农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

丘陵坡度对生态沟渠磷消纳的影响及优化策略

吴陈晨, 徐轩, 段婧婧, 陈小锋, 薛利红

引用本文:
吴陈晨, 徐轩, 段婧婧, 等. 丘陵坡度对生态沟渠磷消纳的影响及优化策略[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2033-2042.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0508

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除
常小云, 张树楠, 张苗苗, 肖博仁, 陈均利
农业环境科学学报. 2021, 40(4): 852-858 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1196

洱海农田生产/生活景观区交替分布及昼夜节律对丰水期沟渠水质影响
谢坤, 吴凡, 罗元, 张克强, 沈仕洲, 王淑茹, 王风, 吴国云, 姚金玲
农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2427-2433 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1135

会仙湿地水体有机磷农药污染特征及生态风险
张健威, 曾莎莎, 梁延鹏, 覃礼堂, 曾鸿鹄, 马诚佑
农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1990-1997 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0208

不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点
迟宇博, 吴磊, 李蕊, 高爽
农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2833-2843 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0357

洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价
谢坤, 罗元, 冯弋洋, 何秋平, 张克强, 沈仕洲, 王风
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2387-2396 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0741

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴陈晨, 徐轩, 段婧婧, 等. 丘陵坡度对生态沟渠磷消纳的影响及优化策略[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2033-2042.
WU C C, XU X, DUAN J J, et al. Impact of hilly slope gradient on phosphorus removal in ecological ditches and optimization strategies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(8): 2033-2042.

开放科学 OSID

丘陵坡度对生态沟渠磷消纳的影响及优化策略

吴陈晨[1,2], 徐轩[2*], 段婧婧[2], 陈小锋[1], 薛利红[2]

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.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, 南京 210014)

摘 要: 为探究丘陵坡度对生态沟渠磷消纳效能的影响,本研究结合模拟沟渠实验与野外原位验证相结合的方法,评估了不同坡度条件下生态沟渠的磷去除机制与效率。模拟实验设置0°与6°两种坡度及常规沟渠与生态沟渠两种类型,监测了24 h内上覆水中不同磷组分[总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)、溶解态无机磷(DIP)、溶解态有机磷(DOP)、颗粒态磷(PP)]浓度及实验前后底泥磷形态的变化。结果表明:生态沟渠在两种坡度下对TP、DTP、PP的去除率均显著高于常规沟渠;与0°相比,6°坡度使生态沟渠的TP去除率降低了15.34%,表明坡度增加对磷的去除产生了显著的抑制作用。沟渠系统主要通过促进底泥中活性磷(如NaOH-P)的累积来实现对水体中磷的消纳。南京汤山野外沟渠实验(坡度约7°、种植金钱蒲、铺设火山石)验证了丘陵生态沟渠的实际效能,该50 m长的生态沟渠对TP的平均去除率达到18.06%,去除负荷为29.81 g·d^{-1}。研究表明,坡度是影响丘陵生态沟渠磷消纳性能的关键因素之一,通过优化沟渠结构设计、基质选择与植被配置等策略,可有效提升其在丘陵地区农业面源磷污染控制中的应用潜力。

关键词: 面源污染;磷;沿程消纳;生态沟渠;丘陵;坡度

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2025)08-2033-10 doi:10.11654/jaes.2025-0508

Impact of hilly slope gradient on phosphorus removal in ecological ditches and optimization strategies

WU Chenchen[1,2], XU Xuan[2*], DUAN Jingjing[2], CHEN Xiaofeng[1], XUE Lihong[2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To investigate the impact of hilly slope gradient on phosphorus(P) removal efficiency in ecological ditches, this study evaluated P removal mechanisms and efficiencies under different slope conditions through simulated ditch experiments combined with field validation. In the simulation experiment, two slope gradients(0° and 6°) and two types of ditches(conventional ditches and ecological ditches) were set. The concentrations of different P components in the overlying water(total phosphorus, TP; dissolved total phosphorus, DTP; dissolved inorganic phosphorus, DIP; dissolved organic phosphorus, DOP; and particulate phosphorus, PP) within 24 hours and the changes in the phosphorus forms in the sediment before and after the experiment were monitored. The results showed that the removal rates of TP, DTP, and PP in ecological ditches were significantly higher than those in conventional ditches under both slope gradients. The 6° slope reduced the TP removal rate in ecological ditches by 15.34% compared to 0°, indicating that an increase in slope had a significant inhibitory effect on P removal. The ditch system primarily removed P in water by accumulating labile P fractions(e.g., NaOH-P) in the sediment. The field ditch experiment in Tangshan, Nanjing(approximately 7° slope planted with *Acorus gramineus* and volcanic rock substrate) verified the actual efficiency of hilly ecological ditches. The 50 m ecological ditch showed an average TP removal rate of 18.06%

收稿日期: 2025-05-29 **录用日期:** 2025-07-04

作者简介: 吴陈晨(2001—),女,江苏如皋人,硕士研究生,研究方向为农业面源污染控制。E-mail:841951181@qq.com

***通信作者:** 徐轩 E-mail:xxu@jaas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1702103,2021YFD1700803)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2023YFD1702103,2021YFD1700803)

and a removal load of 29.81 g·d^{-1}. This study confirmed that slope gradient is one of the critical factors influencing P removal performance of hilly ecological ditches. Nevertheless, optimizing ditch structure, substrate materials, and vegetation selection can enhance the application potential of ecological ditches for controlling agricultural non-point source P pollution in hilly areas.

