

面源污染治理专论

农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践
——案例分析杨林章^{1,2}, 薛利红^{1,2}, 施卫明², 刘福兴³, 宋祥甫³, 王慎强², 张饮江⁴

(1.江苏省农业科学院, 南京 210014; 2.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3.上海市农科院, 上海 201403; 4.上海海洋大学, 上海 201306)

摘要:农村面源污染问题日益突出,是当前水污染控制与水环境改善的重点和难点。“十一五”期间,在国家水专项的支持下,以农村面源污染治理的“4R”理论(源头减量—过程阻断—养分再利用—生态修复)为指导,选择江苏省无锡市的直湖港小流域龙延村为综合示范区进行了技术的集成与工程化应用,取得了良好效果。本文以此为典型案例,详细介绍了综合示范区的污染现状、“4R”技术的集成应用与衔接配套、各项技术应用的污染控制效果以及区域环境改善效果,并对“4R”理论的核心内涵以及未来的发展进行了总结和讨论。

关键词:农村面源污染控制;4R理论;工程应用;总氮负荷削减;水质改善

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)12-2309-07 doi:10.11654/jaes.2013.12.001

Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for the Controlling the Agricultural Non-point Source Pollution in Countryside in China: A case studyYANG Lin-zhang^{1,2}, XUE Li-hong^{1,2}, SHI Wei-ming², LIU Fu-xing³, SONG Xiang-fu³, WANG Shen-qiang², ZHANG Yin-jiang⁴

(1.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 4.Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

Abstract: Non-point source pollution was more and more serious and became the key factor of the water pollution control in countryside in China. During the eleventh five-year period, under the support of the major S&T program for water pollution control and treatment, Reduce-Retain-Reuse-Restore theory (4R theory) and technologies for controlling agricultural non-point source pollution were applied at Longyan Village, watersheds of Zhihugang river, Tai Lake region. The comprehensive demonstration project for controlling the non-point source pollution was established and showed a good result. In this paper, the status of integrated pollution demonstration area was introduced, the design of 4R technology and the link between different demonstration projects was also detailed based on the local terrain and river features. Then, the result for applied 4R technology and the improvement effect for local water quality was evaluated. Furthermore, the core of "4R" theory and technology was summarized and its development and application in the future was discussed.

Keywords: control of non-point pollution in countryside; Reduce-Retain-Reuse-Restore (4R) theory; engineering application; TN load reduction; water quality improvement

随着工业废水和城市生活污水等点源污染得到有效控制,农村面源污染已取代点源成为水体污染的

最重要来源。根据国家环境保护部2010年发布的“全国第一次污染源普查公报”数据^[1],来自于种植业、畜禽养殖业和水产养殖业的农业源污染物排放(流失)量为化学需氧量1 324.09万t,总氮270.46万t,总磷28.47万t。生活污水年排放量343.30亿t,实际污水处理厂的处理量仅有194.41亿t,还有43%近150亿t的生活污水未经处理直接排放到周围水体环境,排放的化学需氧量约476万t,总氮约87万t,总磷约

收稿日期:2013-11-30

基金项目:国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004, 2008ZX07101-005);环保部公益性行业项目(2013467035);江苏省农业科技自主创新资金[CX(12)3046];中科院知识创新工程项目(KZCX2-YW-QN406)

作者简介:杨林章(1958—),男,博士,研究员,研究方向为农业面源污染控制技术与工程化应用。E-mail: lzyang@issas.ac.cn

5.9 万 t, 氨氮约 64 万 t。大量排放的农村面源污染物使得水环境日益恶化, 已成为水体污染控制与水环境改善的重点和难点。

国家及各级政府高度重视农村面源污染问题, 从“十五”开始就陆续投入大量的资金进行相应的技术研发和工程治理, 在我国重点流域建设了一批面源污染防治工程, 在削减农村面源污染负荷、遏制水环境进一步恶化中起到了积极的作用。但是, 由于技术零散, 集成度低, 所建设的农村面源控制工程缺乏区域尺度的系统设计, 相互割裂, 顾此失彼, 从而使得区域整体环境改善效果不理想。而农村面源污染的特性决定了要从根本上治理农村面源污染, 必须从区域尺度出发, 实行多源头、全过程、全方位的系统控制, 推行农村面源污染治理的 4R 技术^[9]是十分必要的。

