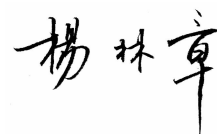


面源污染治理专论

序: 农村面源污染已经成为我国湖泊富营养化及水环境污染的最重要来源,控制农村面源污染是治理湖泊富营养化及改善农村水环境的当务之急。如何实现农村面源污染的有效控制、哪些技术可为面源污染的控制提供保障、如何将这些技术应用于工程实践是从事农村环境研究工作者的职责所在。本系列论文的作者在多年从事农村面源污染发生过程、迁移转化机制、治理技术研究及工程实践的基础上,经总结提炼,形成了农村面源污染治理的“4R”理论与技术,即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore)技术,提出了农村面源污染治理的总体思路、相关技术集成与工程化应用框架。本系列论文包括农村面源污染治理的总体思路与“4R”技术、面源污染的源头减量技术、污染物的过程阻断与拦截技术、养分再利用技术、水环境生态修复技术,以及面源污染治理技术集成与工程实践等6个部分,供从事农村面源污染治理研究与技术开发的相关研究与工程技术人员参考,以使这些技术与示范工程能为我国农村面源污染治理、水环境改善与生态修复做出贡献。



农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践 ——总体思路与“4R”治理技术

杨林章^{1,2}, 施卫明², 薛利红^{1,2}, 宋祥甫³, 王慎强², 常志州¹

(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.上海市农业科学院,上海 201403)

摘要: 在点源污染逐步得到控制后,农村面源污染问题日益突出,已成为目前水环境污染控制的重点和难点。本文系统总结归纳了农村面源污染的特征,提出了农村面源污染治理的总体思路及指导原则,总结提炼了农村面源污染治理的“4R”理论,即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore),阐述了“4R”理论的具体技术组成以及相互间的关系。并结合“十一五”水专项,在直湖港小流域龙延村进行了“4R”理论的具体工程设计和应用。工程实践证明,“4R”理论指导下的龙延村面源污染综合防控示范工程达到了预期的设计目标,核心示范区 TN 入河量削减率为 47.5%。支浜朱家浜水质明显改善,提升了 1~2 个等级,其中 TN 平均降幅达 70.2%,NH₄-N 平均下降 84.1%(由 2.66~5.33 mg·L⁻¹ 降至 0.29~1.28 mg·L⁻¹),COD_{Mn} 平均降幅 55.7%(由 9.60~15.6 mg·L⁻¹ 降至 4.52~7.7 mg·L⁻¹)。

关键词: 农村面源污染控制;源头减量-过程阻断-养分再利用-生态修复的 4R 理论;工程应用;水环境治理

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0001-08 doi:10.11654/jaes.2013.01.001

Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for the Controlling the Agricultural Non-point Source Pollution in Countryside in China:General Countermeasures and Technologies

YANG Lin-zhang^{1,2}, SHI Wei-ming², XUE Li-hong², SONG Xiang-fu³, WANG Shen-qiang², CHANG Zhi-zhou¹

(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)

Abstract: After point pollution was effectively controlled, the non-point source pollution was more and more serious and became the focus of water environment pollution control. In this paper, the characteristics of non-point source pollution in countryside was summarized, and the guideline and principle of non-point pollution control was put forward. Then, the strategy for controlling agricultural non-point source pollution, Reduce-Retain-Reuse-Restore theory(4R theory) was proposed and its internal relationship and technology components was explained. Furthermore, under the support of national water control project, 4R theory was applied at Longyan country, watersheds of Zhihugang River, Tai Lake region to control the non-point pollution. The practice of the engineers proved that comprehensive non-point pollution control

收稿日期:2012-12-08

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金(CX(12)3046);国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004,2008ZX07101-005)资助

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

demonstration project achieved the expected design goals, the TN load to river decreased about 47.5%. The water quality of branch Zhujia-bang in Longyan country was improved obviously, and the concentration of TN decreased from 6.34~8.83 mg·L⁻¹ to 1.13~3.78 mg·L⁻¹, NH₄-N decreased from 2.66~5.33 mg·L⁻¹ to 0.29~1.28 mg·L⁻¹, COD_{Mn} decreased from 9.60~15.6 mg·L⁻¹ to 4.52~7.7 mg·L⁻¹, respectively.