Keywords: non-point source pollution; phosphorus; removal along the way; ecological ditch; hilly area; slope gradient

农业面源污染，特别是氮、磷营养元素的流失，已成为全球性的突出环境问题，是导致河流、湖泊等天然水体富营养化的主要驱动因素之一[1]。据《第二次全国污染源普查公报》数据，2017年我国农业源总磷排放量占全国总磷排放总量的67.2%[2]，磷作为水体富营养化的关键限制因子，其有效控制对于维护和改善水环境质量至关重要[3]。

农田排水沟渠是连接农田和受纳水体的关键通道，不仅承担着农田排水功能，也是拦截和转化农田流失污染物的重要场所[4-5]。生态沟渠通常通过优化沟渠水力结构（如设置小型堰坝、浅滩）、添加功能性基质（如沸石、钢渣）以及种植水生植物等生态工程手段，强化沟渠对氮、磷、悬浮物等污染物的物理沉降、基质吸附与离子交换、植物吸收利用以及微生物转化等过程，从而有效削减进入下游水体的污染负荷[6]。生态沟渠磷消纳指通过物理沉降、基质吸附、植物吸收、微生物转化等协同作用，将径流中的溶解性磷和颗粒态磷截留、固定或转化为难迁移形态，从而减少磷向受纳水体的迁移通量的过程[7]。大量研究表明，在平原地区，生态沟渠能够显著去除农田排水中的磷，生态沟渠对磷的去除率可达30%~90%，具体效果受沟渠设计参数、水力负荷条件、入水污染物浓度、植被类型和运行管理措施等多种因素影响[8-10]。

我国丘陵地区分布广泛，约占国土陆地总面积的1/10。这些地区通常地形起伏显著，坡度较大，在降雨事件发生时易形成流速快、冲刷力强的地表径流，导致土壤侵蚀加剧，污染物迁移量远超平原地区[11]。沟渠作为丘陵地区汇集和输送地表径流的主要通道，其内部水流速度通常较快，水力冲刷作用也更为强烈，这与平原地区沟渠的水文条件存在显著差别[12]。坡度的增加可能导致水流在沟渠内的水力停留时间缩短，影响污染物的沉降和基质吸附过程；同时，高速水流可能冲刷沟渠底部的沉积物，导致已沉降或吸附的磷再次释放进入水体，并可能对水生植物的稳定生长及其对磷的吸收固定效果产生不利影响[13]。目前，关于生态沟渠磷消纳的研究主要集中在平原地区，对于坡度较大的丘陵地区生态沟渠磷消纳性能的研究，特别是坡度对其净化效果影响的定量研究还相对缺乏，这在一定程度上限制了生态沟渠技术在丘陵地区的有效推广和应用。因此，亟需开展针对性的研究，以明确不同丘陵坡度条件下生态沟渠的磷消纳规律和实际应用效果。

本研究旨在通过模拟沟渠实验和野外原位实验相结合的方法，揭示丘陵坡度对生态沟渠磷消纳过程的影响，评估其在丘陵环境下的应用潜力，并为优化设计和管理适用于丘陵地区的生态沟渠提供科学依据和对策建议，以期更有效地控制丘陵地区的农业面源磷污染。

1 材料与方法

1.1 模拟沟渠实验

本实验于江苏省农业科学院内（32°01′55″N，118°52′16″E）进行，实验装置为采用不锈钢材质制成的模拟沟渠，单条沟渠尺寸为长3 m、宽0.4 m、高0.3 m，沟渠底部均匀铺设10 cm厚度的底泥，初始水深为15 cm，底泥和上覆水均采自实验场地附近的自然坑塘。沟渠出水口设置有收集桶，桶内通过潜水泵与沟渠进水口连接，使水体在沟渠内循环流动，沟渠进水流量约为2.5 L·s^{-1}。该循环系统旨在通过水流循环等效模拟更长沟渠的水流状态，延长水力流程。实验采用坡度和沟渠类型两因素设计，沟渠类型因子设为生态沟渠和常规沟渠：生态沟渠处理组在沟渠中段（距进水口0.5~2.5 m区域）种植25株生长状态良好、密度均匀的黄菖蒲（*Iris pseudacorus*）；常规沟渠则不种植任何植物。坡度因子设置0°和6°两种坡度模拟平原和丘陵地区的沟渠条件，坡度通过沟渠底部的可调节支架调节。本实验共4个处理：常规沟渠、0°坡度（C_0）；常规沟渠、6°坡度（C_6）；生态沟渠、0°坡度（T_0）；生态沟渠、6°坡度（T_6）。种植植物后静置14 d待系统稳定后开始实验。模拟实验持续时间为24 h，通过添加KH_2PO_4将初始水体总磷浓度调控在约0.5 mg·L^{-1}。在模拟沟渠的前、中、后位置设置3个采样区作为重复，分别在实验开始后的第0、3、6、12、24小时采集200 mL水样，用于测定总磷（TP）、可溶性总磷（DTP）、可溶性无机磷（DIP）、可溶性有机磷（DOP）和颗粒态磷（PP）。在实验开始和结束时采集表层底泥

