

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

刘福兴¹, 宋祥甫¹, 邹国燕¹, 付子轶¹, 刘娅琴¹, 薛利红², 杨林章^{2,3}

(1.上海市农业科学院, 上海 201403; 2.江苏省农业科学院, 南京 210014; 3.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:当前,我国农村水体普遍污染严重,作为农村面源污染治理技术体系中的最后一环,农村水环境生态修复技术的实施具有十分重要的现实意义。本文在自己已有工作的基础上,总结和梳理了国内外适合我国农村的水环境生态修复技术,并分别按技术原理进行了阐述。研究表明,其中的生态浮床技术具有投资少、见效快、管理方便等优点,是一种行之有效的水体原位生态修复技术,尤其是采用水稻等能产生经济效益的植物作为浮床植物,不仅可以改善水质,其收益也能补偿部分投资成本;水生植物恢复技术是提高水体自净能力、恢复水生态系统结构和功能的必然选择,按照目标要求进行水生植物恢复,可以有效降低水体污染物浓度,促进水生态系统良性发展;以土壤生物工程为主的生态护坡技术适合我国农村河道的边坡修复,河岸植被群落能够得到良好恢复,坡岸土壤侵蚀和农业面源污染均能得到有效控制。生态修复技术的应用需与生态拦截技术和养分利用技术相协调,要以不同功能和目标需求为导向,注重采用组合技术工艺进行修复,以提高水环境生态修复的效果。

关键词:面源污染;水环境生态修复;生态浮床;水生植物恢复;生态护坡

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2105-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.001

Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for the Controlling the Agricultural Non-point Source Pollution in Countryside in China:Eco-Restoration Technology

LIU Fu-xing¹, SONG Xiang-fu¹, ZOU Guo-yan¹, FU Zi-shi¹, LIU Ya-qin¹, XUE Li-hong², YANG Lin-zhang^{2,3}

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

Abstract: At present, rural water body in China is seriously polluted in general. The rural water environment ecological restoration, as the last step of non-point source pollution control technology system, has vital practical significance. In this paper, on the basis of previous work, rural water environment ecological restoration technologies at home and abroad were concluded and their technical principles were expounded. Some important conclusions were found, firstly, ecological floating bed technology is an effective water ecological restoration technology in situ with advantages of less investment, faster effect, and easier management. Especially the use of rice or other plants which can produce economic benefits as floating bed plants, not only can improve water quality, but also compensate for part of the investment cost. In addition, aquatic plants restoration technology is inevitable choice to improve self-purification capacity of water bodies and restored structure and function of aquatic ecosystem. Aquatic plants restoration, in accordance with the objectives and requirements, can reduce the concentration of pollutants in water effectively and promote water ecosystems development healthily. Finally, ecological revetment technologies, mainly the soil bioengineering, are suitable for rural river slope restoration, which could result in good recovery of the riparian vegetation and effective controlling of sloping shore erosion and agricultural non-point source pollution. The application of ecological restoration technologies can be combined with ecological interception technologies and nutrient utilization technologies. To meet different functions requirement and restoration objectives, integrated application of these technologies can improve the effectiveness of ecological restoration of water environment.

Keywords: non-point source pollution; ecological restoration of water environment; ecological floating bed; hydrophyte restoration; ecological slope protection

收稿日期:2013-10-16

基金项目:国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004);上海市闵行区中小企业技术创新项目(2013MH013)

作者简介:刘福兴(1975—),男,硕士,副研究员,研究方向为水环境治理与生态修复技术及工程设计。E-mail: liufuxing@126.com

当前,从发达国家及我国的诸多研究成果来看,农村面源污染已经取代点源污染成为水环境污染的最重要来源^[1-2],根据我国第一次污染源调查结果:农业源污染物中的总氮、总磷排放分别为270.46万t和28.47万t,分别占排放总量的57.2%和67.4%^[3]。农村面源污染具有排放路径随机、排放区域广泛以及排放量面广等特征,同时,其产流、汇流具有较大的空间异质性^[2],对区域内河道、水塘等水体的水环境质量影响较为严重,以太湖流域的直湖港为例,2007年全年水体中的总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别平均高达 $8.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其主要支流的龙延河近直湖港段,2009年下半年至2010年上半年分别平均达 $7.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。据统计,农村面源污染是造成直湖港流域水质恶化的主要因素,其中的总氮和总磷排放量分别占到总排放量的56.8%和65.6%(内部资料*)。同时由于不合理的开发利用等原因,造成水系堵塞、淤积,更加剧了水体水质的恶化。

