

生态型农田排水系统设计与应用研究

高尚

天津渤化环境修复股份有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6888

[摘要] 为解决传统农田排水引发的排涝与环境问题,构建并评价了一套生态型农田排水系统。该系统集成了生态拦截沟、控排暗管、植被过滤带和表流人工湿地等单元。采用暴雨洪水管理模型进行水力模拟,并通过现场监测评价其排涝、水质净化及综合效益。结果表明,系统将排涝标准提升至10年一遇,暴雨后积水在42小时内消退,洪峰流量削减29.8%。对总氮和总磷的平均削减率分别达到45.2%和58.7%。经济评估显示项目净现值为正。研究证实该系统能有效协同农田排涝安全与面源污染控制,具备推广应用价值。

[关键词] 生态型排水系统; 农田排水; 面源污染; 雨洪管理; 人工湿地

中图分类号: TL353+.2 **文献标识码:** A

Research on the Design and Application of Ecological Farmland Drainage System

Shang Gao

Tianjin Bohai Chemical Environmental Remediation Co., Ltd

[Abstract] To address the waterlogging and environmental issues caused by traditional farmland drainage, an ecological farmland drainage system was constructed and evaluated. This system integrates units such as ecological intercepting ditches, controlled drainage subsurface pipes, vegetation filter belts, and surface flow constructed wetlands. A rainstorm flood management model was used for hydraulic simulation, and on-site monitoring was conducted to evaluate its waterlogging drainage, water quality purification, and comprehensive benefits. The results showed that the system raised the waterlogging drainage standard to a 10-year return period, with accumulated water dissipating within 42 hours after a rainstorm and flood peak discharge reduced by 29.8%. The average reduction rates for total nitrogen and total phosphorus reached 45.2% and 58.7%, respectively. Economic evaluation indicated a positive net present value for the project. The study confirmed that this system can effectively coordinate farmland waterlogging safety and non-point source pollution control, and has potential for promotion and application.

[Key words] ecological drainage system; farmland drainage; non-point source pollution; stormwater management; constructed wetland

引言

平原地区传统农田排水工程以快速外排为导向,虽满足了一定的排涝需求,却加剧了下游防洪压力,并导致携带氮磷等营养盐的农田径流直接污染受纳水体。为应对这一挑战,亟需发展兼顾排涝功能与生态效益的新型排水模式^[1]。本研究以典型平原农田为对象,旨在设计并应用一套集滞蓄、净化、生态功能于一体的生态型排水系统。通过水力模型模拟与现场原位监测相结合的方法,系统评估该系统在排涝减灾、水质净化及综合效益方面的实际效果,以期为区域农业面源污染治理和水环境可持续管理提供技术参考。

1 区域概况

1.1 研究区自然条件与水文特征

研究区域地处冲积平原,地势较为平坦,平均海拔介于5 m至10 m之间,地面坡降约1/5000,微弱的地形梯度导致地表径流速度缓慢,水力输送条件不佳。该区域属于温带季风气候区,年均降雨量约1200 mm,降雨时空分布极不均匀,6月至8月的汛期降雨量占全年总量的70%以上,且多以短时强降雨形式出现,历史记录10年一遇24 h最大降雨量可达180 mm。土壤类型以黏壤土为主,土壤容重为1.45g/cm³,其饱和导水率较低,约为1.0×10⁻⁶ cm/s。在土壤剖面40 cm至60 cm深度处普遍存在一层黏粒含量超过40%的黏盘层,该层次结构紧密,严重阻碍了降雨的垂直入渗。区域地下水位较高,常年维持在0.5 m至1.5 m之间,

汛期易受降雨补给和周边河流水位顶托的双重影响而迅速抬升至地表。河网密度较大,但河道坡降小,水流交换不畅,水体自净能力有限^[2]。主要种植作物为水稻-小麦轮作,不同的作物生长阶段对土壤水分条件要求各异,为农田排水管理带来了挑战。

1.2 农田排水现状及生态问题

当前研究区农田排水系统主要由传统的水泥衬砌梯形渠道构成,渠道断面通常为底宽0.5 m,边坡1:1.5,其设计标准为应对5年一遇的暴雨事件,整体排涝能力偏低。在遭遇超过100 mm/d的集中降雨时,渠道行洪能力不足,田间积水时间常超过48 h,导致小麦等旱作物的根系长时间处于缺氧环境。农田径流未经过任何处理直接排入外河,由于该区域氮肥施用量普遍在250 kg/ha左右,径流中携带的氮、磷等营养物质成为水体富营养化的重要来源。监测数据显示,排水高峰期,排口水体总氮(Total Nitrogen, TN)浓度可达5-8 mg/L,总磷(Total Phosphorus, TP)浓度达到0.4-0.6 mg/L。硬化的渠道不仅增加了流速,加剧了对下游河道的冲刷,其单一的结构也破坏了原有的水陆生态交错带,使得水生植物难以附着生长,阻碍了鱼类和底栖动物的迁徙与繁衍。调查发现,与区域内自然河道相比,这些人工渠道中的鲤科鱼类和螺类等指示性生物种类减少了近70%,生态系统服务功能严重退化。

