

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0060

姚嘉伟,刘晓波,董飞,等.平原型水库水体热分层的水质响应特征与水质改善成效[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):158-167. YAO J W, LIU X B, DONG F, et al. Water quality response characteristics and improvement effect of thermal stratification in a plain region reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 158-167. (in Chinese)

平原型水库水体热分层的水质响应特征 与水质改善成效

姚嘉伟^{1,2}, 刘晓波^{1,2}, 董飞^{1,2}, 马冰^{1,2}, 刘畅^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:针对平原型水库热分层特征及其对水质的影响问题,采用 CE-QUAL-W2 模型建立了立面二维水温模型,模拟了 2018 年全年的水温变化特征,三个率定断面的绝对平均误差分别为 0.53 °C、0.35 °C 和 0.14 °C。基于模拟结果和监测数据,分析了水库热分层的季节性变化及水质响应特征。在轴流泵混合曝气技术的基础上提出了一种移动式扬水器用以增加水库底层 DO 质量浓度,基于监测数据初步分析了移动式扬水器对垂向水质的改善效果。结果表明:水库全年呈现单循环混合模式(5—11 月为分层期,12—4 月为混合期),夏季形成稳定的热分层结构,底层形成厚度约为 8 m 的缺氧区(DO 质量浓度低于 2 mg/L);厌氧环境下底层污染物(铁、锰、总氮、总磷、COD、氨氮等)的释放量远大于表层和中层,底层水质较差;移动式扬水器能够有效提高底层 DO 质量浓度,弱化热分层结构(工作中心的 DO 质量浓度由 0.2 mg/L 提高至 0.8 mg/L,温跃层厚度减少了 4 m)。

关键词:CE-QUAL-W2;移动式扬水器;水库;热分层;水质

中图分类号:X524 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Water quality response characteristics and improvement effect of thermal stratification in a plain region reservoir

YAO Jiawei^{1,2}, LIU Xiaobo^{1,2}, DONG Fei^{1,2}, MA Bing^{1,2}, LIU Chang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, Beijing 100038, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the thermal stratification characteristics of plain reservoirs and their impact on water quality, a vertical two-dimensional water temperature model was developed using the CE-QUAL-W2 model to simulate the characteristics of water temperature changes throughout 2018. The absolute mean error of the three calibration sections was 0.53 °C, 0.35 °C and 0.14 °C respectively. The seasonal variation of water temperature and water quality response characteristics of the reservoir were analyzed based on simulation results and monitoring data. A mobile water pump was proposed based on the axial flow pump mixed aeration technology to increase the DO mass concentration in the bottom of the reservoir. The improvement effects of the mobile water pump on vertical water quality were preliminarily analyzed based on the monitoring data. The results showed that the

收稿日期:2019-11-05 修回日期:2019-12-20 网络出版时间:2020-03-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200312.1204.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401700;2018YFC0407702);国家水专项(2017ZX07101004-001);中国水科院团队建设及人才培养重点项目(WE0145B592017);国家自然科学基金(51809288)

作者简介:姚嘉伟(1995—),男,河北保定人,主要从事流域水生态与水环境模型方面研究。E-mail:534224578@qq.com

通信作者:刘晓波(1978—),男,北京人,教授级高级工程师,主要从事水环境数值模拟、河湖健康评估理论与方法等方面研究。E-mail:xb-liu@iwahr.com

reservoir presented a single-cycle mixed mode throughout the year (stratified period: May to November, mixed period: December to April). The reservoir formed a stable thermal stratification structure in summer and formed a hypolimnion with a thickness of about 8 m anoxic zone (DO mass concentration is less than 2 mg/L). The release amount of pollutants (iron, manganese, total nitrogen, total phosphorus, COD, ammonia nitrogen, and so on) in hypolimnion was much larger than the epilimnion and the thermocline because of the anaerobic environment. The mobile water pump can effectively improve DO mass concentration in the hypolimnion and weaken the thermal stratification structure (the DO mass concentration in the working center increased from 0.2 mg/L to 0.8 mg/L, and the thermocline thickness decreased by 4 m).

Key words: CE-QUAL-W2, mobile water pump; reservoir; stratification; water quality

水库热分层现象是指深水型水库受到季节性温度变化影响,表层水受到较强的太阳辐射和能量交换不能及时传递到底部,导致水体上下层之间产生较大的温度差,进而导致密度差异,使水温结构自上而下分为变温层、温跃层和等温层的现象^[1-3]。由于水的特殊反膨胀属性(纯水在4℃时密度最大,在此基础上温度升高或降低均会导致密度减小),热分层型水库可划分为两类:水温沿水深方向逐渐降低称为“正向热分层”,逐渐升高称为“逆向热分层”^[4],其热分层特征受水的滞留时间影响较大,王敬富^[5]等对贵州红枫湖的研究表明,当水体的滞留时间小于200 d时,一般不会形成稳定的热分层结构。而水库热分层的生消过程对水库水质产生明显影响^[6],董春颖等^[7]对千岛湖季节性热分层特征研究认为热分层结构对DO、pH值、浊度、PAR和叶绿素a的垂向分布产生了一定的影响;黄廷林等^[8-11]对周村水库、柘林水库、金盆水库、黑河水库等的研究表明,水库热分层会引起垂向水体中DO、氮、磷等浓度及浮游植物生物量等发生变化。水-沉积物界面物质转化及能量交换受热分层结构影响明显,Kraemer等^[12]研究发现:热分层会导致DO含量降低,易引起水-沉积物界面铁、锰、氮、磷等物质向还原态转化;Davison^[13]认为厌氧环境下会引起水库沉积物中的铁、锰向上覆水体释放,是水库中铁、锰的主要来源,威胁水库供水安全。此外,热分层结构对水生生物的生境也有一定影响,Sally等^[14]认为热分层期间,水库底层长期光线不足,DO含量降低,营养盐累积,易对水生生物产生不利影响。热分层结构失稳即翻库现象对季节性水华的爆发有重要影响,王雨春等^[15]对西南地区百花湖研究和夏品华等^[16]等对红枫水库的研究均认为水体季节性水质恶化现象与热分层结构失稳有关。

