

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
——生态拦截技术施卫明¹, 薛利红², 王建国¹, 刘福兴³, 宋祥甫³, 杨林章^{1,2}

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

摘要:农村面源污染因其排放路径的随机性、排放区域的广泛性以及排放量大面广等特征,即使在实施源头控制后,仍然不可避免地有一部分污染物随各排放途径输移,对下游水体水质造成很大的影响,因此,实施生态拦截技术,高效阻断污染物输移是农村面源污染治理技术中非常重要的一环。研究表明,生态拦截沟渠技术不额外占用土地,能高效拦截净化氮磷污染物,并兼具生态景观美化之功能。人工湿地技术、稻田消纳技术以及前置库技术,也能有效拦截氮磷污染物,在农村面源污染治理实践中得到了一定的应用,但其占地面积大的缺点限制了在我国经济发达地区的推广。以丁型潜坝技术为代表的陆-水交接面污染拦截净化技术在我国农村面源污染物的过程阻断方面开始崭露头角,具有较高的应用潜力。缓冲带、生草覆盖、脱氮沟以及湿地-多级塘等技术也有一定的应用前景。生态拦截技术的应用需结合区域环境特征和地形地貌现状,因地制宜,兼顾生态功能、环境功能和景观功能,在充分利用和改良现有沟渠塘的基础上注重氮磷养分资源的回用,从而提高拦截效率,实现水体生态系统的生态修复。

关键词:面源污染;过程阻断;生态拦截;人工湿地;生态沟;丁型潜坝技术;稻田消纳

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1697-08 doi:10.11654/jaes.2013.09.001

**A Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for Controlling Rural Non-point Pollution in China:
Eco-Retain Technology**SHI Wei-ming¹, XUE Li-hong², WANG Jian-guo¹, LIU Fu-xing³, SONG Xiang-fu³, YANG Lin-zhang^{1,2}

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

Abstract: Rural non-point pollution is characterized with random emission paths, wide-ranging emission areas, and large emission amounts. An eco-retain technology is vital to block pollutants from transporting into water body systems for controlling rural non-point source pollution. This paper reviewed eco-retain technologies currently used in the world. The ecological ditches not only effectively remove nitrogen and phosphorous in water discharged from agricultural fields, but function as ecological landscape without occupying additional land. Artificial wetlands, wetland paddy fields and pre-reservoirs are also able to remove nitrogen and phosphorus pollutants effectively. However, these ecological approaches occupy large land, which restricts their applications in economically developed areas of China. The interception and purification of pollutants at land-water interface, represented by T-submerged dam, shows relatively high potential to retain rural non-point source pollutants. Other technologies as buffer zones, grass cover, denitrification ditch, and wetland-multistage ponds also have good application prospects. Application of eco-retaining technology for rural non-point pollution control should take into account the ecological, environmental, and landscape functions, in full combination with regional environmental characteristics and social-economic conditions.

Keywords: non-point pollution; pollutant blocking; eco-retaining; artificial wetland; ecological ditch; T-submerged dam technology; wetland paddy field

收稿日期:2013-08-06

基金项目:国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004);环保部公益性行业项目(201309035);江苏省农业科技自主创新资金[CX(12)046]资助

作者简介:施卫明(1963—),男,博士,研究员,研究方向为农田氮磷高效利用与面源污染控制技术。E-mail: wmsi@issas.ac.cn

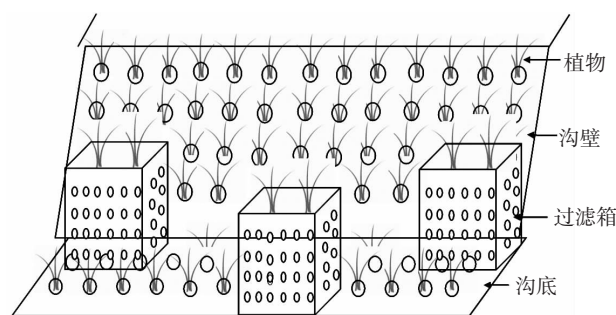
近年来,我国化肥使用量一直处于上升态势,2004年全国化肥使用总量已达到4637万t。我国耕地面积不到世界的1/10,氮肥和磷肥的使用量却为世界的30%和26%,单位土地面积氮肥和磷肥施用量分别高出世界平均水平的2.05倍和1.86倍。我国化肥平均用量高达 $400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,太湖流域等集约化农区高达 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,是发达国家化肥安全使用上限的2倍,远远超过发达国家为防止水体污染而设置的 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的安全标准^[1-2]。农田流失的氮磷已成为水体富营养化的重要贡献因子^[3-4]。据全国第一次污染源调查结果:农业源污染物排放对水环境的影响较大,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%^[5]。农村面源污染因其排放路径的随机性、排放区域的广泛性以及排放量面广等特征,其治理要取得实效,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^[6]。源头减量虽然能有效减少污染物的产生量,但不能完全控制污染的产生。这就要求在污染物向水体的迁移过程中实施生态拦截等技术,增加污染物在陆地的停留时间和路线,对污染物中的氮磷养分进行回用,减少其向水体的迁移,从而最大程度地降低面源污染对水体环境的风险。由此可见,在源头控制技术^[7]的基础上,进一步实施生态拦截技术,尽量阻断污染物输移是农村面源污染治理技术中不可或缺的一环。本文着重阐述氮磷面源污染物的生态拦截技术,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,以期为从事农村面源污染治理的相关人员提供借鉴参考。

