

亢建新, 包宇飞, 王雨春, 等. 糯扎渡水库季节性分层特征及气温变化影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 111-123. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.009

KANG Jianxin, BAO Yufei, WANG Yuchun, et al. Seasonal stratification characteristics of Nuozhadu Reservoir and influence of temperature changes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 111-123. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.009

糯扎渡水库季节性分层特征及气温变化影响

亢建新^{1,2}, 包宇飞², 王雨春², 陈豪³, 李金洁³, 程瑶¹,
吴兴华⁴, 温洁², 李姗泽², 孙猛²

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214; 4. 中国长江三峡集团有限公司
长江生态环境工程研究中心, 北京 100028)

摘要:【目的】热分层是湖库水生态系统的重要特征之一, 影响水体的混合、对流、营养物质循环以及溶解氧的垂直分布, 因此分析水体分层规律及主要影响因素至关重要。【方法】利用糯扎渡水库连续一年的高频剖面数据, 分析了日尺度上的温度剖面、热分层参数和热稳定性的时间变化, 探讨了不同分层时期热分层的驱动因素, 以及气候变暖对热分层及水生态环境的影响。【结果】糯扎渡水库的水体分层明显, 水温与溶解氧(DO)垂向分布具有明显的季节性特征, 表层与底层温度差在2.8~12.3℃, DO浓度最小值0.59 mg/L出现在了氧跃层中, 温跃层厚度最大值为14.85 m, 同一时间相对稳定系数(RWCS)达到最大值359.9。【结论】热分层参数的日变化特征揭示了热分层的形成期、平稳期和减弱期, 表层水温是影响热分层的主要因素, 而气候变暖可能导致热分层更加稳定, 分层时间延长, 溶解氧剖面浓度和分布情况发生改变, 并引发其他环境问题。研究结果为了解糯扎渡水库水体季节性分层和水化学特征, 以及气候变暖的影响提供了科学依据, 对水库水质管理和生态环境保护具有重要意义。

关键词: 糯扎渡水库; 热分层; 热稳定性; 溶解氧; 气候变化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0111-13



Seasonal stratification characteristics of Nuozhadu Reservoir and influence of temperature changes

KANG Jianxin^{1,2}, BAO Yufei², WANG Yuchun², CHEN Hao³, LI Jinjie³, CHENG Yao¹,
WU Xinghua⁴, WEN Jie², LI Shanze², SUN Meng²

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Huaneng Lancang River
Hydropower Inc., Kunming 650214, Yunnan, China; 4. Yangtze River Ecological Environment Engineering
Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100028, China)

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2024-09-23; 录用日期: 2024-10-28; 网络出版日期: 2024-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(52309107); 云南省重点研发计划项目(202203AA080009); 中国长江三峡集团有限公司项目(201903144);
国家重点研发计划(2023YFC3209401-02); 河北省自然科学基金(E2024402142)

作者简介: 亢建新(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程生态环境研究。E-mail: kjsx118@163.com

通信作者: 包宇飞(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事流域生源要素环境地球化学研究。E-mail: baoyf@iwhr.com

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

Abstract: [Objective] Thermal stratification is an important characteristic of lake and reservoir water ecosystems, affecting mixing, convection, nutrient cycling of water bodies, and the vertical distribution of dissolved oxygen (DO). Therefore, understanding the stratification patterns and their key influencing factors is essential. [Methods] Based on the high-frequency profile data collected over one year from Nuozhadu Reservoir, the temporal variations of temperature profiles, thermal stratification parameters, and thermal stability were analyzed on a daily scale. The driving factors of thermal stratification during different stratification periods were explored, and the impact of climate warming on thermal stratification and the water ecological environment was examined. [Results] The water column of Nuozhadu Reservoir showed clear stratification, with significant seasonal variations in the vertical distribution of water temperature and DO. The temperature difference between the surface and the bottom layers ranged from 2.8 to 12.3 °C, with a minimum DO concentration of 0.59 mg/L occurring in the oxycline. The maximum thermocline thickness reached 14.85 m, while the relative water column stability (RWCS) peaked at 359.9 during the same period. [Conclusion] The daily variations in thermal stratification parameters reveal the formation, stabilization, and weakening phases of thermal stratification. Surface water temperature is identified as the main factor affecting thermal stratification. Additionally, climate warming may lead to more stable thermal stratification, extending the duration of stratification, changing DO concentration profiles and distributions, and causing other environmental issues. The findings provide scientific evidence for understanding the seasonal stratification and water chemistry characteristics of Nuozhadu Reservoir and the impacts of climate warming. The result are significant for reservoir water quality management and ecological environment protection.

Keywords: Nuozhadu Reservoir; thermal stratification; thermal stability; dissolved oxygen; climate change

0 引言

水库是人为建造的具有巨大容积的停滞水域, 尤其是一些调节能力较强的深大水库, 具有库容大、流速小的特点, 导致水体停留时间长, 整体更新缓慢, 容易形成季节性的稳定水体分层^[1-2], 而水体分层是库区面临的重要水环境问题之一^[3]。水体分层指在垂向剖面上水温分布不均的现象, 广泛存在于自然界中, 是湖泊和水库中一个基本而重要的物理过程^[4], 其形成主要受水体深度、流动性以及气候条件等因素影响。水体分层会影响水体的混合和对流、营养物质循环以及溶解氧的垂直分布^[5], 并且会引发多种物理和化学过程^[6-7]。表层水体与空气密切接触, 光线充足, 受太阳辐射影响较大, 相反, 底层水体光照不足, 温度低而稳定^[8], 而表层和底层之间存在一个水温急剧变化的区域, 称为温跃层, 它将混合良好的表层和相对稳定的底层分隔开, 对溶解氧、营养物质、光和微生物基质的可用性具有重要作用, 进而对浮游植物和浮游动物的垂直分布、迁移和代谢及有机物降解产生影响^[9-11], 水体下层的沉积物在微生物的作用下, 会释放金属元素和营养盐等, 造成内源污染, 使水质恶化, 因此水质监测对于水生态环境保护具有重要意义。

气候变暖导致的湖库水体温度升高可以改变热分层特性^[12], 主要涉及分层持续时间、温跃层厚度、深度和热稳定性^[13-14], 以往的研究大多表明,

气候变暖会加剧热分层, 长期的气温升高和短期的极高温会延长湖泊热分层的持续时间^[15-16], 降低温跃层深度, 增加热稳定性^[17-18]。但不同时间, 气温对热分层的影响是不同的; 不同区域对气候变化的响应也不尽相同, 因此需要更多的观测数据来阐明热分层的变化和机制。另外, 热分层的变化也会影响营养物质循环, 特别是在水体表层, 会促进水体富营养化和有害藻华^[19]。因此, 了解热分层的形成过程和机制, 明确其驱动因素对湖库水质管理具有重要意义^[20]。

近年来, 国内对于湖库水体热分层的研究开展了较多的研究, 如张世杰等^[21]利用 MIKE3 建立了二滩水库水温模型, 对水库进行了数值模拟, 并进行了率定分析, 得出三维模型可以较好地模拟出垂向水温分布结构, 不同外部条件和水库调度运行条件下, 水文在垂向和纵向上的变化趋势也能准确模拟; 王琳杰等^[22]为探究高原深水湖泊抚仙湖在夏季热分层时期的水温水质空间特征及其昼间变化规律, 在 2014 年 7 月, 对抚仙湖的南部、中部及北部各选取一个代表点位进行分层取样, 得出其夏季水温分层具有明显的深水湖泊分层期温度分布特征, 但研究时间跨度较短, 仅为夏季一个月, 无法全面分析全年水质变化。以往对热动力学研究主要是基于月、季、年等长时间跨度数据, 来描述热分层的时间变化及其对气候变化的响应^[23-24], 缺乏对热力分层过程及其环境效应的细节刻画, 并不能充分阐明小时和日周期特征和驱动

机制^[25]。随着传感器技术和高频观测的迅速发展, 利用水温剖面的分钟、小时和日数据可以充分表征和量化热分层的形成和弱化。

本研究利用浮标监测系统在糯扎渡水库连续一年的高频剖面数据: (1) 在日尺度上呈现温度剖面、热分层参数和热稳定性的时间变化; (2) 分析不同分层时期热分层的驱动因素; (3) 阐明热分层对水体生态系统的潜在环境影响。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

