

薛利红, 段婧婧, 杨林章. 太湖流域农田灌排系统生态化改造技术及相关标准[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 81-86.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.009

## 太湖流域农田灌排系统生态化改造技术及相关标准

薛利红, 段婧婧, 杨林章

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 农田面源污染已成为中国农业绿色发展以及水环境质量改善的主要限制因子, 如何保障国家粮食安全的同时有效减少农田面源污染是“十四五”的关注重点。本研究结合中国高标准农田建设的最新需求, 指出了农田灌排系统生态化改造是高标准农田建设与面源污染防治的有机结合点, 重点阐述了农田灌排系统生态化改造的建设目标、基本原则、适用技术和相关标准, 并提出了当前农田灌排系统生态化改造的主要研究方向, 以期以太湖流域生态农田建设提供相关参考, 促进农业面源污染防治与高标准农田的融合, 助推中国耕地数量、质量、生态“三位一体”保护。

**关键词:** 太湖流域; 面源污染; 高标准农田建设; 灌排系统生态化改造

**中图分类号:** S277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0081-06

## Ecological transformation technology and related standards of farmland irrigation and drainage system in Taihu Lake Basin

XUE Li-hong, DUAN Jing-jing, YANG Lin-zhang

(Key Lab of Agro-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Farmland non-point source pollution in China has become the main limiting factor for the green development of agriculture and the improvement of water environment quality. How to ensure national food security and effectively reduce farmland non-point source pollution is the focus of the 14th five-year plan. Based on the latest requirements of high-standard farmland construction in China, this paper pointed out that the ecological transformation of farmland irrigation and drainage system was the organic combination of high standard farmland construction and non-point source pollution prevention and control. Construction objectives, basic principles, applicable technologies and relevant standards of farmland irrigation and drainage system ecological transformation were discussed emphatically, and the main research direction in the future was put forward. It is expected to provide relevant reference for the construction of ecological farmland in Taihu Lake Basin, promote the integration of agricultural non-point source pollution prevention and control and high-standard farmland, and boost the trinity protection of quantity, quality and ecology of arable land in China.

**Key words:** Taihu Lake Basin; non-point pollution; high-standard farmland construction; ecological transformation of farmland irrigation and drainage system

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(19)1007]

作者简介: 薛利红(1977-), 女, 河南修武人, 博士, 研究员, 主要从事农田养分管理与农业面源污染控制方面的研究。(E-mail) njxuelihong@gmail.com

通讯作者: 杨林章, (E-mail) lzyang@issas.ac.cn

根据《第二次全国污染源普查公报》, 2017 年中国农业源总氮、总磷排放量占排放总量的 46.5% 和 67.2%, 其中 50.85% 的总氮和 35.94% 的总磷来自种植业, 已经成为中国水体富营养化的主要贡献因素<sup>[1]</sup>。太湖流域素有“鱼米之乡”的美誉, 粮食产量

年可达 $1.3 \times 10^7 \sim 1.4 \times 10^7$  t,是中国主要的粮食生产基地。耕地主要以稻田为主,稻季平均施氮量 $352 \text{ kg/hm}^2$ ,最高可达 $450 \text{ kg/hm}^2$  [2]。加上区域内河网密布、降雨量(年均降雨 $1\,181 \text{ mm}$ )大且集中在5-9月,农田面源污染风险高,水体富营养化问题比较突出。据观测,在多雨年份,太湖流域稻麦轮作农田年流失氮(含径流和淋洗)可达 $84.8 \text{ kg/hm}^2$  [3]。如何在保障粮食安全的前提下实现农田面源污染的有效防控,是中国“十四五”期间需要解决的重大问题。

随着“藏粮于地”国家战略的深入落实,高标准农田建设已在全国范围内广泛开展,对提高国家粮食安全和促进农民增收等方面发挥了重要作用。然而,早期建设的高标准农田侧重产能提升而对改善农田生态环境重视不够,在项目设计与施工各环节未能充分体现绿色发展理念,存在简单硬化沟渠道路、破坏生物多样性等问题,导致农田面源污染防控等生态系统服务功能未能有效发挥 [4-7]。为此,国家2021年对《高标准农田建设通则》(GB/T 30600)进行了修订,明确将绿色生态列为高标准农田建设基本原则之一,并增加了农田防护与生态环境保持工程的相关内容。然而修订的《高标准农田建设通则》只给出了指导性意见,缺乏具体可落地的技术与相关工程建设标准,迫切需要各地因地制宜地开展生态型高标准农田建设试点研究,探索农业面源污染防控与高标准农田建设的融合之路,形成一些可推广可复制的技术模式并形成相关标准。

