水　利　学　报

2019年8月　　SHUILI　XUEBAO　　第50卷　第8期

文章编号:0559-9350(2019)08-0990-09

分层湖库溶解氧时空特性研究进展

杜彦良，彭文启，刘　畅

（中国水利水电科学研究院，水环境研究所 北京　100038）

摘要：溶解氧(DO)是湖库水质管理的关键变量之一，对维持湖库生态系统平衡至关重要。受控于湖库生态、生物地球化学和物理过程的相互作用，湖库DO对气候、地理、富营养化、有机污染、水文及负荷的输入等环境压力反应敏感。随着监测技术的提高、实验分析的多样、模型工具的完善，溶解氧垂向分层机理研究也更加深入。分层湖库的表面温水层因大气复氧、光合作用等的影响DO饱和程度高，变温层DO与受透明度影响的浮游生物呼吸与光合作用、水平和表层等外部物质输入、有机物沉积过程分解等机制有关，DO垂向形态多样，其中变温层DO极小值广泛存在且成因复杂。滞温层缺氧与沉积物、初级生产力、外部输入湖库大小等有关，通过数据分析和模型手段，滞温层DO演变过程得到较好的解释。由于分层湖库影响DO时空分布的因素众多，个别因子或经验公式分析，很难对湖库DO现象做出全面精确的描述，基于机理及过程的数值模型是DO研究中必不可少的工具。针对分层湖库越来越普遍的缺氧现象，为水质和生态环境的改善提出合理的科学措施，提高水库管理，采用原位监测、经验参数、公式和数值模型等手段，揭示湖库溶解氧的演变机理，是需要继续深入研究的课题。

关键词：分层湖库；溶解氧时空变化；变温层溶解氧极小(MOM)；滞温层缺氧；湖库缺氧

中图分类号：X524　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20190147

湖库水体溶解氧(DO)是维系水生态安全的重要要素之一，同时DO几乎参与所有的水化学反应及水生物等相互作用过程，成为河湖水质管理的顶级评价指标。湖库中受水体的热力分层影响，溶解氧的呈现不同的分布。随着全球气候的变化，淡水水体营养水平升高的趋势下，大量的湖库中存在和海洋中类似的缺氧区[1]，并有加剧趋势。湖库底部低溶解氧导致底泥有毒物质释放[2]，直接威胁了鱼类、底栖生物等的生存和繁殖[3]，且改变食物链结构[4]，危害水生态系统的稳定和安全。National Ocean Service(USA)把DO<2 mg/L或DO饱和度低于30%的区域定义为海洋中的缺氧区(hypoxic)[5]，Ecological Society of America定义缺氧为DO<2～3 mg/L[6]。淡水湖库缺氧区的形成与发展和地理气象、水动力条件、营养状态等众多因素相关，为改善湖库的生态环境，实施可持续发展的湖库管理，分层湖库中的DO时空变化成为近年来研究的热点。

1　分层湖库的溶解氧垂向形态及发展

湖库分层水体由上至下为湖面温水层(epilimnion)、变温层(metalimnion)和下层滞温层(hypolimnion)。湖库分层形态与所在地理位置相关，不同纬度上年均辐射量、年内辐射量变化，及地球自传科氏力三个基本要素作用下，位于南北纬度0°～20°的湖泊分层的稳定性最低，南北纬度25°～40°稳定性大幅提高[7]。此外，湖泊的形态参数对分层也有影响，如表层面积与平均深度之比R(surface area to mean depth ratio)，也反映了蓄热能力，用以预测湖泊分层发生日期[8]。我国有水库宽深比判别水库水温是否分层。同时考虑湖库的水文情势的径流—库容法(α-β法)也常用于判别分层。水库下泄水量

收稿日期：2019-03-07

基金项目：国家自然科学基金项目(51861135314)；国家重点研发计划(2017YFC0405804，2016YFC0401701)

作者简介：杜彦良(1974-)，教授级高级工程师，博士。主要从事环境水力学研究。E-mail：duyl@iwhr.com

的不同深度的取水方式也影响水库热储量[9]。此外水色对分层也有影响[10]。DO的垂向分布在很大程度上依赖湖库的热分层格局[11-12]，湖库分层后，稳定的热分层一定程度上阻碍了上层温水与下层较冷水体的交换，在温跃层上下形成热/冷、氧化/还原的对立环境，环境差异对湖库水化学、物质循环过程以及水生生物生命活动产生较大的影响，变温层的密度的差促进了水化学指标与生物体的垂向分布的差异的形成，变温层高密度梯度区成为较为特殊的栖息环境，水中颗粒及浮游生物体存在于代表其密度水平的垂向高度上，许多浮游生物通常将自身定位在强密度梯度中的温跃层中，以获得水柱上下两层之间的优点[13]。Cantin[4]研究发现对应温跃层深度的变化，浮游动植物群落在垂向上也表现出结构变化。综上，水体的密度分层是DO浓度垂向形态的初始驱动。由于全球气温升高，湖库分层时间延长和分层稳定性增强[14-15]，DO的垂向结构也相应发生变化。