糯扎渡水库位于云南省普洱市思茅区和澜沧县交界处, 是澜沧江中下游河段梯级规划“两库八级”中的第二库第五级, 上接大朝山电站, 下接景洪电站, 如图 1 所示。水库功能以发电为主, 兼顾防洪、航运, 是国家“西电东送”的骨干电源工程。库区地处高山峡谷地区, 河道狭长, 河岸陡峭, 断面呈“V”形, 水下地形十分复杂。水库坝高 262 m, 库区水底距水面最高可达 200 m, 总库容约 237 亿 m^3 ^[26], 干流回水长度达 210 km^[27], 是典型的高山峡谷深大型水库, 并且为多年调节水库^[27]。

1.2 研究方法

1.2.1 浮标数据

在过去, 自动化和在线监测技术不够完善, 监测工作还需要人工采样来完成, 而人工采样一般是一年采几次样品、每次采几个时间段; 但随着科技的进步, 浮标站能做到对布放位置进行连续的在线监测,

弥补了传统监测方式数据不全面、监测效率低和成本较高等不足。当前国内已研发出了常规定点水质监测浮标和水质剖面浮标, 因其能实现对水域表层、次表层及深层的垂直剖面水体进行多层水质参数的长时间实时监测, 对于全面、深入掌握水体环境具有重要价值, 近年来得到了广泛应用。例如国内比较典型的原位藻类细分实时监测剖面浮标, 该浮标布放于千岛湖, 实现了藻类的分类剖面监测。

本研究使用浮标搭载气象传感器来实现对气温、风速和风向等气象因素的自动观测, 采用水质多参数监测仪(CTP, 德国)记录垂直深度、温度、溶解氧、叶绿素和 pH 等, CTP 剖面仪从水下 0.5 m 处开始监测, 被缓慢下放到湖底, 然后用自动控制的绞车慢慢拉回水面。剖面数据每 24 h 采集 1 次, 表层数据 24 h 在线监测, 常规气象要素每 1 h 记录 1 次, 并通过通讯子系统将数据传输至岸站, 从而完成对水质剖面和气象数据的实时监测。除此之外, 会定期对各组件进行检查、校准, 以保证数据的准确性。在连续 1 a 的监测过程中, 出现若干异常值, 这些异常值已被识别并从分析中排除, 以确保研究结果的准确性和可靠性; 此外, 在观测期间水质监测中的 pH 传感器更换导致监测设备从 2022 年 4 月 21 日—2022 年 5 月 19 日暂停运行, 并停止数据收发, 直至 5 月 20 日, 监测系统经过必要的维护和调整后, 方才重新启动并恢复正常运行, 导致数个月份数据出现缺失。现场布放的浮标实物情况如图 2 所示。

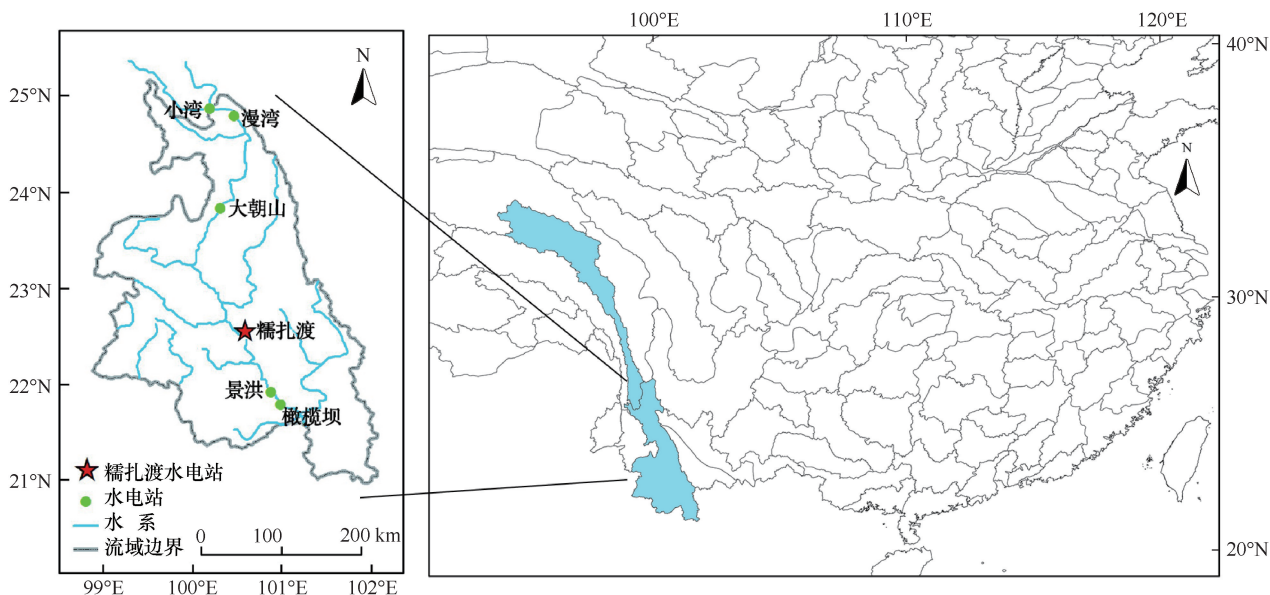


图 1 地理位置

Fig. 1 Geographical location



图2 浮标实物

Fig. 2 Photograph of buoy

1.2.2 参数选择

(1)热稳定性参数。热稳定性参数(Relative water column stability, RWCS)是一个无量纲参数,可以用来反映热分层和水运动的强度^[28-29], RWCS 值越大,水体越稳定,热分层作用越强。其计算公式为

$$RWCS = \frac{\rho_d - \rho_b}{\rho_4 - \rho_5} \quad (1)$$

式中, ρ_b 和 ρ_d 分别为表层水密度和底层水密度 (g/cm^3); ρ_4 和 ρ_5 分别为 4 °C 和 5 °C 纯水的密度 (g/cm^3)。

此外,水密度与水温之间存在函数关系,可以由以下经验公式计算^[30]

$$\begin{aligned} \rho_T = & 999.842\ 594 + 6.793\ 952 \times 10^{-2} T - \\ & 9.095\ 290 \times 10^{-3} T^2 + 1.001\ 685 \times 10^{-4} T^3 - \\ & 1.120\ 083 \times 10^{-6} T^4 + 6.536\ 332 \times 10^{-9} T^5 \quad (2) \end{aligned}$$

(2)温跃层参数。温跃层参数通常采用梯度准则法计算,包括湍流阈值、密度梯度阈值、温度梯度阈值和化学梯度阈值,本文采用温度梯度阈值判据法,利用温度剖面确定温跃层(定义为 ≥ 0.2 °C/m 的水层),同时溶解氧也采用梯度判据标准 (>0.2 mg · L⁻¹ · m⁻¹),以上标准是根据张运林等^[20]在千岛湖实测水温和溶解氧剖面得出的,在其他湖泊中也被广泛采用。

本文选取温跃层深度(TD)、温跃层底深度(TB)、温跃层厚度(TT)和温跃层强度(TS)来确定糯扎渡水库的热分层性质,其中TT为温跃层上下边界之差(TT=TB-TD),TS为温跃层上下边界温度差与温跃层厚度之比,是整个温跃层的平均梯度判据。

1.2.3 数据分析

采用 Origin 2018 进行统计分析,包括均值、线

性拟合和相关分析等。若 $p < 0.01$, 则报告显著性水平为显著。

2 结果与分析

2.1 水温和溶解氧的垂直分布特征

作为一个典型深大水库,糯扎渡水库蓄水深度可达 200 m,但水体底部稳定均匀,水温变化非常小,因此,选取了 180 m 范围内的剖面数据。为糯扎渡水库 2021 年 10 月—2022 年 10 月的日水温垂向分布如图 3(a)所示。由图可知,其水温的垂向分布存在明显的季节性特征,在 1 a 中呈现混合-热分层-混合的变化特征。

由于温度在水体传递的时效性和不均匀性,水温随深度的增加而降低,水体表层与底层温差约为 2.8~12.3 °C,在 12 月—次年 2 月水体垂直温差较小,3 月—11 月较大;水体在垂直方向上可分为温度最高的表水层、温度变化很大的温跃层和温度较低且稳定的滞温层;从 2021 年 11 月中旬—2022 年 2 月底,由于气温的快速下降,表层水温也随之降低,水库上下层水体趋于混合,此时的垂直温差变化不明显;3 月开始,随着春季的到来,气温的升高和太阳辐射的加强导致表层水温逐渐升高,并且表层水体吸收的热量持续向下层水体传递,但底层水温变化很小,表层与底层的水温差距开始增大,在此过程中,水体的垂直分层特征开始显现,并且随着季节的推移而变得更加明显;直至 7 月下旬,表层水体温度达到峰值 29.7 °C,在垂向上,水温从表层的 29.7 °C 下降到底层的 17.5 °C,这种状态持续了大约一个月;8 月下旬以后,太阳辐射减弱,气温降低,表层水体的温度开始下降,随后水库表层与底层之间的温差逐渐减小;直至 11 月,气温进一步下降,水体垂向温度差异变得不明显,上下水体重新趋于混合。

