

南方水库热分层消亡时期水体混合特征及其驱动机制*

王 璨^{1,2}, 李一平^{1,2**}, 李聂贵³, 郭晋川⁴, 朱 雅^{1,2}, 吴卫熊⁴, 魏 尧^{1,2}, 陈 宇^{1,2}

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(3: 水利部南京水利水文自动化研究所, 南京 210012)

(4: 广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530023)

摘要: 稳定分层的深水水库常在冬季发生“翻库”现象, 继而导致水库的整体水质下降, 影响饮用水安全问题。为探究南方水库热分层消亡时期水体混合特征, 在冬季 2019 年 11 月—2020 年 2 月对南宁市天雹水库水体理化指标开展长序列原位监测, 并结合水体垂直扩散系数, 分时期(热分层期、减弱期、完全混合期、形成期)刻画水库热分层消亡全过程中水温 T、溶解氧 DO 的剖面变化特征, 探讨了气象因子(气温、太阳辐射、风速等)与水动力因子(水体垂直扩散系数 K_z)对水体理化指标的影响。结果显示: 梭树人工林区水库热分层消亡期温度分层与溶解氧分层变化不同步, 溶解氧分层的破坏较水温分层的破坏出现滞后, 其结构失稳是气温及太阳辐射共同作用的结果; 期间水体垂直扩散系数变化范围 0.16~380.36 m²/d, 均值为 30.46 m²/d, 表层 K_z 变化的主要控制因子为气温变化, 且较 T 及 DO 而言, 表层 K_z 对气温的变化更加敏感($R_K = -0.44, R_T = 0.25, R_{DO} = 0.25, P < 0.01$), 底层 K_z 的变化与水体混合程度变化一致, 能够更准确地表征水体垂向混合情况; 水体垂向 T、DO、lg K_z 分布具有时间异质性, 热分层期及半混合时期 lg K_z 与 T 及 DO 均呈现显著的正相关($R_T = 0.60, R_{DO} = 0.76, P < 0.01$), 而在水体完全混合后, K_z 与 T 呈现负相关($R_T = -0.19, P < 0.01$), 与 DO 不存在相关关系($R_{DO} = 0.04, P > 0.05$)。热分层消亡为水质恶化提供了环境条件, 因此在水库监控管理中, 应当着重关注冬季气象因子的变化, 并加以防范。

关键词: 热分层; 水温; 溶解氧; 垂直扩散系数

Characteristics and mechanism of water mixing structure during the extinction of thermal stratification in southern reservoirs*

Wang Can^{1,2}, Li Yiping^{1,2**}, Li Niegui³, Guo Jinchuan⁴, Zhu Ya^{1,2}, Wu Weixiong⁴, Wei Yao^{1,2} & Chen Yu^{1,2}

(1: College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(3: Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, P.R.China)

(4: Guangxi Water Conservancy Science Research Institute, Nanning 530023, P.R.China)

Abstract: Deep reservoirs with stable stratification often ‘turn over’ in winter, leading to a decline in overall water quality and affecting the safety of drinking water. To explore the mixing characteristics of water bodies during the thermal stratification period in southern reservoirs, long-term in-situ monitoring of physical and chemical indices of Tianbao Reservoir in Nanning was conducted from November 2019 to February 2020 during the thermal stratification fading in winter. Combined with the vertical diffusion coefficient

* 2022-11-14 收稿; 2023-02-03 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52039003)、广西科技计划项目(桂科 AB20297017)和中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金联合资助。

** 通信作者; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn。

cient of water, the variation characteristics of water temperature (T) and dissolved oxygen (DO) in the whole process of thermal stratification of the reservoir were described by stages (thermal stratification, weakening, complete mixing and formation), and the influences of meteorological factors (air temperature, solar radiation, wind speed, etc.) and hydrodynamic factors (vertical diffusion coefficient K_z) on the physical and chemical indices of water were discussed. The results showed that the temperature stratification and the dissolved oxygen stratification of the reservoirs were out of sync during the extinction of the thermal stratification, and the destruction of the dissolved oxygen stratification lags behind that of the water temperature stratification, and its structural instability was the result of the combined action of air temperature and solar radiation. During this period, the vertical diffusion coefficient of the water body varied from 0.16 to 380.36 m^2/d , with an average value of 30.46 m^2/d . The main controlling factor of surface K_z change was air temperature change, and surface K_z was more sensitive to air temperature change than T and DO ($R_{K_z} = -0.44$, $R_T = 0.25$, $R_{DO} = 0.25$, $P < 0.01$). The change in bottom K_z was consistent with the change in water mixing, which could more accurately characterize the vertical mixing of water. The vertical distribution of T, DO and $\lg K_z$ in the water body was temporally heterogeneous. The $\lg K_z$ was positively correlated with T and DO during thermal stratification and semi-mixing ($R_T = 0.60$, $R_{DO} = 0.76$, $P < 0.01$), while it was negatively correlated with T ($R_T = -0.19$, $P < 0.01$) and had no correlation with DO ($R_{DO} = 0.04$, $P > 0.05$) after complete mixing. Thermal stratification extinction provides environmental conditions for water quality deterioration, so we should pay attention to the change of meteorological factors in winter and take precautions against it in reservoir monitoring and management.