对于缓解由热分层带来的水环境问题,国外研究人员在20世纪80年代开始较为系统的研究,如Ashley等^[17]设计出全空气提升曝气装置,在多个水

库、湖泊进行了曝气试验,取得了显著效果;Woo等^[18]在韩国Dalbang湖进行了为期6a的试验研究,发现人工曝气对防止藻类大量繁殖有效,但对减少藻类生物量效果不明显。国内周子振等^[19]研制的扬水曝气系统主要作用是削减水体中的总氮、总磷、TOC、铁等污染物浓度,运行效果显著。传统曝气技术的缺点是只能固定安装在一个点进行曝气,导致其只能进行底部曝气且难以转换曝气点,操作运行不灵活。本研究针对山东省萌山水库的热分层及其引起的水质问题,通过现场监测、模型分析等手段分析了水库热分层的季节性变化及水质响应特征,并基于轴流泵混合技术提出了可以自由转换位置、进行不同区域分层曝气的移动式扬水器,以期为我国平原型水库的生态修复及水环境治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 监测

1.1.1 研究区概况

萌山水库位于山东省淄博市,孝妇河一级支流范阳河中游,属于典型的平原型水库。萌山水库承担着防洪、灌溉及工农业供水等多项功能,库区水面面积6.7 km²,回水区总长度约为6 km,控制流域面积288 km²,属于中型水库,年供水量510万m³,设计灌溉面积67 km²。

《2017年淄博市水功能区水质监测报告》中对萌山水库水质达标评价表明,三类区域中仅范阳河农业用水区达标(V类水),范阳河和白泥河饮用水源区均不达标(分别为Ⅳ类水和Ⅱ类水),白泥河饮用水源区补充项目超标,库区整体达标率为33.3%。根据相关文献调查表明,水库上游存在大量的煤炭行业,排污水超标2.5倍以上,导致入流污染物中硫酸盐含量超标3.9倍,氨氮超标15.7倍,企业排污是上游污染的主要来源^[20]。此外,水库自1986年开始实施网箱养鱼,大量的鱼类饵料、排泄

物等沉入水底,加重了水库的内源污染。为改善库区生态环境,2008 年开始逐步清除网箱养鱼,污染负荷得到了一定程度的缓解。

1.1.2 监测方法

监测点位共设置 10 个,从坝前延伸至库尾各处,具体位置及布置说明见图 1 和表 1。其中 S3 为移动式扬水器工作中心,S2 距工作中心约 10 m,S4 距工作中心约 500 m,用以分析移动式扬水器运行效果。

本研究数据来源包括 3 类:(1)10 个监测点位的垂向水质监测数据,采用美国 YSI 公司 EXO-1 便携式多参数水质监测仪,该仪器可携带多探头进行水体水质的现场快速监测,频率为 4Hz,数据通过平台软件实时传输到计算机中,监测参数为水温、电导率、DO、盐度、TDS、pH、ORP、叶绿素 a、蓝绿藻等。(2)实验室检测数据,采用分层式采水器对库区 S4 和 S5 点位进行分层取样,分别在 0.5、6、10 和 20 m 处取 1 500 mL 水样进行实验室检测分析,检测方法遵循《水和废水监测分析方法》^[21]的相关规定,指标包括铁、锰、钙、氨氮、COD、硫酸盐、磷酸盐、硝酸盐氮、总氮、总磷。(3)监测平

台监测的表层水质数据,监测平台于 2017 年开始运行,位于水库中心距大坝约 2 500 m 处,可以对水温、DO、电导率、COD 等 27 项水质参数进行实时监测,监测频率为 4 h 记录一次数据,并实时传输到网络平台上。



图 1 监测点位置

Fig. 1 position of monitoring points

表 1 点位布置说明

Tab. 1 Points layout description

点位	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
说明	坝前深水区	距工作区 10 m	工作区中心处	距工作区 500 m	距坝前 1 500 m	距坝前 1 500 m	距坝前 3 000 m	距坝前 4 000 m	距坝前 4 000 m	距坝前 4 500 m

1.2 水库立面二维水温模型

1.2.1 模型建立

为分析萌山水库的热分层特性及演变过程,结合水库的地形特征,采用 CE-QUAL-W2 模型构建二维水温模型。CE-QUAL-W2 模型是由美国陆军工程兵团和波特兰州立大学联合开发的立面二维水动力-水质模型,广泛应用于水库、河流等立面二维较为明显的水体水质模拟。模型重点关注各物质组分在水体纵向和垂向上的变化,横向上平均处理,模型控制方程基于流体力学的质量守恒和能量守恒,包含连续方程、动量方程、状态方程、自由水面方程和质量(热)输运方程,满足流体不可压缩假定和布西涅斯克假定^[22-24]。

连续方程如式(1)。

$$\frac{\partial BU}{\partial x} + \frac{\partial BW}{\partial z} = qB \quad (1)$$

动量方程如下:

$$X \text{ 方向 } \frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha +$$

$$g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{zx}}{\partial z} + qBU_x \quad (2)$$

$$Z \text{ 方向 } 0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

状态方程如式(4)。

$$\rho = f(T_w, \Phi_{MS}, \Phi_{SS}) \quad (4)$$

自由水面方程如式(5)。

$$B \eta \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h BU dz + \int_{\eta}^h qB dz \quad (5)$$

质量(热)输运方程如式(6)。

$$\frac{\partial B \Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB \Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB \Phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_{\Phi} B + S_{\Phi} B \quad (6)$$

式中:U 和 W 分别为 x 和 z 方向的流速,m/s;q 为单位体积旁侧净入库流量,L/s;B 为水面宽,m;\eta 为水面高程,m;\alpha 为河道与水平线之间的夹角,rad;