同时时间段的溶解氧垂直剖面数据如图 3(b)所示,与水温分层类似,糯扎渡水库的溶解氧浓度也具有显著的季节性分层特征,也呈现出与水温分层类似的 3 层结构。本文中将其从上到下依次称为混合层、氧跃层和低氧层。水库的热分层始于春季,即 3 月,同一时间溶解氧分层也已开始,但此时水体溶解氧浓度较高,在 3 月—5 月期间,混合层中溶解氧呈富集状态 (>9 mg/L),5 月以前虽然深水处浓度低于表层水体,但也均在 5 mg/L 以上;随着气候变化,水温分层加剧,溶解氧浓度持续降低,到了 5 月,氧跃层呈现出缺氧状态 (<3 mg/L),甚至部分深度达到了极度缺氧 (<1 mg/L),此时氧跃层深度在 7 m 左右;之后,

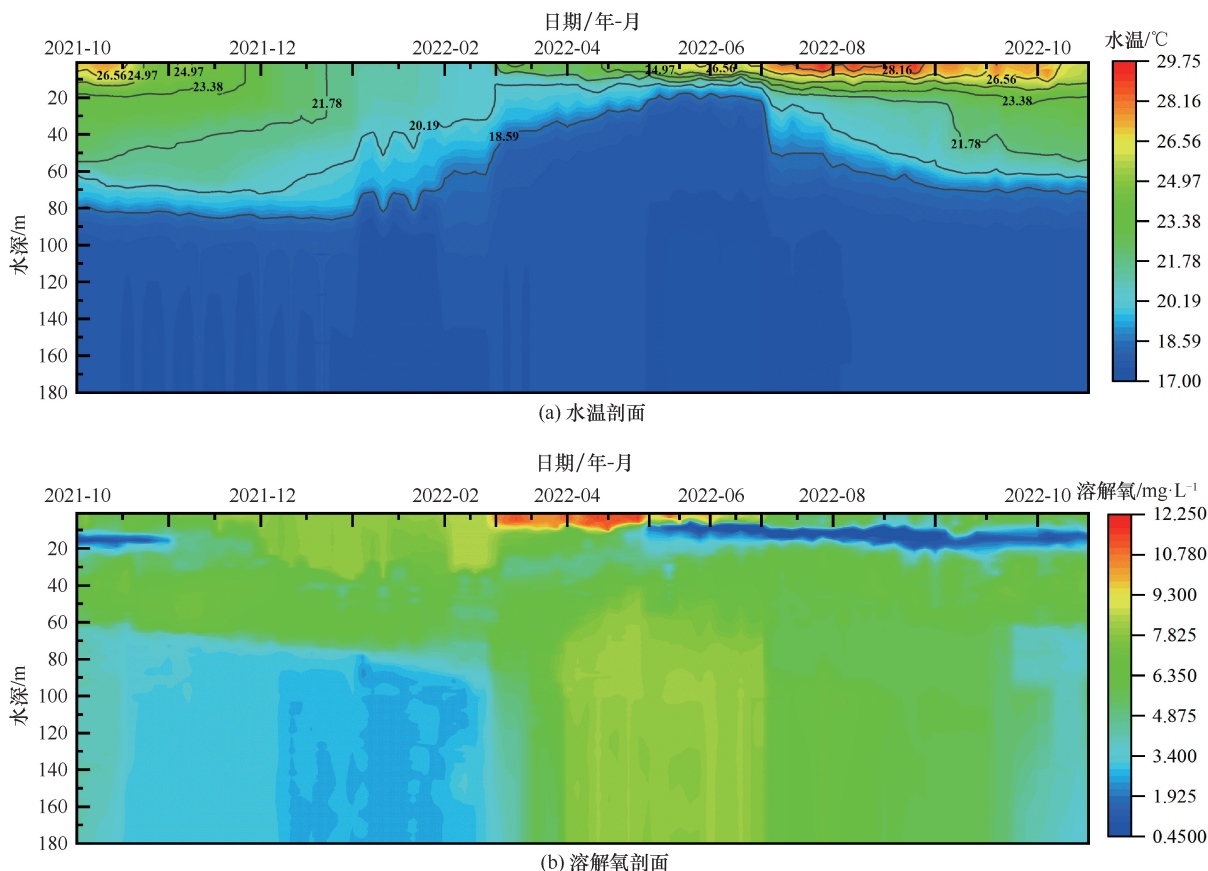


图3 水温和溶解氧剖面

Fig. 3 Water temperature and dissolved oxygen profiles

由于气温和表层水温的持续升高, 温跃层在整个夏季逐渐加深加厚, 氧跃层的深度和厚度也有所增加; 但9月以后气温和水温的降低, 导致垂直方向上的对流混合加快了氧跃层加深的速度; 11月随着水温垂向分层的结束, 溶解氧的分层也逐渐消失。由于长时间的分层, 低氧层中溶解氧浓度持续降低, 从分层初期的6.9 mg/L左右, 一直下降到分层末期的3 mg/L。

2.2 热分层参数的日变化特征

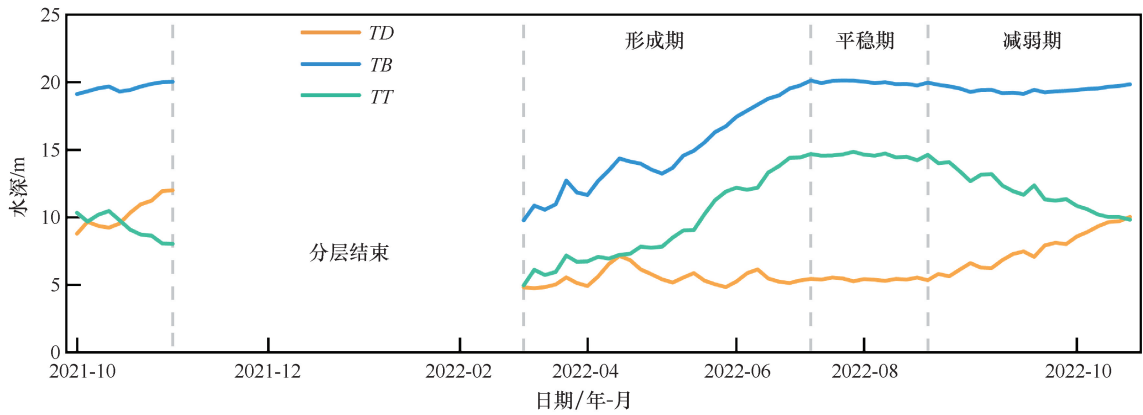
2021年10月—2022年10月期间糯扎渡水库温跃层参数的日变化如图4(a)所示, 对应糯扎渡水库热分层的年周期变化。温跃层深度(TD)在水深4~8 m之间波动, 变化不大, 温跃层底部深度(TB)从2022年3月10日的9.78 m逐渐增长到7月20日的20.14 m, 达到一年内的最大值, 温跃层厚度也接近最大值, 达到14.7 m, 因此2022年3月10日—7月20日可视为热分层的形成期。从7月21日—8月20日, TD 和 TB 基本保持稳定, 波动较小, 可认为这段时间为热分层平稳期。在8月21日以后, TB 在19~20 m之间浮动, 而 TD 在期间开始逐渐增加, TT

逐渐减小, 直至热分层消失, 垂向水体趋于混合, 这一时期可认为是减弱期。

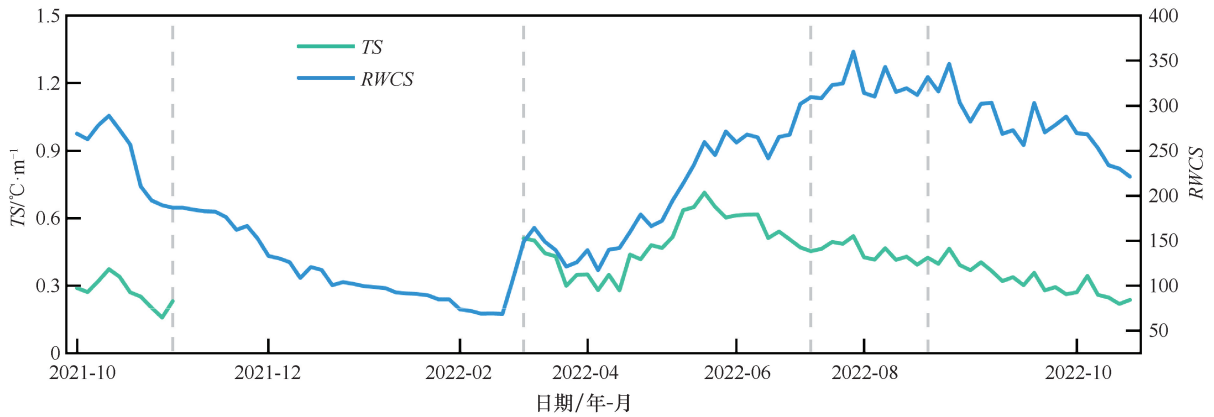
热稳定性参数 $RWCS$ 整体变化趋势与 TT 相似 [见图4(b)], $RWCS$ 在2022年3月10日时为148.9, 之后随着气温的升高, 呈现波动式的增长, 在7月30日时达到峰值359.9。随后一直到热分层结束, 伴随着气温的降低, $RWCS$ 逐渐减小。与其他时间段相比, 分层形成期的温跃层较薄, 温度变化较大, 导致其温跃层强度(TS)波动较大, 并在5月28日 TS 达到了0.71 °C/m的最大值。