1 污染物阻断的生态拦截技术

1.1 生态拦截沟渠技术

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量。目前常用的技术有两大类,一是农田内部的拦截;另一大类是污染物离开农田后的拦截阻断技术。生态拦截沟渠技术就是面源污染过程阻断技术中的重要代表。该技术主要是通过通过对现有排水沟渠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。该技术具有不需额外占用耕地、资金投入少、农民易于接受,又能高效阻控农田氮磷养分流失等特点。生态拦截型沟渠系统(图1),主要由工程部分和植物部分组成,沟渠采用带孔的硬质板材构建而成,沟内每隔一定距离设置一小型的拦截坝(高度10~20 cm),也可放置一些多孔的拦截箱,拦截箱内装有能高效吸附氮磷的基质,沟底、沟壁以及拦截箱内均可种植具备高效吸收氮磷的植物。通过工程和植物的有效组合,农田排水中的氮磷通过植物吸收、基质吸附、泥沙沉降以及流速减缓等而被有效去除^[8]。



图示一个沟壁和沟底

图1 生态拦截型沟渠的示意图

Figure 1 Sketch map of ecological ditch with interception function

在太湖流域宜兴市大浦镇汤庄村的连续3年监测表明,生态拦截型沟渠对稻田径流排水中氮磷的平均去除率可达48.36%和40.53%^[9]。王岩等进一步比较了生态拦截沟渠、混凝土沟渠和土质沟渠在不同进水浓度下对总氮、总磷的去除效果,再次证实了生态拦截沟渠对氮磷的拦截去除效果均显著高于其他沟渠^[10]。在昆明滇池流域的应用表明,生态沟渠对农村复合污水(农田径流+生活污水+养殖废水)中总氮和总磷的平均去除率分别为60%和64%^[11]。在珠江三角洲地区的应用实践表明,在原有排灌沟渠基础上改建的生态沟渠,能在满足原有排灌功能的前提下,对稻田排水径流中固体悬浮物、总磷、总氮、化学需氧量、铵态氮、生化需氧量的去除效率分别达到71.7%、63.4%、49.9%、26.6%、14.5%^[12]。在太湖流域直湖港小流域的应用表明,生态拦截沟渠对设施菜地夏季揭棚期径流氮排放的平均拦截率为48%(图2)。为了进一步增强生态沟渠对污染物的拦截净化效果,Wu等^[13]提出了A²/O强化的生态拦截沟渠技术(其称之为混合生物反应器),即在生态沟渠前端增设了A²/O强化

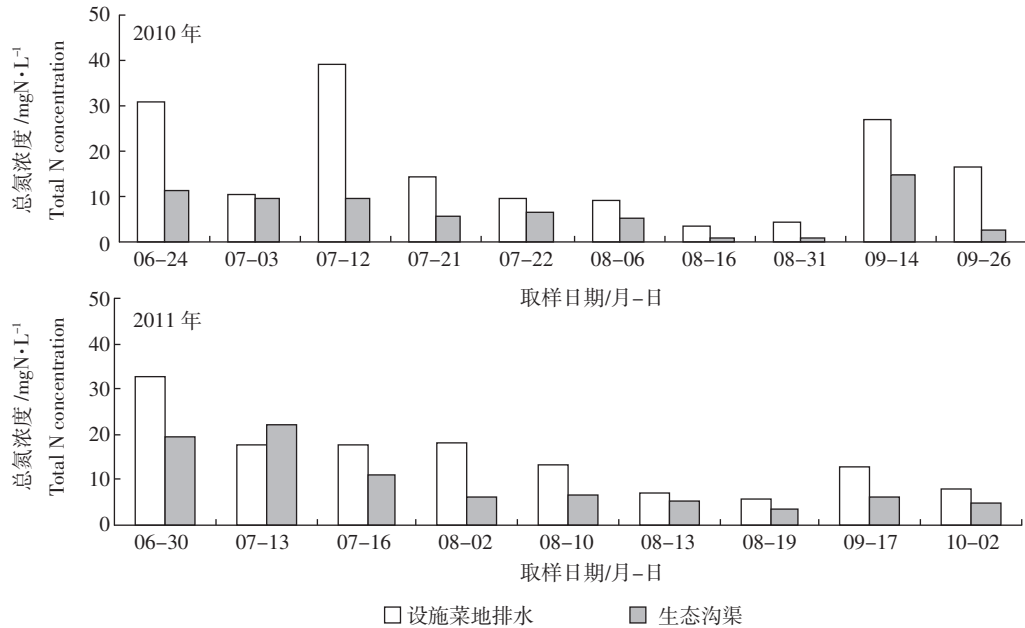


图 2 生态拦截沟渠对设施菜地径流氮排放拦截效果

Figure 2 The removal rate of runoff total nitrogen by the ecological ditch system in greenhouse vegetable field