ρ 为水体密度, kg/m^3 ; τ_{xz} 为控制体 X 面 X 方向的湍流剪切应力, N/m^2 ; τ_{zx} 为单元体 Z 面 X 方向的湍流剪切应力, N/m^2 ; $\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$ 为密度函数, 水体密度与温度、盐度和悬浮物的浓度有关; Φ 为横向平均的某种组分质量浓度, g/m^3 ; D_x 和 D_z 分别为组分的纵向和垂向扩散系数, m^2/s ; q_Φ 为控制体单位体积内物质横向流入或流出的量, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_Φ 为源汇项。

萌山水库回水区总长度约为 6 km, 划分为 2 个 branch, 以正南方向的范阳河至坝前为主流, 设置为 branch1, 以西南方向的白泥河为支流, 设置为 branch2。纵向上共设置 40 个网格, 每个网格长度 $\Delta x = 200 \text{ m}$, 其中 branch1 共 31 个, branch2 共 9 个。垂向上划分为 27 层, 每层厚度 $\Delta z = 1 \text{ m}$ 。模拟时段为 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日, 共 365 d。图 2 为模型概化后的平面图和纵剖面图。

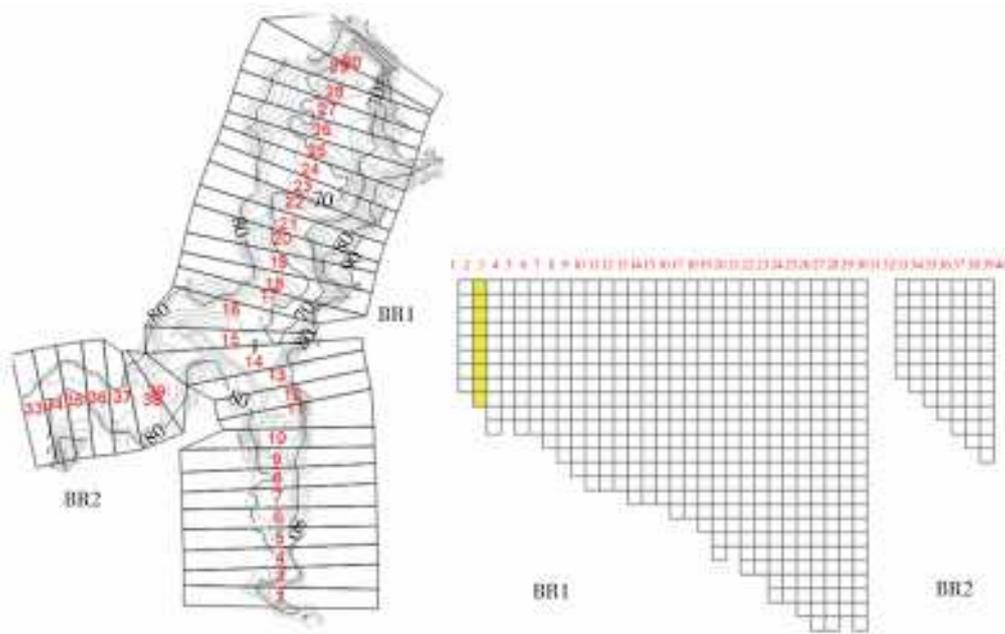


图 2 模型网格的平面和纵剖面

Fig. 2 Plan and longitudinal section of the model grid

模型的边界条件主要包括上下游边界条件和分布式入流边界, 边界条件均设置为流量边界, 流量数据由水库管理处提供, 分布式入流边界条件由水量平衡程序自动生成。初始条件包含初始水位、初始水温和初始流速三个方面, 初始水位和初始水温以 2018 年 1 月 1 日的水位和水温作为初始条件, 模型默认水流从静止开始, 初始流速为零。模型建立所需要地形数据、入流水温数据及调度数据等均由水库管理处提供, 气象数据由周村区气象站提供。

1.2.2 模型率定

1.2.2.1 水位验证

选取模拟坝前断面与实测坝前水位进行比较。图 3 为水位验证结果, 均方根为 0.002 m, 最大误差为 0.016 m, 平均误差为 0.009 m。表明模拟水位过程与实际水位过程吻合度较高, 模型能够较好地反映萌山水库的水量变化及水动力特征。

1.2.2.2 水温率定

水温是模型计算中非常重要的参数, 影响水体

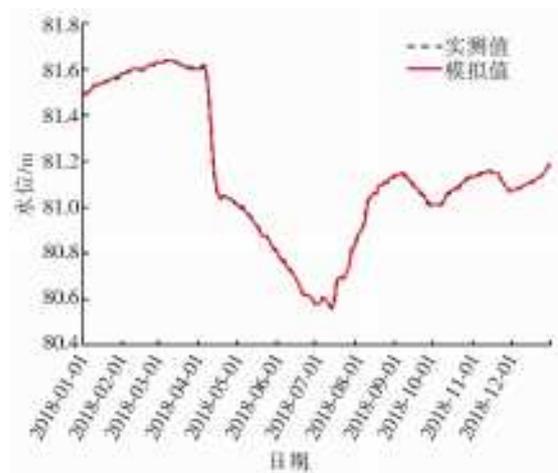


图 3 水位验证结果

Fig. 3 Results of water level calibration

中多种物质组分的生化反应及输运过程。水温的影响因素主要有: 地形条件、气象条件、出入流量及水温、取水条件等。CE-QUAL-W2 模型计算水库水温主要涉及到的参数及率定后的取值见表 2。

实测水温数据包括 2018 年 8 月各断面监测数据以及库中心设置的监测系统测得的全年表层水温

表 2 模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of the model

系数	纵向涡黏系数 $Ax/(m^2 \cdot s^{-1})$	纵向扩散系数 $Dx/(m^2 \cdot s^{-1})$	风遮蔽系数 WSC	动态遮光系数 Dynsh	水表面太阳辐射吸收率 BETA	纯水中太阳辐射削减率 EXH ₂ O/m
取值	1	1	0.9	1	0.7	0.35

