

# 水稻对富营养化水体生态修复效应及其研究进展

孙志萍<sup>1,2,#</sup> 秦琳<sup>3,#</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; <sup>3</sup> 四川省农业科学院 分析测试中心; <sup>#</sup>共同第一作者; <sup>\*</sup>通讯联系人, E-mail: dxwu@zju.edu.cn, fangfuping@caas.cn)

## Advances in Restoration Effects of Rice Growing on Eutrophic Water

SUN Zhiping<sup>1,2,#</sup>, QIN Lin<sup>3,#</sup>, LIU Yaobin<sup>2</sup>, LI Fengbo<sup>2</sup>, FENG Jinfei<sup>2</sup>, WU Dianxing<sup>1,\*</sup>, FANG Fuping<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; <sup>3</sup> Analysis and Determination center, Sichuan Academy of Agricultural Sciences; <sup>#</sup> These authors contributed equally to this work; <sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: dxwu@zju.edu.cn, fangfuping@caas.cn)

**Abstract:** Eutrophication is an important factor limiting sustainable development of agriculture in China. Rice has significant capacity to purify eutrophic water. With *in-situ* and *ex-situ* remediation technologies, rice planting has great potential in restoration of eutrophic water in lakes, large reservoir, sewage river, fertile water from aquaculture pond, the irrigation return flow and domestic wastewater. With a summary of previous studies, We comprehensively compared the effects of rice planting on the restoration of eutrophic water and the removal efficiency of nutrients, and analyzed the technical characteristic and disadvantages in the application of three modes(floating-bed rice planting, paddy wetland and rice-fish co-culture).

**Key words:** rice; eutrophic water; remediation technology; technical mode; mechanism

**摘 要:** 水体富营养化是制约我国农业可持续发展的重要因素。水稻具有显著的水质净化能力, 利用水稻对富营养化水体进行生态修复成为植物修复的一个重要的研究方向。通过文献调研, 总结了水稻对不同富营养化水体(湖泊、水库、污水河道、养殖尾水、农田退水和生活污水)修复效率, 综合分析了不同修复模式(浮床种稻、稻田湿地和稻鱼共作)的技术特点、适用范围和影响因素, 归纳总结了水稻对富营养化水体修复的主要作用机制, 并对下一步的研究提出了相关建议。

**关键词:** 水稻; 富营养化水体; 生态修复; 技术模式; 作用机理

**中图分类号:** S181.6; S511.047

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2018)05-0509-10

水资源是人类及其他一切生物赖以生存的重要物质。然而, 由于人为活动的影响, 目前我国大量湖泊、河流、水库等地表水体都发生了严重的富营养化污染问题<sup>[1]</sup>。形成水体富营养化的污染物主要来源于农业面源污染、生活污水、工业废水以及水产养殖排放的尾水等途径。水体富营养化不仅恶化水源水质, 增加水处理负担和成本, 而且严重影响水体生态平衡<sup>[2-4]</sup>。因此, 有效控制与治理富营养化水体, 提高地表水质量, 对于保护地表水体生态系统的稳定, 保障人类健康生活, 促进社会经济生态的可持续发展都具有非常重要的意义。

目前, 富营养化水体的修复技术主要有化学修复、物理修复和植物修复等, 其中植物修复技术具有修复成本低、效果好、对环境干扰小等优点而被

广泛关注和应用<sup>[5]</sup>。植物修复的技术模式主要有原位和异位修复两种。原位修复就是将修复植物直接种植或浮床种植于污染水体; 异位修复是将富营养化水体排到人工湿地或生态沟渠, 经净化后再利用。在这些模式中, 修复植物的选择是影响净化效果和应用潜力的关键因素。目前全球已发现的高等水生植物多达 6700 余种, 但被利用且产生效果的只有几十种, 且主要是香蒲、芦苇等自然水生植物<sup>[6]</sup>。由于自然水生植物收获后二次利用存在较大问题, 探索适宜水生的粮食或经济作物对水体净化的应用潜力, 成为当前植物修复研究的重要方向<sup>[7]</sup>。

水稻不仅是我国重要的粮食作物, 而且对水体氮磷养分具有较强的吸收同化能力。研究显示<sup>[8]</sup>, 水稻对水体养分的吸收能力仅次于芦苇和菰, 明显高

收稿日期: 2018-01-19; 修改稿收到日期: 2018-03-28。

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)。

于牛筋草、香蒲、美人蕉等水生植物,而且水稻是唯一的可以淹水种植的粮食作物,在修复富营养化水体中具有先天优势。此外,随着我国城镇化的不断发展,耕地面积日益减少,水稻面积扩增日益艰难。因此,采用水稻作为修复植物对于增加水稻种植面积,提高水稻产量具有重要作用。自20世纪90年代以来,国内外许多学者对采用水稻进行富营养化水体的生态修复进行了大量探索。结果显示,水稻对湖泊、水库、污水河道、养殖废水、农田退水、生活污水等不同富营养化水体的均显示出显著的修复能力,具有巨大的应用潜力。本文对以往研究中水稻对不同类型水体的净化效率进行了综合比较,对不同修复模式技术特点和修复机制进行了综合分析。

## 1 水稻对不同类型水体养分净化效率

### 1.1 水稻对湖泊、水库水体富营养化的修复

湖泊富营养化是湖泊水体在自然环境因素和人为活动双重影响下,由于大量营养盐输入而使得湖泊水体逐步从生产力水平低的贫营养状态向生产力水平高的富营养状态转化的一种现象<sup>[9]</sup>。氮和磷是其主要污染指标。在以往研究中,水稻对湖泊水体的净化主要有两种方式:1)以人工浮床为载体种植到水面;2)通过在湖滨无耕作种植水稻来净化水质。邓志强<sup>[10]</sup>采用生态浮床对小兴凯湖进行了7个周期(每10 d为一周期)的水体净化研究,结果表明水稻在前3个周期净化能力逐渐上升,此后达到稳定状态;7个周期内对水体总氮和总磷的平均去除率达到84.0%和85.9%(分别从 $9.63 \pm 0.85$ 、 $1.02 \pm 0.14$  mg/L降至1.56、0.158 mg/L);水稻吸收的氮磷主要集中在地上茎叶部。郑立国等<sup>[11]</sup>采用生态浮床对天鹅湖水质进行了为期4个月的净化。研究结果显示,通过修复,该湖水体总氮、氨态氮和总磷含量分别降低了61.9%、63.1%和80%(分别从3.86、2.33、0.23 mg/L降低到1.47、0.86和0.046 mg/L)。水稻单株氮磷吸收量分别为17.0 g和1.4 g,茎叶吸收量高于根系。郭艳英等<sup>[12]</sup>在滇池湖滨免耕种植水稻,将湖水灌入稻田,经稻田净化后再返回滇池。试验表明,水稻在生长过程中对滇池水体中TP、TN去除率分别达到40.4%~80.7%、43.9%~88.0%。除对水体氮、磷的消减外,水稻湿地还可调节浮游植物的总量和多样性。实验结果显示,浮游植物数量和微囊藻数量在水稻分蘖、孕穗和灌浆期分别减少95.6%~96.2%和95.8%~97.3%,