在《湖沼学》[16]中总结了分层湖库中的DO垂向分布形态两种模式。第一种模式多见于高纬度透明度高的贫营养型湖泊，DO的季节性变化小，湖下层在整个分层期都呈现DO饱和的状态，下层滞水层因水温低DO浓度比上层更高，如图1中的①艾特湖。第二个模式多见于富营养湖泊和腐殖质湖泊，这类湖泊由上层向下层输入较多的有机物，使得的滞温层DO沿水深浓度降低，底层远低于湖上层的DO浓度，有时甚至为0，见图1。图1中不仅呈现滞温层的DO减小模式，也呈现了变温层3种不同形态：(1)变温层DO极大值，如④；(2)变温层DO极小值(MOM)，如②③；(3)变温层DO由大及小的单向变化，如⑤。除了图1中形态，水体分层结构不同DO还可能有其他变化，如Mersebur-os矿湖中变温层DO增大，滞温层DO浓度较高且垂向均匀，最底部的矿化层DO几乎为0[13]。本文仅讨论淡水分层湖库的DO变化。

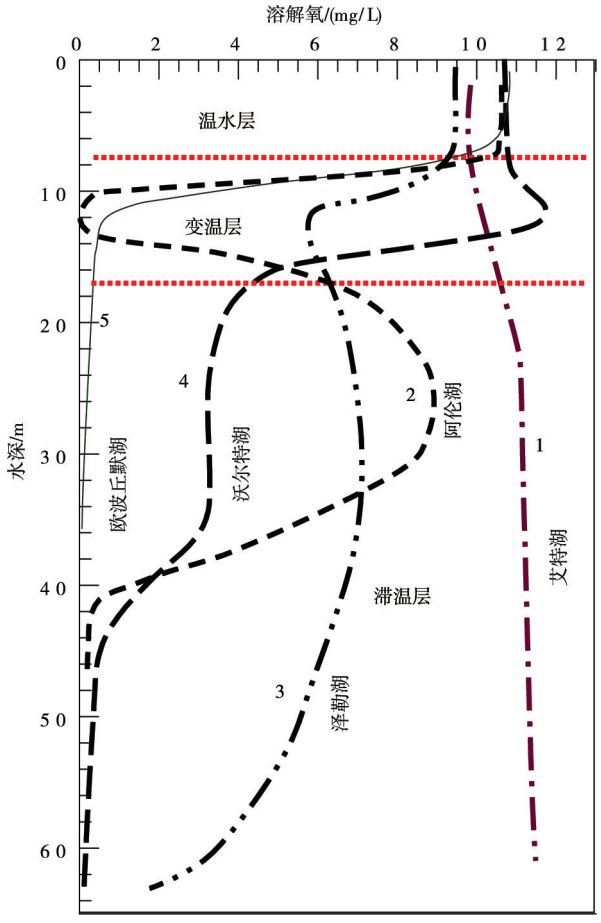

图1　欧洲5个夏末DO垂直剖面(1，3，4，5引自《湖沼学》，2引自Boehre[13])

湖泊DO变化过程受以下要素控制：(1)通过水汽界面的气体交换；(2)考虑分层结构的垂向和水平混合；(3)光合作用导致在水中DO浓度增加；(4)水生生物呼吸，有机物的细菌氧化、化学氧化并

通过其他还原无机物消耗DO；(5)沉积物及底栖生物耗氧[13]。非永久分层的湖库年内DO时空变化过程大致分几个阶段，春季DO浓度垂向较为均匀，春末夏初季水体开始温度及分层，表层水体受(1)(2)(3)(4)作用，DO较高，变温层受水体受(2)(3)(4)的作用，形态各异，滞温层受(2)(4)(5)作用，以耗氧为主兼有水平扩散，表层、变温层和滞温层DO浓度逐渐产生差异。进入秋冬季节分层现象逐渐减弱，随着垂向温度梯度变小，DO较高的表层水体下沉逐渐增强，水温的垂向差异逐渐变小，甚至逆转，称为“翻库”，翻湖(库)时间可通过经验公式进行预测[62]。冬春季随着水体的垂向掺混加强，自上而下地对湖库充氧，先是表层及变温层DO均匀掺混，而后向湖库底部发展，垂向DO分布逐渐均匀，在年内完成一个变化周期。这个循环过程在Rhodes[17]、Kreling[18]、马越[19]、董春颖[20]及Zhang[21]中不同季节的实测DO的垂向分布中展示，受纬度气象、形态、营养状态等多因子影响，可以看出DO开始分层及结束的时间存在差异。