2.3 热分层参数之间的关系

基于浮标数据, 给出了三个不同阶段的热分层参数之间的关系(见图5)。在形成期阶段, TB 与 $RWCS$ 和 TT 之间存在很强的正相关关系 [见图5(b)(d)], TT 和 $RWCS$ 均随 TB 的增加而增加。初春时节, 气温回升, 水库的上层水体因为受到较强的太阳辐射, 水温升高, 而下层水体相对凉爽, 导致水体上下层产生温差, 形成热分层现象, 在此阶段气温变化不大, 而春夏季的光照强度要显著高于秋冬季, 因此光照强度是导致热梯度形成的原因; 随着水深的



(a) 温跃层深度、底部深度、厚度日变化



(b) 温跃层强度、热稳定性参数日变化

图4 温跃层参数日变化

Fig. 4 Daily variation of thermocline parameters

增加,光照强度会因为水中物质的吸收和散射而降低^[31-38],影响水的密度和温跃层的建立,在春夏季节,光照强度的增加会导致更深的水被加热,从而导致TB的增加。然而,此阶段的TD较小,在水面附近波动,与TT、RWCS和TB的相关性不显著。此外,RWCS与TS之间存在较强的正相关关系[见图5(c)]。因此,光穿透深度是形成期热分层的主要影响因素。

在平稳期阶段,热分层作用最强,但热分层参数的关系与形成期不同。RWCS与TT、TS呈正相关[见图6(a)(c)],而TD与RWCS、TS和TT都呈负相关[见图6(b)(d)(e)],此外TT与TS在此阶段均达到最大值,且两参数之间存在较强的正相关性[见图6(f)]。此阶段的TB深度约为20m,变化幅度很小,但TD会在气温和降水的影响下变化,而TT是TD和TB之间的差值,因此TT在平稳期主要受TD的影响。

与形成期时的结果相似,在减弱期阶段,RWCS与TT之间存在显著的正相关关系 $R^2=0.76$ [见图7(a)],TD同平稳期一样与RWCS、TS和TT呈负相

关[见图7(b)(d)(e)],由于TB变化较小,所以TT主要受TD影响($R^2=0.98$),因此,在减弱期热分层主要受温跃层上边界影响,此外,TS与RWCS和TT之间存在显著正相关[见图7(c)(f)],表明RWCS和TT也随着温跃层强度的增加而增加。

总体而言,RWCS与TT在三个阶段都存在显著的正相关关系,两者均能充分表征水体的热分层状态,但参数RWCS来源于水温剖面,具有比TT更好的连续性,因此RWCS能更好地表征热分层的

3 结果分析与讨论

3.1 热分层驱动机理

TT与表层水温呈显著正相关($R^2=0.885$, $p<0.01$),如图8(a)所示,这与张运林等在千岛湖长期观测数据结果一致^[31],并且,在以前的研究中水温对湖泊分层的显著影响已经得到证实^[32]。在春季,由于温度和风的作用,水体形成较薄的温跃层,并逐渐变厚,然而,据此次研究分析,TT与风速相关性较差($R^2=0.123$),如图9所示;夏季水

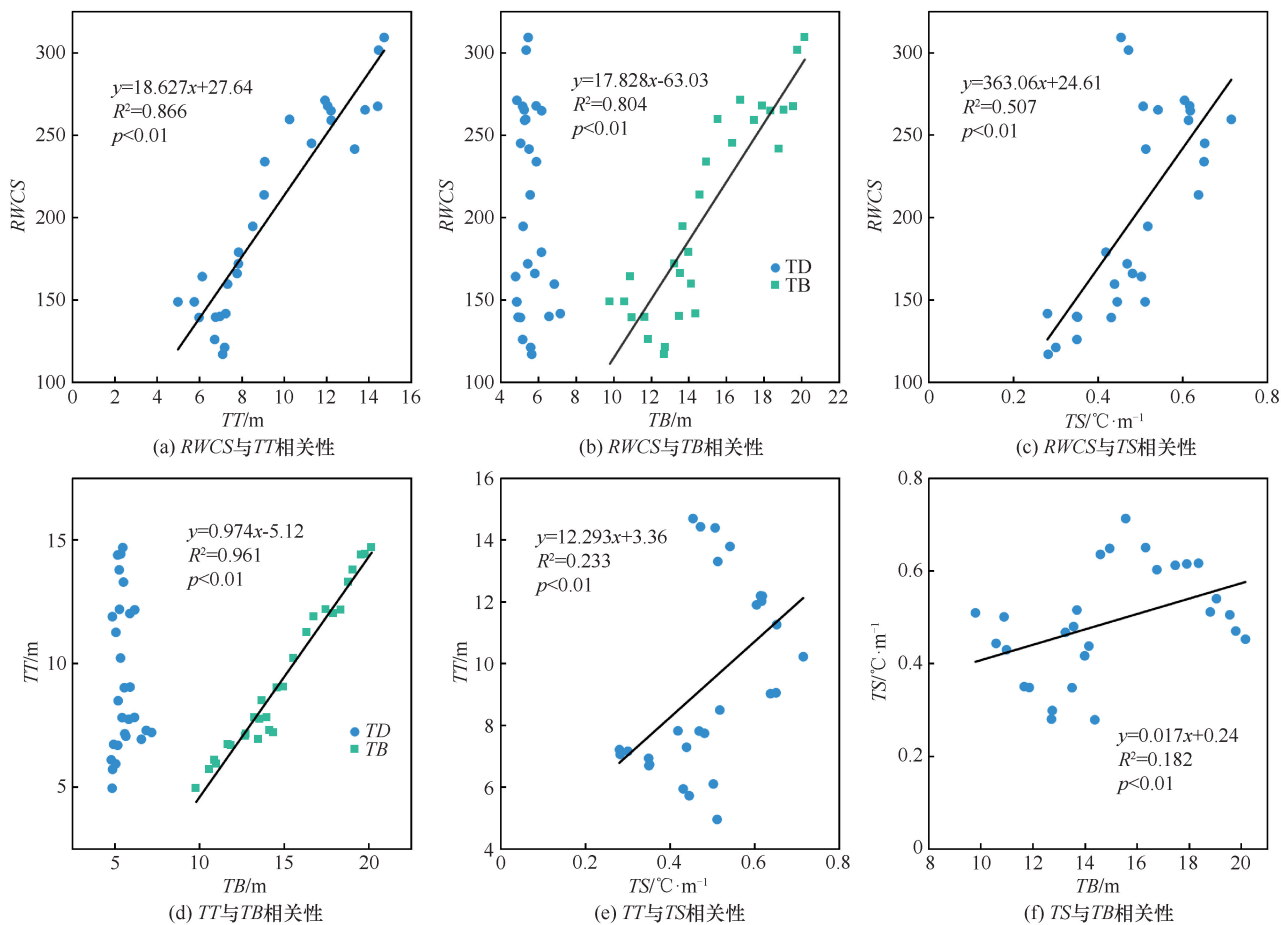


图5 形成期各参数线性关系

Fig. 5 Linear relationship of various parameters in formation period

体的吸热大于放热, 因此表层水受到持续加热, 而热量持续向下传递, 使得水体从混合状态变成具有垂直梯度的热分层状态^[33], 而秋冬季节的降温也伴随着 TT 的减小。

TS 与表层水温之间虽然呈正相关, 但相关性很弱 ($R^2=0.009$, $p>0.01$), 如图 8(b) 所示, 并且与其他参数不同的是 TS 的最大值于 5 月 28 日达到了最大值 $0.71\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$, 处于形成期, 而其他参数最大值均在平稳期(见图 4), 这可能是此时正处于春夏季节交替阶段, 温度变化较大, 而 TT 此时增长缓慢, 导致 TS 变化较大。这一时期 TS 值的较大波动也反映了形成期温跃层的不稳定性。