浮游植物种类从5~6种增加到10~11种,微囊藻的优势度降低了74.2%~96.8%。邱立莉<sup>[13]</sup>利用生态岛技术水面无土种植水稻修复三峡库区富营养化水体,发现水稻在5~6月对总氮和总磷的净化率分别为74.7%~87.2%和83.0%~91.0%,期间水稻在中度富营养化水体的净化效果优于轻度和重度污染水体。在6~7月,水稻对轻度和中度污染水体总氮的净化率有所降低,分别为67.5%和63.6%,对重度污染水体的总氮净化率则增加到98.5%,对水体总磷的净化率均呈增加趋势,达到97%~99%。去除率的变化可能与水体氮磷含量比及水稻生长阶段对养分的吸收能力有关。有研究显示<sup>[14]</sup>,水稻对不同N/P比水体的氮磷去除率不同,在中N/P比(25:1)的水体中,浮床水稻对总氮的净去除率最高。此外,轻度和中度污染水体可能养分不足,限制水稻生长,从而影响水体养分净化率。

### 1.2 水稻对江河水体富营养化的修复

由于工农业的发展和人口增长,越来越多的河流水体被城市生活污水、地表水径流和农业面源污染而呈现重度营养化状态。陈继顺等<sup>[15]</sup>在两条滇池入湖河道开展了漂浮种稻试验,结果表明,两年内,漂浮稻可吸收、降解氮 $115.1 \sim 324.6$  g/m<sup>2</sup>(折合成尿素),磷 $27.7 \sim 138.2$  g/m<sup>2</sup>(折合成普钙)和钾(折合成钾肥) $15.8 \sim 107.5$  g/m<sup>2</sup>。此外,漂浮种稻对水体重金属也有较强的富集能力,对Pb、Cd、Cr、Hg和As的富集能力分别为 $44.4 \sim 230.1$  mg/m<sup>2</sup>、 $1.53 \sim 13.58$  mg/m<sup>2</sup>、 $65.3 \sim 174.8$  mg/m<sup>2</sup>、 $0.106 \sim 1.39$  mg/m<sup>2</sup>和 $2.10 \sim 29.2$  mg/m<sup>2</sup>。富集的重金属主要集中在水稻根系和茎秆,水稻籽粒中重金属含量并没有超过国家限量标准。Zhou等<sup>[16]</sup>选用饲料稻品种,在日本Sannogawa河旁构建了稻田湿地以修复富营养化河水。研究结果显示,稻田湿地对河水有机氮、氨态氮、硝态氮和亚硝态氮的去除量分别为43、10、129和4 mg/(m<sup>2</sup>·d)。在整个水稻生长季节,水体中氮的去除总量可达 $30.6$  g/m<sup>2</sup>。由此可见,水稻植株是水体去除氮素的储存库。然而,氮收支结果显示,稻田湿地模式中,水稻从土壤中也吸收了大量氮素,可能减弱了其对水体氮的净化效果。还有研究认为,在稻田湿地中,土壤会吸附和固持水中氮磷养分,从而增加对水体养分的净化效果<sup>[17]</sup>。

### 1.3 水稻对水产养殖水体富营养化的修复

淡水水产养殖尾水中含有水生动物的排泄物和饵料残渣,富含N、P等营养物质且重金属含量低,可以用来灌溉多数的植物<sup>[18]</sup>。我国也早有将养殖池塘和人工湿地相结合的实践。通过池塘种稻、浮

床栽培水稻和养殖尾水灌溉稻田等方式,可使养殖尾水中富余的营养物质被水稻植株吸收利用,减少养殖尾水中营养物质的积累,从而有效降低养殖水体的富营养化程度。李凤博等<sup>[19]</sup>在养殖池塘原位种植池塘专用水稻来吸收池塘富余养分,结果表明水稻收获时,种稻鱼塘水体总氮含量为 0.49 mg/L,比不种稻池塘低 96.0%;种稻鱼塘水体中总磷含量为 0.08 mg/L,比不种稻鱼塘低 84.5%。水稻可能是通过同化吸收、促进水体中含氮颗粒物质沉降和反硝化作用等来降低水中总氮含量,而水体中总磷的去除则主要受沉积、微生物的同化吸收、沉积物-水界面的磷吸附等间接作用影响。池塘浮床栽培水稻研究表明,水稻生育期内对氮磷的吸收量分别为 118.7 g/m<sup>2</sup> 和 11.1 g/m<sup>2</sup>,表现出较强的氮磷去除能力<sup>[8]</sup>。吴启侠等<sup>[20]</sup>研究了不同水管理模式灌溉稻田对养殖尾水的净化效果,结果表明间歇灌溉排水和间歇灌溉连续排水方式下,稻田湿地系统对污水中氮、磷养分的去除率要高于平衡灌溉方式,且渗径达到 50 cm 时,净化效果明显优于 30 cm。也有研究将养殖池塘周边充裕的土地充当稻田湿地,利用养殖尾水进行水稻灌溉,结果表明对池塘养殖尾水中的 TN、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率高于人工湿地<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 水稻对农田退水和生活污水的修复

农田退水是农田中流经地表和地下进入农田排水沟且最终流向河流的水,其直接排放是河流水体富营养化的重要来源。由于农田退水水量极大,且排放时间和地方分散不集中,一直以来缺乏切实可行的治理方法。现有的治理方法主要有浮床栽培植物修复、人工湿地修复和退水再利用等<sup>[22]</sup>。马克星等<sup>[23]</sup>采用浮床栽培水稻对宁夏灵武农场农田退水进行了净化,试验结果表明,浮床种稻对农田退水氮含量有显著的消减作用。总氮、氨态氮、硝态氮和可溶性磷的去除率分别为 90.3%、100.0%、12.1%和 82.2%,整个水稻季水稻植株吸收总氮量达到 111.5 kg/hm<sup>2</sup>。然而,受养分和生长条件限制,浮床种稻产量仅为当地常规稻田水稻产量 50%,浮床种稻有效穗数较少是限制产量的最主要因素。Feng 等<sup>[24]</sup>和 Takeda 等<sup>[25]</sup>分别在日本 Kokai 河和 Hii 河旁进行农田退水循环灌溉稻田的连续水质监测,结果发现稻田每年最高可减少灌溉水体中的氮、磷达 5.46 和 2.87 kg/hm<sup>2</sup>。通过农田退水灌入稻田静置停留可很大程度上沉积氮磷养分,有效减缓灌溉排水对水源的污染。

