

# 稻鱼共作对养殖池塘沉积物-水界面微观剖面理化性质的影响

秦琳<sup>1,2</sup> 刘耀斌<sup>2</sup> 李凤博<sup>2</sup> 冯金飞<sup>2</sup> 吴殿星<sup>1,\*</sup> 方福平<sup>2,\*</sup>

(<sup>1</sup>浙江大学 农业与生物技术学院, 杭州 310029; <sup>2</sup>中国水稻研究所, 杭州 310006; \* 通讯联系人, E-mail: dxwu@zju.edu.cn, fangfuping@caas.cn)

## Impacts of Rice-Fish Co-culture on the Physical and Chemical Variables of the Microprofiles at Sediments-Water Interface in an Intensive-culture Pond

QIN Lin<sup>1,2</sup>, LIU Yao-bin<sup>2</sup>, LI Feng-bo<sup>2</sup>, FENG Jin-fei<sup>2</sup>, WU Dian-xing<sup>1,\*</sup>, FANG Fu-ping<sup>2,\*</sup>

(<sup>1</sup>College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; <sup>2</sup>China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; \* Corresponding author, E-mail: dxwu@zju.edu.cn; fangfuping@caas.cn)

QIN Lin, LIU Yaobin, LI Fengbo, et al. Impacts of rice-fish co-culture on the physical and chemical variables of the microprofiles at sediments-water interface in an intensive-culture pond. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(6): 647-652.

**Abstract:** An experiment was carried out to investigate the physical and chemical variables in sediment-water interface of yellow catfish pond with and without rice planting. The results showed that rice-fish co-cultures slowed down the decrease of O<sub>2</sub> concentration around the sediment-water interface, and increase the O<sub>2</sub> penetration depths by 71.4%, comparing with fish monoculture pond. Additionally, rice-fish co-culture increased the Eh value, and improved the aerobic condition in the sediment of pond. Rice-fish co-culture also decreased the pH around sediment-water interface. The pH of rice-fish co-culture pond was lower than that of monoculture pond by one unit. These results indicated that rice growing changed the microenvironment of the sediment-water interface of fish pond, which may affect the migration and transformation of elements around this interface.

**Key words:** rice; fish culture pond; sediment-water interface; microelectrode; vertical profile

秦琳, 刘耀斌, 李凤博, 等. 稻鱼共作对养殖池塘沉积物-水界面微观剖面理化性质的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(6): 647-652.

**摘要:** 采用微电极系统研究了黄颡鱼-水稻共作和黄颡鱼单养两种模式下沉积物-水界面基本理化性质的变化。研究表明,与黄颡鱼单养相比,黄颡鱼-水稻共作可使沉积物-水界面附近 O<sub>2</sub> 浓度下降速率减慢, O<sub>2</sub> 渗透深度增加 71.4%, 并使界面 Eh 值升高, 改善塘底沉积物-水界面厌氧状况; 黄颡鱼-水稻共作降低了界面附近 pH 值, 比黄颡鱼单养低约一个单位。以上研究结果表明, 养殖池塘种植水稻改变了沉积物-水界面的微环境, 可能会影响界面物质迁移转化过程。

**关键词:** 水稻; 养殖池塘; 沉积物-水界面; 微电极; 垂直剖面

**中图分类号:** S181.6; S511.047

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2016)06-0647-06

池塘养殖在我国淡水水产品生产与供给中占重要地位。据统计,我国池塘养殖水产品产量占淡水水产品总量的 70.6%<sup>[1]</sup>。为了提高产量,我国池塘养殖普遍采用高密度精养模式,大量残饵和水产动物排泄物导致池塘以及周边水体富营养化问题日益严重<sup>[2,3]</sup>。沉积物是塘体中冗余养分重要的汇与源。在养殖池塘中,超过 70% 的冗余养分以残饵、鱼虾排泄物等形式沉积在底泥表层<sup>[4]</sup>,这些养分物质可以通过沉积物-水界面释放到上层水体中。可见,沉积物-水界面的养分迁移交换是影响上覆水体营养