数据,以实测值和模拟值的绝对平均误差(AME)来进行率定(图 4)。垂向上,选取三个典型断面:坝前断面(S1),为库中断面(S7),为库尾断面(S9)进行率定,绝对平均误差分别为 0.53 °C、0.35 °C 和

0.14 °C。平面上,采用监测平台得到的库中心表层水温数据进行率定,绝对平均误差为 0.8 °C。结果表明,模型能够反映水库的水温分布情况,对该水库的二维水温具有较强的模拟能力。

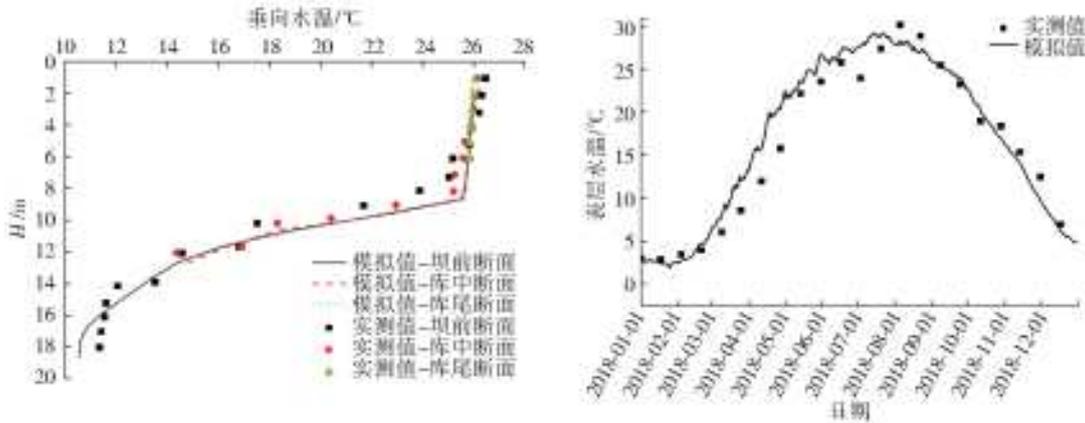


图 4 水温率定结果

Fig. 4 Results of water temperature calibration

2 水库水温分层特征

采用坝前断面(segment30)、库中断面(segment18)和库尾断面(segment9)每月第一天的模拟值分析水库水温的季节性变化(图 5),水库冬季上下层水温基本趋于一致,约为 3 °C,此时由于空气温度较低导致表层水温略低于底层水温,但由于水库较浅并未形成明显的“逆向热分层”结构,且坝前与库尾没有明显的温

度差异;3—5 月份为热分层结构的形成期,随着气温升高,表层水受到的太阳辐射逐渐增强以及入库水温逐渐升高,由于能量传递的时效性和不均匀性导致底层水温升高幅度较小,表层水温逐渐高于底层水温,热分层结构逐渐形成,此时表层水温的变化范围在 6~22 °C,底层水温变化范围在 5~8 °C。水库沿程方向表层水温变化基本一致,但由于库尾处水深逐渐变浅,故底层水温升高幅度逐渐变大。

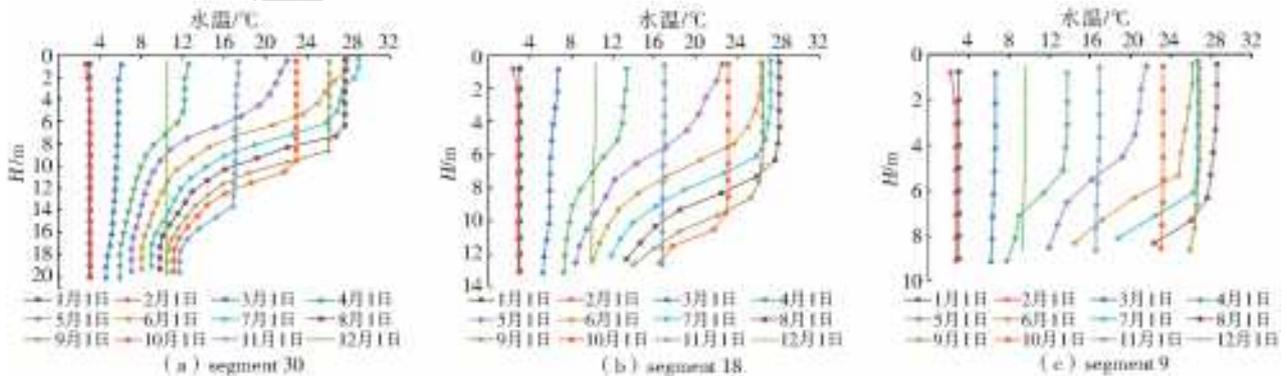


图 5 水温季节性变化

Fig. 5 Seasonal variation of water temperature

6—10 月为稳定热分层期,图 6 所示为 8 月 1 日水库水温分布情况,可以看出此时水库在坝前深水区呈显著的“三层式”热分层结构,变温层温度变

化受气象条件影响较为明显,有一定的温度梯度,平均温度在 26~28 °C,离坝前越远,温度越高;温跃层温度梯度最大,约为 2.4 °C/m,平均温度为 18 °C;

滞温层受气象条件影响最小,温跃层阻隔了物质运输及能量交换,使底部平均温度维持在 12 ℃左右。纵向上,由于深度逐渐降低,水温结构逐渐由“三层式”过渡到“两层式”,至库尾处热分层现象已基本消失,表层水温至库尾处逐渐降低,底层水温逐渐升高;11—2月为热分层结构的消亡期,在此期间,水库水温逐渐降低至 3 ℃左右,表层水温度下降导致密度升高,而底层水依然能保持一个相对较高的温度,导致表层水密度大于底层水,上下层水体发生混合,易出现“翻库”现象^[25]。

