

农田退水污染零直排技术研究进展

周驰誉¹, 李 敏¹, 刘 茗¹, 刘 伟¹, 王玉敏², 孙明权¹

(1. 江苏水利科教中心, 江苏 南京 210029; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对农田退水污染的问题, 综合介绍农田退水污染零直排技术的研究进展, 并从源头控制、过程拦截、末端治理3个层面总结现有技术方法, “零直排”模式在实践中积累了丰富的工程建设经验与生态拦截净化技术, 以期类似地区的农业面源污染治理提供参考。

关键词: 零直排; 农田退水; 源头控制; 过程拦截; 末端治理

中图分类号: X52 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2025)04-0023-0004

Research progress on zero direct discharge technology for farmland drainage pollution

ZHOU Chiyu¹, LI Min¹, LIU Ming¹, LIU Wei¹, WANG Yumin², SUN Mingquan¹

(1. Jiangsu Province Water Resources Scientific Education Center, Nanjing 210029, China;

2. Southeast University School of Energy and Environment, Nanjing 210096, China;)

Abstract: Aiming at the problem of farmland drainage pollution, this paper comprehensively introduces the research progress of the zero direct discharge technology for farmland drainage pollution, and summarizes the existing technical methods from three aspects: source control, process interception, and terminal treatment. The “zero direct discharge” model has accumulated rich engineering construction experience and ecological interception and purification technologies in practice, providing references for the control of agricultural non-point source pollution in similar regions.

Key words: zero direct discharge; farmland drainage; source control; process interception; terminal treatment

近些年, 伴随着农药、化肥、地膜的过度使用, 我国农业面源污染现象加重, 尤其以农田系统中氮磷、农药等营养物质流失严重, 研究表明, 我国农田退水每年流失的氮、磷总量分别达 397.85 t 和 8.50 t。农田系统中的氮、磷等营养物质随着径流汇入外界水环境中, 会引发河流、湖泊等水体富营养化问题, 进而造成生物多样性降低、蓝藻水华暴发、人类生产生活安全受到威胁等^[1-4]。

国内对于农田退水污染的研究愈加深入, 对于农田退水面源污染的治理有过一些成功的案例, 不

过尚未找到一种系统的、合理的、固定的治理模式, 农田退水零直排工程要想成为一项系统性工程, 需从源头防控、过程阻断、末端治理3个层面着手, 实现对农业面源污染的综合整治, 本文将从各层面分别叙述退水污染控制主要技术手段。

1 农田退水污染削减净化技术

1.1 源头控制技术

1.1.1 科学灌溉

改进灌溉方式可以从源头上减少退水的产生

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 江苏水利科技项目(2024047)

作者简介: 周驰誉(1990—), 男, 硕士, 主要从事水利工程施工、管理及运行工作。E-mail: 464214874@qq.com

量,减少化肥中的氮磷通过淋滤和地表径流的方式进入河流。通过采用节水薄露灌溉技术,精准控制水稻生长各阶段的水层深度,有效减少排水量。李英等^[5]研究表明,滴灌的水分利用效率与喷灌相比增大了4.7%,较漫灌增大26.9%。ISLAM等^[6]研究表面干湿交替节水灌溉技术与尿素深施连用,可将水稻产量提高21%,氮回收效率提高58%。

1.1.2 保护性耕作

保护性耕作是近年来受到广泛关注的耕作制度,一般地表作物秸秆覆盖率高于30%的耕作措施都称为保护性耕作,包括少耕、免耕及地表覆盖秸秆等方式。史倩倩等^[7]研究发现将立茬少耕覆盖技术集成到间作模式中,可起到降低地表温度减少水耗、提高土壤含水量的效果。朱坚等^[8]研究表明,秸秆还田处理与常规化肥处理相比,不但可从源头上减少晚稻化肥投入,还可减少农田径流液中N、P含量,使总氮(TN)和总磷(TP)流失量分别减少12.6%、9.7%。