为此, 在“十一五”国家水专项的支持下, 选择了太湖地区直湖港小流域的龙延村为综合示范区, 开展了“4R”技术的系统设计和工程化应用。通过“4R”技术的集成与区域联控, 整个示范区的污染负荷削减了 47.5%, 示范区河流主要水质指标提高了 1~2 个等级, 村庄环境有了明显改善, 实施效果为“4R”技术的工程化应用提供了一个成功案例和模板。

1 示范区概况

示范区位于太湖流域直湖港下游的龙延村村域(北纬 31°31', 东经 120°06'), 面积约 2.0 km²。该地区属于典型的亚热带季风气候, 年降水量约 1048 mm, 主要集中在 6、7、8 月的夏季。示范区土地利用类型主要有稻田、设施菜地以及水蜜桃园。农田面积为 84.7 hm², 其中稻田面积约 77.3 hm², 水蜜桃园约 2.5 hm², 设施蔬菜约 4.9 hm²。稻田主要是稻麦轮作, 年施氮量 450~510 kg N·hm⁻² 之间。设施菜地主要种植番茄、茼蒿、芹菜等, 每年种植蔬菜 3 季, 年施氮量在 1000~1500 kg·hm⁻² 之间。水蜜桃园年施氮量高达 1200~1400 kg·hm⁻²。过量施肥导致大量的氮随径流流失到周围水体中。根据该区域农田污染排放监测数据^[3-8], 估算出该区域每年农田总氮排放量约 5.9 t。

示范区覆盖了后沙滩村, 共有 75 户人家计 210 人, 生活污水未经任何处理直接排放入周边的支浜朱家浜和后沙滩浜。据 2008 年调查数据, 生活污水中 TN、氨氮和 TP 的浓度分别在 26.3~58.2、16.4~35.6 和 1.82~3.74 mg·L⁻¹ 之间, 该村生活污水年排放量约 5500 t, 总氮排放量约 0.242 t, 氨氮约 0.15 t, 总磷约 0.016 t^[9]。

示范区覆盖池塘养殖水面近 13.3 hm², 分布在龙延河北侧, 主要养殖鱼类、河蟹和甲鱼, 其中鱼类占 83%, 河蟹占 12%, 甲鱼占 5% 左右。据监测, 各养殖池塘氮、磷污染较严重, 总氮为 2.0~7.8 mg·L⁻¹, TP 为 0.2~1.9 mg·L⁻¹。污染物主要来源于过量投放饲料和饵料。根据对各养殖池塘的水质监测数据和整年的排水量分析, 得出示范区养殖池塘在传统养殖模式下的 TN 排污通量分别为 378 kg·hm⁻²·a⁻¹ (鱼塘)、486 kg·hm⁻²·a⁻¹ (鱼苗塘)、209 kg·hm⁻²·a⁻¹ (蟹塘)、121 kg·hm⁻²·a⁻¹ (蟹苗塘) 和 101 kg·hm⁻²·a⁻¹ (甲鱼塘)^[9]。

示范区内的河道主要有直湖港的主干支流龙延河(龙延村段, 1400 m)以及 5 条次级支浜: 下场浜(990 m)、淀溪环浜(700 m)、朱家浜(550 m)、后沙滩浜(200 m)和王店桥浜(1350 m), 河道总面积(含直湖港龙延村段)约 27.1 hm²。陆域产生的面源污染物汇入附近支浜, 然后通过龙延河、直湖港最终汇入太湖。2009—2010 年水质监测表明, 河道水质长期处于劣 V 类(GB 3838—2002), 具体见表 1。

表 1 示范工程实施前河道水质状况
(2009 年 5 月—2010 年 5 月平均)

