

几种机械增氧方式在池塘养殖中的增氧性能比较

谷 坚^{1,2}, 顾海涛^{2,3}, 门 涛^{2,3}, 刘兴国^{1,2}, 曹建军^{2,3}

(1. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;
3. 国家渔业机械质量监督检验中心, 上海 200092)

摘 要: 为评价池塘养殖中主要机械增氧方式的性能优劣, 该文通过增氧清水试验和水产养殖池塘中实地试验, 研究了
几种机械增氧方式在清水试验中的增氧能力, 动力效率和实际池塘中的溶解氧变化。结果表明, 在清水中, 叶轮增氧机
增氧能力分别高出水车和螺旋桨增氧机 4% 和 264%, 动力效率分别高出 12.7% 和 259%; 在池塘中, 叶轮增氧机对池塘水
层的混合均匀时间要比水车和螺旋桨增氧机快 40%, 对溶解氧的增加值分别高 115% 和 293%。叶轮增氧机综合增氧性能
要高于水车和螺旋桨增氧机, 螺旋桨增氧机综合增氧性能最差。该研究为在池塘养殖中合理运用机械增氧方式提供了有
益的借鉴。

关键词: 池塘, 供氧, 机械性能, 增氧性能, 叶轮增氧机, 水车增氧机, 螺旋桨增氧机

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.023

中图分类号: S2, S9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0148-05

谷 坚, 顾海涛, 门 涛, 等. 几种机械增氧方式在池塘养殖中的增氧性能比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 148
-152.

Gu jian, Gu haitao, Men tao, et al. Performance comparison for different mechanical aeration methods in pond [J]. Transactions of
the CSAE, 2011, 27(1): 148-152. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

水环境中的溶解氧是养殖生物生存的最重要的因子, 低溶氧可能带来高死亡率, 所以对溶解氧的调控已成为水产养殖管理中最重要措施之一^[1]。在中国, 传统的水产自然养殖方式随着各类池塘增氧机械的广泛使用得到了根本性的改变, 高密度、高产已成为中国池塘水产养殖的普遍形式, 目前在中国池塘机械增氧方式中存在着叶轮式、水车式、螺旋桨式等繁多的种类和形式, 如何选择各类机械增氧方式已成为现代水产养殖业关注的焦点之一。本研究旨在通过增氧机历年来大量的清水试验数据和池塘中实际使用各类机械增氧方式试验时获得的数据进行分析与研究, 以评价中国池塘养殖中主要机械增氧方式的性能优劣, 并通过对增氧性能和使用方式进行分析比较, 为选择池塘机械增氧方式提供科学依据。

自然水体中氧气来源于 2 个方面: 一是空气中的氧的溶入, 约占 10%, 二是水体中浮游植物和藻类光合作用释放的氧, 约占 90%^[2-3]。李玉全等人的研究表明增氧潜力和溶解氧的扩散速度是判断增氧方式优劣的重要指标, 高增氧潜力和能快速提高水体溶解氧含量的增氧方式可以更好地应对突发情况, 提高养殖安全系数^[4]。王兴国等人的研究提出池塘机械增氧的几种需要类型: 1) 紧

急增氧, 用来在缺氧期间防止鱼类死亡。2) 在气候炎热, 以及鱼塘中的溶氧上下分布不均等情况下而造成的缺氧, 通过增氧可减少这一类的危险^[5]。庞云芝等研究了引射式冰下深水增氧机性能, 提出了进气量与增氧动力效率之间呈正相关关系; 增氧动力效率随深度的增加而提高^[6]。Petrille 等对在美国斑点叉尾鲷养殖场使用的应急增氧机的增氧效果作了比较, 结果表明水车式增氧机比压缩风扇式增氧机和抽水喷洒式增氧机更为有效^[7]。Parker 使用增氧泵在池塘连续增氧试验, 提出若池塘遇到溶氧量急剧下降时, 除在池底采用提升式增氧泵以外, 还有必要使用在水面充氧的增氧机, 以提高池塘的增氧效果^[7]。然而目前在中国对于在池塘中使用的各类机械增氧方式缺乏较为系统的研究和比较分析, 更缺乏在养殖池塘中实际试验和研究。本试验选取了目前中国主要使用的几种池塘机械增氧方式, 从其增氧原理、增氧效果和池塘溶解氧实测情况值进行分析, 研究各类水产养殖的机械增氧方式, 并分析池塘机械增氧方式的综合增氧性能优劣。