1.1.3 优化施肥施农药

可以推广减肥增效技术,源头控制退水中氮磷含量,如利用结合喷灌、滴灌等节水灌溉技术的水肥综合管理技术,完成水肥一体化。科学把控肥料用量并节约灌溉用水,以此减少氮磷等的流失^[9]。还可以通过采取分期施氮、前氮后移、缓/控释氮肥等技术措施优化施肥。张丽娟等^[10]研究表明,平均4次产流中,优化施肥相对于传统施肥,其分次施用及缓释肥处理产生的径流中TN浓度可降低约22.98%~42.88%。段小丽等^[11]研究表明,将前期氮肥的30%~50%后移到穗肥施用,不会对水稻产量产生明显影响,且能显著降低三氮(TN、可溶性总氮DTN、胺态氮 NH_4^+-N)浓度。

1.1.4 生态种养模式创新

“稻虾共生+尾水治理”,通过稻虾、稻鸭共生综合种养模式,小龙虾可以通过捕食水稻生产中的害虫以及微生物,水稻也可以将龙虾的粪便作为很好的生物肥来源,构建出一条互利共生的生物链,大量减少氮磷化肥和农药使用量。

1.2 过程拦截技术

1.2.1 生态沟渠

生态沟渠是一种对传统土质沟渠进行生态化改造的系统,通过种植氮磷富集能力强的湿生植物、配置高吸附能力的生态滤坝、设置小型跌水堰等措施,构建独特的水-植物-微生物-填料组合系统,兼具排水沟渠和净化湿地的双重功能^[12]。Chen

等^[13]研究进一步表明,生态沟渠在减少面源氮污染方面具有显著效果,其处理效能受到多种因素的影响,包括植物种类、水力停留时间HRT、流速、水位等环境因素。具体而言,生态沟渠中的植物通过吸收和吸附作用,可去除水体中8%~16%的氮。张树楠等^[14]研究表明生态沟渠中,TN和TP的去除率分别可达29.3%~69.2%和34.2%~72.8%。

1.2.2 人工湿地

人工湿地是一种通过植物、微生物和基质的协同作用净化水质的技术,在农田退水过程中可有效去除氮磷等营养物质,同时为生物提供栖息地。首先,植物根系通过吸收和吸附作用,直接摄取水中的氮、磷等营养物质;其次,微生物在基质表面形成生物膜,利用硝化和反硝化,将 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 和 N_2 ,从而实现氮的去除;此外,基质的物理过滤和化学吸附作用也对悬浮物和重金属的去除起到了重要作用。刘文祥^[15]研究表明,在滇池流域一片 0.18 km^2 的区域内打造的 $1\,257\text{ m}^2$ 人工湿地,对农田径流有着出色的净化效果。具体来看,这片人工湿地对TN的削减效果显著,去除率达到了60%,对TP的去除率达到了50%;此外,滇池流域的人工湿地还为多种水生生物提供了栖息地,促进了生态系统的恢复和稳定。

1.2.3 植被缓冲带与渗滤系统

植被缓冲带作为污染源与水体之间的植被覆盖区域,具备多重生态功能,这些功能包括养分截留、污染物过滤、水质提升、美化环境以及提供生物栖息地等。植被缓冲带治理水源地面源污染的机制主要在:植物在生长期间对氮、磷等营养物质的摄取;借助植被来稳固土壤,降低水土流失风险;植被的覆盖与拦蓄功能可以延长径流在地表的停留时长,从而促使更多水分下渗,减少氮、磷等营养物质随地表径流流失。但若管理不善,可能会向环境释放如氮和磷等营养物质,从而引发面源污染。

1.3 末端治理技术

1.3.1 生物浮岛

生物浮岛技术是遵循自然规律,基于无土栽培原理,融合现代农艺和生态工程措施。它通过人工方式,将高等水生植物或改良的陆生植物无土栽培于富营养化水体表面,其作用机制主要包括:植物根系的截留、吸收与吸附,物种间的竞争与相克,水生动物的摄食,以及栖息期间微生物的降解等,以此来削减水体中的氮、磷及有害物质,达到净化水质的目的。蒋白懿等^[16]使用生物浮岛技术进行水质

净化发现,生物浮岛技术对TN和TP具有较为稳定的净化效果,但受限于温度影响,对于化学需氧量(COD_{Cr})和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的净化效果却不尽如人意。此外,关于不同生态系统之间相互影响的研究也相对匮乏。