样品，进行TP浓度和磷形态的分级测定。由于进水流量稳定且沟渠形状固定，因此可以通过测量沟渠内的平均水深计算平均流速，待实验运行后，在模拟沟渠的前、中、后3个采样区分别测定3次水深计算各处理沟渠内平均水深，通过平均水深计算平均流速和水力停留时间。各处理平均水深、平均流速和水力停留时间如表1所示。

表1 实验各处理沟渠平均水深、平均流速和水力停留时间

Table 1 Average water depth, average flow velocity and hydraulic retention time of each treatment ditch in the experiment

处理 Treatment	平均水深 Average water depth/cm	平均流速 Average flow velocity/(cm·s^{-1})	水力停留时间 Hydraulic retention time/h
C_0	15.2	0.526	0.158
C_6	12.9	0.620	0.134
T_0	16.1	0.497	0.168
T_6	14.1	0.567	0.147

1.2 野外原位实验

实验地点位于南京市汤山街道南京太和水稻种植专业合作社（32°00′10″N，119°04′34″E），该区域属于典型的低山丘陵地貌。选择一条具有代表性的农田排水生态沟渠作为研究对象，沟渠长度约为50 m，宽度约为0.5 m，平均坡度约为7°，沟渠内种植有金钱蒲（*Acorus gramineus*），植被覆盖度约50%，沟渠底部铺设有火山石。在沟渠前端设置一个储水箱，通过添加KH_2PO_4将进水总磷浓度控制在约0.5 mg·L^{-1}，进水流量约为2.5 L·s^{-1}，在此条件下，该50 m长生态沟渠水力停留时间约为0.11 h。沿水流方向均匀布设4个采样点（P1~P4），其中P1和P4位于沟渠进水口和出水口，P2位于上游段中部，P3位于下游段中部。待沟渠整体水流稳定后开始采集水样，每隔10 min在各采样点同步采集一次水样，共连续采集7次，水样采集后立即冷藏保存并尽快送回实验室测定TP浓度。

1.3 测定指标及方法

采用过硫酸钾消解、钼锑抗比色法测定水样中的TP和DTP浓度，钼锑抗比色法测定DIP浓度。DTP和DIP样品在测定前均采用0.45 μm滤膜过滤。底泥样品风干后研磨并通过60目筛网，底泥TP含量采用高氯酸-硫酸消煮-钼锑抗比色法于紫外分光光度计（UVmini-1240，岛津）700 nm下进行测定。为了确定底泥中不同形态磷的含量，采用Hedley磷素分级方法对底泥样品进行磷分级测定[14]。具体步骤为：取0.2 g过60目筛的底泥样品，首先与30 mL去离子水混合，在150 r·min^{-1}转速下振荡16 h，离心分离并通过0.45 μm滤膜过滤，滤液中测得的磷为可溶性P（H_2O-P）；剩余固体与30 mL 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$溶液混合，同样条件下振荡、离心、过滤，滤液中测得的磷为交换态P（$NaHCO_3$-P）；剩余固体再与30 mL 1 mol·L^{-1} NaOH溶液混合，同样条件下振荡、离心、过滤，滤液中测得的磷为铁铝结合态磷（NaOH-P）；随后固体与30 mL 1 mol·L^{-1} HCl溶液混合，振荡、离心、过滤，滤液中测得的磷为钙结合态磷（HCl-P）。以上各组分提取液中的磷含量均采用电感耦合等离子体发射光谱仪（PQ9000，Analytik Jena）进行测定。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2021进行数据整理，使用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析，使用Origin 2021进行主成分分析（PCA）及绘图。

模拟实验流速（v，cm·s^{-1}）计算公式如下：

$$v = \frac{Q_{in}}{10 \times h \times b} \tag{1}$$

式中：Q_{in}为进水流量，L·s^{-1}；h为平均水深，m；b为沟渠宽度，m。

水力停留时间（HRT，h）计算公式如下：

$$HRT = \frac{L}{v \times 10^{-2} \times 3\,600} \tag{2}$$

式中：L为沟渠长度，m；v为流速，cm·s^{-1}。

通过测定不同时段的污染物浓度，计算出各污染物的去除率（η，%），公式如下：

$$\eta = \left(\frac{c_0 - c_t}{c_0}\right) \times 100\% \tag{3}$$

式中：c_0和c_t分别为初始和t时间浓度，mg·L^{-1}。

通过监测渠段的流量，计算去除负荷（P_w，g·d^{-1}），公式如下：

$$P_w = Q \times (c_{in} - c_{out}) \tag{4}$$

式中：Q为沟渠流量，m^3·d^{-1}；c_{in}和c_{out}分别为沟渠起始和末端污染物浓度，mg·L^{-1}。

2 结果与分析

2.1 上覆水磷浓度变化与去除率

在模拟沟渠实验中（图1），所有处理组的上覆水磷浓度在实验初期下降较快，随后逐渐趋于稳定或下降速率减缓。在整个24 h运行期间，生态沟渠（T_0、T_6）的上覆水TP、DTP、PP浓度始终低于相应坡度下的常规沟渠（C_0、C_6）。比较相同沟渠类型在不同坡度下的表现，6°坡度处理的磷浓度整体上高于