太湖流域农田排放的污染物主要是氮、磷等,主要来自降雨产生的地表径流以及人为排水,多经农田排水口排出或田埂溢出后进入排水沟渠,再汇入周边塘浜,最终进入河流。因此,利用物理、生物和生态等方法对污染物从农田向河流迁移的过程进行阻断拦截,是农业面源污染控制的一个重要环节 [7-8]。农田生态拦截沟渠、生态田埂、生态净化塘等技术相继被提出并在太湖流域及其他流域得到广泛应用 [9-14]。此外,氮、磷进入水体变身为污染物,但对于农田生态系统是必不可少的养分资源,如何对农田排水尤其是降雨初期产生的高浓度地表径流进行科学调蓄和循环利用,也是农业面源污染控制中重要的一环 [7,15]。江苏省农业科学院杨林章研究团队率先利用团队提出的农业面源污染控制的“源头减量-过程拦截-养分再利用-生态修复”4R理念与

技术体系,在土地综合整理的基础上,因地制宜开展农田灌排系统生态化改造等工程,分别在南京市江宁区汤山街道阜庄村、常州市武进区新康村打造了丘陵区和平原水网区的生态高标准农田建设样板,实现了土壤地力和农产品质量的双提升以及生产、生活与生态的有机融合,并受到了农业农村部、国土资源部及环境保护部的高度认可。为此,本文系统总结已有的相关研究结果,结合江苏省生态型高标准农田建设试点项目的实践经验,重点聚焦农田灌排单元的生态化改造,提出相关建设目标和原则、通用技术及相关标准等,以期以太湖流域生态农田建设提供参考,促进农业面源污染防控与高标准农田的融合,助推中国耕地数量、质量、生态“三位一体”保护。

## 1 农田灌排系统生态化改造的基本原则和要求

高标准农田建设中最重要就是灌排设施的建设,确保能灌能排,旱涝保收。农田灌排系统生态化改造的目标就是在保证耕地粮食生产产能的前提下,通过灌排单元内的水系及灌排设施的合理规划和排水系统的生态化改造,提升对农田排水中氮、磷等的拦截净化及循环利用水平,减少农田面源污染排放。由于地形地势的差异,丘陵区和平原水网区农田灌排系统也有所不同,生态化改造中均应遵循因地制宜、生态处理、循环利用的总体原则,对已有灌排水系(沟渠、塘堰、河浜)进行疏通连接,充分利用泵、闸等对水资源进行科学调度和管理,促进农田排水在灌排单元内的有效蓄滞与循环利用,并尽量优先利用塘浜对降雨初期产生的高浓度农田地表径流进行汇集后循环灌溉,尽量不外排。如南京江宁汤山生态高标准农田建设中,充分发挥其地势高程差,农田排水汇流到沟渠,进入区域内的河浜,通过闸控制其向外河的排放,并利用提水泵站将其提升至区域内高处的鱼塘,然后通过管道自流灌溉至稻田,从而实现了农田内部用水的循环。而地处平原河网区的武进新康村,在高标准农田建设中,通过建设地表径流汇集池,利用提水泵站将排水提升至荷花生态净化塘中,不仅实现了农田排水的汇流净化,还打造了生态景观。此外,排水系统生态化改造工程宜在原有排水系统基础上进行生态化改造提升,尽量不额外占用土地,保证排水通畅的同时采用相