城镇和农村生活污水的排放加剧了地表水环

境的恶化,生活污水富含氮磷养分,成为水体富营养化的重要来源。利用稻田湿地修复生活污水,可有效缓解水体富营养化问题,改善水体,且具有成本低、修复效果理想和无二次污染等优点<sup>[26,27]</sup>。李松<sup>[28]</sup>在余杭农业研究站以农村生活污水灌溉稻田湿地,可满足水稻正常生长需要,在保证产量的同时也可有效减少氮素流失。Sun 等<sup>[29]</sup>用人工湿地和稻田湿地组合系统处理农村非点源污染废水,发现每年对总氮、总磷的平均去除量相当于 295 kg/hm<sup>2</sup> 和 25 kg/hm<sup>2</sup>,分别比人工湿地单独处理高 40%和 25%。由此可见,农村生活污水中的 N、P 更容易被稻田湿地去除,若用其取代肥料使用还可有效减少水体中磷素流失和入湖污水中的氮磷含量,最终达到保护水源的目的。

## 2 水稻对水体修复的生态技术模式

技术模式是影响植物修复经济成本、修复效率和适用性的关键因素。目前,水稻对富营养化水体的修复主要是通过生态浮床种稻、稻田湿地和稻鱼共生这三种技术模式。现将这三种模式的技术特点、适用范围和尚待改进之处总结如下。

### 2.1 生态浮床种稻

生态浮床种稻就是运用无土栽培的原理,借助于发泡聚乙烯、合成树脂、合成纤维等材料制作的漂浮床体,将水稻移栽到水面的一种水体污染修复技术<sup>[36]</sup>。目前,一般认为浮床种稻主要通过三方面的作用净化水体养分:1) 水稻直接吸收;2) 改善微环境;3) 根系和浮床基质吸附。生态浮床种稻技术具有修复成本低、效果好、易管理,且有利于重建和恢复生态系统等优点,适用于水体较深、不能直接种植水稻的大型水域,如湖泊、河流和大型养殖池塘等。

生态浮床种稻对富营养化水体的修复受到水稻生长阶段、供试水体中氮磷浓度、浮床覆盖率、浮床基质等因素影响。一般而言,水稻处于生长旺盛期和成熟期时,对氮、磷的吸收速率高于衰老期;污水中氮磷浓度较高时,水稻生长较好,反之,生长会受到抑制;浮床覆盖率越高,根系输氧能力越强,对氮、磷的去除效果也会越好。在实际应用中,水稻成熟后应及时将浮床和水稻植株搬离水体,防止植株衰老腐烂引起二次污染<sup>[37-38]</sup>。随着污水中氮磷养分含量的增加,采用浮床系统对氮磷养分的去除量增加,但去除率有所下降;浮床覆盖率太大会增加成本,降低水稻单株的去除量。生态浮床种稻

表 1 水稻对不同富营养化水体养分净化效果

Table 1. Purification effect of rice growing on different eutrophic water

地点 Location	模式 Model	水源 Source of water	去除量 Remove quantity								
			TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TSS	COD	BOD
湖南 <sup>[11]</sup> Hunan	生态浮床种稻 Ecological floating bed for rice planting	湖南农业大学校内景观湖 Landscape lake in Hunan agricultural university campus	10	6	-	-	0.80	-	-	-	-
重庆 <sup>[13]</sup> Chongqing	生态浮床种稻 Ecological floating bed for rice planting	三峡库区 The Three Gorges Reservoir	2.73	-	-	-	0.07	-	-	-	-
黑龙江 <sup>[10]</sup> Heilongjiang	盆栽模拟种稻 Pot culture	小兴凯湖 Small Xingkai Lake	7.70	-	-	-	0.83	-	-	-	-
云南 <sup>[7]</sup> Yunnan	盆栽模拟种稻 Pot culture	河水 River water	-	13.20	-	-	1.20	-	-	-	-
湖北 <sup>[20]</sup> Hubei	盆栽模拟种稻 Pot culture	长江排污 The Yangtze River drainage	4	-	-	-	-	-	-	-	-
东京 <sup>[16]</sup> Tokyo	稻田湿地 Paddy wetlands	河水 River water	-	10	129	4	-	-	-	-	-
江苏 <sup>[17]</sup> Jiangsu	稻田湿地 Paddy wetlands	河水 River water	29.73	-	-	-	2.92	-	-	-	-
台湾 <sup>[30]</sup> Taiwan	稻田湿地 Paddy wetlands	养殖尾水 Fertile water from fish pond	-	340	-	580	-	-	26700	-	-
筑波 Tsukuba <sup>[31]</sup>	稻田湿地 Paddy wetlands	Kokai 河 Kokai river	398	-	-	-	37	-	-	-	-
湖北 <sup>[32]</sup> Hubei	稻田湿地 Paddy wetlands	养殖尾水 Fertile water from fish pond	109.54~124.36	-	-	-	46.60~47.15	-	-	-	-
宁夏 <sup>[22]</sup> Ningxia	生态浮床种稻 Ecological floating bed for rice planting	农田退水 The irrigation return flow	-	2.13	6.27	-	2.19	9.98	-	-	-
江苏 <sup>[33]</sup> Jiangsu	稻田湿地 Paddy wetlands	农田退水 The irrigation return flow	1.40	-	-	-	0.02	-	-	-	-
广西 <sup>[34]</sup> Guangxi	稻田湿地 Paddy wetlands	农田退水 The irrigation return flow	1.15	-	-	-	0.16	-	-	-	-
黑龙江 <sup>[35]</sup> Heilongjiang	稻田湿地 Paddy wetlands	城镇生活污水 Municipal sewage	-	-	-	-	-	-	58.43	163.27	42.80
浙江 <sup>[28]</sup> Zhejiang	稻田湿地 Paddy wetlands	农村生活污水 Rural domestic wastewater	3.43	-	-	-	6.59	-	-	-	-

TN—总氮; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N—铵态氮; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N—硝态氮; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N—亚硝态氮; TP—总磷; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>—可溶性磷; TSS—总悬浮物; COD—化学需氧量; BOD—生物需氧量; 生态浮床种稻和盆栽模拟种稻模式下, 单株去除量单位为 μg/(L·d); 稻田湿地模式下, 养殖尾水和富营养化河水的去除量单位为 mg/(m<sup>2</sup>·d); 农田退水的去除量单位为 mg/L。  
TN, Total nitrogen; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, Ammonia-N; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, Nitrate-N; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, Nitrite-N; TP, Total phosphorus; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Orthophosphate; TSS, Total suspended solid; COD, Chemical oxygen demand; BOD, Biochemical Oxygen demand. For ecological floating bed for rice planting and potted rice, the unit for remove quantity is μg/(L·d); in paddy wetlands, the unit for fertile water and river irrigation is mg/(m<sup>2</sup>·d); for Kokai River irrigation, mg/m<sup>2</sup>; others, mg/L.

