

亚深型水库水体季节性分层特征研究*

郑莹莹¹, 刘树元^{1,2**}, 刘虹¹, 马晨¹, 江蓉蓉¹, 阎百兴²

(1. 台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000;

2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要:【目的】探究亚热带亚深型水库的热分层结构、水质响应特征以及形成机制。【方法】对2018年的长潭水库(位于台州市境内)的水温、溶解氧(DO)、pH和叶绿素a的垂直方向变化进行现场测定和实验室测试。然后分析热分层的季节性物理结构特征,探讨其对于水质的影响。【结果】长潭水库在5—6月为3层结构分层期,7—11月为2层结构分层期。相对水体稳定性(RWCS)8月最高,为521;温跃层厚度8月最大,占水深的85.19%,强度6月最大,为0.70℃/m。DO的垂直方向分布在7—9月呈现3峰特征,10—11月呈现2峰特征。表层水体在5—9月呈弱碱性,其他月份呈中性,底层水体在7—11月呈弱酸性,其他月份呈中性。叶绿素a垂直方向分布在12月、1月和2月以及6月离散性较大,其他月份呈现单峰特征。【结论】长潭水库全年呈现单循环的混合模式,在分层稳定期内呈现了不同于深水型水库的结构特征。亚深型水库特殊的分层结构对于水体中DO、pH和叶绿素a的垂直方向变化产生了一定的影响。

关键词:长潭水库;亚深型;水体分层;温跃层;结构特征

中图分类号:Q 178.513

文献标志码:A

文章编号:1004-390X(2021)02-0359-12

Seasonal Stratified Characteristics of Water Bodies in a Sub-deep Reservoir

ZHENG Yingying¹, LIU Shuyuan^{1,2}, LIU Hong¹, MA Chen¹,

JIANG Rongrong¹, YAN Baixing²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: [Purpose] In order to explore the thermal stratification structure, water quality response characteristics and their formation mechanism of a subtropical sub-deep reservoir. [Method] We conducted *on-site* measurements and laboratory tests on the vertical changes of water temperature, dissolved oxygen (DO), pH, and chlorophyll a in the Changtan Reservoir (in Taizhou City) in 2018. Then the seasonal physical structure characteristics of thermal stratification were analyzed, and its impact on water quality was discussed. [Result] Changtan Reservoir has a three-layer stratification period from May to June, and a two-layer stratification period from July to November. The relative water column stability (RWCS) was the highest (521) in August, the thermocline was the largest in August, accounting for 85.19% of the water depth, and the intensity was the largest (0.70℃/m) in June. The vertical distribution of DO showed a 3-peak characteristic from July to September, and a 2-

收稿日期: 2019-07-28 修回日期: 2020-07-03 网络首发时间: 2021-03-22 09:48:03

*基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFD0800904); 浙江省科技计划项目(2015C33238)。

作者简介: 郑莹莹(1998—), 女, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要从事为水资源利用与保护研究。

E-mail: z936489951@163.com

**通信作者 Corresponding author: 刘树元(1971—), 男, 吉林长春人, 博士, 讲师, 主要从事水污染与防治研究。E-mail: lxmxm521@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210318.1320.002.html>



peak characteristic from October to November. The surface water was weakly alkaline from May to September, and was neutral in other months, the bottom water was weakly acidic from July to November, and was neutral in other months. The vertical distribution of chlorophyll a in December, January and February, and June was more discrete, and other months showed a single peak characteristic. [**Conclusion**] The thermal stratified structure of Changtan Reservoir presents a single-cycle mixed pattern throughout the year, and presents structural characteristics different from those of deep-water reservoirs during the stratified stable period. The special layered structure of the sub-deep reservoir has a certain special effect on the vertical changes of DO, pH and chlorophyll a.

Keywords: Changtan Reservoir; sub-deep type; water stratification; thermocline; structural characteristics

水体形成季节性的稳定物理分层是水库的重要特征^[1]。水库中水体停留时间长, 流速缓慢, 水库整体更新慢, 因而水库是人为形成的容积巨大的停滞水域^[2]。夏季, 气温的升高会使表层水体水温升高, 但一定的水深又使水体在垂直方向上的传热不均, 因此导致水体形成上高下低的水温结构, 引起水体密度在垂直方向上的上轻下重, 借助于水库的大水力停留时间, 形成垂直方向上的物理分层^[3]。尤其夏季太阳辐射强烈时期, 水体垂直方向上的温差进一步加大, 垂直方向密度差异随之进一步加大, 因此在夏季高温时期会形成最为稳定的分层结构^[4-5]。所以, 水温分层的形成和演变过程是明确水体季节性分层的基础。

长时间和大温差的稳定分层结构会影响水库水体的物理性质、化学反应过程和生物活动^[4, 6-8]。水库水体稳定分层结构的形成, 使水体在垂直方向上具有了温度梯度最大的温跃层。温跃层的存在减弱或阻碍了上下水体的对流和混合, 抑制了水体垂直方向上的物质交换, 尤其引起溶解氧向下传输的减少, 造成底层水体形成缺氧或厌氧的还原环境^[9-11]。沉积物中的金属元素和营养盐等在微生物的作用下释放进入底层水体, 形成内源污染, 使水质恶化^[12-13]。在气温下降的秋冬季时期, 表层水体水温降低, 而底层水体由于表层水体的覆盖, 受气温的影响滞后, 水温高于表层水体, 水层的密度差异形成“翻库”, 导致底层水体携带还原性金属元素及营养盐上浮, 对水库整体造成污染^[14]。同时, 湖库的稳定分层附加传统的底层取水方式会对下游的生态环境产生负面影响。湖库稳定分层时期, 底层水体溶解氧含量和水温均较低, 理化指标较差, 对于河道内水生生物的生长和繁殖形成抑制, 对下游农作物的生长

机能产生不利影响, 也不利于景观用水的使用^[15]。

水温、水体透明度和水深与水体热分层参数(如温跃层深度、厚度和强度)有一定的相关性^[16]。其中, 一定的水深能够保证夏秋季节稳定分层时期形成完整的 3 层结构, 同时能够维持恒温层较为恒定的低温, 而温度对于微生物的活性和化学反应过程具有较大影响。相反, 较浅的水深可能在一定时期不能形成完整的 3 层结构, 同时会导致不同季节底层水温受气温的影响而波动, 从而影响微生物活性、水化反应速率以及沉积物释放, 进而对于水库水质的作用程度产生影响^[17]。

鉴于大型深水型水库对于区域经济社会发展的重要意义, 近年来对于此类水库的热分层形成机理、水质响应特征以及水质原位修复改善的研究颇多。如贵州高原红枫湖水库(最大水深 45 m)^[18]、亚热带特大山谷型水库——千岛湖(正常水位 106~107 m)^[16-17]、北方峡谷型水库——黑河水库(平均水位 70~90 m)^[11]和金盆水库(正常水位 94 m)^[19]等, 以上水库的深度一般均在 30 m 以上, 能够形成完整和典型的 3 层结构, 是研究热分层结构的典型样本。实际上, 水体水深超过 7 m 的水库就有可能形成温跃层^[20], 而水深更深的深水型水库会形成完整的 3 层结构。对于深度在 10~30 m 以下的亚深型水库, 水体的分层结构必然会出现受水深影响的变化特征, 进而会呈现出有别于深水型水库的水体物理、化学和生物指标的响应特征。