处理装置,包括初沉池、厌氧池、溢流池、二沉池、厌氧流化床和好氧流化床 6 个单元,对面源废水中总磷、总可溶磷、总氮、硝态氮和铵态氮的去除率可达 81%、74%、82%、79%和 86%。

1.2 人工湿地技术

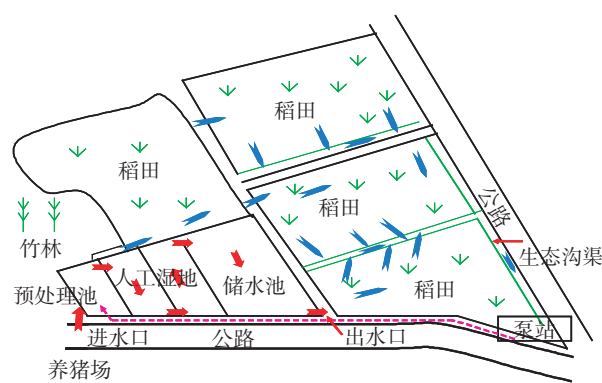
人工湿地是 20 世纪 70 年代发展起来的新型污水处理和水环境修复技术,为由土壤或人工填料(如碎石等)和生长其中的水生植物所组成的独特的土壤-植物-微生物-动物生态系统。根据人工湿地内水流方式的不同,一般可将人工湿地分为表面流人工湿地、潜流人工湿地和垂直流人工湿地^[14]。在我国太湖、滇池、洱海等许多湖泊面源污染控制中都采用过人工湿地工程技术。国内外研究表明,随着面源污水在湿地内的流动,总氮和总磷等污染物的浓度逐渐下降^[15-19]。Beutel 等研究结果显示,人工湿地的沉降池单元和表面流湿地单元分别可去除农田径流中氮源污染物的 21%和 60%^[20]。Borin 等发现尽管人工湿地系统可有效去除入水氮负荷的 90%,但是仍有 41~58 kg·hm⁻²·a⁻¹ 的氮污染物负荷流出湿地进入周边水体^[21-22]。根据太湖地区苕溪流域浙江省杭州市余杭区径山镇西山村的面源污染发生规律^[23],并结合该地区地形地貌特征,Sun 等^[24]设计建造了由预处理池(PT)、水平潜流湿地(HSSF)、水平表面流湿地(HSF)与稳定储水池(ST)等 4 个处理单元构成的湿地工程(面积 0.56 hm²)。运行结果表明,在观测周期(1 年)内,该

人工湿地系统对总氮的去除率为 37.4%~75.1%,平均去除率为 57.3%,对总磷的去除率为 62.0%~98.4%,平均去除率为 76.3%^[24],每年可以去除 1278 kgN 和 121 kgP。Wu 等^[11]利用 240 m² 的人工湿地来处理 14 hm² 混合农区排放的污水,该污水先经过生态沟渠进行预处理,连续 1 年半的运行效果监测表明,人工湿地对总氮和总磷的平均去除率为 38%和 49%。

1.3 稻田消纳技术

稻田具有双重性的特点,作为农业生产系统,需要大量肥料投入来确保高产,保障我国粮食安全,从而导致部分氮磷流失,成为面源污染物的发生源;但是,稻田作为一个天然的人工湿地系统,包含其周边河流及沟渠在内的水文单元,均可以被用来处理面源污水^[25-27],作为面源氮磷和低污染水的汇流消纳场所,起到“汇”的功能。在中国南方地区,大面积分布的稻田有着较大的潜力可以挖掘,用于回收利用及消纳面源污水中的氮磷营养元素。袁俊吉等^[28]通过模拟实验研究了环境友好的稻田湿地系统对外源污水中氮的消纳效果,发现稻田生态系统在 1 周内就可显著减控污水中的无机态氮。Nakasone 等^[29]与 Zhou 和 Hosomi^[30]在小区规模上开展了同类研究,结果表明季节性淹水饲料稻种植稻田对富营养化河水中氮的去除有着较高的效率。Li 等发现采用农村生活污水替代地表水灌溉稻田可在保证产量的同时高效除磷,去除效率高达 75.2%~98.2%^[31]。但是,将高浓度污水直接引入稻田,

