

罗渊明, 卢泽民, 朱咏莉. 机械扰动富营养水体溶解氧推动力及其数值模拟[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 379–382.

机械扰动富营养水体溶解氧推动力及其数值模拟

罗渊明, 卢泽民, 朱咏莉

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏镇江 212013)

摘要:选取 3 种结构相似、倾角和盘面比不同的机械扰动桨叶, 安装在 3 个体积、初始状态相同的试验水池中, 在相同的工况下研究其溶氧量和动力学情况。经过 47 d 后, 试验水池的溶氧量相对稳定, 稳定后的表层溶氧量平均为 6.4、7.1、9.6 mg/L, 底层溶氧量平均为 6.2、6.9、9.5 mg/L; 空白水池的表层和底层溶氧量为 5.6、5.3 mg/L。应用 Fluent 软件对水体运动状态进行数值模拟, 并用流速仪进行验证。结果表明, 溶解氧的推动力来源于富氧水和贫氧水的相互交换, 交换速度越快的桨叶获得的溶解氧越多。

关键词:机械扰动; 富营养化; 溶解氧; 推动力; 数值模拟

中图分类号:TP725; X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2013)09-0379-04

溶氧量是反映水质情况的重要指标, 水生动植物和好氧微生物须在溶氧量适宜的情况下才能生存。水体富营养化状态下, 由于藻类暴发生长导致水体溶氧量过低, 水中的水生生物发生呼吸困难, 甚至死亡, 同时厌氧菌繁殖, 有机物因腐败而使水体变黑、发臭, 影响生态环境, 破坏生态平衡; 同时, 对水产养殖、旅游业、人体健康具有危害^[1-2]。水体富营养化治理是一个难题, 目前改善的方法有物理、化学、生物 3 种方法, 物理方法包括底泥疏浚、人工增氧、加速水体循环^[3]等; 化学方法包括化学药品杀藻、凝聚沉降^[4]等; 生物方法包括放养

食用藻类的水生动物^[5]、人工湿地处理技术^[6]等。就物理方法来说, García 等在高藻塘中应用桨叶轮来提高塘内氧的浓度, 促进有益微生物的生长, 改善水体富营养化^[7]。饶勇等通过底层曝气和机械扰动进行试验, 结果表明, 这 2 种方式均能够增加水体中溶氧量, 降低水中氮、磷、COD 含量, 且溶氧量越高, 富营养化改善效果越明显^[8]。与大功率曝气和机械增氧 ($>5 \text{ kW/hm}^2$) 不同的是, 以上方法输入功率极低 ($<0.2 \text{ kW/hm}^2$), 理论上是通过水体缓慢运动, 将水体底层贫氧水和表层富氧水进行交换, 达到增氧的目的, 但溶氧量和水体运动关系不确切。蒋文清研究了流速对水体富营养化的影响, 初步验证了发生富营养化的临界流速的存在, 高于或低于临界流速都不会发生水体富营养化, 但同样没有研究溶氧量和水体运动的关系^[9]。依据双膜理论^[10], 空气和水两相接触, 接触面附近存在气膜和液膜, 氧以分子扩散的形式通过两膜产生溶解氧, 其含量高低取决于分子扩散速度。溶氧量推动力使可溶组分和溶液之间形成分压差, 同时使滞留膜的厚

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40901112)。

作者简介: 罗渊明 (1988—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事农业生物环境与能源工程研究。E-mail: may163456@163.com。

通信作者: 卢泽民, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业工程装备研究。E-mail: luzm@uj.s.edu.cn。