正是由于农村面源污染对水环境质量的严重影响,及其所具有的无序排放特征,在进行治理时必须实施基于“源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore)”这样一种完整的技术体系链^[2]。源头减量可以减少污染物的产生量,但不能完全控制污染的发生;生态拦截虽可以在迁移路径上对污染物进行有效削减,但由于受场地、季节及污染物排放的不规律性等因素影响,也不能完全控制其进入水体。由此可见,在源头减量技术^[4]、生态拦截技术^[5]的基础上,进一步实施水环境的生态修复技术,以达到改善水质,提高水体自净能力,恢复水生生态系统的结构和功能的目的,是治理农村面源污染不可或缺的最后一环。本文从农村面源污染治理的“4R”体系出发,综合技术的适用性和经济性,着重阐述了适合农村水体的生态修复技术,并根据其技术原理进行了分类概括,总结了技术的应用效果及其适用范围,以期为农村面源污染治理的相关研究和工程实践提供借鉴参考。

1 水体修复的生态浮床技术

生态浮床技术是运用无土栽培的原理,采用现代农业和生态工程措施,将陆生或水生植物移栽到水面的一种水体污染治理技术^[6-7],其原理是通过植物吸收、吸附、微生物降解等作用,达到净化水质的目

的^[8-10]。该技术具有投资少、见效快、管理方便等优点,是一种行之有效的水体原位生态修复技术,广泛应用于富营养化的河道、水塘、湖泊等水体。如利用生态浮床治理杭州南应加河黑臭水体过程中,透明度从0.49 m上升并稳定在1.0 m左右,溶解氧从 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮和总磷也均显著下降^[11];在上海市郊区汇丰河治理工程中,应用生态浮床为主的技术体系,使水体主要污染物的氨氮、总氮和总磷最高降低69.9%、80.7%和63.5%^[12]。生态浮床技术不仅能降低污染物浓度,同时也对浮游植物群落产生积极影响,研究表明3种生态浮床覆盖率下水体中的浮游植物群落结构复杂性和生物多样性指数均显著高于空白对照组,其中,26%覆盖率比39%覆盖率水体中的浮游植物生物多样性指数要高,群落结构更复杂,随后是13%覆盖率处理^[13]。

传统的生态浮床技术除注重净化效率外,更多考虑景观需求,投入成本无法得到补偿,因此,结合农业生产的实际需要,在江苏无锡直湖港支流王店桥浜,采用水稻作为浮床植物,进行了水体修复实验,实验周边土地利用及监测断面设置见图1。

王店桥浜全长约800 m,生态浮床设置于中间河段,长约280 m,水面积约4200 m²,浮床总面积1000 m²,占河段水面积的23.8%,移栽时水稻平均株高43 cm,秧龄39 d,单本干物质平均重1.11 g,水稻移栽密度约每平方米18.7丛。实验前河道水体氨氮平均 $2.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷平均 $0.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,全河道透明度均在0.20~0.30 m之间,水质为劣V类,受直湖港闸控影响,水流速较小。

实验结果表明(图2):利用生态浮床水稻对开放水域进行水质净化,浮床区域(3#)水体氨氮较区外(1#)平均降低19.1%,区内3#点氨氮平均浓度 $1.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到Ⅳ类水质标准,2#点平均浓度 $2.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4#点平均浓度 $1.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而对照点的1#点浓度平均为 $2.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,5#点为 $2.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,越接近浮床设置的中心区域,氨氮去除效果越明显;从对总磷的去除效果来看,浮床区域(3#)水体较区外(1#)平均降低22.3%,区内3#点总磷平均浓度 $0.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最低达到 $0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,区外1#点平均浓度为 $0.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生态浮床水稻对总磷具有较好的去除效果。