亚深型水库具有数量众多和分布广泛的特点, 对于区域经济发展和水环境保护具有重要作用。以位于浙江省台州市的长潭水库为例, 该水库是集供水、灌溉、防洪和发电于一体的大(Ⅱ)型水库, 为地区经济发展和生态环境改善提

供了重要保证。该水库虽然最大水深为 42 m,但由于位于亚热带台风多发区,年降水量达到 2 000 mm 左右,且降雨量主要集中在夏秋的梅雨季节,降雨、台风及高温等多种气候现象叠加,为保证防台和防洪要求,水库蓄水水位长期位于 30 m 以下,因此实质上运行水深较浅。由于热分层的影响,长潭水库的水质会出现季节性变化,近年来其水质的季节性变化逐渐受到关注。因此,长潭水库是一座较为典型的亚深型热分层水库。随着台州市对于长潭水库周边生态环境治理的持续投入,森林覆盖率较高,面、点源污染输入基本绝迹,入库河流的水质持续改善。因此,内源污染成为长潭水库水质季节性恶化的根本原因^[13]。

为加强长潭水库供水水质的可预测性,推动水库水质修复改善技术研究,对水库进行科学管理,有必要对于类似于长潭水库的亚深型水体的热分层结构尤其是温跃层的形成规律进行研究。以长潭水库为研究对象,探讨浅层水库(水深在 10~30 m)热分层结构的形成及水质响应特征,以期对亚深型水库的内源污染形成机制以及原位水质改善技术研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长潭水库(N28°30′~28°40′, E121°00′~121°04′)位于浙江省台州市西部的永宁江上游。水库集水面积 441 km²,年均降水量 1 948 mm,入库水量 5.65×10⁹ m³。坝高 43 m,最高水位 42 m,总库容 7.32×10⁹ m³。长潭水库灌溉面积 6.95 万 hm²,防洪面积 1.87 万 hm²,水电站总装机容量 9 920 kW,供水范围覆盖台州市南部五县区 and 数万家企业。

1.2 采样及测试

库区内靠近大坝的深水区是长潭水库分层结构比较明显的区域,也是水库出水口所处位置。如图 1 所示:本次试验水样采集地点设置在长潭水库大坝处(N28°36′36″, E121°04′23″)。

2018 年 1—12 月在采样点持续进行监测采样。采集频率为每月 3 次,设置在每月的上旬(5 日±2 d)、中旬(15 日±3 d)和下旬(25 日±3 d)各采样 1 次,采样的时间集中在每日上午的 9:00—11:00,然后取 3 次的平均值。采用便携式多参数水质测定仪(意大利产 HANNA)现场测定水温、pH 和溶解氧(DO)。水样取回实验室后首先

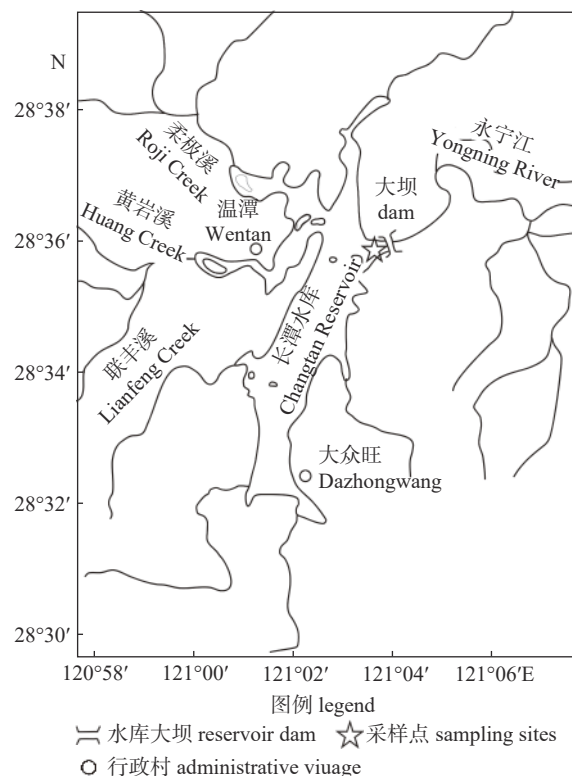


图 1 长潭水库采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites in Changtan Reservoir

经 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤,然后进行叶绿素 a 的测定,测定方法为丙酮萃取分光光度法^[21]。

1.3 数据处理

水体相对稳定性 (relative water column stability, RWCS) 采用以下公式计算的结果进行判别^[22]。

$$RWCS = (D_h - D_s) / (D_4 - D_5) \quad (1)$$

式中, D_h 为底层水体密度; D_s 为表层水体密度; D_4 和 D_5 分别为纯水 4 °C 和 5 °C 时的密度。

垂直方向温度梯度大于 0.2 °C/m 的水层定义为温跃层,相应地,该水层上部水深定义为温跃层上界,该水层下部水深定义为温跃层下界,上下界的差值定义为温跃层的厚度,温跃层的垂直方向温度梯度定义为温跃层的强度^[23]。

2 结果与分析

2.1 水温垂直分层与季节变化

如图 2 所示:2018 年春季,长潭水库水体剖面平均水温从大到小的顺序是 1 月>3 月>2 月。从表层水体温度变化来看,1 月最高,3 月次之,2 月最低;底层水温变化与表层基本相同,表底层水温差异不大,最大在 1 月,为 2.43 °C。从垂直方向水温变化来看,1—3 月的水温剖面分

