZHAO Z W, et al. Research and application of the air2stream river water temperature model with time lag [J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(4): 45-51.
- [38] 傅抱璞. 山谷风 [J]. *气象科学*, 1980, 1(1/2): 1-14.  
FU B P. Valley wind [J]. *Meteorological Science*, 1980, 1(1/2): 1-14.
- [39] 覃军, 袁业畅, 李燕, 等. 山区复杂地形条件下的风场分析 [J]. *气候与环境研究*, 2001(4): 493-497.  
QIN J, YUAN Y C, LI Y, et al. Analysis of wind field under complex terrain conditions in mountainous areas [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2001(4): 493-497.
- [40] LOBOS-ROCO F, HARTOGENSIS O, VILÀ-GUERAU D A, et al. Local evaporation controlled by regional atmospheric circulation in the Altiplano of the Atacama Desert [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(11): 9125-9150.
- [41] BRUTSAERT W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [42] MCJANNET D L, WEBSTER I T, COOK F J. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 31: 76-83.
- [43] GUSEVA S, ARMANI F, DESAI A R, et al. Bulk transfer coefficients estimated from eddy-covariance measurements over lakes and reservoirs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(2): e2022JD037219.
- [44] HAN S J, GUO F J. Evaporation from six water bodies of various sizes in East Asia: An analysis on size dependency [J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(6): e2022WR032650.
- [45] TIAN W, LIU X, WANG K, et al. Estimation of global reservoir evaporation losses [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127524.
- [46] 曹正达, 刘寿东, 肖启涛, 等. 太湖湖-气界面动量和热交换系数时间变化特征及其影响因素分析 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(24): 1-9.  
CAO Z D, LIU S D, XIAO Q T, et al. Temporal variations and influencing factors of transfer coefficients of momentum, heat and water vapor in the atmospheric surface layer of Lake Taihu [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(24): 1-9.
- [47] HOU L T, AMINZADEH M, OR D, et al. Evaporation dynamics from flowing water surfaces [C]//ALBERTO V. *Global and (sub) Continental Hydrology: EGU General Assembly 2025*. Vienna, Austria: European Geosciences Union, 2025: EGU25-2716.
- [48] LEE X H, YU Q, SUN X M, et al. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: A revisit [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(1/2): 111-124.
- [49] 崔逸凡, 刘元波. 湖泊蒸发观测与计算方法研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1501-1517.  
CUI Y F, LIU Y B. Advances in observation and calculation of lake evaporation [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1501-1517.

(责任编辑 王海锋)