Table 1 River water quality status before the experiment
(Average value of 12 months from May, 2009 to May, 2010)

河道	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	透明度/cm
朱家浜	3.89	0.24	13.8	45
后沙滩浜	2.25	0.23	7.80	35
淀溪环浜	1.00	0.16	7.30	50
下场浜	1.43	0.18	9.10	45
王店桥浜	2.71	0.27	11.5	25
龙延河(龙延村段)	2.92	0.27	10.3	30

2 “4R”技术应用与工程设计

根据示范区的地形水系特征以及农业生产现状, 通过污染源的解析, 在区域联控策略的指导下, 进行了示范区面源污染控制的系统设计及“4R”技术体系的综合应用, 并充分考虑各个技术的衔接以及示范工程的空间互联, 确保污染物削减和水质改善的整体目标的实现。示范区工程化应用的 4R 技术及其内容如下。

源头减量技术(Reduce): 主要涉及农田及村庄生活污水两部分。稻田主要采用有机无机配施技术、新型缓控释肥技术和轮作制度调整技术(稻麦轮作改为稻-紫云英轮作或冬季休耕), 设施菜地主要采用基于氮肥-产量报酬曲线的化肥减量技术, 水蜜桃园主要

采用了桃园专用缓控释肥深施技术^[10]。生活污水采用了塔式蚯蚓生物滤池处理技术。

过程阻断与拦截技术(Retain):针对农田径流和排水,将原有的土质和三面光水泥沟渠改造为生态拦截沟渠,对径流中的氮磷污染物进行拦截^[11]。此外,设施菜地在夏季揭棚期种植填闲作物来阻断养分的下渗和径流,在桃园树下种植三叶草来减缓径流速度和沉降径流中的颗粒物。同时,利用龙延河青云桥旁边一处废弃鱼塘,改造成兼氧-好氧湿地塘,有效拦截净化龙延河北侧农田径流排水,在无径流排放期间,净化龙延河富营养化河水。为了有效拦截消除生活污水等对朱家浜水质的影响,在朱家浜设计应用了生态丁型潜坝技术^[11]。

养分的循环利用技术(Reuse):对于设施菜地及桃园的径流排水,经生态拦截沟渠初步拦截净化后,引入周围的稻田,使排水中的氮磷养分进一步被稻田所吸收利用。并在稻田排水末端设置无肥拦截带和小型湿地,对稻田排水中的养分进行拦截再利用^[11]。针对生活污水处理后的尾水及部分低污染河水,专门设计建设了 800 m² 的稻田人工湿地,使这部分污水中的氮磷得以循环利用^[12]。针对陆域水产养殖的污染排放,利用鱼蟹养殖对水资源需求与排放不同期的特点,利用沉水植物-浮叶植物将蟹塘设计成高效人工

湿地,对其他池塘养殖的污水进行异位湿地处理,综合调控与合理利用水资源,实现水产养殖水资源的循环利用以及污染物的减排。

河道水质的生态修复技术(Restore):在对陆域污染物进行拦截和养分循环利用的基础上,针对河道水体,因地制宜地采用了置入式生态滤床技术、组合式生态浮床技术、底泥污染控释技术、河滩湿地恢复技术及岸带植被恢复技术等,进一步对河道水体进行净化和生态修复^[13]。

各技术在示范区的空间布局如图 1。示范工程于 2010 年 4 月开始运行,运行一年后进行了阶段性效果评估。在示范工程运行期间,农田只要有降雨排水时就取样监测每个技术环节的水质指标;河道水质则每半月监测一次。

3 工程运行效果分析

3.1 源头减量化效果

示范工程运行后的监测数据表明,稻季各种技术可减少化肥氮用量 60~117 kg·hm⁻²,减施比例为 22%~43%,减少径流总氮排放量 1.4~4.94 kg·hm⁻²,减排比例在 8.8%~31%之间,水稻产量为农户对照的 95%~107%,总产量与对照无显著差异(图 2)。麦季种植紫云英或休耕,不施肥,牺牲了一季小麦产量,可减少

