

综述

养殖池塘溶氧平衡与日最低值预报的研究概况
STUDY OUTLINE ON THE DIEL BALANCE OF DO AND THE
PREDICTION OF THE LOWEST DIURNAL DO IN MARICULTURE PONDS

徐宁 李德尚

(青岛海洋大学水产学院, 266003)

Xu Ning Li Deshang

(Ocean University of Qingdao, 266003)

关键词 养殖池塘, 溶氧, 平衡, 预报

KEY WORDS Aquaculture pond, Dissolved oxygen, Balance, Prediction

溶氧是养殖池塘水质管理中的一项重要指标。溶氧变化是水体理化性质和生物学过程的综合反映,也是养殖池塘生产性能的重要参数。系统地研究池塘溶氧变化规律,对基础和应用科学都十分重要,因而引起国内外学者的兴趣和高度重视,并有较多报道。本文仅对池塘溶氧平衡与预报研究概况进行综述。

养殖池塘的溶氧平衡

1 养殖池塘溶氧收支的组分

水中的氧气状况取决于氧的收入和支出的平衡。在一相对封闭的池塘中,氧的收入主要包括水生植物的光合作用和大气的溶解,氧的支出主要包括“水柱”呼吸、鱼类和其它养殖生物呼吸以及“底泥”呼吸。

浮游植物的光合作用是淡水养鱼池中氧的最有效和最经常的来源,占池塘溶氧收入的60-95%;大气溶解是池塘溶氧的重要补充,占溶氧收入的4.7-40%^[3,4]。不同研究者的结论差距较大,可能是由于使用增氧机和风速不同影响了大气扩散速率。

“水柱”呼吸是一个综合的耗氧过程,包括浮游细菌、浮游植物、浮游动物的呼吸以及细菌对溶解和悬浮有机物质的分解,是主要的耗氧组分。乌克兰中部的养鲤池塘中,“水柱”呼吸约消耗总氧量的50%^[2],无锡河埭口高产鱼池的水呼吸约占总耗氧量的70%^[4],江苏省高产鱼池的水呼吸约占72.0%^[3],而美国斑点叉尾鲴养殖池的水呼吸约占82%^[8]。同为淡水养鱼池塘,“水柱”呼吸在总耗氧量中所占比例仍差别较大,这是由于浮游生物丰度、养殖类型、放养密度等因素的影响。

鱼呼吸在总耗氧量中所占比例与鱼载量有密切关系。但即使在密养条件下,鱼类本身的呼吸并非耗氧的主要因子,不过占总耗氧量的5-22%^[2-4,8]。

“底泥”呼吸包括底栖生物群落的呼吸及细菌对沉积物有机质的分解,在总耗氧量中所占比例较低,约为3-10%^[3,4,8]。

海水池塘溶氧平衡的研究国内外报道较少。臧维玲等1990年-1991年测定了杭州湾畔中国对虾池溶解氧的收支状况^[5,6]。研究结果表明,对虾池中“水柱”呼吸也是主要的耗氧因素,占总耗氧量的58.2%-75.1%。

2 溶氧收支各组分的测定方法

关于池塘溶氧收支各组分的具体测定方法,国内外学者进行了很多研究,找到了一些比较成功的方法。光合作用产氧、水呼吸耗氧的测定一般采用黑白瓶测氧法,简便易行,结果可靠^[3,8,17]。

鱼呼吸耗氧率随其种类、个体大小、水温、溶氧水平而不同。Winberg 假定在 20~30℃ 范围内鱼呼吸耗氧率不随水温发生显著变化,研制了计算鱼呼吸的一般模式:

$$Y = 0.001W^{0.82}$$

式中:Y 为鱼耗氧率($\text{gO}_2/\text{fish}\cdot\text{h}$);W 为平均鱼重(g)^[19]。Thamforde 用该模式成功地计算了 *Nile tilapia* 和 *Oreochromis niloticus* 的呼吸耗氧^[18]。

Boyd 等对斑点叉尾鲴的呼吸($\text{Y}, \text{mgO}_2/\text{fish}\cdot\text{h}$)研制了多元回归模式:

$$\log_{10} Y = -0.999 - 0.000957W + 0.000006W^2 + 0.0327T - 0.0000087T^2 + 0.000003WT$$