对收获植株测定表明,利用水稻作为浮床植物,干物质收获量和理论产量分别为 $28.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $7.6\text{ t}\cdot$

*: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。

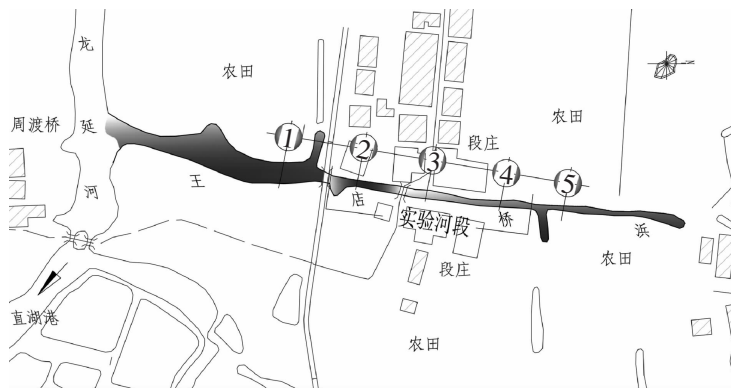


图1 实验所属河道周边土地利用情况及水质监测断面设置图

Figure 1 Surrounding land use and water quality monitoring sections set of experimental river

hm^{-2} 。同时,本实验中,植株氮磷含量的测定结果表明,通过收获水稻,直接从水体中去除氮 $316.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷 $148.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

利用生态浮床水稻对水体进行修复,不仅可以实现对水质的改善,同时还可以通过收获水稻,产生一定的经济效益,补偿了一部分污染治理的投资成本。因此,在对农村面源污染及农业生产现状进行调查的基础上,采用当地能产生经济效益的植物构建生态浮床,改善水体水质、修复水体生态,达到因地制宜、节省投资的目的。

需要说明的是,生态浮床只能作为农村水环境生态修复中的一种“强化”技术,可以在短期内实现改善水质的修复目的,但并不是永久性的技术手段,而要保持持续稳定水质、促进水生态系统的良性发展,则需要利用诸如水生植物恢复等技术措施,构建长效的技术体系。

2 水生植物恢复技术

本文阐述的水生植物恢复技术,是在农村面源污

染严重区域的河道、水塘等水体中,以改善及稳定水质、提高水体自净能力为主要目的的生态修复技术。因此,技术应用的基本思路不是要再造原有植被,而是在充分分析污染现状及功能需求的基础上,结合目标水体现存植被,通过重新设计,全部或局部恢复不同种类水生植物,促进水生态的良性发展,进而实现持续净化和稳定水质的目的。该技术的关键在于物种的筛选、组合以及因地制宜地确定植物的利用方式,以期实现最佳的生态环境效益和经济效益,并兼顾景观效果的目的^[14]。

水生植物的生态功能方面,国内外研究较为深入,主要集中在水生植物对氮磷的吸收作用^[15-18]、微生物的降解作用^[19-21]、过滤及吸附等物理作用^[22-23]、对藻类的抑制作用^[24-26]等。这些研究成果为合理利用水生植物、科学设计利用方式等实践提供了较为翔实的参数。

在直湖港小流域内的后沙滩浜内,通过分析汇流区域的土地利用方式、汇流面积,结合水质及当地主要水生植物物种,以栽植茭草(*Zizania caduiciflora*)、