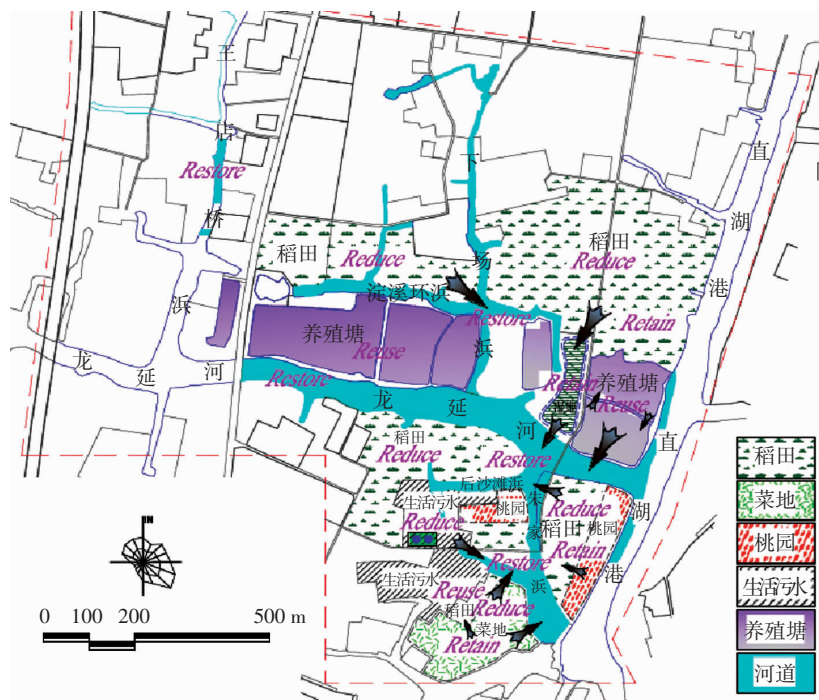


图 1 示范区技术应用及工程布局图

Figure 1 The distribution of 4R technology demonstration in the experimental area

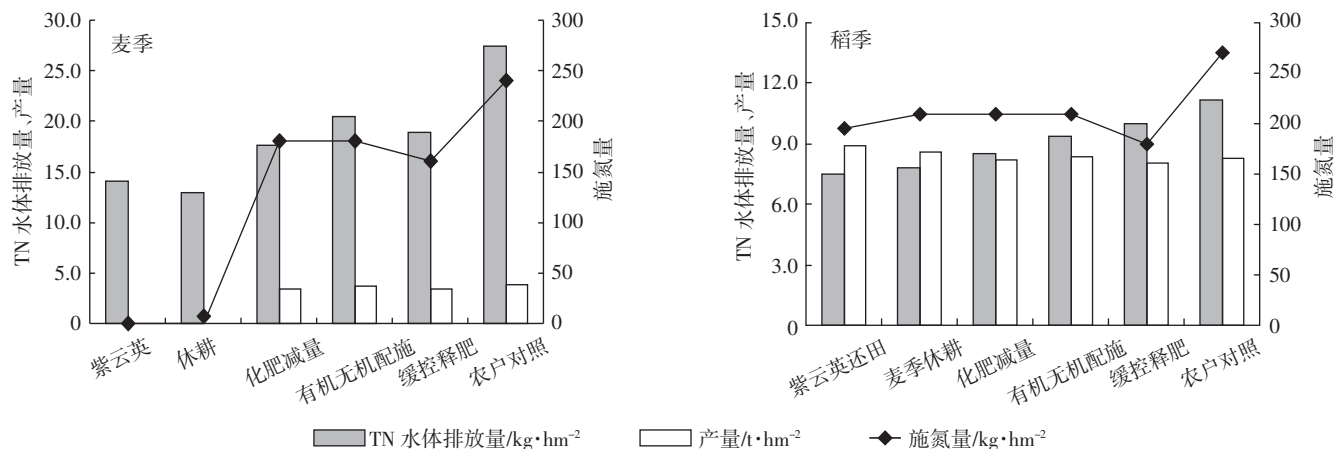


图 2 稻田不同减量技术效果对比

Figure 2 Effect of different source reduction technology of wheat and rice

总氮排放 $15\sim 16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮的减排率分别为 50% 和 53%。麦季其他化肥减量技术的化肥氮减施量在 $60\sim 80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间, 减施比例为 25%~33%, 总氮减排量为 $7.77\sim 11.92\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减排率 26%~39%, 但产量比农户对照略有下降, 减产 4%~11%。