不仅存在土壤肥力破坏和稻米重金属超标等安全隐患,而且很容易带来病虫害加重和水稻倒伏减产等次生问题。因此,Sun 等^[24]在面源污染的稻田消纳技术应用过程中,重点强调了将稻田湿地与人工湿地在工程规模上进行耦合应用(图3),既解决了人工湿地出水尾水氮磷含量较高问题,又避免了高浓度面源污水直接灌溉稻田所带来的倒伏、病虫害发生和重金属超标等生产问题及安全隐患。在该体系中,湿地化稻田消纳处理氮磷的能力分别达 $93.2 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (其中稻季 $68.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,麦季 $24.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 $5.43 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (其中稻季 $4.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,麦季 $1.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),同时也不会带来额外的稻田氧化亚氮排放和淋溶损失,具有十分显著的生态环境效应。



图中箭头代表水流方向

The arrows represents the water flowing direction

图3 人工湿地-稻田生态系统耦合处理技术示意图

Figure 3 Design of the combination of constructed wetlands (CWs) and paddy fields to enhance nutrient removal

1.4 近河道端的生态丁型潜坝拦截技术

生态丁型潜坝是借鉴水利工程中丁字坝的设计思路,结合生态浮床^[32]、人工湿地的基本原理而开发设计的(图4),其主要设置在河道支浜承纳污水的端头,作为陆-水界面的交接断面,对进入水体后的面源污染物进行有效拦截。该技术是在不影响河流泄洪等功能需求的情况下,通过河底丁型潜坝的设置,改变河流底部地形,从而在河水通过坝体与浮床间空隙进行流动时,影响水流方向中污染物的扩散和迁移路径,增加污染物在丁型潜坝前的水力停留时间,利用丁型潜坝沸石基质的吸附作用、离子交换作用等对污染物进行去除。同时,河底生境条件的改变,促进了实施区域水体微生物的增殖,提升了微生物的降解作用,能够持续去除污染物;垂直于坝体框架浮床的设置,为实施区域的氧气输送提供了条件,浮床植物根系又促进了坝体范围内微生物的繁衍,植物生长过程

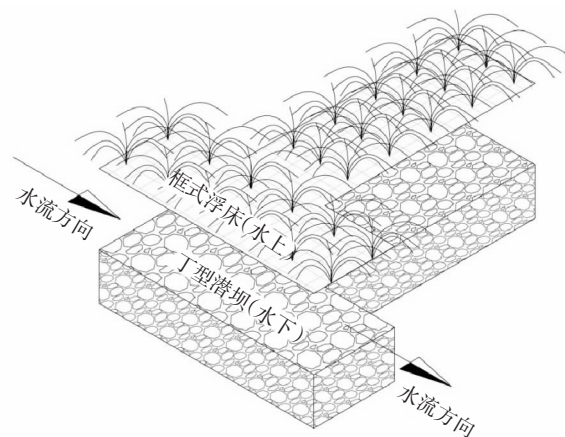


图4 生态丁型潜坝示意图

Figure 4 Sketch for T-shape ecological interception dams

中同时还吸收部分氮、磷等污染物,可持续拦截与净化河流外源污染。在太湖流域直湖港小流域朱家浜的运行效果表明,生态丁型潜坝的设置使输入污染物在扩散迁移方向上降解速率明显加快,工程前污染物下降比例分别为 COD_{Mn} 19.2%、TN 19.5%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 34.3%、TP 39.4%,工程后污染物下降比例增加到 COD_{Mn} 51.0%、TN 66.3%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 82.0%和 TP 53.0%;生态丁型潜坝两侧的污染物浓度差异显著,TN、TP、铵态氮和 COD_{Mn} 最高可下降 4.2 、 0.25 、 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明生态丁型潜坝系统的设置使污水排放对河流水质的影响逐步缩小(图5)。

1.5 前置库技术

20世纪50年代后期,前置库就开始被作为流域面源污染控制的有效技术进行开发研究。前置库技术是利用水库的蓄水功能,将污水截留在水库中,经物理、生物作用强化净化后,排入所要保护水体。前置库这种因地制宜的水污染治理措施,对控制面源污染,减少湖泊外源有机污染负荷,特别是去除入湖地表径流中的氮磷安全有效,在面源污染治理中发挥了巨大的作用。

边金钟^[33]首次在于桥水库库前区堵截老河道口构建一个面积近 9 km^2 ,容积达 2000 万~2500 万 m^3 的大型前置库,充分发挥其物理、生物、化学的综合作用,延长流水在前置库区的停留时间,降低流速,均化流场,使入流水在前置库区得到净化,大量的泥沙及营养盐截留在前置库区,从而使进入主库的营养盐含量大幅度降低,抑制主库中藻类的过度繁殖,起到防治或减缓于桥水库富营养化的作用。随后,张永春等人^[34-36]提出了平原河网地区面源污染控制的前置库生