在不同纬度上，从水动力角度对分层水库进行划分，有6种垂向循环类型的湖泊[22]，有不同垂向环流特性。Lewis[23]认为纬度带不仅影响水温结构同样影响着营养盐及浮游生物，在低纬度导致了较高的营养再生率，加速了营养循环、影响着营养和浮游等的时空分布，进而影响DO分布。在我国高纬度的北方双循环湖库通常有较高的DO垂向循环能力，低纬度的南方湖库DO垂向交换能力较弱，表现为，冬春季节北方湖库DO浓度垂向达到均匀的时间较早，而南方湖库的时间较迟。

2　变温层溶解氧变化

湖库水体密度分层过程驱动DO的分层及垂向变化。通常认为变温层溶氧极大值是由于水体透明度足够高，变温层藻类的光合作用产生了DO极大值[26-28]。Jones[24]对水库DO极大值现象分析得到极大值与平均塞氏盘深度呈强相关(r=0.74)。Wilinson[29]通过测定藻类光合作用生产的氧气，指出单光合作用的并不是变温层最大值形成的原因。Dubay[26]认为高浓度DO水流的输入也可能使得湖库变温层发生DO极大现象。

变温层溶氧极小现象在不同营养状态水平的湖库中均广泛存在。Jones[24]对密苏里州235个湖库的监测显示大部分DO剖面为变温层极小值，这些水库大多都是中营养或富营养状态[25]。在我国南方贫营养状态的千岛湖[21]及德国北部贫营养状态的Rappbode水库[34]在夏秋季均发生变温层极小现象。Rhodes等[17]通过1977—2010年超过30年德国康斯坦斯湖垂向TP浓度与DO变化，湖中TP平均浓度由0.08 mg/L逐渐下降至0.01 mg/L水平，在营养水平高的时段，变温层极小值现象不太显著，而到中营养和贫营养时段，湖区变温层的DO极小值却更为显著，即极小值变小。Rhodes解释为气候变暖作用的结果。

分层水体的变温层DO极小(metalimnetic oxygen minima，MOM)现象早在海洋中发现，海洋学家认为是表层温水层产生大量有机物质(藻类)，藻类有机物衰亡后在垂向沉降过程中被微生物分解，该过程的耗氧产生了MOM，也被称为“生物泵”作用[30]。与海洋相比，湖库水环境受外界的扰动大，如支流的物质、能量汇入、面源、沉积物释放等多要素作用，系统变化更为复杂，随着监测技术的提升，人们认识到绝大多数内陆分层湖库存在变温层极小现象，DO极小达到缺氧水平，将成为湖库生态安全的隐患。除了借鉴海洋中“生物泵”作用，湖泊学家还提出其他不同的假设，Shapiro[31]将早期的假设与现场观察和分析联系起来，提出变温层DO极小有三种可能的原因：(1)水平运输的中水柱上的悬浮有机物对氧气的吸收，(2)流过水体的低氧密度水流，和(3)从生物分解或呼吸中原位消耗氧气。Baker等[32]对Mead湖DO研究中考虑了Shapiro给出的可能原因，认为变温层DO极小是因为湖泊的生产力高，变温层中浮游生物的呼吸作用导致DO大量消耗。Zhang[21]在千岛湖的垂向监测结果显示，变温层处DO极小区域，有色可溶性有机物(CDOM)浓度也较高。Boehre[13]对Arendsee垂向监测剖面表明，变温层DO极小区域，C的浓度略高，解释为在变温层的高密度梯度捕获了悬浮有机颗粒，产生了MOM现象。Wentzky等[33]认为水库中的藻类是呼吸作用的耗氧超过光合作用的产氧导致MOM。

变温层密度梯度较高的区域，导致垂向上与其他水域的紊动强度存在差异，DO等水质变量的垂

向混合也不同。密度分层水体的垂向紊动混合系数研究通常基于实验室测量和经验公式计算[35-37]，Weck等[38]采用涡度相关技术(eddy correlation technique，EC)对德国两个湖泊的变温层的DO和浮力通量进行现场测量，EC测得的数值为紊动变量的时间平均值，从EC导出的反映DO的Prandtl数的紊动扩散率比用参数预测的数值大一个数量级。Kreling等[18]对德国Arendsee湖变温层极小DO研究中提出，基于局部区域的DO消耗解释MOM现象显然不够。在估算了DO在垂向上的输运作用后，得到MOM的发展不单单由当地增大的DO消耗率造成的，而是DO垂向梯度扩散和局部消耗的共同作用的结果。颗粒有机碳的向下通量促进了MOM的发展，同时变温层DO极小可能会增加浮游生物的呼吸作用，加速增光层的营养物循环，从而可能进一步刺激初级生产，DO形成与光合作用和呼吸作用存在相互反馈的机制。Bolke对Flaming Gorge水库研究中[39]，对浮游植物和悬浮物的进行分析后，确定它们不是MOM发生的主要原因。在夏末季节，入库河流经过库尾的沉积区域DO降低，且水温低于库区水面，入流水体某个深度水平通过水库，密度流的输运导致了变温层溶氧极小。美国Copco水库的研究报告[40]显示，一些时间段在变温层深度上水平输入了低DO水体，另些时间段，水平输入的密度流可对滞温层区域的DO进行补充。Williams[41]通过模型模拟，水库在变温层附近深度的取水会加剧MOM的发展。Gerling[42]对Falling Creek水库不同下泄流量的水质监测表明，大流量下泄时的MOM现象更为显著。