表 2 水稻对水体修复模式及修复机理

Table 2. Model and mechanism of water remediation by rice.

修复模式 Model		修复机理 Mechanism of remediation	优缺点 Advantage and disadvantage
生态浮床 Ecological floating bed	水稻直接吸收; 改善微环境; 根系和浮床基质吸附		优点: 成本较低、效果好、易管理、适用范围广 缺点: 漂浮床体等易产生二次污染
	稻田湿地	水稻生长的吸收利用; 土壤的吸附和土壤微生物的降解	优点: 成本较低、工艺流程简单、运行管理方便 缺点: 受地域限制、二次污染风险大
Paddy wetlands	稻鱼共生	水稻直接吸收; 土壤的吸附和土壤微生物的降解; 改善溶氧	优点: 成本低、操作简单、污染少、生态互惠 缺点: 稻田养鱼受水稻生长期限制, 共生品种有限; 鱼塘种稻适合水深 1.5 m 以下水体
	Rice-fish co-culture	降低沉积物再悬浮等间接作用	

在应用中依然存在需改进之处, 如改造生态浮床<sup>[10-11,13]</sup>和挑选优势水稻品种<sup>[7]</sup>, 以进一步提高生态浮床种稻对富营养化水体的净化能力。比起单一的生态浮床, 组合型生态浮床在普通生态浮床基础上, 增加水循环增氧系统、浮法控制器等, 可大大提高生态修复的效率<sup>[11]</sup>; 在浮床下挂设填料和强化活性微生物等, 可人为地增加微生物量, 有效提高浮床净化能力<sup>[10]</sup>。

2.2 稻田湿地

稻田湿地模式是通过灌溉系统将纳污水体转入人工构建的稻田湿地, 利用土壤-微生物-水稻这个复合生态系统的物理、生物和化学的协调作用, 通过水稻生长的吸收利用、土壤的吸附和土壤微生物的降解除去污水中氮、磷养分的一种水体污染修复技术。在实际应用中, 往往借助于合理的布水灌溉方式和适当的施肥处理, 使得水体净化效果和水

稻生长状况达到最佳。稻田湿地对水体养分的修复效率受到灌水方式、养分管理、土壤性质、污水类型等因素的影响。研究表明, 间歇灌溉排水和间歇灌溉连续排水方式下, 稻田湿地系统对污水中氮、磷养分的去除率要高于平衡灌溉方式。对于人工构建的稻田湿地, 土壤渗径会影响水质净化效率; 土壤渗径达到 50 cm 时, 净化效果明显优于 30 cm<sup>[20]</sup>。Kwun 等<sup>[39]</sup>研究发现, 通过调整待修复污水的氮含量, 可以增加水稻株高、分蘖数、生物量和产量, 促进污水的净化和循环利用。陈柏湘<sup>[32]</sup>尝试采用稻田湿地净化养殖尾水, 发现在稻田湿地中增施氮磷钾肥对养殖废水的净化效率与不施肥处理相比并没有显著差异, 但是水稻产量却显著增加。这些结果表明, 在稻田湿地修复中, 根据水稻生长需求, 适当增施氮磷钾肥可以增加水稻产量, 且不降低对水体的净化效率。稻田湿地对不同类型污水的净化能力也存在较大差异。Li 等<sup>[40]</sup>对三种生活污水的净化结果显示, 稻田湿地对污水中总磷的去除率依次为灰水>生活污水>黑水。稻田湿地对生活污水中磷的去除效率(60.3%~71.4%)要高于化肥磷(26.8%~36.7%)。除了外源污水之外, 稻田湿地还可通过循环灌排系统对自身排水进行净化。Hama 等<sup>[41]</sup>研究表明, 通过采用循环灌排系统, 稻田尾水磷排放量仅为 0.27~0.63 kg/hm<sup>2</sup>, 远低于常规管理排放量(2.62~3.13 kg/hm<sup>2</sup>)。

我国稻田面积大, 且分布广阔, 在富营养水体修复中存在巨大潜力。与常规人工湿地相比, 稻田湿地直接利用现有稻田资源, 可大大地降低湿地建设成本, 且修复工艺流程简单、运行管理方便, 特别是作为世界上最大的湿地, 稻田在补充地下水、蓄滞洪水、保护环境、净化空气、维护生态平衡方面都发挥着至关重要的作用<sup>[42]</sup>。然而, 稻田湿地对富营养水体的修复存在一定二次污染风险。施肥或耕作措施不当可能会使得稻田湿地中氮、磷养分淋失损失重新进入水源造成二次污染<sup>[20]</sup>, 对稻田湿地管理需要精细化, 施肥、耕作合理化, 减少径流损失, 保证稻田湿地对污水的净化效果。

### 2.3 稻鱼共生

稻鱼共生是改变单一稻作和水产养殖方式, 将稻作系统和水产养殖进行生态耦合, 充分发挥稻鱼生态互惠共作的优势, 减少养殖饵料、稻田肥料等投入, 从而减少池塘养殖、水稻种植带来的氮、磷养分物质冗余和流失, 最终达到净化水质的目的<sup>[43]</sup>。在稻鱼共生系统中, 鱼会摄食稻田杂草、害虫和浮游生物等, 在促进水稻生长的同时, 可以减少饵料

投入, 有效避免饵料冗余带给养殖水体的污染; 养殖过程中, 残留在池塘的剩余饵料、鱼类的排泄物等降解的氮、磷养分物质也会被水稻吸收, 从而减少了肥料投入, 也避免了养分流失<sup>[44]</sup>。稻鱼共生主要是针对水产养殖和稻田尾水的净化。目前稻田共生主要有两种技术模式: 稻田养鱼和池塘种稻。稻田养鱼在我国已有 2000 多年历史, 2016 年在我国应用推广面积已达到 150.16 万/hm<sup>2</sup>。池塘种稻是一种基于养殖池塘的新型稻鱼共生技术模式。它采用适宜于池塘种植的高秆水稻, 直接种植于池塘底泥中, 实现稻鱼共作。