菜地采用化肥减量技术后, 氮肥用量可比常规农户减少 40%, TN 排放量减少 42%~52.3%, 产量增加 15.1%~39% (表 2), 具有良好的生态和经济效益。水蜜桃园采用专用缓控释肥深施技术后, 氮肥用量比农户对照减少了 $201.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占 27.3%, 总氮排放量减少了 $28.67\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减排率 30.6%, 总磷排放量减少 $3.14\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减排 44.4%, 水蜜桃增产 11.9%, 增效 $1.2\text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 2 设施菜地的氮肥减量效果

Table 2 Effect of nitrogen reduction of greenhouse vegetables on yield and TN discharge

蔬菜 品种	氮肥减施量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	减施 比例/%	TN 减排量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	减排 比例/%	增产/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	增产 比例/%
番茄	160	40	29.7	42	10.8	15.1
茼蒿	208	40	85.2	52.3	23.8	39
芹菜	256	40	93.1	46.2	24.2	27.8

生活污水经过塔式蚯蚓生物滤池处理后, 排放标准可达一级 B 以上。排水标准按照一级 B 来计算, 单个生活污水处理工程 (处理户数 75 户, 210 人口) 每年可减少 TN 排放 64.19 kg, 氨氮排放 65.29 kg, TP 排放 5.99 kg, 污染减排率分别为 26.5%、59.1% 和 52.1%。

3.2 过程阻断与拦截效果

生态拦截沟渠的监测数据 (2010 年 6 月—11 月) 表明, 菜地生态沟渠进水浓度为 $3.3\sim 39.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水浓度为 $0.3\sim 14.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 稻田生态沟渠进水浓度在

$2.14\sim 8.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水浓度在 $1.36\sim 4.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。生态沟渠对菜地、稻田径流排水中总氮的平均拦截率分别为 57.3% 和 37.4% (图 3)。

桃园的径流排水经汇流收集后首先进入稻田人工湿地, 然后再经生态拦截沟渠排入生态水塘。工程运行后一次大雨时的监测数据表明, 桃园径流 TN 浓度由桃园出水口的 $44.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到入生态水塘前的 $15.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 湿地与生态拦截沟渠对 TN 的拦截率为 65.8%。

3.3 养分资源再利用效果

示范区内菜地径流通过生态沟渠拦截净化后, 流入径流收集池, 然后通过泵站提升回灌至稻田, 对其养分进行再利用。结果表明, 菜地排水经稻田循环再利用后, 排水浓度进一步降低, 总氮由原来的平均 $6.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $3.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。稻田排水经生态沟渠拦截净化后进一步汇入稻田的无肥拦截带和小型湿地中。监测数据表明, 无肥拦截带对总氮的拦截率平均为 46.6%, 出水浓度在 $0.81\sim 2.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $1.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。

稻田湿地的低污染水净化工程运行效果表明, 稻田湿地在水稻旺盛生长期可日处理环境中低污染水达 $160\sim 200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 对污水中 N、P 的去除率可达 75%~81% 和 82%~96%, 整个稻季可吸收利用环境中 TN $96\sim 103\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, TP $8.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。经过稻田湿地的净化, 排水浓度基本稳定在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。水稻仅在前期施氮 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 即可获得与农户正常施肥时的产量 ($7.9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 从而实现了生产与环境的双赢。