$RWCS$ 为相对水体稳定性, $RWCS$ 值越大, 说明水体越稳定, 而 $RWCS$ 与表层水温呈极显著正相关 ($R^2=0.98$, $p<0.01$), 如图 8(c) 所示, 表明表层水温升高时水体稳定性增强, 热分层更稳定, 在热分层形成期, $RWCS$ 波动上升; 在稳定期达到峰值, 与表层水温同步; 在减弱期逐渐下降, 反映出热分层的变化趋势, 而表层水温是主要影响因素。

此外, 从图 3(a) 中可观察到 2022 年 3 月—6 月中层水温明显降低, 且深层处溶解氧偏高, 这一异常现象可能与上游来水的增加有关, 初春时节气温升高, 会加剧澜沧江源区内冰雪的消融, 导致径流量增加^[34], 使得上游来水增加, 水体中层水温降低, 且上游来水溶解氧含量较高, 使得溶解氧浓度升高, 并且此时正处于温跃层的形成期, 水体分层并不稳定, 从而也导致了 TS 在此阶段波动变化较大。

3.2 气候变化对热分层的影响

以往的研究表明, 水体热分层会对环境产生一系列的影响, 特别是对水中的溶解氧^[35-36]。水体中溶解氧的演变一般通过以下过程控制^[37-38]: (1) 通过水气界面的气体交换; (2) 水体垂直混合; (3) 光合作用导致水体 DO 浓度升高; (4) 水生生物的呼吸作用、有机物的细菌氧化作用、化学氧化作用和其他还原性无机物对 DO 的消耗作用; (5) 底栖生物和沉积物的耗氧。溶解氧演变过程如图 10 所示, 上游来水补充到水库时, 水中溶解氧浓度较高, 然而, 在水

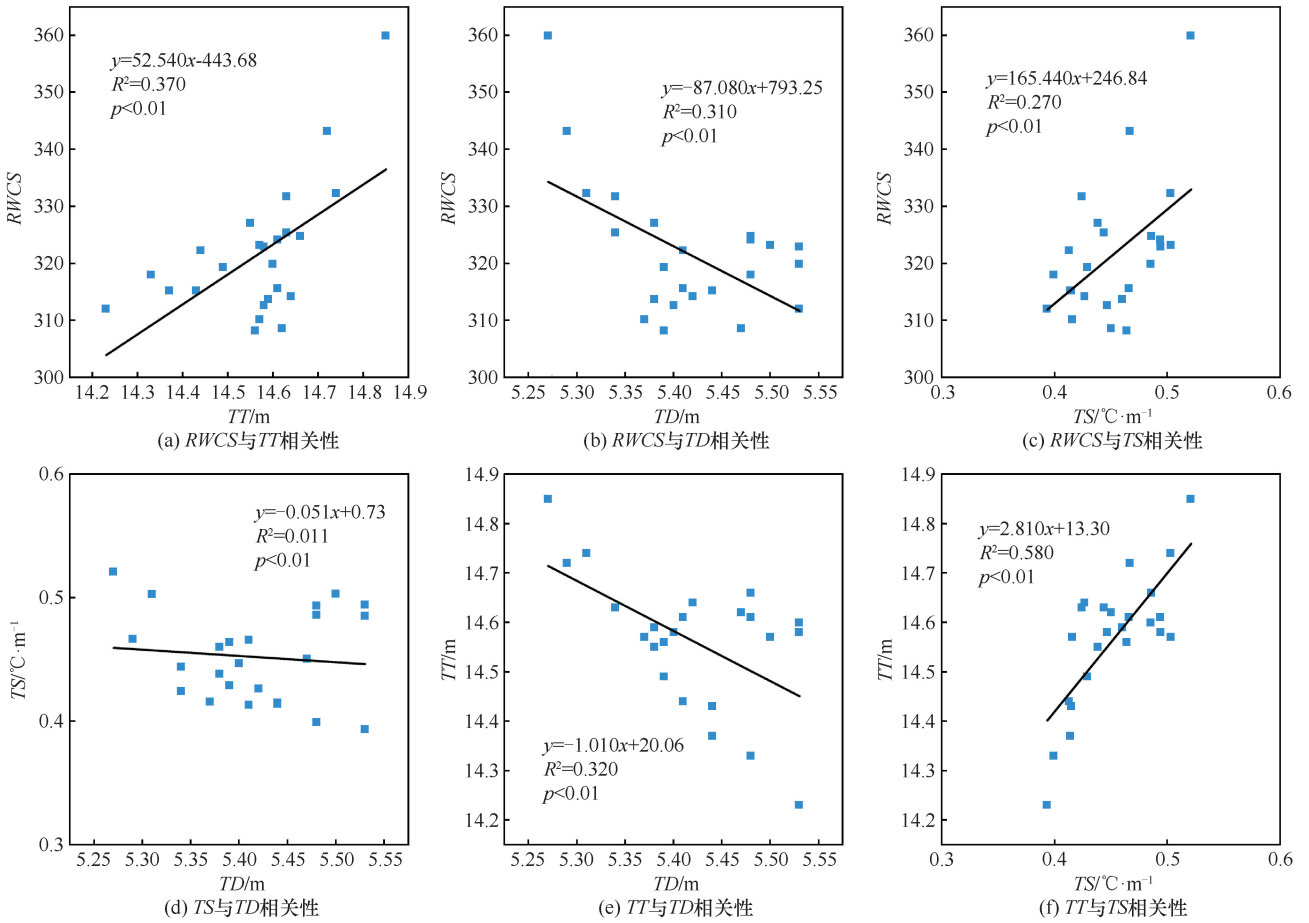


图6 平稳期各参数线性关系

Fig. 6 Linear relationship of various parameters in stabilization period

体向下游流动的过程中, 溶解氧受上述控制过程的影响, 浓度逐渐降低。随着流动和分层现象的加剧, 溶解氧的层状垂直分布变得更加明显, 尤其是在水体滞留于坝前区域时。在深层水体中由于底栖生物和沉积物等耗氧, 溶解氧浓度持续降低, 而水体分层会使垂直掺混困难, 溶解氧得不到补充。随着分层时间的延长, 溶解氧浓度会进一步降低, 导致富营养化现象的发生, 对水生生态系统构成严重威胁。

糯扎渡水库溶解氧的垂直分布特征与热分层分布相对应(见图3), 并且已有研究表明, 在深湖和水库中, 溶解氧的深度剖面 and 分层高度依赖于湖泊的热分层模式^[39-40]。通过对比图3(a)和图3(b)可以发现, 水体分层之后, 氧跃层与温跃层处于相同水深位置, 且两个分层开始和结束时间相符, 张运林等^[6]也发现氧跃层与温跃层深度呈正相关, 热分层的持续时间延长可以增加氧跃层的持续时间。

此次研究中, 表层溶解氧浓度表现出季节性波动, 冬季和春季浓度较高, 夏季和秋季较低, 并且表层溶解氧最大值出现在春季, 达到了11.54 mg/L, 表层溶解氧最小值4.13 mg/L出现在秋季, 与殷燕等^[41]在千岛湖水体溶解氧研究中发现一致, 这是由于春季天气回暖, 万物复苏, 除大气复氧外, 浮游植物开始大量繁殖, 特别是在水体表层适宜的光照条件和温度使得浮游植物进行光合作用, 且强度大于表层生物的呼吸耗氧作用, 光合作用产生的氧气一部分逸散到大气中, 而另一部分则溶解于水中, 使得表层水体溶解氧在春季时达到最高。

氧跃层位于温跃层内下侧, 上边界深度低于温跃层, 下边界几乎重合, 其溶解氧浓度随水深的增加而迅速减小, 并且溶解氧极小值(MOM)也出现在了这里, 最低达到了0.59 mg/L, 夏威夷等^[42]在仙女湖的研究也观察到相同现象。其主要原因可能有: (1)温跃层中较大的温度梯度限制了垂向水体的交