1.3.2 “生态沟渠+”治理样板

“生态沟渠+”治理样板有3种模式:一是利用断头浜作为生态涵养缓冲区,采用“生态沟渠+节水灌溉+断头浜”全封闭型模式,配套灌排水阀,控制灌溉水层,减少肥药流失,提升肥药利用效率,除台风、暴雨等特殊天气外,基本实现了农田退水灌溉循环利用不外排;二是利用农田周边自然状态的断头浜,形成“生态沟渠+生态塘+断头浜”的半封闭型模式,配套农田智慧灌溉系统,实现农田退水经滞留净化后部分外排,出水水质得以显著改善;三是利用水稻种植基地总排渠,将农田退水集中于一条主沟渠进行净化,末端利用河道建设生态缓冲带,形成“生态沟渠+生态缓冲带”的开放型模式,使农田退水主要污染物出水浓度降低30%左右。

2 “零直排”工程建设可选模式

我国地域广阔,各省份的自然因素、地形地貌、基础设施以及经济水平存在显著差异,农田退水零直排工程由此形成了3种主要的建设模式,以适应不同地区的实际需求(图1)。

2.1 开放型模式

开放型模式适用于那些自然条件较为简单、基础设施相对薄弱的地区,针对无法退养水塘、“断头浜”且无条件构建生态调蓄塘的区域的一种建设模式。其核心构建路径包括:农田系统、生态拦截沟

渠、生态净化区域以及最终的接纳水体。在这一综合模式中,生态拦截沟是关键环节,其通过拦截农田退水中的固体颗粒物和部分溶解性污染物,降低退水的污染负荷。生态净化带则进一步运用水生植物、微生物等自然生态系统的自我净化机制,吸收并转化退水中所含的氮、磷等营养成分,以此达成水质初步改善与净化的目的。开放型模式的优势在于其建设成本较低,技术相对简单,易于在经济欠发达地区推广和应用。

2.2 半封闭型模式

半封闭型模式适用于那些自然条件稍好、有一定基础设施建设能力的地区,特别是那些没有退养水塘、“断头浜”但有条件建设生态调蓄塘的区域。该模式的构建路线为:农田—生态拦截沟—生态调蓄塘—生态净化带—受纳水体。与开放型模式相比,半封闭型模式增加了生态调蓄塘这一关键环节。生态调蓄塘不仅能够对农田退水进行暂时性储存,调节退水的流量和水质,还能通过微生物降解、沉淀等作用进一步去除水中的污染物。经过生态净化带的二次净化后,退水的水质能够达到更高的标准,从而减少对受纳水体的污染负荷。半封闭型模式在技术上更具优势,能够适应更多复杂的自然条件和更高的环保要求,适合在经济条件中等的地区推广。

2.3 全封闭型模式

全封闭型模式是3种模式中技术最为先进、创新性最为突出的一种模式。它适用于自然条件优越、基础设施完善的地区,特别是那些在存在退养水塘和“断头浜”的区域。全封闭型模式的构建路径是:农田—生态拦截沟—生态调蓄塘—“三池两坝”