陆域水产养殖污染控制示范工程的监测数据表明, 鱼塘养殖污水经蟹塘异位湿地处理后水质得到改善 (HRT 为 20 d, 水力负荷为 $0.05\sim 0.06\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),

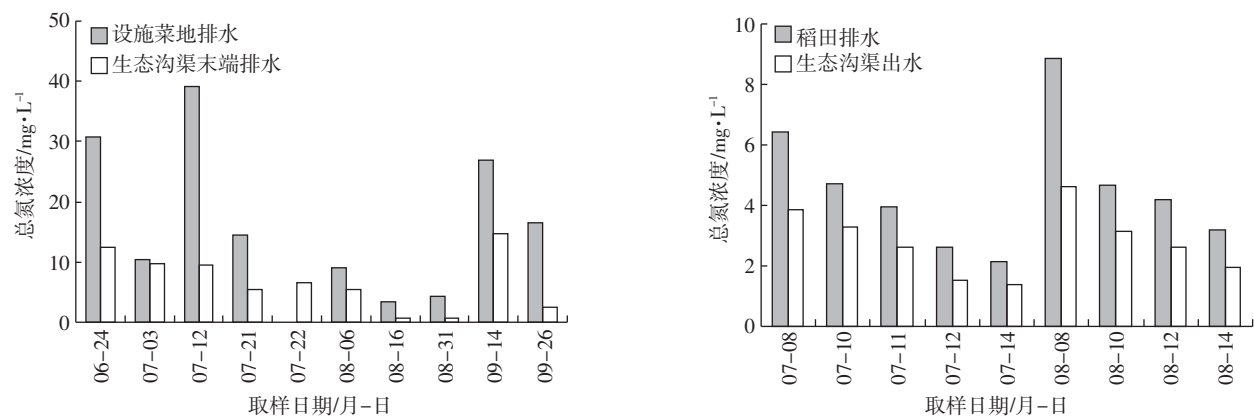


图 3 生态沟渠对设施菜地、稻田排水中总氮的拦截效果
Figure 3 Retain effect of TN from greenhouse vegetable and paddy drainage with eco-ditches

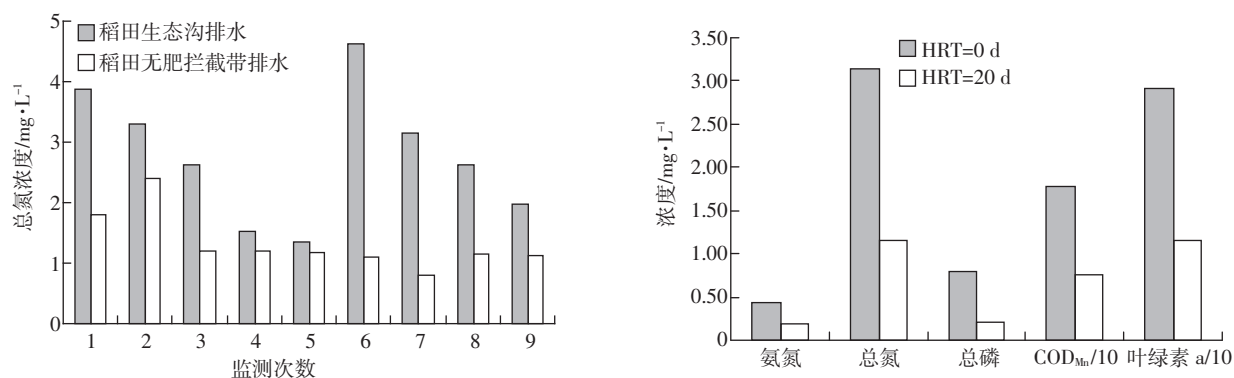


图 4 稻田无肥拦截带对生态沟渠排水的净化效果
Figure 4 Purification of eco-ditch drainage with no-fertilizer buffer strip

图 5 养殖鱼塘污水的异位湿地处理效果
Figure 5 Purification effect of fish ponds sewage with ectopic wetland treatment