式中:W 为平均鱼重(g);T 为水温($^{\circ}\text{C}$)^[8]。

Ross 等现场测定了 30℃ 下体重 15~200g 尼罗罗非鱼的呼吸率,研制了如下模式:

$$Y = 3.34 - 0.586X$$

式中:Y = $\log_{10}$ 呼吸率($\text{mgO}_2/\text{kg}\cdot\text{h}$);X = $\log_{10}$ 鱼体重(g)。温度对鱼呼吸的影响可用 Q_{10} 来校正, Q_{10} 值为 1.9 (Becker 和 Fishelson, 1990; Ross 和 Ross, 1983 年的平均值)。David Teichert - Coddington 等用此模式来计算尼罗罗非鱼的呼吸耗氧率^[17]。

臧维玲等研究了中国对虾的耗氧率与溶氧量的关系,得出如下关系:

$$V = 0.299 + 7.94 \times 10^{-2} \text{DO}$$

式中:V 为对虾耗氧率($\text{mgO}_2/\text{g}\cdot\text{h}$);DO 为溶氧量(mg/L)^[5,6]。运用这一关系式,只需代入溶氧浓度数据,即可算出中国对虾的耗氧率,十分简便。然而,研制该方程所用的实验虾是 8cm 左右的大虾,水温范围是 $32 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。由于不同规格的对虾,在不同的温度下耗氧率有显著差别,因而此方程的使用有较大局限性。

“底泥”呼吸耗氧的测定一直是一个难点。为此,国内外学者设计了各种实验方法,也取得一些进展。最早是苏联学者 $\text{M}\ddot{\text{u}}\text{er}$ 等用两个上端有盖的白铁筒插入池底,其中一个下端有底,作为对照,24 小时后比较两白铁筒中含氧量的差数,即为“底泥”耗氧量^[2],结果表明,“底泥”耗氧率为 $0.02 - 0.04 \text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 。Shapiro 和 Zur 改进了这一方法,用两对深色的 PVC 柱(每对包含一个实验柱、一个对照柱,柱内装满过滤水),现场测定了精养鲤鱼池的“底泥”呼吸耗氧率为 $54.2 \text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ^[16]。这一结果显然高于 $\text{M}\ddot{\text{u}}\text{er}$ 的测定结果,与测定方法、池塘底质有关。

Costa - Pierce 等提供了一种现场监测“底泥”呼吸的新方法^[10]。用一个不透光的有机玻璃罩,罩内装有电动搅水器、氧电极,可通过溶氧仪直接观测罩内溶氧的变化,进而推算出底泥和水柱总的耗氧率,扣除水柱耗氧率(同时用挂瓶法测定),即得出底泥耗氧率。测定结果表明,夏威夷淡水虾池沉积物呼吸率平均值为 $60 \text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{h}$,与 Shapiro 和 Zur 在精养鲤鱼池中的测定结果 $54.2 \text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 相近。然而,设计会因人为的搅动打破了上覆水原有的成层状态,而使耗氧率比实际情况有所增大。且长期测定过程中温度变化幅度较大,很难保证溶氧仪测定结果的准确性。

在国内,孙耀曾采用自行设计的现场模拟测定法,研究了不同养殖区域和养殖季节的虾塘底质总耗氧量及其变化规律^[1]。

实际上,底泥耗氧量在很大程度上依赖于溶解氧浓度:如果溶解氧浓度降低,耗氧率会明显下降。反之,如果周期性地搅动底泥,耗氧率会成倍地增加^[11]。此外,耗氧率与 PH 值、温度也有一定关系。因此,即使是同一池塘,在不同时间、不同条件下,底泥耗氧率也会有差别。将底泥呼吸视作恒量的处理方法过于简单,研究池塘溶氧平衡时,应该现场测定底泥耗氧,结果才会准确可信。

大气扩散作用引起的池塘得氧、失氧很难直接测定,一般采用间接方法来估计。可以近似地认为,浮游植物光合作用产氧量减去各种呼吸作用耗氧量所得的差值相当于大气扩散作用引起的溶氧得失。