1 材料与方 法

1.1 清水增氧性能试验

增氧机清水增氧性能试验按照《增氧机增氧能力试验方法》^[8]标准的要求在标准 6.3、8 和 10 m 半径的标准水池中进行。试验用水为自来水。探头布置按照标准要求布放。采样时间间隔为 1 min。

1.1.1 主要仪器与试剂

仪器: 溶氧(温度)测定仪: 型号 YSI-58, 具有自动温度补偿的膜探头溶氧测定仪, 附带搅拌器, 美国 YSI 公司。气压测定仪: 空盒气压表 DYM3 型长春气象仪表厂。

收稿日期: 2010-08-10

修订日期: 2010-10-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD03B06); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(nycytx-49); 农业部“引进国际先进农业科学技术”项目(2008-Z9)。

作者简介: 谷 坚(1966-), 男, 主要从事水产养殖装备与工程研究。中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 200092。Email: gujian@fmiri.ac.cn

试剂：消氧剂：亚硫酸钠 Na_2SO_3 （工业纯）

催化剂：氯化钴 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ （分析纯）

1.1.2 试验方法

按照标准要求，试验时先将清水中的溶解氧按照 100 g/m^3 的比例投放亚硫酸钠消氧至接近 0 mg/L ，然后开启机械增氧设备，当水体中溶解氧出现上升至饱和和溶解氧的 10% 时开始记录，直至接近 75% 以上时结束^[8]，按标准规定计算增氧能力和动力效率。

1.2 池塘增氧试验

池塘增氧能力试验是在上海市松江泖港的淡水养殖池塘中进行，池塘长 110 m，宽 50 m，平均水深 1.5 m。池中分别放置叶轮（3 kW）1 台、水车（1.5 kW）2 台、螺旋桨（1.1 kW）2 台，连续开机 2.5 h 左右，观察池塘中上下水层溶解氧的变化情况，主要仪器设备同上。

2 结果与分析

2.1 原理与计算依据

当前中国池塘增氧方式大都为扩散式增氧，空气中的氧向水中转移时，通常以刘易斯（LEWIS）和怀特曼（WHITMAN）的双膜理论^[9]为基础。该理论认为当气、液两相作相对运动时，其接触界面二侧分别存在气体边界层（气膜）和液体边界层（液膜），气膜和液膜均属层流。氧的转移就是在气、液双膜进行分子扩散和在膜外进行对流扩散的过程。由于对流扩散的阻力远比分子扩散的阻力小，故传质的阻力集中在双膜上，在水中，对于难溶解的氧来说，转移的决定性阻力是液膜。由于在气膜中存在着氧的分压梯度和液膜中存在氧的浓度梯度，就产生了氧的扩散和转移，因此氧转移速率为

$$\frac{dm}{dt} = D_L A \frac{C_S - C_L}{Y_L} = K_L A (C_S - C_L)$$

式中， D_L 为液膜部分的氧分子扩散系数， m^2/h ； A 为界面面积， m^2 ； C_S 为液体饱和溶氧值， mg/L ； C_L 为液体实际溶氧值， mg/L ； Y_L 为液膜厚度， m ； $\frac{C_S - C_L}{Y_L}$ 为液膜中

氧的浓度梯度； $K_L = \frac{D_L}{Y_L}$ 为液膜的氧转移系数， m/h 。

由此可得氧转移速率为

$$\frac{dc}{dt} = K_{La} (C_S - C_L)$$

式中， $\frac{dc}{dt}$ 为单位容积内氧的转移速率， $\text{mg/L}\cdot\text{h}$ ； K_{La} 为氧的总转移系数， $1/\text{h}$ 。

因此增氧机的增氧能力 Q_S 为

$$Q_S = K_{La} \times V \times C_S \times 10^{-3}$$

式中， V 为试验用水体积， m^3 。

增氧机的动力效率 ES 为 $E_s = \frac{Q_S}{N}$

式中： N 为实测输入功率， kW 。

当前在清水试验中评价增氧方式和增氧性能的主要

指标为氧的转移速率、增氧能力和动力效率等。这些技术指标中，动力效率为效能指标，氧的转移速率和增氧能力为规格指标，效能指标是反映增氧设备优劣的指标，选择效能指标高的设备可以使用户受益，比如节省费用，方便管理等。而规格指标是指反映规格方面特点的指标，无所谓优劣，对用户来说是合适与否的问题^[10]。