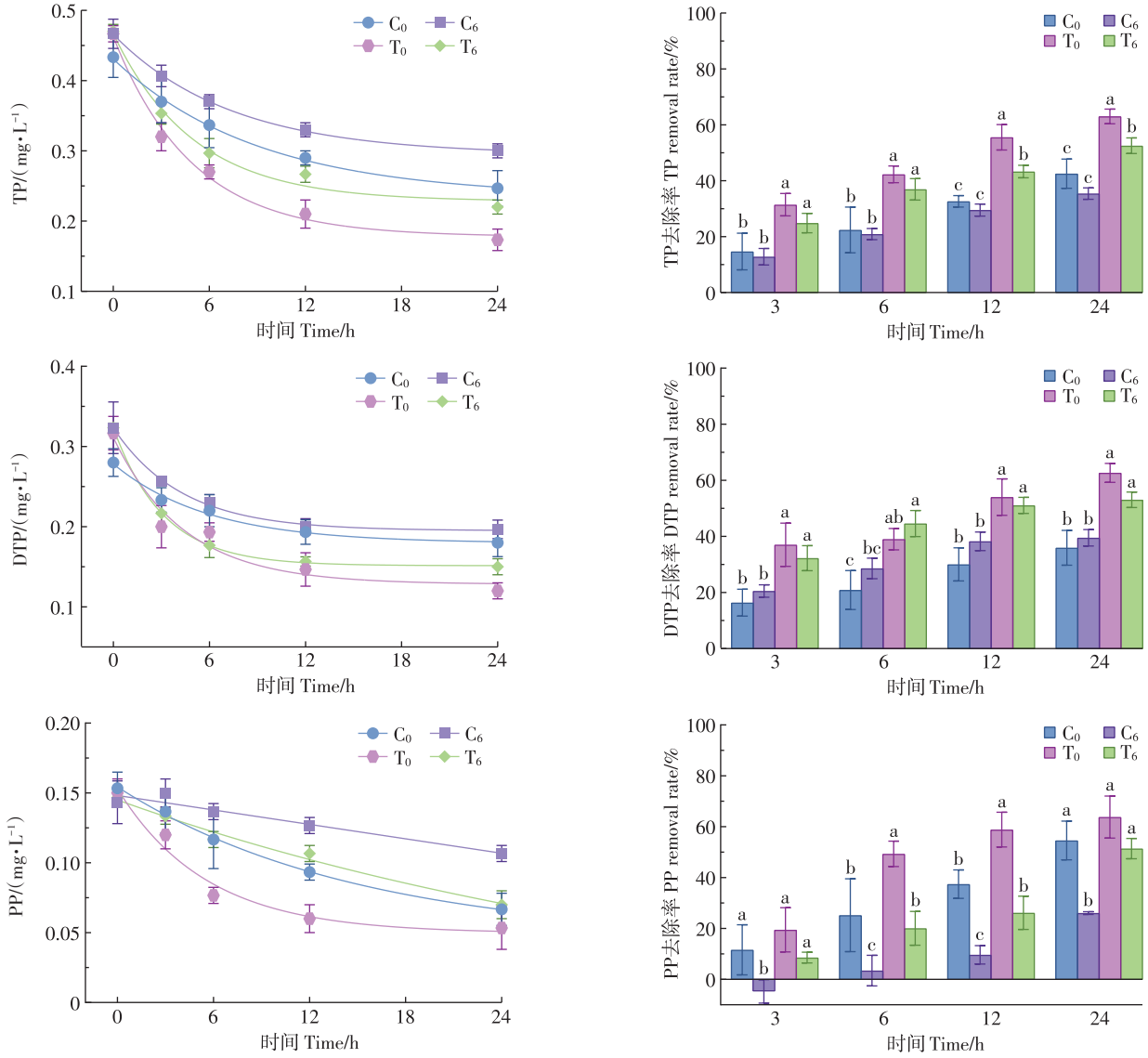
0°坡度处理。综合来看，各处理对磷去除效率表现为T_0>T_6>C_0>C_6。

在0°坡度条件下，生态沟渠对TP、DTP、PP的24 h去除率分别达到了62.83%、62.50%、66.67%，高于常规沟渠的41.86%、35.71%、53.33%。当坡度增加至6°时，生态沟渠的去除率为53.19%、53.13%、53.33%，同样高于常规沟渠的36.17%、37.50%、21.43%。这表明生态沟渠显著增强了对水体中不同形态磷的消纳能力。

对于常规沟渠，C_0处理TP浓度由初始的0.43 mg·L^{-1}降至0.25 mg·L^{-1}，C_6处理TP浓度由0.47 mg·L^{-1}降至0.30 mg·L^{-1}。值得注意的是，C_0处理对PP的去除率(53.33%)显著高于C_6处理(21.43%)，这表明坡度的增加加剧了常规沟渠中颗粒态磷的流失。

对于生态沟渠，T_0处理TP浓度由初始的0.47 mg·L^{-1}下降至0.17 mg·L^{-1}，而T_6处理TP浓度从0.47 mg·L^{-1}降至0.22 mg·L^{-1}。T_6处理组的TP去除率(53.19%)显著低于T_0处理组(62.83%)，TP去除率因坡度从0°增加至6°而降低了15.34%，表明坡度增加削弱了生态沟渠的磷消纳能力。

关于溶解态磷组分的变化(图2)，在常规沟渠中，C_0处理的DIP浓度由初始的0.26 mg·L^{-1}降至0.17 mg·L^{-1}，降幅为34.62%，C_6处理的DIP浓度由0.32 mg·



不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著(P<0.05)。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments(P<0.05).