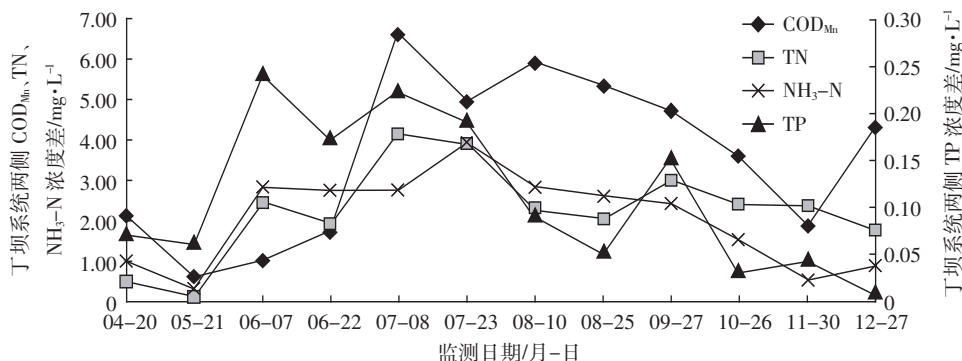


图5 丁坝两侧各水质指标差值动态变化

Figure 5 Dynamics of water quality outside T-shape ecological interception dams

态工程的构想,结合生态河道构建技术、生物浮床净化技术、生物操纵技术、生态透水坝构建技术、前置库运行调控技术等关键技术,开展了示范工程研究。工程实施后水质和景观得到明显改善,污染负荷得到有效削减,无降雨和小降雨输入期间,TN、TP、SS的平均去除率分别达到65.1%、45.3%、62.9%;强降雨时,降雨初期TN、TP、SS污染物去除率分别为70.5%、84.6%、90.9%。可见,前置库对于面源污染为主的河网地区的污染控制,特别是暴雨季节的径流净化效果明显,这为太湖地区及其他平原河网地区面源污染控制提供了技术依据和重要案例。另外,阎自申^[37]、杨文龙^[38]等人根据地理位置的不同、污染特点和水体特征,对前置库技术与其他净水技术的耦合进行了相关研究,如透水坝技术、生物强化技术、湿地技术和生态工程技术,均取得一定的成效。

1.6 缓冲带等其他拦截技术

缓冲带是一类水土保持和面源污染控制的生物治理措施的总称,被广泛应用于农村面源污染物的过程阻断^[39-42]、坡地水土流失控制和河(沟)道稳定性保护等。所谓缓冲带或缓冲区,就是指永久性植被区,宽度一般为5~100 m,大多数位于水体附近,这种缓冲区降低了潜在污染物与接纳水体之间的联系,并且提供了一个阻止污染物输入的生化 and 物理障碍带。缓冲区的植被通常包括树、草和湿地植物。恢复河岸森林植被带能有效地截留来自农田的养分和泥沙,地表径流总N和总P显著减少,从而在一定程度上控制农业面源污染。如美国的植被过滤带(Vegetated filter strips)、新西兰的水边休闲地(Retirement of riparian zones)、英国的缓冲区(Buffer zones)等^[41]。张刚等人研发了太湖地区稻田面源污染控制的缓冲带技术,即在稻田内部靠近排水口的周围设置1 m宽度的无肥缓冲区,研究表明该技术能在保证缓冲区内水稻正常

产量的同时有效减少稻田向水体的氮磷排放^[40]。李伟等^[42]比较研究了不同缓冲带宽度和缓冲带植物对太湖地区菜地径流排水拦截的效果,认为狗牙根比水稻、空心菜更适合作为缓冲带植物,缓冲带的最佳宽度为1.5 m,菜地和缓冲带面积之比为100:11,对总氮和总磷的去除效果可达到56.1%和85.9%。生草覆盖和生物篱技术是丘陵坡耕地中应用较为广泛且效果显著的面源污染生态拦截技术^[43-44],其具有投资少、易操作和见效快等特点,在三峡库区紫色土坡耕地的应用结果表明,采用多年生牧草进行地表生草覆盖能减少磷素流失54.3%;常规小麦-玉米模式增设香椿、紫花苜蓿植物篱技术可降低磷素流失53.9%和50.4%。此外,湖北农业科学院的熊桂云等人在坡地农业面源污染控制方面提出了脱氮沟的技术思路,并进行了实施,也取得了良好的效果^[45]。尹澄清和毛战坡^[46]等发展了人工多水塘系统来截留农田径流和面源污染物,在白洋淀的野外试验结果表明,水陆交错带中的芦苇群落能有效截留来自上游流域的污染物,有植被290 m长的小沟对地表径流总氮和总磷的截留率分别为42%和65%,4 m芦苇根区土壤对地下径流总氮和总磷的截留率分别为64%和92%。