水平和环境质量的重要过程<sup>[5]</sup>。而这一过程易受到界面溶解氧、氧化还原电位、pH 值等理化性状的影响。因此,研究沉积物-水界面的微环境特征及其理化性状的微观剖面分布,对于调控塘体养分循环,减轻水体富营养化具有重要意义。

池塘种稻是一种新型的基于养殖池塘的稻鱼共作模式。以往研究发现<sup>[6]</sup>,池塘种稻可以显著降低水体营养盐含量以及水体 COD、pH 值等,对于减轻养殖池塘富营养化污染以及改良水质具有显著作用。在池塘种稻模式中,水稻直接种植于池塘底泥

收稿日期: 2016-05-05; 修改稿收到日期: 2016-07-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31400379); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15C030002)。

中,水稻根系的生长必然会影响沉积物-水界面微环境。以往对沉积物-水界面微环境的研究,大多集中于海洋、湖泊、河流等自然生态系统<sup>[7-9]</sup>,以及轮叶黑藻等自然水生植物<sup>[10,11]</sup>,而对养殖池塘研究较少,且以往对水稻根际微环境的研究主要侧重于稻田浅水环境<sup>[12]</sup>,缺乏对养殖池塘这种深水环境下水稻根际作用的深入研究。由于水体环境、动植物类型以及人工干预等因素的差异,稻作池塘沉积物-水界面微环境的特征以及水稻的根际效应可能与自然水体存在差异。对于沉积物-水界面环境的研究,常规分层采样分析方法容易破坏界面、扰动沉积物,不利于准确监测沉积物-水界面微环境的变化<sup>[13]</sup>。近年来,随着微电极技术的发展,可以直接测量沉积物-水界面微米尺度的溶解氧等理化指标的变化,为解析沉积物-水界面微环境的变化提供了有力工具<sup>[14,15]</sup>。

本研究以黄颡鱼塘种稻模式为例,通过小区试验,利用微电极系统研究稻鱼共作和单养鱼池塘沉积物-水界面溶解氧、氧化还原电位和 pH 值的微米尺度剖面分布特征,分析了水稻生长对沉积物-水界面微环境的影响,以增加对池塘种稻这种新型鱼稻共生模式调控水体养分作用机制的科学认识。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验在浙江省杭州市中国水稻研究所试验基地进行。试验设置黄颡鱼-水稻共作(RF)和黄颡鱼单养(F)两个处理,每个处理 3 个重复。试验小区是由多年养殖池塘中围隔出大小一致的水泥池建设而成,每个水泥池 80 m<sup>2</sup>(10 m×8 m),池深 1.5 m。

种稻小区选用高秆型鱼塘专用水稻品种,2015 年 5 月上旬育秧,6 月上旬移栽于小区中部,移栽密度为 60 cm×60 cm,种植面积约占小区总面积的 50%。7 月上旬在小区投放 2.5~3.0 cm 长黄颡鱼苗,投放量为 150 000 尾/hm<sup>2</sup>,且均按常规养殖方法进行养殖管理。小区水深随水稻生长不断增加,种稻小区和不种稻小区保持相同水位。水稻于当年 11 月上旬收获,黄颡鱼于水稻收获后一次性捕获。

### 1.2 样品采集

2015 年于稻鱼共作的中期(8 月)采集沉积物柱状样。先用有机玻璃取水器采集 6 个小区上覆水体水样,再采用无扰动沉积物采样装置采集对应小区

沉积物柱状样<sup>[16]</sup>,将采集后的有机玻璃采样管底部塞子用胶带封牢,并使用不透光锡箔纸包裹整个采样管以保持避光状态。

6 个小区水样和土样采集时间与柱状样同步,分别用于水体和底泥基础理化指标测定。在小区的四个采样点用取样器于水面下 10 cm 进行水样采集,再将水样混合均匀作为待测水样;随后用取样器于采样区取土样约深 20 cm,再将其混合均匀作为待测土样。将采集的样品放入冰盒带回实验室后,水样 4℃ 下保存,在 24 h 内测定;土样风干后混匀过筛,待测。