Keywords: Thermal stratification; water temperature; dissolved oxygen; vertical diffusion coefficient

水库作为城镇生活的重要水源,其水质直接影响饮用水安全问题^[1-2]。而深水水库在夏秋季存在明显的热力分层,一般可分为3个水层:变温层、温跃层和滞温层^[3],其形成主要受水体深度、水体流动性以及气候条件^[4-5]等因素的影响。稳定的热分层可以阻碍上下层水体的物质交换^[6],在温跃层上下形成“氧化-还原”的对立环境,其对溶解氧、营养物质和微生物有着重要影响^[4,7-8],同时也会改变浮游植物和浮游动物的垂直分布和迁移^[1,8-9]。而由于秋冬季水库“翻库”,多座水库出现水质恶化现象,如土耳其 Tahtali 水库冬季营养盐浓度的剧增^[10],贵州百花湖水库的“黑潮”问题^[11],贵州红枫湖鱼类等水生生物的死亡现象^[12],南宁天雹水库黑水现象^[13],山东周村水库“翻库”初期锰和总磷的突增现象^[14]等,严重影响地表水源地水质安全。为确保城镇供水安全,故选择水源地水库天雹水库展开热分层消亡特征的深入研究。

为了直观表达水体分层状态,国际上常用特定系数来定义热分层,从而根据系数的大小确定湖库的热分层状态^[15]。包括水库潜在势能指数(Available Potential Energy, APE)^[16]、施密特稳定性指数(Schmidt Stability)、水体相对热稳定性指数(Relative Water Column Stability, RWCS)^[17]、垂直扩散系数(K_z)。这些指数均可用于描述水体分层情况,但 APE 指数、Schmidt stability 指数以及 RWCS 指数更多用于描述湖库热分层稳定性的强弱而非混合特征^[18-19]。如 APE 指数^[16]被用于西安黑河水库的研究,并表明热稳定系数 APE 值表现出与气温类似的季节性变化^[15]。Zhang 在新安江水库的研究中则使用 Schmidt stability 来描述热分层特性,研究表明 Schmidt stability 系数与温跃层强度及温跃层厚度均呈现显著的正相关关系^[7]。在关于大黑汀水库的研究中,刘畅等使用 RWCS^[17]来表征水库缺氧区热分层时期的分层强度和稳定性^[20]。目前已有关于湖库分层时期垂直扩散系数的研究^[21],然而水体混合状态下水柱中的垂直扩散系数与分层期间相比可能有显著差异^[22],只有少数针对水库季节性分层消亡期的热分层结构变化及混合特性变化规律展开研究,不能详细地反映水库热分层消亡过程水体理化指标的变化规律。为了更直观、准确表达水库热分层消亡期的水体理化指标变化情况及水体混合程度,本文选用水体垂直扩散系数(K_z)并结合水温 T 及溶解氧 DO 作为水体热分层消亡期混合程度的评价指标。

基于此,本研究将利用南宁市天雹水库逐日高频连续剖面观测数据精细刻画热分层消亡过程中气象因子、水体垂直扩散系数及水体理化指标的变化规律,并分析气象因子对热分层结构和水体垂向扩散的影响。在此基础上,探究冬季水库水体水质突发性恶化的原因,以期为南方地区水库水质改善和保护治理提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天雹水库(22°52'16"~22°53'17"N, 108°13'31"~108°14'9"E)位于广西壮族自治区南宁市高新区。该水库建成于1960年,主要功能有城市供水、灌溉及防洪,是南宁市城市供水水源地,水库总面积73.3万m²,集雨面积50.8km²,海拔95.83m,总库容1360万m³。天雹水库处于亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温暖干燥,年均气温21.6℃,入库径流主要受降雨影响,年均降雨量1304.2mm。天雹水库属单次混合型热分层水库,一般在3—11月形成热分层结构,12月—次年2月发生垂向水体混合^[23]。近年来,天雹水库多在冬季气温骤降后水体出现突发性水质恶化现象,为探究天雹水库消亡期前后水体变化特征,本实验于2019年11月—2020年2月进行水体逐日监测,且天雹水库在12月已出现突发性水质恶化现象。

1.2 野外观测

高频逐日的剖面观测数据来自天雹水库在中心处布设的固定浮标(22°52'12"N, 108°14'22.46"E),该位置水深约14m,距离取水口较远,受入库出库径流影响较小,检测水样在冬季有明显水质恶化现象,具体位置见图1。浮标上挂有YSI多参数水质分析仪(美国,EXO2)对垂向水温(T,℃)和溶解氧浓度(DO,mg/L)浓度进行在线测定,每4h监测一次,从水面开始,至沉积物—水界面处停止,每隔0.5m监测一次。选取每日中午特定时间点的监测数据进行分析。

区域气温、太阳辐射、风速、降雨等气象数据来自在天雹水库管理所自建的气象站(Vantage Pro2)和天雹水库管理部门。气象站每小时记录一组气象数据,本研究选取每日平均监测值进行研究。沉积物由UWITEC柱状采泥器采集,用于监测沉积物含水率及沉积物温度。

1.3 数据处理

垂直扩散系数 K_z 计算公式如下^[22]:

$$K_z = - \left[\partial \int_z^{z_{max}} T(\xi) d\xi / \partial t - (H_{short}(z) + H_{sed}) / C_{p,w} \rho \right] / \left[\partial T(z) / \partial z \right] \quad (1)$$

式中, K_z 为垂直扩散系数(m²/d); T 为水温(℃); z 为水深(m); t 为时间(d); $H_{short}(z)$ 为不同深度处的净短波辐射(W/m²); H_{sed} 为水和沉积物之间的热交换率(W/m²); $C_{p,w}$ 为水的比热,取4190J/(kg·℃); ρ 为水体密度(kg/m³)。不同深度处的净短波辐射、水和沉积物之间的热交换率计算公式如下:

$$H_{short}(z) = (1 - \gamma) / (1 - 0.55) H_{short,i} \exp(-k_d z) \quad (2)$$

$$H_{sed} = -2^{(1-\theta)} [0.0014(T_{wsi} + T_{s-10} + 0.5688)]^\theta (-T_{s-10}) / (2\Delta z) \quad (3)$$

式中, γ 为水面反射率,经验参数,取0.06; k_d 为消光系数,取0.3(m⁻¹); $H_{short,i}$ 为气—水界面处的短波辐射(W/m²); θ 为沉积物含水率(%); T_{wsi} 为泥水界面温度(℃); T_{s-10} 沉积物温度(℃)。