2 现有生态拦截技术的优缺点及应用前景分析

研究表明,现有的各种生态拦截技术均能有效拦截面源污染物的输移,在农业面源污染控制中发挥了重要的作用,但是各种技术的应用也都存在其局限性。生态拦截沟渠技术不需要额外占用土地、投资少、易被农民接受,已在全国范围内推广应用,在农田面源污染控制中发挥了重要作用。但在实际应用中生态沟渠对氮磷的拦截效果时空变异较大,如何高效配置沟渠植物及吸附基质等来提高沟渠对暴雨径流时的拦截效果,生态沟渠与农田的适宜配置比例等仍有待

于进一步研究。人工湿地技术具有氮磷去除能力强,处理效果相对稳定,操作简单,维护和运行费用低等优点,但其需要额外占用大量土地,湿地植物如果不及时收获处置存在着二次污染问题,冬季受低温的影响处理效率低,容易产生淤积和饱和现象等。在我国人多地少的大环境下,特别是面源污染发生严重的地区往往又是经济发达地区,限制了人工湿地处理技术的大规模推广应用。我国稻田分布广泛,可以充分挖掘稻田湿地的环境效应,对农田径流以及农村低污染水进行有效拦截净化,实现生产与环境的双赢,但在实际应用中需要注意防止可能带来的土壤肥力破坏和稻米重金属超标问题。前置库技术也存在着植被二次污染防治、不同季节水生植被交替和前置库淤积等问题,在实际应用中还应考虑其净化功能与河流行洪功能的高效有机协调问题。生态丁型潜坝拦截技术是近年来发展的新型河道生态拦截技术,具备一次投资,基本零维护、处理效率高等特点,可有效拦截陆源污染物在河流支浜中的扩散,适用于承接生活污水及地表径流的重污染农村河道。缓冲带技术同样需要占用土地,在实际应用中需要因地制宜,见缝插针,发挥其对污染的拦截净化效果。

此外,无论采用何种生态拦截技术,都不能完全拦截去除掉所有污染物。为进一步加强面源污染拦截净化效果,可多种技术组合应用,如生态拦截沟渠末端配置人工湿地技术^[1],缓冲带技术组合生态拦截沟渠技术,人工湿地技术偶联稻田消纳技术^[24]等。同时与源头减量技术、养分回用技术等有效串联,最终实现农村面源污染的最大化去除。

需要强调的是,任何一项技术,要长期良好运行,需要起码的常规维护,在生态拦截技术运行方面尤其如此。需要改变单纯依赖技术的观点,建立日常的维护机制,确保生态拦截技术的长期效果。

今后,生态拦截技术方面还需要进一步加强基础研究,提高单位面积的拦截效率,简化技术操作程序。重点发展占地少、操作简易、维护方便的生态拦截技术,并编制相应的技术规范。

3 小结

(1)生态拦截是面源污染过程控制中不可或缺的一环,现有的生态拦截技术在农村面源污染治理中发挥了重要的作用。农村面源污染因其排放路径的随机性、排放区域的广泛性以及排放量大面广等特征,即使在实施源头控制后,仍然不可避免地有一部分污染

物随各排放途径输移,对下游水体水质造成很大的影响,因此,实施生态拦截技术,尽量阻断污染物输移是农村面源污染治理技术中非常重要的一环。现有的生态拦截沟渠、人工湿地等技术可有效拦截净化输移过程中的污染物,减少对水环境的污染,是现阶段我国农村面源污染治理中的重要技术手段。

(2)生态拦截技术的应用要兼顾环境效益和土地经济成本,并结合区域环境特征,因地制宜,探求生态功能、环境功能和景观功能的协调统一。随着我国农村经济水平的提高和建设美丽乡村目标的提出,对农村的生态环境提出了更高的要求。而我国人多地少、土地资源紧张,尤其是面源污染严重的经济发达地区。因此,生态拦截技术的应用,除了政府适当的引导外,技术的经济效益分析不容忽视。同时要结合区域环境特征,因地制宜,在有效利用和改良原有沟渠塘的基础上,贯彻生态功能、环境功能和景观功能三者兼顾的理念,完善生态拦截技术系统与其周围地区的功能互补性,进一步提高拦截效率和拦截材料的循环利用率,尽量避免二次污染的产生。在拦截污染物的同时,实现与水体生态系统生态修复的协调统一,为构建人与自然和谐、经济发展与社会环境相协调的社会主义新农村做出应有的贡献。

(3)为充分发挥农村面源污染控制效果,生态拦截技术需与源头减量技术、养分回用技术等系统整合。农村面源污染治理是一项系统工程,针对单一过程的技术应用产生的效果相对有限,而且面源污染物中的氮磷元素是农业生产中的重要养分资源。因此,在实施污染物的过程阻断中,还需注重养分资源回用,通过氮磷资源的最大化利用而实现污染物的最大去除。同时配合源头减量技术和水生态修复技术,实现各技术单元的无缝对接,以发挥综合作用,从而最大程度地减少面源污染对水体环境的风险,实现水生态系统的修复和农村生态环境的改善,保障农业生产的可持续发展。

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] 陈吉宁, 李广贺, 王洪涛. 滇池流域面源污染控制技术研究[J]. 中国水利, 2004, 9: 47-50.
- [3] 柴世伟, 裴晓梅, 张亚雷, 等. 农业面源污染及其控制技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 192-195.