### 1.3 样品分析测定

对采集的塘底沉积物柱状样用虹吸法抽取上层水,再用虹吸法沿管壁注入上覆水(经 0.45 μm 滤膜过滤),并使所有柱状样上层水高度都保持在 5 cm,静置 24 h 稳定后待测<sup>[7]</sup>。采用 Unisense 微电极测量系统,先将 DO、pH 和 Eh 电极连接在主机上进行校正,调节相应参数后,再依次选用微电极对待测样品沉积物-水界面进行无扰动测定,每个柱子测定 3 个平行剖面后求平均值,并分析沉积物-水界面垂直剖面的变化趋势。

水样测定指标主要包括 pH 值、溶氧(DO)量、叶绿素 a 含量(Chl-a)、生物需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量、硝态氮含量(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和可溶性磷(DP)含量。水体 pH 值和 DO 分别采用梅特勒-托利多手持 pH 仪和 YSI 光学溶氧仪 proODO 现场测定;Chl-a 含量采用热乙醇提取法测定;BOD 采用标准稀释法测定;COD 含量用重铬酸钾法测定;水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,分别采用靛酚蓝比色法、紫外分光光度法和钼锑抗比色法来测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 DP 含量。底泥中 pH 值采用电位法测定;Eh 值采用 FJA-6 型氧化还原电位(ORP)去极化法全自动测定仪测定;氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量用氯化钾溶液提取-分光光度法测定;速效磷(A-P)含量采用 NaHCO<sub>3</sub> 提取法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 池塘种稻对水体和底泥基础性质的影响

黄颡鱼-水稻共作(RF)和黄颡鱼单养(F)小区底泥和上覆水体的基础性质如表 1 所示。RF 处理底泥中 pH、氨态氮和硝态氮含量均显著低于 F 处

表 1 黄颡鱼-稻共作和黄颡鱼单养小区底泥和上覆水体基础性质

Table 1. Basic properties of sediment and overlying water in yellow catfish ponds with and without rice planting.

取样部位 Sampling position	指标 Index	黄颡鱼-稻共作 RF	黄颡鱼单养 F
底泥 Sediment	pH 值 pH value	6.23±0.19	6.59±0.18
	Eh/mV	390.44±7.20	274.27±20.41
	氨态氮含量 Ammonia nitrogen content / (mg · kg <sup>-1</sup> )	9.89±0.40	11.21±0.40
	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content / (mg · kg <sup>-1</sup> )	30.03±3.06	42.37±2.93
	速效磷含量 Available phosphorus content / (mg · kg <sup>-1</sup> )	13.41±0.62	12.96±0.81
上覆水 Overlying water	pH 值 pH value	7.18±0.05	7.57±0.08
	溶氧量 DO / (mg · L <sup>-1</sup> )	6.09±0.21	7.27±0.07
	叶绿素 a 含量 Chl-a / (μg · L <sup>-1</sup> )	7.25±1.28	12.25±1.94
	生物需氧量 BOD / (mg · L <sup>-1</sup> )	4.12±0.18	6.12±0.23
	化学需氧量 COD / (mg · L <sup>-1</sup> )	48.66±1.74	62.33±6.93
	氨态氮含量 Ammonia nitrogen content / (mg · kg <sup>-1</sup> )	0.43±0.01	0.79±0.11
	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content / (mg · kg <sup>-1</sup> )	1.27±0.05	1.44±0.09
	速效磷含量 Available phosphorus content / (mg · g <sup>-1</sup> )	4.90±1.10	5.20±0.70

RF, Yellow catfish pond with rice planting; F, Yellow catfish pond without rice planting.

