

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.057

鱼菜共生水体溶解氧时空变化规律及其影响因素研究

饶伟 杨卫中 位耀光 李道亮

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为明确鱼菜共生系统中水体溶解氧分布特征,采用室内搭建的鱼菜共生系统,利用多点采样装置以及物联网传感系统对系统中水质参数、气象数据和生物量信息进行提取,通过相关性分析对该鱼菜共生系统中溶解氧时空变化规律以及光照强度与喂食量对其时空变化的影响进行了研究。结果表明,溶解氧在鱼池中随垂直深度增加而减小,相关系数范围为 $-0.9 \sim -0.7$ 时,鱼池溶解氧空间变化量与喂食量呈显著线性关系,相关系数为 0.9294 ,方差分析中 F 值为 126.94 。溶解氧在水培槽中随水平距离增加而减小,相关性范围为 $-0.9 \sim -0.8$ 时,水培槽溶解氧空间变化量与光照强度呈显著线性关系,相关系数为 0.8158 ,方差分析中 F 值为 39.7954 。溶解氧日变化受到各环节空间变化影响,白天波动下降,夜间平缓上升。研究结果为鱼菜共生系统溶解氧研究提供了一定理论依据。

关键词: 鱼菜共生; 溶解氧; 时空变化; 多点采集; 光照强度; 喂食量

中图分类号: S953.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0374-07

Temporal and Spatial Variability of Water Dissolved Oxygen with Influence Factors in Aquaponics System

RAO Wei YANG Weizhong WEI Yaoguang LI Daoliang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to clarify the distribution characteristics of dissolved oxygen in water in symbiosis system, the water quality parameters, meteorological data and biomass information of the system were extracted by using the multi-point sampling device and the networking sensor system. The influence of light intensity and feed intake on the spatiotemporal variation of dissolved oxygen in the symbiosis system was studied by correlation analysis method. On the one hand, the results showed that dissolved oxygen levels decreased with the increase of vertical depth in the fish pond, the correlation was between -0.9 and -0.7 . The dissolved oxygen was changed at 9:00, and there was obvious correlation between the logarithm and vertical depth of dissolved oxygen with correlation coefficient value $r = 0.9894$ and the value of the variance analysis $F = 126.94$. On the other hand, the dissolved oxygen decreased with the horizontal increase of the water culture tank following the correlation coefficient from -0.9 to -0.8 . A significant linear relationship reached 0.89 between the dissolved oxygen content and the horizontal distance. In addition, there was the logarithmic relationship between the dissolved oxygen content of hydroponic tank and light intensity, in which the correlation coefficient was 0.8158 . According to the monitoring during different time, the diurnal variation of dissolved oxygen was affected by the spatial variation. The fluctuation values of dissolved oxygen content decreased during the daytime and increased during the nighttime which might be mainly related to the change of light intensity, feeding operation and consumption. As a result, the study provides a theoretical basis for the study of dissolved oxygen in the symbiosis system.

Key words: aquaponics system; dissolved oxygen; temporal and spatial changes; multi-point collection; light intensity; feeding volume

收稿日期: 2017-07-01 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 欧盟 FP7 计划项目(619137)和广东省海大集团院士工作站项目(2012B090500008)

作者简介: 饶伟(1992—),男,硕士生,主要从事农业物联网及鱼菜共生技术研究,E-mail: 164233061@qq.com

通信作者: 杨卫中(1963—),男,副教授,博士,主要从事农业信息获取与智能控制研究,E-mail: ywz@cau.edu.cn

引言

鱼菜共生系统是一个基于自然生态循环理念所创造出来的复合型生产系统,主要原理是鱼类消化有机物产出无机物氨氮,通过微生物分解将氨氮先转化为亚硝酸盐,最终转化成硝酸盐,被植物通过固氮作用吸收,转化成有机物,从而形成一种循环利用的绿色生产模式,该模式不仅可以解决传统生产模式带来的水质污染问题,还可以实现水、物质和能源的循环利用,进而提高经济效益。国内公开报道鱼菜共生相关研究始于20世纪90年代。丁永良等^[1]介绍了鱼菜共生系统理论及主要设施和结构组成部分,开发了一套组装式的鱼菜共生系统。张明华等^[2]通过水质和环境的动态调控,探索了营养盐类、pH值、溶解氧、温度等因子对鱼菜不同生长阶段的影响,总结了不同密度鱼类与不同种类、不同生长阶段蔬菜之间的优化配比关系。至2010年,基于工厂化循环水养殖的鱼菜共生系统^[3]得到了长足发展,并已形成一定的产业规模。