2.2 增氧试验结果与分析

目前池塘养殖生产中主要使用的叶轮增氧机、水车增氧机、螺旋桨增氧机从工作形式分析：

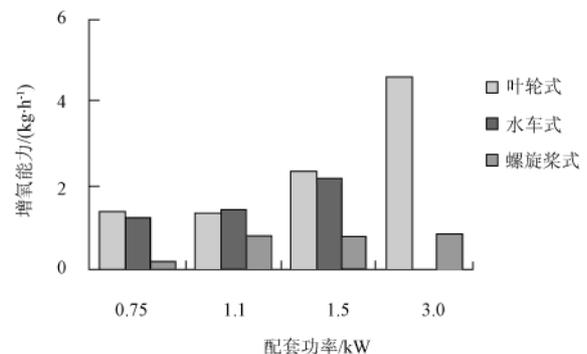
1) 叶轮增氧机由于叶轮叶片的强烈搅动，叶轮周围提升水体在水面形成了水花和水跃，扩大了气液的接触面积^[11]，同时在水下形成水层的上下流动和交换。

2) 水车增氧机是随着叶轮的转动，桨叶击打水面激起水花和水跃，并把空气压入水中，同时产生一个与水面平行的作用力，形成一股定向水流，并造成表层水定向流动^[12]，在一定深度的水层内形成上下流动和交换。

3) 螺旋桨增氧机是将空气通过螺旋桨的高速旋转所产生的负压吸入水中，并在高速水流的冲击下破碎成微小的高密度雾状气泡扩散至水体的中下层^[13-14]，同时形成推流，并随着气泡的上升，产生向上水流，完成上下水层的交换。

以上 3 种机械增氧方式中，水体交换能力强弱依次为叶轮式、水车式、螺旋桨式。依据双膜理论，有较强的水体交换能力，应能提高气液两相的相对运动，扩大空气和液体的接触面积，有利于扩散增氧。

在对国家渔业机械质量监督检验中心 1999 年至 2008 年增氧机清水试验数据进行统计分析后（样本中：叶轮增氧机 376 台；水车增氧机 92 台；螺旋桨增氧机 17 台）。得出各类机械增氧方式的规格指标增氧能力数据见图 1：平均每千瓦功率的叶轮式增氧机增氧能力为 1.53 kg/h 与水车式增氧机增氧能力 1.47 kg/h 基本接近，螺旋桨式增氧机增氧能力 0.42 kg/h 要明显低于以上 2 种形式的增氧机，叶轮增氧机增氧能力分别高出水车和螺旋桨增氧机 4% 和 264%。



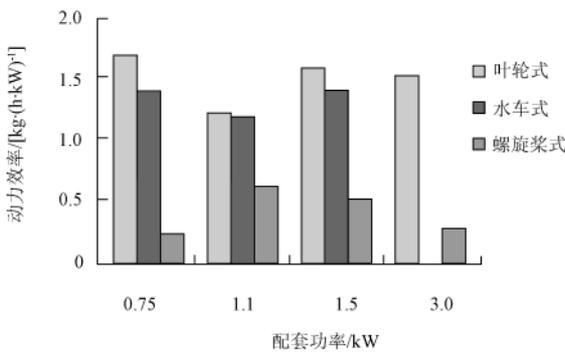
注：水车式无 3.0 kW

图 1 增氧机增氧能力

Fig.1 Oxygen-enriched capacity of aerator

清水试验中各类增氧方式的效能指标动力效率数据见图 2：叶轮式增氧机平均动力效率 $1.51 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{kW})$ 要略

高于水车式平均动力效率 1.34 kg/(h·kW)，而螺旋桨式增氧机平均动力效率 0.42 kg/(h·kW)明显低于以上 2 种形式的增氧机，叶轮增氧机动力效率则分别高出水车和螺旋桨增氧机 12.7% 和 259%。