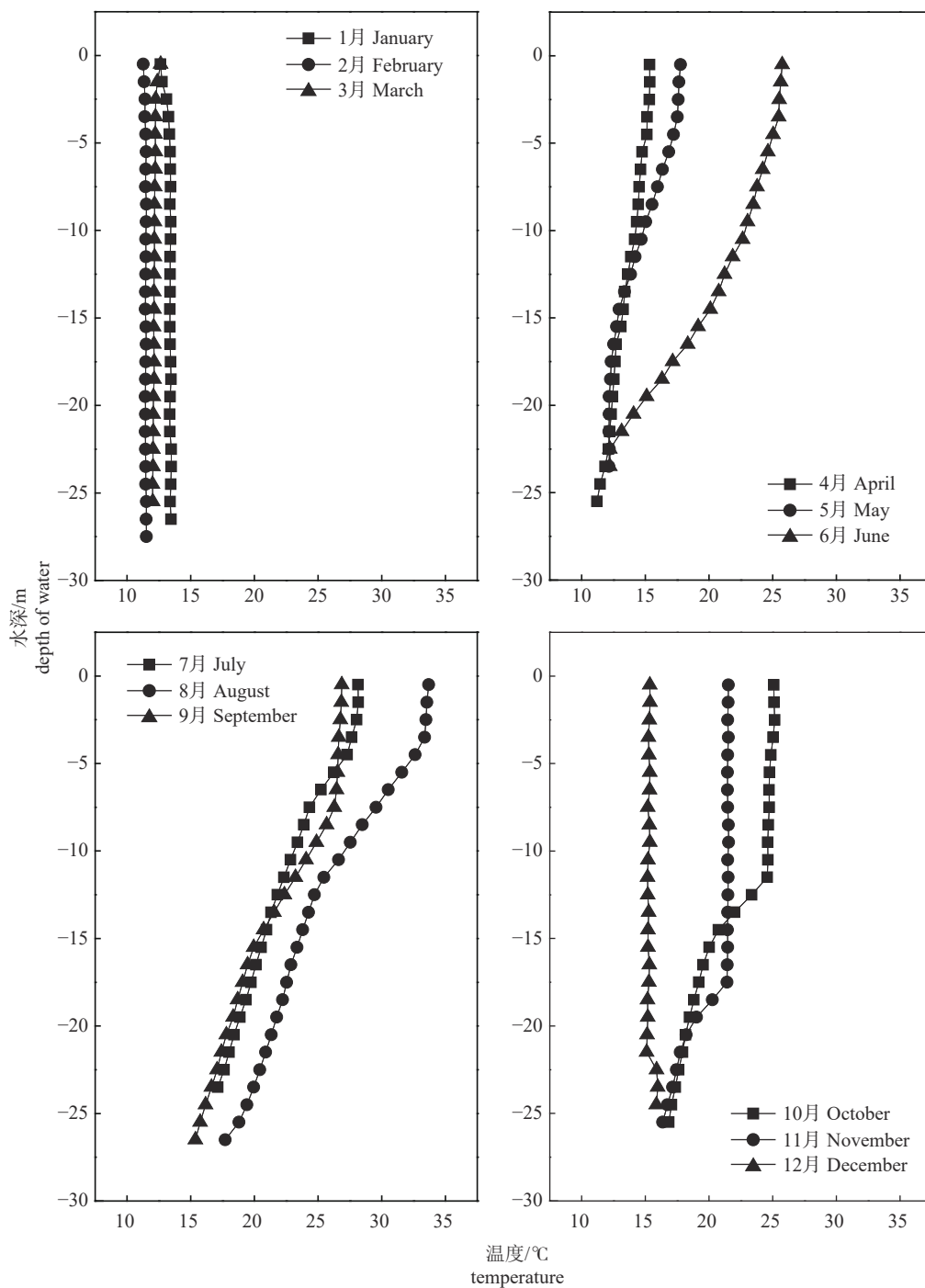


图 2 长潭水库水温的垂直剖面变化

Fig. 2 Vertical profile variation of water temperature in Changtan Reservoir

布温差变化不大, 1—3 月的温度分别为 $(13.33 \pm 0.12) ^\circ\text{C}$ (平均值 \pm 平均偏差, 下同)、 $(11.46 \pm 0.04) ^\circ\text{C}$ 和 $(12.16 \pm 0.08) ^\circ\text{C}$, 可认为整体垂直方向掺混均匀, 水温无明显分层。

4 月的表层水温为 $14.35 ^\circ\text{C}$, 与底层水温相差 $3.24 ^\circ\text{C}$; 垂直方向来看, 其温度变化可分为 3 个水段, 在 $0 \sim 2.5 \text{ m}$ 范围内, 平均温度为 $(14.34 \pm$

$0.01) ^\circ\text{C}$, 温度基本不变; 在 $2.5 \sim 14.5 \text{ m}$ 范围内, 平均温度为 $(13.03 \pm 0.16) ^\circ\text{C}$, 垂直方向温差逐渐增大; 在 $14.5 \sim 25.5 \text{ m}$ 范围内, 平均温度为 $(11.54 \pm 0.25) ^\circ\text{C}$, 垂直方向温差较上一层有所减少。同样, 5—6 月具有类似的规律, 即虽然随着水深的增加, 水体垂直方向上的温度逐渐降低, 但是在 3 种不同的深度范围内, 降低的速率不

同。由此可见,4—6月虽然表层水体温度升高较快,但底层水温基本维持在11.21~12.25℃范围内,受表层水体温度升高的影响较小。

7—9月是长潭水库气温最高的3个月份。该时期水温的剖面分布特征与5、6月相比,既有相同的变化趋势又有不同的水层结构特征。与5、6月相同的是,随着水深的增加,水温明显下降;区别在于7—9月期间如果按照垂直方向水温的差异进行水层的分类,那么长潭水库在该时期只有2个明显水层。以8月为例,在0~3.5 m的垂直水段内,平均温度为 (33.51 ± 0.10) ℃,温度基本保持不变;进入3.5~26.5 m的水段内,平均温度为 (24.57 ± 3.73) ℃,温度在33.36~17.72℃之间变化。同时可以看出:随着气温升高,底层水温受到了气温影响,由6月的12.25℃升高到了8月的17.72℃,随着9月的气温降低,底层水温回落到15.38℃。

表层水温受气温影响,表现为10月>11月>12月。在10—11月,同7—9月的情况类似,长潭水库继续维持2层结构特征。以10月为例,在0~11.5 m的水层范围内,平均水温为 (24.83 ± 0.19) ℃,温度在24.57~25.08℃之间变化,温度差异较小;在11.5~25.5 m的水层内,平均水温为 (19.45 ± 1.81) ℃,温度在24.57~16.84℃之间变化,温度差异较大。而在12月,长潭水库垂直方向水体已经完全混合,分层结构已经消失。10—12月,长潭水库底层水温趋向于一致,在15.86~16.84℃之间变化。

2.2 水体稳定性和降雨量变化

如图3所示:长潭水库的RWCS自1—12月呈现单峰变化。在1—3月,RWCS值的变化较为平稳,在3.5~13.25之间变化;自4月开始,随着气温升高,表层水温提升,RWCS随之升高,最大值出现在8月,为521;进入9月以后,气温降低,表层水体温度降低,表层和底层水温差异减小,在12月水体达到完全混合,RWCS降为10.13。从降雨量的月份分布来看,全年总降雨量为1 835.5 mm,其中雨季集中分布在5—6月以及8—10月,占全年降雨量的70.55%,与热分层期基本重叠。