稻鱼共生可以显著提高养分利用效率, 降低水产养殖和稻田尾水污染。研究表明, 在相同养殖密度和稻田管理均一致的情况下, 稻鱼共作水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 分别低于鱼单作系统 24.5% 和 32.6%<sup>[20]</sup>, 且水稻 N 利用效率和 N 储量均高于水稻单作系统<sup>[45]</sup>。对于稻鱼共生系统, 养分利用和流失受到水稻和水产动物的生物配置以及养分管理等多方面因素的影响。Hu 等<sup>[46]</sup>研究发现通过调整稻鱼系统中化肥氮和饲料氮的比例可以增加鱼产量和氮素利用率, 减少氮素流失。Yaro 等<sup>[47]</sup>比较了三种肥料管理方式下(施无机化肥、有机肥和不施肥)稻鱼共生系统的水质和产量, 结果显示, 三种施肥方式下, 水体可溶性氮磷含量并没有显著差异, 但是无机肥的施用显著增加了水稻和鱼产量。Mohanty 等<sup>[48]</sup>研究发现, 通过选择性的捕获调整水产动物密度, 可以提高水产品产量, 提高养分效率, 减少养分流失。Rothuis 等<sup>[49]</sup>对水稻种植密度的研究表明, 增加水稻种植密度会降低水体光照, 限制浮游生物的数量, 降低水体溶氧和水产品产量。除了稻田养鱼模式外, 也有研究监测了池塘种稻这种新型模式对水体养分的净化效率, 与传统精养池塘相比, 池塘种稻模式可以显著降低水体氮磷量<sup>[19]</sup>。

我国稻田养鱼模式发展历史悠久, 养殖种类已由普通鱼类扩展到虾、蟹、鳖等特种水产, 养殖面积和水产品产量不断增加, 是一种重要的环境友好型生态农作模式。尤其是近年来小龙虾市场消费需求大, 养殖效益高, 稻田养小龙虾模式在湖北、江苏等地有较大规模发展, 并且形成了养殖、加工、餐饮等产业化集群模式。为稻鱼共作模式的推广应用起到了较好的市场化、产业化发展的示范作用。近年来, 随着人们对生态水产品需求的日益增长, 以及对集约化养殖环保要求的日益严格, 在精养池塘形成的一种稻鱼共作新模式——池塘种稻近年来在我国南方地区也得到较好发展。该模式采用特

别培育的适合养殖池塘种植的高秆水稻,将水稻直接种植于池塘底泥中,实现稻鱼共作。目前已成功实现了不同养殖塘体(包括青虾、黄颡鱼、黑鱼、对虾、甲鱼、小龙虾等)稻鱼共作技术模式,特别是小龙虾养殖塘体尤其适宜,在江苏、湖北、安徽等省具有广泛的应用前景。

### 3 水稻对富营养化水体养分的修复机理

水稻在生长过程中,需要吸收和利用大量的氮、磷,同化为自身的结构组成物质,而富营养化水中大量的氮、磷等营养物质足以达到水稻的正常生长发育的需要。水体中的无机氮是构成水稻等植物体内许多重要有机化合物的组分,可以合成蛋白质、核酸、叶绿素、维生素和生物碱等,并最终转化为生物量的不可或缺的物质<sup>[50]</sup>;无机磷是水稻经同化吸收转化为 ATP、DNA 等有机成分的必需营养物质<sup>[51]</sup>。当水稻被收割运出水生系统,大量的营养盐也会随之输出,从而达到去除氮磷,净化水体的效果。水稻对氮、磷的吸收和利用能力取决于自身的生长速率和氮磷含量及供试水体氮磷浓度,且不同水稻品种、不同器官吸收能力和积累量均不同,并随着生长期的变化而变化。利用水稻修复污染水体时,水稻可通过根部吸收沉积物中的氮磷<sup>[52]</sup>,发达的根系能够提供更多的微生物附着点,借助于微生物的生化反应捕获更多的悬浮颗粒物和氮磷营养盐供植株生长<sup>[10]</sup>。水稻在湿地系统中处理污水的效果和浮床系统存在差异,在人工湿地系统用养殖尾水进行灌溉,水稻通过土壤获取充足的营养物质,因而对不同氮磷负荷的水体吸收量差异不大,吸收率也就偏小;而在人工浮床系统中,水稻不能直接从底泥中吸收营养盐,因而水体中氮、磷浓度影响其生长状况,在高负荷污水中水稻生长旺盛<sup>[10]</sup>。

除了直接吸收之外,水稻生产过程中产生的间接作用也在水体养分去除中起着重要作用。例如,水稻可以促进悬浮营养盐的沉降。水稻对水体中悬浮营养盐的沉降作用主要是通过物理吸附、过滤和生物化学作用来实现的。将水稻种植于不同水体或稻田湿地进行污水修复时,水稻茂密的植株可使风速在水面或近土壤处大大降低,有利于抑制风浪,减缓水流,促进水体中的悬浮营养盐沉积,降低沉积物质再悬浮的发生率,增加水稻植株和静态水体的接触时间<sup>[53]</sup>,最终有利于水稻对营养盐的吸收;水稻的存在也会削减光线到达水体的强度,从而阻碍了水体中藻类的繁殖,有效保护了基质<sup>[54]</sup>。此外,

水稻生长过程中,根系会向土壤和水体中分泌出大量有机酸(如酒石酸等)<sup>[55]</sup>,因而浮床栽培水稻时,附着分泌物的水稻根系与水体接触面能够形成一道过滤层,有水流经时,根系表面分泌物中的一系列功能团(羟基、羧基、酚羟基等)会对污水中的悬浮物进行过滤和截留,会粘附或吸附不溶性胶体使其沉降,凝集的菌胶团也会使悬浮的有机物和新陈代谢产物沉降下来,最终改善周围水体<sup>[56,57]</sup>。

水稻和微生物对污水中的营养盐和有机物有显著的协同降解作用。水稻的根系不仅为微生物和微型水生动物提供了可附着的基质、栖息的场所,且其根系分泌的氧和有机物也为微生物生长提供了营养物质来源<sup>[58-60]</sup>。同时,水稻根际微生物的活动可促进水稻植株生长;大量微生物在水稻根系表面富集形成灰色生物膜,可有效增加微生物的分解代谢面积和数量,使得根部吸附的污染物被微生物分解利用或经代谢作用去除<sup>[61]</sup>。水稻生长时,植株能够将体内光合作用产生的氧气运输至根部,同时满足了水稻缺氧环境的呼吸和根部氧化区好氧微生物的活动<sup>[62]</sup>;根部氧化区和根区附近缺氧区域共存形成根际好氧、兼氧和厌氧区域,并为不同类型的微生物提供生存环境,使其发挥各自的作用<sup>[63]</sup>。根际好氧的微环境能够加强根际微生物的生长和繁殖,促进好氧微生物对有机物质的分解,且有助于硝化细菌和反硝化细菌的生长;根系以外的厌氧区域有利于厌氧微生物的生长,也有助于促进反硝化进程从而最大限度除去水体中的硝态氮。