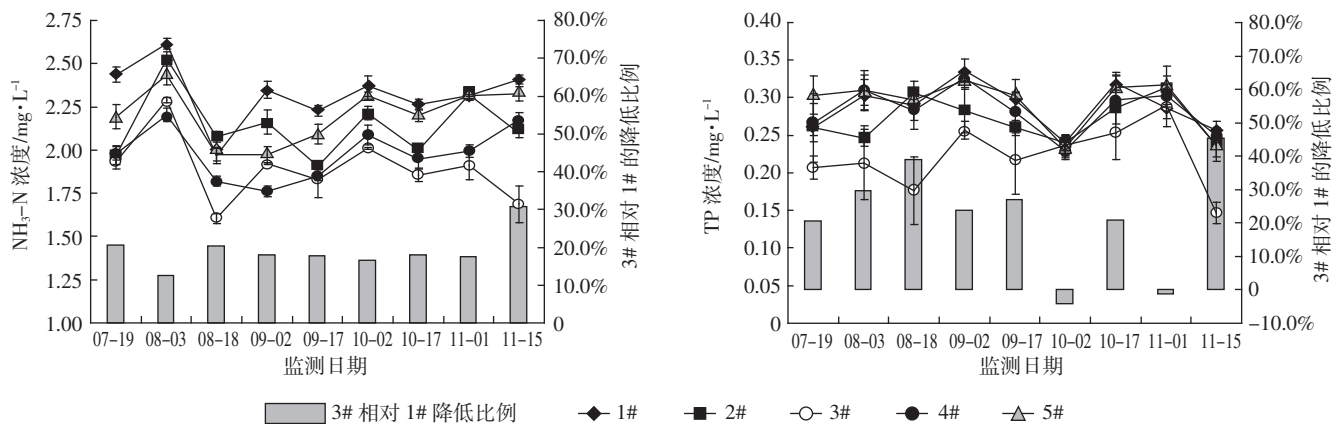


图2 实验期间河段各监测点氨氮及总磷浓度及降低比例

Figure 2 The concentration and reducing ratio of ammonia nitrogen and total phosphorus ratio in monitoring section during experiment

菱角(*Trapa*)为主进行水生植物恢复,取得了较好的效果。该河道长约200 m,面积约1800 m²,周边为农户及稻田,河道一端断头,另一端与龙延河经由闸门相连,修复时菱草幼苗移栽,栽植面积为330 m²,菱角栽植东西两段,总面积约为1080 m²。修复2个月后,水体自然生长出黑藻等沉水植物,修复期间,定期进行收割,保持水生植物所占比例。水质连续监测结果表明(图3):氨氮由修复前的平均2.25 mg·L⁻¹,降低至修复后的平均1.74 mg·L⁻¹,降低比例为22.8%,同时,修复后河道各断面氨氮浓度差异较小;总磷修复前平均为0.23 mg·L⁻¹,修复后平均为0.17 mg·L⁻¹,降低比例为24.1%。

鱼塘生态修复一般采用恢复沉水植物进行,董昌华等利用水生植物恢复技术对鱼塘富营养化水体进行修复的研究结果表明^[27]:金鱼藻等6种水生植物对水中总氮、总磷和硝态氮有较好的去除效果,而以狐尾藻和微齿眼子菜两种效果最好,1个月后对总氮的去除率分别为83.84%和77.54%,总磷的去除率均达到91.7%,且显著提高了水体透明度。张饮江等在直湖港小流域利用沉水植物恢复等技术对鱼塘进行修复的研究表明^[28]:养虾塘内栽种苦草(*Vallisneria natans*)和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*),与种植常绿鸢尾(*Iris hexagonus*)的植物浮床组合,对养殖污染的控制效果较好,总氮、总磷分别从3.41、0.32 mg·L⁻¹降至0.79、0.02 mg·L⁻¹,浮游藻类 Margalef 指数为4.00, Shannon-Wiener 多样性指数为3.32, Pielou 均匀度指数为0.76,显示养殖水体环境较稳定,水质相对较好。

水生植物恢复技术应用于农村水环境生态修复过程中,应充分考虑水体主要污染物来源,分段或分区实施,并依据当地物种因地制宜进行植物的区间配置。在恢复过程中,要注意补种或收割,以维持一定的配置比例和适度的生物量,实现长效净化水质、逐步

完善生态系统结构的目的。同时,水生植物恢复应与生态浮床及生态护坡技术相结合,成为连接“4R”中生态拦截与生态修复之间的纽带。

3 生态护坡技术

河道边坡作为水体与陆地之间的过渡带,是水生生态系统的重要组成部分,在保持水土、净化水质、防洪行洪等方面均具有重要的功能^[29]。长期以来,经济发达的太湖农村地区,由于过度开发利用,造成很多河道岸带侵蚀、植被稀少,同时,由于缺乏管理造成的翻坡种植、违章搭建等,加剧了边坡稳定性的丧失,削弱了对径流的拦截能力。因此,对结构和生物受损的河道边坡进行修复,是恢复河道生态功能的重要组成部分。