淡水和海水表面的大气运输速率并无差异^[15]。但是,若使用人工充气设备,形成很多气泡时,氧通过气—水界面的运输在海水中比在淡水中快。海水中的气泡比淡水中的小,这可能是海水中氧运输速率快

的原因。由于风充气产生的气泡密度远小于人工充气产生的,可以假定风充气时淡水、海水的氧运输速率相等^[13]。

Schroeder 在几天无风的天气测定了大气扩散的平均值,Boyd 修改后编制了一个表格,列出了在不同的溶氧(黄昏时)饱和程度下,经过一夜后溶氧浓度因扩散作用而产生的改变值^[8]。

上述表格仅仅根据黄昏时的 DO 浓度来估计氧在空气与池水间的转移,并未考虑到风速的影响。Banks 和 Herrera 的函数关系式则表示了氧气运输系数与风速之间的关系^[7]:

$$KL = 0.0036(8.43W^{0.5} - 3.67W + 0.43W^2)$$

式中:KL 为氧气运输系数(m/h);W 为距池塘表面 10m 高处的夜间平均风速(m/s)。

溶氧扩散速率是氧气运输系数和池塘溶氧与饱和溶氧水平差值的函数:

$$DIF = KL(SAT(T) - DO) / PD$$

式中:DIF 为氧扩散速率($\text{mgO}_2/\text{L}\cdot\text{h}$);KL 为氧气运输系数(m/h);PD 为平均池塘深度(m);SAT(T)为水温为 TC 时的饱和溶氧水平(mgO_2/L);DO 为池塘溶氧浓度(mgO_2/L)^[12]。

由于方程要求 W 必须是距池塘表面 10m 高处的平均风速,可以使用下列关系式作校正(引自 Madenjian 所引 Schroeder 未发表的资料):

$$V_a/V_b = (a/b)^{1/7}$$

式中: V_a 为 a 高度处风速; V_b 为 b 高度处风速。

Banks 和 Herrera 的计算氧运输系数的方程是针对湖泊研制的^[8],风速通常大于养殖池塘中通常遇到的情况。Boyd 等研制了一种适用于养殖池塘的计算氧扩散速率的模式^[9]:

$$WRR = 0.92(0.017X - 0.014)(C_s - C_p)1.024^{T-20}$$

式中:WRR 为氧扩散速率($\text{gO}_2/\text{m}^2\cdot\text{h}$),X 为 3m 高处的风速(m/s); C_s 为饱和溶氧浓度(g/m^3); C_p 为池塘 DO 浓度(g/m^3);T 为水温($^{\circ}\text{C}$)。

养殖池塘的溶氧预报

养殖池塘溶氧在午后达到最高值,而在黎明前降至最低值。从实用的角度出发,了解夜间池塘溶氧的动态,可以预测黎明时的溶氧浓度,据此可以确定是否需要采取防止缺氧的相应措施。根据预测结果,养殖者可以仅在需要的时候采取这类措施,做到既可以避免泛池的发生,又可以减少不必要的费用。

通过对池塘溶氧昼夜变化的观察,很多研究者发现夜间池塘溶氧的降低基本上呈线性。据此,Boyd 设计出一种简便方法用以预报次日黎明的溶氧浓度,即在黄昏时和黄昏后 2-3 小时分别测定池塘的溶氧浓度(DO),在 DO-t(时间)坐标系中描出这两点,通过两点确定一条直线,将直线延伸即可估计夜间到黎明期间其他时间的 DO 值。Boyd 使用这一方法成功地预报了斑点叉尾鲷池塘的黎明 DO^[8]。

然而,Madenjian 发现,Boyd 提供的直线外推法(The linear extrapolation method)不能很好地预报夏威夷罗氏沼虾黎明 DO。该作者因而将直线外推法作了改进,设计出对数直线外推技术(The log-linear extrapolation technique)。该法将两个 DO 的对数值(黄昏及黄昏后数小时)取对数,对时间作图,过两点作一直线,即可找到黎明时 DO 的对数值,取反对数得到黎明 DO 的预测值。实验证明,与直线外推法比较,用对数直线外推技术预报夏威夷罗氏沼虾黎明 DO 更为准确^[12]。