除了供氧之外,水稻根际分泌的有机碳也对养分转化起着重要作用。水体和底泥中的有机氮经微生物降解生成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (氨化或矿化作用);  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  经硝化细菌作用被氧化为  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (硝化作用);  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可在缺氧条件下还原为  $\text{N}_2$ (反硝化作用)或者被还原为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$  氨化)。已有研究表明,微生物的硝化和反硝化作用对总氮的去除量贡献率达 45% 以上<sup>[64]</sup>。其中,反硝化通常是水体和底泥中除氮的关键性步骤,除了必需的缺氧环境之外,反硝化进程也与水体中碳氮质量浓度比显著相关,因而水体中充足的碳源是有效除氮的关键。已有研究表明,水体中 C/N 低于 5:1 时,碳的供给不足是反硝化作用的限制性因素<sup>[65]</sup>。水稻种植后,根系能够分泌有机碳,能够为反硝化细菌提供充足的碳源,有利于氮的反硝化反应,最终将水体中的氮盐以氮气的形式去除。此外,水稻根系微生物可将环境中难溶解的磷形态及溶解态的难利用的有机磷活化为无机、可溶态的磷酸盐供水稻植株



吸收利用。

#### 4 研究展望

自 20 世纪 90 年代以来, 诸多研究初步显示, 水稻是一种重要的水体富营养化污染修复作物。在我国富营养化水体的修复和养分循环利用中具有巨大的应用潜力。然而, 目前除了稻田养鱼这一技术模式已有大规模应用之外, 其他技术模式目前都尚处于试验示范阶段。因此, 急需在修复技术、基础理论、生态补偿等方面进一步深入开展相关工作: 1) 加强水体修复专用水稻品种的选育。不同水稻品种对水体养分的富集能力存在较大差异, 但以往研究中大多采用稻田种植的常规水稻品种。今后应根据水体修复的需要, 培育具有根系发达、生物量大、养分富集量大、抗性强等特征的专用水稻品种。例如, 浮床种稻技术尤其需要根系发达, 养分富集能力强的品种。2) 加强轻简化修复技术模式的研发。目前, 经济投入和劳动力成本高是影响水稻修复技术大规模应用一个重要限制因素。例如, 浮床种稻材料成本高, 浮床上插秧需要人工多; 稻田湿地修复需要构建专门的污水灌排系统等。因此, 今后要着重研发技术工艺简单、经济成本低、便于机械化操作的修复技术模式。3) 进一步加强水稻对水体养分修复机制的研究。水稻对水体养分的消减除了直接吸收途径之外, 还存在促进悬浮营养盐沉积、促进氮素气态散失等诸多间接途径。然而, 对这些途径的作用机制还缺乏深入研究。4) 完善水稻修复技术的生态补偿和政策激励机制。采用水稻修复富营养化水体, 不仅能够增加水稻产量, 保障粮食安全, 还能净化水质, 促进养分循环利用。这一修复技术的大规模应用, 可以带来巨大的生态和社会效益。因此, 政府部分应该建立相应的生态补偿和政策扶持机制, 以激励对水稻修复技术的进一步推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 程丽巍, 许海, 陈铭达, 刘兆普, 陈巍, 华静霞, 霍珊珊. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展. *环境保护科学*, 2007, 33(1): 18-21, 38.  
Cheng L W, Xu H, Chen M D, Liu Z P, Chen W, Hua J X, Huo S S. Review on causes of eutrophication of water body and its control measure. *Environ Prot Sci*, 2007, 33(1): 18-21, 38. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡耐根. 水体富营养化的成因及防治对策. *科技信息*, 2009, 33: 726-727.
- Hu N G. Causes of water eutrophication and its control measures. *Sci & Technol Infor*, 2009, 33: 726-727. (in Chinese)
- [3] 王哲嵘, 赵婷. 水体富营养化的成因危害及防治. *河南农业*, 2012, (1): 20-23.  
Wang Z R, Zhao T. Causes, damages and prevention of water eutrophication. *Henan Agric*, 2012, 1: 20-23. (in Chinese)
- [4] 付春平, 钟成华, 邓春光. 水体富营养化成因分析. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(1): 128-131.  
Fu C P, Zhong C H, Deng C G. Analysis on cause of the eutrophication of water body. *J Chongqing Jianzhu Univ*, 2005, 27(1): 128-131. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chávez-Crooker P, Obreque-Contreras J. Bioremediation of aquaculture wastes. *Curr Opin Biotechnol*, 2010, 21(3): 313-317.
- [6] 吴建强, 阮晓红, 王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择. *水资源保护*, 2005, 21(1): 1-6.  
Wu J Q, Ruan X H, Wang X. Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands. *Water Res Prot*, 2005, 21(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨雁, 李永梅, 张怀志, 张维理. 不同水稻品种对滇池富营养化水体中氮磷去除效果研究. *西南农业学报*, 2010, 23(6): 1923-1929.  
Yang Y, Li Y M, Zhang H Z, Zhang W L. Effect of different varieties of rice on removal phosphorus and nitrogen from eutrophic water in Dianchi lake. *Southwest China J Agric Sci*, 2010, 23(6): 1923-1929. (in Chinese with English abstract)
- [8] 卢进登, 陈红兵, 赵丽娅, 李兆华. 人工浮床栽培 7 种植物在富营养化水体中的生长特性研究. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(7): 58-61.  
Lu J D, Chen H B, Zhao L Y, Li Z H. Study on the growth characteristics of seven plants cultivated on artificial floating rafts in eutrophic water. *Techn Equip Environ Poll Cont*, 2006, 7(7): 58-61. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 金千瑜, 应火冬. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 489-494.  
Song X F, Zou G Y, Wu W M, Jin Q Y, Yeng H D. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-beds to main nutrients and P in eutrophicated water bodies. *Acta Sci Circum*, 1998, 18(5): 489-494. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邓志强. 人工浮床净化污染水体中氮磷的研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013.  
Deng Z Q. Study on nitrogen and phosphorus removal by artificial floating bed. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese with English abstract)