水质总体达到国家地表水Ⅲ类标准,总氮由 3.14 mg·L⁻¹ 下降到 1.16 mg·L⁻¹,削减率 65%,对总磷、氨氮、COD_{Mn} 和叶绿素的削减率分别为 75%、55%、58%和 60%(图 5)。

3.4 水体(环境)生态修复效果

表 3 列出了河道修复后的水质数据。其中,朱家

浜、后沙滩浜、淀溪环浜及下场浜为全河道修复,效果较为明显,四条河道修复后水质可达Ⅳ~Ⅴ类水标准,尤其是朱家浜,氨氮的去除率高达 79.2%,COD_{MN} 的去除率为 55.1%,水体透明度提高了 35 cm。王店桥浜仅在河道中段采用水稻浮床进行了修复,氨氮、COD_{Mn} 浓度略有下降,透明度提高了 30 cm,对 TP 没有效

表 3 河道生态修复后水质状况及去除率(2010 年 6 月—2010 年 12 月平均)
Table 3 River water quality after the experiment and the pollution removal efficiency
(Average value of 6 months from June, 2010 to Dec, 2010)

河道名称	NH ₃ -N		TP		COD _{Mn}		透明度/cm	
	修复后浓度/ mg·L ⁻¹	平均去除率/ %	修复后浓度/ mg·L ⁻¹	平均去除率/ %	修复后浓度/ mg·L ⁻¹	平均去除率/ %	修复后	平均 提高
朱家浜	0.81	79.2	0.17	29.2	6.20	55.1	80	35
后沙滩浜	1.74	22.8	0.17	24.1	6.00	23.1	65	30
淀溪环浜	0.56	44.0	0.14	12.5	5.50	24.7	70	20
下场浜	0.76	46.9	0.15	16.7	5.90	35.2	60	15
王店桥浜	2.11	22.1	0.27	—	10.4	9.60	55	30
龙延河(龙延村段)	2.17	25.7	0.28	—	7.80	24.3	30	—

*:修复前的浓度见表 1。

果,水质改善效果略差,但修复区域内外水质差异较大^[13]。龙延河由于其为直湖港主干支流,并且属于通航河道,修复区域仅位于龙延村段,因此水质改善效果相对有限,氨氮和 COD_{Mn} 下降了 25% 左右,TP 和透明度无改观。朱家浜修复前后浮游植物的调查结果表明,修复后浮游植物生物量一直处于较低水平,平均为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,生态修复有效抑制了水体内藻类的过度增殖。

3.5 区域环境整体改善效果

示范区在示范工程运行前,每年农田排入水体的总氮量约 5325 kg (水泥沟渠的拦截率按 10% 计),生活污水(前沙滩村)排入到水体的总氮量为 232 kg,养殖鱼塘排入到水体的总氮量 4797 kg,陆域总氮入河污染负荷为每年 10 364 kg。经过源头减量技术、生态拦截技术以及养分循环利用技术的集成应用后,示范区 TN 入河量削减为 5436.8 kg,削减率达 47.5%。加上河道水质改善和生境修复技术的应用,示范区内河道水质均有了较大的改观,次级支浜朱家浜水质提升了 1~2 个等级,TN 由 $6.34 \sim 8.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.13 \sim 3.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均降幅达 70.2%,水体透明度增加(表 3),植物种类和植被覆盖度大大增加,结构趋于合理,河流的生态状况有效改善,附近居民又开始在河里淘米洗菜了。

4 结论与展望

(1)“4R”理论与技术是现阶段治理农村面源污染的有效手段,源头减量结合区域内养分资源再利用是关键,区域联控是核心。作者在“十五”期间提出的农村面源污染控制的“3R”理论与技术(源头控制—过程拦截—末端修复)^[14],是一种由点到线的链状技术体系,难以实现全过程、全空间覆盖,而“4R”技术体系强调了区域联控的理念,在源头减量的基础上,考虑区域内潜在养分资源的再利用,使污染控制由单一的治理向治理与利用相结合的转变,控制空间由点、线扩展到面,形成一种复杂的网络结构技术体系,从而实现了污染控制技术在时间和空间上的全覆盖,污染控制效果更加稳定和显著。