Keywords: Countryside non-point pollution control; Reduce-Retain-Reuse-Restore(4R) theory; engineer application; water environment control

随着工业废水和城市生活污水等点源污染得到有效控制,农村面源污染已经取代点源成为水环境污染的最重要来源。根据美国、日本等国家的研究,即使在点源污染全面控制(达到零排放)之后,江河的水质达标率仅为65%,湖泊的水质达标率为42%,海域水质达标率为78%^[1]。“十一五”国家水专项课题对太湖流域污染负荷来源的分析表明,总氮和总磷农村面源污染所占的比重约为58%和40%(内部资料^①)。北京密云水库、天津于桥水库、安徽巢湖、云南洱海、上海淀山湖等水域,农村面源污染比例已超过点源污染,上升为威胁饮用水源的主要原因。农村面源污染控制不仅成为水环境污染控制的重点和难点,也逐步成为现代农业和社会可持续发展的重大课题,成为建设资源节约与环境友好型社会的瓶颈之一。

目前,国内外已开展了许多关于农村面源污染控制技术的研究和相关工程建设,包括农田面源污染控制的肥料管理技术^[2-5]、缓冲带或植物过滤带技术等^[6-8],农村生活污水治理的土壤毛细管渗滤净化技术、蚯蚓生态滤池技术、氧化沟技术和湿地处理技术等^[9]、农业废弃物、畜禽粪便和生活垃圾的厌氧发酵产沼气技术以及堆肥技术^[10-11]等等、养殖肥水回灌技术等^[12]、以及针对塘、浜和小河等小水体的生态护岸技术、浮床技术、湿地净化技术等^[13-16],这些技术及相应的工程建设在削减农村面源污染负荷中均起到了一定的作用。但是,国外的一些成功技术相当多的是以牺牲农业生产产量或中小企业发展为代价,来达到保护环境的目的。此外,这些技术多是针对农村面源污染的局部环节而设计的,技术零散,集成度低。源头减量、过程拦截、循环利用相结合的一体化技术仍然较为缺乏,区域整体环境改善效果不理想。不少农业面源污染控制工程还停留在“就事论事”的技术层面,缺乏系统和全面的控制体系,难以实现长期的有效控制。所建设的农业面源控制工程往往由于结构单薄和体系的单一,极易造成主次矛盾不分、控制效率不稳

定、运行成本偏高等现象。而农村面源污染的特性决定了要从根本上改观农村面源污染现状,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。因此,就当前农村面源污染控制,亟需对现有的技术进行梳理、验证和组装集成,总结提炼形成一套全面系统的污染控制理论与技术来指导相关工程体系的建设,并在区域上付诸实施,从而提高农村面源污染控制的效果。

本文是作者在多年从事农村面源污染发生过程、治理技术研究与工程实践的基础上,在“十一五”水专项课题的资助下,在直湖港小流域进行了相关技术的研发和组装集成,通过工程示范,达到了区域污染控制的效果。在此基础上,经总结提炼,提出了农村面源污染治理的总体思路和成套技术,仅供从事面源污染治理研究与技术开发的相关人员参考。

1 农村面源污染的内涵及其特征

农村面源污染又称农村非点源污染,是指在农业生产和生活活动中,溶解的或固体的污染物,如氮、磷、农药及其他有机或无机污染物质,从非特定的地域,通过地表径流、农田排水和地下渗漏进入水体引起水质污染的过程。典型的农村面源污染包括农田径流(化肥、农药流失)和渗漏、农村地表径流、未处理的农村生活污水、农村固体废弃物及小型分散畜禽养殖和池塘水产养殖等造成的污染^[17-19]。农村面源污染具有以下特征:

(1)污染来源的分散性、复杂性以及溯源的困难性。受我国农业生产现状的影响,我国农村面源污染来源于千家万户,来源分散而且复杂,涉及的地域范围广,不仅包括农田径流、农户的生活污水排放和村镇地表径流,还包括农村生活垃圾及固体废弃物、小型畜禽养殖和池塘水产养殖等造成的污染。这就造成了难以在发生之处进行监测、真正的源头难以或无法追踪,治理难度加大。

(2)污染物排放的不确定性和随机性。农村面源污染物的排放受时间、空间的影响较大,排放过程具有明显的不确定性和随机性。同时,农户的施肥行为、

^①余晖,等.“十一五”国家水专项太湖项目“太湖流域环境综合调查与湖泊富营养化综合控制方案研究(2008ZX07101-001)”技术报告。

生活用水等习惯、畜禽养殖等行为都因人的主观意愿而变,加上大部分农村面源污染的发生受降雨事件的驱动,决定了农村面源污染排放源、排放时间以及空间分布的不确定性和随机性^[20]。此外,污染物在进入水体之前的沿程迁移路线千差万别,无疑加大了污染负荷估算的难度。