应技术措施对农田退水进行净化后再排放至水体。可采用的技术包括生态田埂、农田排水促沉净化装置、生态沟渠、生态净化塘等。

## 2 农田灌排系统生态化改造技术及相关标准

### 2.1 生态田埂

生态田埂是在田埂原有田块分界和蓄水功能的基础上,通过适当调节田埂和排水口高度、在条田田埂上种植植物等措施来减少农田径流发生、提升农田生物多样性和农田生态景观。在汤山高标准生态农田建设中,通过小田变大田,每块田 $1\sim 2\text{ hm}^2$ 左右,并将田埂加宽加高至 $30\text{ cm}$ 左右,田块之间的田埂上种植黄花菜、饲料桑等多年生固土植物,在田两头(近路或近渠)的田埂上种植一些病虫的“驱-诱”植物或者益虫植物如大豆、芝麻、四路玉米、香根草等,并搭配种植灯芯草、鸢尾、菖蒲等本土水生植物,从而形成隔离带。多年实践证明,生态田埂可有效拦截地表径流带走的氮、磷,并起到以“草”压“草”、以“草”控“病虫”的功能,农田生物多样性和景观多样性明显提高。研究发现,太湖流域田块 $25\text{ cm}$ 高的田埂能减少径流量约 $91.1\%$ ,对总磷的拦截率最高可达 $31.4\%$ <sup>[16]</sup>。除了高度外,田埂宽度对氮、磷截流效果也有影响, $40\text{ cm}$ 宽的田埂对铵态氮和磷酸盐截留率均超过 $50\%$ <sup>[17]</sup>;近沟渠田埂由于受侧渗的影响,田埂宽度在 $80\sim 130\text{ cm}$ 时对侧渗拦截效果最好<sup>[18]</sup>。考虑到建设成本及占地情况,建议太湖流域田埂高度以 $20\sim 25\text{ cm}$ 为宜,普通田埂宽度以 $30\sim 40\text{ cm}$ 为宜,沟渠边田埂宽度以 $80\text{ cm}$ 为宜。此外,排水口是田埂的有机组成部分,为了减少灌排水时的工作量,当前太湖流域多采用平水缺的方法,平水缺的高度一般在 $5\sim 8\text{ cm}$ ,这个高度不能有效拦蓄雨水。因此,根据水稻的耐淹水深和耐淹时间以及太湖地区稻田的蓄雨上限,推荐稻田的排水口高度在水稻返青期以 $5\text{ cm}$ 为宜,分蘖期、抽穗开花期及乳熟期以 $10\text{ cm}$ 为宜,而拔节孕穗期则可提高到 $20\text{ cm}$ 。

### 2.2 农田排水促沉净化装置

农田排水促沉净化装置是指建设在农田排水口处或排水沟渠两端的、内部填有吸附填料,可对农田排水中的泥沙和氮、磷等污染物进行沉降、吸附和拦截的装置,2014年由上海市农业科学院的刘福兴

等<sup>[19]</sup>提出。在武进新康村、太仓东林和镇江姚桥等多地高标准农田建设中的应用实践表明,农田排水促沉净化池对排水中悬浮物和氮的拦截效果分别可达 $52\%\sim 78\%$ 和 $14\%\sim 38\%$ <sup>[12]</sup>。农田排水促沉净化池分初沉室和主沉室,农田排水首先经进水管进入初沉室,自上而下经填料吸附净化后由初沉室内壁底部的水孔进入主沉室,然后自下而上逐渐上溢,排入沟渠或河道。农田排水促沉池的形状和大小可因地制宜。填料宜采用对氮、磷有较好吸附作用的沸石、火山岩、陶粒、生物炭等材料或其组合。灌排两用沟渠可以在农田排水口处安装简易的促沉净化装置,高度和田埂一致,由有机玻璃或PVC板材制成,内部由挡板将装置均匀分割成 $4\sim 5$ 个室,挡板高度低于促沉净化装置高度 $10\text{ cm}$ 左右,可使水流弯曲通过,填料填装高度与挡板持平,既可延长排水停留时间,增加对悬浮物和氮、磷的拦截效果,又可避免大暴雨时排水不畅。此外,灌水时还能将通过吸附拦截在促沉净化装置内填料上的氮、磷重新冲刷回农田,起到反冲洗功能,延长填料的使用时间。