直线外推法和对数直线外推技术均未考虑风速对于夜间池塘 DO 变化的影响。实验证明,当风速较小时,对数直线法预报效果较好^[12]。而当风速较大时,扩散效应将会加强,溶氧时间曲线的弯曲程度将会受风速影响。假定黄昏时 DO 是超饱和状态,当风速很大时,DO 气很快降到饱和水平,溶氧一时间曲线显示出陡峭的下降;当 DO 低于饱和水平时,由于风速很大,DO 不会下降很快。因此,当风速很大时,夜间溶氧一时间曲线将不再是简单的线性下降趋势。如果将扩散作用作为风速的函数纳入黎明 DO 预报模式,预报效果可能比对数直线外推法更好。

Boyd 等研制出预报斑点叉尾鲷池塘夜间 DO 下降的计算机模拟模式^[8]:

$$DO_t = DO_{dusk} \pm DO_{df} - DO_f - DO_m - DO_p$$

式中: DO_t 为天黑 t 小时后的 DO; DO_{dusk} 为黄昏时的 DO; DO_{df} 为扩散引起的 DO 得失; DO_f 为鱼呼吸耗氧; DO_m 为底泥呼吸耗氧; DO_p 为浮游生物群落呼吸耗氧。

这一模式成功地预测了斑点叉尾鮰池塘夜间 DO 的变化, Boyd 将模式的成功归因于浮游生物群落呼吸在 DO 消耗中占相当大的比例, 而计算浮游生物呼吸的方法是准确可靠的, 各耗氧组分在夜间 DO 降低中所占比例为: DO_p 82%, DO_f 9%, DO_m 5%, DO_{df} 4%^[8]。

Boyd 模式比较全面地反映了影响夜间 DO 变化的各个因素, 如果能够估算出各组分的量值, 应该可以准确地预测池塘黎明的 DO 值。然而, 逐项求解各项呼吸组分耗氧量的过程相当复杂, 非专业人员很难掌握。Olah 模式和 WPRD 模式则提供了计算池塘夜间溶氧变化率的近似方法。这两种模式均可划分为呼吸组分和扩散组分, 它们的区别在于对全池呼吸组分的计算方法不同。在 Olah 模式中, 全池呼吸率仅与 DO 水平有关, 而在 WPRD 模式中, 全池呼吸率与水温有关^[14]。

WPRD 模型(全池呼吸-扩散模型):

$$\frac{d(DO)}{dt} = -Ce^{kt} + \frac{KL}{PD}(SAT(T, S) - DO); KL = 0.0036(8.43W^{0.5} - 3.67W + 0.43W^2)$$

式中: C 为呼吸系数($mgO_2/L \cdot h$); k 为呼吸随水温的瞬时增长率($^{\circ}C^{-1}$)。其中 k 由恒温下所作的室内呼吸试验得出其估计值为 0.0542。呼吸系数 C 的估计通过计算平均呼吸率(r)和平均温度而求得。

Olah 模式:

$$\frac{d(DO)}{dt} = -R(DO) + \frac{KL}{PD}(SAT(T, S) - DO)$$

式中: R 为 Olah 呼吸系数(h^{-1}); $d(DO)/dt$ 为池塘溶氧浓度随时间的变化率($mgO_2/L \cdot h$); KL 为氧气运输系数(m/h); PD 为平均池塘深度(m); S 为盐度(g/kg); $SAT(T, S)$ 为在水温为 $T^{\circ}C$ 、盐度为 S 时的饱和溶氧水平(mgO_2/L)。将 Olah 模型拟合黄昏及黄昏后 3 小时 DO 观测值, 可以估计出 Olah 呼吸系数 R 。

为查明究竟哪种计算方法更为准确, Madenjian 监测了海水虾(*Panaeus Vannarnei* 和 *P. monodon*)池夜间的 DO、水温和风速, 实验结果表明, Olah 模式经常偏离观测值, 而 WPRD 模式更接近观测值^[14]。因此, 夜间池塘系统的呼吸率与水温相关性更强一些。