2.3 温跃层结构的季节性变化

如图4所示:温跃层上界初期位置较浅,后期位置下降明显。5—8月,温跃层上界距离水体

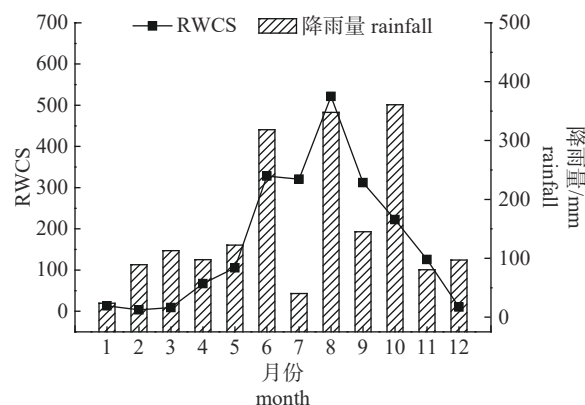


图3 水体相对稳定性 (RWCS) 及月平均降雨量

Fig. 3 Relative water column stability (RWCS) and average monthly rainfall in Changtan Reservoir

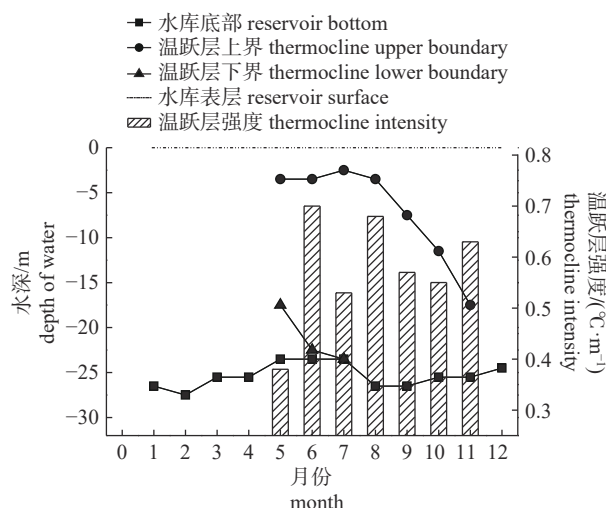


图4 水体相水温跃层强度及厚度的季节性变化

Fig. 4 Seasonal variation of strength and thickness of thermocline in Changtan Reservoir

表层较小,温跃层深度较浅,主要在3~4 m左右变动。进入9月以后,温跃层下潜,深度增加,温跃层上界与表层水体的距离增加,从9月的7.5 m一直下降至11月的17.5 m。

在分层结构形成后,温跃层下界不断下降,直至水库底部。5—6月,温跃层下界不断向下延伸,从5月的17.5 m延伸至6月的22.5 m,7月,温跃层下界继续下降,对恒温层形成持续的挤压作用,直至温跃层下界触及水库底部,恒温层消失。因此,在不同的稳定分层时期内,长潭水库分层呈现不同的结构特征,在5—6月为3层结构分层期,7—11月为2层结构分层期,而恒温层只存在于5—6月。

在分层期内,温跃层厚度变化较为复杂。

5—8 月, 温跃层的厚度处于不断增加的时期, 从 14 m (5 月)→19 m (6 月)→21 m (7 月) 向 23 m (8 月) 变化, 厚度最大的 8 月占水深的 85.19%。9—11 月, 温跃层处于不断变薄的时期, 厚度从 9 月的 19 m 一直减少至 11 月的 8 m。

温跃层强度是衡量和判别热分层结构的重要指标之一。5—6 月, 随着水温升高, 温跃层强度从 5 月的 0.38 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 达到最大值 0.70 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。进入

7 月, 温跃层的强度开始下降至 0.53 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。8 月, 温跃层的强度回升至 0.68 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。9 月, 随着水温的下降, 温跃层强度又降至 0.57 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 10 月, 温跃层强度继续降低至 0.55 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。11 月, 温跃层强度突然有所上升, 达到自 9 月以来的最高值, 为 0.63 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

2.4 长潭水库溶解氧 (DO) 及 pH 的季节性变化
如图 5 所示: 长潭水库中 DO 的垂直方向分

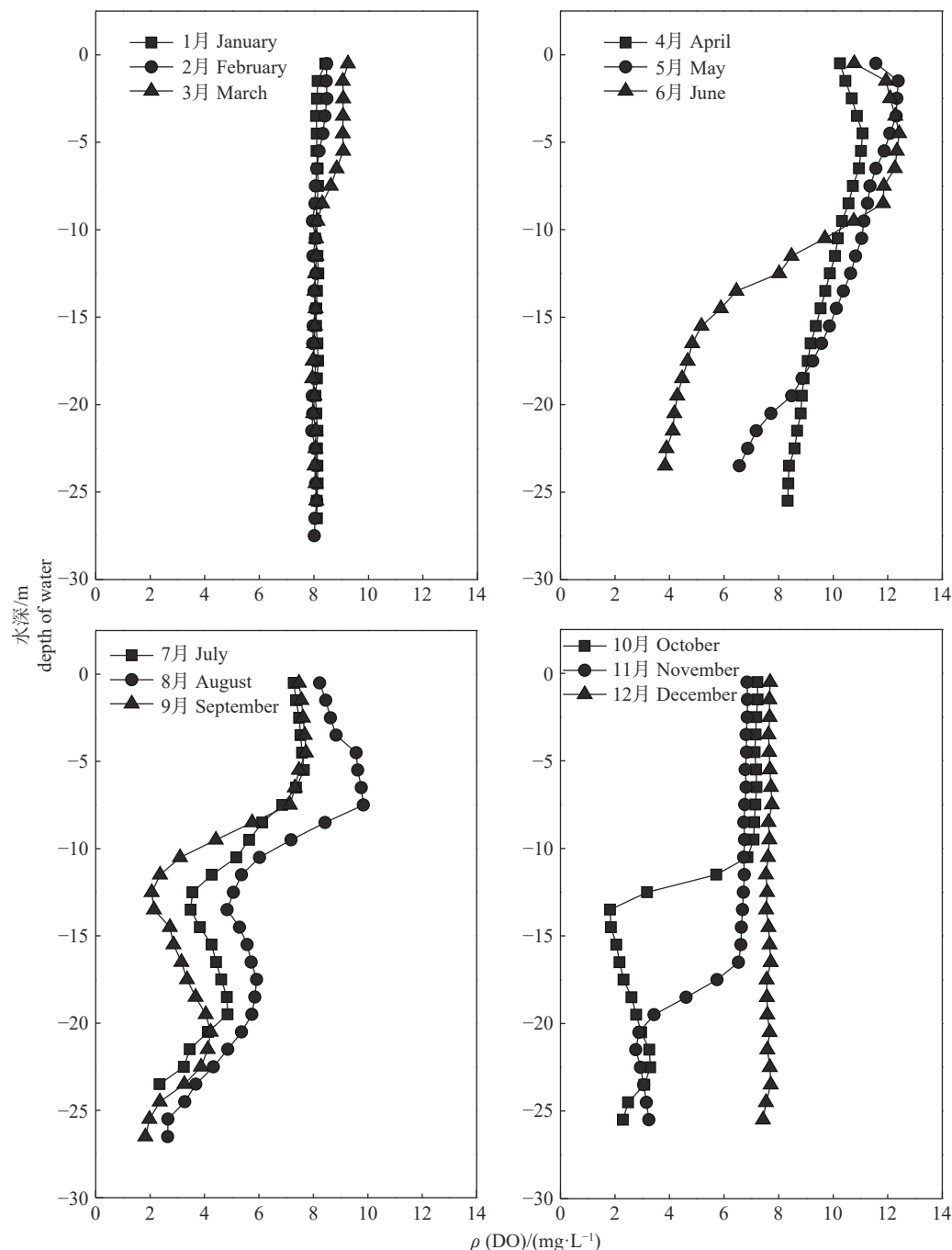


图 5 长潭水库溶解氧 (DO) 垂直方向分布的季节性变化

Fig. 5 Seasonal variation of dissolved oxygen (DO) vertical distribution in Changtan Reservoir