- CHAI Shi-wei, PEI Xiao-mei, ZHANG Ya-lei, et al. Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (6):192-195.
- [4] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(5): 1-6.
- [5] 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/qgqttjgb/20100211_402621161.htm. [2013-7-11].
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水水中氮磷的去除机理初探[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 586-590.
- WANG Yan, WANG Jian-guo, LI Wei, et al. Initial exploration of mechanism of ecological ditch intercepting nitrogen and phosphorus in drainage from farmland[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 586-590.
- [9] 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.
- [10] 王 岩, 王建国, 李 伟, 等. 三种类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较[J]. 土壤, 2009, 41(6): 902-906.
- WANG Yan, WANG Jian-guo, LI Wei, et al. Comparison on removal of nitrogen and phosphorus from hibernial farmland drainage by three kinds of ditches[J]. *Soils*, 2009, 41(6): 902-906.
- [11] Wu Yonghong, Kerr Philip G, Hu Zhengyi, et al. Eco-restoration: Simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area[J]. *Environmental Pollution*, 2010(158): 2472-2477.
- [12] 何元庆, 魏建兵, 胡远安, 等. 珠三角典型稻田生态沟渠型人工湿地的非点源污染削减功能[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 394-398.
- HE Yuan-qing, WEI Jian-bing, HU Yuan-an, et al. Non-point source pollution control function of constructed wetland in the ditches of paddy field system in Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 394-398.
- [13] Wu Yong-hong, Hu Zheng-yi, Yang Lin-zhang, et al. The removal of nutrients from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 2419-2426.
- [14] 余志敏, 袁晓燕, 施卫明. 面源污染水治理的人工湿地治理技术[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 264-268.
- YU Zhi-min, YUAN Xiao-yan, SHI Wei-ming. The technology of constructed wetlands to non-point source pollution water treatment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(3): 264-268.
- [15] Huang J, Reneau R B, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. *Water Research*, 2000, 34(9): 2582-2588.
- [16] Headley T R, Huett D O, Davison L. Seasonal variation in phosphorus removal processes within reed beds-mass balance investigations[J]. *Water Sciences and Technology*, 2003, 48(5): 59-66.
- [17] 付融冰, 杨海真, 顾国维, 等. 潜流水平湿地对农业灌溉径流氮磷的去除[J]. 中国环境科学, 2005, 25(6): 669-673.
- FU Rong-bing, YANG Hai-zhen, GU Guo-wei, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from agricultural irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetland[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25 (6): 669-673.
- [18] Kadlec R H, Knight R L, Vymazal J, et al. Constructed wetlands for pollution control[R]. Scientific and Technical Report No. 8. IWA-publishing, London, UK, P, 2000:156.
- [19] 徐 进, 张 奇, 徐力刚. 三级串联湿地对氮磷的净化效果[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 79-82.
- XU Jin, ZHANG Qi, XU Li-gang. Purification efficiency of nitrogen and phosphorus pollutions by three level series wetlands[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18(1): 79-82.
- [20] Beutel M W, Newton C D, Brouillard E S, et al. Nitrate removal in surface-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Takima Basin, Washington[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35 (10): 1538-1546.
- [21] Borin M, Bonaiti G, Santamaria G, et al. A constructed surface flow wetland for treating agricultural waste waters[J]. *Water Science & Technology*, 2001, 144(11-12): 523-531.
- [22] Borin M, Tocchetto D. Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3): 38-47.
- [23] 孙海军, 吴家森, 姜培坤, 等. 浙北山区典型小流域农村面源污染现状调查与治理对策[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 258-264.
- SUN Hai-jun, WU Jia-sen, JIANG Pei-kun, et al. A survey about rural non-point pollution in mountain region of northern Zhejiang Province and the countermeasures[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20): 258-264.
- [24] Sun H J, Zhang H L, Yu Z M, et al. Combination system of full-scale constructed wetlands and wetland paddy fields to remove nitrogen and phosphorus from rural unregulated non-point sources[J]. *Environmental Geochemistry and Health*. 2013. DOI: 10.1007/s10653-013-9536-9.
- [25] Greenland D J. The sustainability of rice farming[M]. London: CAB International Publication in Association with the International Rice Research Institute, 1998: 110-113.