图1 水体TP、DTP、PP的变化

Figure 1 Changes of TP, DTP and PP in water

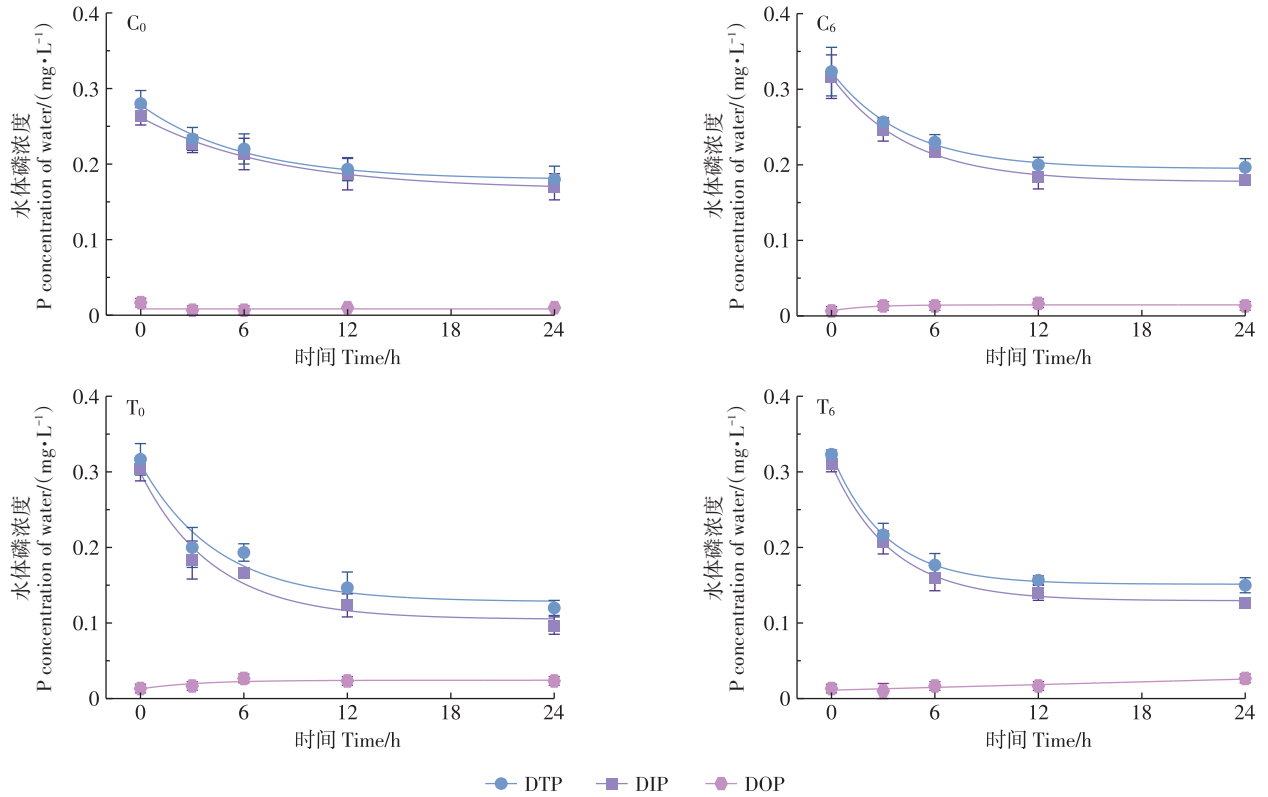


图2 不同处理下水体可溶性磷组分变化

Figure 2 Changes in soluble P composition in water under different treatments

L^{-1}降至0.18 mg·L^{-1},降幅为43.75%,两个坡度下DOP浓度始终维持在较低水平,且随时间无显著波动。

在生态沟渠中,T_0处理的DIP浓度由初始的0.30 mg·L^{-1}降至0.10 mg·L^{-1},降幅达66.67%,T_6处理的DIP浓度由0.31 mg·L^{-1}降至0.13 mg·L^{-1},降幅为58.06%,生态沟渠对DIP的去除效能明显优于常规沟渠。与常规沟渠相比,生态沟渠中的DOP浓度呈现出一定程度的上升趋势,这可能与植物和微生物的生命活动有关。

2.2 沟渠底泥磷含量及组分变化

实验后,各处理组底泥中的TP含量均较实验前有所增加(图3),表明底泥是水体中磷的重要汇集场所。生态沟渠T_0处理的底泥TP含量由实验前的762.23 mg·kg^{-1}提升至实验后的811.06 mg·kg^{-1},增幅达6.41%;T_6处理的底泥TP含量也从737.59 mg·kg^{-1}增至783.70 mg·kg^{-1},增幅为6.25%。常规沟渠C_0处理的底泥TP含量由725.98 mg·kg^{-1}提升至761.64 mg·kg^{-1},增幅达4.91%;C_6处理的底泥TP含量从757.17 mg·kg^{-1}小幅增至771.32 mg·kg^{-1},增幅仅为1.87%。生态沟渠底泥的TP增量普遍高于常规沟渠,且0°坡度条件下的增幅略高于6°坡度。