布呈现出明显的季节性特征。

在1—2月,表层水体和底层水体的DO差别不大。进入3月后,随着气温的升高,水温随之上升,在表层的0~8 m处出现DO跃层,DO的质量浓度为0.11 mg/L。

进入4月,虽然长潭水库依然没有形成稳定的分层结构,但是由于藻类在真光层内的光合作用,DO在水体的5 m左右达到最大值(11.08 mg/L),随后,DO值持续下降,至底层水体时降为8.33 mg/L,在5~26 m之间的平均DO质量浓度梯度为0.13 mg/(L·m)。进入5月后,长潭水库DO的垂直方向分布继续维持4月的单峰分布特征,即在5 m左右达到DO质量浓度的最大值(12.08 mg/L),随后DO质量浓度持续下降,但平均质量浓度梯度增大至0.29 mg/(L·m),且由于稳定的分层结构的形成(图2),底层水体DO下降至6.56 mg/L。进入6月后,由于真光层内藻类作用导致的DO极大值达到12.42 mg/L,垂直方向平均DO质量浓度梯度较5月增加至0.45 mg/(L·m),而底层水体的DO进一步降至3.84 mg/L。

进入7—9月,长潭水库的DO垂直方向分布自上而下呈现出明显的3峰特征,第1峰为藻类在5~8 m的范围内由于光合作用使DO增加的缘故;随着水深增加,由于处于温跃层内,水温较高,有机物的分解速率加快,耗氧速率增加,DO含量迅速下降,在12~14 m范围内形成第2峰,如9月DO质量浓度在13 m处低至2.06 mg/L,这可能与水温降低,藻类大量死亡有关;有机物消耗后,水体内DO含量逐渐上升,至19~21 m处,由于底层水体沉积物还原物质释放过程中的耗氧作用,因而形成第3峰。7—9月的最大DO梯度均由水体有机物矿化贡献,分别为0.52、0.83和0.71 mg/(L·m),底层水体DO质量浓度分别为2.35、2.65和1.83 mg/L。

在10月,DO在0~10 m范围内混合较为均匀,11月,DO混合质量深度增加至17 m,而进入12月,长潭水库整个水体剖面DO已经完全混合均匀。10—11月底层水体DO质量浓度分别为2.29和3.24 mg/L,而12月底层水体DO质量浓度已经恢复至7.43 mg/L。

如图6所示:1—3月水体垂直方向pH分别为7.53±0.07、7.02±0.26和7.18±0.08,整体呈现

中性。

进入4月,pH的垂直方向分布较为均匀,为7.66±0.16。5—6月10 m以下水体的pH分别为7.54±0.11和7.51±0.16。5月,在表层水体0~5.5 m范围内,pH为8.82±0.25;6月,在表层水体0~7.5 m范围内,pH为8.93±0.08。因此,长潭水库4月水体垂直方向呈中性,5—6月表层水体由于藻类的光合作用而偏弱碱性,而底层水体呈中性。

7月,4.5 m以上水体的pH为9.04±0.12,8—9月在7.5 m以上水体的pH分别是9.43±0.05和9.19±0.10。7—9月底层水体的pH分别为6.86±0.07、6.42±0.01和6.63±0.01。所以,7—9月长潭水库表层水体呈弱碱性,底层水体由于温跃层的包裹和覆盖呈弱酸性。

10—12月,10 m以上水体的pH分别为7.69±0.038、7.48±0.039和7.39±0.036。10—11月,距库底3 m范围内的底层水体的pH分别为6.59±0.064和6.52±0.13。12月,pH垂直方向分布均匀,为7.40±0.032。因此,10—11月长潭水库表层pH呈现中性,底层水体pH呈现弱酸性,12月水体pH呈均匀分布,呈中性。

2.5 长潭水库叶绿素a的季节性变化

如图7所示:长潭水库叶绿素a的垂直方向分布特征的季节性变化较为明显。

1—2月长潭水库叶绿素a的垂直方向分布的离散性变化较大,整体有1月>2月的趋势。如1月叶绿素a质量浓度为(1.11±0.48) μg/L,2月叶绿素a质量浓度为(1.03±0.21) μg/L。3月,随着气温上升,同时,“翻库”后真光层中营养盐浓度增加,有利于浮游植物的生长,叶绿素a在表层3~5 m处出现极大值,随后,由于水体结构较为稳定,垂直方向混合减弱。

4月,叶绿素a基本维持了3月的分布规律。进入5月后,叶绿素a的质量浓度在表层水体3~4 m处达到极大值(4.37 μg/L),是4月极大值的2.34倍。6月,长潭水库叶绿素a的质量浓度持续增大,最大值达到4.83 μg/L,分布在表层水体的2~3 m处,而在垂直方向分布上,整体离散性较大。