- [26] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 256–260.
CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 256–260.
- [27] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 799–804.
CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment I. Characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 799–804.
- [28] 袁俊吉, 马永玉, 蒋先军, 等. 模拟稻田生态系统对农村污水中磷的消纳[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 30–34, 69.
YUAN Jun-ji, MA Yong-yu, JIANG Xian-jun, et al. The simulation of sequestration of rural sewage phosphorus in rice-based ecosystems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 30–34, 69.
- [29] Nakasone H, Kuroda H, Tabuchi T. Nitrogen removal from water contained high nitrate nitrogen in a paddy field(wetland)[J]. *Water Sciences and Technology*, 2003, 48(10): 109–217.
- [30] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformation and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(2): 147–155.
- [31] Li S, Li H, Liang X Q, et al. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171: 301–308.
- [32] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体[J]. 水文水资源, 2005, 37(5): 50–53.
CHEN He-sheng, SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan. Treatment in water bodies pollution by ecological floating bed technology[J]. *China Water Resources*, 2005, 37(5): 50–53.
- [33] 边金钟, 王建华, 王洪起, 等. 于桥水库富营养化防治前置库对策可行性研究[J]. 城市环境与城市生态, 1994, 7(3): 5–10.
BIAN Jin-zhong, WANG Jian-hua, WANG Hong-qi, et al. Practicality of pre-dam for eutrophication control in Yuqiao reservoir[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1994, 7(3): 5–10.
- [34] 张永春, 张毅敏, 胡孟春, 等. 平原河网地区面源污染控制的前置库技术研究[J]. 中国水利, 2006, 17: 15–18.
ZHANG Yong-chun, ZHANG Yi-min, HU Meng-chun, et al. Studies on front damming technology for NPS pollution control of river network in plain areas[J]. *China Water Resources*, 2006, 17: 15–18.
- [35] 田 猛, 张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1665–1670.
TIAN Meng, ZHANG Yong-chun. Experimental study on permeable dam technique to control rural non-point pollution in Taihu basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1665–1670.
- [36] 张毅敏, 张永春, 左玉辉. 前置库技术在太湖流域面源污染控制中的应用探讨[J]. 环境污染与防治, 2003, 12(6): 342–344.
ZHANG Yi-min, ZHANG Yong-chun, ZUO Yu-hui. Discussion on application of pre-dam in the nonpoint pollution control of Lake Tai basin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2003, 12(6): 342–344.
- [37] 阎自申. 前置库在滇池流域运用研究[J]. 云南环境科学, 1996, 15(6): 33–35.
- [38] 杨文龙, 黄永泰, 杜 娟. 前置库在滇池非点污染源控制中的应用研究[J]. 云南环境科学, 1996, 12(4): 8–10.
YANG Wen-long, HUANG Yong-tai, DU Juan. Study in applying pre-tank to non-point pollution control in lake Dianchi[J]. *Environmental Science Survey*, 1996, 12(4): 8–10.
- [39] 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]. 生态学杂志, 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.
- [40] 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[J]. 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.
- [41] 柴世伟, 裴晓梅, 张亚雷, 等. 农业面源污染及其控制技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 192–195.
CHAI Shi-wei, PEI Xiao-mei, ZHANG Ya-lei, et al. Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 192–195.
- [42] 李 伟, 王建国, 王 岩, 等. 用于防控菜地排水中氮磷污染的缓冲带技术初探[J]. 土壤, 2011, 43(4): 565–569.
LI Wei, WANG Jian-guo, WANG Yan, et al. Pre-test of buffer zones for preventing nitrogen and phosphorus pollution from vegetable drainage[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 565–569.
- [43] 夏立忠, 杨林章, 李运东. 生草覆盖与植物篱技术防治紫色土坡地土壤侵蚀与养分流失的初步研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 28–31.
XIA Li-zhong, YANG Lin-zhang, LI Yun-dong. Perennial alfalfa and contour hedgerow on reducing soil, nitrogen and phosphorus losses from uplands of purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 28–31.
- [44] 夏立忠, 马 力, 杨林章, 等. 植物篱和浅垄作对三峡库区坡耕地氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 104–111.
XIA Li-zhong, MA Li, YANG Lin-zhang, et al. Effects of hedgerows and ridge cultivation on losses of nitrogen and phosphorus of slope land in Three Gorges Reservoir area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 104–111.
- [45] 刘保存, 赵同科. 农业面源污染综合防控技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 475.
- [46] 尹澄清, 毛战坡. 用生态工程技术控制农村非点源水污染[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 229–232.
YIN Cheng-qing, MAO Zhan-po. Nonpoint pollution control for rural areas of China with ecological engineering technologies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 229–232.