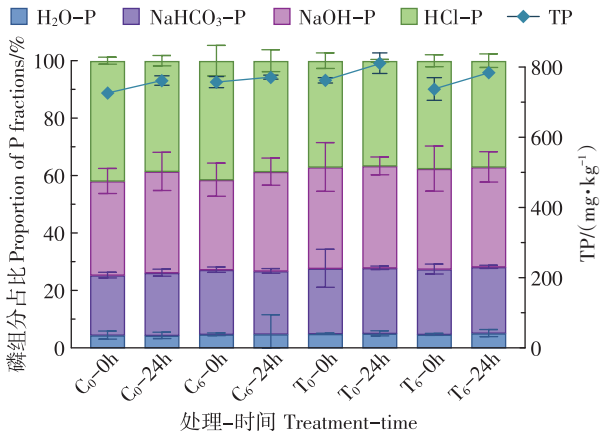


图3 实验前后底泥磷含量与各级磷组分占比

Figure 3 TP content in sediments and the proportion of P fractions before and after the experiment

从磷形态来看,在常规沟渠中,C_0处理实验后$NaHCO_3$-P和NaOH-P的相对占比分别较实验前上升了约1.0个和2.5个百分点,C_6处理的NaOH-P占比则上升约3.2个百分点,表明磷主要以活性态磷在底泥中累积。相比之下,生态沟渠T_0和T_6处理实验前后各形态磷的相对占比保持稳定,NaOH-P占比基本不变,这一现象表明生态沟渠中的植物在生长过程中可

能会优先利用底泥中这部分活性磷组分。

2.3 野外实验

在南京汤山丘陵地区的野外试验中，不同时段生态沟渠采样点TP浓度变化及其去除负荷如图4所示。沿水流方向，从进水口到出水口TP浓度整体呈下降趋势。进水口P1处TP浓度为0.72 mg·L^{-1}，至50 m长的沟渠末端出水口P4处，TP浓度降至0.59 mg·L^{-1}。结果表明，该生态沟渠对TP实现了平均18.06%的去除率。根据平均进水流量（2.5 L·s^{-1}）和进出水TP浓度差计算，该生态沟渠对TP的去除负荷达到了29.81 g·d^{-1}。这一结果初步证实了在真实的丘陵地形条件下，经过适当设计的生态沟渠系统仍然具有一定的磷削减能力。

2.4 水体磷去除率影响因素分析

对水体磷去除率和坡度等数据进行主成分分析，结果如图5所示。第一轴（PC1）和第二轴（PC2）的解释值分别为55.2%和25.6%，第一和第二主成分反映的信息量占总信息量的80.8%。植被和时间与各形态磷去除率呈正相关，说明随着植被种植、时间增加，各形态磷去除率升高。流速和坡度与各形态磷去除率呈负相关，说明随着流速和坡度的增加，各形态磷去除率下降。

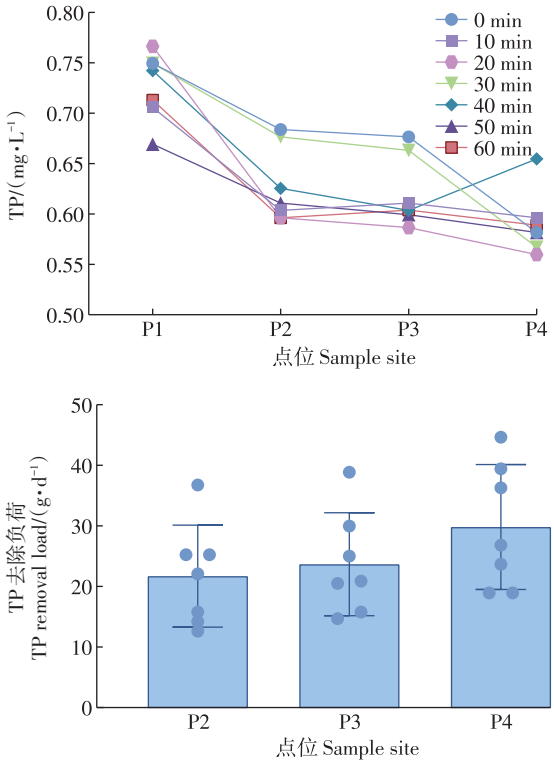
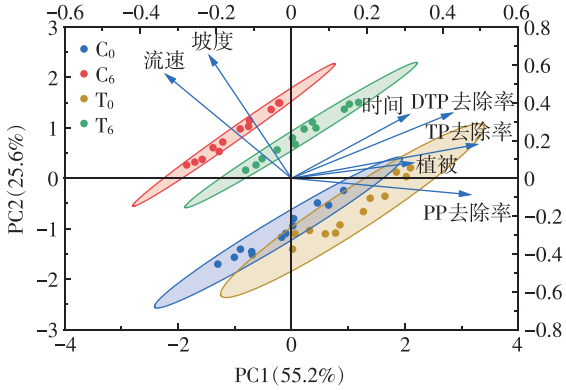


图4 南京汤山生态沟渠沿程水体总磷浓度和去除负荷变化

Figure 4 Changes in TP concentration and removal load along the ecological ditches in Tangshan, Nanjing



点表示试验处理，箭头表示影响因素。

The dots indicate the test treatments, and the arrows indicate the influencing factors.