2 农田排水系统设计

2.1 系统总体构建思路与目标

生态型农田排水系统的构建,旨在转变传统“快速排泄”的单一模式,建立一套兼具排涝安全、过程净化与生态保育功能的多级滞蓄净化系统。其核心思路是在源头、过程和末端设置多道生态工程单元,通过拦截、渗透、滞留、净化等一系列过程,实现雨水的“慢排缓释”^[3]。系统总体目标包括两个方面:在排涝方面,将农田排涝标准提升至10年一遇,确保在设计暴雨后48 h内田间地下水位能降至作物根系主要分布层以下0.8 m的安全深度,以满足小麦等作物的生长需求;在水质改善方面,实现对农田排水中主要污染物的有效削减,设计目标为TN去除率不低于40%,TP去除率不低于50%,使外排尾水水质满足地表水环境质量标准的要求。该系统通过构建水生与陆生植被相结合的生态系统,重塑沟渠的生物多样性,提升排水系统的综合服务功能,最终实现高产农业与区域水环境保护的协调发展。这一思路改变了过去将农田排水视为负担的观念,而是将其作为一种可以管理和利用的资源。

2.2 关键技术单元结构与参数设计

系统由生态拦截沟、控排暗管、植被过滤带及表流人工湿地等关键技术单元串联组成。生态拦截沟替代了原有的混凝土渠道,设计为底宽0.8 m、深1.2 m、边坡1:2.0的复式断面结构。生态拦截沟的植被配置上,坡脚常水位线以下选择沉水性能好的苦草,常水位线附近则密植具有强固土和净化能力的芦苇,坡顶则采用耐旱的狗牙根。其下部深槽用于承载日常基流和2年一遇以下的小流量径流,上部平台则在遭遇大流量时提供蓄洪空间。田间内部署了间距15 m、埋深1.0 m的直径110 mm高密度聚

乙烯多孔波纹管作为控排暗管,其出口设有可调控堰板。该堰板采用高强度聚氯乙烯(Polyvinyl Chloride, PVC)材料^[4]。通过手动螺杆装置调节其高度,调节精度可达1cm,确保了水位调控的灵活性。

沿生态沟两侧设置宽度为5 m的植被过滤带,种植高羊茅等密根系地被植物,并对表层30 cm土壤掺入20%的河沙进行改良,以提高入渗性能,用于拦截地表径流中的颗粒态污染物。系统末端建设一座表流人工湿地,水深设计为0.4-0.6 m,水力停留时间控制在2-3 d。其长宽比设计为3:1,以促进水流形成推流状态,避免短流。设计水力负荷率为500 m³/(ha·d)。湿地床体由下至上依次铺设20 cm厚的防渗土工膜、15 cm厚的支撑砾石层(粒径20-40 mm)、30 cm厚的功能性基质层(粒径5-10 mm的沸石与砾石按1:3体积比混合)以及15 cm厚的种植土层,为植物生长和微生物附着提供了优良载体。

2.3 系统集成布局与水力模拟

各技术单元的集成布局遵循“源头-过程-末端”的逻辑序列,形成“田块-控排暗管/植被过滤带-生态拦截沟-表流人工湿地-外河”的水力与水质净化通路。为验证系统设计的合理性并优化其水力性能,采用了暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)进行数值模拟。模型构建中,将农田概化为多个子汇水区,采用格林-安普特(Green-Ampt)模型模拟土壤入渗过程^[5]。生态沟渠采用自定义不规则断面输入,植被过滤带与人工湿地则通过蓄水单元进行模拟。基于研究区降雨资料,设定了2年、5年和10年一遇等不同重现期的设计暴雨情景。模型率定阶段,利用改造前监测站记录的三场典型暴雨径流过程数据进行参数优化,通过调整子汇水区宽度、不透水面积百分比和曼宁糙率系数等参数,使得模拟洪峰流量与实测值的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)达到0.78。率定后生态沟渠的曼宁糙率系数确定为0.035。模拟结果显示,在10年一遇的24 h设计暴雨条件下,系统出口洪峰流量较改造前降低了25%,田间关键区域的最高水位满足设计要求。此外,模拟还表明,系统总径流外排量减少了15%,这部分水量通过入渗和蒸发等途径回补了区域水循环,表明该集成布局方案在水力上是安全可行且具有生态效益的。

3 应用效果分析

3.1 系统排涝减灾效益评价

系统建成后,通过对一场24 h内降雨量达到150 mm的实际暴雨事件进行监测,评估了其排涝减灾效益。数据显示,新系统作用下,布设在农田几何中心的自动化水位监测仪显示田面积水在42 h内完全消退。该监测仪为压力式水位计,精度为±0.5 cm。同时,通过时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)土壤水分传感器监测,田块表层20 cm土壤的体积含水率在雨后48 h内由饱和状态的45%迅速下降至田间持水量的32%,避免了作物根系的持续胁迫。地下水位也随之降至地表下0.85 m,相较于改造前积水持续超过72 h的情况,排涝效率得到有效提升,满足了10年一遇的排涝设计标准,其排水模数达到了15 mm/d。同时,