SPSS 26用于数据汇总和处理,包括平均值、相关分析以及回归分析。MATLAB R2018b用于计算水体 K_z ,Origin 2018用于图表的绘制。

2 结果与讨论

2.1 热分层消亡时期气象因子变化

气象因子对热分层生消起着重要的作用。总体上,天雹水库气温、太阳辐射在观测时段内呈现出先波

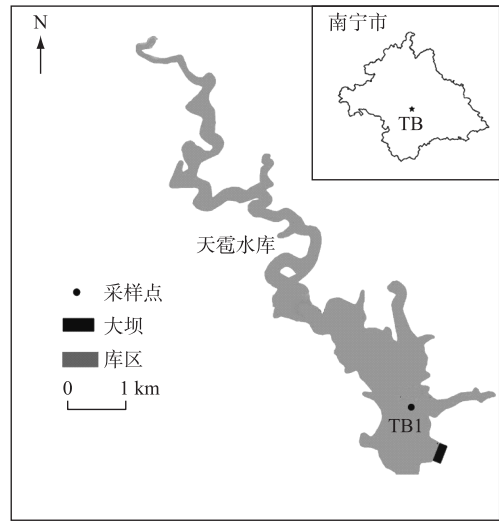


图1 天雹水库采样点
Fig.1 Locations of the sampling sites in Tianbao Reservoir

动降低后急剧升高的趋势(图 2a), 风速在 0~2.00 m/s 之间波动(图 2b)。从 11 月 22 日—1 月 31 日气温及太阳辐射波动降低, 分别下降 6.00℃ 及 22.25 W/m², 降幅为 32.55%、57.04%, 最低气温为 9.88℃(1 月 27 日), 最低辐射为 10.75 W/m²(1 月 25 日)。自 2 月开始, 气温及太阳辐射呈现回升趋势, 最高分别可达 21.25℃、117.46 W/m²。平均风速则在 0.52~0.89 m/s 内波动。此阶段降雨量少, 仅有 8 天存在降雨, 且仅 1 月 18 日降雨量高于 50.00 mm。

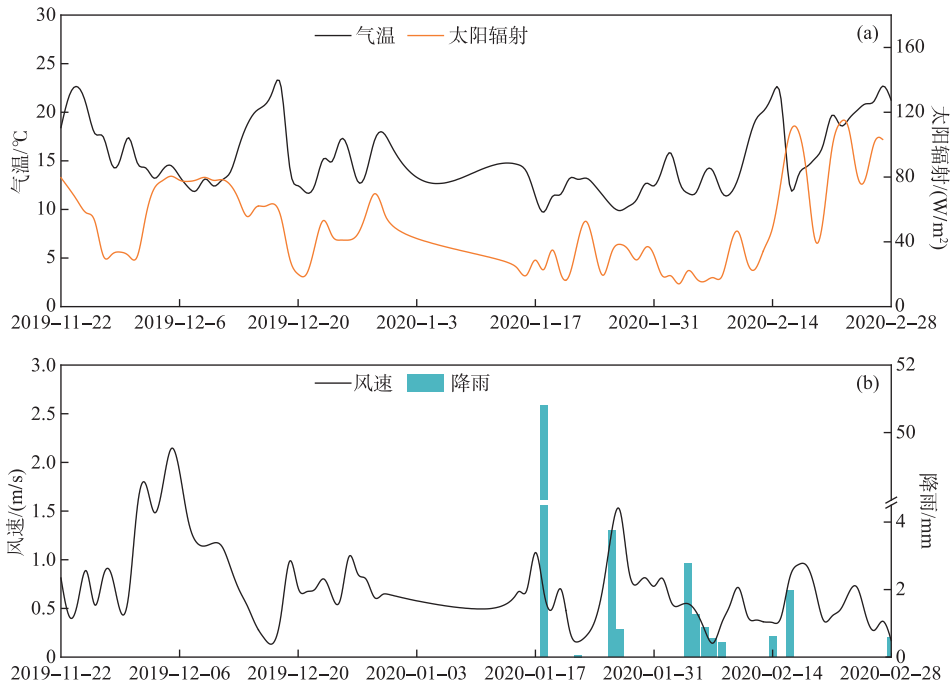


图 2 热分层消亡期气象因子变化

Fig.2 Change of meteorological factors during extinction period of thermal stratification

2.2 水温和溶解氧浓度垂向变化

水温是湖库重要的理化指标, 温度分层是底层水体缺氧的主要原因^[24-25], 温跃层的存在阻止了上下层水体中溶解氧的传递。研究表明: 垂向温度梯度 $\geq 0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的水体即为温跃层^[26], 依据此定义溶解氧梯度 $\geq 0.2 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$ 的水体为氧跃层^[27]。水面下 3 m 作为表层水体, 沉积物上 3 m 作为底层水体。

天霁水库 2019 年 11 月—2020 年 2 月深水区逐日水温垂向分布呈现明显的变化过程(图 3), 具体可分为 4 个阶段: 热分层期、减弱期、完全混合期、形成期。热分层期为 11 月底至 12 月底, 水柱垂向温差明显, 最高达 6.31℃。12 月 27 日水柱垂向温差消失, 说明底层水体开始出现混合的现象, 但由于气象等因素, 水体并未完全混合, 直至 1 月 20 日水柱呈现完全混合状态, 水库分层消退, 这段时期被定义为减弱期。完全混合期为 1 月 20 日—2 月 11 日, 水体处于完全混合的状态。2 月 12 日之后, 表层水温逐渐上升, 表底层温差再次出现, 将其定义为形成期。

DO 是反映水体新陈代谢状况的重要指标^[28]。水库热分层会引起一系列影响, 尤其是对水中的 DO, 热分层持续时间越长会使得氧跃层越稳定。这是因为水库热分层使得垂向各层水体的水动力差异显著, 为 DO 的垂向分层提供了分异性物理环境, 同时在各水层内不同的生化过程作用下, 垂向各层 DO 呈现不同的演变特征^[27]。Zhang 的研究发现氧跃层深度和温跃层深度存在很强的正相关关系 ($R=0.99$, $P<0.01$)^[7]。然而, 天霁水库 DO 对热变化具有潜在的敏感性, 因此其变化更加复杂, 氧跃层的破坏过程与温跃层破坏过程不一致。在热分层时期, 库区表、底层温差及溶解氧浓度差大, 分别为 6.31℃ 及 8.57 mg/L, 库区仍存在水温和溶解氧分层现象, 6~9 m 处存在明显的温跃层与氧跃层, 底层 DO 约 0.00 mg/L。随着气温逐步降低, 温

