

# 深型水库溶解氧分层规律及其机制探究——以万安水库为例

陈侃<sup>1</sup>, 王飞飞<sup>1</sup>, 阮琪祯<sup>1</sup>, 吴旭春<sup>2</sup>, 曹文志<sup>1</sup>

(1. 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102;

2. 喀什地区盖孜库山河流域管理处, 新疆 喀什 844000)

**摘要:** 溶解氧(DO)是衡量生态状况的重要指标, 探讨深型水库DO分层规律与营养元素生物地球化学循环间的关系, 可为维护库区水生态健康提供科学依据。2022年监测了九龙江万安水库的理化指标及营养元素的垂向分布, 并分析了库区的DO分层规律及影响因素。结果表明: 2月属万安水库混合期, 呈贫营养状态, DO垂向平均浓度高达6.70 mg/L, DO变化受浮游植物分布及“翻库”影响; 5月属热分层形成期, 处中营养状态, 水体在内源产氧减少和原位DO消耗驱动作用下出现温跃层溶解氧极小值, 36 m以下水体处于缺氧状态; 8月为热分层稳定期, 处中度富营养化, 表层DO最大浓度达12.00 mg/L以上, 在35 m深度出现DO极大值, 水体热分层阻碍DO补充、内源产氧减弱是造成热分层稳定期水体上层大范围缺氧的主要原因; 10月为热分层消退期, 呈中营养状态, DO垂向平均浓度仅为0.77 mg/L, 水深2.79 m以下水层皆处于缺氧状态。热分层时期DO垂向变化受到水体热分层、营养水平、污染状态及浮游植物生长分布等因素的影响, 热分层从物理角度影响DO分层, 营养水平及污染状态可以影响DO的产耗机制, 而库区水体浊度通过影响浮游植物的垂向分布进而对DO浓度产生影响。

**关键词:** 溶解氧; 水体热分层; 缺氧状态; 万安水库

**中图分类号:** X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)02-0020-11

溶解氧(Dissolved oxygen, DO)是指O<sub>2</sub>以分子态溶解于水中的形态(李艳红等, 2013)。水体DO的主要来源是大气根据氧分压的大小向DO未饱和的水体中充氧, 以及水生生物进行光合作用释放到水中的氧(吕琳莉等, 2018)。水体中的DO浓度能够反应水体污染程度, 是水质的一个重要参数, 也是湖库水质管理的重要指标之一。水中有机物的生物降解过程消耗了大量的O<sub>2</sub>, DO耗尽促使有机物厌氧分解, 产生一些有毒、有难闻气味的气体有机物, 使水环境进一步恶化。因此, DO浓度影响到湖库用水质量, 并直接关系居民用水安全(陈东等, 2008; Harke et al, 2016; Torres et al, 2016)。DO不仅影响营养物质循环及温室气体排放, 充足的DO还是水生生物生存的必要条件, 许多水生生物需要DO充足的栖息地和适宜的水

温才可生存(Fernandez et al, 2014; Schindler, 2017; McClure et al, 2018)。当DO低于5.0 mg/L时, 存在威胁鱼类与浮游动物生存的可能, 而水体处于低氧或厌氧状态时(一般低于2.0 mg/L)会影响水生生物的生存繁衍。此外, 湖库底部的低DO浓度还会通过降低氧化还原电位(Eh), 促进沉积物中有毒物质、还原性污染物(如氨氮)等释放, 从而威胁到鱼类、底栖生物等生存, 并危害水生态系统健康(Singleton and Little, 2006; Matzinger et al, 2010; North et al, 2014)。

在全球气候变暖的背景下, 库区的深层水温稳定, 但表层水温上升显著, 库区水体分层结构更加稳定、生物异养呼吸速率增加、沉积物耗氧及氧气溶解度下降等因素驱动了DO的减少(Muller et al, 2012; Jane et al, 2021)。但大坝的修建、水资源过度开发利用等人类干扰行为改变了流域生态状况, 工农业、生活排污等向湖库输入营养物质与污染物, 营养水平高的库区藻类暴发频繁, 其强烈的光合作用常使得表层水体DO超饱和(Kosten et al, 2012; Schindler, 2017)。DO存在很高的生化反应参与度, 这使得DO浓度垂向变化规律特别是缺氧现象很难预测(Yvon-Durocher et al, 2010; Woolway & Merchant, 2019)。库区水体常被视作“半封闭”水体, 其水力停留时间长, 故季节变化所引起的水体热分层通常较稳定, 在此

收稿日期: 2023-08-12 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 福建省水利科技项目(MSK202216); 福建省环保科技计划项目(2021R023); 福建省厦门环境监测中心站环保科技项目(2022S01)。

作者简介: 陈侃, 2000年, 男, 硕士研究生, 河流环境过程方向。  
E-mail: chenkan@stu.xmu.edu.cn

通信作者: 曹文志, 1968年, 男, 教授, 主要从事河流与近海生物地球化学过程、水文与水资源。E-mail: wzcao@xmu.edu.cn

驱动下DO也呈现出较稳定的垂向分层规律(Wagner & Adrian,2011;Jones et al,2011)。现有研究将水深30 m以上的水库界定为深型水库,易形成由混合层、变温层及滞温层组成的热分层结构(李秋华等,2013;郑莹莹等,2021)。变温层中温度变化梯度最大的薄水层称为温跃层,湖库水体热分层的稳定性与其水温、水体透明度等物理化学因素及湖泊形态学参数密切相关(Demers & Kalff,1993;Houser,2006;Huang,2016)。热分层出现的根本原因是季节变化导致水体的上下层间出现温度差异从而产生水层密度差,热分层不仅阻碍水层交换,并对生物的活性和生化反应速率产生影响,进而影响DO分布规律(Saito et al,2001;Caliskan & Elci,2009;Borics et al,2015;Zhang et al,2015)。深型库区滞温层在一年中长时间存在大范围缺氧水层,DO补充受阻、浮游植物及有机质下沉分解与沉积物耗氧等是缺氧现象出现的主要原因。此外,流域内人类活动影响,水质进一步恶化,对缺氧层的形成存在一定的促进作用(Diaz & Rosenberg,1995;Muller et al,2012)。

国内外研究虽已对湖库DO垂向分布规律及机制进行了广泛探讨,但却缺乏对深型湖库中水体营养状态及营养元素生物地球化学循环与DO分层规律相互影响关系的研究。本研究以我国东南地区万安水库为研究对象,分析DO在不同时期的垂向变化特征,探究水层缺氧及变温层DO极小值等现象出现的内在原因,DO垂向分层规律与水层营养状况间的响应关系,以及DO变化规律与营养元素生物地球化学循环间的关系,以期为维护库区的水生态健康提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

万安水库(25°20′58″~25°24′36″ N,116°58′30″~117°03′36″ E)位于福建省南部的九龙江北溪上游,坝址位于龙岩市万安镇境内,1994年底开始蓄水。坝址以上流域面积667 km<sup>2</sup>,多年平均流量23.3 m<sup>3</sup>/s,水库正常蓄水位365 m,总库容约2.29×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,调节库容1.68×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,为多年调节水库。最大坝高93.8 m,属于混合式电站,设计水头84.7 m,多年平均发电量约为1.36×10<sup>8</sup> kW·h。水流入库汇流处存在一定规模的渔业养殖活动(林炳明,2006)。