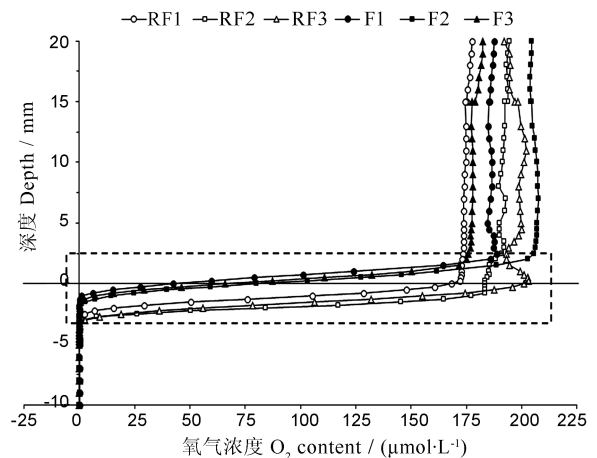
理,分别降低了 5%、11.8% 和 29.1%,但 Eh 较 F 处理增加了 42.4%。RF 处理上覆水体的 pH 值、氨态氮和硝态氮含量分别比 F 处理显著降低 5.2%,45.6% 和 11.8%。RF 上覆水体 DO 比 F 处理降低了 16.2%,且 Chl-a、BOD 和 COD 含量分别降低了 40.8%、32.7% 和 21.9%。

## 2.2 池塘种稻对沉积物-水界面 O<sub>2</sub> 剖面分布的影响

图 1 为 RF(黄颡鱼-水稻共作)和 F(黄颡鱼单养)处理 3 个小区沉积物-水界面附近的 O<sub>2</sub> 剖面分布。从图中可以看出,RF 和 F 小区沉积物-水界面 O<sub>2</sub> 随深度变化的垂向分布趋势相近,即从界面以上 20 mm 至以下 10 mm O<sub>2</sub> 浓度整体上都是表现出随深度降低而降低的趋势,待 O<sub>2</sub> 浓度降至零时保持基本稳定的状态。RF 和 F 的差异主要表现在临近界面的 2.5 mm 内,即图中的虚线框区域。约从 2 mm 开始,F 处理界面 O<sub>2</sub> 浓度下降较快,开始低于 RF。在界面以下,F 处理 O<sub>2</sub> 扩散仅渗透到 1.75 mm 其浓度即开始下降为零;而 RF 处理 O<sub>2</sub> 扩散渗透到 3.00 mm 才下降为零。这些结果表明,池塘种稻改善了塘底沉积物-水界面厌氧状况,使沉积物-水界面附近 O<sub>2</sub> 浓度下降速率减慢,且增加了界面以下 O<sub>2</sub> 渗透深度。

## 2.3 池塘种稻对沉积物-水界面 Eh 剖面分布的影响

沉积物-水界面附近 Eh 剖面分布如图 2 所示。RF 处理 3 个小区 Eh 值均高于 F 处理。F 处理 3 个小区 Eh 从界面以上 1~3 mm 范围开始表现出



RF1、RF2 和 RF3 分别代表黄颡鱼-水稻共作处理的 3 个小区;F1、F2 和 F3 分别代表黄颡鱼单养的 3 个小区。

RF1,RF2 and RF3 represent three yellow catfish ponds with rice planting; F1,F2 and F3 represent three yellow catfish ponds without rice planting.

图 1 黄颡鱼-水稻共作和黄颡鱼单养池扩建沉积物-水界面附近 O<sub>2</sub> 浓度的垂直变化

Fig. 1. Vertical distribution of the concentration of O<sub>2</sub> near sediment-water interface in rice-fish coculture ponds and yellow catfish monoculture ponds.

急剧下降趋势,而 RF 处理 3 个小区则从界面 0.5~1.5 mm 范围开始急剧下降。F 处理 Eh 值在界面以下 2.5 mm 开始小于零,转变为还原环境,而 RF 处理 Eh 值则在界面以下 4.5 mm 开始小于零。此后,RF 和 F 处理 Eh 值均呈缓慢下降趋势。至界面下 10 mm 时,F 处理 3 个小区 Eh 均值为 -26.8 mV,