注：水车式无 3.0 kW

图 2 增氧机动力效率
Fig.2 Efficiency of aerator

2.3 池塘增氧效果分析

在池塘增氧试验中各类增氧机增氧实测数据值如图所示。

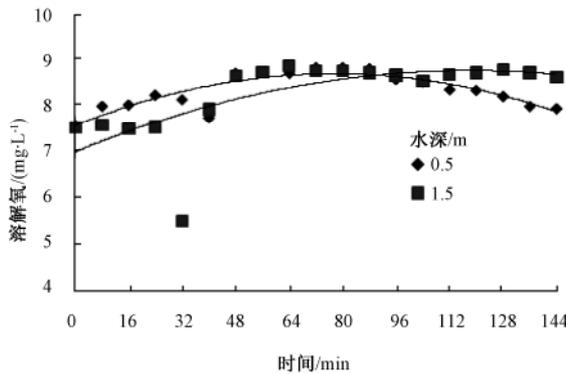


图 3 叶轮增氧机池塘增氧随时间的变化

Fig.3 Oxygen changes over time in paddle aerator pond

从叶轮增氧机增氧曲线图（图 3）中，可以发现池塘水体中溶解氧平均值有明显的上升，池塘水体中上下层各测点溶解氧的均匀性较好，池塘上下层水体的溶氧在开机后约 48 min 达到基本均匀状态，这时池塘中溶氧值平均增加 1.14 mg/L，平均增氧速率 1.425 mg/L·h。

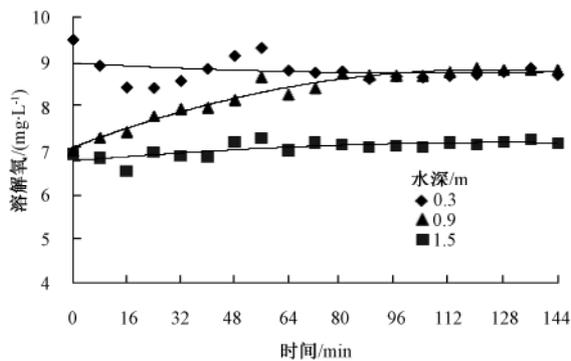


图 4 水车增氧机池塘增氧随时间的变化

Fig.4 Oxygen changes over time in waterwheel aerator pond

从水车式增氧机增氧曲线图（图 4）中，可以发现池塘水体中溶解氧也有明显的变化，主要是池塘中上层的平均溶解氧上升趋势较为明显，下层溶解氧略有增加，池塘中上层水体在开机 80 min 后基本达到均匀状态，这时池塘中溶氧值平均增加 0.53 mg/L，平均增氧速率 0.398 mg/L·h。

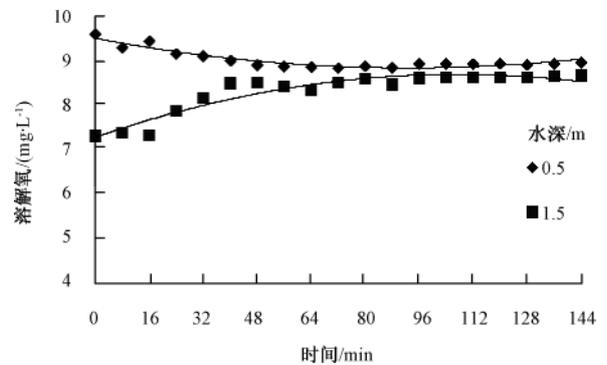


图 5 螺旋桨增氧机池塘增氧随时间的变化

Fig.5 Oxygen changes over time in propeller aerator pond

从螺旋桨式增氧机增氧曲线图（图 5）中，可以发现池塘底层水体中溶解氧上升明显，而上层水体中溶解氧基本不增加，池塘上下水层在开机 80min 后达到稳定状态，但溶氧均匀性较差，这时池塘中溶氧值平均增加 0.29 mg/L，平均增氧速率 0.218 mg/L·h。

以上研究结果表明，叶轮增氧机对池塘水层的混合均匀时间要比水车和螺旋桨增氧机快 40%，达均匀时对池塘溶解氧的增加值分别要高于水车和螺旋桨增氧机 115% 和 293%。

3 讨论

3.1 机械增氧方式对增氧性能的影响

增氧机的重要的功能之一是在水体缺氧时，能快速补充和增加水体中的溶解氧。由于目前在中国的池塘水产养殖中，增氧主要为机械扩散式，因此增氧机械型式就决定了该设备的水气混合能力，氧液接触面积和水体交换混合能力，根据双膜理论，这些因素决定了氧转移速率，也就决定了其增氧性能。