位于系统末端的排水口洪峰流量为 $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ ，与同等降雨条件下改造前的模拟洪峰值 $1.21 \text{ m}^3/\text{s}$ 相比，削峰率为29.8%。这表明系统内部的生态沟、湿地等单元发挥了良好的调蓄作用，通过增加糙率和提供蓄水空间，有效延缓了径流汇集时间，降低了对下游河道的防洪压力。

3.2 水质净化与面源污染削减分析

为量化系统的水质净化效果，在典型的灌排期间对系统进、出水口的水质进行了连续监测。系统进出水水质监测与削减效果如表1所示。

表1 系统进出水水质监测与削减效果

污染物	进水平均浓度/(mg/L)	出水平均浓度/(mg/L)	平均削减率
硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)	4.82	1.98	58.9%
总氮 (TN)	6.55	3.59	45.2%
溶解性总磷 (TDP)	0.21	0.11	47.6%
总磷 (TP)	0.58	0.24	58.7%
化学需氧量	52.3	28.6	45.3%
悬浮物	115.4	35.1	69.6%

表1的数据清晰地反映了生态排水系统对面源污染物的削减能力。TP的削减效果最为突出，其中，颗粒态磷的去除率高达75%，这与悬浮物69.6%的高削减率密切相关，表明植被过滤带和生态沟的物理拦截与沉降作用是除磷的关键环节。硝态氮的去除率高达58.9%，表明系统内的控排暗管和生态沟渠底部为微生物反硝化过程提供了有利的缺氧环境。系统在不同季节的运行效果也存在差异，夏季高温时期，微生物活性增强，TN的去除率可达到50%以上；而在冬季低温条件下，去除率则会下降至30%左右，但TP的去除效果受温度影响较小，全年保持稳定。监测结果证实，该系统能够稳定达到TN削减40%和TP削减50%的设计目标。

3.3 综合生态与经济效益评估

该生态排水系统的应用产生了多方面的综合效益。生态方面，改造后的沟渠和新建的湿地为多种生物提供了栖息地，现场鉴定的底栖大型无脊椎动物由改造前的4种增加到12种。采用香农-维纳(Shannon-Wiener)多样性指数进行评价^[6]。该指数值从改造前的0.85提升至1.92，表明群落结构复杂度和稳定性有所改善。经济效益方面，通过净现值(Net Present Value, NPV)法进行评估。该方法用于评估项目全生命周期的经济可行性，其计算公式如式(1)：

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

其中，为第年的效益，主要包括作物增产(约10%)、化肥流失减少带来的成本节约以及生态环境改善的间接价值；为第年的成本，包括初期建设投资和年均运行维护费用；为社会折现率，取值6%；为评估年份；为项目评估总年限。年均维护成本主要包括：人工除草与植被管理(约200元/ha)，用于清除优势入侵物种，维持植物群落多样性；堰板调节与渠道巡查(约150元/ha)；以及分摊的清淤费用(约150元/ha)，确保了系统的长期稳定运行。根据项目实际投入与效益估算，初期建设成本为每公顷1.5万元，年维护成本为每公顷500元。经计算，该项目在10年运营期内的NPV为正值，内部收益率高于基准折现率，静态投资回收期约为8年，表明该系统在经济上具有可行性。

4 结论

研究成功设计并验证了一套生态型农田排水系统。该系统通过多级生态单元的集成，有效提升了农田的排涝标准，保障了作物生长安全，同时显著延滞并削减了洪峰流量。水质监测数据证实了其对于氮、磷等主要面源污染物的稳定削减能力，达到了改善区域水环境质量的设计目标。综合效益评估表明，该系统在恢复沟渠生物多样性、提升生态系统服务功能方面效果良好，且在全生命周期内具备经济可行性。研究结果为传统农田排水系统的生态化改造提供了可行的技术方案和关键设计参数，对实现农业生产与环境保护的协调发展具有重要作用。

[参考文献]

- [1]刘云丽.高质量推进高标准农田建设为夺取明年夏粮丰产丰收筑牢根基[N].安阳日报,2025-12-19(001).
- [2]张兆鑫,孙翌翌,刘哲,等.我国农田径流污染及其控制技术进展[J].水资源与水工程学报,2024,35(02):207-216.
- [3]黄灿源.福建省生态型高标准农田建设研究[J].山西农经,2023,(24):104-106.
- [4]秦沂樟,白静,赵健,等.长江流域农田生态排水沟渠氮削减效应研究[J].农业环境科学学报,2024,43(02):389-400.
- [5]回禹,张贞,付艳华.土地整治项目中的生态型排水沟设计进展与未来展望[J].天津城建大学学报,2023,29(05):362-367.
- [6]任晓磊,王少丽,杨培岭,等.农田不同排水措施地下水排水效果模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(03):253-260.

作者简介:

高尚(1988—),男,汉族,内蒙古呼和浩特市人,本科,研究方向:水务,现任职称:中级工程师。