4 结语

本设计构建了一种通过 Android 手机软件对温室环境远程监控的方案, 使用 NXP 最新嵌入式 LPC4350 开发板, 移植 Linux 2.6.36 操作系统, 借助 3G 网络强大的无线数据传输能力, 进一步解决了温室远程监控无线数据传输量小的问题。实践表明, 客户端软件与核心模块数据交换可靠; 客户端界面操作方便, 获取温室环境信息实时性好, 视频信息清晰, 发出控制指令后温室内设备运行正常, 温室环境参数可被调控, 且应用在 Android 系统上的客户端软件易于推广。本设计提高了用户对温室环境变化控制的实时性, 有利于实现温室无人值守的目标, 促进了智能化温室发展。同时此方案可作为物联网远程监控发展的一部分, 被运用于现代设施农业的其他领域。

参考文献:

[1] 李莉, 张彦娥, 汪懋华, 等. 现代通信技术在温室中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 195–200.

[2] 杜尚丰, 李迎霞, 马承伟, 等. 中国温室环境控制硬件系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 7–12.

[3] 左志宇, 毛罕平, 李俊. 基于 Internet 温室环境控制系统研究设计[J]. 农机化研究, 2003, 4(4): 104–107.

[4] 赵伟, 孙忠富, 杜克明, 等. 基于 GPRS 和 WEB 的温室远程自动控制系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2010, 26(31): 20–22, 11.

[5] 仲元昌, 王靖欣, 胡江坤, 等. Android 内核移植及在远程监控中的应用[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2011, 25(1): 102–106.

[6] 张晓东, 李秀娟, 张杰. 基于 ARM 的嵌入式远程监控系统设计[J]. 现代电子技术, 2008, 31(6): 22–23.

[7] 劳风丹, 余礼根, 滕光辉, 等. 设施农业 3G + VPN 远程监控系统的设计与实现[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 155–159.

[8] 曾桂根, 吴霜. 基于嵌入式 Linux 的 3G 接入方案的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(9): 193–196, 200.

[9] Song X Q, Zhou D S. Development and research of application based on android platform[J]. Software Guide, 2011, 10(2): 104.

[10] 耿东久, 索岳, 陈渝, 等. 基于 Android 手机的远程访问和控制系统[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 559–561, 571.

度变薄,推动力越大,滞留膜越薄,从而使氧气能够更好地通过气膜和液膜,向水中扩散,提高水体的溶氧量。目前的研究只限于证明提高溶氧量能够改善水体富营养化,或者水体运动状态和水体富营养化有关,但水体运动的产生及其对溶氧量的影响研究不够。本研究以机械扰动桨作为溶氧量推动力来源,选取 3 种结构相似、倾角和盘面比不同的机械扰动桨进行溶氧量试验,并用 Fluent 模拟其作用后的水体运动状况,以揭示水体运动和溶氧量的关系,为选择提高溶氧量的方法、机械扰动桨的优化和放大提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验对象和方法

试验对象为 4 个室外试验水池,尺寸均为 3 000 mm × 2 000 mm × 2 000 mm,水深保持 1 400 mm,3 个试验池安装机械扰动装置,1 个为空白对照池,试验用水为自来水,加入磷酸二氢钾和尿素溶液,模拟成磷浓度 6.7 mg/L、氮浓度 89 mg/L 的受污染水体。

机械扰动装置连续运转,每天定时测量各水池的溶氧量,自然条件下,环境条件如气温、气压等对溶氧量均有影响,一天中的不同时间段溶氧量也有差异,定时测量可以减少环境影响导致的偏差。测点距离池面分别为 200 mm(代表表层)和 1 000 mm(代表底层),时间周期为 2012 年 7—9 月,共计 54 d,并于试验后期水池水流运动稳定后测量其速度,用于流体运动速度计算的校验^[11]。试验仪器包括 JPB-607A 便携式溶解氧测定仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)、LS-CM1 型便携式流速测算仪(南京圣荣仪器设备有限公司)。