叶轮增氧机由于在整个水体中有较强的混合与提升能力，能获得最大的氧液接触面积，在清水试验中增氧能力和动力效率指标要高于其他 2 种机械增氧方式，且在池塘试验中各测点的溶氧值均有明显提升，各测点上下层溶解氧增加的同步性较好，有着很好的增氧性能。

水车增氧机在中上层有着较强的推流能力和一定的混合能力，能获得较好的氧液接触面积，在清水试验中增氧能力和动力效率指标略低于叶轮增氧机，高于螺旋桨式增氧机，在池塘试验中池塘中上层的溶氧值均有明显提升，适于水深一米左右的浅池增氧^[2]，有着较好的增氧性能。

螺旋桨增氧机在水体中推流能力和混合能力较弱，在清水试验中增氧能力和动力效率指标要远低于上述 2 种机械增氧方式，在池塘试验中底层的溶氧值有明显提

升,但上下层溶解氧的均匀性较差,增氧性能明显弱于以上 2 种增氧方式。

3.2 机械增氧方式对不同深度水层增氧能力的影响

由于水产池塘养殖中养殖品种的习性不同,生活于池塘中的不同水层,因此对增氧方式的要求也不同。在池塘试验中,可以看到,叶轮增氧机能较好的同时提升试验池塘中不同深度各水层的溶解氧;水车增氧机,在试验池塘中上层水层的溶解氧提升较好,但对池塘底层的溶解氧提升能力较差;螺旋桨增氧机则能较为明显的提升试验池塘中底层的溶解氧,但对池塘中上层水层的溶解氧提升能力不强。

3.2 机械增氧方式对池塘中水流的影响

在中国水产养殖中如虾、鳊等一些品种,对池塘中水流有一定的要求,也造成对增氧方式的不同要求,叶轮增氧机随着叶轮的搅动,在池塘中同时形成水体的上下流动和交换,可以较大范围地搅动水体增氧作用较好^[15],适用于无水流要求的鱼类;水车增氧机,在浅水池塘增氧效果好,随着叶轮的转动在池塘中上层形成直线方向的水流,适用于鳊、对虾养殖等;螺旋桨增氧机则随着桨叶的高速转动,在池塘底层形成较大的水流^[15],适用于底栖养殖品种如虾、蟹类的养殖。

因此在实际池塘养殖中可根据不同养殖品种,选择相应的机械增氧方式,并可根据对增氧深度和养殖品种的需要搭配使用各类增氧机,以获得较为经济的增氧效果。

4 结 论

本文根据清水增氧能力试验和池塘增氧试验结果,研究分析了几种机械增氧方式的增氧原理,并对清水试验中增氧能力、动力效率和在池塘中增氧均匀时间和增氧速率指标进行了对比,结论如下:

1) 在清水试验中,叶轮增氧机增氧能力分别高出水车和螺旋桨增氧机 4% 和 264%,而效能指标动力效率则分别高出水车和螺旋桨增氧机 12.7% 和 259%,因此叶轮增氧机性能略高于水车;叶轮和水车增氧机性能明显高于螺旋桨式增氧机。

2) 在池塘试验中,叶轮增氧机对池塘水层的混合均匀时间要比水车和螺旋桨增氧机快 40%,池塘增氧试验中对溶解氧的增加值分别要高于水车和螺旋桨增氧机 115% 和 293%。

综合清水试验和池塘试验结果,在以上 3 种主要池塘机械增氧方式中,叶轮增氧机的综合增氧性能要高于水车和螺旋桨,螺旋桨增氧机性能最差。

[参 考 文 献]

[1] Boyd C E. Water Quality in Ponds for Aquaculture[M]. Alabama USA: Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, 1990: 482.

[2] 吴宝迅. 水产养殖机械[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 111.

[3] 王武. 鱼类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 53—54.

[4] 李玉全, 张海艳, 李健, 等. 水产养殖系统中机械增氧与液态氧增氧的效果比较[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 475—480.

Li Yuquan, Zhang Haiyan, Li Jian, et al. The comparison of aeration effect between air aeration and pure oxygen aeration systems in aquaculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(2): 475—480. (in Chinese with English abstract)

[5] 王兴国, 王悦蕾, 赵水标. 养殖水体增氧技术及方法探讨[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2004, 23(2): 114—117. (1008-830X(2004)02-01 14-04).