### 1.2 样品采集与测定

选取万安水库深水区(年平均水深大于55 m),分别于2022年2月、5月、8月及10月进行4个季节的

采样。现场使用Hondex便携式数字声纳深度计测量水深,并采用YSI-EXO3便携式多参数水质测试仪垂向连续测定DO、水温、pH、叶绿素a、浊度及电导率,以叶绿素a浓度表征浮游植物生物量。并使用5 L有机玻璃采水器分别在水深0.5、10、25、35、45及60 m采集水样并将其低温保存于聚乙烯水样瓶中带回实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)、营养盐五参数(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)及高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)等相关指标。

TN和TP分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ636-2012)和钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定,COD<sub>Mn</sub>采用高锰酸盐指数测定标准(GB 11892-89)测定,营养盐五参数采用连续流动化学分析仪(AA3,德国Bran+Luebbe公司)进行测定。

### 1.3 数据处理

根据《湖泊(水库)富营养化状况评价方法及分级技术规定》,富营养化状态评价采用综合营养状态指数法(金相灿,1995)。评价中以0~3 m水深的叶绿素a平均浓度代表表层水体叶绿素a水平,以水深0.5 m的TN、TP及COD<sub>Mn</sub>浓度代表三者表层水体中的水平。

本文将垂直方向上温度梯度大于0.2°C/m的水层定义为温跃层,其是变温层中水温垂直梯度较大的一个水层;DO浓度梯度大于0.2 mg/(L·m)的水层定义为氧跃层,温跃层及氧跃层的深度分别定义为温跃层和氧跃层上部边界的深度,温跃层底部和氧跃层底部分别定义为温跃层和氧跃层下界的深度,温跃层及氧跃层厚度则为上下边界的差值(Wilhelm & Adrian,2008;Zhang et al,2015)。将水体DO浓度小于2.0 mg/L定义为缺氧状态。

采用Excel、SPSS 27.0进行数据处理及统计分析,并使用Origin 2018绘制垂向数值图。

## 2 结果与分析

### 2.1 DO及环境因子分层规律

2.1.1 DO及基础理化指标 万安库区不同季节呈现出混合期(2月)、热分层形成期(5月)、热分层稳定期(8月)及热分层消退期(10月)的变化特征(图1-a)。混合期水体无显著热分层,垂向水温变化范围12.59~15.24°C。进入热分层形成期,滞温层以上水温显著上升,热分层结构形成(第1温跃层+混合层+第2温跃层+滞温层),双温跃层分别出现在0.21 m及33.08 m处,厚度为7.24 m和7.86 m,水温梯度达0.67°C/m和0.63°C/m。热分层稳定期的水体分层结构更加稳固

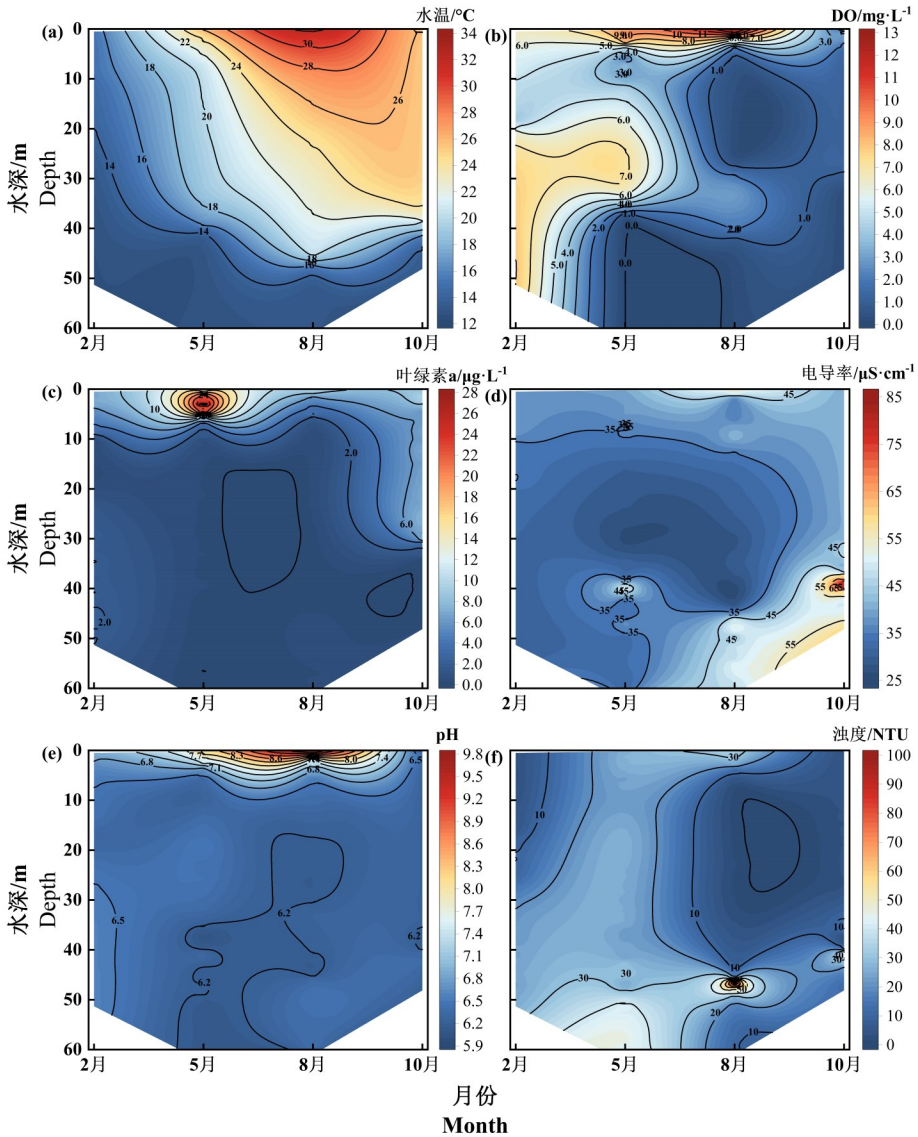


图 1 不同热分层形成时期垂向水温(a)、溶解氧(b)、叶绿素a(c)、电导率(d)、pH(e)及浊度(f)变化  
 Fig.1 Vertical profiles of water temperature (a), dissolved oxygen (b), chlorophyll-a (c), conductivity (d), pH (e) and turbidity (f)

(第 1 温跃层+混合层+第 2 温跃层+滞温层),垂向平均水温升高至  $21.78^{\circ}\text{C}$ ,双温跃层分别出现在水深  $0.65\text{ m}$  及  $44.57\text{ m}$  处,厚度为  $8.23\text{ m}$  和  $5.30\text{ m}$ ,水温梯度达  $0.77^{\circ}\text{C}/\text{m}$  和  $1.26^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,滞温层深度较热分层形成期增大。热分层消退期水体分层强度减弱(混合层+变温层+滞温层),温跃层出现在水深  $34.64\text{ m}$  处,厚度为  $9.51\text{ m}$ ,水温梯度达到了  $1.08^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,滞温层深度减小。