图5 水体磷去除影响因素PCA分析

Figure 5 PCA analysis of influencing factors of phosphorus removal in water

3 讨论

3.1 生态沟渠对磷消纳的影响

本研究的模拟沟渠实验结果表明，无论是在0°还是6°坡度下，生态沟渠的磷消纳能力均显著优于常规沟渠。这与大量在平原地区开展的生态沟渠研究结果一致[15]。生态沟渠的优势主要源于其多重净化机制的协同作用[16]。一是基质的吸附与沉降，生态沟渠中铺设的底泥本身具有一定的吸附能力，能够通过物理吸附、化学沉淀和离子交换等方式固定水体中的溶解态磷和颗粒态磷[17]。本实验中，所有处理组的底泥TP含量在实验后均有增加，特别是$NaHCO_3$-P和NaOH-P的增加，证明了底泥对磷的吸附和累积是重要的去除途径。同时，生态沟渠中水生植物的存在有助于减缓水流速度，增加水力粗糙度，从而更有利于悬浮颗粒物的沉降，进而高效去除附着其上的颗粒态磷[18]。二是分泌物影响根际微环境，促进磷的转化和吸收[19]。虽然本模拟实验周期较短（24 h），植物对磷的直接吸收量可能相对有限，但在生态沟渠的长期运行过程中，植物的持续生长和对磷的累积吸收，以及后续通过定期收割植物移除系统中的磷，是实现磷从水生态系统中净去除的关键途径[20]。本实验中C_0和C_6处理NaOH-P的占比分别较实验前上升了2.5个和3.2个百分点，相比之下，T_0和T_6处理实验前后各形态磷的相对比值保持稳定，NaOH-P占比基本不变。不同形态磷的生物可利用性差异较大，研究表明，沉水

植物对活性磷的吸收效率通常高于其他形态[21]。因此，生态沟渠中NaOH-P未有明显积累的原因，可能是水生植物吸收利用了部分吸附的活性磷。此外，挺水植物如黄菖蒲还能通过其根系分泌物（如有机酸、酶类）改善根际微环境的理化性质，可能促进难溶性磷的活化与再吸收，或促进磷酸盐与根表铁膜等结合[22]。植物也可能通过根系分泌物调节根际微生物群落，进而影响磷的去除[23]。研究发现菖蒲根系分泌的有机酸量显著高于对照组[24]。微生物在磷循环中扮演双重角色：一方面将有机磷矿化为植物可利用的无机磷；另一方面，其自身活动（如同化作用）也会将部分磷转化为微生物源有机磷（即DOP的重要组分）。根系分泌物与微生物活动共同构建了一个正反馈机制，促进了DOP的产生与磷循环[25]。因此，生态沟渠中DOP浓度的相对升高也间接反映了植物和微生物活动对磷形态转化的影响。三是微生物过程，沟渠底泥、植物根系表面以及水体中均附着和悬浮着大量的微生物群落，这些微生物在磷的生物地球化学循环中扮演着重要角色[26]。生态沟渠复杂的环境为微生物提供了更大的附着表面和多样化的生境，可能促进了与磷循环相关的微生物活动[23]。大部分被去除的磷最终以不同形态累积在沟渠的底泥中，这是短期内磷的主要汇。然而，底泥对磷的吸附能力有限，当达到饱和或环境条件改变（如pH、氧化还原电位变化、强烈水力扰动）时，部分已固定的磷可能再次释放回上覆水体。同时，一部分磷被水生植物吸收并转化为其组织的构成部分，通过定期收割和移除植物生物质，可以将这部分磷永久性地移出沟渠系统。常规沟渠主要依赖于有限的自然沉降作用去除部分颗粒态磷，对溶解态磷的去除能力则更为有限，且其底泥容易较快达到吸附饱和，或在水流扰动下发生磷的再悬浮。因此，生态沟渠通过综合强化上述多种物理、化学和生物过程，实现了对各种形态磷更高效、更稳定的去除。

3.2 坡度对沟渠磷消纳的影响

本研究的结果表明坡度的增加对生态沟渠和常规沟渠的磷消纳能力均产生了显著的负面影响。模拟实验结果显示，当坡度从0°增加到6°时，生态沟渠的TP去除率下降了约15.34%。这一现象主要归因于坡度增加改变了沟渠内的水力条件，进而影响了物质迁移和转化过程。一是水力停留时间缩短，坡度增加直接导致沟渠内水流速度加快。在本研究的模拟实验中，坡度会增加沟渠内水流速度，平均流速由0.526 cm·s^{-1}（C_0）和0.497 cm·s^{-1}（T_0）分别上升至0.620 cm·s^{-1}（C_6）和0.567 cm·s^{-1}（T_6），相应的水力停留时间由0.158 h（C_0）和0.168 h（T_0）分别缩短至0.134 h（C_6）和0.147 h（T_6）。通常情况下，较短的水力停留时间意味着污染物（磷）与沟渠净化系统（底泥、基质、植物根系、微生物膜等）的接触反应时间大幅缩短，这直接限制了物理沉降、化学吸附/沉淀以及生物吸收等一系列需要一定时间才能有效发生的净化过程[13,27]。二是水流冲刷与再悬浮增强，更高的水流速度（尤其是在较大坡度下）会增大水流对沟渠底部的剪切力。这种增强的剪切力更容易引起底泥表层已沉降的颗粒态磷以及部分疏松结合的吸附态磷发生再悬浮，重新进入水体并随水流失。这不仅会将已去除的磷再次释放，还可能破坏基质的微观结构稳定性，甚至冲刷掉附着其上的生物膜，从而显著降低沟渠的净去除效果，甚至可能导致二次污染。本研究中，6°坡度条件下常规沟渠对PP的去除率远低于0°坡度，以及6°坡度下底泥TP增量普遍低于0°坡度，可能均与此冲刷和再悬浮作用增强有关。