### 2.3 生态沟渠

2005年杨林章在国内率先提出生态型拦截沟渠的概念并应用于太湖流域,其主要通过对现有排水沟渠的生态化改造和功能强化,利用物理、化学和生物的联合作用对污染物(主要是氮、磷)进行拦截和净化<sup>[9]</sup>。生态拦截沟渠系统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,也可放置一些多孔的拦截箱,拦截箱内装有氮、磷吸附填料,沟底、沟壁及拦截箱内均可种植氮、磷高效吸收植物。农田排水中的氮、磷通过植物吸收、基质吸附、泥沙沉降以及微生物脱氮等方式而被有效去除。自生态型拦截沟渠概念提出后,被因地制宜地进行改进升级并广泛应用到全国各地农业面源污染控制中,对氮、磷的拦截净化效率一般在 $40\%$ 以上,最高可达 $80\%$ 左右<sup>[9-10,14,20-28]</sup>。生态沟渠对农田排水中氮、磷的拦截效果受沟渠的构造、规格、填料类型以及植物配置等的综合影响<sup>[25-29]</sup>。经江宁汤山、武进新康等多地实践应用,总结提出了生态沟渠的相关建设标准如下:(1)生态沟渠宜利用原有农田排水沟渠通过生态化改造构建,不应影响农田正常排水。(2)生态沟渠应包括渠体、植物和水位调节装置,可因地制宜增加填料净化模块。(3)渠体断面一般为



倒等腰梯形,口宽不小于 0.8 m,深度不小于 0.6 m,具体规格因地制宜,确保排水通畅。沟壁宜采用适合植物生长的土质或有孔穴的植草砖铺设,应保证边坡稳定;沟底宜为土质。(4)植物应配置耐污能力强、根系发达、生物量大的挺水植物、沉水植物和浮水植物,可一种或几种搭配栽种,以不影响正常排水为前提;常水位以上沟坡宜种植草本植物。(5)在生态沟渠的末端布设拦截堰,用以维持沟渠中一定的水位(20~30 cm)。(6)生态沟渠内可适当布设填料净化模块,填料宜采用炉渣、沸石、加气混凝土、陶粒等多孔净化无机材料,一种或几种组合置于网箱或生态袋内,模块高度不宜超过沟渠高度的 1/2。

#### 2.4 生态塘浜调蓄净化系统

太湖流域水网发达,塘浜密布<sup>[30]</sup>,农田排水入河入湖速度快。因此,因地制宜利用已有的塘浜对农田排水进行蓄存、循环利用和净化是当前最经济高效的技术之一。大量研究结果表明,生态塘对农田尾水中氮、磷的净化率可达 40% 以上<sup>[11,31-33]</sup>。“十一五”期间,本研究团队在无锡市胡埭镇通过水池汇流菜地氮、磷高浓度排水再回用到稻田中,可实现菜地径流排水中 79% 的全氮被净化回用<sup>[34]</sup>。在镇江姚桥,结合村庄搬迁整治和高标准农田建设,利用废弃的垃圾堆放场建设了 13 000 m<sup>2</sup>生态塘调蓄净化系统,结合生态沟渠和拦截溢流堰,可实现 26.7 hm<sup>2</sup>农田排水的蓄存净化。连续 2 年的监测结果表明,生态塘调蓄净化系统对排水中氮、磷拦截率最高可达 78.0% 和 68.4%,经净化后,19 次农田排水中仅 3 次全氮质量浓度略高于 2 mg/L,其余均达到地表水 V 类水标准<sup>[12]</sup>。

稻麦轮作农田的模拟降雨径流数据显示,初始径流期是稻田氮素流失的高浓度风险期,前 10% 的径流中氮排放量占总氮排放量的 40%~50%<sup>[35-37]</sup>,前 25% 的径流携带了 87% 的氮和 48% 的磷<sup>[38]</sup>。因此,收集池只需收集前期 10% 或 25% 的高浓度地表径流即可拦蓄 50% 以上的污染物。依据太湖流域苏州、无锡及常州三地的降雨规律,降雨次数中 99% 的降雨量在 66 mm 以内,因此以 66 mm 降雨量作为收集池容积的计算依据,正常情况下稻田田埂可拦蓄 3 cm 左右的雨水。据此,在武进新康村,在已有高标准农田三面光水泥沟渠的基础上,建设了农田地表径流汇集池,并利用提水泵站将农田氮、磷

高浓度排水提升至荷花生态净化塘中,实现了农田排水的汇流净化。连续一年的第三方监测结果显示,农田排水经荷花生态塘净化后全氮质量浓度由 0.63~5.88 mg/L 下降至 0.57~1.68 mg/L,全磷质量浓度由 0.14~0.37 mg/L 下降至 0.05~0.18 mg/L,达到了地表水 IV 水标准,农田排水全氮质量浓度 > 2 mg/L 和全磷质量浓度 > 0.4 mg/L 时的氮、磷拦截率均超过 50% 以上。