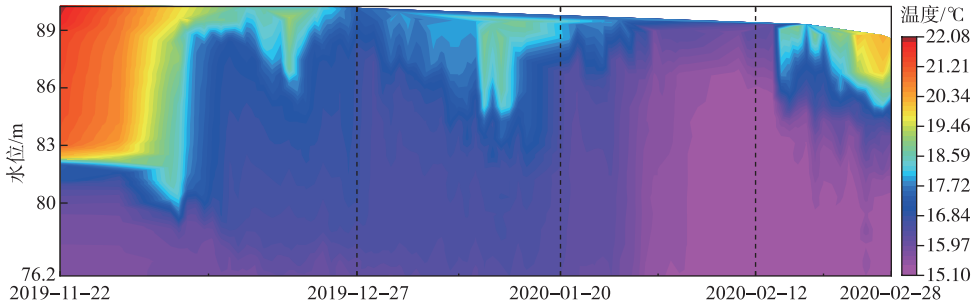


图 3 2019 年 11 月—2020 年 2 月水温垂向分布剖面图

Fig.3 The water temperature profile on 22 November 2019 and 28 February 2020

跃层及氧跃层深度呈现下降趋势,12月5日,温跃层及氧跃层下移至9~11 m。随着气温和太阳辐射的降低,表层水体吸收的热量逐渐减少,温跃层深度下移至12.50 m,温跃层强度较弱(0.20~0.30°C/m),此时T与DO的变化出现不一致,9~12 m处仍存在明显的氧跃层,底部DO仍处于缺氧状态(约0.20 mg/L)。直至完全混合时期,分层结构被完全破坏,表底层温差仅0.19°C,水体垂向对流使得底层水体缺氧状况得到改善,还原性物质释放减少,耗氧作用下降^[27],底层DO由0.85 mg/L上升至5.33 mg/L,同时垂向DO差异消失。随着气温及太阳辐射的回升,表层T开始逐渐增加,加之大气复氧作用以及浮游植物初级生产力的提高^[29],使得DO较完全混合时期明显增大,表层DO上升至8.00 mg/L以上,水体逐渐开始出现分层的现象(图4)。

2.3 水体垂直扩散系数垂向变化

水体垂直扩散系数 K_z 是通过类比分子扩散来表征水体垂向混合情况,其值越大表明垂向混合越剧烈。本研究利用浮标高密度长序列监测资料对研究时段内的深水区 K_z 进行计算,得到时间变化序列(图5)。

天雹水库 K_z 在观测时段内呈现先减小继而波动增加最终急剧减小的趋势。热分层期 K_z 平均值为24.04 m²/d,从12月27日(均值23.11 m²/d)开始逐渐增加,说明开始出现消亡现象,至1月20日底层突破30.00 m²/d,此时表底层温差及溶解氧浓度差完全消失,水库分层消退,水体进入完全混合时期, K_z 继续增大至105.36 m²/d(2月4日)转而减小。在2月12日, K_z 突降至4.15 m²/d,表明水体已完成垂向混合。

同时图5仍表明 K_z 在垂向上也呈现显著的区别。表层水体变化幅度较大,范围为1.00~380.36 m²/d,尤其在热分层期,表层 K_z 易受到气温、辐射等的影响^[30]而波动明显。已有研究表明,底层水体 K_z 变化与水体混合程度相关性较强^[22]。天雹水库底层 K_z 基本保持不变,除完全混合时期外通常为0.02~30.00 m²/d,即在热分层时期底层水体受扰动较小,随着分层的破坏,底层扰动愈发剧烈,在完全混合期热分层已经破坏到沉积物-水界面,而在完全混合期结束后, K_z 的突降表明水体不再发生垂向混合,与T及DO的结果一致。综上所述,南方水库热分层不同时期垂向扩散程度差异性较大,热分层的破坏是个缓慢的过程。

2.4 热分层消亡期参数相关关系

基于天雹水库垂向T、DO、lg K_z 分布,分析了三者互相关系。图6及表1不同分层水体T、DO和lg K_z 的关系表明,不同分层时期不同水层中参数之间的关系是不同的。例如,在热分层期,DO与T垂向特征保持