在水体热分层驱动下,DO 垂向分层在不同季节也呈现出明显变化特征(图 1-b)。在混合期,库区水体 DO 垂向变化( $4.12\sim 8.04\text{ mg/L}$ )较小,DO 垂向浓度平均值( $6.70\text{ mg/L}$ )较高,仅在  $8.66\text{ m}$  水深处出现氧跃层,其厚度为  $1.65\text{ m}$ ,浓度梯度为  $0.27\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$ ,未出现缺氧状

态水层。垂向 DO 分布规律在混合期呈“下高上低”,热分层形成期、稳定期及消退期则呈“上高下低”。进入热分层形成期,滞温层 DO 浓度下降,水体在第 1 个温跃层中出现了典型的 DO 极小值现象;2 个氧跃层分别出现在  $1.37\text{ m}$  和  $31.33\text{ m}$  处,厚度分别为  $4.07\text{ m}$  和  $5.90\text{ m}$ ,浓度梯度为  $1.53\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$  和  $1.10\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$ ,且低于  $36.68\text{ m}$  水深时处于缺氧状态。在热分层稳定期中,表层水体 DO 最大浓度达  $12.00\text{ mg/L}$  以上,2 个氧跃层分别出现在  $1.01\text{ m}$  及  $38.74\text{ m}$  处,厚度分别为  $13.19\text{ m}$  和  $6.71\text{ m}$ ,浓度梯度为  $0.90\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$  和  $0.26\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{m})$ ;并在水深  $5.09\text{ m}$  处出现了厚度  $23.22\text{ m}$  的缺氧水层,在  $35\text{ m}$  深度出现 DO 极大值现象,水深低于  $40.39\text{ m}$  再次进入缺氧状

态, 滞温层中的缺氧层出现深度较热分层形成期时有所增大。随着库区进入热分层消退期, 垂向DO浓度显著下降, 垂向平均浓度仅为0.77 mg/L, 2个氧跃层分别出现在0.85 m及29.80 m处, 厚度分别为2.04 m和3.10 m, 浓度梯度为0.93 mg/(L·m)和0.22 mg/(L·m)。缺氧现象较热分层稳定期进一步加剧, 深度2.79 m以下的水层皆处于缺氧状态。

万安库区各时期叶绿素a整体呈“上高下低”分布趋势(图1-c)。在混合期、热分层形成期及热分层稳定期, 叶绿素a浓度在10 m以上水层显著高于10 m以下水层, 且在10 m水深处降接近0。热分层形成期温跃层DO浓度最小的水深中叶绿素a浓度达27  $\mu\text{g/L}$ 以上。热分层消退期中水深30 m以上叶绿素a浓度稳定, 至第2个氧跃层及温跃层范围内, 叶绿素a浓度显著下降至接近0。

库区水体电导率在混合期变化较小(30.1~37.7  $\mu\text{S/cm}$ ), 在其他时期变化范围大(图1-d)。在热分层形成期及热分层稳定期, 水体电导率在第1个温跃层及氧跃层位置显著下降, 在第2个温跃层及氧跃层位置上升。热分层消退期中的水体电导率始终高于40  $\mu\text{S/cm}$ , 在第2个温跃层位置由41  $\mu\text{S/cm}$ 增至80  $\mu\text{S/cm}$ 。

各时期pH整体呈“上高下低”状态, 大部分水体属于弱酸性, 水体混合期及热分层消退期pH整体变化范围小; 热分层形成及稳定期pH变化较大(6.07~8.04及6.15~9.47), 在0~10 m水层的pH表现出与同深度DO变化相同的下降趋势(图1-e); 且在热分层形成期的第2个温跃层及氧跃层出现位置, pH显著下降。

水体浊度在热分层形成期最高, 各深度水体浊度均高于20 NTU, 混合期及热分层形成期的水体浊度在滞温层呈显著增大趋势(图1-f)。在热分层稳定期, 浊度在第1个温跃层及氧跃层位置显著下降, 在第2个温跃层位置上升。热分层消退期中的水体浊度在第2个温跃层范围内显著增加。

**2.1.2 营养物质垂向变化特征与库区营养状态** 库区水体热分层形成期的TN、TP及 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的变化范围小于热分层稳定期及消退期(图2)。在热分层形成期, 库区水体的TN在垂向上稳定。热分层稳定期时, 库区表层的水体TN浓度超过V类地表水环境质量的限值, 其在第1个变温层中以0.46 mg/(L·m)的梯度下降, 在混合层、第2变温层及滞温层中保持稳定。在热分层消退期, TN在10 m以上水层呈上升趋势。在第2个温跃层中出现极小值, 滞温层TN明显回升, 超过V类

地表水环境质量的限值(图2-a)。

热分层形成期及消退期的水体TP浓度在垂向上保持稳定。在热分层消退期, 库区混合层的TP保持稳定, 第2个温跃层位置TP出现极小值, 在滞温层回升, 超过V类地表水环境质量的限值(图2-b)。

热分层形成期的水体 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 在水表变温层中呈上升趋势, 在第2个温跃层中出现 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的极大值。在热分层稳定期, 水体 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 在混合层中持续下降, 在DO极大值位置出现极小值, 在滞温层中略有回升后下降。热分层消退期的水体 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 在混合层中呈先上升后下降趋势(图2-c)。

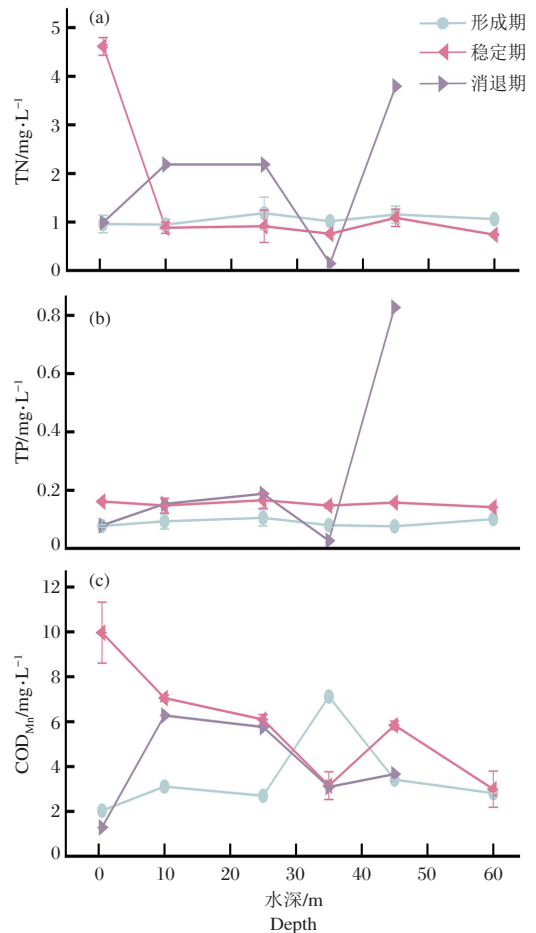


图2 不同热分层时期TN(a)、TP(b)、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (c)垂向变化特征