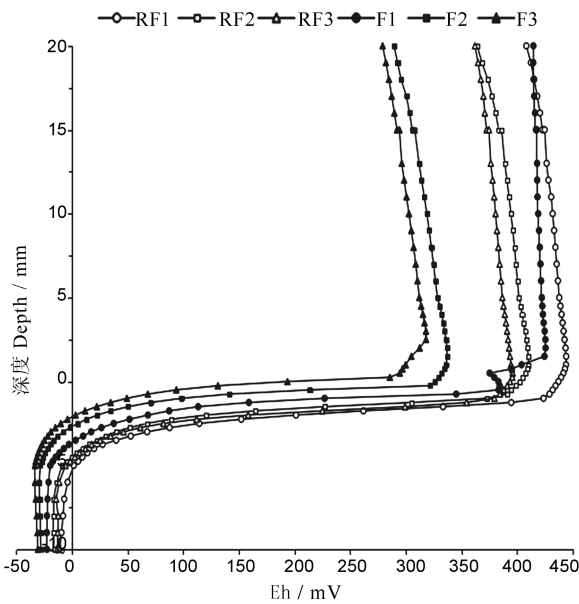


图2 黄颡鱼-水稻共作和黄颡鱼单养池塘沉积物-水界面附近 Eh 的垂直变化

Fig. 2. Vertical distribution of Eh near sediment-water interface in rice-fish coculture ponds and yellow catfish monoculture ponds.

低于 RF 处理(-13.3 mV)。沉积物-水界面 Eh 剖面分布结果表明,池塘种稻显著改善塘底沉积物-水界面氧化还原环境,提高沉积物中氧化还原电位。

#### 2.4 池塘种稻对沉积物-水界面 pH 的剖面分布的影响

RF 和 F 处理沉积物-水界面附近 pH 值变化不大(图 3),均在 0.4 个 pH 单位以内,且都呈现出弱碱性。其中 F 处理 3 个小区的 pH 值为 8.13~8.36;RF 处理 3 个小区 pH 值均低于 F 处理,在 7.03~7.41。在界面附近 2.5 mm 范围内,RF 和 F 处理 pH 值均表现出明显的降低趋势。其中 RF 处理 3 个小区 pH 值降幅为 0.26;F 处理 3 个小区 pH 值降幅为 0.03,低于 RF 处理。此后,在界面以下 2.5 mm 至 6 mm,RF 处理 pH 值又表现为缓慢增加,6 mm 以下稳定至 7.23,而 F 处理 pH 值除个别点外,基本表现为缓慢减小的趋势,最终稳定值为 8.25。

### 3 讨论

在界面微环境的研究中,微电极系统可以无扰动地精确测量界面附近微环境的变化,与传统方法相比具有不可替代的优势。近十几年,微电极系统在沉积物-水界面研究中日益受到重视<sup>[17-19]</sup>。本研

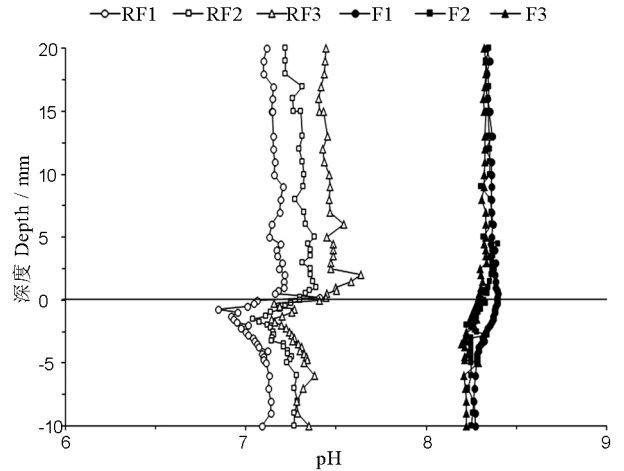


图3 黄颡鱼-水稻共作和黄颡鱼单养池塘沉积物-水界面附近 pH 的垂直变化

Fig. 3. Vertical distribution of pH near sediment-water interface in rice-fish coculture ponds and yellow catfish monoculture ponds.