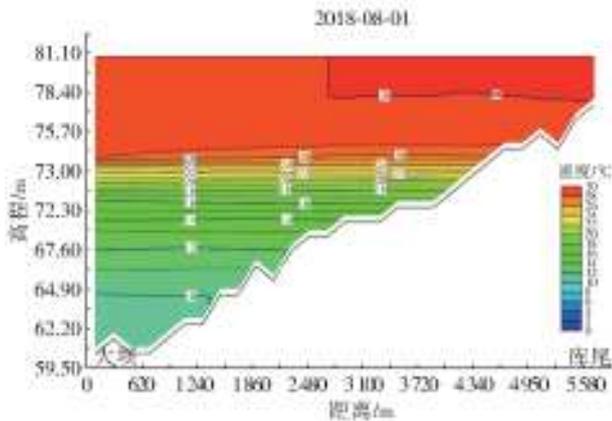


图 6 热分层期水库水温沿程分布

Fig. 6 Distribution of water temperature in thermal stratification

3 热分层的水质响应特征

3.1 热分层对 DO 分布的影响

采用 S1 点位的监测数据分析水温、DO 的垂向分布特征(图 7),DO 的分布出现了类似于水温的“三层式”分布结构,并且变化趋势与水温基本一致。进一步分析水温、DO 和 ORP 三者之间的相关性(表 3),可以看出三者之间显著相关($P < 0.01$),这表明水库中 DO 的分布受热分层影响较大,这与孙祥^[26]等对天目湖沙河水库的热分层特征研究和邱华北^[27]等对万峰湖热分层的研究中得出的结论基

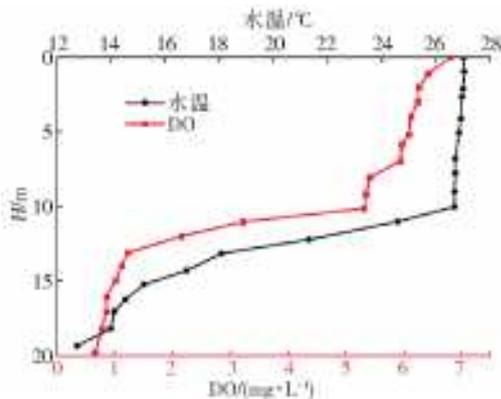


图 7 S1 点位水温和 DO 分布

Fig. 7 Distribution of water temperature and DO in S1

表 3 水温、DO 和 ORP 的 Pearson 相关系数

Tab. 3 Pearson correlation coefficient of water temperature, DO and ORP

	水温	DO	ORP
水温	1.000**	0.985**	0.930**
DO		1.000	0.897**
ORP			1.000

注: ** 表示 $P < 0.01; n = 126$ 。

本一致。ORP 与 DO 和水温均显著相关,表明水库的氧化还原环境受水温和 DO 影响较大。

水库中 DO 的质量浓度及分布与水温、大气中氧的分压、水动力条件、溶解质特性等多种因素有关,其含量主要来源于大气复氧、水生植物光合作用和入流携带三种途径^[27]。三种途径均发生在水体真光层以上,而底层水体 DO 的来源主要依赖于水体垂向上的交换。由于该水库长期以来实施网箱养殖,致使大量的鱼类排泄物、饵料及腐殖质等沉积到底层,其氧化分解需要消耗大量的 DO。热分层期间,由于温跃层的存在,阻隔了垂向上的物质和能量交换,底层水体有机物的耗氧速率远大于 DO 的补充速率,逐渐形成缺氧区,加速底部水体厌氧化进程(萌山水库底层 ORP 约为 -100 mV)。上述分析表明了水体热分层加剧了底部缺氧,这与曾明正^[8]等研究周村水库热分层的水质响应特性得出结论基本一致。

3.2 热分层对其它水质指标的影响

铁、锰是重要的金属元素,水库沉积物中铁、锰的释放对城市供水有较大影响。《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定铁、锰的标准值分别为 0.3 mg/L 和 0.1 mg/L。图 8 为 2018 年 8 月测得的垂向水质数据,可以看出:铁、锰在垂向上形成上低下高的分布趋势,水体表层铁、锰含量较低(分别为 0.1、0.05 mg/L),底层铁、锰含量远远超出了标准值(分别为 1、1.4 mg/L),水深超过 10 m 后,浓度随水深的变化梯度急剧升高,这与 DO 随水深的变化梯度具有较好的一致性。相关研究表明:铁、锰的化学特性受氧化还原影响较大,当水体处于还原状态时,铁、锰以溶解态的离子形式存在,厌氧环境下,储存在沉积物中的铁、锰的氧化物分解,向上覆水中释放溶解态的铁离子和锰离子^[28],但由于温跃层垂向涡动扩散系数较低^[29],阻隔了铁、锰进一步向上扩散,逐步被氧化成粒径较大的铁离子(III)和锰离子(III或IV)沉降到底部,导致底层铁离子和锰离子浓度远高于表层。

COD、氨氮、总氮和总磷是评价地表水环境质

量的重要指标。从图 8 中可以看出:COD、氨氮、总氮和总磷浓度的垂向分布特征基本一致,底层浓度高于中层和表层,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)可以判断出水库表层水质较好处于 I 至 III 类水之间,底层水质较差属于劣 V 类水,其浓度随水深的变化梯度与 DO 也具有较好的协同性,表明 DO 对 COD、氨氮、总氮和总磷有较大的影响,底部厌氧环境下加剧了污染物释放。相关研究表明:沉积物中氮磷的释放受多种因素影响,其中较为