国外在鱼菜共生技术方面的研究早于国内,起始于20世纪70年代。最初开展鱼菜共生系统研究目的是对养殖水体的循环净化,主要是针对氨氮的去除^[4-5],而后SUTTON^[6]对鱼菜共生系统的性能进行了深入分析,包括水温、植物生长率、饲料转化率及死亡率等方面。K. M. BUZBY等^[7]根据鱼类营养排放和植物营养吸收的平衡原则建立了便于调节生物量配比的鱼菜共生系统。HUSSAIN等^[8]对比了茄果类蔬菜(西红柿)和叶菜(白菜)对氮素的去除情况,发现茄果类由于有较大的根表面积,能更有效地吸收氮素。文献^[9-11]分析了当地鱼菜共生系统运行对水和能源的消耗情况,结合饲料等成本消耗情况,认为鱼菜共生系统在实现可持续发展方面还存在不少问题。JONATHAN等^[12]研究了鱼菜共生条件下固氮菌对植物生长的促进情况,发现这类有益菌能明显促进植物生长。

国内研究主要偏重于鱼菜共生的技术实现上,国外已深入到鱼菜共生系统水、营养、能源利用效率及系统性能影响因素等方面,较国内超前一些,但总体看来,近年来鱼菜共生相关研究还主要集中在应用层面,特别是在国内,应用相关的报道较多。针对鱼菜共生系统物质代谢,特别是水质参数转化、分布特征等机理性方面研究较少,对于溶解氧在鱼菜共生方面的研究还未见到。

养殖水体中水质变化机理复杂多样,溶解氧作为养殖中的关键控制要素,其时空变化规律直接影响着鱼菜共生系统的结构及运行模式,本文针对鱼

菜共生系统中鱼池溶氧量时空变化开展研究,在空间分布上研究主要包括溶解氧垂直和水平变化规律两种^[13],由于溶解氧时空变化易受到环境因素的影响^[14],将呈现出不同的变化规律。鉴于我国对于鱼菜共生系统水质机理方面研究较少,为此本文通过设计试验、多点采集、数据分析等方法对溶解氧在鱼菜共生系统中分布情况及其影响因素进行研究,为开展鱼菜共生系统研究提供参考理论。

1 材料和方法

1.1 试验平台概况

试验平台搭建在中国农业大学信息与电气工程学院,试验所搭建的鱼菜共生系统包括:养鱼池、水培槽和水处理槽,如图1所示。



图1 鱼菜共生系统试验平台

Fig.1 Experiment platform of aquaponic system

养鱼池为直径100 cm深70 cm的塑料板材桶,上方安置有自动投喂器,定时向鱼池投喂鱼食。鱼池底部设有开孔,水管穿过所述开孔将鱼池与水处理槽一端连通。鱼池与水培槽整体并排放置,其水位低于水培槽中水位。

水培槽为塑料板围成的长200 cm、宽110 cm的长方形槽体,内部设置有定植板、定植篮和定植绵,上部设置有补光灯。槽内种植144棵生菜。水培槽所处水平位置在系统的最高处,既满足了蔬菜进行光合作用对阳光的需求,又可以保证水培槽中的水可以靠重力自然回流至养鱼池。

水处理槽位于水培槽的正下方,其出水口与水培槽的入水口通过水泵相连。水处理槽由物理池、生物滤池和沉降池组成。其中物理池设有多层过滤棉,用来过滤大型食物残渣以及固体鱼粪便;生物滤池设有1000个生物球,用来培养硝化细菌;沉降池设有气石和水泵,为系统水体充氧及提供0.15 L/s的水流动力。

1.2 数据采集点设定

试验于2016年10月在中国农业大学信息与电气工程学院水-土-气物联网试验室中进行。通过对系统中溶解氧空间变化关键控制点和溶解氧时间变

化关键控制点进行长期定时采样及数据分析,找到鱼菜共生系统溶解氧的时空变化规律。

图2为溶解氧空间变化关键控制点和溶解氧时间变化关键控制点的分布示意图。养鱼池入水口为圆形,以其圆心所在水平面为坐标平面建立坐标系,坐标原点 O 为养鱼池的中心, X 方向指向养鱼池的入水口圆心, Y 轴垂直于 X 轴,在 X 、 Y 轴上分别找到距离原点 O 25 cm和-25 cm的 A 、 B 、 C 和 D 4个点,通过 O 、 A 、 B 、 C 和 D 5个点作垂直于坐标平面的垂线 L_0 、 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 ,称为采样基准线,在采样基准线 L_0 上以20 cm间隔取 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 4个点。用同样的方法分别在 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 上取点 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 、 $C_1 \sim C_4$ 、 $D_1 \sim D_4$ 。上述 $O \sim O_4$ 、 $A \sim A_4$ 、 $B \sim B_4$ 、 $C \sim C_4$ 、 $D \sim D_4$ 共25个点定义为养鱼池溶解氧空间变化关键控制点;在水培槽平面上以图2所示方式建立采样网格,图中网格线 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的间隔为25 cm,网格线 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 的间隔为40 cm。定义网格点 $n_1 \sim n_{15}$ 为水培槽中溶解氧空间变化关键控制点, $P_1 \sim P_5$ 为水培槽纵向采样基准线, $Q_1 \sim Q_3$ 为水培槽横向采样基准线。定义位于养鱼池中的采样点 O_2 和位于水培槽中的采样点 n_8 为系统中的时间变化关键控制点。