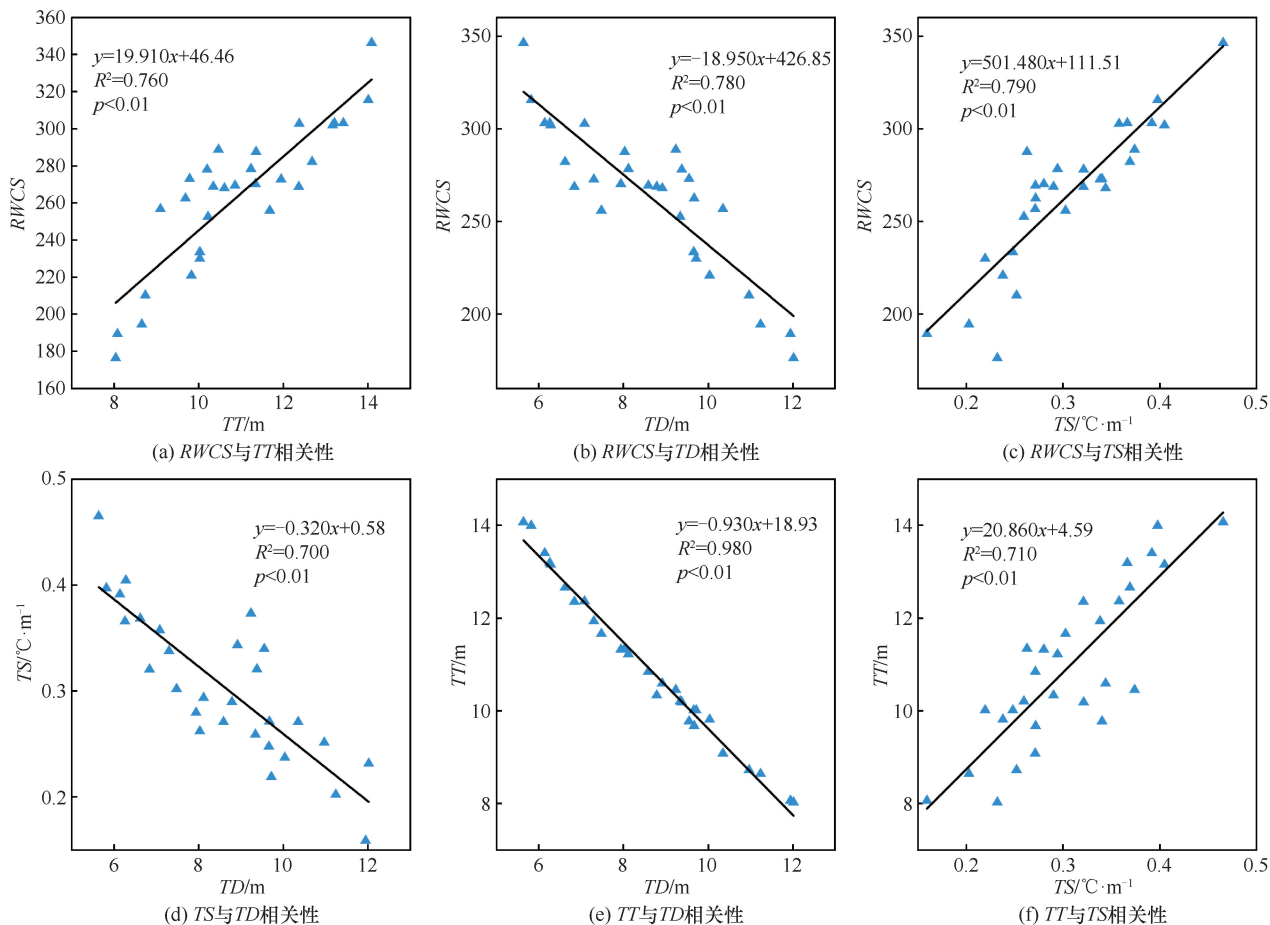


图7 减弱期各参数线性关系

Fig. 7 Linear relationship of various parameters in weakening period

换, 导致上层水体对温跃层中溶解氧的补给减少; (2) 温跃层内的水生生物的呼吸耗氧, 同时浮游动物捕食浮游植物导致光合作用产氧量减少; (3) 有机物的细菌氧化、化学氧化并通过其他还原无机物耗氧。

低氧层位于水库下层的滞温层中, 水体扰动小, 没有大气复氧和植物光合作用产氧, 只能通过上层溶解氧的传递来进行补给, 在水库热分层期间, 温跃层的形成会阻止水体表层和底层的上下掺混, 同时也会将滞温层与上层水体的大气复氧以及光合作用产氧作用隔离开来, 另外, 滞温层内部的有机质分解和底部沉积物的耗氧反应都会导致溶解氧的消耗, 从而造成下层水体形成稳定的低氧区域^[43]。并且随着分层的持续, 其中的溶解氧也会持续消耗。由此可说明温度热力分层是影响溶解氧的关键因素, 曾春芬等^[44]也在天目湖的研究中得出相同结果。

在全球变暖的大趋势下, 不得不考虑气候变暖对水生态环境的影响, 以往的许多研究表明, 气候

变暖会加强湖泊和水库的热分层, 增加热稳定性, 延长分层时间^[15,45]。从1969年到2002年, 美国太浩湖的热稳定性增加了32%, 非洲坦噶尼喀湖的热稳定性增加了98%, 而苏必利尔湖的分层时间从145 d增加到了170 d, 我国纳木错湖的夏季分层在1979年到2012年期间, 每10 a提前4.2 d。此外, 世界上许多湖泊的温跃层深度一直在下降, 从1970年到2002年^[46], 太浩湖的温跃层深度减少了10 m^[36], 千岛湖的温跃层深度在过去几十年中减少了1.4 m^[20], 并且在千岛湖发现短期极端气候变化, 即冬季气温升高, 会显著影响春季滞温层的热稳定性和溶解氧浓度^[26]。

由图11可以看出, 糯扎渡水库近些年的年平均气温和极端高温都呈现出上升趋势, 并且, 此次高频浮标数据的研究结果表明, 糯扎渡水库的热分层与表层水温密切相关, 而气温与表层水温之间有显著相关性($r^2=0.755$, $p<0.01$), 如图8(d)所示。此外, 糯扎渡是典型的高山峡谷型水库, 具有较大的水深, 导致其具有明显的水温分层现象^[47], 因此, 气候变暖

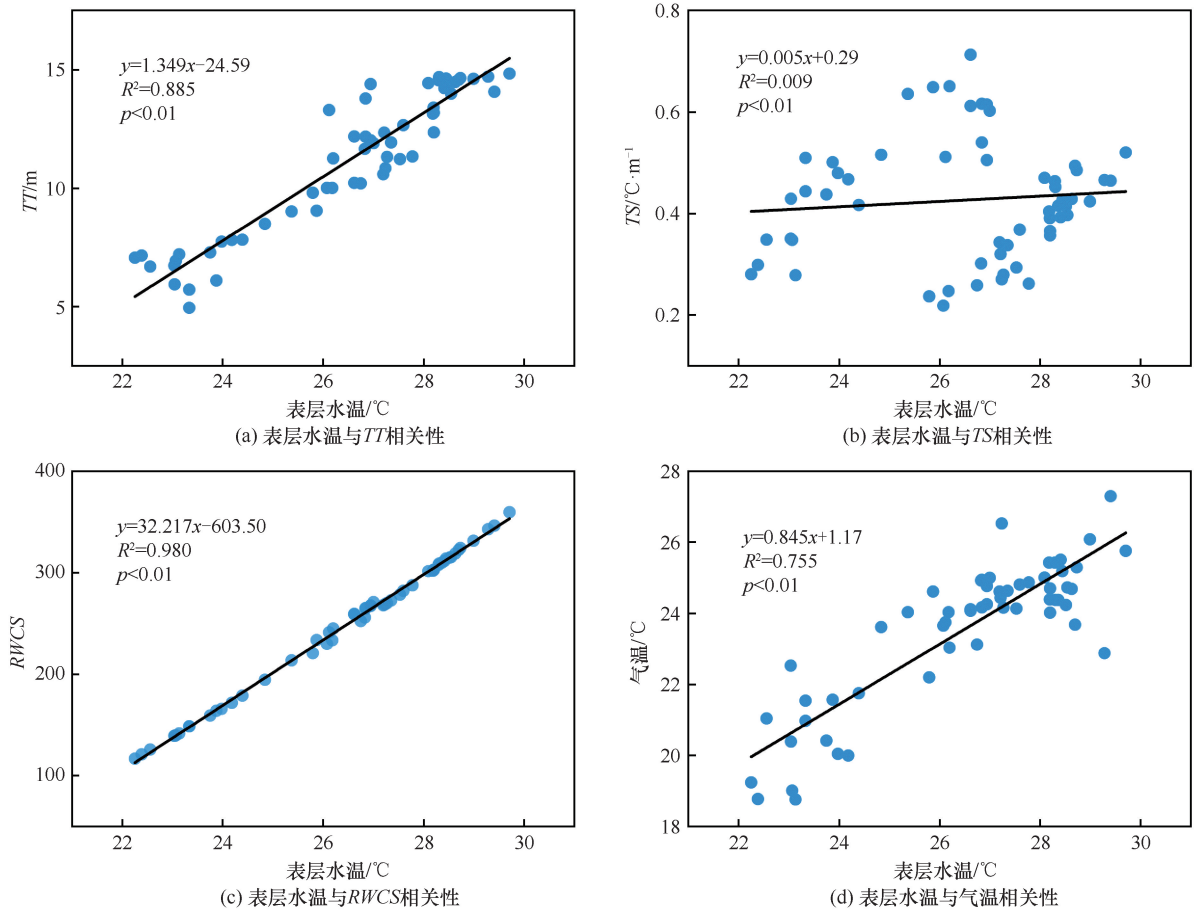


图 8 热分层周期内表层水温与温跃层各参数线性关系

Fig. 8 Linear relationship between surface water temperature and thermocline parameters in thermal stratification period