分层水库的温度梯度是变温层溶氧极小值形成的基本条件，除了影响水温分层的气象及地理因素，变温层中浮游动植物的呼吸作用、有机物浓度、水动力特性及水库调度方式等共同影响溶氧极小值的大小。

3　滞温层溶解氧变化

分层湖库底层低DO是较普遍的现象，美国北部的Erie湖夏季湖底缺氧甚至可追溯千年[43]。表层水体的光合作用产生氧气和有机物，部分有机物沉降到湖库底层，有机颗粒在下沉过程中被分解，并消耗底层水体DO含量，水体的热分层限制了表层对滞温层DO的补充，滞温层DO的消耗超过了其在水中的积累，会导致滞温层缺氧。滞温层的DO指示了滞温层厚度、温度及生产力[44]。湖库沉积物内源N、P营养盐是滞温层缺氧的重要因素之一[41]。1960年代和1970年代欧美很多分层湖库受富营养化、缺氧等环境问题所困扰，人们意识到必须加强水库的水质管理。生物有效磷(BAP)被认为是初级生产力的驱动力，措施上主要侧重于减少磷负荷。1970年代中期和1980年代初期，许多湖泊的磷浓度都有所下降，创造了许多成功的案例，但湖库中缺氧现象并未达到预期的改善效果[45]。

为研究湖滞温层DO变化，1920年代人们就关注到湖下层单位体积水体的氧气消耗速率，称为体积湖下层氧消耗速率(volumetric hypolimnetic oxygen depletion rate，VHOD)，这是指示非腐殖质湖泊表层水中营养盐负荷和初级生产力的有效指标。水生态系统中常常通过测定VHOD来预测水体是否会以及何时可能发生缺氧或厌氧。Hutchinson[16]提出面积湖下层氧消耗速率(areal hypolimnetic oxygen depletion rate，AHOD)，对湖泊的初级生产力有很好的指示作用。Matthews[46]通过1978—2002年Onondaga湖的垂向间隔1 m的DO数据，建立表层和底层的二层模型，计算得到滞温层DO垂向输入占系统的15%～37%，AHOD的减小与表层初级生产力和沉降到分解层的有机碳的减少相关。Matzinger[47]研究滞温层的DO，提出区域滞温层矿化耗氧速率(areal hypolimnetic mineralization rate，AHM)，单位同AHOD，计算得到80%以上的AHM是有机物(包括沉积物表面)降解以及10年之内沉积物层还原物质的释放。在较厚的滞温层(12 m)的湖泊，老沉积层对于AHM的贡献低。AHM和滞温层厚度正相关，滞温层耗氧量主要是由湖泊当前的生产力控制，人工复氧、混合、沉积物疏浚等技术性湖泊管理措施不能有效地降低沉积物还原物质的流量。Johns[48]认为尽管水库有外来有机物输入，但底部耗氧，滞温层内耗氧对滞温层DO影响较大，甚至超过其他来源的变量。Kreling[49]认为沉积是导致滞温层耗氧的主因。这些发现与来自世界各地的生产性湖泊的经验模一致[50-51]。

湖库滞温层DO的变化，与水动力学及调度方式相关，不同温度的水体流入，携带外部DO进入

不同的深度。Weber[52]通过模型研究得到，为改善水库低温水下泄，表层取水的方式也会进一步降低水库滞温层的DO水平。水库入流水量及下泄流量变化导致的水动力学变化也会对DO及水温垂向分布产生影响[41]。

全球气候变化增加了湖库热力分层的稳定性，稳定分层结构导致有限垂直氧气交换和滞温层持续的氧气消耗，进而导致底层缺氧的恶化，而通常通过湖库的冬季水温翻转（翻库）对底层DO的补充，在越来越温和的冬天，DO补充效率降低，湖库下层可能因垂向DO交换不足，而被耗尽[12,53]。Rhodes等[17]康斯坦斯湖经历了去营养过程，随着时间的推移，在50～100 m深度的滞温层的DO浓度变化不大。