针对农村河道边坡的生态功能需求,尤其是在农村面源污染治理过程中,应更多地选择以存活植物为主要结构的生态护坡技术,该类型技术不是简单的绿化,而是充分考虑生态系统的自我修复能力,将水、河道、堤岸、植被、微生物、水生生物等结合成一个完整的河流生态体系,有着巨大的生态效能^[30-31]。当前,以植物主体结构的生态护坡技术大体可分为3类:全系列生态护坡、土壤生物工程(Soil bioengineering)以及复合生物稳定技术^[32]。全系列生态护坡技术是水生植物恢复技术的延续,即在沉水-浮叶-挺水植物恢复的基础上,增加坡顶乔-灌-草的搭配;土壤生物工程技术是一种边坡生物防护工程技术,采用有生命力的植物根、茎(秆)或完整的植物体作为结构的主要元素,按一定的方式、方向和序列将它们扦插、种植或掩埋在边坡的不同位置,在植物群落形成过程中加固和稳定边坡,控制水土流失和实现生态修复^[33],主要有活枝扦插(Live stakes)、柴笼(Live fascine)以及灌丛垫(Brush layering)等3种工程类型^[32];复合式生物稳定

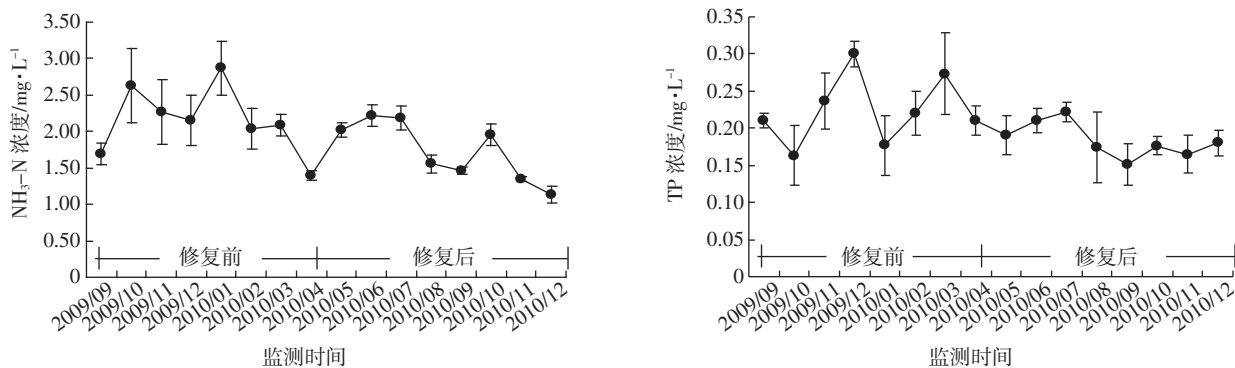


图3 水生植物恢复前后河道氨氮和总磷时空变化

Figure 3 River temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorous before and after aquatic plants recovery

技术是生物技术与工程技术相结合的复合式生态护坡技术,强调活性植物与工程措施相结合,技术核心是植生基质材料,依靠锚杆、植生基质、复合材料网和植被的共同作用,达到对坡面进行绿化和防护的目的^[34]。

农村河道的边坡修复中,土壤生物工程技术较为适合,应用也较为广泛。上海崇明前卫村某河道边坡进行土壤生物工程的效果表明^[35]:与对照相比,使用灌丛垫技术修复后的坡岸土壤剪切力、紧实度和土壤湿度显著提高($P<0.05$),坡岸植被延缓径流和去除悬浮物效果显著($P<0.05$),使用柴笼技术修复后坡岸的土壤剪切力和悬浮物去除率显著提高($P<0.05$),但对土壤湿度、紧实度和雨水径流的延滞作用不太明显。上海市机场镇生态河道示范区开展了土壤生物工程技术护坡修复,结果表明^[36]:土壤生物工程护坡技术非常适用于农业流域的河流坡岸,河岸植被群落得到了良好恢复,河流的坡岸土壤侵蚀和农业面源污染得到有效控制。