(3)污染物以水为载体,其产流、汇流特征具备较大的空间异质性。农村面源污染实际上是指对水体的污染,各种污染物以水为载体,通过扩散、汇流、分流等过程进入水体。由于农村地域宽广、土地利用方式多样、地形地势复杂,这就造成降雨引起的产流汇流特征受空间地形的影响,具备较大的空间异质性,污染物的排放区和受纳区难以准确辨认,污染高风险区难以辨识。

(4)污染物具有量大和低浓度特征,难治理,成本高,见效慢。不同于点源污染,农村面源污染物一般是COD、TN和TP,排放的大部分污染物在进入水体后浓度相对较低,TN浓度一般低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP浓度一般低于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于浓度低,污染物来源多而分散,造成治理难度加大,传统的脱氮除磷工艺去除效率较低且成本高,见效慢。有效去除低浓度的面源污染物是当前面临的一大难题。

2 面源污染治理的整体思路

鉴于农村面源污染来源复杂和分散、发生随机、污染物浓度低、难以治理等特征,以及我国农村生态环境的现状,农村面源污染的治理要取得实效,必须因地制宜,从污染物的排放、迁移、污染成灾等过程入手,实行从“源头减量-过程阻断-末端治理”的全过程控制,同时兼顾污染物中养分的农田回用。同时,在农村面源污染治理中必须遵守以下4个原则:

(1)总量削减与过程控制相结合。污染物总量削减是目标,污染物的过程控制是保障。只有在污染物削减总量目标的指引下,有计划有目的地进行过程控制,才能达到预期的效果。

(2)污染治理与养分再利用结合。污染物治理是根本,养分再利用是途径。氮磷养分等进入水体后成为污染物,但对于农田和作物,其是重要而必不可缺的养分。因此,对养分进行再利用是减少污染的一个有效途径,不仅可以减少污染治理的成本,还能实现资源的再利用。

(3)技术研究与工程应用结合。先进有效的技术是前提,但技术必须以工程的形式进行应用,也是对

技术效果及其可行性的检验。两者结合并付诸实施,才能提高面源污染治理的效果。

(4)污染物管理与生态文明建设结合。要从根本上减少农村面源污染,一定要加强对污染物的管理,建立一定的激励或惩罚机制,并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,才能真正实现农村面源污染治理的效果,改善农村生态环境。

3 面源污染治理的4R技术体系

农村面源污染治理的“4R”控制技术,即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore)技术,四者之间相辅相成,构成一完整的技术体系链(图1)。“4R”控制技术体系是以污染物削减为根本,从污染物的源头减量入手,根据治理区域的污染汇聚特征进行过程阻断,通过对养分的循环再利用减少污染物的入水体量(图2),并对水体进行生态修复(图3),从而实现水质改善的目的。源头减量-过程阻断-生态修复三者之间在逻辑上是一环紧扣一环,呈串联结构,但在实施地域的空间上则是互相独立的;养分再利用则把三者在地域空间上有效的连接起来,使其成为一个复杂的网络体,从而达到污染控制技术在时间和空间上的全覆盖,使整个系统的污染控制效果更好。要实现农村面源污染的有效控制,“4R”技术缺一不可。“4R”技术体系的构架如下:

3.1 源头减量(Reduce)技术

源头减量技术即通过农村生产生活方式的改变来实现面源污染产生量的最小化。针对高度集约化的农田,可根据作物高产养分需求规律以及土壤供肥特征等进行肥料优化管理,采用新型缓控释肥或新的按需施肥技术,提高肥料利用率,减少化肥用量^[21-22];也可通过种植制度等的调整如改稻麦轮作为稻-绿肥轮作、稻-蚕豆轮作或稻-休闲来减少化肥投入量^[23];也可通过施用肥料增效剂、土壤改良剂等增加土壤对养分的固持,从而从源头上减少养分流失^[24]。针对果园的养分流失,可采用桃园生草覆盖技术,既减少了土壤的地表径流,也可增加桃园有益昆虫的数量,增加生物多样性而减少桃树病虫害的发生,减少农药用量^[25]。针对分散畜禽养殖和农村固废,改传统的养殖方式为生态养殖方式,如改变传统的水冲圈养猪方式为生物发酵床养殖^[26],并加强对畜禽粪便以及农村固废的管理和无害化处理,减少露天堆放,从而减少污