滞温层DO浓度的变化主要受控于沉积物耗氧水平，同时水库的调度方式和湖库分层的稳定性也会影响湖库底部的滞温层DO浓度。

4　湖库缺氧研究

为保障鱼类群落健康，水体中DO需要维持在一定浓度范围内。对于缺氧耐受能力中等的鱼类，表层水DO必须在2～5 mg/L的水平或以上，而对于冷水种群以及不受CO_2和污染物胁迫、需氧量较大的温水性种群来说DO必须在5～9 mg/L的水平或以上[54]。Nuernberg[55]列出美国和加拿大的水库水质管理中，根据不同季节或水域的DO标准，大致范围为4.0～10.5 mg/L。20世纪人们发现在夏秋季节很多分层水库某些区域出现不同程度的缺氧现象，减小了鱼类可利用栖息地，提出相应的热-氧空间的损耗概念。分层湖库变温层及滞温层均会存在缺氧的现象，水体分层制约浮游动物日夜垂直迁移模式[57]，变温层缺氧将部分鱼类群落压缩到违背它们热偏好的滞温层，底部缺氧危害底栖生物及食物链结构，在极端情况下库区缺氧导致鱼类死亡率上升[58-61]。变温层缺氧对温室气体垂向分布也产生影响，导致了CH_4在变温层和CO_2在滞温层的积累[61]。面向水库的水质及生态管理实践中，人们同时关注水体开始缺氧的时间和持续时长。

Jones等[19]对1989—2007年期间每年5月至8月密苏里州的235个水库水温（个数n=7193）和溶解氧（n=6516）的垂直剖面分析，得到水体开始缺氧时刻通常是水域面积的函数，平均而言，一个10 000 hm^2的水库比10 hm^2的晚4周左右变成缺氧。营养状态变量（TP，Chl和Secchi）也表现出与缺氧的弱相关性（r<0.4，p<0.05），同时表明营养程度升高加速了缺氧的发生。Reckhow[63]在对55个分层湖库的研究后，提出基于湖泊形态、水文、和营养负荷的缺氧概率（P_{anox}）：

$$P_{anox}=1-\left[1\Big/\left(10^{5}z^{2.49}L_{ext}{}^{2}q_{s}^{-1.78}+1\right)\right] \tag{1}$$

式中：z为平均水深；q_s为年均流量；L_{ext}为年均外部的磷输入，该公式考虑了水深、流量和负荷量，可能会低估一些原始的贫营养水库的缺氧。Nurnberg[51]根据提出安大略湖附近的56个湖泊研究中提出了缺氧因子（AF），定义为：

$$AF=\left(\text{缺氧时长/缺氧沉积物面积}\right)\Big/A_0 \tag{2}$$

式中A_0为湖泊表面积。Nurnberg[55]提出考虑TP输入的AF计算公式：

$$AF=-36.2(5.2)+50.1(4.4)\log(TP)+0.762(0.196)z/A^{0.5} \tag{3}$$

式中：A为水库面积（km^2）；TP为总磷浓度（ug/L）。括号中数值为正负标准差。

5　湖库DO数值模拟

水体中DO是反映水质变化的基础变量，1925年的Streeter和Phelps建立的第一个S-P水质模型即计算河流中的DO和BOD浓度变化。随着计算技术的发展，水质的模型耦合水动力等模型向多维、多参数方向发展，众多知名且成熟的水质模型，如Delft3D、EFDC、MIKE、CE-QUAL-W2等，都可计算湖库水质及DO的时空变化[64]。

分层湖库的DO时空变化的一些机理问题仍在探讨中，为更精确模拟分层水体各层DO的变化，学者通常根据最新的研究成果，或引入新参数，或对模型进行二次开发，来对DO进行模拟。Matthews[40]建立表层和底层的二层模型计算滞温层DO浓度变化，Müller[45]模型中引入AHM参数，计算模拟了不同湖泊的滞温层DO的时空变化。Weber[51]采用GLM模型对水库的DO进行模拟。上述研究均为垂向一维模型。在对水库的水质及DO变化的模型研究中，垂向二维的CE-QUAL-W2模型对狭长形水库有较好运用[65-66]，前文提及Powell湖DO模拟[41]、美国Copco水库DO模拟[39]等。三维模EFDC模型也有广泛的应用[64,67]。Chen[68]采用三维模型耦合水射流模型和线性气泡羽流模型，模拟一个浅水富营养化水库中滞温层复氧对水温及DO结构的作用。驱动及影响湖库的DO分布变化的因素众多，很难从个别因子进行湖库水质演化分析，模型手段是研究水环境系统不可缺少的工具，多模型耦合模型研发也是研究的重点。