7—8月,长潭水库叶绿素a质量浓度在7~8 m处继续呈现极大值,分别达到2.64 μg/L和3.62 μg/L,9月后此值减小至1.68 μg/L,位置上

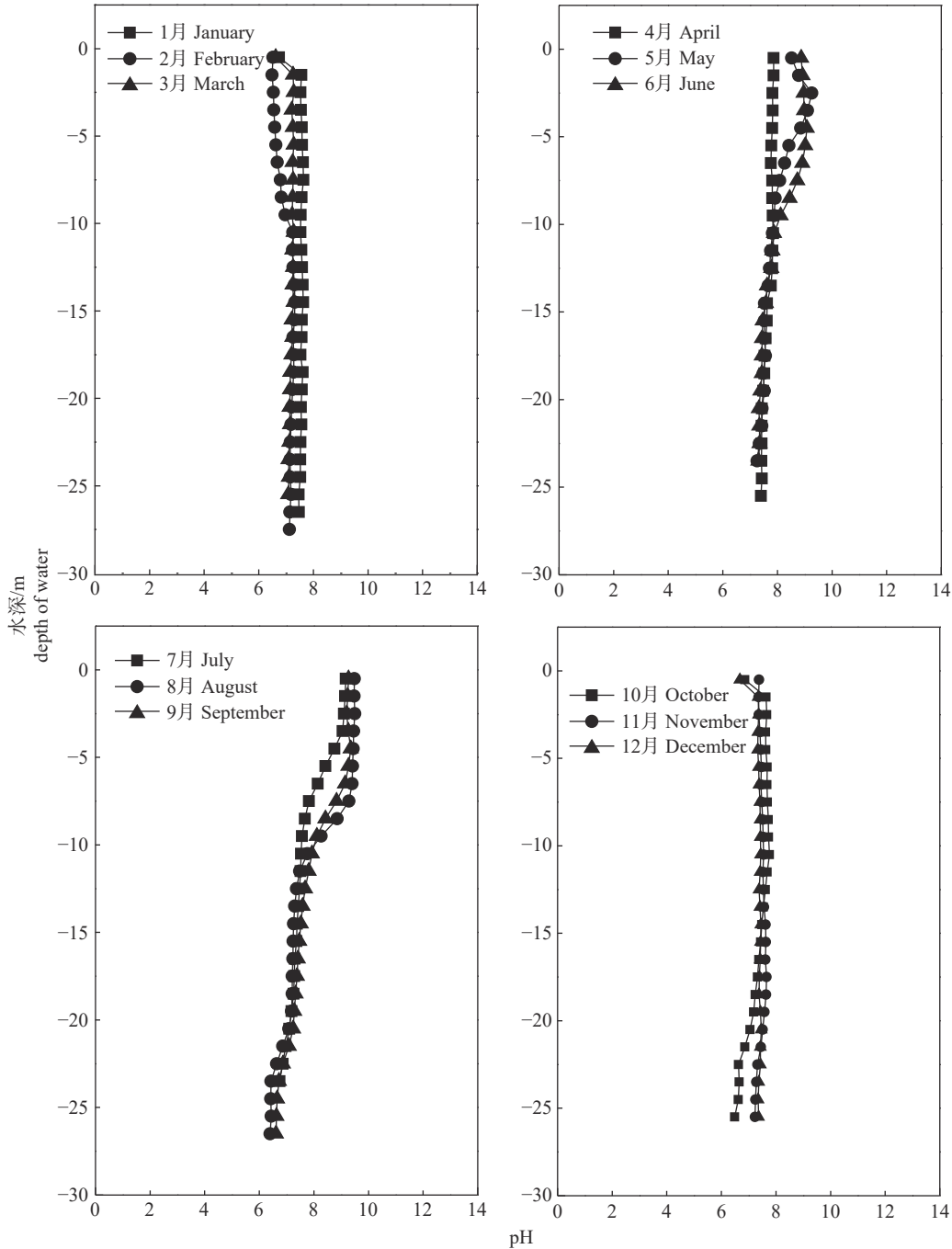


图 6 长潭水库 pH 值垂直方向分布的季节性变化
Fig. 6 Seasonal variation of pH vertical distribution in Changtan Reservoir

抬至 4~5 m 处。

10 月，叶绿素 a 质量浓度的垂直方向分布重复夏季的规律，并在表层水体 5~6 m 处达到极大值 (3.41 $\mu\text{g/L}$)。11 月，15 m 以上水层叶绿素 a 的离散性增加；12 月，叶绿素 a 的垂直方向分布离散性整体较大。

从叶绿素 a 的全年垂直方向分布来看，3、4、5、7、8、9 和 10 月基本呈现单峰的变化特

征，且极大值出现在表层水体 3~8 m 处，叶绿素 a 质量浓度的最大值出现在夏季长潭水库分层结构最为稳定的时期。

3 讨论

3.1 长潭水库水温层化结构的演替模式

(1) 水温分层结构的季节性变化

水温的季节性变化是水库形成稳定分层的必

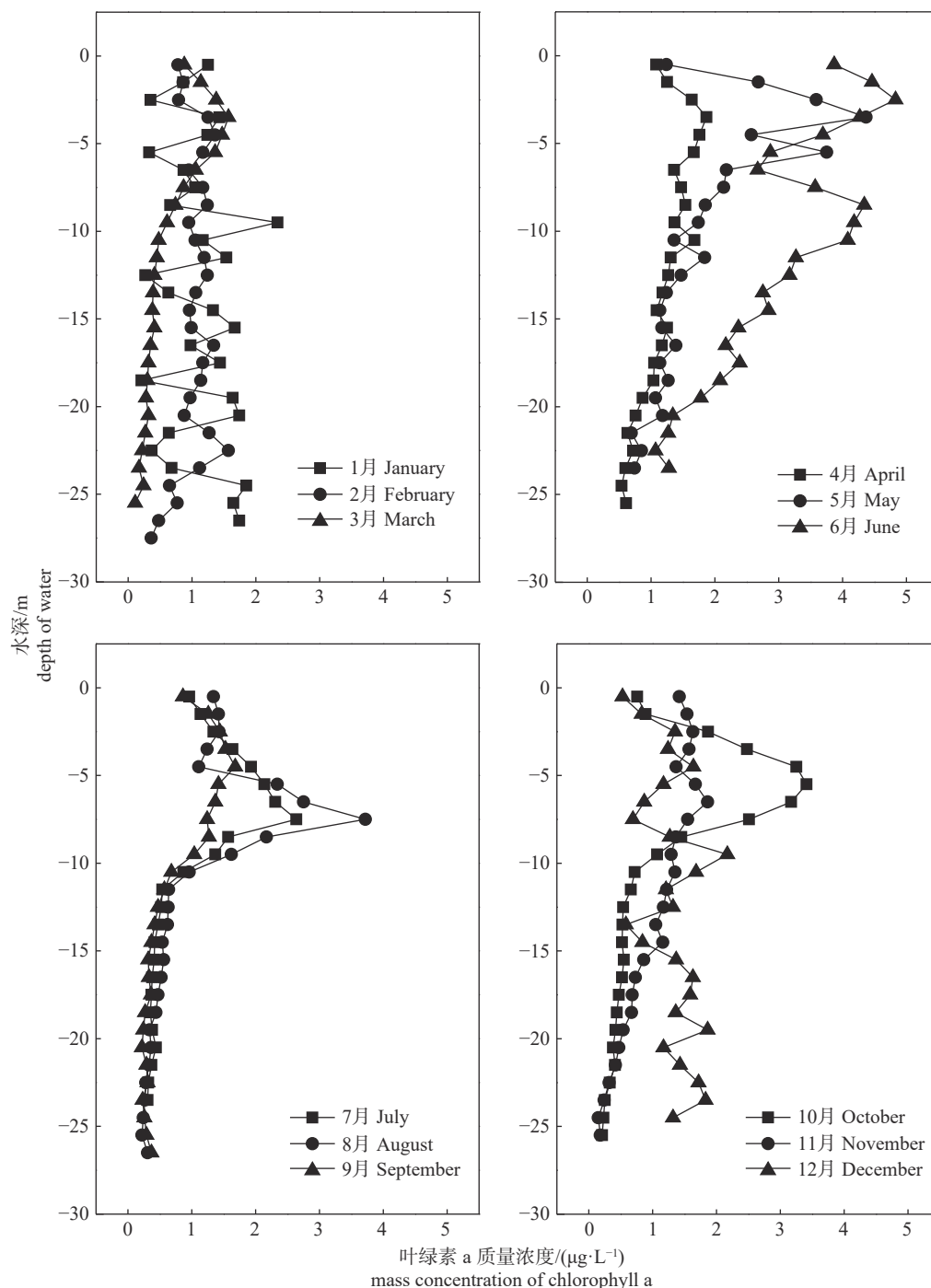


图7 长潭水库叶绿素 a 质量浓度的季节性变化

Fig. 7 Seasonal variation of mass concentration of chlorophyll a vertical distribution in Changtan Reservoir