敏感的因素有 DO、温度、pH 及生物扰动等,厌氧条件下,硝化作用受到抑制,磷酸盐的复合物溶解释放出磷酸根离子向上覆水体中扩散,有机氮通过氨化作用转化为氨氮释放,使底层水体氨氮浓度升高^[8];水库底部缺氧区的存在导致沉积物附近的氧化还原电位降低,有机质分解产生 CO₂ 和有机酸,造成水体酸化^[30]。孙晓杭^[31]等研究了微生物对太湖沉积物氮磷释放的影响,认为微生物促进了铁结合态磷的释放。可以认为底层缺氧加剧了内源污染。

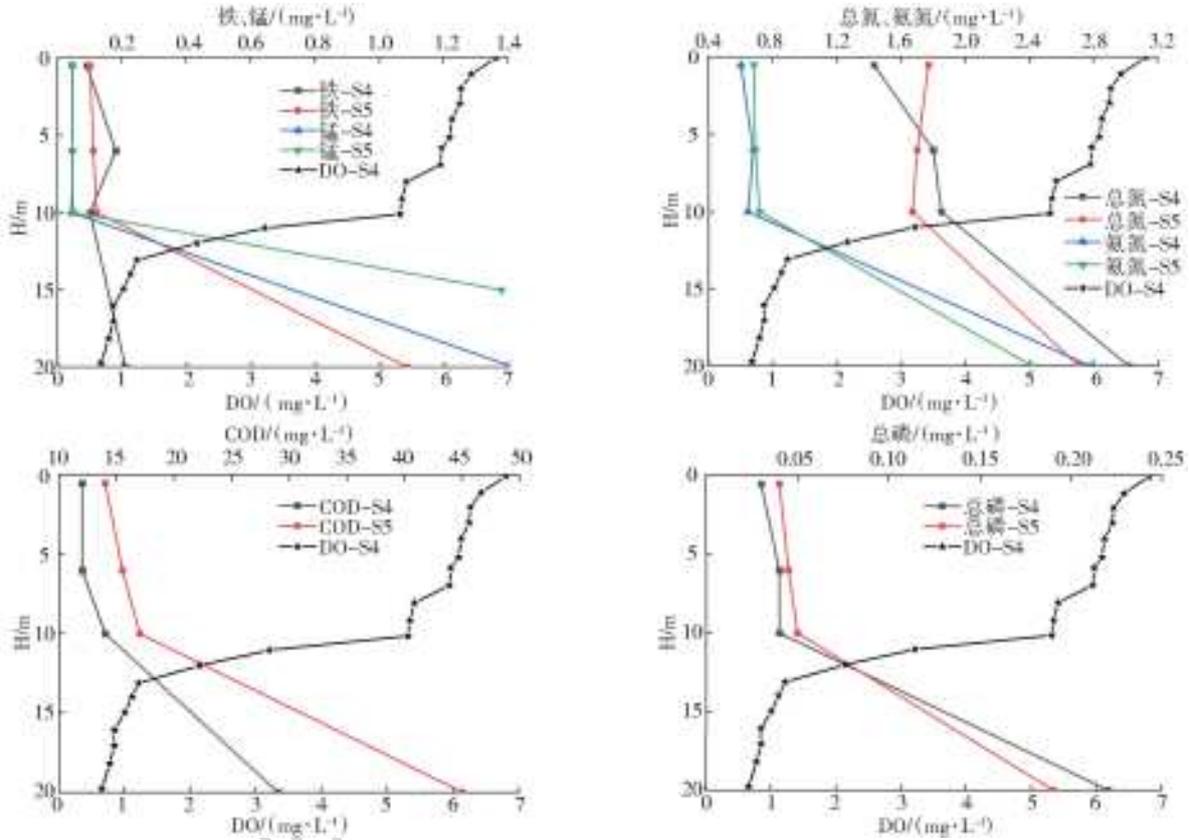


图 8 主要水质参数垂向分布特征

Fig.8 Vertical distribution characteristics of main water quality parameters

4 移动式扬水器的应用效果

4.1 移动式扬水器的应用效果

针对萌山水库底层缺氧及水质恶化问题,本研究在轴流泵混合技术的基础上加以改进,保留其主要工作模式,以浮船为载体,进水通道设置为可伸缩的管道,设计出移动式扬水器(图 9),克服了传统轴流泵混合技术的运行不灵活问题,而且还可根据水库大小及污染状况设计其各部件尺寸。

移动式扬水器长 16 m,宽 4.8 m,高 1.1 m,吃水深 0.6 m,进水管最长为 20 m,装机功率 104 kW,工作流量为 446 m³/h,航行功率为 22 kW。该设备的运行方式为:由发动机驱使移动式扬水器移动和水泵的运行,当到达指定位置后,通过控制室操纵进

水管道伸入水库下层缺氧水体,开启水泵,底层水进入进水管,经出水管排出到空气中,与空气掺混后自由下降至水库表层,完成由底层-空气-表层的人工循环曝气过程。

移动式扬水器对于水库水质的改善体现在三个方面:(1)直接提高底层 DO 质量浓度,进水管抽走局部底层水,周围水体会迅速补充致使上部含氧量高的水体逐渐补充至底层,从而直接增加底层水体 DO 质量浓度。(2)底层水体由于长期处于厌氧环境下,含有大量的可溶性营养盐,通常很难释放,与空气掺混并且再次沉淀到库底的过程中,部分营养盐被氧化转化为易释放物质被水库中的菌藻再利用,氨氮发生硝化反应和反硝化反应,转化为氮气溢出水体,以达到净化水质的目的。(3)弱化水体分层

结构,通过增加上下层水体混合达到弱化水库热分层结构的目的,增加物质和能量的垂向交换。

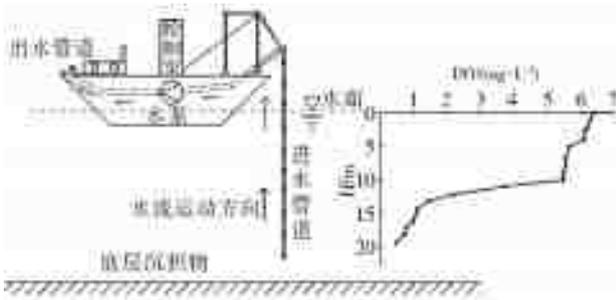


图9 移动式扬水器结构

Fig. 9 Structure drawing of mobile water pump

4.2 水质改善效果分析

2018年8月对移动式扬水器的运行效果进行了监测分析,根据现场监测和模型分析得到的缺氧较为严重的区域,并结合历史上网箱养殖情况,选取S3点为设备的主要工作区域。采用垂向水温和DO