6 结语

在全球气候变化、水体富营养化等背景下，分层湖库的缺氧现象变得越来越普遍，且受到广泛关注。受气候、地理、富营养化、有机污染、水文及负荷的输入过程等环境压力的作用，湖库分层后DO在温水表层、变温层和滞温层中浓度形态发生变化。大气复氧、光合作用等的导致了温水表DO浓度较大，而变温层DO与浮游生物呼吸和光合作用、水平和表层等外部物质输入、有机物沉积过程分解、透明度等相关，DO垂向形态各异，其中变温层DO极小值广泛存在形成机理较为复杂。滞温层缺氧与沉积物、初级生产力、外部输入等相关，分层后通常表现为耗氧过程。影响分层湖库DO时空分布的因素众多，个别因子或经验公式分析，难以对湖库DO现象做出全面精确的描述，基于机理及过程的数值模型是DO研究中必不可少的工具。我国地域幅员辽阔，变温层和滞水层缺氧现象在大部分分层水库中普遍存在，但很多水库中深层DO的监测数据资料并不完备和充分，DO及其水生态系统的影响程度研究也有限，在湖库生态恢复和水环境管理中缺乏相关的技术支撑和参考依据。针对分层湖库的缺氧问题，为水质和生态环境的改善提出可行性措施，提高水库科学管理水平，运用原位监测、经验参数、公式分析和数值模型等手段，揭示湖库溶解氧的演变机理，是迫切需要开展的研究课题。

参 考 文 献：

[1] DIAZ R J. Overview of hypoxia around the world[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 275-281.

[2] SINGLETON V L, LITTLE J C. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems: a review[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(24): 7512-7520.

[3] POLLOCK M S, CLARKE L M J, DUBE M G. The effects of hypoxia on fishes: from ecological relevance to physiological effects[J]. Environmental Reviews, 2007, 15: 1-14.

[4] CANTIN A, BEISNER B E, GUNN J M, et al. Effects of thermocline deepening on lake plankton communities [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 68(2): 260-276.

[5] RABALAIS N, EUGENE T R, WISEMAN J. Hypoxia in the Gulf of Mexico a. k. a. "THE DEAD ZONE"[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 235-263.

[6] Ecological Society of America. Hypoxia[EB/OL]. (2012-12-01)[2012-12-01]. https://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2012/12/hypoxia.pdf

[7] LEWIS W M. Tropical limnology[J]. Annual Review Ecology Systematics, 1987, 18: 159-184.

[8] McGill Limnology Research Centre. A simple model for predicting the date of spring stratification in temperate and subtropical lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(5): 1077-1081.

[9] 郑铁刚，孙双科，柳海涛，等. 大型分层型水库下泄水温对取水高程敏感性分析研究[J]. 水利学报，2015, 46(6): 714-731.

[10] HOUSER J N. Water color affects the stratification, surface temperature, heat content, and mean epilimnetic irra-

diance of small lakes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2006, 63(11): 2447-2455.
[11] RAHMAN A, AL BAKRI D, FORD P, et al. Limnological characteristics, eutrophication and cyanobacterial blooms in an inland reservoir[J]. Australia Lakes and Reservoirs Research and management, 2005, 10(4): 211-220.
[12] YOSHIMIZU C, YOSHIYAMA K, TAYASU I, et al. Vulnerability of a large monomictic lake (Lake Biwa) to warm winter event[J]. Limnology, 2010, 11(3): 233-239.
[13] BOEHRER B, SCHULTZE M, Stratification of lakes[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 1-27.
[14] STAINSBY E, WINTER J, JARJANAZI H, et al Changes in the thermal stability of Lake Simcoe from 1980 to 2008[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37(1): 55-62.
[15] 张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 130-139.
[16] 卡尔夫. 湖沼学: 内陆水生态系统[M]. 古滨河, 刘正文, 李宽章, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2011.
[17] RHODES J, HETZENAUER H, FRASSL M A, et al. Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance[J]. Ambio, 2017, 46(5): 554-565.
[18] KRELING J, BRAVIDOR J, ENGELHARAT C, et al. The importance of physical transport and oxygen consumption for the development of a metalimnetic oxygen minimum in a lake[J]. Limnology and Oceanography, 2017, 62(1): 348-363.
[19] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 406-415.
[20] 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.
[21] ZHANG Y L. 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.
[22] 侯锡鹏. 湖泊研究的历史与湖泊分类[J]. 科技创新与应用, 2016, 9: 165-166.
[23] LEWIS W M. Tropical lakes: how latitude makes a difference[C]//Schiemer F, Boland KT, editors. Perspectives in tropical limnology. Amsterdam: SPB Academic Publishers, 1996.
[24] JONES J, KNOWLTON M, OBRECHT D V, et al. Temperature and oxygen in Missouri reservoirs[J]. Lake and Reservoir Management, 2011, 27(2): 173-182.
[25] JONES J, OBRECHT D V, PERKINS B D, et al. Nutrients, seston and transparency of Missouri reservoirs and oxbow lakes: an analysis of regional limnology[J]. Lake and Reservoir Management, 2008, 24: 155-180.
[26] DUBAY C I, SIMMONS G M. The Contribution of Macrophytes to metalimnetic oxygen maximum in a Montane, Oligotrophic Lake[J]. American Midland Naturalist, 1979, 101(1): 108-117.
[27] CORNETT R J, RIGLER F H. Decomposition of seston in Hypolimnion[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, 44(1): 146-151.
[28] FRIESE K, SCHULTZE M, BOEHRERB, et al. Ecological response of two hydro-morphological similar pre-dams to contrasting land-use in the Rappbode reservoir system (Germany)[J]. International Review of Hydrobiology, 2014, 99(5): 335-349.
[29] WIKINSON G M, COLE J J, PACEM L, et al. Physical and biological contributions to metalimnetic oxygen maxima in lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(1): 242-251.
[30] KARSTENSEN J, STRAMMA L, VISBECK M. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans[J]. Progress in Oceanography, 2008, 77: 331-350.
[31] SHAPIRO J. The cause of a metalimnetic minimum of dissolved oxygen[J]. Limnology and Oceanography, 1960, 5: 216-227.
[32] BAKER J R, DEACON J E, BURKE T A, et al. Limnological Aspects of Lake Mead, Nevada-Arizona[R]. Technical Report Recerc-77-9. Bureau of Reclamation, Denver, Co., 1977.
[33] WENTZKY V C, FRASSL M A, RINKE K, et al. Metalimnetic oxygen minimum and the presence of Planktothrix rubescens in a low-nutrient drinking water reservoir[J]. Water Research, 2019, 148: 208-218
[34] RINKE K, KUEHN B, BOCANIOV S, et al. Reservoirs as sentinels of catchments: the Rappbode reservoir observatory (Harz Mountains, Germany)[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(2): 523-536.
[35] SHIH L H, KOSEFF J R, IVEY G N, et al. Parameterization of turbulent fluxes and scales using homogeneous