Fig.2 Vertical change characteristics of TN (a), TP (b) and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  (c) in different thermal stratification periods

在热分层形成期, 库区水体 $\text{NO}_2^-$ 垂向变化较大, 其余4项指标的变化较小(图3)。在温跃层DO极小值出现位置,  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 呈上升趋势,  $\text{NH}_4^+$ 呈下降趋势。在第2个温跃层及氧跃层出现位置,  $\text{NO}_2^-$ 及 $\text{NO}_3^-$ 出现极小值,  $\text{NH}_4^+$ 及 $\text{PO}_4^{3-}$ 略有上

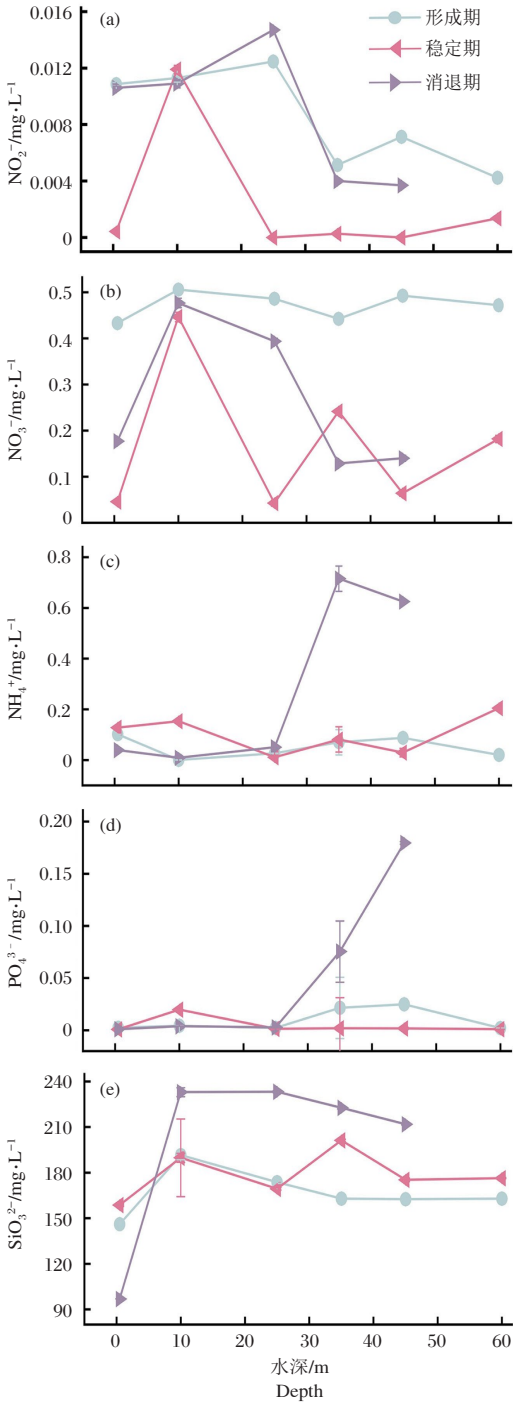


图3 不同热分层时期 $\text{NO}_2^-$  (a)、 $\text{NO}_3^-$  (b)、 $\text{NH}_4^+$  (c)、 $\text{PO}_4^{3-}$  (d) 及 $\text{SiO}_3^{2-}$  (e) 垂向变化特征

Fig.3 Changes in the vertical distribution of  $\text{NO}_2^-$  (a),  $\text{NO}_3^-$  (b),  $\text{NH}_4^+$  (c),  $\text{PO}_4^{3-}$  (d), and  $\text{SiO}_3^{2-}$  (e) in different thermal stratification periods

升。随着热分层结构稳定,库区水体的 $\text{NO}_2^-$ 及 $\text{NO}_3^-$ 变化范围增大。第1个温跃层及氧跃层范围内的 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 均呈现上升趋势。在DO极大值出现位置, $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 也达到极大值, $\text{NO}_2^-$ 及 $\text{NH}_4^+$ 略有增加后减少。在第2个氧

跃层范围内, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 均呈下降趋势。而 $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{NH}_4^+$ 在滞温层明显增大, $\text{NO}_2^-$ 含量也略有上升。进入热分层消退期,营养盐五参数的变化范围均增大,水体表层氧跃层中 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 呈上升趋势, $\text{NH}_4^+$ 呈下降趋势。在第2个温跃层出现位置, $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 及 $\text{SiO}_3^{2-}$ 不同程度减少, $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{PO}_4^{3-}$ 不同程度增加。

根据富营养化状态评价结果,万安库区表层水体的营养状态在混合期处贫营养级,在热分层形成期及热分层消退期皆处于中营养级,在热分层稳定期更是达到中度富营养化(表1)。库区水体的营养水平在热分层形成后显著提高,热分层时期较高的营养状态对DO的垂向分布规律存在很大影响(Jane et al,2021)。

## 2.2 不同热分层时期DO分层规律变化的影响因素

将热分层不同时期各分层水体的DO与环境因子进行相关性分析,结果见图4。混合期中,DO与水温、pH及浊度呈正相关,与电导率呈极显著负相关;叶绿素a与水温呈极显著负相关,与pH呈极显著正相关,但与浊度不存在显著相关性;pH与浊度呈极显著正相关。热分层形成期及稳定期的表层变温层及混合层中DO与环境因子的相关性结果类似:库区表层变温层的DO与水温、叶绿素a、电导率、pH及浊度皆呈极显著正相关,同时叶绿素a与浊度呈极显著正相关;2个时期的混合层中DO与水温、叶绿素a及电导率呈极显著负相关,而与pH呈极显著正相关;叶绿素a与浊度呈极显著正相关。在热分层形成期的第2个变温层中,DO与水温及pH呈极显著正相关,而与电导率呈极显著负相关;叶绿素a与pH及浊度呈极显著负相关,而pH与浊度呈极显著正相关。热分层稳定期的第2个变温层中DO与水温及浊度呈极显著正相关,与pH呈极显著负相关,同时与叶绿素a呈显著负相关。在热分层消退期,混合层DO与水温、叶绿素a及pH呈极显著正相关,与电导率及浊度呈极显著负相关;变温层中DO与水温及叶绿素a呈极显著正相关,与电导率、pH及浊度呈极显著负相关,滞温层DO浓度已降至0 mg/L。

水体热分层、浮游植物生物量及分布与浊度是影响DO变化的关键环境因子(图4)。为探究水体热分层对DO分层规律的影响,对万安库区氧跃层与温跃层的出现深度、厚度以及变化梯度进行线性拟合,混合期未出现温跃层故不纳入分析(图5)。氧跃层与温跃层在深度上存在极显著的正线性关系( $P<0.001$ ),在梯度上存在显著负线性关系( $P<0.05$ ),但在厚度上却不存在显著的线性关系。