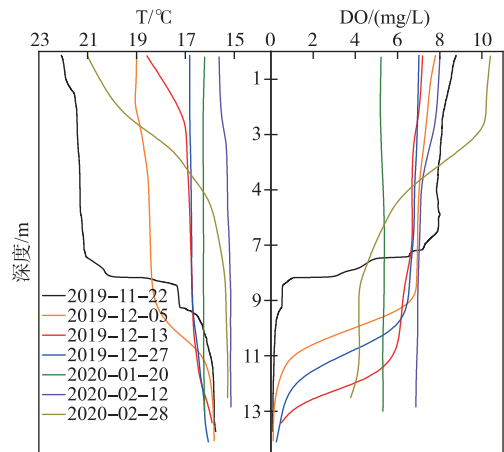


图 4 天雹水库水体垂向 T 和 DO 分布特征

Fig.4 Vertical distribution of T and DO in Tianbao Reservoir

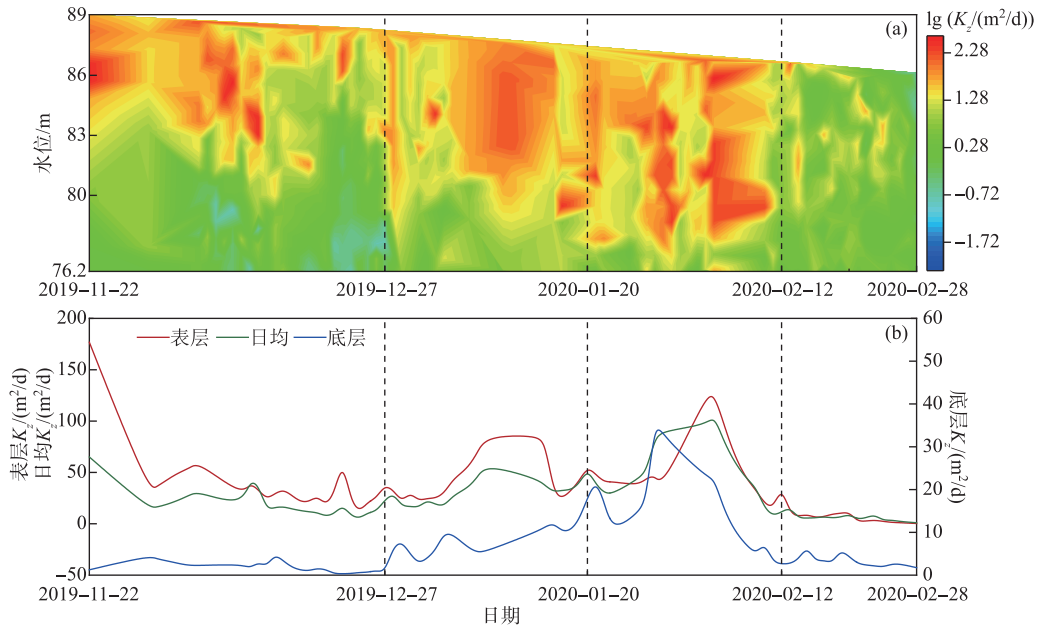


图 5 垂直扩散系数随时间变化

Fig.5 Vertical diffusivity of water column over time

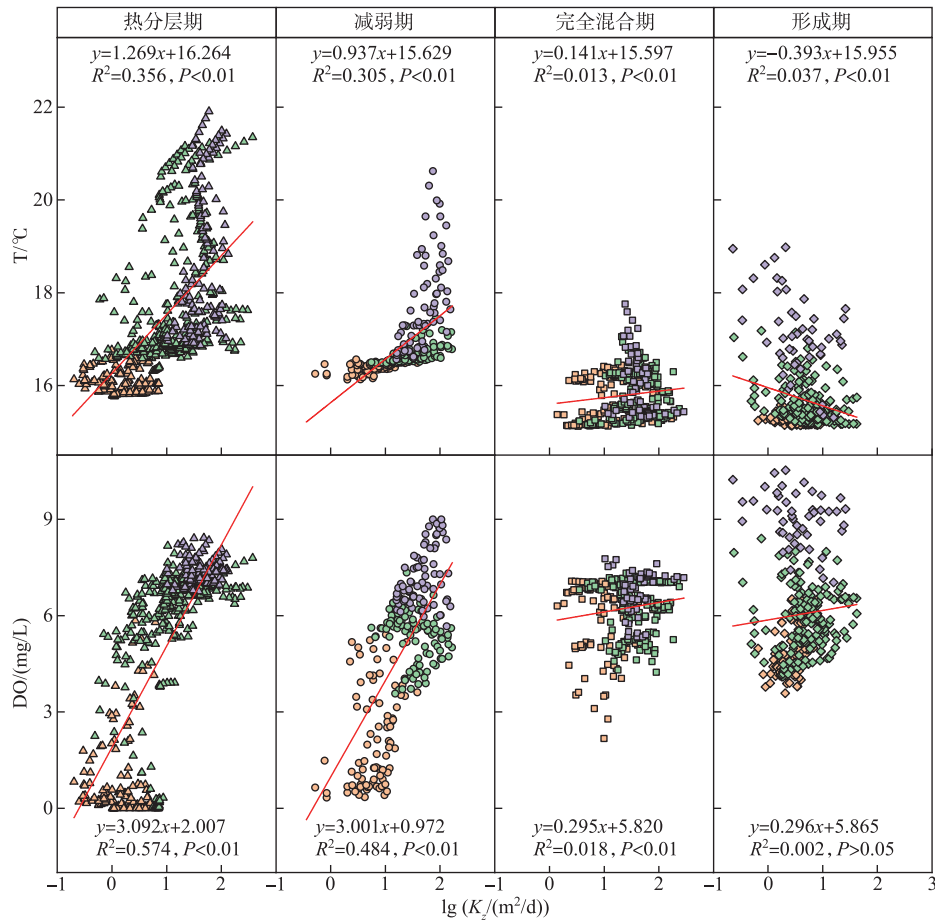
表 1 不同分层水体 T、DO 和 lg K_z 的关系

Tab.1 Relationship between T, DO and lg K_z in different layers of water

指标	分层水体	热分层期	减弱期	完全混合期	形成期
T(y) 与 lg K _z (x)	表层	$y = 2.330x + 14.856$ $R^2 = 0.144$	$y = 2.262x + 13.914$ $R^2 = 0.396$	$y = -0.848x + 17.44$ $R^2 = 0.115$	$y = -0.901x + 17.607$ $R^2 = 0.243$
	中层	$y = 0.936x + 16.756$ $R^2 = 0.122$	$y = 0.321x + 16.176$ $R^2 = 0.332$	$y = 0.173x + 15.513$ $R^2 = 0.015$	$y = -0.356x + 15.855$ $R^2 = 0.119$
	底层	$y = -0.070x + 16.12$ $R^2 = 0.011$	$y = 0.175x + 16.252$ $R^2 = 0.320$	$y = 0.096x + 15.588$ $R^2 = 0.011$	$y = -0.152x + 15.32$ $R^2 = 0.179$
DO(y) 与 lg K _z (x)	表层	$y = 0.044x + 7.352$ $R^2 = 0.001$	$y = 1.366x + 4.945$ $R^2 = 0.186$	$y = 0.260x + 6.289$ $R^2 = 0.011$	$y = -0.551x + 9.30$ $R^2 = 0.103$
	中层	$y = 1.552x + 4.304$ $R^2 = 0.224$	$y = -0.590x + 6.36$ $R^2 = 0.058$	$y = -0.089x + 6.46$ $R^2 = 0.002$	$y = 0.197x + 5.722$ $R^2 = 0.007$
	底层	$y = 0.453x + 0.827$ $R^2 = 0.015$	$y = 1.700x + 0.952$ $R^2 = 0.128$	$y = 0.235x + 5.706$ $R^2 = 0.010$	$y = 1.630x + 4.218$ $R^2 = 0.239$