农村范围内河流的生态护坡,应从农村实际条件出发,充分考虑水土环境、水生生物、周边环境等因素,实现提升河岸带生态功能的目的。

4 其他技术

适合农村水体生态修复的技术系统除上述几种类型外,还包括适度清淤、食藻虫引导的生态修复技术等。清淤与农村水体的使用功能密切相关,如鱼塘的清淤、便于农田灌溉的河道清淤等。适度清淤可清理多年沉积的淤泥、沟通水系、改善农村河道的引排条件、提高水体的交换能力、增加河道蓄水量、提高水环境承载能力,从而实现改善水质的目的。

食藻虫引导的生态修复技术是采用经人工驯化的大型溞(*Daphnia magna*),可以快速滤食掉水华藻类及其他有机颗粒物,在短时间内较大幅度提高水体透明度,使快速种植的沉水植物不仅可以存活,而且能迅速形成植被,发挥更好的生态修复作用^[37]。应用该技术对上海市临港新城果园镇里塘河道富营养化水体进行了工程治理和生态修复,选取河段 500 m,河宽 20 m,水深平均 3.5 m。为了保持食藻虫在治理河段水体中的密度,在河道两端采用筛绢网帘拦截,治理河段共投入 4 kg 食藻虫,立即采用抛秧法种植 400 kg 伊乐藻;南岸采用扦插法栽培苦草约 30 000 株。结果表明:在生态修复工程 2~3 个月,苦草伊乐藻逐步形成水下植被,覆盖率高达 40%。每月水质跟

踪检测结果表明:高锰酸盐指数、总氮和总磷在最低时分别比 1 月份下降了 60.67%、85.36% 和 88.74%;修复过程中 11 月份水质最好,氨氮平均为 $0.088 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,叶绿素 a 平均 $5.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。试验期间,修复区水体总氮、总磷等指标显著低于对照区,水体透明度平均在 1.5~1.8 m 之间,达到 II~III 类地表水水质标准。因此,食藻虫与苦草和伊乐藻结合的生态修复方法是河道治理的一条有效途径^[38]。

5 小结与讨论

(1)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。农村面源污染治理过程中,在实施了源头减量及生态拦截技术后,仍有一部分污染物会进入水体,同时,由于农田氮磷流失、生活污水排放等影响,农村水体污染已十分严重,其生态功能严重退化。因此,实施水环境生态修复技术,不仅是改善水质、提高水体自净能力、恢复流域水生态系统结构和功能的需要,也是建立农村面源污染控制体系不可或缺的环节。

(2)生态修复需与生态拦截技术和养分再利用相协调,并以不同功能及目标需求为导向。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,实现生态系统的健康良性发展^[39]。农村面源污染的治理过程,也是农业生态与自然生态相协调的过程,因此,水环境生态修复技术的实施需要详尽分析污染物来源、迁移路径及水体空间布局等因素,结合生态拦截技术和养分再利用技术,因地制宜地设计修复方案。同时,在具体技术的应用过程中,应以水体不同功能及目标需求为导向,即根据不同区域水质现状、污染物组成、外源污染汇入类型、水-陆界面情况等开展以改善水质为导向的生态修复或以完善生态系统结构为导向的生态修复。

(3)生态修复要注重各技术工艺的组合应用,并且应在修复后进行有计划的维护管理。农村面源污染具有排放路径随机、排放区域广泛以及排放量面广等特征,造成了农村水体污染的时空差异,单一技术无法适应这些特征,需要在功能定位及目标需求的基础上,设计组合技术工艺,实现短期或长期的修复目标。现有成熟技术中,生态浮床技术是短期内改善水质最有效方法之一,而长效稳定水质、逐步提升水体自净能力、持续净化外源污染物、完善水生态系统结构和功能是生态修复的最终目标,因此,需要与水生

植物恢复、生态护坡等技术组合应用,才能更高效稳定地发挥净化作用和生态功能。同时,无论何种技术,实施后均需要根据目标要求进行计划的维护管理,以保证技术作用的持续发挥和目标的实现。