表1 万安库区不同热分层时期 TLI 富营养化指数评价

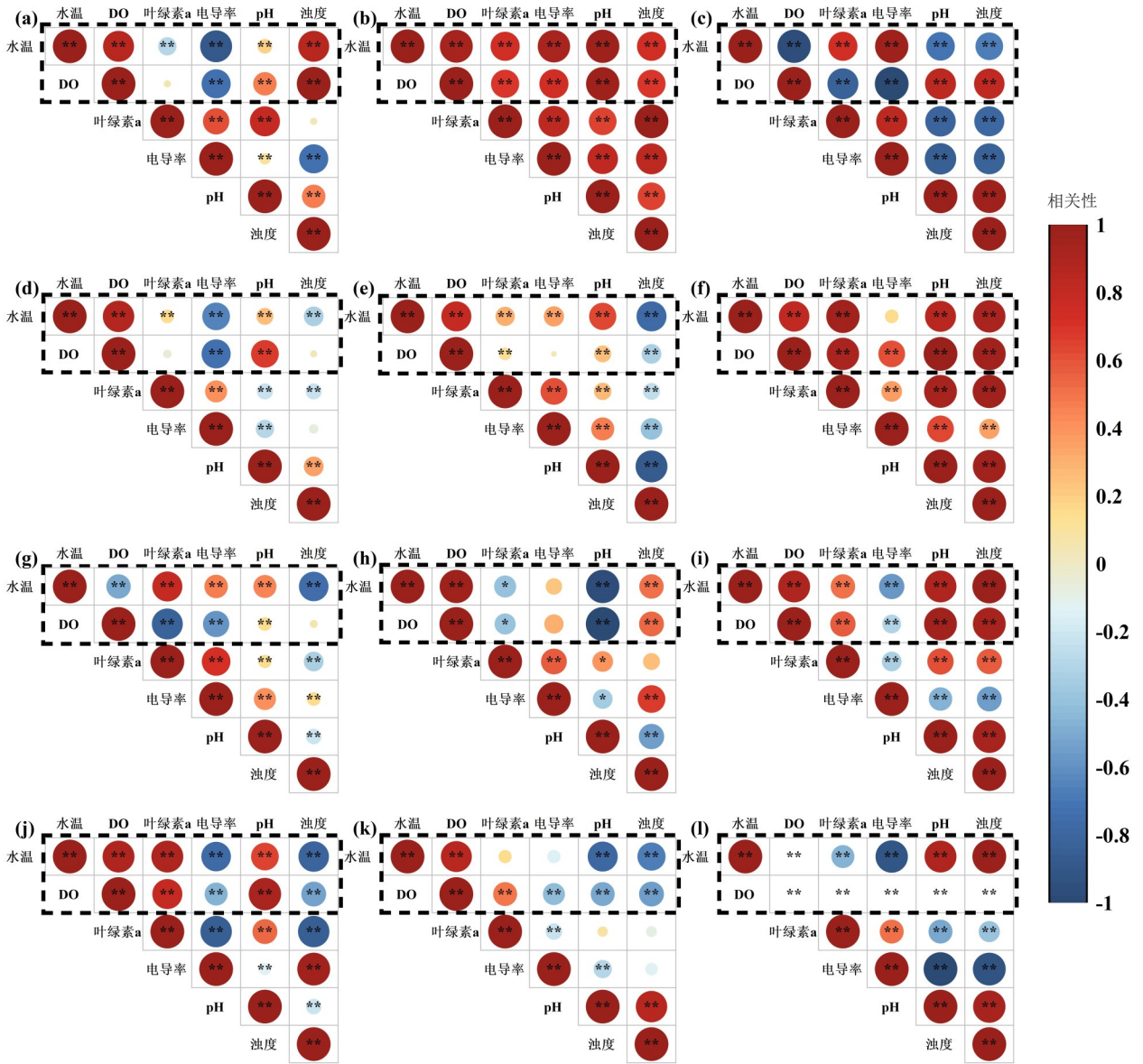
Tab.1 Eutrophication evaluation by the comprehensive nutrition state index(TLI) in different thermal stratification periods in Wan'an reservoir

热分层时期	参数					TLI 指数	评价结果
	叶绿素a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	透明度/m	COD <sub>Mn</sub> / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
混合期	6.90±0.16	0.41	0.023	2.30	0.013	10.95±0.07	贫营养
形成期	21.48±2.86	0.96±0.18	0.078±0.004	1.40	2.035±0.003	46.87±1.12	中营养
稳定期	7.41±1.03	4.62±0.03	0.162±0.002	0.45	9.967±1.358	62.61±1.12	中度富营养
消退期	6.91±0.90	0.99	0.080	1.70	1.284	40.87±0.40	中营养

注:参考《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规范》。

Note: Refer to "Eutrophication Evaluation Methods and Grading Technical Regulations of Lakes (Reservoirs)".

\* $P<0.05$  \*\* $P<0.01$



(a), 混合期; (b)~(e), 热分层形成期; (f)~(i), 热分层稳定期; (j)~(l), 热分层消退期

图4 各热分层时期不同分层理化因子的 Pearson 相关性

(a), the mixed period; (b)~(e), the formation period of thermal stratification; (f)~(i), the stable period of thermal stratification; (j)~(l), the thermal delamination subsided period

Fig.4 Pearson correlation of physicochemical factors for each thermal stratification period

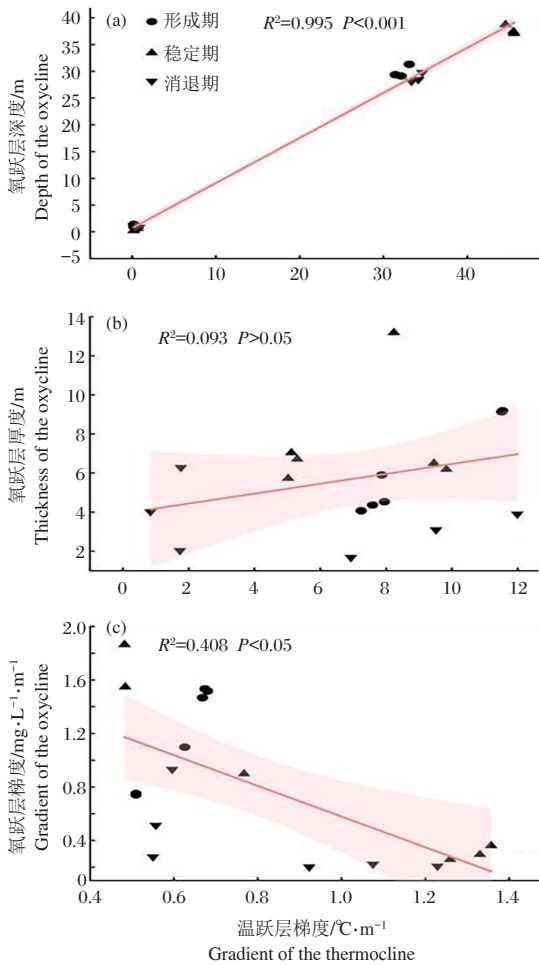


图 5 温跃层梯度与氧跃层深度(a)、厚度(b)及梯度(c)的回归关系

Fig.5 Regression between thermocline and oxycline depth (a), thickness (b) and gradient (c) at different thermal stratification periods