1.2 机械扰动装置

机械扰动装置由电机、扰动桨和导流筒组成,其工作原理是:扰动桨将底层贫氧水提升上来,与表层富氧水进行交换,并产生表层富氧水往底层、底层贫氧水往表层的循环运动,达到水体增氧、溶氧均衡的作用。机械扰动装置简图如图 1 所示,选择电机功率 70 W,转速 60 r/min。扰动桨结构形式如图 2 所示,参数如表 1 所示,差异在于桨叶倾斜角和盘面比。桨叶的盘面比越大,桨叶越宽。

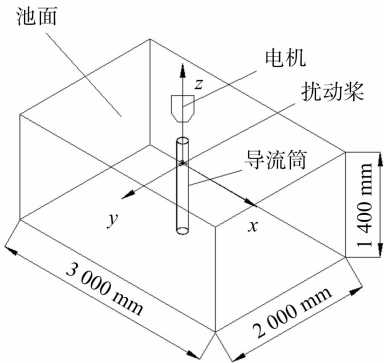


图1 机械扰动装置

2 结果与分析

2.1 试验结果

连续测量 54 d 的溶氧量,测得的结果如图 3 所示,其中



图2 机械扰动桨示意图

表 1 扰动桨结构参数

扰动桨	桨叶倾斜角 (°)	盘面比	桨叶直径 (mm)
1#	45	0.416 : 1	120
2#	45	0.618 : 1	120
3#	55	0.618 : 1	120

图 3-a 为水池表层测量值、图 3-b 为水池底层测量值。1#、2#和 3#的溶氧量分别代表 1#、2#和 3#扰动桨所在水池的溶氧量,4#的溶氧量代表空白池的溶氧量。

2.2 数值模拟

目前对水体运动和溶氧量的关系研究主要以试验为主,不能详尽地描述水体运动的产生及其对溶氧量的影响。改变扰动桨的参数,通过数值模拟的方法得到其产生的水体运动情况,一方面可以阐明水体运动导致的溶氧量变化情况,另一方面可以对扰动桨进行优化设计,减少试验工作量。

2.2.1 控制方程^[12] 由于流体为三维不可压黏性流体,所以它的 N-S 方程组如下所示:

(1)质量守恒方程

$$\text{div} u = 0$$

式中:div 为散度算子;u 为速度矢量在 x 方向上的分量。

(2)动量守恒方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \mu \Delta u_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} = F_i$$

式中:u_i(i=1,2,3)为沿 i 方向的速度分量;u_k(k=1,2,3)为沿 k 方向的速度分量;x_i(i=1,2,3)为沿 i 方向的 x 值变量;x_k(k=1,2,3)为沿 k 方向的 x 值变量;t 为时间变量;μ 为黏性系数;p 为压力;F_i为沿 i 方向的质量力。

2.2.2 计算区域与网格划分 将整个水池作为计算区域,水从导流筒底部进入,经扰动桨旋转带入上层,形成循环。利用 Solidworks 建立三维模型,抽取流出道,然后导入 Ansys ICEM CFD 中进行网格划分。由于扰动桨为曲面,几何模型比较复杂,所以采用非结构网格进行划分^[13],并对扰动桨区域进行加密。

2.2.3 多重参考系模型(MRF)和边界条件 导流筒为静止部件,扰动桨为转动部件,二者之间存在相对运动,因此采用多重参考系模型对流场进行数值计算,求解定常状态下的流场。将划分好的网格导入到 Fluent 中,检查网格尺度、进行网格光滑;流体在导流筒内为湍流,选用标准模型进行模拟,采用标准壁面函数处理壁面^[14];流体介质为液态水;水池表面以标准大气压力为壁面边界条件^[15];设置扰动桨附近区域为旋转区域,转速为 60 r/min,其他区域为静止区域;叶片边界条件设置为相对速度为 0,叶片与周围流体区域一起以相同的速度转动。