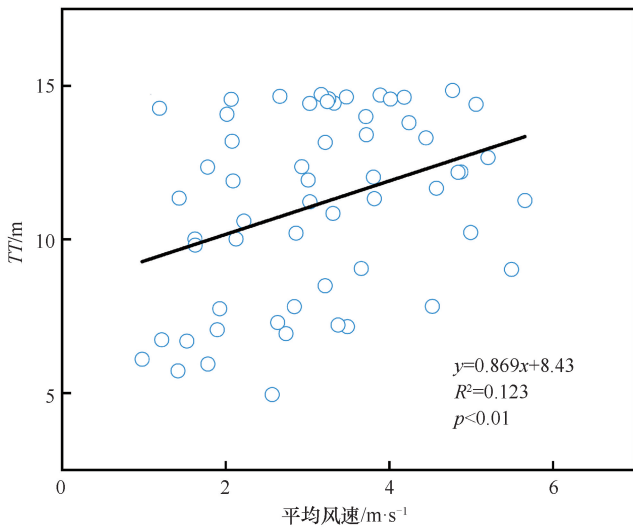


图 9 平均风速与热分层厚度线性关系

Fig. 9 Linear relationship between average wind speed and thickness of thermal stratification

引起的气温升高可能会导致糯扎渡水库的热分层更加稳定, 分层时间延长, 而溶解氧的剖面浓度和分布情况也会发生改变, 导致浮游动植物垂向分布及

群落结构发生变化, 甚至涉及其他方面的环境问题等。

4 结论

本研究基于糯扎渡水库 2021 年 10 月—2022 年 10 月的高频剖面数据, 研究了水库季节性分层和水化学特征, 并分析了气候变暖对水库分层的影响, 结论如下。

(1) 糯扎渡水库水体分层现象明显, 表现为以年为尺度的热分层-混合模式循环, 热分层过程可划分为形成期、平稳期和减弱期三个阶段。

(2) 热分层期间, 水温垂向变化较大, 尤其是在温跃层中, 表层与底层之间温差最大可达到 12.3 °C。热分层是影响溶解氧的关键因素, 影响了溶解氧浓度的分布情况, 且氧跃层与温跃层在相同水深位置形成, 持续时间一致。

(3) 表层水温是影响水体分层的主要因素, 气温与表层水温表现为极显著相关, 气候变暖会对表层水温产生直接影响, 进而导致水体热分层的变化, 溶

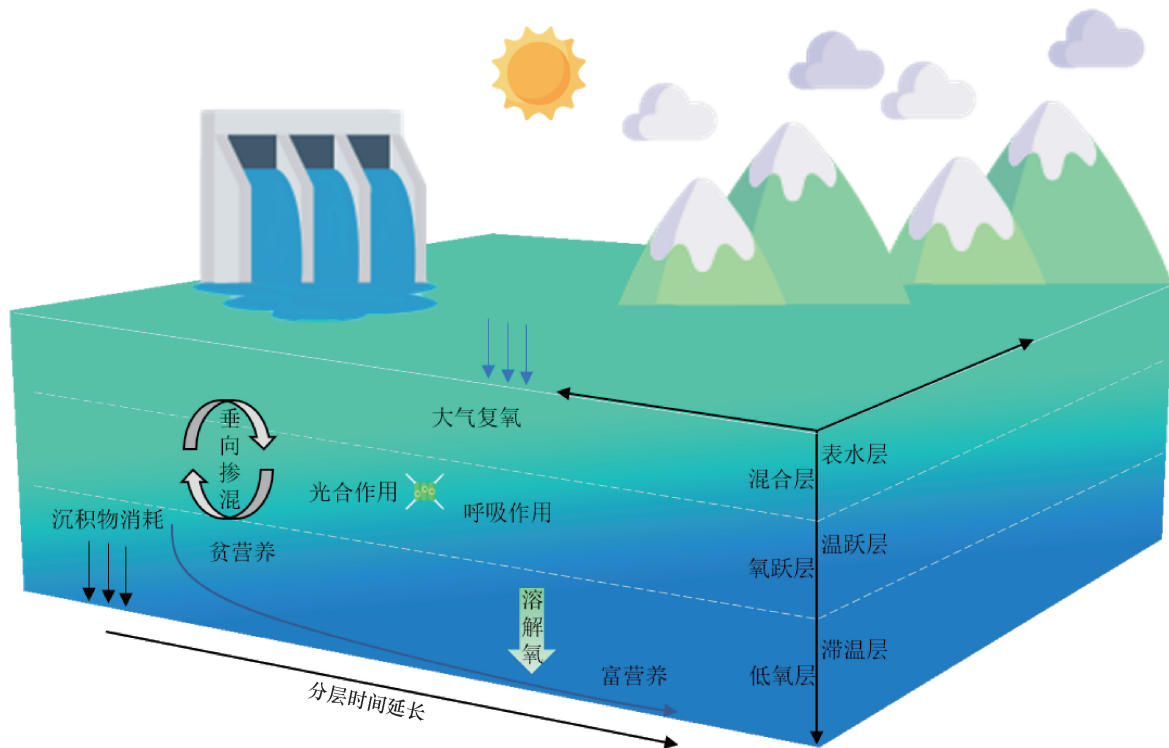


图 10 溶解氧演变示意

Fig. 10 Schematic diagram of dissolved oxygen evolution

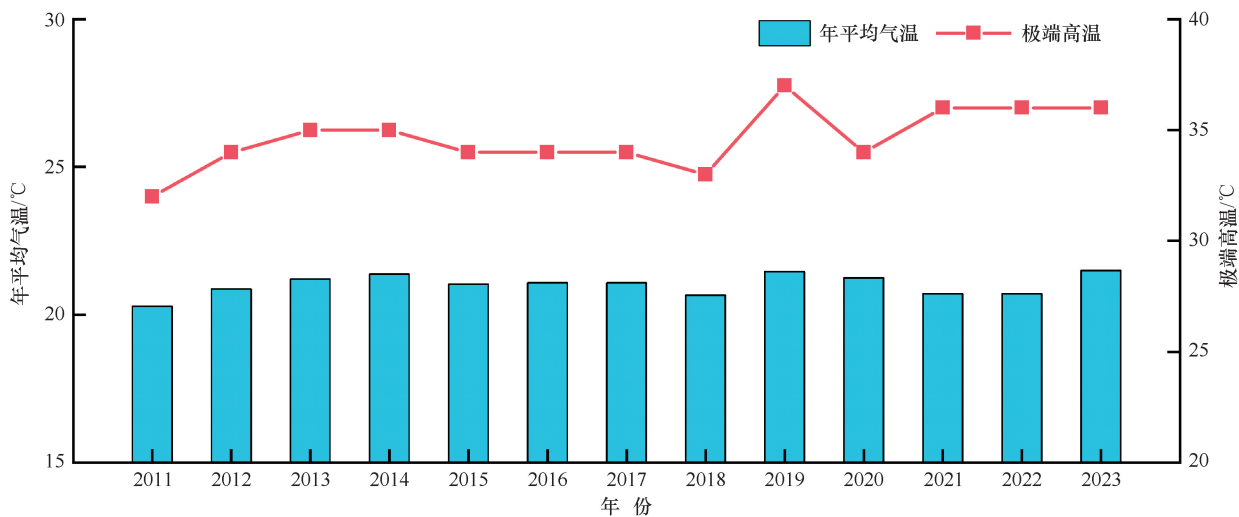


图 11 糯扎渡水库气温年度变化

Fig. 11 Annual variation in air temperature in Nuozhadu Reservoir

解氧剖面浓度和分布情况发生改变, 甚至引发其他环境问题。

参考文献 (References):

[1] 郑莹莹, 刘树元, 刘虹, 等. 亚深型水库水体季节性分层特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(2): 359-370.
ZHENG Y Y, LIU S Y, LIU H, et al. Seasonal stratified

characteristics of water bodies in a sub-deep reservoir[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(2): 359-370.