一致,此阶段底层 K_z 仅有 2.05 m²/d,lg K_z 与 T 及 DO 有着显著的正相关关系 (R_T = 0.60、R_{DO} = 0.76, P < 0.01; 图 6), 水体内部分子扩散随着水温的降低而减小, 即表层水体进行混合交换, 混合程度随深度的增加而减弱。同时稳定的温跃层结构阻止水体在垂向上的自由更换, 只能通过水体表层氧分子传输到较深的水体中而获得氧气, 加之底层还原性物质及微生物等的耗氧作用^[12,31], 使得水库底层水体中的 DO 均处于 0.00 mg/L 左右。

在减弱期, DO 与 T 垂向变化出现差异 (图 4), 整体上 lg K_z 与 T 及 DO 的正相关关系降低 (图 6), 水体仍存在稳定的溶解氧分层, 底部仍处于缺氧状态, 此阶段底层 K_z 有所升高, 但仍在 20.00 m²/d 以下, 水体的混合没有到达沉积物-水界面, 从而导致水体溶解氧分层仍然存在。

图 6 不同时期 T、DO 和 $\lg K_z$ 的关系 (橙色、绿色和紫色分别代表底层、中层和表层水体)Fig.6 Relationship between T, DO and $\lg K_z$ in different periods

而在完全混合时期,天雹水库混合状态达到最强,水柱 K_z 达到最大值,底层 K_z 突破 $30.00 \text{ m}^2/\text{d}$,水体混合深度已达到沉积物-水界面,氧气传输快于热分层的形成过程,水体底层 DO 上升至 5.00 mg/L 左右。分层参数之间的关系不同于热分层期及减弱期, $\lg K_z$ 与 T 及 DO 的关系均降低至 $R=0.10$ (图 6),不同水层 $\lg K_z$ 与 T 及 DO 的关系也降到最小值(表 1)。这是因为此阶段 T 及 DO 变化幅度相对较小, K_z 受到气温及太阳辐射的影响仍在增加,水体内部仍在强烈混合。

在形成期期间, $\lg K_z$ 与 T 呈现较弱的负相关关系 ($R_T = -0.20, P < 0.01$; 图 6),与 DO 不存在相关关系 ($R_{DO} = 0.04, P > 0.05$) 的主要原因是 2 月 12 日之后 K_z 基本保持在 $4.15 \text{ m}^2/\text{d}$,垂向混合过程结束,而表层 T 及 DO 则受到气温和太阳辐射的影响,在垂向完全混合状态维持 4 天后,表层开始出现较弱的温跃层和氧跃层,因此 $\lg K_z$ 与 T 呈现较弱的相关关系,与 DO 不存在相关关系。

表层 DO 与表层 T 在总体上呈现负相关关系(图 7),推测原因是气温及太阳辐射的降低,加之风速的影响,表层水体 T 立刻作出响应^[32],出现水柱平均 T 降低的现象;但是,与 T 相比,表层水体的 DO 对于气象因子的响应程度较低,同时研究表明温度的降低也使得溶解氧饱和度增大^[31],加之表层浮游植物的光合作用,从而使得水柱 DO 处于较高水平,继而水体出现了 T 与 DO 的负相关关系。

2.5 气象因子对水体垂向混合的驱动机制

湖库季节性热分层的变化常与气温、太阳辐射、水温等涉及水体热量收支的因素相关^[28],一方面受到气

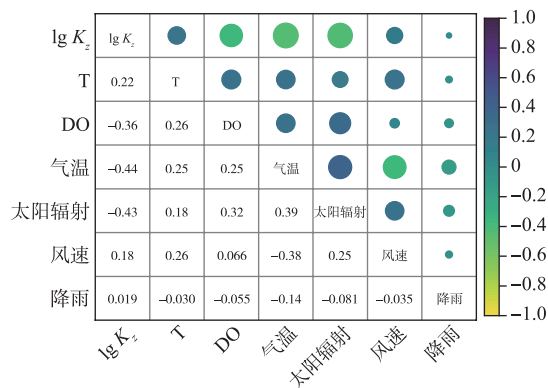


图7 气象因子、垂直扩散系数与水体理化指标相关系数

Fig.7 Correlation coefficient between meteorological factors, vertical diffusion coefficient and physical and chemical indexes of water body

象因子的直接影响,另一方面气象因子通过对水动力的影响间接影响热分层结构。研究表明,天目湖热分层季节性变化的主要因素是太阳辐射^[31],泸沽湖热分层季节性变化则更多受到太阳辐射和气温变化的影响^[33]。对于天雹水库而言,水体热分层的消亡受到气象因子气温、太阳辐射及风速的综合影响(图7),气温及太阳辐射是引起热分层结构变化的主要因素,其决定了水体的含热量,而热量的分配是直接促进温跃层形成与破坏的主导因素^[15]。在秋季太阳辐射及气温突降的影响下,导致水体发生密度流即上下层水体不断交换,从而引起温跃层厚度减少,温跃层上界面下移,对热分层的稳定性产生影响。同时,风速引起的风力扰动施加于水体表面,加速了水体的混合。