2.2.4 求解方法 采用基于压力的求解器进行求解,压力-速度耦合求解采用 SIMPLE 算法,动量、湍动能和湍流耗散率

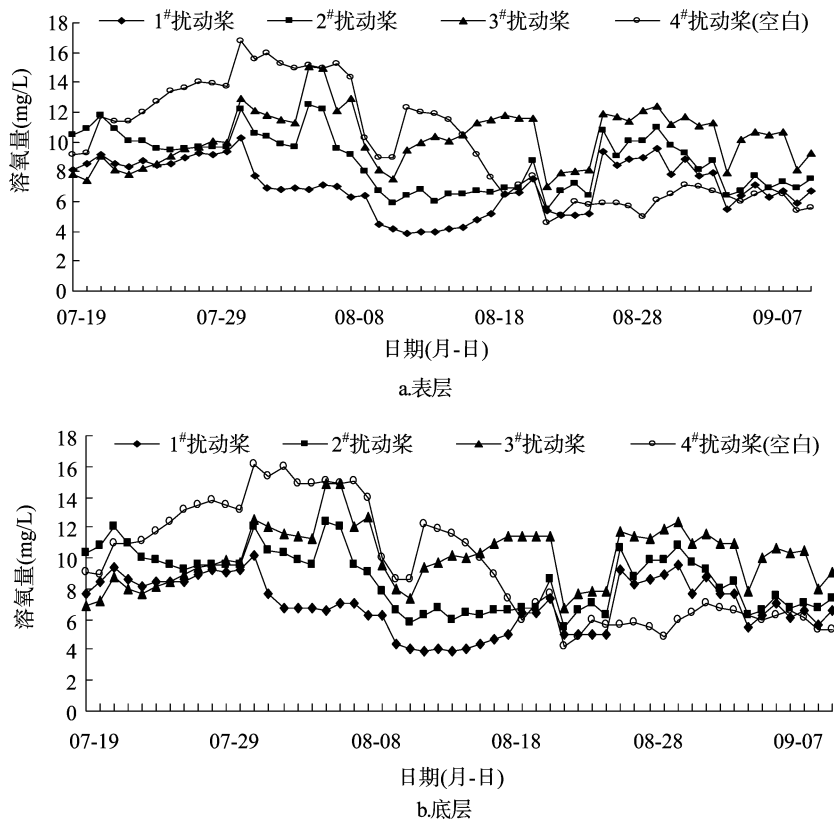


图3 试验水池表层、底层溶氧量的变化情况

采用一阶迎风格式,残差指标设置为 0.001,设置好后对求解初始化。

2.2.5 计算结果校验 试验所用的流速仪量程为 10 mm/s,初步计算,试验水池导流筒附近的流速较高,为 10 mm/s,其他地方为 1 mm/s,所以以扰动池导流筒附近的流速来进行计算校验。