为指标,初步分析了移动式扬水器对垂向水质的改善效果。对比S3,S2(距S3约10m),S4(背景值,距S3约500m)3个点位水温和DO(图10),可以看出:(1)S3的水温层化现象显著减弱,S3和S2的温跃层厚度相较于S4分别减少了4m和3m,温度随水深的下降梯度减缓,底层水温显著升高。(2)DO分层现象显著减弱,S3和S2相较于S4,氧跃层的起始位置分别下降了3m和2m,缺氧区厚度分别减少了3m和2.8m,底层DO浓度分别升高了0.4mg/L和0.6mg/L。表明移动式扬水器对水体的垂向混合起到了一定的促进作用,增加了水体上下层之间的垂向运动,加速了物质循环和能量流动,使底层DO含量增多,缺氧区厚度减小,弱化了水库热分层结构,提高了底层水体的氧化性,一定程度上抑制了内源污染释放,对水库水环境改善及生态修复有重要意义。

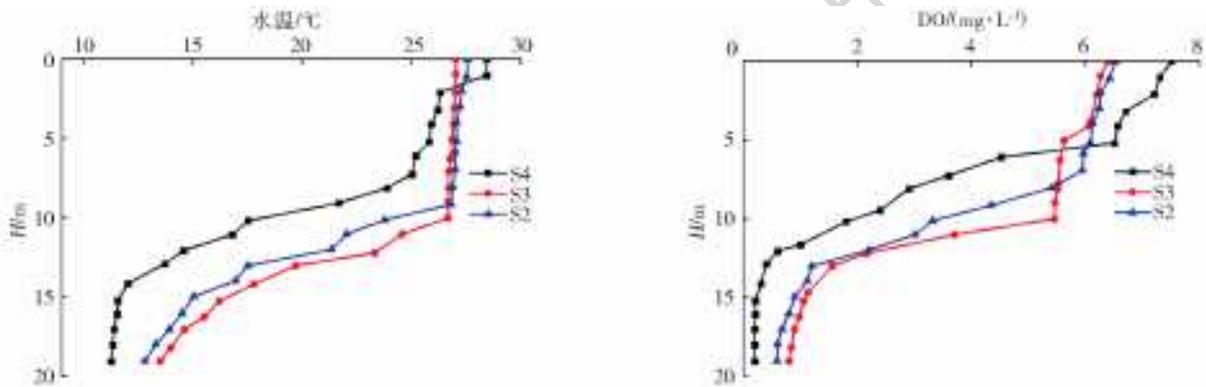


图10 S2、S3和S4水温、DO垂向分布

Fig. 10 Vertical distribution characteristics of water temperature and DO in S2, S3 and S4

5 结论

(1)本研究应用CE-QUAL-W2模型建立了萌山水库立面二维水温模型,各断面水温绝对平均误差均小于1℃,模型能够准确模拟出水库水温变化及热分层结构的形成与消亡过程。

(2)模拟结果显示,萌山水库属于热分层明显的平原型水库,全年呈单循环混合模式,6—10月为稳定热分层期,水库底层在热分层期DO质量浓度小于2mg/L,形成厚度约为8m的缺氧区,热分层结构是缺氧区形成的主要诱因。底层长期处于厌氧环境下加剧了铁、锰、COD、氨氮、总氮、总磷等污染物的累积和释放,导致底层污染物含量远高于表层,可能会对底层取水的水库供水造成不利影响。

(3)在轴流泵混合曝气技术的基础上设计了移动式扬水器,以改善水库垂向水质结构。设备运行效果明显,工作中心底层DO质量浓度由0.2mg/L

提高到了0.8mg/L,增加了水体垂向物质交换和能量流动,弱化水库热分层结构,温跃层厚度减少了4m,缺氧区厚度减少了3m。不过,移动式扬水器会受运行时间、设备功率等的影响,需要在下一步开展多种运行工况的对比,根据水质改善效果优化设备运行参数,使其成为保障水库水质安全的一种有效手段。

参考文献(References):

- [1] HAN B P, ARMENGOL J, GARCIA J C, et al. The thermal structure of Sau reservoir (NE, Spain): a simulation approach[J]. Ecological Modelling, 2000, 125 (2-3): 109-122. DOI: 10. 1016/s0304-3800 (99) 00176-3
- [2] 成晓奕,李慧赟,戴淑君. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 818-826. (CHENG X Y, LI H Y, DAI S