依据库区水体浊度的垂向变化特征及浮游植物分布特征,将0~5 m和5~10 m 水层叶绿素 a 浓度变化梯度与浊度进行线性拟合,发现两者存在极显著的正线性关系( $P<0.001$ ) (图 6)。其中,热分层形成期的水体平均浊度与叶绿素 a 浓度变化梯度的拟合关系较差,两者在混合期、热分层稳定期及消退期的拟合关系较好。

### 3 讨论

#### 3.1 混合期 DO 分层变化机制

在混合期影响水体 DO 变化的主要因素是浮游植物生物量。库区在混合期未出现热分层,尽管 DO 与水温呈极显著正相关,但水温不是影响 DO 变化的最主要因素。水体中浮游植物的光合作用消耗  $\text{CO}_2$ , 释放  $\text{O}_2$ , 氢离子浓度随之降低,从而导致 pH 上升。

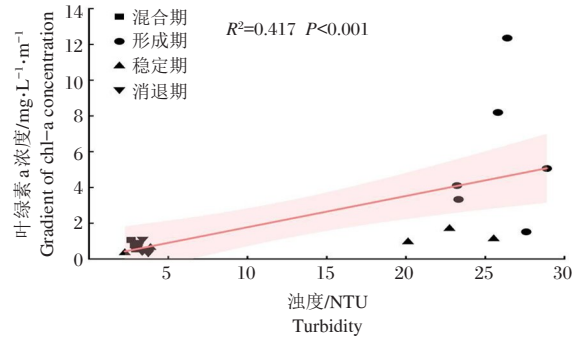


图 6 叶绿素 a 变化梯度与浊度的回归关系

Fig.6 Regression of chlorophyll-a gradients with turbidity at different thermal stratification periods

根据  $\text{CO}_2$  水解方程式:



当水体中的呼吸作用强于光合作用时,生物消耗  $\text{O}_2$  分解有机物质,产生  $\text{CO}_2$ , 氢离子浓度上升, pH 和 DO 随之降低(赵紫涵等,2020;郭诗君等,2021)。水体上层 DO 下降的主要原因是浮游植物生物量的减少, pH 的下降也证明了这一点。但在混合期贫营养及低水温的条件下,浮游植物生长受限制,故浮游植物生物量变化引起的 DO 下降梯度较小。库区在混合期未出现缺氧现象,并且 DO 浓度及浊度分布呈“上低下高”,同时滞温层在热分层消退期存在高营养水平及浊度,极可能是由于水库在上年的秋冬交际时(热分层消退期与混合期的过渡时期)发生“翻库现象”(吴丰昌等,2010)。

#### 3.2 不同热分层时期 DO 分层变化机制

在热分层时期,水体热分层是直接影响了 DO 分层规律的最主要因素,浮游植物、营养物质及有机物也是影响 DO 分层的重要因素,水体浊度间接影响了 DO 变化。水体热分层造成的密度分层是驱动 DO 分层的物理原动力,根据相关性分析结果及氧跃层与温跃层深度、厚度及变化梯度的线性拟合结果,库区水体热分层对 DO 垂向分层规律产生了显著影响,但同时也受到其他环境因素的影响,这与在密苏里州水库及中国千岛湖所发现的规律类似(Jones et al,2011; Zhang et al,2015)。

分层期间适宜的水温及高营养负荷使得浮游植物在表层大量繁殖,强烈的光合作用抵消了  $\text{O}_2$  溶解度因温度升高而降低的作用,表层的 DO 达到超饱和。但水体热分层阻碍 DO 向下补充,且浮游植物生物量下降削弱了光合作用,加以好氧条件下强烈的硝化反应及有机物质堆积分解耗氧驱动导致库区表层

水体在热分层期间出现了梯度变化大的温跃层与氧跃层(Yoshimizu et al,2010;Kreling et al,2017)。水体中的浮游植物趋向分布于光合有效辐射强的水层,而水体浊度影响光合有效辐射强度的衰减,进而影响浮游植物的分布及光合作用,并对DO垂向分层规律产生影响(唐诗等,2013;谷娇等,2016)。热分层形成期、稳定期及消退期间的水体浊度影响着浮游植物分布(Gallegos,2001;Obrador & Pretus,2008)。加之水体表层温跃层具有“兼上顾下”特殊的物化条件,浮游生物将自身定位在密度梯度大的空间中以便获得上下层水体的优异条件,因此表层温跃层因内、外源O<sub>2</sub>补充丰富,DO水平较高(Boehrer & Schultze,2008;Yang et al,2018)。

O<sub>2</sub>垂向梯度扩散受阻和局部原位消耗共同作用导致热分层形成期出现典型的温跃层DO极小值现象(MOM)。MOM位置的湍流扩散率随着水体密度分层强度的增加而降低,DO运输受垂向梯度约束(Kreling et al,2017)。另外,浮游植物生长繁殖需吸收NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,浮游植物生物量下降减少了对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的吸收利用(Tuantet et al,2014;Su et al,2019)。有机物质及死亡藻类分解消耗DO,已有研究证实变温层有机物质降解及藻类死亡分解对MOM的出现有着巨大贡献(Zhang et al,2015;Wentzky et al,2019);根据亚硝化反应(式②)及硝化反应(式③):



好氧条件下的硝化反应增强,氧跃层中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度增加,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>向NO<sub>2</sub><sup>-</sup>及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的转化过程消耗DO,DO的变化规律影响氮的转化行为,MOM在水层内形成氧化还原梯度,为这些过程提供了好氧-厌氧耦合等适宜的物化条件,加强生物竞争,进一步影响种群结构分布及氮循环过程(Elci,2008;Woolway et al,2014;Su et al,2019;Wentzky et al,2019)。强烈的DO分层甚至影响水体中CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的垂直分布以及扩散外流的强度和时,或许湖库成为温室气体排放的一个来源(McClure et al,2018)。

浮游植物分布趋势、随水温升高而降低的O<sub>2</sub>溶解度、水体热分层的阻碍等影响水体DO的内、外源补充,藻类死亡沉降分解、有机物质耗氧分解及NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的硝化反应进一步消耗O<sub>2</sub>,导致水库在热分层稳定期出现大范围缺氧水层,缺氧水层中水体的反硝化反应显著增强(Liljendahl-Nurminen et al,2008;Rice et al,2009)。DO极大值的出现是由于有机物质耗氧

分解削弱,且极大值出现位置因季节变化响应延迟故水层温度较低,仍保留着热分层加剧前较高的DO水平,故经好氧硝化产生较高水平的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。热分层消退期间库区表层因硝化反应及有机物质耗氧分解强烈,导致DO水平迅速下降(Blair et al,2013;Qu et al,2022)。库区在热分层消退期缺氧范围大、水体浊度低,浮游植物生物量在第2个温跃层及氧跃层位置突降,缺氧条件下水体反硝化作用显著增强,硝化作用减弱,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>在氧跃层富集(Cole & Pace,1998)。滞温层在热分层形成期、稳定期及消退期都出现大范围缺氧,温度上升加剧热分层,大气向水体的充氧和浮游植物光合作用产氧因水体分层阻碍运输及消耗而难以补充,藻类死亡沉降、有机物质堆积分解都使得滞温层的缺氧现象加剧,这对湖库深水层的生物及底栖生物的生存繁衍造成了巨大的风险,厌氧环境促进沉积物中的营养释放,进一步恶化水质(Bajer et al,2007;McClure et al,2018)(图7)。