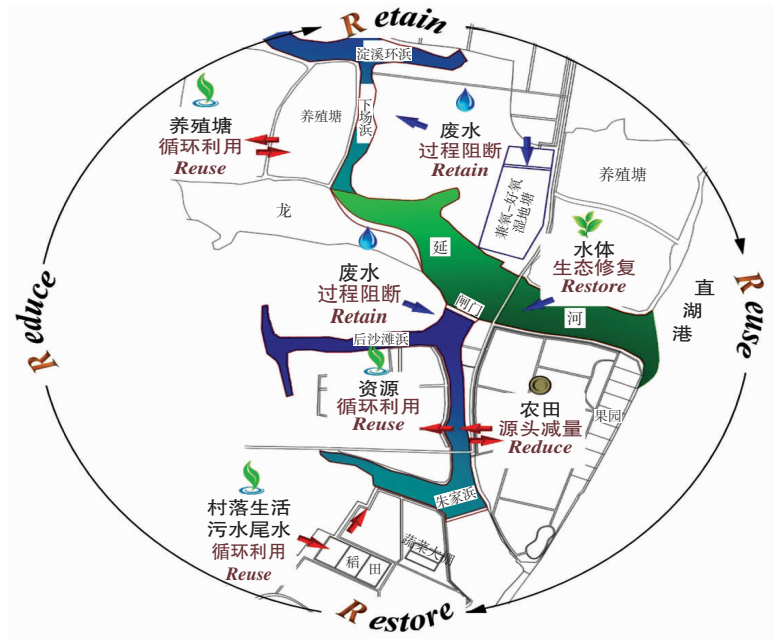


图1 面源污染治理“4R”技术体系构架图

Figure 1 The frame of the 4R technology on controlling non-point source pollution

染的发生。针对陆域水产养殖,可采用优化投饵方式,并循环用水,实现养殖废水的循环利用,从而达到污染物的零排放或最小排放。针对村镇地表径流,通过增加地面的透水性能,如设置生态吸水路面等,减少地表径流的源头发生量。

3.2 过程阻断(Retain)技术

过程阻断技术指在污染物向水体的迁移过程中,通过一些物理的、生物的以及工程的方法等对污染物进行拦截阻断和强化净化,延长其在陆域的停留时间,最大化减少其进入水体的污染物质。目前常用的技术有两大类,一是农田内部的拦截,如稻田生态田埂技术(通过适当增加排水口高度、田埂上种植一些植物等阻断径流)^[27]、生物篱技术^[28-29]、生态拦截缓冲带技术^[7-8]、设施菜地增设填闲作物技术(夏天蔬菜揭棚期种植甜玉米等填闲作物对残留在土壤中的多余养分进行回收利用,阻断其渗漏和径流)^[30]、桃园生草技术(果树下种植三叶草等减少地表径流量)。另一大类是污染物离开农田后的拦截阻断技术,包括生态拦截沟渠技术^[31]、人工湿地塘技术^[32]、生态丁型潜坝技术(一种用于河流污染治理的生态丁型潜坝,发明专利,申请号:20110403497.8)、生态护岸边坡技术、土地处理系统等。这类技术多通过对现有沟渠塘的生态改造和功能强化,或者额外建设生态工程,利用物

理、化学和生物的联合作用对污染物主要是氮磷进行强化净化和深度处理,不仅能有效拦截、净化农田污染物,还能汇集处理农村地表径流以及农村生活污水等,实现污染物中氮磷等的减量化排放或最大化去除。

3.3 循环利用(Reuse)技术

循环利用技术即将污染物中包含的氮磷等养分资源进行循环利用,达到节约资源、减少污染、增加经济效益的目的。对达标排放的农村生活污水尾水以及河道低污染水,可回灌农田尤其是稻田,通过植物的吸收以及土壤等的吸附固持,实现低污染水中氮磷养分的再利用,不仅能控制污染,又能减少化肥投入,实现生产和环境的双赢。如低污染水的稻田净化技术,即利用稻田对旱地排水以及农村生活污水尾水等低污染水进行净化处理,稻季只需补充正常施肥量的30%~40%左右即可保证达到农户的正常产量,可减少养分环境排放 TN 90 kg·hm⁻² 以上, TP8 kg·hm⁻² 以上(内部资料^②)。此外,还可对旱地(果园和菜地)的径流进行收集,回灌到稻田中去,实现养分的循环利用。针对陆域水产养殖,可采用水产养殖污水序批式置换循环再利用技术,可实现陆域水产养殖用水的内循环,基本实现污染的零排放(一种养殖污水序批式循环处理与再利用系统,实用新型专利,授权号:

②杨林章,等.“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。

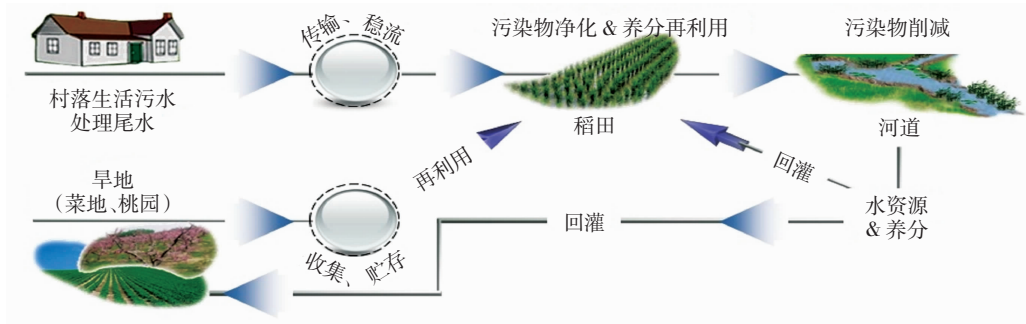


图2 农村各类养分的循环利用示意图

Figure 2 The pathway of the nutrients reuse in countryside

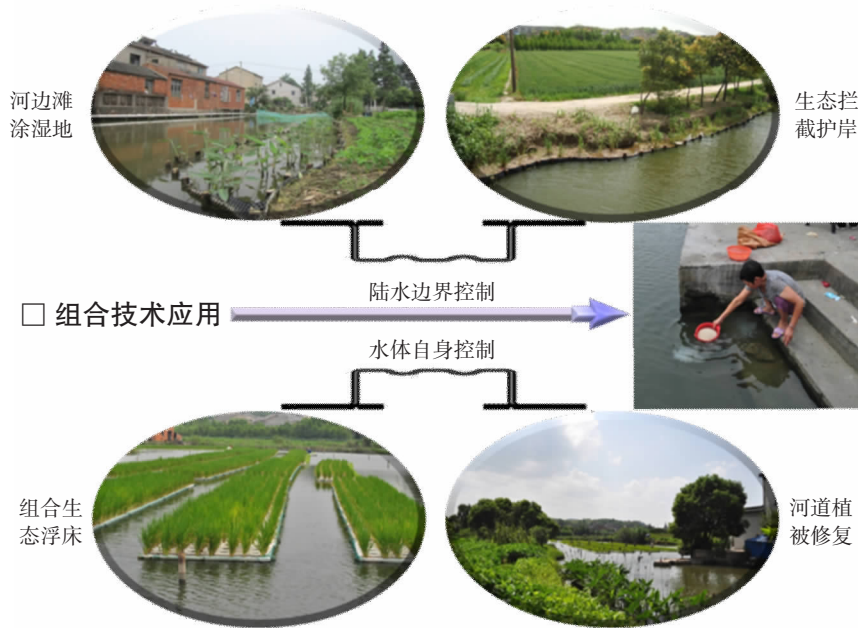


图3 农村水体的生态修复技术系统

Figure 3 Restoration of water body in countryside

201120198978.5)。农村固体废弃物和生活垃圾等,其中的有机部分可采用无害化堆肥技术,畜禽粪便可采用肥料化、沼气化等技术,实现废弃物中养分资源的循环再利用。

3.4 生态修复(Restore)技术

生态修复是农村面源污染治理的最后一环,也是农村面源污染控制的最后一道屏障。狭义的讲,其主要指对水体生态系统的修复,通过一些生态工程修复措施,恢复其生态系统的结构和功能,包括岸带和护坡的植被、濒水带湿地系统的构建、水体浮游动物及水生动物等群落的重建等,从而实现水体生态系统自我修复能力的提高和自我净化能力的强化,最终实现水体由损伤状态向健康稳定状态转化。目前常用的技术有河岸带滨水湿地恢复技术、生态浮床技术^[13]、水产养殖污水的沉水植物和生态浮床组合净化技术^[14]

等。针对农村河道的低污染水,以水稻作为浮床植物,采用水稻组合生态浮床修复水体技术,弥补了传统生态浮床处理效率不稳定、应用过程中成本无法部分补偿的缺点,不仅可获得一定的水稻产量,对开放水域 NH_4^+-N 、TP的处理效率达到19%和22%以上(内部技术报告)。通过多种技术的应用组和,可以达到农村面源污染的有效控制^[33-34]。