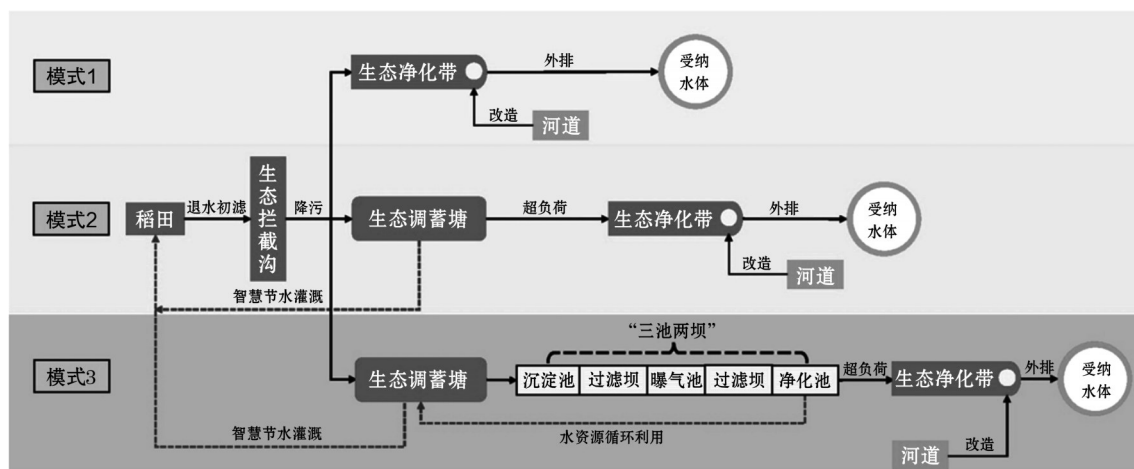


图1 农田退水零直排工程构建模型

坝”(沉淀池—过滤坝—曝气池—过滤坝—净化池)—生态净化带—受纳水体。该模式中“三池两坝”是核心技术环节。沉淀池通过重力沉降作用去除退水中的悬浮颗粒物;过滤坝采用物理过滤手段与微生物的分解作用,去除水体中的污染物;曝气池则通过提升溶解氧含量,刺激好氧微生物的繁殖和活动,从而加快有机物的降解;净化池则通过水生植物的吸收和微生物的协同作用,实现对氮、磷等营养物质的深度净化。经过“三池两坝”处理后的退水,其污染物浓度显著降低,水质得到极大改善。全封闭型模式在农田退水处理上表现出色,实现了高效净化,同时也有助于减少氮磷的流失,推动资源的循环利用。

3 结 论

农田退水污染“零直排”技术的研究和应用为农业面源污染治理提供了新的思路。“零直排”技术从源头控制、过程拦截和末端治理3个层面有机结合,可以显著减少氮磷等污染物的排放,改善水体环境质量。农田退水非直接排放工程与建设高标准、生态型的智慧农田相结合,是达成农业现代化与生态保护双重目标的关键策略。采用智能化管理系统和自动化操作流程,能够增强农田在灌溉、排水及污染治理方面的精确性和作业效率,还能有效减轻管理人员的工作强度,提升农业生产的整体管理水平。此外,农田退水“零直排”工程在实践中积累了丰富的工程建设经验与生态拦截净化技术,这些经验和具有可复制性和可推广性,能够推动农业向绿色方向转型,指导未来智慧田园管理体系的演进趋势,促进农业非点源污染控制及水体保护相关领域的技术创新与发展,为实现农业可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 尤滨乾,贾伟忠,葛佳颖,等. 海宁市农田退水“零直排”治理现状、问题与对策建议[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(9): 2301-2304.
- [2] 王潇,王沛芳,胡斌,等. 农田退水生态削减净化技术研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(3): 681-686.
- [3] 胡诗瑶,王沛芳,胡斌,等. 农田退水中氮磷与吡虫啉的光催化水循环协同净化试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 35-42.
- [4] 王沛芳,娄明月,钱进,等. 农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 1-10.
- [5] 李英,赵福年,丁文魁,等. 灌溉方式和播期对玉米水分动态与水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 62-67.
- [6] ISLAM S M M, GAIHRE Y K, ISLAM Md R, et al. Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management [J]. Journal of Environmental Management, 2022 (307): 114520.
- [7] 史倩倩,于爱忠,冯福学,等. 少耕留茬小麦间作玉米农田土壤温湿度关联性研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(6): 25-30.
- [8] 朱坚,纪雄辉,田发祥,等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1626-1634.
- [9] 向梦,顾世祥,高蓉,等. 杞麓湖流域农田面源调查及农业节水减排对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(8): 127-132.
- [10] 张丽娟,马中文,马友华,等. 优化施肥和缓释肥对水农田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 90-94, 100.
- [11] 段小丽,张富林,倪承凡,等. 前氮后移对水稻产量形成和田面水氮素动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 255-261.
- [12] 张迎颖,李敏,潘吴意,等. 生态沟渠对农田退水污染物的净化效能及其配置规模[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 105-116.
- [13] 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.
- [14] 张树楠,肖润林,刘锋,等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516-4522.
- [15] 刘文祥. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究[J]. 环境科学研究, 1997(4): 18-22.
- [16] 蒋白懿,刘丹,颜秀勤,等. 生物浮岛技术对八干渠水质净化研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(3): 544-548.