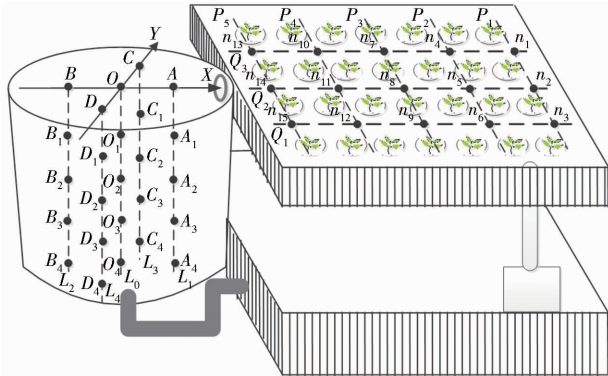


图2 水样采集方案示意图

Fig. 2 Schematic of water sampling scheme

1.3 数据采集

利用多点并行采集装置于每日09:00、15:00、21:00进行水样多点采集,然后用multi 3420型水质分析仪进行检测。试验连续进行了15 d,获得不同时间养鱼池和水培槽中溶解氧空间分布数据。样品多点并行采集装置如图3所示。

为研究系统中溶解氧的时间变化规律,使用multi 3420型水质分析仪对系统内溶解氧时间变化关键控制点的样品每30 min进行一次实时检测。

试验中随机对5条锦鲤和9棵生菜进行标记,每周对做了标记的鱼和菜进行称量。喂食量信息采集是通过每天对投喂前后的自动投喂器进行称量后做差计算得到。

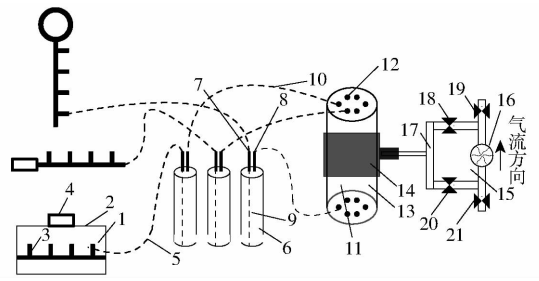


图3 样品并行采集装置

Fig. 3 Sample parallel acquisition device

1. 采样支架 2. 采样框架 3. 固定器 4. 把手 5. 采样管
6. 样品存储器 7、8. 抽(排)气连接器 9. 进样管 10. 缓冲气管
11. 集气缓冲器 12. 缓冲气孔连接器 13. 63 mm PVC管
14. 20~63 mm变径三通 15. 抽(排)气泵及管路 16. 抽(排)气泵
17. 抽(排)气管路 18~21. 阀门

试验需要采集鱼菜共生系统所处室内的环境信息,采用华控兴业的二氧化碳传感器、光照强度传感器和温湿度传感器对系统环境参数进行实时采集,然后通过RS485通讯接口将数据传入上位机数据库中。

2 数据分析与讨论

本文采用Microsoft Excel 2010进行数据处理;用SPSS Statistics 16.0统计软件进行方差分析(Tukey HSD);用OriginPro绘图。

2.1 养鱼池中溶解氧空间变化规律分析

将养鱼池中每条基准线上测量点测得的溶氧量 D ,经过相关变换后与垂直深度进行相关性分析,结果如图4所示。由图可知,鱼池中溶氧量在不同时刻的空间分布不同,整体上看,鱼池中的溶氧量随垂直深度的增加而减小。为了建立鱼池中溶解氧空间分布预测模型,需根据图4选取各时刻相关系数高的基准线及变量形式作为预测模型的自变量分别建立回归模型,建模采用的数据为试验阶段前20 d的数据,模型建立后用试验阶段后10 d的数据进行模型预测精度检验。由表1可见,09:00采用在 L_4 基准线上取对数形式的溶氧量为预测量所建立的线性预测模型进行鱼池溶氧量预测精度最高,模型的决定系数 R^2 为0.84, RMSE为0.021 mg/L,预测结果的 R^2 为0.88, RMSE为0.025 mg/L,模型如图5所示;与此类似,15:00在 L_1 基准线上溶氧量原始形式为预测量建模;21:00在 L_1 基准线上以溶氧量平方形式为预测量建模;模型性能见表1。