由图2及图3可知,2019年最低气温下降约15.10℃,最大昼夜温差为16.60℃(12月11日前

后),天雹水库受冷空气的影响,表层T随气温降低,水体在一定深度范围内发生垂向混合,但并未在短时间内导致水体完全混合。这是因为水环境的变化不仅与天气的剧烈变化有关,还与气温变幅及水体水温结构等因素有关^[34]。天雹水库属于亚深水型水库,底层水温较低,水体密度大,因此抗扰动能力强。另一方面,水体的热量收支主要是通过水面进行,从而导致不同水深的温度最小值产生相移,而且随深度的增加出现时间逐渐滞后^[35]。同时天雹水库位于北回归线南侧,冬季气温与底层水温相当,短期的气温下降不会迅速导致热分层完全破坏,这与前人在红枫湖^[34]和周村水库^[24]的研究结论一致。随着气温和辐射的进一步降低,加之风速的增大,水体密度流及风生流增强,从而导致水体热分层被彻底破坏。而在完全混合后,气温及太阳辐射出现突增,表层出现弱分层现象。综上说明天雹水库水体热分层的破坏主要受到气温及太阳辐射的综合影响,风速会对热分层的消亡存在一定的作用,气温、辐射的降低及风速的增加会导致热分层的逐渐消亡。

基于天雹水库垂向T、DO、 $\lg K_z$ 分布和气象因子的变化结果,分析了参数之间的互相关系。整体上, $\lg K_z$ 与T存在正相关关系(图7),所以这两个参数可以基本代表水体的分层状态。然而, K_z 的数据计算结果相较于T具有相对的优势。这是因为在热分层消亡初期由于分层仍稳定,且浮标数据测量深度间隔较大,T未能捕捉到微弱的破坏,而在整个消亡过程中,均可以通过水柱的剖面温度积分、太阳辐射及沉积物热交换计算得到 K_z ,其结果具有一定的稳定性和连续性。同时表层 K_z 对气温的响应($R_{K_z} = -0.44, P < 0.01$)较T及DO更敏感($R_T = 0.25, R_{DO} = 0.25, P < 0.01$),因此在捕捉细致的分层季节变化方面, K_z 是更加理想的代表参数,这与广东流溪河水库模拟结果一致^[4]。

3 结论

- 1) 天雹水库热分层消亡期温度及溶解氧分布变化不同步,其分层结构失稳是气温和太阳辐射共同作用的结果,但由于气温降幅及底层水体温度等环境条件,并未在短时间内引起热分层消亡、水体完全混合。
- 2) 热分层消亡期水体 K_z 在0.16~380.36 m²/d之间波动,均值为30.46 m²/d。表层 K_z 变化的主要控制因

子为气温变化,且较 T 及 DO 而言,对气象因子的变化更加敏感($R_K = -0.44$, $R_T = 0.25$, $R_{DO} = 0.25$, $P < 0.01$), 底层 K_z 的变化与水体混合程度变化一致。相较于 T 而言, K_z 能够更准确地表征水体分层状态。

3) 天雹水库热分层消亡期水体垂向 T 、 DO 、 $\lg K_z$ 分布具有时间异质性,热分层期及半混合时期 $\lg K_z$ 与 T 及 DO 均呈现显著的正相关($R_T = 0.60$, $R_{DO} = 0.76$, $P < 0.01$), 而在水体完全混合后, K_z 与 T 呈现负相关($R_T = -0.19$, $P < 0.05$), 与 DO 不存在相关关系($R_{DO} = 0.04$, $P > 0.05$)。

4 参考文献

- [1] Wen G, Wang S, Cao RH *et al.* A review of the formation causes, ecological risks and water quality responses of metalimnetic oxygen minimum in lake and reservoirs. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 711-726. DOI:10.18307/2022.0301. [文刚, 王硕, 曹瑞华等. 湖库温跃层溶解氧最小值的形成原因、衍生的生态风险及控制研究进展. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 711-726.]
- [2] Zhu ZX, Yang J. The spatial distribution of reservoirs in Fujian Province; Higher density but lower storage in coastal than inland regions. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 567-580. DOI: 10.18307/2018.0227. [朱珍香, 杨军. 福建水库空间分布特征:沿海密度高水量少、内陆密度低水量多. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 567-580.]
- [3] Huang TL. Water pollution and water quality control of selected Chinese reservoir basins. Cham; Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-20391-1.
- [4] Wang S, Qian X, Han BP *et al.* Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at tropic of Cancer, in southern China. *Wat Res*, 2012, **46**(8). DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.014.
- [5] Zhang C, Lai SY, Gao XP *et al.* A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 691-700. DOI:10.18307/2016.0401. [张晨, 来世玉, 高学平等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 691-700.]
- [6] Lin J, Su YP, Zhong HZ *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir (Fujian) during summer stratification. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 244-250. DOI:10.18307/2010.0214. [林佳, 苏玉萍, 钟厚璋等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.]
- [7] Zhang Y, Wu Z, Liu M *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). *Wat Res*, 2015, **75**: 249-258. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.052.
- [8] Selmecky GB, Krienitz L, Casper P *et al.* Phytoplankton response to experimental thermocline deepening: A mesocosm experiment. *Hydrobiologia*, 2018, **805**(1): 259-271.
- [9] Chi SY, Wei CZ, Hu J *et al.* Correlation between macroinvertebrates and plankton in two deep eutrophic reservoirs. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 1060-1075. DOI: 10.18307/2020.0415. [池仕运, 韦翠珍, 胡俊等. 富营养深水库底栖动物群落与浮游生物相关性分析. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1060-1075.]
- [10] Sebnem E. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *Limnology*, 2008, **9**(2): 135-142. DOI: 10.1007/s10201-008-0240-x.
- [11] Wang YC, Zhu J, Ma M *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, Southwestern China. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 54-60. DOI: 10.18307/2005.0109. [王雨春, 朱俊, 马梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 54-60.]
- [12] Xia PH, Lin T, Li CX *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng reservoir in Guizhou, China. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1477-1485. [夏品华, 林陶, 李存雄等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应. 中国环境科学, 2011, **31**(9): 1477-1485.]
- [13] Zhu Y, Li YP, Tang CY *et al.* Effects of the disappearance of seasonal thermal stratification on the mobilization of iron and phosphorus in reservoirs, southern China-A case of Tianbao Reservoir, Nanning City. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1153-1162. DOI: 10.18307/2021.0416. [朱雅, 李一平, 唐春燕等. 南方水库季节性热分层消亡对沉积物铁和磷迁移的影响——以南宁市天雹水库为例. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1153-1162.]
- [14] 邱晓鹏. 我国北方分层型水库水质演变规律及富营养化研究[学位论文]. 西安建筑科技大学, 2016.
- [15] Lu JS, Li ZL. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: A case study of Heihe Reservoir, Xi'an City. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 698-706. DOI:10.18307/2014.0507. [卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水水库为例. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 698-706.]
- [16] Kumagai M, Nakano S, Jiao C *et al.* Effect of cyanobacterial blooms on thermal stratification. *Limnology*, 2000, **1**(3): 191-195. DOI: 10.1007/s102010070006.
- [17] Becker V, Huszar VLM, Naselli-Flores L *et al.* Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(5): 952-963. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.01957.x.