- [11] 郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军. 组合型生态浮床对水体修复及植物氮磷吸收能力研究. *环境工程学报*, 2013, 7(6): 2153-2159.  
Zheng L G, Yang R B, Wang H P, Song J J. Study on water remediation and uptake ability of nitrogen and phosphorus by plants using combined ecological floating bed. *Chin J Environ Engin*, 2013, 7(6): 2153-2159. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭艳英, 潘珉, 何锋, 韩亚平. 一种湿地建设的替代模式——滇池湖滨无耕作水稻种植及初步研究. *中国环境科学学会学术年会论文集*. 武汉: 中国环境科学学会, 2009: 486-491.  
Guo Y Y, Pan M, He F, Han Y P. An alternative model for wetland construction—preliminary research on no-tillage rice cultivation in Lakeside of Dianchi Lake. *Annual Conference Proceedings of Chinese Society of Environmental Sciences*. Wuhan: China environmental science society, 2009: 486-491.
- [13] 邱立莉. 三峡库区富营养化水体生态岛修复技术研究. 重庆: 重庆大学, 2006.  
Qiu L L. Study on the eco-island remediation technology in eutrophic water bodies of the Three Gorges Reservoir. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐凌悦, 马宏海, 王晨雯, 汪秀芳, 王胜利. 2种浮床植物吸收不同 N/P 水体中氮磷的研究. *长江科学院院报*, 2013, 30(3): 8-11.  
Xu L Y, Ma H H, Wang C W, Wang X F, Wang S L. Removal of nitrogen and phosphorus by two plants cultivated on floating bed at different N/P ratios. *J Yangtze River Sci Res Instit*, 2013, 30(3): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈继顺, 尹正红, 武绍启, 冷明初, 杨雁峰, 周红艳, 田志敏, 李荣波. 漂浮栽培水稻在污水治理中的应用研究. *农业科技通讯*, 2011, (1): 34-37.  
Chen J X, Yin Z H, Wu S Q, Leng M C, Yang Y F, Zhou H Y, Tian Z M, Li R B. Application of floating rice cultivation in sewage treatment. *Agric Sci & Technol Newsl*, 2011, (1): 34-37. (in Chinese)
- [16] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan. *Ecol Eng*, 2008, 32(2): 147-155.
- [17] 谢迎新, 熊正琴, 赵旭, 邢光熹, 郭天财. 富营养化河水灌溉对稻田土壤氮磷养分贡献的影响——以太湖地区黄泥土为例. *生态学报*, 2008, 28(8): 3618-3625.  
Xie Y X, Xiong Z Q, Zhao X, Xing G X, Guo T C. Contribution of nitrogen and phosphorus on eutrophied irrigation water in a paddy soil: A case study in Taihu Lake region. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(8): 3618-3625. (in Chinese with English abstract)
- [18] Prinsloo J F, Schoonbee H J. Investigation into the feasible of a duck-fish-vegetable integrated agriculture-aquaculture system for developing areas in South Africa. *Water South Africa*, 1987, 13: 109-118.
- [19] 李凤博, 冯金飞, 周锡跃, 吴殿星, 陈凡, 徐春春, 方福平. 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, Wu D X, Chen F, Xu C C, Fang F P. Nutrients removal from fish pond by rice planting. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(2): 174-180. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴启侠, 朱建强, 李谷, 周元. 不同水管理模式下稻田对养殖尾水的净化效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 5-9.  
Wu Qi X, Zhu J Q, Li G, Zhou Y. Purification effect of paddy field on fertile water from fish pond under different water management modes. *J Irrig Drain*, 2011, 30(4): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周元, 朱建强, 李谷, 吴启侠. 稻田对池塘养殖肥水的吸收利用效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(5): 78-81.  
Zhou Y, Zhu J Q, Li G, Wu Q X. The nutrients in the fertile water from fish pond assimilated and utilized by paddy field. *J Irrig Drain*, 2011, 30(5): 78-81. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马克星. 宁夏灌区浮床栽培净化农田退水技术研究. 新乡: 中国农业科学研究院农田灌溉研究所, 2011.  
Ma K X. The study on purification of irrigation return low by floating-beds in Ningxia irrigation region. Xinxiang: Agricultural Irrigation Research institute of China Agricultural Science Research Institute, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马克星, 吴海卿, 朱东海, 穆鑫. 宁夏灌区水面试植稻净化农田退水效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 103-106.  
Ma K X, Wu H Q, Zhu D H, M X. Purification of irrigation return flow by cultivating rice on water surface in Ningxia irrigation area. *J Irrig Drain*, 2011, 30(4): 103-106. (in Chinese with English abstract)
- [24] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, Hitomi T, Hasebe H. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system. *Agric Water Manag*, 2004, 68(1): 47-60.
- [25] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system. *Water Res*, 1997, 31(11): 2685-2692.
- [26] Belmont M A, Cantellano E, Thompson S, Williamson M, Sánchez A, Metcalfe C D. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecol Eng*, 2004, 23(3-4): 299-311.
- [27] Brix H, Arias C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecol Eng*, 2005, 25(5): 491-500.
- [28] 李松. 稻田湿地处理农村生活污水脱氮除磷及其径流