综上所述,鱼池中溶解氧空间变化规律整体呈现随垂直深度增加而减小的趋势。不同时空情况下,溶氧量垂直分布不同,在每日09:00溶氧量的对数形式与垂直深度呈现明显线性关系;15:00溶氧

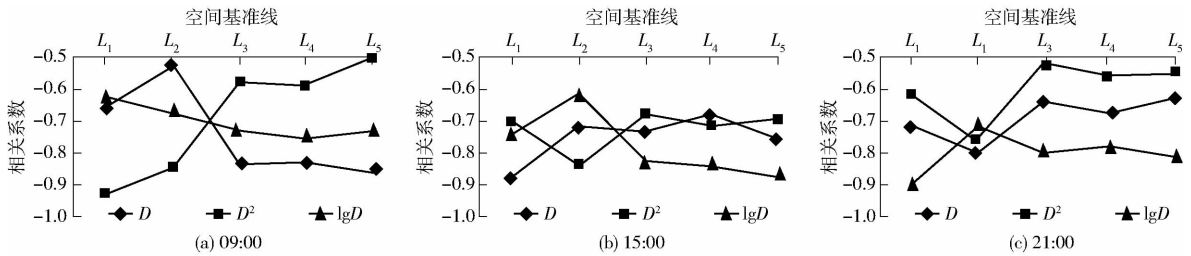


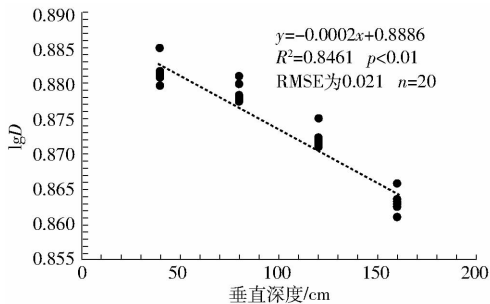
图4 鱼池中不同时间段各基准线溶氧量及其变化与垂直深度相关系数

Fig. 4 Correlation between the dissolved oxygen content and the variation of the basic baseline in different time periods and the vertical depth correlation coefficient

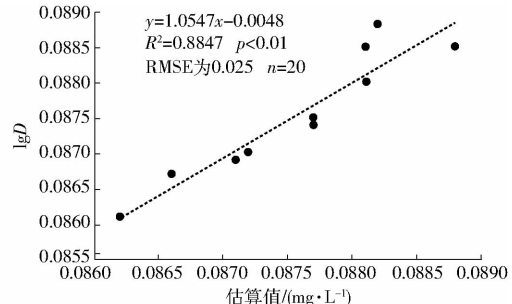
表1 鱼池中溶解氧与垂直深度变化估算模型

Tab. 1 Estimation models of dissolved oxygen and vertical depth in fish ponds

测试时刻	基准线	数据处理方法	建模		验证	
			R^2	RMSE/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	R^2	RMSE/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
09:00	L_5	D	0.75	0.026	0.84	0.023
	L_4	$\lg D$	0.84	0.021	0.88	0.025
	L_1	D^2	0.73	0.041	0.83	0.021
15:00	L_1	D	0.85	0.032	0.85	0.021
	L_5	$\lg D$	0.67	0.033	0.79	0.018
	L_2	D^2	0.52	0.025	0.78	0.011
21:00	L_2	D	0.68	0.019	0.63	0.032
	L_3	$\lg D$	0.62	0.024	0.73	0.040
	L_2	D^2	0.83	0.031	0.64	0.026



(a) 溶氧量的对数形式与垂直深度的关系



(b) 溶氧量与垂直深度变化模型的估测值与实测值

图5 鱼池溶氧量对数变换形式与垂直深度模型

Fig. 5 Establishment and verification of logarithmic transformation form and vertical depth model of dissolved oxygen in fish pond