- [18] Liu C, Liu XB, Zhou HD *et al.* Temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of reservoir anoxic zone. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(12): 1479-1490. [刘畅, 刘晓波, 周怀东等. 水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析. 水利学报, 2019, **50**(12): 1479-1490.]
- [19] Detmer TM, Parkos JJ, Wahl DH. Long-term data show effects of atmospheric temperature anomaly and reservoir size on water temperature, thermal structure, and dissolved oxygen. *Aquatic Sciences*, 2022, **84**(1). DOI: 10.1007/s00027-021-00835-2.
- [20] Zheng YY, Liu SY, Liu H *et al.* Seasonal stratified characteristics of water bodies in a sub-deep reservoir. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2021, **36**(2): 359-370. [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. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, **36**(2): 359-370.]
- [21] Yang P, Xing Z, Fong DA *et al.* Observations of vertical eddy diffusivities in a shallow tropical reservoir. *Journal of Hydro-environment Research*. 2015, **9**(3): 441-451.
- [22] Saber A, James DE, Hayes DF. Effects of seasonal fluctuations of surface heat flux and wind stress on mixing and vertical diffusivity of water column in deep lakes. *Advances in Water Resources*, 2018, **119**: 150-163.
- [23] Liu SX, Li YP, Zhu Y *et al.* Migration of iron, manganese and sulfide in black reservoir water in south china: A case study of Tianbao Reservoir, Nanning. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(10): 78-84. [刘斯璇, 李一平, 朱雅等. 南方泛黑水库 Fe、Mn 及硫化物的迁移规律研究: 以南宁天雹水库为例. 环境工程, 2021, **39**(10): 78-84.]
- [24] Huang TL, Zeng MZ, Qiu XP. Response of water quality of Zhoucun Reservoir during the disappearance of seasonal thermal stratification. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(10): 5695-5702. [黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏. 周村水库季节性热分层消亡期水质响应特性. 环境工程学报, 2016, **10**(10): 5695-5702.]
- [25] Zeng MZ, Huang TL, Qiu XP *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir—Zhoucun Reservoir in north of China. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1337-1344. [曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性. 环境科学, 2016, **37**(4): 1337-1344.]
- [26] Wang YZ, Pu PM. Preliminary study on the thermocline in Fuxian Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1982, (4): 1-9. [王银珠, 濮培民. 抚仙湖水温跃层的初步研究. 海洋湖沼通报, 1982, (4): 1-9.]
- [27] Yu X, Zhuge YS, Liu XB *et al.* Evolution mechanism of dissolved oxygen stratification in a large deep reservoir. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1496-1507. DOI:10.18307/2020.0521. [余晓, 诸葛亦斯, 刘晓波等. 大型深水水库溶解氧层化结构演化机制. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1496-1507.]
- [28] Zhou QC, Yang X, Wang WL *et al.* Seasonal vertical stratification and the potential impacts of its fading on algal blooms in winter: Cases of Lake Chenghai and Lake Yangzonghai, Yunnan Plateau. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 701-712. DOI: 10.18307/2020.0310. [周起超, 杨炫, 王玮璐等. 云南程海和阳宗海季节性分层及其消退对冬季水华的潜在影响. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 701-712.]
- [29] Xu J, Huang TL, Li K *et al.* Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe Reservoir. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3049-3057. [徐进, 黄廷林, 李凯等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响. 环境科学, 2019, **40**(7): 3049-3057.]
- [30] Effler SW, Field SD. Vertical diffusivity in the stratified layers of the mixolimnion of Green Lake, Jamesville, NY. *Journal of Freshwater Ecology*, 1983, **2**(3): 273-286.
- [31] Sun X, Zhu GW, Da WY *et al.* Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China. *Environmental Science*, 2020, **39**(5): 2632-2640. [孙祥, 朱广伟, 笄文怡等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响. 环境科学, 2018, **39**(6): 2632-2640.]
- [32] Zhao LL, Zhu GW, Chen YF *et al.* Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and shallow Lake Taihu. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(6): 844-850. [赵林林, 朱广伟, 陈元芳等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素. 水科学进展, 2011, **22**(6): 844-850.]
- [33] Wen XY, Zhang HC, Chang FQ *et al.* Seasonal stratification characteristics of vertical profiles of water body in Lake Lugu. *Advances in Earth Science*, 2016, **31**(8): 858-869. [文新宇, 张虎才, 常凤琴等. 泸沽湖水体垂直断面季节性分层. 地球科学进展, 2016, **31**(8): 858-869.]
- [34] Wang JF, Chen JA, Yang YQ *et al.* Physical and chemical characteristics of water in Lake Hongfeng during the disappearance of seasonal stratification. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 845-851. [王敬富, 陈敬安, 杨永琼等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征. 环境科学研究, 2012, **25**(8): 845-851.]
- [35] Zhang YC, Qian X, Qian Y *et al.* Field measurement and analysis on diurnal stratification in Taihu Lake. *Environ Sci & Manage*, 2008, (6): 117-121. [张玉超, 钱新, 钱瑜等. 太湖水温分层现象的监测与分析. 环境科学与管理, 2008, (6): 117-121.]