(2)“4R”技术体系是一个开放的技术体系,需要不断地扩展更新,尤其要注重技术的标准化、物化和产品化。“4R”理论实际上是农村面源污染控制的一个总体思路,是面源污染治理不留死角的一种创新思想,适用于任何地区的农村面源污染控制。每个环节(R)都需要具体技术做支撑,而这些技术需要因地制宜,

与时俱进。国内外所有的相关技术成果均可纳入到这个技术体系中来,从而逐渐丰富“4R”理论与技术,使其具有持续的生命力。另外,技术的研发要面向推广应用,注重实用性,强调技术的标准化、物化和产品化,使相关技术更容易被推广应用。

(3)“4R”理论技术的推广应用需要配套的政策法规支持。农村面源污染控制是一项公益性事业,需要政策引导和扶持,通过一定的激励或惩罚机制/措施,结合农村的生态文明建设,使农民从思想上重视农村面源污染的严重性及其后果,提高农民的生态环境意识,鼓励广大农民全身参与,以身作则。在控制农田污染排放的同时,农作物产量及经济效益可能会受到影响,需要政府在政策上进行扶持,给予一定的生态补偿。鼓励农民采用低投、少排、环境友好的种植方式、施肥方法与管理模式,鼓励村镇实施环境友好的污染物管理机制。只有有效控制了河道的外源污染输入,河道的生态修复和水质改善技术才能发挥实效,才能恢复河道的自净能力,还河道“一河清水”,才能真正实现山美水美环境美的最终目标。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报. 2010. http://www.stats.gov.cn/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/t20100211_40262116.htm.
- [2] 杨林章,施卫明,薛利红,等. 农村面源污染治理的“4R”治理技术: 总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8. YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [3] YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Winter Legumes in rice crop rotations reduces nitrogen loss, and improves rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, DOI 10.1007/s13593-013-0173-6.
- [4] 薛利红,俞映惊,杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 222-227. XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [5] 俞映惊,薛利红,杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 988-996. YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(5): 988-996.
- [6] 俞映惊,薛利红,杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式

- 对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2475-2482.
- YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2475-2482
- [7] Min Ju, ZHAO Xu, SHI Wei-ming, et al. Annual nitrogen balance and losses in greenhouse vegetable systems in South-eastern China[J]. *Pe-dosphere*, 2011, 21(4):464-472.
- [8] 陆扣萍, 闵炬, 李蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):706-71.
- LU Kou-ping, MIN Ju, LI Meng, et al. Effect of nitrogen fertilizer application rates on annual nitrogen leaching loss from protected vegetable production system in Tai Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):706-712.
- [9] 杨林章. “十一五”国家水专项太湖项目“闸控入湖河流直湖港及小流域污染控制技术与工程示范课题(2008ZX07101-005)”技术报告[Z]. 2011.
- [10] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报. 2013, 32(5), 881-888.
- XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5), 881-888.
- [11] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源源污染治理的“4R”理论与工程实践: 生态拦截技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1697-1704.
- SHI Wei-ming, XUE Li-hong, WANG Jiang-guo, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Retain Technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32, 32(9):1697-1704.
- [12] 常志州, 黄红英, 靳红梅, 等. 农村面源源污染治理的“4R”理论与工程实践: 氮磷养分循环利用技术. 农业环境科学学报. 2013, 32(10). 1697-1704.
- CHANG Zhi-zhou, HUANG Hong-ying, JIN Hong-mei, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Reuse of N and P in agricultural waste[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10), 1697-1704.
- [13] 刘福兴, 宋祥甫, 邹国燕, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 水环境生态修复技术 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2105-2111.
- LIU Fu-xing, SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Restoration technology [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2105-2111.
- [14] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6.
- WU Yong-hong, HU Zheng-yi, YANG Lin-zhang. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: Reduce-Retain-Restoration (3R) theory and its practice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 1-6.