更广义的讲,生态修复是指农业生态系统的整体修复,通过生态工程措施恢复和提高系统的生物多样性,从而实现生态系统的健康良性发展^[35]。

4 面源污染治理“4R”技术的工程应用与效果

“十一五”期间,在国家水专项课题“闸控入湖河流直湖港及其小流域污染控制技术与工程示范”(2008ZX07101-005)的资助下,在对闸控河道直湖港

水文水动力学特征及污染来源解析的基础上,基于闸控河流污染控制的区域联控策略,以提出的“4R”技术为支撑,结合直湖港小流域的地形水系特点,重点选择直湖港下游胡埭镇龙延村作为综合示范区(面积为 2 km^2)进行技术系统的设计,建设“点(源)-面(源)-线(河道)”的面源污染控制系统示范工程,基本实现了示范区内全过程、全区域的覆盖以及不同工程之间的无缝对接。示范区由陆域清水入河示范工程和河道水质改善及生态修复示范工程两部分共9个小示范工程组成(具体分布如图4),各个示范工程的技术组成如表1。

通过系统设计和工程实施,改变了以往农田污染物的无序直排现象,实现了示范区内污染物的有序控制以及污染物中氮磷养分的多级阻控和循环利用,使稻田由原来的污染源变成污染物的消纳汇,克服了以往治理工程之间的分散独斗等缺点,通过工程之间的系统整合,从而使示范区的污染物控制效果大幅提高,整个区域的水环境质量得到了提升。

核心示范区 TN 入河量由实施前的 $10\ 368\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$

削减为 $5\ 436.8\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$, 削减率为 47.5%。朱家浜支浜的水质明显改善(图5),提升 1~2 个等级,其中 TN 平均降幅达 70.2%(由 $6.34\sim 8.83\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $1.13\sim 3.78\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), COD_{Mn} 平均降幅 55.7%(由 $9.60\sim 15.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $4.52\sim 7.7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均下降 84.1%(由 $2.66\sim 5.33\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.29\sim 1.28\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), TP 平均降幅 25.0%(由 $0.17\sim 0.47\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.11\sim 0.27\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

5 结论

近 20 多年来,中国已经成为世界上湖泊富营养化最严重的国家之一。在污染的地表水体中,农业面源污染所占份额越来越高,农业面源污染的危害也日益严重,对农业面源污染采取有效的控制措施,并进行农业面源污染控制工程建设已经成为中国地表水环境保护工作的当务之急。本文在系统研究了农村面源污染特征的基础上,创新性地提出了农村面源污染控制的总体思路和“4R”成套技术,不仅丰富了农村面源污染治理的理论,也在农村环境治理中得到了有效的应用。在“4R”技术的支撑下,通过污染物的区域

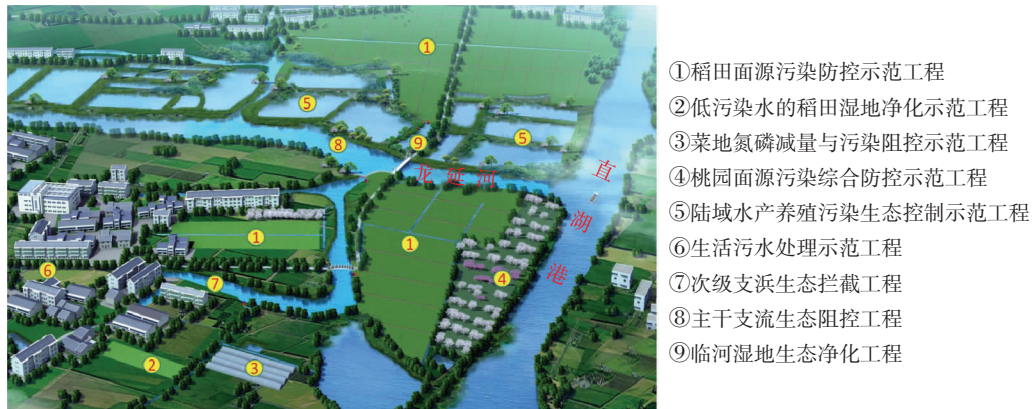


图4 核心示范区的示范工程分布图

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

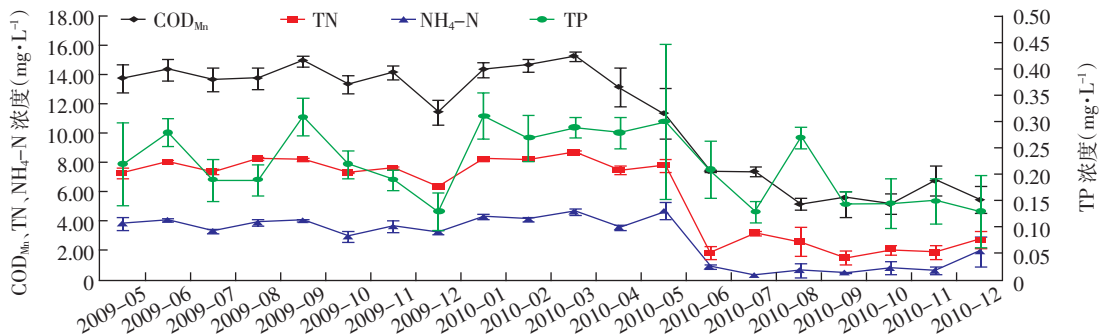


图5 朱家浜水质改善效果(示范工程2010年4月起运行)