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.
ZHU Zhao-liang, David Norse, SUN bo. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [2] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 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[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-retain-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] 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. http://www.stats.gov.cn/tjgb/qttjgb/qgqztjgb/t20100211_402621161.htm. [2013-07-11]
- [4] 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 the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: Source reduction technology [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [5] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的“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 Jian-guo, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: Eco-retain technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1697-1704.
- [6] SONG Xiang-fu, YING Huo-dong, WU Wei-ming, et al. Study of surface aquaponics in unison with aquaculture[J]. *Aquaponics Journal*, 2000, 4(3): 21-25.
- [7] 宋祥甫, 应火冬, 朱 敏, 等. 自然水域无土栽培水稻的研究[J]. 中国农业科学, 1991, 24(4): 8-13.
SONG Xiang-fu, YING Huo-dong, ZHU Min, et al. A study on growing rice with floating method on the waters[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, 24(4): 8-13.
- [8] Nakamura K, Mueller G. Review of the performance of the artificial floating island as a restoration tool for aquatic environments[M]. World Environmental and Water Resources Congress 2008, May 12-16, 2008, Honolulu, Hawaii.
- [9] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 489-493.
SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan, WU Wei-ming, et al. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-beds to main nutrients N and P in eutrophicated water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 489-493.
- [10] 宋祥甫, 吴伟明, 应火冬, 等. 自然水域无土栽培水稻的生态适应性研究[J]. 中国水稻科学, 1996, 10(4): 227-234.
SONG Xiang-fu, WU Wei-ming, YING Huo-dong, et al. Studies on the ecological adaptability of growing rice with floating bed on the natural waters[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1996, 10(4): 227-234.
- [11] 吴伟明, 宋祥甫, 金千瑜, 等. 鱼塘水面无土栽培美人蕉研究[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(3): 206-210.
WU Wei-ming, SONG Xiang-fu, JIN Qian-yu, et al. Study on soilless culture of canna on fish pond[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, 6(3): 206-210.
- [12] 刘福兴, 付子轼, 宋祥甫, 等. 生态浮床及辅助技术治理汇丰河黑臭水体[J]. 四川环境, 2009, 28(5): 36-40.
LIU Fu-xing, FU Zi-shi, SONG Xiang-fu, et al. Treating the smelly water of Huifeng river with ecological floating bed and assistive technology[J]. *Sichuan Environment*, 2009, 28(5): 36-40.
- [13] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 富营养水体浮游植物群落对新型生态浮床的响应[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1233-1241.
LIU Ya-qin, ZOU Guo-yan, SONG Xiang-fu, et al. Response of phytoplankton community to a new ecological floating bed system (EFBS) in enclosures with eutrophicated water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11): 1233-1241.
- [14] 宋海亮, 吕锡武. 利用植物控制水体富营养化的研究与实践[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(3): 35-39.
SONG Hai-liang, LÜ Xi-wu. The research and application of plant in purification and remediation for eutrophic water body[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2004, 11(3): 35-39.
- [15] 缪绅裕, 陈桂珠, 黄玉山. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 236-241.
MIAO Shen-yu, CHEN Gui-zhu, GUANG Yu-shan. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 236-241.
- [16] 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 等. 菹草对水中氮磷的吸收及若干影响因素[J]. 生态学报, 1994, 14(2): 168-173.
JIN Song-di, LI Yong-han, NI Cai-hong. Uptake by potamogeton crispus of nitrogen and phosphorus from water and some affecting factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(2): 168-173.
- [17] 乔建荣, 任久长, 陈艳卿, 等. 常见沉水植物对草海水体总磷去除速率的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(6): 785-789.
QIAO Jian-rong, REN Jiu-chang, CHEN Yan-qing, et al. Study on the removal rate to TP in Lake Caohai by common submerged macrophytes [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(6): 785-789.
- [18] 牛晓音, 葛 滢, 王晓明, 等. 不同光照条件下五种植物对富营养化水净化能力差异的比较[J]. 科技通报, 2001, 17(20): 1-4.
NIU Xiao-yin, GE Ying, WANG Xiao-ming, et al. Comparison on dif-