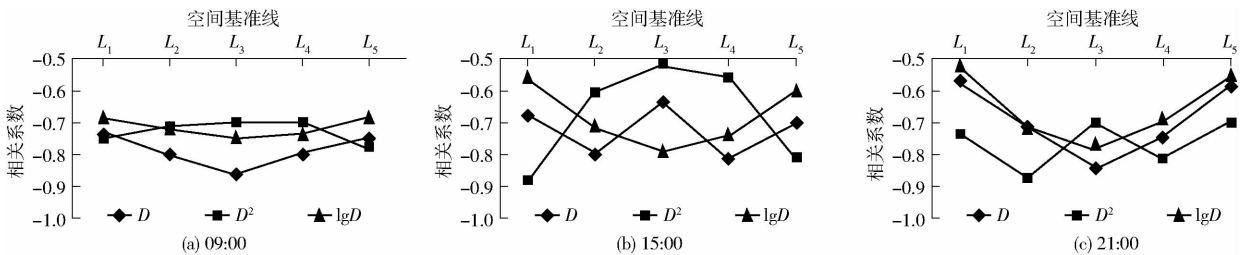


图6 水培槽中不同时间段各关键基准线溶氧量及其变化结果与水平距离相关系数

Fig. 6 Correlation between the dissolved oxygen content and the variation of the key reference line in the hydroponic at different time intervals and the horizontal distance correlation coefficient

同,选取相关系数高的基准线及预测量形式作为模型的预测量,建模结果如表2和图7所示,分析过程与鱼池溶氧量空间分布建模分析类似,在此不做赘述。本研究得到的水培槽溶解氧空间变化规律与陈

量的原始数据与垂直深度呈现明显线性关系;21:00溶氧量的平方与垂直深度呈现明显的线性关系。这一规律与崔峰^[15]对溶解氧空间分布的研究结论相吻合。

2.2 水培槽中溶解氧空间变化规律分析

溶解氧作为水培植物中的关键控制要素,主要研究内容包括时空变化规律^[16-17]。本文针对鱼菜共生系统中水培槽溶氧量空间变化规律,采用类似于上述鱼池中溶氧量空间分布规律研究的方法开展研究。分别对水培槽中5条纵向采样基准线 $P_1 \sim P_5$ 上所测得的溶氧量的原始量、平方量和对数量与测量点水平距离进行相关性分析,结果如图6所示。由图可知,水培槽中溶氧量在不同时刻空间分布不

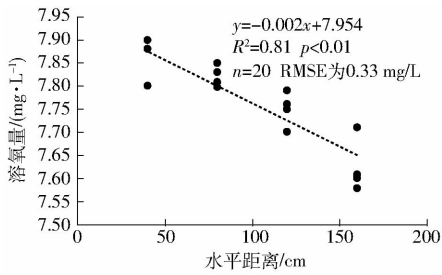
艳丽等^[18]对于DFT水培系统生菜根系耗氧规律中溶氧量变化规律的研究结论相近。

综上所述,水培槽中某处与鱼池的距离越近其溶氧量越小;09:00溶氧量的对数形式与距离呈现

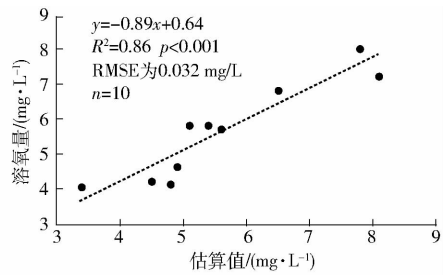
表 2 水培槽中溶氧量与水平位置的关系模型
Tab.2 Estimation model of dissolved oxygen and horizontal distance in hydroponics

测试时刻	基准线	数据处理方法	建模		验证	
			R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)	R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)
09:00	P ₅	D	0.75	0.021	0.84	0.023
	P ₄	lgD	0.81	0.033	0.89	0.032
	P ₁	D ²	0.73	0.042	0.83	0.041
15:00	P ₁	D	0.79	0.032	0.85	0.021
	P ₅	lgD	0.64	0.023	0.79	0.018
	P ₂	D ²	0.62	0.015	0.78	0.031
21:00	P ₂	D	0.68	0.019	0.83	0.032
	P ₃	lgD	0.62	0.031	0.73	0.025
	P ₂	D ²	0.80	0.028	0.84	0.024

明显线性关系;15:00 溶氧量的原始数据与距离呈现明显线性关系;21:00 溶氧量的平方与距离呈现明显的线性关系。这一规律与文献[19-20]在水培系统上溶解氧与环境因子相关关系研究中溶氧量变化规律相符。



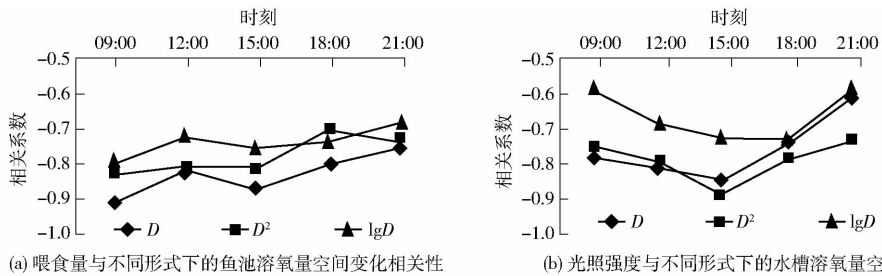
(a) 溶氧量的对数形式与水平距离的关系



(b) 溶氧量与水平距离变化模型的估值值与实测值

图 7 水培槽溶氧量原始形式与水平距离模型建立与验证

Fig. 7 Establishment and verification of the original form and horizontal distance model of dissolved oxygen in hydroponic system