为尽量减少占地,生态塘浜调蓄净化系统建议由废弃的低洼地或者已有的塘浜改造而成,由高浓度排水收集池和生态塘组成。条件不具备时可仅建设高浓度排水收集池,安装小型水泵进行农田灌溉回用。生态塘建设应因地制宜,水深以 1.5~2.0 m 比较适宜,优先选用具有经济价值的水生作物,如茭白、莲藕、荸荠、水芹等,适当种植菖蒲、芦苇、茼蒿、黑麦草等对氮、磷高效吸收的水生植物。收集池和生态塘之间建设溢流闸坝,农田氮、磷高浓度径流排水汇入收集池,当收集池满之后,排水直接通过溢流坝流入生态塘,起到拦污的作用,并保证氮、磷高浓度排水优先被农田回用。大雨来临前应及时降低生态塘中的水位,为汇集净化农田径流排水腾出库容。生态塘设置排水管道与河道相连,大暴雨时生态塘满后才排入河道。

### 3 小结与展望

#### 3.1 农田灌排系统生态化改造主要包括生态田埂、农田排水促沉净化装置、生态沟渠以及生态塘浜调蓄净化系统等

生态田埂是农田灌排系统生态化改造的第一要素,在生态高标准农田建设中最容易落实,田埂高度以 20~25 cm 为宜,并根据水稻生育时期对排水口高度进行动态管理,普通田埂宽度以 30~40 cm 为宜,排水渠边田埂宜适当加宽,并因地制宜种植具有固土拦蓄或抑制病虫害功能的植物。排水沟渠的生态化改造是农田灌排系统生态化改造的重点,建设中应因地制宜选用不同植物的组合及填料,可结合农田排水促沉净化装置一并建设。生态塘浜调蓄净化系统是农田灌排系统生态化改造的关键,应在高标准农田建设前结合区域地形、水系特征进行顶层设计,以农田氮、磷高浓度排水的蓄存回用为核心,1 hm<sup>2</sup>建设 45 m<sup>3</sup> 的收集池就能实现农田排水氮、磷回用率达到 50% 以上。