[2] 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 J, YANG S W, WANG Y M, et al. Study on the effect of water temperature in a hybrid pumped storage power station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(9): 133-143.

- [3] 尹晓燕, 李海明, 苏思慧, 等. 滨海水库沉积物-水界面扩散边界层水化学特征及成因机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1160-1172.
YIN X Y, LI H M, SU S H, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of the sediment-water interface diffusion boundary layer in the coastal reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1160-1172.
- [4] AESCHBACH-HERTIG W, HOLZNER C P, HOFER M, et al. A time series of environmental tracer data from deep meromictic Lake Lugano, Switzerland[J]. Limnology and Oceanography, 2007, 52(1): 257-273.
- [5] APARICIO F L, NIETO-CID M, CALVO E, et al. Wind-induced changes in the dynamics of fluorescent organic matter in the coastal NW Mediterranean[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1001-1012.
- [6] ZHANG Y L, WU Z X, LIU M L, et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China)[J]. Water Research, 2015, 75: 249-258.
- [7] PAERL H W, GARDNER W S, MCCARTHY M J, et al. Algal blooms: Noteworthy nitrogen[J]. Science, 2014, 346(6206): 175.
- [8] MACINTYRE S, FRAM J P, KUSHNER P J, et al. Climate-related variations in mixing dynamics in an Alaskan Arctic lake[J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6part2): 2401-2417.
- [9] BECKER V, HUSZAR V L M, CROSSETTI L O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir[J]. Hydrobiologia, 2009, 628(1): 137-151.
- [10] CHEN X C, WANG X D, WU D Y, et al. Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya reservoir, China[J]. Limnology, 2009, 10(3): 159-165.
- [11] HAO J J, CHEN Y L, WANG F, et al. Seasonal thermocline in the China Seas and northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C2): 2011JC007246.
- [12] ARHONDITSIS G B, BRETT M T, DEGASPERI C L, et al. Effects of climatic variability on the thermal properties of Lake Washington[J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(1): 256-270.
- [13] O' REILLY C M, SHARMA S, GRAY D K, et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(24): 10.
- [14] STAINSBY E A, WINTER J G, JARJANAZI H, et al. Changes in the thermal stability of lake simcoe from 1980 to 2008[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37: 55-62.
- [15] AUSTIN J, COLMAN S. A century of temperature variability in Lake Superior[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(6): 2724-2730.
- [16] YAGHOUTI M, HEIDARZADEH N, ULLOA H N, et al. The impacts of climate change on thermal stratification and dissolved oxygen in the temperate, dimictic Mississippi Lake, Ontario[J]. Ecological Informatics, 2023, 75: 102087.
- [17] BRUESEWITZ D A, CAREY C C, RICHARDSON D C, et al. Under-ice thermal stratification dynamics of a large, deep lake revealed by high-frequency data[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(2): 347-359.
- [18] LIVINGSTONE D M. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate Central European Lake[J]. Climatic Change, 2003, 57(1): 205-225.
- [19] POSCH T, KÖSTER O, SALCHER M M, et al. Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(11): 809-813.
- [20] ZHANG Y L, WU Z X, LIU M L, et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China[J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59(4): 1193-1202.
- [21] 张士杰, 彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1254-1258.
ZHANG S J, PENG W Q. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1254-1258.
- [22] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1384-1392.
WANG L J, YU H, NIU Y, et al. Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian Lake during thermal stratification period in summer[J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1384-1392.
- [23] HAMPTON S E, IZMEST' EVA L R, MOORE M V, et al. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake-Lake Baikal, Siberia[J]. Global Change Biology, 2008, 14(8): 1947-1958.
- [24] JONES J R, KNOWLTON M F, OBRECHT D V, et al. Temperature and oxygen in Missouri Reservoirs[J]. Lake and Reservoir Management, 2011, 27(2): 173-182.
- [25] SAROS J E, NORTHINGTON R M, OSBURN C L, et al. Thermal stratification in small Arctic lakes of southwest Greenland affected by water transparency and epilimnetic temperatures[J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(4): 1530-1542.
- [26] 张弛, 张洋, 吴雨娇, 等. 缓解水温失调问题的水库生态调控策略[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 134-143.
ZHANG C, ZHANG Y, WU Y J, et al. Reservoir ecological regulation strategy to alleviate water temperature imbalances[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 134-143.
- [27] 周思佳, 秦鑫, 薛文豪, 等. 糯扎渡水电站不同调度下泄低温水改善效果研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 170-179.
ZHOU S J, QIN X, XUE W H, et al. Research on the improvement effect of low outflow temperature under different reservoir operation at Nuozhadu Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 170-179.
- [28] CUI G Y, WANG B L, XIAO J, et al. Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in karst hydroelectric reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125607.
- [29] CUI G Y, LI X D, LI S Q, et al. Varying water column stability controls the denitrification process in a subtropical reservoir,

- Southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 111: 208-219.
- [30] MARTIN J L, MCCUTCHEON S C, SCHOTTMAN R W. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [31] LIU M, ZHANG Y L, SHI K, et al. Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 614-624.
- [32] JANKOWSKI T, LIVINGSTONE D M, BÜHRER H, et al. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion; Implications for a warmer world[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(2): 815-819.
- [33] DETMER T M, PARKOS J J, WAHL D H. Long-term data show effects of atmospheric temperature anomaly and reservoir size on water temperature, thermal structure, and dissolved oxygen[J]. *Aquatic Sciences*, 2021, 84(1): 3.
- [34] 王珂, 蒲焘, 史晓宜, 等. 澜沧江源区气温与降水对径流变化的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(3): 306-315.
WANG K, PU T, SHI X Y, et al. Impact of temperature and precipitation on runoff change in the source region of Lancang River [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(3): 306-315.
- [35] NORTH R P, NORTH R L, LIVINGSTONE D M, et al. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: Consequences of a climate regime shift[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 811-823.
- [36] COATS R, PEREZ-LOSADA J, SCHLADOW G, et al. The warming of lake tahoe[J]. *Climatic Change*, 2006, 76(1): 121-148.
- [37] 杜彦良, 彭文启, 刘畅. 分层湖库溶解氧时空特性研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(8): 990-998.
DU Y L, PENG W Q, LIU C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(8): 990-998.
- [38] 张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 130-139.
ZHANG Y L. Effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications: A review[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 130-139.
- [39] RAHMAN A K M, AL BAKRI D, FORD P, et al. Limnological characteristics, eutrophication and cyanobacterial blooms in an inland reservoir, Australia[J]. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 2005, 10(4): 211-220.
- [40] YOSHIMIZU C, YOSHIYAMA K, TAYASU I, et al. Vulnerability of a large monomictic lake (Lake Biwa) to warm winter event[J]. *Limnology*, 2010, 11(3): 233-239.
- [41] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2539-2546.
YIN Y, WU Z X, LIU M L, et al. Dynamic distributions of dissolved oxygen in Lake Qiandaohu and its environmental influence factors[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2539-2546.
- [42] 夏威, 张萌, 周懋, 等. 大型深水湖库溶解氧时空变化及驱动因素: 以江西仙女湖为例[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 874-885.
XIA W, ZHANG M, ZHOU M, et al. Spatio-temporal dynamics of dissolved oxygen and its influencing factors in Lake Xiannv Jiangxi, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 874-885.
- [43] 刘畅. 热分层水库缺氧区演化机理、驱动因素及抑制条件研究: 以大黑汀水库为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
LIU C. *Evolution, Driving Factors and Inhibition Conditions of Hypoxia Process in Thermal Stratified Reservoirs*[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [44] 曾春芬, 黄文钰, 王伟霞, 等. 天目湖溶解氧分布特征及环境影响因子[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(4): 445-451.
ZENG C F, HUANG W Y, WANG W X, et al. Distribution and its influence factors of dissolved oxygen in Tianmuhu lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(4): 445-451.
- [45] LIVINGSTONE D M, ADRIAN R, ARVOLA L, et al. Regional and supra-regional coherence in limnological variables[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 311-337.
- [46] HUANG L, WANG J B, ZHU L P, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: Evidence from a lake model simulation of nam co, China, during 1979—2012 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(24): 13.
- [47] 官卓宇, 王慎, 张思思, 等. 澜沧江不同中游水库分层对溶解氧垂向分布的影响研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 12-18.
GUAN Z Y, WANG S, ZHANG S S, et al. Effect of water stratification on vertical distribution of dissolved oxygen in different reservoirs in the middle reaches of Lancang River[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2020, 42(3): 12-18.

(责任编辑 王璐)