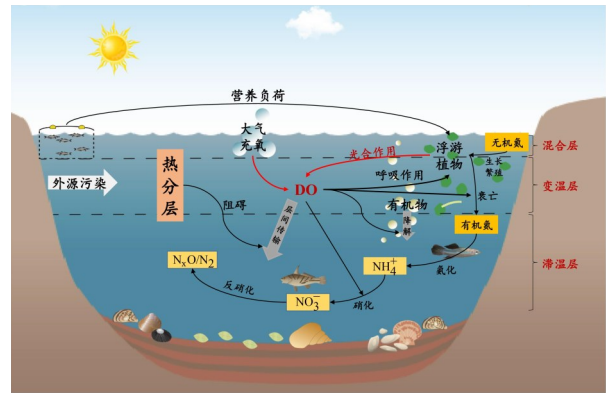


图7 库区DO垂向变化规律的影响机制

Fig.7 Mechanisms driving changes in the vertical distribution of DO in a deep reservoir

## 4 结论

(1)万安水库在2月为混合期,未出现缺氧现象;2-5月为热分层形成期,形成温跃层+混合层+温跃层+滞温层的4分层结构;5-8月为热分层稳定期,温跃层+混合层+温跃层+滞温层的4分层结构进一步稳固;10月为热分层消退期,形成混合层+变温层+滞温层的3分层结构。

(2)万安水库混合期的营养水平为贫营养,热分层形成期及消退期为中营养,热分层稳定期为中度富营养化。库区混合期表层DO变化受浮游植物分布影响的同时也受“翻库”现象影响。高光合速率能克服溶解度下降所带来的DO损失,故较高营养水平下水体DO的垂向分布规律受多因素耦合影响,热分层时



期 DO 变化的主导因素包括水体热分层、营养水平、污染状态及浮游植物生长分布。而水体浊度通过影响浮游植物的垂向分布,进而影响 DO 的垂向变化规律。

(3) 热分层形成期的水体在内源产氧减少和原位 DO 消耗驱动作用下发生 MOM。而水体热分层阻碍 DO 补充、内源产氧减弱是造成热分层稳定期水体上层大范围缺氧的主要因素。

(4) 库区在热分层形成期、稳定期及消退期皆出现滞温层缺氧现象,温度上升加剧热分层,DO 补充阻碍加大,大量水藻类死亡沉降、有机物质堆积分解使得滞温层的缺氧现象加剧。

### 参考文献

- 陈东,张丽旭,刘汉奇,等,2008. 长江口海域春夏季溶解氧分布特征及其相关因素分析[J]. 海洋环境科学,108(S1):49-53.
- 谷娇,宁晓雨,靳辉,等,2016. 沉积物再悬浮对浅水湖泊沉水植物光合作用及生长影响的研究进展[J]. 生态科学,35(1):200-208.
- 郭诗君,王小军,韩品磊,等,2021. 丹江口水库叶绿素 a 浓度的时空特征及影响因子分析[J]. 湖泊科学,33(2):366-376.
- 金相灿,1995. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社.
- 李秋华,商立海,高廷进,等,2013. 喀斯特高原深水水库一万峰湖富营养化特征分析[J]. 生态科学,32(2):194-199.
- 李艳红,成静清,夏丽丽,等,2013. 鄱阳湖区水体溶解氧现状及环境影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,372(10):122-125.
- 林炳明,2006. 万安水库银鱼资源调查与开发[J]. 中国水产,(7):74-75.
- 吕琳莉,李朝霞,崔崇雨,2018. 高原河流溶解氧变化规律研究[J]. 环境科学与技术,41(7):133-140.
- 唐诗,孙涛,沈小梅,等,2013. 水体浊度变化影响下的河口溶解氧系统动力学模型及应用[J]. 水利学报,44(11):1286-1294.
- 吴丰昌,金相灿,张润宇,等,2010. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学,22(1):1-7.
- 赵紫涵,宋贵生,赵亮,2020. 秦皇岛外海夏季溶解氧与 pH 的变化特征分析[J]. 海洋学报,42(10):144-154.
- 郑莹莹,刘树元,刘虹,等,2021. 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),36(2):359-370.
- Bajer P G, Millspaugh J J, Hayward R S, 2007. Application of discrete choice models to predict white crappie temperature selection in two Missouri impoundments[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 136(4):889-901.
- Blair J M, Ostrovsky I, Hicks B J, et al, 2013. Growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in warm-temperate lakes: implications for environmental change[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70(5):815-823.
- Boehrer B, Schultze M, 2008. Stratification of lakes[J]. Reviews of Geophysics, 46(2):RG2005.
- Borics G, Abonyi A, Varbiro G, et al, 2015. Lake stratification in the Carpathian basin and its interesting biological consequences[J]. Inland Waters, 5(2):173-186.
- Caliskan A, Elci S, 2009. Effects of Selective Withdrawal on Hydrodynamics of a Stratified Reservoir[J]. Water Resources Management, 23(7):1257-1273.
- Cole J J, Pace M L, 1998. Hydrologic variability of small, Northern Michigan lakes measured by the addition of tracers[J]. Ecosystems, 1(3):310-320.
- Demers E, Kalf J, 1993. A Simple-Model for predicting the date of spring stratification in temperate and subtropical lakes[J]. Limnology and Oceanography, 38(5):1077-1081.
- Diaz R, Rosenberg R, 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna[J]. Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev., 33:245-303.
- Elci S, 2008. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 9(2):135-142.
- Fernandez J E, Peeters F, Hofmann H, 2014. Importance of the Autumn Overturn and Anoxic Conditions in the Hypolimnion for the Annual Methane Emissions from a Temperate Lake[J]. Environmental Science & Technology, 48(13):7297-7304.
- Gallegos C L, 2001. Calculating optical water quality targets to restore and protect submersed aquatic vegetation: Overcoming problems in partitioning the diffuse attenuation coefficient for photosynthetically active radiation[J]. Estuaries, 24(3):381-397.
- Harke M J, Steffen M M, Gobler C J, et al, 2016. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp.[J]. Harmful Algae, 54:4-20.
- Houser J N, 2006. Water color affects the stratification, surface temperature, heat content, and mean epilimnetic irradiance of small lakes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 63(11):2447-2455.
- Huang T, 2016. Water Pollution and Water Quality Control of Selected Chinese Reservoir Basins[M]. Switzerland: Springer International Publishing.
- Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al, 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes[J]. Nature, 594:66-70.
- Jones J R, Knowlton M F, Obrecht D V, et al, 2011. Temperature and oxygen in Missouri reservoirs[J]. Lake and Reservoir Management, 27(2):173-182.
- Kosten S, Huszar V L M, Becares E, et al, 2012. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes[J]. Global Change Biology, 18(1):118-126.