- J, et al. Modeling of seasonal vertical variation of dissolved oxygen and its impacts on water environment in Shahe reservoir within Tianmuhu reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(6): 818-826. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201607165
- [4] ARHONDITSIS G B, BRETT M T, SCHINDLER D G E. Effects of climatic variability on the thermal properties of Lake Washington[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 256-270. DOI: 10. 4319/lo. 2004. 49. 1. 0256
- [5] 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[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(8): 845-851. (WANG J F, CHEN J A, YANG Y Q, et al. Physical and chemical characteristics of water in Lake HongFeng during the disappearance of seasonal stratification [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(8): 845-851. (in Chinese)) DOI: 10. 13198/j. res. 2012. 08. 4. wangjf. 009
- [6] 李凯, 王晓东, 黄廷林, 等. 分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性[J]. *环境科学*, 2019, 40(1): 187-193. (LI K, WANG X D, HUANG T L, et al. Characteristics and fouling potential of dissolved organic matter in a stratified source water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1): 185-191. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201805169.
- [7] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2574-2581. (DONG C Y, YU Z M, WU Z X, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2574-2581. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2013. 07. 028
- [8] 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[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1337-1344. (ZENG M Z, HUANG T L, QIU X P, et al. Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir: Zhoucun reservoir in north of China [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1337-1344. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2016. 04. 019
- [9] 周子振, 黄廷林, 章武首, 等. 柘林水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(2): 93-99. (ZHOU Z Z, HUANG T L, ZHANG W S, et al. Pollution sources and the stratification effects on water quality of Zhelin reservoir [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(2): 93-99. (in Chinese)) DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 2016. 02. 016
- [10] 黄廷林, 谭欣林, 李扬, 等. 金盆水库热分层特性及扬水曝气系统运行效果研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(2): 270-276. (HUANG T L, TAN X L, LI Y, et al. Study of thermal regime characteristics and effect of water-lifting aerators operation on the Jinpen reservoir [J]. *Xi'an Univ. of Arch. (Natural Science Edition)*, 2018, 50(2): 270-276. (in Chinese)) DOI: 10. 15986/j. 1006-7930. 2018. 02. 018
- [11] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 819-828. (JU T, HUANG T L, MA W X, et al. Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 819-828. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2015. 0508.
- [12] KRAEMER B M, ANNECILLE O, CHANDRA S, et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change: lake stratification responses to climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(12): 4981-4988. DOI: 10. 1002/2015GL064097.
- [13] DAVISON W. Supply of iron and manganese to an anoxic lake basin [J]. *Nature*, 1981, 290(5803): 241-243. DOI: 10. 4319/lo. 1982. 27. 6. 0987
- [14] SALLY M, KEVIN M F, ROBERT J, et al. Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(3): 512-529. DOI: 10. 4319/lo. 1999. 44. 3. 0512
- [15] 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[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 54-60. (WANG Y C, ZHU J, MA M, et al. Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon reservoir, southwestern China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, (1): 54-60. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; FLKX. 0. 2005-01-010
- [16] 夏品华, 林陶, 李存雄. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(9): 1477-1485. (XIA P H, LIN T, LI C X, et al. Features of the water column stratification and the response of water quality of HongFeng reservoir in Guizhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(9): 1477-1485. (in Chinese)) DOI: CNKI;

- SUN;ZGHJ. 0. 2011-09-017
- [17] ASHLEY K I. Hypolimnetic aeration: practical design and application[J]. *Water Research*, 1985, 19(6): 735-740. DOI: 10. 1016/0043-1354(85)90120-4
- [18] HEO W M, KIM B. The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 524 (1): 229-239. DOI: 10. 1023/B: HYDR. 0000036142. 74589. a4
- [19] 周子振, 黄廷林, 李扬, 等. 扬水曝气器对水源水库水质改善及沉积物控制[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(1): 210-217. (ZHOU Z Z, HUANG T L, LI Y, et al. Improvement of water quality and sediment control by WLAs in a source water reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(1): 210-217. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2017. 01. 027
- [20] 王胤韬, 燕海平, 唐敏. 山东省淄博市萌山水库非汛期上游入库水量及水质情况浅析[J]. *中国水运(下半月)*, 2014, 14(10): 191-192. (WANG Y T, YAN H P, TANG M. A brief analysis of the inflow and water quality of Mengshan reservoir in Zibo, Shandong province during non-flood season[J]. *China Water Transport(The second half month)*, 2014, 14(10): 191-192. (in Chinese))
- [21] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. (The book editing committee of the state environmental protection administration. *Methods for monitoring and analysis of water and wastewater*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989. (in Chinese))
- [22] DELIMAN P, GERALD J. Application of the two-dimensional hydrothermal and water quality model, CEQUAL-W2, to the Chesapeake Bay-Conowingo Reservoir[J]. *Lake Reservoir Management*, 2002, 18(1): 10-19. DOI: 10. 1080/07438140209353925
- [23] MA J, LIU D F, WELLS S, et al. Modeling density currents in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 296: 113-125. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2014. 10. 030.
- [24] 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)[J]. *Water Research*, 2015(75): 249-258. DOI: 10. 1016/j. watres. 2015. 02. 052.
- [25] ARAOYE P A. The seasonal variation of pH and dissolved oxygen (DO₂) concentration in Asa lake Ilorin, Nigeria[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2009, 4(5): 271-274. DOI: 10. 1142/S0218127409023950
- [26] 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2632-2640. (SUN X, ZHU G W, DA W Y, et al. Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe reservoir, Liyang, China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2632-2640. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201710223
- [27] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 1039-1044. (QIU H B, SHANG L H, LI Q H, et al. Impacts of seasonal thermal stratification on the water environment of Wanfeng Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 1039-1044. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 2011. 0157
- [28] 姜欣, 朱林, 许士国. 水源水库季节性分层及悬浮物行为对铁锰迁移的影响: 以辽宁省碧流河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 375-385. (JIANG X, ZHU L, XU S G, et al. Effects of seasonal stratification and suspend sediment behaviors on the mobilization of manganese and iron in a drinking water reservoir: A case of Biliuhe Reservoir, Liaoning Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 375-385. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2019. 0207
- [29] KALFF J. 湖沼学: 内陆水生态系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (KALFF J. *Limnology: inland water ecosystems*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [30] 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍, 等. 福建省山仔水库水体季节性分层特征研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(3): 1-4. (SU Y P, ZHENG D X, LIN W Z, et al. research of the characteristic of seasonal thermal stratification in ShaneZi Reservoir[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2007, 23(3): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000- 5277. 2007. 03. 001
- [31] 孙晓杭, 张昱, 张斌亮, 等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究[J]. *环境化学*, 2006, 25(1): 24-27. (SUN X H, ZHANG Y, ZHANG B L, et al. Microbial effects on phosphorus release in taihu lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(1): 24-27. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HJHX. 0. 2006-01-005