(a) 喂食量与不同形式下的鱼池溶氧量空间变化相关性

(b) 光照强度与不同形式下的水槽溶氧量空

图 8 不同形式溶解氧空间变化量与喂食量和光照强度的相关性

Fig. 8 Correlation between the variation of dissolved oxygen space and the feeding intensity and light intensity

表 3 溶解氧空间变化量与喂食量和光照强度估算模型

Tab.3 Estimation model of dissolved oxygen space variation and feeding and light intensity

数据处理方法		喂食量与溶氧量空间变化模型				光照强度与溶氧量空间变化模型			
		建模		验证		建模		验证	
		R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)	R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)	R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)	R ²	RMSE/(mg·L ⁻¹)
鱼池	D	0.87	0.027	0.88	0.021	0.21	0.031	0.31	0.027
	D ²	0.55	0.018	0.43	0.032	0.31	0.029	0.35	0.032
	lgD	0.63	0.021	0.51	0.021	0.13	0.026	0.28	0.021
水培槽	D	0.32	0.019	0.35	0.024	0.59	0.034	0.57	0.017
	D ²	0.24	0.032	0.37	0.031	0.86	0.019	0.70	0.015
	lgD	0.43	0.024	0.41	0.019	0.52	0.025	0.53	0.021

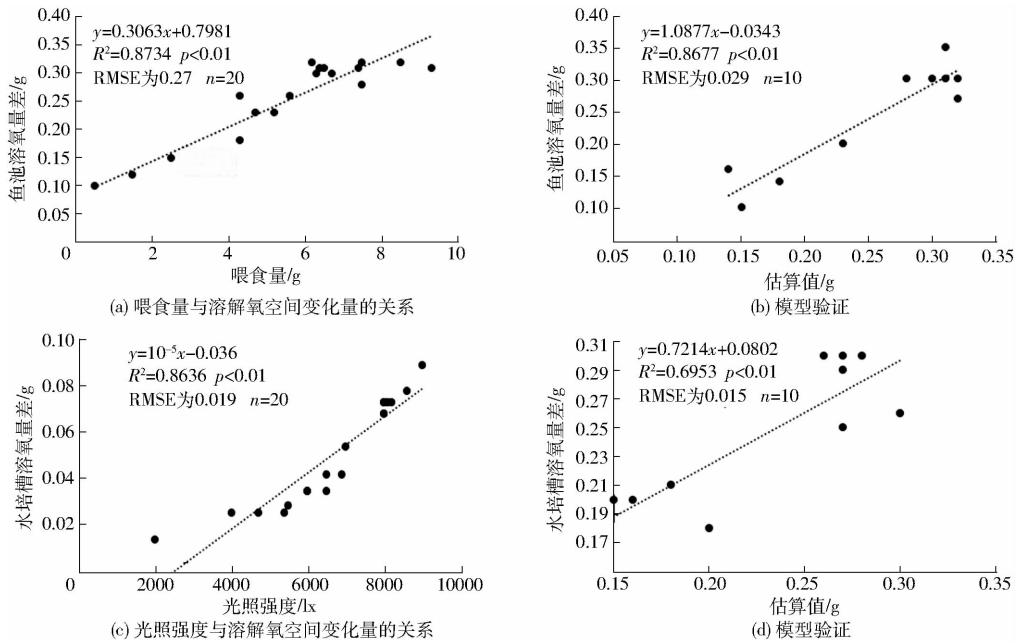


图9 喂食量和光照强度与溶氧量空间变化关系模型及验证

Fig.9 Relationship between feeding quantity and light intensity and dissolved oxygen space

由表3可知,鱼池溶氧量空间变化量预测模型的决定系数 R^2 为0.87, RMSE为0.027 mg/L,用实测样本验证结果显示,模型预测精度较好, R^2 为0.88, RMSE为0.021 mg/L。水培槽溶氧量平方预测模型决定系数 R^2 为0.86, RMSE为0.019 mg/L,用实测样本进行精度验证显示,模型预测精度较好, R^2 为0.70, RMSE为0.015 mg/L。

上述结果与鱼和植物的生长特性是吻合的,由于鱼在进食时比较活跃,呼吸作用较强,喂食量大则鱼的进食时间长,呼吸作用的影响就会更大,对鱼池中溶解氧的影响较大;而水培槽中溶解氧量受光照