### 3.2 农田灌排系统生态化改造还要加强相关工程配置参数和技术的物化和标准化研究,实现生态功能、环境功能和景观功能的协调统一

目前对农田排水中氮、磷等污染物的拦截净化研究主要集中在技术工艺及其应用效果,对于工程建设参数,尤其是工程配置参数的研究相对薄弱。要实现农田退水的“达标”排放,对河道不造成污染,需要配置多长的生态沟渠、多大的生态塘,如何根据农田排放污染负荷及周边水系特征进行科学合理配置,并综合考虑经济和生态环境效益,实现投入最小化和污染防控效果最大化,这些都需要借助于相关面源污染模型深入系统地开展情景模拟研究,并提出一套普适性的简单设计算法。此外,灌排系统生态化改造中还要加强生物多样性的研究,合理科学配置不同植物,充分发挥乡土物种的功能,提高农田系统的生态服务功能并打造美丽田园<sup>[39]</sup>。最后,技术要大面积推广应用,必须与市场密切结合,对技术进行物化和标准化,并开发配套的作业设备,减少工程建设作业成本,提高作业效率。如生态沟渠建设中需要用到的对植草砖进行填土压实并播种草籽的小型机械、一些硬质化的带草籽的植生板材、可模块化应用批量化生产的即装即用式高效除磷脱氮装置等。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部,国家统计局,中华人民共和国农业农村部.第二次全国污染源普查公报[R/OL].(2020-06-09)[2021-12-23].[https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610\\_783547.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html).
- [2] 王海,席运官,陈瑞冰,等.太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J].农业环境与发展,2009(3):10-15.
- [3] XUE L H, YU Y L, YANG L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. Environmental Research Letter, 2014, 9: 115010.
- [4] 杨勇.关于推进生态型高标准农田建设的思考[J].中国农业综合开发,2020(12):31-33.
- [5] 罗明,宇振荣,应凌霄.从生态系统健康视角看土地综合整治[J].中国土地,2020(2):4-8.
- [6] 沈佳莹,刘辉,温小乐,等.高标准农田生态系统服务价值评估——以福建省永泰县同安镇片区为例[J].亚热带资源与环境学报,2019,14(4):86-92.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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.
- [10] 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.
- [11] 王晓玲,李建生,李松敏,等.生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J].水利学报,2017,48(3):291-298.
- [12] XUE L H, HOU P F, ZHANG Z Y, et al. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 304:107148.
- [13] 李华斌,梁海兵,李健,等.农业面源污染全过程防治策略初探[J].中国农村水利水电,2014(1):81-85.
- [14] 王岩,王建国,李伟,等.生态沟渠对农田排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.
- [15] 常志州,黄红英,靳红梅,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——氮磷养分循环利用技术[J].农业环境科学学报,2013,32(10):1901-1907.
- [16] YUAN Z W, PANG Y J, GAO J Q, et al. Improving quantification of rainfall runoff pollutant loads with consideration of path curb and field ridge[J]. Resources, Environment and Sustainability, 2021(6):100042.
- [17] 周根娣,梁新强,田光明,等.田埂宽度对水田无机氮磷侧渗流失的影响[J].上海农业学报,2006,22(2):68-70.
- [18] 祝惠,阎百兴.三江平原水田氮的侧渗输出研究[J].环境科学,2011,32(1):108-112.
- [19] 刘福兴,宋祥甫,邹国燕,等.一种用于农田排水口的污染物促沉降净化装置:CN203878034U[P].2014-10-15.
- [20] CHEN L, LIU F, WANG Y, et al. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 487-492.
- [21] LI X N, ZHANG W W, ZHAO C Q, et al. Nitrogen interception and fate in vegetated ditches using the isotope tracer method: a simulation study in northern China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105893.
- [22] WANG J L, CHEN G F, FU Z S, et al. Application performance and nutrient stoichiometric variation of ecological ditch systems in treating non-point source pollutants from paddy fields[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 299: 106989.
- [23] KUMWIMBA M N, ZHU B, MUYEMBE D K. Assessing the influence of different plant species in drainage ditches on mitigation of non-point source pollutants (N, P, and sediments) in the Purple Sichuan Basin[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(6): 267-271.
- [24] WANG X L, LI J S, LI S M. A study on removing nitrogen from paddy field rainfall runoff by an ecological ditch-zeolite barrier sys-

- tem[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 27090-27103.
- [25] 刘福兴,陈桂发,付子轼,等. 不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力及实际应用效果[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 787-794.
- [26] 刘福兴,王俊力,付子轼. 不同规格生态沟渠对排水污染物处理能力的研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 561-570.
- [27] 王迪,李红芳,刘锋,等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1717-1723.
- [28] 张树楠,肖润林,余红兵,等. 水生植物刈割对生态沟渠中氮、磷拦截的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1066-1071.
- [29] 张小龙,王晓昌,刘言正,等. 多级生态塘植物修复技术用于富营养化水体修复[J]. 中国给水排水, 2015, 31(4): 95-98.
- [30] 严燕,孙子杰,李震宇,等. 农村生态保护中的肥料减施问题与落实——以太湖流域磷肥减施工作为例[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 207-211.
- [31] 刘红江,郑建初,孙国峰,等. 麦季农田流失养分植物拦截技术体系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 611-617.
- [32] 朱金格,张晓姣,刘鑫,等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 405-411.
- [33] 刘方平,向爱农,才硕,等. 南方稻田灌排系统生态整治效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 116-121.
- [34] MIN J, LU K P, ZHAO X, et al. Nitrogen removal from the surface runoff of a field scale greenhouse vegetable production system[J]. Environmental Technology, 2015, 36(24): 3136-3147.
- [35] 肖强,张维理,王秋兵,等. 太湖流域麦田土壤氮素流失过程的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 731-736.
- [36] 张继宗,雷秋良,左强,等. 模拟降雨条件下太湖地区稻田氮素径流流失特征[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(11): 2688-2692.
- [37] 严磊,邓旭哲,薛利红,等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 1-12.
- [38] 陈育超,李阳,于海明,等. 太湖地区何家浜流域初期雨水对水稻田污染物的冲刷效应[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 573-580.
- [39] 吴政文,张秋玲,李文会,等. 基于生态视角下高标准农田建设的实践研究——以苏州市通安镇生态农田建设为例[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1): 476-479, 483.

(责任编辑:陈海霞)