在图 1 所示的坐标系下,将 $z = 380$ mm 截面与 $y = 0$ mm

截面相交,得到一条直线,在直线上取 14 个测点。测点分布如图 4 所示,测量结果与数值计算结果对比如图 5 所示。

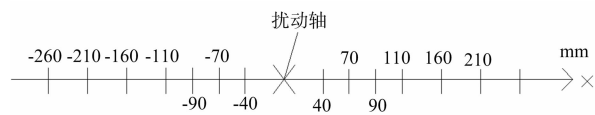


图4 测点示意图示

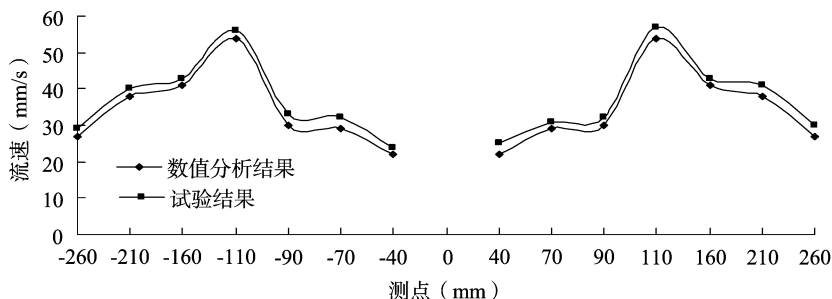


图5 各测点流速的模拟结果

通过对比得到,数值计算得到的模拟值比实际值小 12% 左右,在后面的计算中,以 12% 作偏差纠正。

2.2.6 计算结果 经过计算,得到水池流场的速度迹线图和云图(图 6)。在扰动桨作用下,水池底部的水被提到上层,并使水池的水产生循环,即形成表层富氧水和底层贫氧水进行缓慢交换,通过长时间作用,可提高和均衡水体的溶氧量。

截取导流筒附近的流速云图进行观察,倾斜角和盘面比最大的 3# 扰动桨产生的导流筒出口截面平均流速最大,倾斜角和盘面比最小的 1# 扰动桨产生的导流筒出口截面平均流

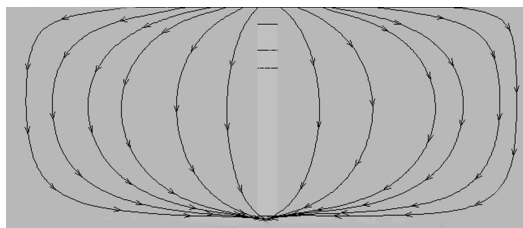


图6 3# 扰动池的速度迹线图和云图

速最小(图 7)。

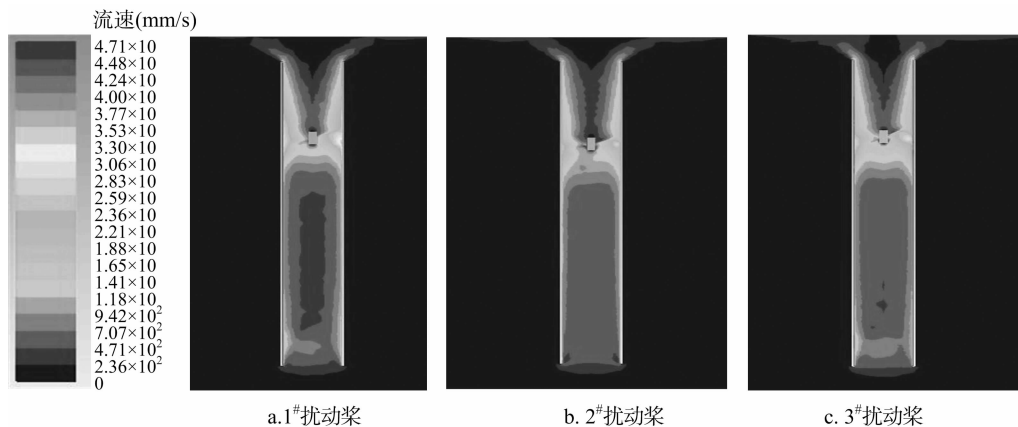


图7 扰动桨的速度云图

3 结论与讨论

由图 3 可以看出,在规定的测量时间内,各试验水池的溶氧量都是先升高后下降,这是因为试验开始时富营养水体导致藻类生长,藻类光合作用产生氧气,使溶氧量上升,随着藻类继续生长,呼吸作用消耗的氧气多于光合作用产生的氧气,溶氧量逐渐下降。约开始试验后 2 周,3 个扰动池溶氧量变化规律性不强,原因在于每个水池的初始藻类生长情况不一,藻类光合作用产氧量不同。经过一段时间的扰动作用,3 个扰动池的溶氧量变化呈现出差异。试验后 47 d,扰动池的溶氧量基本稳定,1[#]、2[#]、3[#] 扰动池稳定后的表层溶氧量平均为 6.4、7.1、9.6 mg/L,底层溶氧量平均为 6.2、6.9、9.5 mg/L。