Figure 5 The change of water quality in Zhujiabang(The experiment started from April 2010)

表1 示范区相关示范工程的技术组成

Table 1 The technologies used in the demonstration area

示范工程名称	源头减量技术(Reduce)	过程阻断技术(Retain)	循环利用技术(Reuse)	生态修复(Restore)
稻田面源污染防控示范工程	化肥源头减量技术有:有机无机配施技术、新型缓控释肥技术、基于叶色的按需施肥技术、稻麦轮作改稻-紫云英轮作技术;农药源头减量技术有:频振式杀虫灯技术、性引诱剂技术和生物农药技术	生态拦截沟渠技术(冬种水芹,夏种空心菜和水稻);无肥生态拦截带技术;人工湿地技术		
低污染水的稻田湿地净化示范工程	基于低污染水回灌的化肥减施技术		低污染水的稻田湿地净化技术	
菜地氮磷减量与污染阻控示范工程	化肥减量技术	填闲作物技术;生态拦截沟渠技术	菜地排水的稻田回用技术	
桃园面源污染综合防控示范工程	桃园生草技术(减少农药投入);水蜜桃专用缓控释肥减量深施技术	桃园生草技术(减少径流);生态拦截沟渠技术	生态塘汇流净化技术	
陆域水产养殖污染生态控制示范工程	养殖结构调整技术	沉水植物的原位净化技术	基于蟹塘的鱼塘污水序批式异位处理技术	
生活污水处理示范工程		塔式蚯蚓生物滤池处理生活污水技术		
次级支浜生态拦截工程		生态丁型潜坝拦截净化技术		生态拦截与稳定护岸技术;组合生态浮床生态净化技术
主干支流生态阻控工程		置入式生态滤床污染阻控技术		滩涂湿地恢复技术
临河湿地生态净化工程		兼氧-好氧湿地塘拦截净化技术		

联控,改变了以往农田污染物的无序直排现象,实现了示范区内污染物有序控制、污染物中的氮磷养分多级阻控和循环利用,使稻田由原来的污染源变成污染物的消纳汇;通过工程之间的系统整合,克服了以往治理工程之间的分散独斗等缺点,不但可以有效防控农村面源污染的发生、发展和产生,而且还能够有效地削减农村面源污染的负荷,减少污染物进入水体,从而减轻面源污染对主要河流及湖泊水体的污染。本文研究结果对于集约化农区面源污染综合防控理论和技术体系的发展具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 朱兆良, David Norse, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [2] Peña-Haro S, Llopis-Albert C, Pulido-Velazquez M, et al. Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 392(3-4): 174-187.
- [3] 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): 1133-1138. 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.
- [4] Xue L H, Yang L Z. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100: 524-534.
- [5] Min J, Zhang H L, Shi W M. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111: 53-59.
- [6] Marc Duchemin, Richard Hogue. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(1-2): 85-97
- [7] 李国栋, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制[J]. *生态学报*, 2006, 25(8): 905-910. LI Guo-dong, HU Zheng-yi, YANG Lin-zhang, et al. Soil nitrogen and phosphorus losses with surface runoff from typical vegetable field of Taihu Lake region and their control with grass buffer strip[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 905-910.
- [8] 张刚, 王德建, 陈效民. 太湖地区稻田缓冲带在减少养分流失中的作用. *土壤学报*, 2007, 44(5): 873-877. Zhang Gang, Wang De-jian, Chen Xiao-min. Roles of buffer strips in reducing nutrient loss from paddy field in Taihu lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 873-877.
- [9] 李先宁, 吕锡武, 孔海南, 等. 农村生活污水处理技术与示范工程研究. *中国水利*, 2006, 17: 19-22. LI Xian-ning, LÜ Xi-wu, KONG Hai-nan, et al. Research on rural sewage treatment techniques and application in demonstration projects [J]. *China Water Resources*, 2006, 17: 19-22.
- [10] 张后虎, 胡源, 张毅敏, 等. 太湖流域农村分散居民生活垃圾与生活污水共处置强化产沼技术[J]. *生态与农村环境学报*, 2010(增): 19-23. ZHANG Hou-hu, HU Yuan, ZHANG Yi-min, et al. Anaerobic co-digestion of domestic solid waste and wastewater of disperse rural households in Taihu Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010(Suppl): 19-23.