- Kreling J, Bravidor J, Engelhardt C, et al, 2017. The importance of physical transport and oxygen consumption for the development of a metalimnetic oxygen minimum in a lake[J]. *Limnology and Oceanography*, 62(1):348–363.
- Liljendahl–Nurminen A, Horppila J, Lampert W, 2008. Physiological and visual refuges in a metalimnion: an experimental study of effects of clay turbidity and an oxygen minimum on fish predation[J]. *Freshwater Biology*, 53(5):945–951.
- Matzinger A, Muller B, Niederhauser P, et al, 2010. Hypolimnetic oxygen consumption by sediment–based reduced substances in former eutrophic lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 55(5):2073–2084.
- McClure R P, Hamre K D, Niederlehner B R, et al, 2018. Metalimnetic oxygen minima alter the vertical profiles of carbon dioxide and methane in a managed freshwater reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 636:610–620.
- Muller B, Bryant L D, Matzinger A, et al, 2012. Hypolimnetic Oxygen Depletion in Eutrophic Lakes[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(18):9964–9971.
- North R P, North R L, Livingstone D M, et al, 2014. 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*, 20(3):811–823.
- Obrador B, Pretus J L, 2008. Light regime and components of turbidity in a Mediterranean coastal lagoon[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(1):123–133.
- Qu L Y, He C, Wu Z T, et al, 2022. Hypolimnetic deoxygenation enhanced production and export of recalcitrant dissolved organic matter in a large stratified reservoir[J]. *Water Research*, 219:118537.
- Rice J, Sykes J, Barwick H, et al. 2009. The role of metalimnetic oxygen minimum zones in striped bass summer kills and forage fish entrainment: consequences and management implications[C]//139th Annual Meeting of the American Fisheries Society. Nashville: 121–145.
- Saito L, Johnson B M, Bartholow J, et al, 2001. Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web–energy transfer and water quality models[J]. *Ecosystems*, 4(2):105–125.
- Schindler D E, 2017. Warmer climate squeezes aquatic predators out of their preferred habitat[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(37):9764–9765.
- Singleton V L, Little J C, 2006. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems – A review[J]. *Environmental Science & Technology*, 40(24):7512–7520.
- Su X X, He Q, Mao Y F, et al, 2019. Dissolved oxygen stratification changes nitrogen speciation and transformation in a stratified lake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3):2898–2907.
- Torres E, Galvan L, Canovas C R, et al, 2016. Oxycline formation induced by Fe(II) oxidation in a water reservoir affected by acid mine drainage modeled using a 2D hydrodynamic and water quality model–CE–QUAL–W2[J]. *Science of the Total Environment*, 562:1–12.
- Tuantet K, Temmink H, Zeeman G, et al, 2014. Nutrient removal and microalgal biomass production on urine in a short light–path photobioreactor[J]. *Water Research*, 55:162–174.
- Wagner C, Adrian R, 2011. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale[J]. *Freshwater Biology*, 56(10):1949–1961.
- Wentzky V C, Frassl M A, Rinke K, et al, 2019. Metalimnetic oxygen minimum and the presence of *Planktothrix rubescens* in a low–nutrient drinking water reservoir[J]. *Water Research*, 148:208–218.
- Wilhelm S, Adrian R, 2008. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton[J]. *Freshwater Biology*, 53(2):226–237.
- Woolway R I, Maberly S C, Jones I D, et al. 2014. A novel method for estimating the onset of thermal stratification in lakes from surface water measurements[J]. *Water Resources Research*, 50(6):5131–5140.
- Woolway R I, Merchant C J, 2019. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change[J]. *Nature Geoscience*, 12(4):271–276.
- Yang Y, Wang Y, Zhang Z, et al, 2018. Diurnal and Seasonal Variations of Thermal Stratification and Vertical Mixing in a Shallow Fresh Water Lake[J]. *Journal of Meteorological Research*, 32(2):219–232.
- Yoshimizu C, Yoshiyama K, Tayasu I, et al, 2010. Vulnerability of a large monomictic lake (Lake Biwa) to warm winter event[J]. *Limnology*, 11(3):233–239.
- Yvon–Durocher G, Jones J I, Trimmer M, et al, 2010. Warming alters the metabolic balance of ecosystems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B–Biological Sciences*, 365(1549):2117–2126.
- Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, et al, 2015. 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*, 75:249–258.

## Stratification of Dissolved Oxygen in Deep Reservoirs: A Case Study of Wan'an Reservoir

CHEN Kan<sup>1</sup>, WANG Fei-fei<sup>1</sup>, RUAN Qi-zhen<sup>1</sup>, WU Xu-chun<sup>2</sup>, CAO Wen-zhi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, P.R. China;  
2. Kashiku River Basin Management Office, Kashgar Region, Kashgar 844000, P.R. China)

**Abstract:** Dissolved oxygen (DO) is a key indicator for evaluating the ecological condition and balance of an aquatic ecosystem. We explored DO stratification and mechanisms producing variations in DO in deep reservoirs, using Wan'an reservoir on Jiulong River as a case study. Depth profiles of physicochemical parameters and nutrients in Wan'an reservoir were recorded seasonally in February, May, August and October of 2022, and DO stratification patterns and influencing factors were analyzed. February was the mixing period of Wan'an reservoir, and the average vertical concentration of DO increased to a high of 6.70 mg/L. Changes in DO were driven by phytoplankton distribution and "reservoir turnover". Thermal stratification occurred in Wan'an reservoir during May, and the reservoir was in a mesotrophic state. In May, a local minimum DO at the thermocline appears as oxygen production by photosynthesis decreases and in-situ DO was consumed by microbial decomposition, leading to anoxic water below 36 m. August was the period of stable thermal stratification, and the reservoir was moderately eutrophic. The maximum DO concentration at the surface exceeded 12.00 mg/L because of high algal production. Thermal stratification hinders DO replenishment, and decomposition of settling nonviable algal cells consume DO, resulting in large-scale DO depletion during the period of stable thermal stratification. October was the period when thermal stratification weakened, and the reservoir was in a mesotrophic state, with an average vertical DO concentration of 0.77 mg/L, and anoxic water below 2.79 m. The vertical change in DO during thermal stratification was affected by thermal stratification, nutrient levels, pollution status, and the vertical distribution of phytoplankton growth. Thermal stratification produces a physical barrier that affects DO stratification, nutrient levels and pollution affect DO production and consumption mechanisms, and water turbidity affect the vertical distribution of the phytoplankton and, consequently, the DO concentration. In conclusion, we explored the mechanisms leading to anoxic conditions and the occurrence of a DO minima near the thermocline, and analyzed the relationship between changes in the vertical distribution of DO and nutrient biogeochemical cycles. Our research provides a scientific basis for maintaining a healthy aquatic ecosystem in Wan'an reservoir.

**Key words:** dissolved oxygen; thermal stratification; anoxic state; Wan'an reservoir