在同一时刻各水池的温度和大气压力相差很小,可以忽略,因此只研究水体运动速度对溶氧量的影响,图 8 说明了导流筒出口截面平均流速和试验水池溶氧量的关系。从图 8 中可以发现,水体运动速度与水池中溶氧量的大小成正比,水体运动速度越快,水体溶氧量越高。3[#] 扰动桨产生的导流筒出口截面平均流速比 2[#] 扰动桨高 3.8%,而 3[#] 扰动池在稳定后的表层、底层溶氧量平均比 2[#] 扰动池高 26%、27.4%;2[#] 扰动桨产生的导流筒出口截面平均流速比 1[#] 扰动桨高 6%,而 2[#] 扰动池在稳定后的表层、底层溶氧量平均比 1[#] 扰动池高 9.9%、10.1%。试验证明,在低功率扰动情况下,溶氧量的推动力来源于水池表层富氧水与底层贫氧水的相互交换,交换速度越快,溶氧量越高。4[#] 空白池溶氧主要依靠分子扩散进行传递,由于滞留膜的阻力,其表层溶氧量最后降到 5.6 mg/L,底层溶氧量降到 5.3 mg/L。

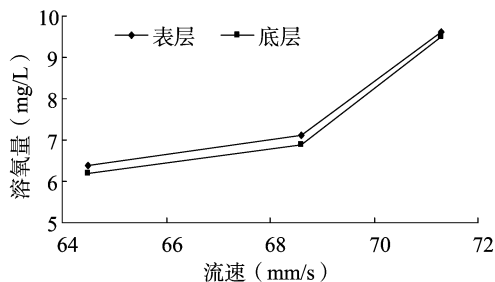


图8 流速对溶氧量的影响

机械扰动装置都有一定的处理范围,在这个范围内该装置产生的溶解氧推动力才能够使氧气突破滞留膜的阻力从气相进入到液相,从而提高水中的溶氧量,超过这个范围则不再

起作用,因此存在一个极限位置点,在极限位置内的水中溶氧量才会增加,但极限位置的值还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Bricker S B, Longstaff B, Dennison W, et al. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: a decade of change[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 21–32.
- [2] Verity P G. Expansion of potentially harmful algal taxa in a Georgia Estuary (US)[J]. Harmful Algae, 2010, 9(2): 144–152.
- [3] 王嘉学, 刘丛强, 王锐良. 滇池及入湖河道富营养化治理的人工辅助增氧[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 183–187.
- [4] 杨小茹, 苏建强, 郑天凌. 化感作用在赤潮调控中的意义及前景[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 219–226.
- [5] Qin B Q. Lake eutrophication: control counter-measures and recycling exploitation[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1569–1573.
- [6] Hansson A, Pedersen E, Weisner S E. Landowners' incentives for constructing wetlands in an agricultural area in South Sweden[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 271–278.
- [7] García J, Green B F, Lundquist T, et al. Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(14): 1709–1715.
- [8] 饶勇, 卢泽民. 微小功率装置改善水质研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(9): 353–356.
- [9] 蒋文清. 流速对水体富营养化的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [10] 张振坤, 王锡玉. 化工基础[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [11] Kang Y H, Lee M O, Choi S D, et al. 2-D hydrodynamic model simulating paddle wheel-driven circulation in rectangular shrimp culture ponds[J]. Aquaculture, 2004, 231(1): 163–179.
- [12] 岳戈. ADINA 流体与流固耦合功能的高级应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [13] Xia J Y, Wang Y L, Zhang S L, et al. Fluid dynamics investigation of variant impeller combinations by simulation and fermentation experiment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, 43(3): 252–260.
- [14] Xia J Y, Wang Y L, Zhang S L, et al. Computational investigation of fluid dynamics in a recently developed centrifugal impeller bioreactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 38(3): 406–413.
- [15] 施卫东, 田飞, 陈斌. 带导流壳的污水处理搅拌机流动分析与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 96–99.