要条件^[10], 而垂直方向水温的分布能够较为直观地反映水温的分层变化^[24]。1月水温自表层至底层逐渐增加, 表明不断降低的大气环境温度对于水温产生了自上而下的影响, 2月随着气温的持续降低, 水体上下混合均匀的程度在增加, 而3月, 随着气温升高, 表层水温升高。整体来看, 在1—3月低气温条件下, 长潭水库表层和

底层的水体得到了充分混合。4—6月, 随着气温的逐渐升高, 平均水温升高, 同时水体垂直方向温差加大。长潭水库水体变温层、温跃层和恒温层的3层结构初步形成。6—7月, 受气温持续升高的影响, 水温变化的下潜深度持续增加, 恒温层的上界不断被压缩, 但由于水深所限, 恒温层的厚度不断减小, 直至消失。因此, 7—9月长潭

水库水层具有明显的变温层和温跃层 2 层结构特征, 这与同处亚热带地区的深水型水库千岛湖的分层特征明显不同^[16]。10—12 月, 随着气温降低, 长潭水库水体垂直方向混合深度不断增加。但是与其他时期不同, 该时期水温的剖面分布呈现 2 种不同的状态: 一是在 10—11 月继续维持长潭水库夏季 2 层结构特征; 二是在 12 月, 随着气温的持续降低, 垂直方向温度梯度不断减小, 分层结构消失。

比照 RWCS 值的变化, 长潭水库分层期为 5—11 月, 混合期为 1—4 月以及 12 月, 全年呈现单循环的混合模式。

(2) 温跃层结构特征对于热分层及水深的响应机制

温跃层的上界主要受气温的影响, 而温跃层下界受气温和水深的共同作用。5—8 月, 由于气温较高, 辐射作用强烈, 温跃层深度较浅。9 月以后, 气温降低, 温跃层下潜, 温跃层上界深度增加。5—6 月, 随着气温升高, 温跃层下界不断向下延伸; 7 月, 由于长潭水库深度限制, 温跃层下界已经触底, 恒温层消失, 水库垂直方向呈现温变层+温跃层的 2 层结构。8 月, 气温继续升高, 温跃层下界持续与底部接触。9 月及以后, 由于气温降低, 温跃层整体下潜, 因此温跃层下界并未出现向上抬升的趋势, 而是继续与底部接触, 维持长潭水库 2 层的分层结构。

温跃层的厚度主要受气温和水深支配。5—8 月, 气温逐渐升高, 温跃层的厚度不断加大。进入 7、8 月后, 虽然受水深限制, 但是温跃层厚度的整体趋势是不断加大的。9—11 月, 随着气温的降低, 表层水温下降 (图 2), 受温跃层上界下潜以及长潭水库有限水深的影响, 温跃层厚度不断减少, 温跃层变薄。

在不同的时期内, 温跃层的强度受水温的影响或者水温与水深的共同作用^[25]。在 5—6 月的 3 层结构存在期, 温跃层的强度主要受水温影响, 这与传统意义上温跃层形成的机制类似^[14]。7—11 月的 2 层结构存在期, 温跃层的强度受水温与水深的共同作用。进入 7 月, 由于温跃层下界触底, 温跃层的垂直方向剖面没有完整呈现, 气温对于温跃层内水温产生影响, 促使其强度明显下降, 这与千岛湖内随水深增加温跃层强度增加的结论相同^[16]。8 月, 由于降雨影响 (图 3), 长

潭水库水深有所增加, 同时受水温升高以及长潭水库水深增加的影响, 温跃层的强度较 7 月有所增加。9 和 10 月, 由于水温持续下降, 水深有所抬升, 温跃层继续下潜, 温跃层强度继续降低。11 月, 温跃层强度突然有所上升, 主要是受温跃层内在较薄的水层内产生较大的温差所致。由于气温降低, 温跃层表层水温降到了全年分层期内的最低温度, 而底层水体由于温跃层的阻挡, 继续维持较高的水温, 因此在垂直方向深度较小的范围内产生了较大的温差。

3.2 长潭水库特殊分层结构影响下的水环境效应

(1) DO 和 pH 的响应特征

DO 的变化主要受水体物理分层结构的阻隔、藻类释氧和有机物矿化耗氧的影响。

1—2 月, 由于气温降低, 水体处于垂直方向混合期, DO 在垂直方向上的分布较为均匀, 进入 3 月后, DO 垂直方向质量浓度之所以形成跃层, 主要是藻类在真光层内光合作用所致^[26]。

4 月, 底层水体 DO 的质量浓度下降主要是因为表层藻类等初级生产者在生命活动中产生的有机物向下层水体沉降, 并在水温升高的水体中不断矿化耗氧所致。进入 5—6 月, 底层水体的 DO 进一步下降, 同时温跃层的阻隔致使表层和底层的 DO 质量浓度差异增大, 垂直方向平均 DO 质量浓度梯度有所增加。

7—9 月, 长潭水库处于 2 层分层结构时期。进入温跃层范围内的底层水体, 由于温跃层的包裹, 其水温较 5、6 月有所上升, 上升的水温有利于沉积物中氧化还原反应的进行, 进一步促使底层水体环境向缺氧状态转变。

10—12 月, 随着气温的持续下降, 水体垂直方向混合深度不断增加。10 和 11 月, 由于气温降低, 藻类对于 DO 的贡献已经可以忽略, 主要是水体有机物矿化和沉积物内源释放耗氧。10 和 11 月底层水体 DO 质量浓度受到温跃层的包围和阻隔作用, 呈现较低数值。

水体中的 pH 变化主要受表层水体中藻类的光合作用和底部沉积物中的有机物厌氧氧化反应的共同影响^[16, 27]。在混合期的 1—3 月, 由于水体垂直方向混合较为均匀, DO 质量浓度较高且均匀, 长潭水库表层与底层水体的 pH 差异不大。进入 4 月, 藻类尚未进入大量繁殖期, 同时水体垂直方向混合较好, 长潭水库的垂直方向 pH 分

布依然较为均匀。5和6月,水体形成了稳定的3层结构,但在底部的恒温层内,依然维持在较低温度范围内,对于微生物活性和耗氧化学反应起到了抑制作用,因此,此时期内10 m以下水体的pH虽然在不断降低,但无明显差异,依然维持在中性环境。而在表层,由于藻类利用水体中的CO₂进行光合作用,促使pH明显增加。