- ference of the purification ability to eutrophic water between five plants in different sunlight conditions. *Bulletin of science and technology*, 2001, 17(20): 1-4.
- [19] Lantze I R, Heritage A D, Pistillo G et al. Phosphorus removal rates in bucket size planted wetlands with a vertical hydraulic flow[J]. *Wat Res*, 1998, 32(4): 1280-1286.
- [20] James F Reilly. Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. *Ecol Eng*, 2000, 14(1): 33-47.
- [21] 许航, 陈焕壮, 熊启权, 等. 水生植物塘脱氮除磷的效能及机理研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(4): 69-73.
- XU Hang, CHEN Huan-zhuang, XIONG Qi-quan, et al. Studies on the efficiencies and mechanisms of N and P removal in macro hydrophyte ponds[J]. *Journal of Harbin University of C. E. & Architecture*, 1999, 32(4): 69-73.
- [22] 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用[J]. 中国环境科学, 1998, 6(2): 15-19.
- WANG Guo-xiang, PU Pei-min, ZHANG Sheng-zhao, et al. The purification of artificial complex ecosystem for local water in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 1998, 6(2): 15-19.
- [23] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 53-57.
- LI Wen-chao. Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an eutrophic lake[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(1): 53-57.
- [24] Marten Scheffer. The effect of aquatic vegetation on turbidity; how important are the filter feeders[J]. *Hydrobiologic*, 1999, 408(4): 307-316.
- [25] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. 环境科学学报, 1989, 9(2): 188-195.
- SUN Wen-hao, YU Zi-wen, YU Shu-wen. The harness of an eutrophic water body by water-hyacinth[J]. *ACTA Scientiae Circumstantiae*, 1989, 9(2): 188-195.
- [26] 何池全, 叶居新. 石菖蒲克藻效应的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 754-758.
- HE Chi-quan, YE Ju-xin. Inhibitory effects of *Acorus tatarinowii* on algae growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 754-758.
- [27] 董昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.
- DONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [28] 霍恒翠, 张钦江, 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.
- HUO Heng-cui, 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.
- [29] 李海东, 林杰, 张金池, 等. 生态护坡技术在河道边坡水土保持中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 119-123.
- LI Hai-dong, LIN Jie, ZHANG Jin-chi, et al. Discussion on the application of ecological slope protection technology for stream channel[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2008, 32(1): 119-123.
- [30] Easson G, Yarbrough L D. The effect of riparian vegetation on bank stability [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2002, 8(4): 247-260.
- [31] 孙宇. 河道植被护坡技术[J]. 水科学与工程技术, 2005(1): 34-36.
- SUN Yu. River vegetative revetment technology[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2005(1): 34-36.
- [32] 陈小华, 李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1169-1176.
- CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping. The eco-functions of ecological protection techniques of riverbank[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1169-1176.
- [33] Li X P, Zhang L Q, Zhang Z. soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China[J]. *Ecological Engineering*, 2006(26): 304-314.
- [34] Hector G A, Timothy A V, Edwin H W, et al. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001(20): 399-411.
- [35] 周香香, 张利权, 袁连奇. 上海崇明岛前卫村沟渠生态修复示范工程评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 394-400.
- ZHOU Xiang-xiang, ZHANG Li-quan, YUAN Lian-qi. Evaluation on a demonstration project of ecological restoration of ditches at Qianwei village of Chongming county, Shanghai[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 394-400.
- [36] 陈小华, 李小平. 农业流域的河流生态护坡技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 140-145.
- CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping. Ecological protection techniques of riverbank in agricultural catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl1): 140-145.
- [37] 霍元子, 何文辉, 罗坤, 等. 大型溇引导的沉水植被生态修复对滴水湖水质的净化效果[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 495-499.
- HUO Yuan-zi, HE Wen-hui, LUO Kun, et al. Bioremediation efficiency of applying daphnia magna and submerged plants: A case study in Dishui Lake of Shanghai, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 495-499.
- [38] 杜霞. 上海市典型富营养化农村河道里塘河生态修复技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- DU Xia. Integration research of ecological restoration technology in Shanghai rural eutrophication river[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [39] 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.