Wang Xingguo, Wang Yuelei, Zhao Shuibiao. Study on a method of increasing oxygen for aquaculture water[J]. Journal of Zhejiang Ocean University :Natural Science, 2004, 23(2): 114 — 117. (1008-830X(2004)02-01 14-04) (in Chinese with English abstract)

[6] 庞云芝, 李秀金. 水-空气引射式冰下深水增氧机的设计与性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 112—116.

Pang Yunzhi, Li Xiujin. Design of water-air spurting aerator used under ice and in deep water and experimental study on its performance[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 112—116. (in Chinese with English abstract)

[7] Tucker C S. Channel Catfish Culture (Developments in Aquaculture and Fisheries Science) [M]. Amsterdam: Elsevier, 1985: P163—176.

[8] SC/T6009—1999. 增氧机增氧能力试验方法[S].

[9] 哈尔滨建筑工程学院. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 75—76.

[10] 严应政. 曝气设备的氧转移效率[J]. 西北建筑 I 程学院学报: 自然科学版, 2001, 18(2): 54—58.

Yan Yingzheng. The oxygen transfer efficiency for aerator[J]. Jot NW Inst of Arch Eng: Natural Sciences, 2001, 18(2): 54—58. (in Chinese with English abstract)

[11] 丁永良. 增氧机的研究[J]. 农业机械学报, 1986(4): 54—59.

[12] 李振安. 三角叶片水车式增氧机的研究与设计[J]. 北京农业工程大学学报, 1992, 12(2): 54—59.

Li Zhenan. Research and design of triangular paddle wheel aerator[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1992, 12(2): 54—59. (in Chinese with English abstract)

[13] 黄新明. 螺旋桨式增氧机的设计[J]. 现代机械, 2006(1): 75—76.

Huang Xinming. The design of propeller increase oxygen machine[J]. Modern Machinery, 2006(1): 75 — 76. (in Chinese with English abstract)

[14] 周玉光, 高清廉, 宋协法, 等. 螺旋吸气式增氧机的结构设计[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(1): 43—48.

Zhou Yuguang, Gao Qinglian Song Xiefa, et al. Construction design of the propeller aspirating aerator[J]. Journal of ocean university of qingdao, 1995, 25(1): 43—48. (in Chinese with English abstract)

[15] 蒋树义, 韩世成, 曹广斌, 等. 水产养殖用增氧机的增氧机理和应用方法[J]. 水产学杂志, 2003, 16(2): 94—96.

Jiang Shuyi, Han Shicheng, Chao Guangbing, et al. Machines and application of aquaculture aerators[J]. Chinese journal of

fisheries, 2003, 16(2): 94—96. (in Chinese with English abstract)

Performance comparison for different mechanical aeration methods in pond

Gu Jian^{1,2}, Gu Haitao^{2,3}, Men Tao^{2,3}, Liu Xinguo^{1,2}, Cao Jianjun^{2,3}

(1. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China ;

2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

3. The National Supervision and Testing Center of Fishery Machinery and Instrument, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to compare the performance indexes of the main mechanical aeration methods in pond culture, the aeration capacity in clean water test, the changes of dissolved oxygen in actual pond and the power efficiency for some kinds of mechanical aeration methods were studied through historical and current data of clean water oxygenation test and field experiments in ponds. The results indicated that the aeration capacity of impeller aerator was 4% and 264% higher than those of paddlewheel aerator and propeller aerator respectively; the power efficiency of impeller aerator was 12.7% and 259% higher than those of paddlewheel aerator and propeller aerator respectively in clean water; the time to achieve the water layer mixing uniformity for impeller aerator was 40% less than those for paddlewheel aerator and propeller aerator, and the increasing values of dissolved oxygen for impeller aerator was 115% and 293% higher than those for paddlewheel aerator and propeller aerator respectively in pond. The comprehensive aeration performance of impeller aerator is higher than that of paddlewheel aerator and propeller aerator, and the propeller aerator has the worst comprehensive aeration performance. The study can provide useful references for the rational application of mechanical aeration methods in pond culture.

Key words: pond, oxygen supply, mechanical properties, aeration performance, paddle aerator, waterwheel aerator, propeller aerator