进入7—9月,长潭水库形成了典型的2层分层结构,表层水体依然受藻类光合作用影响,而底层水体,由于受温跃层的包裹,温度较高,DO处于较低的水平,有机物的厌氧氧化反应活跃,产生的有机酸等降低了底层水体的pH。

10—12月,由于水温的降低,表层水体藻类的丰度降低,其光合作用对于pH的贡献减弱,因而pH分布较为均匀。10—11月,由于温跃层依然阻挡着底层水体DO的供应,底层依然处于厌氧还原环境,因此其pH依然较低。12月,长潭水库进入均匀混合期,pH垂直方向分布表现为整体均匀性。

(2) 叶绿素a的垂直方向分布规律

叶绿素a是表征水体藻类等浮游植物生物量的重要指标,浮游植物在水体真光层中可利用营养盐、进行光合作用从而大量繁殖^[28-30]。

1月长潭水库叶绿素a的垂直方向分布的离散性变化,主要是上一年度的12月长潭水库经“翻库”后水体整体混合,浮游植物在水库的垂直方向呈离散分布所致。进入2月后,随着水体混合程度减弱,叶绿素a的离散性减少。3月,叶绿素a的质量浓度主要受透光强度的影响,主要表现为随着水深的增加和透射光强度的下降,其质量浓度逐渐减小。

进入5月后,由于温度的进一步升高,叶绿素a的质量浓度进一步增加。6月,长潭水库叶绿素a整体离散性较大,可能与6月长潭水库集中降雨较多,入库径流量较大,垂直方向混合较为强烈有关。

7—9月,由于温跃层的阻隔和抑混作用,叶绿素a的下潜作用被遏制,质量浓度在表层水体呈现出较大数值。

10月,由于水体分层结构的持续影响,长潭水库的叶绿素a质量浓度的垂直方向分布基本重复夏季的规律。随着温跃层的下移,11月长潭水库温跃层以上水体垂直方向混合加剧,15 m以上

水层叶绿素a的离散性增加,12月,分层结构消失,水体垂直方向混合程度达到全年最大,导致了叶绿素a的垂直方向分布呈现较大的离散性。

可见,水体垂直方向上的混合程度成为叶绿素a的垂直方向分布离散性最为直接的影响因素。

4 结论

(1) 2018年长潭水库的分层期为5—11月,混合期为1—4月和12月,分层期为7个月,混合期为5个月,分层期中5—6月为变温层+温跃层+恒温层的3层结构,7—11月为变温层+温跃层2层结构,长潭水库呈现亚热带亚深型水库的特殊分层形式。

(2) 水温分层的结构特征对于水体DO和pH的垂直方向分布产生了重要影响。受温跃层的包裹作用影响,2层结构分层期的底层水体温、DO和pH与3层结构分层期明显不同,表现为水温升高,DO和pH下降。

(3) 在水体混合期的1、2、6和12月,叶绿素a的垂直方向分布离散性较大。水体垂直方向上的混合程度成为叶绿素a的垂直方向分布离散性最为直接的影响因素。

[参考文献]

- [1] 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[J].水科学进展,2011,22(6): 844. DOI: 10.1309/P.20111125.1636.010.
- [2] 吴莉莉,王惠民,吴时强.水库的水温分层及其改善措施[J].水电站设计,2007,23(3): 97. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9805.2007.03.026.
- [3] 王煜,戴会超.大型水库水温分层影响及防治措施[J].三峡大学学报(自然科学版),2009,31(6): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-948X.2009.06.003.
- [4] SAITO L, JOHNSON B M, BARTHOLOW J, et al. Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web-energy transfer and water quality models[J]. Ecosystems, 2001(4): 105. DOI: 10.2307/3659011.
- [5] ÇALIŞKAN A, ELÇİ Ş. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics of a stratified reservoir[J]. Water Resources Management, 2009, 23(7): 1257. DOI: 10.1007/s11269-008-9325-x.
- [6] 韩博平.中国水库生态研究的回顾与展望[J].湖泊科学,2010,22(2): 151. DOI: 10.18307/2010.0201.
- [7] XIAO L J, WANG T, HU R, et al. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir[J]. Water Research, 2011, 45(16): 5099. DOI: 10.1016/j.watres.2011.07.012.

- [8] ZHU K X, BI Y H, HU Z Y. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 450/451: 169. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2013.01.101](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.101).
- [9] 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(2): 49. DOI: [10.1016/j.watres.2015.02.052](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.052).
- [10] 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. DOI: [10.1080/07438141.2011.583713](https://doi.org/10.1080/07438141.2011.583713).
- [11] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 698. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5427.2014.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5427.2014.05.007).
- [12] 谭欣林. 峡谷分层型水源水库季节性水质响应特征及水质模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [13] 刘树元, 郑晨, 袁琪, 等. 台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(10): 3702. DOI: [10.13227/j.hjcx.2014.10.009](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2014.10.009).
- [14] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 1. DOI: [10.18307/2010.0101](https://doi.org/10.18307/2010.0101).
- [15] 张少雄. 大型水库分层取水下水温研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [16] 白杨, 张运林, 周永强, 等. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(5): 906. DOI: [10.11693/hyhz20160400095](https://doi.org/10.11693/hyhz20160400095).
- [17] 何剑波. 千岛湖水温、溶解氧及叶绿素a垂向特征研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [18] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 红枫湖夏季分层期间pCO₂分布规律的研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 106. DOI: [10.3321/j.issn:1001-6791.2008.01.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-6791.2008.01.018).
- [19] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 金盆水库汛期高浊水径流的潜入及热分层水体水质响应[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2778. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2015.09.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2015.09.033).
- [20] 贺冉冉, 罗澈葱, 朱广伟, 等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 344. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4831.2010.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4831.2010.04.011).
- [21] 国家环境保护总局, 《水和废水监测分析方法》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, 2002.
- [22] MUNGER Z W, CAREY C C, GERLING A B, et al. Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir[J]. *Water Research*, 2016, 106: 1. DOI: [10.1016/j.watres.2016.09.038](https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.038).
- [23] 姜波, 吴新荣, 丁杰, 等. 南海温跃层深度计算方法的比较[J]. *海洋通报*, 2016, 35(1): 64. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2016.01.009](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2016.01.009).
- [24] 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. DOI: [10.13227/j.hjcx.201710223](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201710223).
- [25] FEE E J, HECKY R E, KASIAN S E M, et al. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(5): 912. DOI: [10.4319/lo.1996.41.5.0912](https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.5.0912).
- [26] 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. DOI: [10.13227/j.hjcx.2014.07.015](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2014.07.015).
- [27] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5277.2007.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5277.2007.03.001).
- [28] BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 1. DOI: [10.4319/lo.1997.42.1.0001](https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001).
- [29] 姜欣, 朱林, 许士国, 等. 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. DOI: [10.18307/2019.0207](https://doi.org/10.18307/2019.0207).
- [30] 刘其根, 陈立侨, 陈勇. 千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2007(1): 117. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6482.2007.01.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6482.2007.01.017).

责任编辑: 何承刚