究采用微电极系统对稻鱼共作养殖池塘沉积物-水界面的微环境进行了研究。研究结果显示,微电极系统电极灵敏度高,能够精确地监测池塘沉积物-水界面附近 DO、pH 等理化性状的微米级变化,且不同剖面的测量结果表现出较好的连续性和重现性。但在研究中发现,微电极系统也存在一些有待改进之处,例如测量界面微环境的电极尖端为玻璃材质,易损坏,且电极价格较高,研究成本高;由于要测定微米级变化,测试行程较长,且每个柱芯都要测量多个剖面,测试过程耗时较长。

本研究的结果显示,养殖池塘沉积物-水界面的 O<sub>2</sub> 浓度剖面分布与以往自然水体的研究结果存在一定差异<sup>[8,11,20,21]</sup>。例如本研究中养殖池塘 O<sub>2</sub> 浓度和渗透深度要高于 Bryant 等<sup>[20]</sup>对 Carvins Cove 水库沉积物-水界面的监测结果,但低于王敬富等<sup>[8]</sup>对红枫湖的研究结果。这可能主要是因为不同水体的水体深度、沉积物厚度、生物扰动等因素的差异造成的。池塘种稻能够改变沉积物-水界面微环境,使得沉积物-水界面有氧层厚度增加,氧化还原电位升高(图 1 和图 2),这一过程主要归因于水稻根际泌氧作用。水稻种植在养殖池塘,长期的渍水环境使得其植株体内形成大量通气组织,叶鞘上由气孔进入的氧气及在叶鞘中由光合作用释放的氧气通过叶鞘和茎秆中的通气组织运输到水稻根系<sup>[22,23]</sup>。水稻径向泌氧部分供根系呼吸,同时有大约 30%~40% 的氧气由根轴径向运输到根际土壤,并伴随释放其

他的氧化性物质,在根际周围形成一个微域的“氧化圈”<sup>[24]</sup>,从而增加沉积物中 O<sub>2</sub> 浓度,提高氧化还原电位。

沉积物中 pH 值是表征土壤化学性质的重要参数,本研究结果显示池塘种稻能改变水稻根际微环境,降低上覆水和沉积物的 pH 值(图 3)。这主要是由于水稻生长过程中,根系会向土壤和水体中分泌大量有机酸(如酒石酸等)<sup>[25]</sup>,水稻根际微生物耗氧降解有机质也会向土壤和水体中释放酸性物质<sup>[7]</sup>,从而使稻鱼共作养殖池塘界面附近 pH 值低于单养鱼池塘。对比以往研究结果发现,水稻对沉积物-水界面附近 pH 值的影响要大于轮叶黑藻<sup>[11]</sup>。在本研究中,稻鱼共作和单养鱼池塘界面附近 pH 差值接近 1,而田翠翠等<sup>[11]</sup>的研究结果显示,种植轮叶黑藻后,沉积物-水界面 pH 值变化小于 0.5。

本研究初步揭示了池塘种稻对塘体沉积物-水界面微观剖面理化性质的影响,但未考虑水稻生长发育特性。由于水稻在不同生育期的生物量及对水体养分的积累量不同<sup>[6,26]</sup>,因而,在稻鱼共作模式下,处于不同生育阶段的水稻对养殖池塘沉积物-水界面微环境的影响可能也存在差异。已有研究表明<sup>[11]</sup>,沉积物中黑藻培养时间不同,其根际微环境中 DO、pH 和 Eh 的垂直变化存在差异。因此,为了更加全面地分析稻鱼共作对塘体沉积物微环境的影响,水稻不同生育期的研究还需进一步完善。沉积物-水界面是一个微生物活动频繁、有高度生物活性的复杂微环境,为了较为全面地研究沉积物-水界面微观界面的特征,在今后还需增加更多指标的微观剖面分析,如 H<sub>2</sub>S 和 N<sub>2</sub>O 剖面特性分析等。此外,对沉积物-水界面微环境的研究,还需要和界面附近氮磷迁移转化等化学或生物过程联系在一起,为解析稻鱼共作系统对沉积物-水界面生物化学过程的作用机制提供微观依据。