- [11] 杨天学, 席北斗, 魏自民, 等. 生活垃圾与畜禽粪便联合好氧堆肥[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10):1187-1192.
YANG Tian-xue, XI Bei-dou, WEI Zi-min, et al. Mixed composting of municipal solid waste and manure, *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(10):1187-1192.
- [12] 高立洪. 规模猪场肥水灌溉技术及其相关问题探讨[D]. 西南大学, 2008.
- [13] 宋祥甫, 邹国燕, 陈荷生. 生态浮床技术治理污染水体的有效性及其应用[M]//太湖高级论坛交流文集. 中国上海, 2004年12月.
SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan, CHEN He-sheng. Effectiveness of floating beds technology on water pollution treatment and its application[M]. High-level Forum on Taihu Lake, Shanghai, China, Dec 2004.
- [14] 罗思亭, 张饮江, 李娟英, 等. 沉水植物与生态浮床组合对水产养殖污染控制的研究[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(2):87-94.
LUO Si-ting, ZHANG Yin-jiang, LI Juan-ying, et al. Effect of combination of submerged macrophyte with ecological floating bed on aquacultural pollution controlling[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(2):87-94.
- [15] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 189-197.
- [16] Raisin G W, Mitchell D S. The use of wetlands for the control of non-point source pollution[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 177-186.
- [17] Yang L Z, Xia L Z, Zhang G L, et al. Nitrogen discharge from aquacultural ponds and the possible impact on water body[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2003, 71(4): 866-871.
- [18] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. *Nutrient Cycling and Agroecosystem*, 2009, 83: 73-84
- [19] Shan Y H, Yang L Z, Yan T M, et al. Downward movement of phosphorus in paddy soil installed in large-scale monolith lysimeters [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 111: 270-278.
- [20] 夏立忠, 杨林章, 吴春加, 等. 太湖地区典型小城镇降雨径流 N P 负荷空间分布的研究, 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 267-270.
XIA Li-zhong, YANG Lin-zhang, WU Chun-jia, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus loads in runoff in a representative town in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):267-270.
- [21] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区不同氮肥管理模式水稻麦轮作农田氮素利用与流失的研究[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.
- [22] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 103-112.
- [23] 乔俊, 颜廷梅, 薛峰, 等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):24-31.
QIAO Jun, YAN Ting-mei, XUE Feng, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 24-31.
- [24] 姬红利, 颜蓉, 李运东, 等. 施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究[J]. 土壤, 2011, 43(2): 203-209.
JI Hong-li, YAN Rong, LI Yun-dong, et al. Effects of Soil Ameliorants on Phosphorus Loss[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 203-209
- [25] 万年峰, 季香云, 蒋杰贤, 等. 桃园生草对桃树上主要害虫及天敌生态位的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1):1-6.
WAN Nian-feng, JI Xiang-yun, JIANG Jie-xian, et al. Effects of ground cover on the niches of main insect pests and their natural enemies in peach orchard[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(1):1-6.
- [26] 王诚, 张印, 王怀忠, 等. 零排放无污染发酵床养猪关键技术研究[J]. 山东农业科学, 2009, 6: 101-103.
- [27] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, 20: 29-31.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Features and ways of control of non-point Agricultural pollution in Taihu area[J]. *China Water Resources*, 2004, 20:29-31.
- [28] 聂军, 廖育林, 谢坚, 等. 自然降雨条件下香根草生物篱对菜地土壤地表径流和氮流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 12-17.
NIE Jun, LIAO Yu-lin, XIE Jian, et al. Impacts of biological hedgerow of vetiver on surface runoff and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 12-17.
- [29] Duchemin M, Hogue R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(1-2): 85-97.
- [30] Min J, Shi W M, Xing G X, et al. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems[J]. *Nutrient cycling and agroecosystem*, 2011, 91: 31-39.
- [31] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1371-1374.
YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1371-1374.
- [32] Raisin G W, Mitchell D S. The use of wetlands for the control of non-point source pollution[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 177-186
- [33] Wu Yonghong, Hu Zhengyi, Yang Linzhang. Hierarchical eco-restoration: A systematical approach to removal of COD and dissolved nutrients from an intensive agricultural area[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 3123-3129.
- [34] Wu Yonghong, Philip G Kerr, Hu Zhengyi, et al. Ecorestoration: Simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 2472-2477.
- [35] 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: reduceretain-restoration(3R) theory and its practice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 1-6.