强度影响的主要原因与水培植物的根部呼吸有关,环境光照强度越高则植物根部呼吸作用越强,对水培槽中溶解氧量的影响就越大。

2.4 溶氧量日变化规律分析

鱼池和水培槽中各个时段的溶氧量差随时间变化如图10所示,可以看出,鱼池中溶氧量差最大,且波动幅度较为剧烈,发生在每日09:00,15:00鱼池溶氧量差居中,21:00鱼池溶氧量差最小,波动幅度最平缓;水培槽中溶氧量差最大,且波动幅度较为剧烈,发生在每日15:00,09:00水培槽中溶氧量差居中,21:00水培槽中溶氧量差最小,波动幅度最平缓。

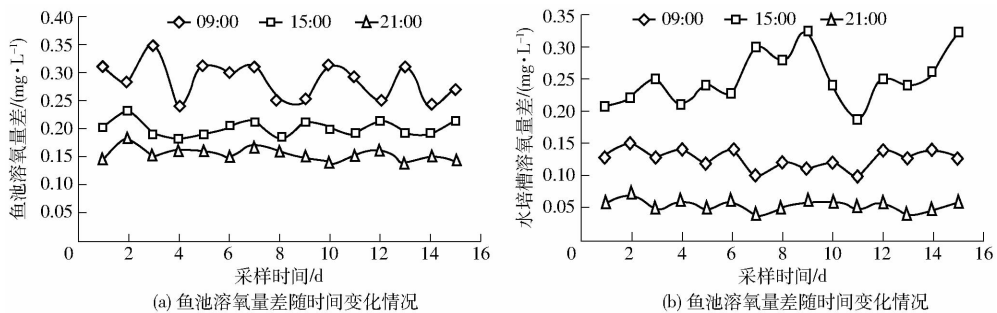


图10 鱼池和水培槽中空间溶氧量随时间变化情况

Fig.10 Variation of dissolved oxygen in the fish pond and culture tank with time

系统总溶氧量随时间变化如图11所示,其一般规律是白天呈现下降趋势,夜间则呈现上升趋势。这一现象是由于白天鱼的活跃程度高则消耗较多的溶氧;同时白天光照强度高,植物光合作用旺盛,根须为了给茎叶输送养分而消耗较多的溶氧。而系统中位于水处理槽的增氧装置始终以恒定的功率运行。由于日间系统的耗氧量大于增氧量,则系统总溶氧量呈持续下降趋势;夜间系统的增氧量大于耗

氧量,则系统总溶氧量呈上升趋势。

3 结论

(1) 鱼池中溶解氧空间变化整体呈现随垂直深度增加而减小的趋势。鱼池中溶解氧空间变化量受喂食量的影响较大,所建立的溶氧量空间变化量与喂食量的关系模型验证的决定系数 R^2 为0.88。

(2) 水培槽中溶氧量呈现随距鱼池水平距离增

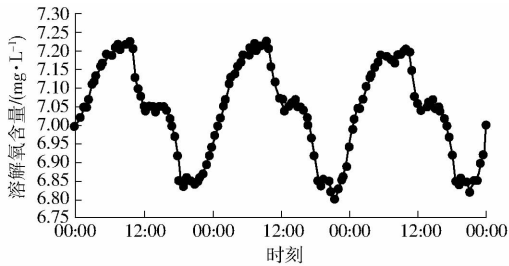


图 11 溶解氧随时间变化情况

Fig. 11 Dissolved oxygen over time

加而减小的趋势,水培槽中 09:00 溶氧量对数形式、

15:00 溶氧量线性形式和 21:00 溶氧量平方形式分别与距离的线性关系显著。不同时刻水培槽中溶氧量受光照强度影响较大,且与光照强度呈线性关系。

(3)系统总溶氧量每日变化波动相似,白天由于鱼池和水培槽中鱼菜耗氧量增大,超过系统中增氧设备的补充能力,导致总溶氧量下降;在清晨和黄昏,系统溶解氧充耗平衡;夜间鱼池、水培槽耗氧量降低,小于增氧设备的补充能力,总溶氧量呈现平稳上升趋势。