#### 4 结论

1) 池塘种稻能够显著改善塘体水质,改变沉积物的基础理化性质。与黄颡鱼单养池塘相比,黄颡鱼-水稻共作池塘上覆水中 pH 值、Chl-a、COD、BOD、氨态氮和硝态氮含量都有所降低。表层底泥中 pH、氨态氮和硝态氮含量降低,但 Eh 升高。

2) 池塘种稻能够显著改变养殖池塘沉积物-水界面微环境。池塘种稻改善了塘底沉积物-水界面厌氧状况,使沉积物-水界面附近 O<sub>2</sub> 浓度下降较慢,

增加了界面以下 O<sub>2</sub> 渗透深度;池塘种稻改变了界面附近氧化还原环境,单养鱼池塘界面以下 2.5 mm 进入还原环境,而稻-鱼共作池塘 Eh 值在界面以下 4.5 mm 才开始小于零;池塘种稻也显著降低沉积物-水界面附近 pH 值。

3) 微电极测量系统对养殖池塘沉积物-水界面的测量结果表现出很好的连续性,说明利用微电极可实现对养殖池塘沉积物-水界面原位无扰动的高分辨率测定。因此,微电极测量系统有助于分析水稻生长与沉积物-水界面微环境变化的相互关系,在探讨水稻生长对水体养分的调控作用机制方面可发挥重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 2013 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社.  
Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook 2013. Beijing: China Agriculture Press.(in Chinese)
- [2] Cao L, Wang W, Yang Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environ Sci Pollut Res*, 2007, 14(7): 452-462.
- [3] Li X, Li J, Wang Y, et al. Aquaculture industry in China: Current state, challenges, and outlook. *Rev Fish Sci*, 2011, 19(3): 187-200.
- [4] Casillas-Hernández R, Magallón-Barajas F, Portillo-Clarck G, et al. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal. *Aquaculture*, 2006, 258(1-4): 289-298.
- [5] 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉. 沉积物-水界面的生物地球化学作用. *地球科学进展*, 1996, 11(2): 191-197.  
Wu F C, Wan G J, Cai Y R. Biogeochemical processes at the sediment-water interface. *Adv Earth Sci*, 1996, 11(2): 191-197.(in Chinese)
- [6] 李凤博, 冯金飞, 周锡跃, 等. 鱼塘种稻对养殖水体营养物质的去除作用研究. *中国水稻科学*, 2015, 29(2): 174-180.  
Li F B, Feng J F, Zhou X Y, et al. Nutrients removal from fish pond by rice planting. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(2): 174-180.(in Chinese with English abstract)
- [7] 王流通, 刘凌, 钱宝, 等. 盐城大纵湖疏浚前后沉积物-水界面环境化学变化. *水资源保护*, 2013, 29(2): 33-37.  
Wang L T, Liu L, Qian B, et al. Changes in environmental chemistry at water-sediment interface before and after dredging of Dazong Lake in Yancheng City. *Water Res Prot*, 2013, 29(2): 33-37.(in Chinese with English abstract)
- [8] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 微电极测量系统在湖泊沉积物-水界面生物地球化学过程研究中的应用. *地球与环境*, 2013, 41(1): 65-70.