sheared stably stratified turbulence simulations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 525: 193-214.
[36] BLUTEAU C E, JONES N L, IVEY G N. Estimating turbulent kinetic energy dissipation using the inertial subrange method in environmental flows[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2011, 9(7): 302-321
[37] BOUFFARD D, AND BOEGMAN L. A diapycnal diffusivity model for stratified environmental flows[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2013(61/62): 14-34 .
[38] WECK J, LORKE A. Mixing efficiency in the thermocline of lakes observed from eddy correlation flux measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122: 291-305.
[39] BOLKE E L. Dissolved-oxygen depletion and other effects of storing water in Flaming Gorge Reservoir, Wyoming and Utah[M]. U. S. Geological Survey Water Supply Paper, 1979: 20-58.
[40] MOBLEY ENGINEERING, WOLFFWARE, RESERVOIR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT INC. Reservoir Oxygenation Feasibility Evaluation Report Copco and Iron Gate Reservoirs[R]. Klamath Hydroelectric Project, 2008.
[41] WILLIAMS N T. Modeling Dissolved Oxygen in Lake Powell Using CE-QUAL-W2[D]. M. S. Thesis. Brigham Young University, Provo, UT, 2007.
[42] Gerling A B, Munger Z W, Doubek J P, et al. Whole-Catchment manipulations of internal and external loading reveal the sensitivity of a century-old reservoir to hypoxia[J]. Ecosystems, 2016, 19(3): 555-571.
[43] ZHOU Y, OBENOUR D R, SCAVIA D, et al. Spatial and temporal trends in Lake Erie hypoxia, 1987-2007 [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(2): 899-905.
[44] CHARLTON M N. Hypolimnion oxygen consumption in lake: discussion of productivity and morphometry effects [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(10): 1531-1539.
[45] MÜLLER B, BRYANT L D, MATZINGER A, et al. Hypolimnetic oxygen depletion in Eutrophic Lakes[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46: 9964-9971.
[46] MATTHEWS D A, AND EFFLER S W. Long-term changes in the areal hypolimnetic oxygen deficit (Ahod) of Onondaga Lake: Evidence of sediment feedback[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(1): 702-714.
[47] MATZINGER A, MÜLLER B, NIEDERHAUSER P, et al. Hypolimnetic oxygen consumption by sediment-based reduced substances in former eutrophic lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(5): 2073-2084.
[48] JONES J R, KNOWLTON M F, OBRECHT D V, et al. Role of contemporary and historic vegetation on nutrients in Missouri reservoirs: implication for developing nutrient criteria[J]. Lake and Reservoir Management, 2009, 25 (1): 111-118.
[49] KRELING J, BRAVIDOR J, MC GINNIS D F, et al. Physical controls of oxygen fluxes at pelagic and benthic oxyclines in a lake[J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59(5): 1637-1650.
[50] NÜRNBERG G K. Quantifying anoxia in lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(6): 1100-1111.
[51] NÜRNBERG G K. Quantified hypoxia and anoxia in lakes and reservoirs[J]. The Scientific World Journal. 2004, 4: 42-54.
[52] WEBER M, RINKE K, HIPSEY M R, et al. Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 96-105.
[53] LIVINGSTONE D M. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake[J]. Climatic Change, 2003, 57: 205-225.
[54] ALABASTER J S, LLOYD R. Water Quality Criteria for Freshwater Fish[M]. 2nd ed. London: Butterworths. 1982.
[55] NÜRNBERG G K. Quantification of oxygen depletion in lakes and reservoirs with the hypoxic factor[J]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18(4): 298-305.
[56] DE STASIO B T, HILL D K, KLEINHANS J M, et al. Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: physics, fish and plankton[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(5): 1136-1139.
[57] COUTANT C C. Striped bass, temperature, and dissolved oxygen: a speculative hypothesis for environmental risk [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1985, 114(1): 31-61.
[58] MATTHEWS W J, HILL L G, SCHELLHAASS S M. Depth distribution of striped bass and other fish in Lake Texoma (OklahomaTexas) during summer stratification [J]. Transactions of the American Fisheries Society,