参 考 文 献

- 1 丁永良,张明华,张建华,等. 鱼菜共生系统的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(5):70-75.
DING Yongliang, ZHANG Minghua, ZHANG Jianhua, et al. Researches on fish and vegetable co-existing system[J]. Journal of Fisheries of China, 1997, 4(5):70-75. (in Chinese)
- 2 张明华,丁永良,杨菁,等. 鱼菜共生技术及系统工程研究[J]. 渔业信息与战略, 2004, 19(4):7-12.
ZHANG M H, DING Y L, YANG J, et al. A study on fish and vegetable co-existing technique and systems engineering[J]. Modern Fisheries Information, 2004, 19(4):7-12. (in Chinese)
- 3 丁永良,兰泽桥,张明华. 工业化封闭式循环水养鱼污水资源化[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(1):124-130.
DING Y L, LAN Z Q, ZHANG M H. Aquaculture sewage resources of industrialized closed circulating system—a typical eco-circulating economy model fish and vegetable symbiotic system[J]. Chinese Fisheries Economics, 2010, 28(1):124-130. (in Chinese)
- 4 SONG Chao, CHEN Jiazhang, QIU Liping, et al. Ecological remediation technologies of freshwater aquaculture ponds environment [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(1):94-97
- 5 汤佩武. 鱼菜共生与生物絮团水质调控技术在西北盐碱池塘的应用研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014.
- 6 SUTTON R J, LEWIS W M. Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants[M]. Southern Illinois University Fisheries and Illinois Aquaculture Center, Work report. Jan 1982.
- 7 BUZBY K M, LIN L. Department Scaling aquaponic systems: balancing plant uptake with fish output [J]. Aquaculture Engineering, 2014, 63:39-44.
- 8 HUSSAIN T, VERMA A K, TIWARI V K, et al. Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. *koi* (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system[J]. Aquaculture Int, 2015, 23:369-384.
- 9 LOVE D C, UHL M S, GENELLO L. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States[J]. Aquaculture Engineering, 2015, 68:19-27.
- 10 LOVE D C, FRY J P, LI X, et al. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey [J]. Aquaculture, 2015, 435:67-74.
- 11 LOVE D C, FRY J P, GENELLO L, et al. An international survey of aquaponics practitioners [J]. PLoS ONE, 2014, 9(7): e102662.
- 12 JONATHAN S M, DEAKER R, ROGERS G. Inoculation effect of azospirillum baselines on basil grown under aquaponics production system[J]. Org. Agr., 2015, DOI 10.1007/s13165-015-0115-5.
- 13 刘海英,曲克明,马绍赛. 养殖水体中溶解氧的变化及收支平衡研究概况[J]. 渔业科学进展, 2005, 26(2):79-84.
LIU H Y, QU K S, MA S S. Survey of both the variation and the absorption and consumption budget of dissolved oxygen in culture ponds[J]. Marine Fisheries Research, 2005, 26(2):79-84. (in Chinese)
- 14 魏小岚,李纯厚,颜晓勇,等. 对虾高位池循环水养殖水体悬浮物等环境因子的变化特征[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1):11-15.
WEI X L, LI Chunhou, XIE X Y, et al. On variation features of the aquatic environmental factors due to the suspending substances in the terraced shrimp-culturing ponds with water-recycling systems [J]. Journal of Safety & Environment, 2012, 12(1):11-15. (in Chinese)
- 15 崔峰. 池塘水中溶解氧变化规律的分析[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999(3):73-75.
CUI Feng. Analysis of changeable regularity of dissolved oxygen in pond [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 1999(3):73-75. (in Chinese)
- 16 宋卫堂,张树阁. 营养液动态液位法的原理及其增氧效果[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2):194-198.
SONG W T, ZHANG S G. Principle and efficiency of oxygen enrichment of dynamic solution surface in nutrient solution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2):194-198. (in Chinese)
- 17 陈海生,崔绍荣,苗香雯. 深水培栽培櫻桃番茄营养液溶氧量变化分析[J]. 农机化研究, 2005, 27(2):174-175.
CHEN H S, CUI S R, MIAO X W. Study on variation of dissolved oxygen content in DFT system for cherry tomato culture [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27(2):174-175. (in Chinese)
- 18 陈艳丽,高新生,王吉庆,等. DFT 水培生菜叶面积与根系耗氧的相关分析[J]. 热带作物学报, 2007, 28(3):19-22.
CHEN Yanli, GAO Xinsheng, WANG Jiqing, et al. Study on the oxygen consumption law of the roots about lettuce in DFT [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2007, 28(3):19-22. (in Chinese)
- 19 王汝祥,徐志豪,季鹰,等. NFT 无土栽培营养液溶氧量的研究[J]. 农业工程学报, 1991, 7(4):55-62.
WANG Ruxiang, XU Zhihao, JI Ying, et al. Study on oxygen content of nutrient solution in NFT system of hydroponic culture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1991, 7(4):55-62. (in Chinese)
- 20 BOYB C E, ROMAIRE R P, JOHNSTON E. Predicting early morning dissolved oxygen concentration in channel catfish ponds [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1978, 107:484-492.