- 试验研究. 杭州: 浙江大学, 2009.
- Li S. Study on nitrogen and phosphorus removal of rural domestic wastewater and its runoff in the paddy wetlands. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [29] Sun H J, Zhang H L, Yu Z M, Wu J S, Jiang P K, Yuan X Y, Shi W M. Combination system of full-scale constructed wetlands and wetland paddy fields to remove nitrogen and phosphorus from rural unregulated non-point sources. *Environ Geochem Health*, 2013, 35(6): 801-809.
- [30] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, Chang Y F, Chen Y M, Shih K C. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate. *Environ Pollut*, 2005, 134(3): 411-421.
- [31] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, Hitomi T, Hasebe H. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system. *Agric Water Manag*, 2004, 68: 47-60.
- [32] 陈柏湘. 稻田对池塘养殖废水的净化研究. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- Chen B X. Study on rice field for the treatment of pond effluents. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [33] Xiong Y J, Peng S Z, Luo Y F, Xu J Z, Yang S H. A paddy eco-ditch and wetland system to reduce non-point source pollution from rice-based production system while maintaining water use efficiency. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22(6): 4406-4417.
- [34] 李文斌, 李新建, 高学睿, 粟世华, 吴昌智. 桂林市堰塘湿地农田水环境修复技术研究. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 119-122.
- Li W B, Li X J, Gao X R, Su S H, Wu C Z. Application of Guilin City's pond-wetland in drainage treatment in agricultural water environment. *J Irrigat Drain*, 2011, 30(2): 119-122. (in Chinese with English abstract)
- [35] 陈兴华, 王方成, 杨树果, 张伟涛, 杨驰原. 应用人工湿地 [稻田系统] 处理北部高寒地区小城镇综合污水. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 77-80.
- Chen X H, Wang F C, Yang S G, Zhang W T, Yang C Y. The application of north part high and cold small town comprehensive sewage treatment with artificial rice field system. *Inner Mongolia Environ Sci* 2008, 20(1): 77-80. (in Chinese with English abstract)
- [36] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体. 中国水利, 2005(5): 50-53.
- Chen H S, Song X F, Zou G Y. Treatment in water bodies pollution by ecological floating bed technology. *China Water Res*, 2005(5): 50-53. (in Chinese with English abstract)
- [37] Zhou X H, Wang G X. Nutrient concentration variations during *Oenanthe javanica* growth and decay in the ecological floating bed system. *J Environ Sci*, 2010, 22(11): 1710-1717.
- [38] 黄央央, 江敏, 张饮江, 杜佳沐. 人工浮岛在上海白莲泾河道水质治理中的应用. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 108-113.
- Huang Y Y, Jiang M, Zhang Y J, Du J M. Building artificial floating-island for treating Bailianjing River in Shanghai. *Environ Sci & Technol*, 2010, 33(8): 108-113. (in Chinese with English abstract)
- [39] Kwun S K, Yoon C G, Chung I M. Feasibility study of treated sewage irrigation on paddy rice culture. *J Environ Sci Health*, 2001, A36 (5): 807-818.
- [40] Li S, Li H, Liang X Q, Chen Y X, Cao Z H, Xu Z H. Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China. *J Soil Sed*, 2009, 9(5): 433-442.
- [41] Hama T, Aoki T, Osuga K, Sugiyama S, Iwasaki D. Reducing the phosphorus effluent load from a paddy-field district through cyclic irrigation. *Ecol Eng*, 2013, 54: 107-115.
- [42] 李凤博, 徐春春, 周锡跃, 方福平. 稻田生态补偿理论与模式研究. 农业现代化研究, 2009, 30(1): 102-105.
- Li F B, Xu C C, Zhou X Y, Fang F P. On theory and model of eco-compensation for paddy field. *Res Agric Moder*, 2009, 30(1): 102-105. (in Chinese with English abstract)
- [43] 冯金飞, 李凤博, 吴殿星, 方福平. 稻作系统对淡水养殖池塘富营养化的修复效应及应用前景. 生态学报, 2014, 34(16): 4480-4487.
- Feng J F, Li F B, Wu D X, Fang F P. Effects of rice cropping systems on the restoration of aquaculture pond eutrophication and its prospective application. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(16): 4480-4487. (in Chinese with English abstract)
- [44] Frei M, Becker K. Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources. *Nat Resour Forum*, 2005, 29(2): 135-143.
- [45] Vromant N, Chau N T H, Ollevier F. The effect of rice-seeding and fish stocking on the floodwater ecology of the trench of a concurrent, direct-seeded rice-fish system. *Hydrobiologia*, 2001, 457: 105-117.
- [46] Hu L L, Ren W Z, Tang J J, Li N N, Zhang J, Chen X. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment. *Agric Ecosys Environ*, 2013, 177: 28-34.
- [47] Yaro I, Lamai S L, Oladimeji A A. The effect of different fertilizer treatments on water quality parameters in rice-cum-fish culture systems. *J Appl Ichthyol*, 2005, 21(5): 399-405.
- [48] Mohanty R K. Density-dependent growth performance of Indian major carps in rainwater reservoirs. *J Appl*

- Ichthyol*, 2004, 20(2): 123-127.
- [49] Rothuis A J, Vromant N, Xuan V T, Richtere C J J, Olleviera F. The effect of rice seeding rate on rice and fish production and weed abundance in direct-seeded rice-fish culture. *Aquaculture*, 1999, 172(3-4): 255-274.
- [50] Sun G Z, Zhao Y Q, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *J Biotechnol*, 2005, 115(2): 189-197.
- [51] Seo D C, Cho J S, Lee H J, Heo J S. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. *Water Res*, 2005, 39(11): 2445-2457.
- [52] 屠晓翠, 蔡妙珍, 孙建国. 大型水生植物对污染水体的净化作用和机理. 安徽农业科学, 2006, 34(12): 2843-2844, 2867.  
Tu X C, Cai M Z, Sun J G. Purification and mechanism of aquatic macrophytes in polluted water. *J Anhui Agric Sci*, 2006, 34(12): 2843-2844, 2867. (in Chinese with English abstract)
- [53] 李志银, 张惠芳, 孙玲, 周德艳. 大型水生植物对污染水体的生态修复. 中国西部科技, 2010, 9(20): 49-50, 52.  
Li Z Y, Zhang H F, Sun L, Zhou D Y. Ecological restoration of polluted water with large aquatic macrophytes. *Sci & Technol West China*, 2010, 9(20): 49-50, 52. (in Chinese with English abstract)
- [54] 白峰青, 郑丙辉, 田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应. 环境科学与技术, 2004, 27(4): 99-100, 110.  
Bai F Q, Zheng B H, Tian Z Q. Ecological effects of aquatic plants on water pollution control. *Environ Sci Technol*, 2004, 27(4): 99-100, 110. (in Chinese with English abstract)
- [55] 旷远文, 温达志, 钟传文, 周国逸. 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, Zhou G Y. Root exudates and their roles in phytoremediation. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(5): 709-717. (in Chinese with English abstract)
- [56] 余居华, 范成新, 钟继承. 富营养化湖泊水体植物修复及其研究进展. 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都: 中国环境科学学会, 四川大学, 2014: 3472-3479.  
Yu J H, Fan C X, Zhong J C. Phytoremediation of eutrophic lakes and its research progress. Annual Conference Proceedings of Chinese Society of Environmental Sciences. Chengdu: Chinese Society of Environmental Sciences, Sichuan University, 2014, 3472-3479.
- [57] Wang C, Zheng S S, Wang P F, Qian J. Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: A review. *J Hydrodyn: Ser B*, 2014, 26(4): 497-511.
- [58] 蒋春, 蒋薇薇, 周鹏, 张敏. 水生植物修复富营养化水体的机制. 安徽农业科学, 2014, 42(35): 12614-12615, 12618.  
Jiang C, Jiang W W, Zhou P, Zhang M. Mechanisms of hydrophytes remediation for eutrophic waterbody. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(35): 12614-12615, 12618. (in Chinese with English abstract)
- [59] Afzal M, Khan Q M, Sessitsch A. Endophytic bacteria: Prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. *Chemosphere*, 2014, 117: 232-242.
- [60] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Sci Technol*, 1994, 29(4): 71-78.
- [61] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 36-40.  
Chong Y X, Hu H Y, Qian Y. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control. *Tech Equip Environ Poll Cont*, 2003, 4(2): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- [62] 张友元, 陈振声. 水生植物对污染水体中氮磷含量净化效果的研究进展. 安徽农业科学, 2014, 42(24): 8317-8318, 8322.  
Zhang Y Y, Chen Z S. Research advances on phytoremediation of nitrogen and phosphorus polluted water by aquatic macrophytes. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(24): 8317-8318, 8322. (in Chinese with English abstract)
- [63] Fennessy M S, Gonk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions. *Ecol Eng*, 1994, 3(4): 469-484.
- [64] Ren L, Yang J. Nitrogen nutrients cycling in marine environment and its modeling research. *Adv Earth Sci*, 2000, 15(1): 58-64.
- [65] Ingersoll T L, Baker, L A. Nitrate removal in wetland microcosms. *Water Res*, 1998, 32(3): 677-684.