1985, 114(1): 84-91.
[59] HAYWARD R S, AMOLD E. Temperature dependence of maximum daily consumption in white crappie: implications for fisheries management[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1996, 125(1): 132-138.
[60] BAJER P G, MILLSPAUGH J J, HAYWARD R S. Application of discrete choice models to predict White Crappie temperature selection in two Missouri impoundments[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136(13): 889-901.
[61] McCLURE R P, HAMRE K D, NIEDERLEHNER B R M, et al. Metalimnetic oxygen minima alter the vertical profiles of carbon dioxide and methane in a managed freshwater reservoir[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 610-620.
[62] NÜRNBERG G K. A simple model for predicting the date of ¨ fall turnover in thermally stratified lakes[J]. Limnolgy and Oceanography, 1988, 33(5): 1190-1195.
[63] RECKHOW K H. Empirical lake models for phosphorus: Development, applications, limitations and uncertainty [C]//Lake eco system modeling. Annual Arbor Science, 1977.
[64] 陈凯麟, 江春波. 地表水环境影响评价数值模拟方法及应用[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
[65] RANGEL-PERAZA J G, DE ANDA J, GONZALEZ F A, et al. Sensitivity and uncertainty analysis on water quality modelling of Aguamilpa reservoir[J]. J. Limnol., 2016, 75(S1): 81-92.
[66] SADEGHIAN A, CHAPRA S C, HUDSON J, et al. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a /algal biomass ratios[J]. Environmental Modelling and Software, 2018, 101: 73-85.
[67] JIN K R, JI Z G, JAMES T. Three dimensional water quality and SAV modeling of a large shallow lake[J]. Journal of Great Lakes Research, 2007, 33(1): 28-45.
[68] CHEN S, LEI C, CAREY C C, et al. A coupled three dimensional hydrodynamic model for predicting hypolimnetic oxygenation and epilimnetic mixing in a shallow eutrophic reservoir[J]. Water Resources Research, 2017, 53(1): 470-484.

A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs

DU Yanliang, PENG Wenqi, LIU Chang
(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Dissolved oxygen (DO), one of the key variables in water quality management, is essential for the ecosystem functioning of these lentic ecosystems. Due to the interactions of lakes, ecology, biogeochemistry and physical processes, DO reacts highly sensitive against environmental stressors like climate change, geography, eutrophication, organic pollution, and hydrology and loads process. With the improvement of monitoring technology, deeper data analysis, and modeling tools, the research on vertical delamination of dissolved oxygen has become more in-depth. The DO is high saturated in the epilimnion due to atmospheric oxygenation, photosynthesis, while metalimnetic oxygen is varying by respiration, photosynthesis, advection, vertical diffusion organic deposition and so on. Metalimnetic oxygen minima (MOM), a popular phenomenon in lentic systems, is more complicated and still no fully explained. The hypolimnetic DO depletion is related to sediments deposition, primary productivity, and income loads, and it is intensively studied and well predictable. Since the temporal and spatial distribution of DO is influenced by lots of factors in the stratified lentic system, it is difficult to make a full and accurate description of the DO phenomenon based on the individual factors or analysis or simple empirical formulas. Processes based numerical models are the indispensable tools for DO research. The hypoxia phenomena in stratified lentic water are more in response to the increasingly widespread hypoxia phenomena in stratified lentic system, the scientific measures and reasonable reservoir management should be put forward to improve the water quality and ecological functions. Applying the high-resolution monitoring technique, empirical methods and numerical models, the mechanism of oxygen dynamics is still a subject that needs further study.

Keywords: stratified lake or reservoir; dissolved oxygen dynamics; metalimnetic oxygen minimum (MOM); hypolimnetic oxygen depletion; hypoxia in lake or reservoir

(责任编辑: 杨 虹)