将全池呼吸率作为一个整体的处理方式是粗糙的。然而, 目前尚未找到一种计算浮游生物呼吸的准确而简便的方法, 也未找到计算“底泥”呼吸的可靠而简单的方法。直接计算全池呼吸率是预测溶氧变化率的捷径。

已有的预报黎明 DO 的方法都是在一定的实验条件下研制出来, 经实验证明在一定范围内是有效的。由于地理条件、天气状况、池塘情况、养殖类型千差万别, 并非所有的预报方法都能普遍适用。在使用这些方法时应该因地制宜, 将已有的成果结合具体实际, 经过适当的修改和验证之后求出切实可行的预报方法。

参 考 文 献

- [1] 孙耀, 1996. 虾塘底质的总耗氧量及其季节变化. 应用生态学报, 7(1): 110-112.
- [2] 何志辉, 1966. 苏联密养鱼池氧的昼夜平衡的研究. 国外水产, (1): 36-39.
- [3] 姚宏禄, 1988. 综合养鱼高产池塘的溶氧变化周期. 水生生物学报, 12(3): 199-211.
- [4] 雷衍之等, 1983. 无锡市河埭口高产鱼池水质研究 I 水化学和初级生产力. 水产学报, 7(3): 185-199.
- [5] 臧维玲等, 1992. 中国对虾瞬时耗氧速率与海水比重及溶氧水平的相关. 水产科技情报, 19(4): 100-103.
- [6] 臧维玲等, 1995. 中国对虾溶解氧的收支平衡状态. 海洋学报, 17(4): 137-141.
- [7] Banks, R. B. & Herrera, F. F., 1977. Effect of wind and rain on surface reaeration. ASCE, EE3: 489-504.
- [8] Boyd, C. E., 1978. Predicting early morning dissolved oxygen concentration in channel catfish ponds. Trans. Am. Fish. Soc.,

- 107: 484 - 492.
- [9] Boyd, C.E. et al., 1992. Relationship between wind speed and reeration in small aquaculture ponds. *Aquacult. Eng.*, 11: 121 - 131.
- [10] Costa - pierce, B.A. et al., 1984. Correlation of in situ respiration rates and microbial biomass in prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) ponds. *Aqua.*, 37: 157 - 168.
- [11] Chung, W.Y.B. et al., 1988. Dynamics of dissolved oxygen and vertical circulation in fish ponds. *Aqua.*, 74: 263 - 276.
- [12] Mackenjian, C.P. et al., 1987. a. Predicting nighttime dissolved oxygen loss in prawn ponds of Hawaii; Part I. Evaluation of traditional methods. *Aquacult. Eng.*, 6: 191 - 208. b. Predicting nighttime dissolved oxygen loss in prawn ponds of Hawaii; Part II. A new method. *Aquacult. Eng.*, 6: 209 - 225.
- [13] Mackenjian, C.P. et al., 1988. Predicting nighttime dissolved oxygen loss in aquaculture ponds. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47: 1842 - 1847.
- [14] Mackenjian, C.P., 1990. Nighttime pond respiration rate: oxygen or temperature dependent? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47: 180 - 183.
- [15] Merdicat, L. & L. Menercy, 1983. Gas exchange across an air - water interface: experimental results and modeling of bubble contribution to transfer. *J. Geophys. Res.*, 88: 707 - 724.
- [16] Shapiro, J. and Zur, O., 1981. A simple in situ method for measuring benthic respiration. *Water Res.*, 15: 283 - 285.
- [17] Teichert - Coddington, et al., 1993. Comparison of two techniques for determining community respiration in tropical fish ponds. *Aqua.*, 114: 41 - 50.
- [18] Thomsforde., 1991. Evaluation of a simulation model for predicting early morning oxygen depletion in tropical brackishwater tilapia ponds. *Asian Fisheries Science*, 4: 253 - 261.
- [19] Winberg, G., 1956. Rate of metabolism and food requirements of fishes. Fisheries Research Board of Canada.