- Wang J F, Chen J A, Zeng Y, et al. Application of microelectrode measurement system in research on biogeochemical processes across the water-sediment. *Earth & Environ*, 2013, 41(1): 65-70.(in Chinese with English abstract)
- [9] 王永平, 朱广伟, 洪大林, 等. 太湖草/藻型湖区沉积物-水界面环境特征差异. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 199-208.  
Wang Y P, Zhu G W, Hong D L, et al. Environmental characteristics of sediment-water interface of phytoplankton and macrophyte dominated zones in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2013, 25(2): 199-208.(in Chinese with English abstract)
- [10] 王永平, 朱广伟, 洪大林, 等. 沉水植物对沉积物-水界面环境特征的影响. *环境科学研究*, 2012, 25(10): 1133-1139.  
Wang Y P, Zhu G W, Hong D L, et al. Effects of macrophytes on the environmental characteristics of sediment-water interface. *Res Environ Sci*, 2012, 25(10): 1133-1139.(in Chinese with English abstract)
- [11] 田翠翠, 王纯波, 李倩, 等. 轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)对沉积物-水界面微观剖面理化参数的影响. *湖泊科学*, 2013, 25(5): 715-722.  
Tian C C, Wang C B, Li Q, et al. Effects of *Hydrilla verticillata* on physical and chemical variables of the microprofiles at sediment-water interface. *J Lake Sci*, 2013, 25(5): 715-722.(in Chinese with English abstract)
- [12] 赵峰, 王丹英, 徐春梅, 等. 水稻氧营养的生理、生态机制及环境效应研究进展. *中国水稻科学*, 2009, 23(4): 335-341.  
Zhao F, Wang D Y, Xu C M, et al. Progress in research on physiological and ecological response of rice to oxygen nutrition and its environment effects. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(4): 335-341.
- [13] 刘素美, 张经. 沉积物间隙水的几种制备方法. *海洋环境科学*, 1999, 18(2): 66-71.  
Liu S M, Zhang J. Sediment pore water sampling techniques. *Marine Environ Sci*, 1999, 18(2): 66-71.(in Chinese with English abstract)
- [14] Armstrong J, Armstrong W. Rice and phragmites: Effects of organic acids on growth, root permeability, and radial oxygen loss to the rhizosphere. *Am J Bot*, 2001, 88(8): 1359-1370.
- [15] Jackson M B, Armstrong W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submerge. *Plant Biol*, 1999, 1(3): 274-287.
- [16] 李键, 张维, 陈敬安, 等. 一种可实现不同水深条件下采样的湖泊沉积物柱芯采样装置. *气球与环境*, 2011, 39(1): 121-124.  
Li J, Zhang W, Chen J A, et al. A newly developed sampler for collecting lake sediment cores. *Earth & Environ*, 2011, 39(1): 121-124.(in Chinese with English abstract)
- [17] Breuer E R, Law G T W, Woulds C, et al. Sedimentary oxygen consumption and microdistribution at sites across the Arabian Sea oxygen minimum zone (*Pakistan margin*). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(6/7): 296-304.
- [18] Schreiber F, Polerecky L, Beer D D. Nitric oxide microsensor for high spatial resolution measurements in biofilms and sediments. *Anal Chem*, 2008, 80(4): 1152-1158.
- [19] Schramm A, Larsen L H, Revsbech N P, et al. Structure and function of a nitrifying biofilm as determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. *Appl Environ Microbiol*, 1996, 62(12): 4641-4647.
- [20] Bryant L D, Gantzer P A, Little J C. Increased sediment oxygen uptake caused by oxygenation-induced hypolimnetic mixing. *Water Res*, 2011, 45: 3692-3703.
- [21] Mügler C, Rabouille C, Bombled B, et al. Impact of spatial heterogeneities on oxygen consumption in sediments: Experimental observations and 2D numerical modeling. *J Geochem Exp*, 2012, 112: 76-83.
- [22] 孟冬梅. 水稻根系通气组织的泌氧能力研究. 北京: 北京林业大学, 2008.  
Meng D M. Study on the capability of rice root aerenchyma to oxygen transportation. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.(in Chinese with English abstract)
- [23] Armstrong W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and waterlogging. *Physiol Plant*, 1971, 25(2): 192-197.
- [24] 李奕林. 水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系. *生态学报*, 2012, 32(7): 2066-2074.  
Li Y L. Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(7): 2066-2074.(in Chinese with English abstract)
- [25] 旷远文, 温达志, 钟传文, 等. 根系分泌物及其在植物修复中的作用. *植物生态学报*, 2003, 27(5): 709-717.  
Kuang Y W, Wen D Z, Zhong C W, et al. Root exudates and their roles in phytoremediation. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(5): 709-717.(in Chinese with English abstract)
- [26] 邓志强. 人工浮床净化污染水体中氮磷的研究. 吉林: 中国科学院大学, 2013.  
Deng Z Q. Study on nitrogen and phosphorus removal by artificial floating beds. Jilin: University of Chinese Academy of Science, 2013. (in Chinese with English abstract)