模拟实验的结果清晰地揭示了丘陵地区（以6°坡度为代表）生态沟渠相较于平原地区（以0°坡度为代表）在磷消纳能力上的差异。尽管生态沟渠本身的净化效果远优于常规沟渠，但坡度的存在确实削弱了其绝对的磷消纳性能。这意味着在丘陵地区设计和评估生态沟渠的效能时，不能简单地套用平原地区的经验参数和预期去除效率，必须充分考虑坡度因素带来的水力条件改变及其挑战。主成分分析表明，去除率受植被、流速和坡度共同影响，其中植被是主要因素。随着时间推移，坡度的影响可能减弱；延长水力停留时间和提升植被覆盖率是提升污染物去除效果的关键。平原地区的生态沟渠设计可能更侧重于优化基质的吸附容量和植物对营养盐的吸收效率，而丘陵地区的生态沟渠则需要额外关注如何克服短水力停留时间和高流速、强冲刷风险所带来的不利影响。

3.3 丘陵地区生态沟渠磷消纳能力及优化对策建议

南京汤山野外生态沟渠（平均坡度约7°，水力停留时间约0.11 h）的实验结果证实，即使在具有一显著自然坡度的真实丘陵环境中，经过一定生态化改造的沟渠依然能够发挥其磷污染削减作用，实现了18.06%的TP去除率，50 m沟渠的TP去除负荷达29.81 g·d^{-1}。这一实际去除效果低于模拟实验中0°和6°坡度生态沟渠的磷去除效率，通过对比模拟沟渠实验，模拟沟渠与野外沟渠存在一定差异，模拟沟渠的

植被覆盖度(约70%)高于野外沟渠(约50%),有研究表明,植物吸收是生态沟渠系统磷去除的主要途径(占比达55.4%),其次为基质和土壤的吸附作用[6]。尽管存在上述差异,模拟与野外结果均证实了植被覆盖对磷去除率的重要影响。考虑到野外条件的复杂性,以及沟渠建设和运行状态可能与理想化的模拟装置存在差异,这一现场实测的去除效果仍然具有重要的环境实际意义[28]。野外数据为丘陵生态沟渠的实际应用效用提供了直接证据。

结合模拟和野外实验结果,丘陵地区生态沟渠磷消纳主要面临以下挑战:沟渠内水流的短水力停留时间与高流速是坡度带来的最直接影响,这极大地限制了各种净化过程的反应时间和效率[29];水流冲刷影响生态沟渠系统稳定性,陡坡上的沟渠在强降雨时更容易受到洪水的冲击,可能导致基质流失、植物被冲毁,甚至沟体结构损坏,从而导致净化系统失效或寿命缩短;维护管理难度增加,坡地作业不如平地便捷,这可能影响到植物的适时收割、堵塞基质的清理与更换等必要的维护管理措施的有效实施。

为了有效提升丘陵地区生态沟渠的磷消纳能力和长期运行稳定性,应采取因地制宜、具有针对性的设计、建造和管理策略:

(1)水力调控与结构优化。在沟渠内部设置一系列小型堰坎、跌水结构或粗糙石块排列,可形成阶梯式跌水或串联的浅滩-深潭结构,延长水流路径并增加沟床糙率系数,从而有效降低实际流速、延长水力停留时间,并促进局部区域悬浮物的沉降。构建迂回型流路,将原本笔直的沟渠适度改造为弯曲形态,通过增加水流的迂回程度和流程长度,可显著延长水体在净化系统中的总水力停留时间,进而提升净化效率[30]。有研究表明,设置堰坎等可使水力停留时间增加1~5倍,同时提升COD、NH_4^+-N、TN、TP等的去除率[31-32]。

(2)基质选择、配置与强化。选择抗冲刷能力强的基质材料,例如粒径较大、密度较高的矿石,考虑基质的分层配置,底层使用较重、支撑性好的材料,表层使用吸附性能高的材料,采用格栅或其他结构固定基质,防止被水流冲走[33]。

(3)植物筛选与配置。选择根系发达、固土能力强、耐水淹和冲刷,且磷吸收能力强的本地水生植物,例如芦苇、香蒲、茭白等,合理配置植物密度和群落结构,既能有效吸收磷,又能起到良好的消能和稳定沟床的作用[34]。

(4)与流域管理措施结合。生态沟渠应作为丘陵地区水土保持和面源污染控制综合体系的一个重要环节,其上游区域应积极推广等高耕作、梯田建设、保护性耕作、植被缓冲带布设等水土保持措施,这些措施能从源头上有效减少进入沟渠的径流量、土壤流失量和污染物初始负荷,从而显著减轻生态沟渠的处理压力,提高其净化效果和保障其长期稳定运行[35]。

本研究的模拟实验虽然控制了坡度,但难以完全模拟丘陵地区复杂的降雨径流过程,此外,实验周期相对较短,未能全面反映植物生长周期和季节变化对磷去除的影响。未来的研究应考虑开展更长期的原位监测,选择更多具有代表性的不同坡度梯度和水文地质条件的地点,并深入探究不同降雨强度对丘陵生态沟渠磷消纳动态过程与影响机制。

4 结论

(1)沟渠系统对磷的消纳主要通过底泥的吸附和沉降作用实现,磷在底泥中主要以活性较高的形态(如$NaHCO_3$-P和NaOH-P)累积。

(2)生态沟渠在不同坡度条件下对水体中TP、DTP和PP的去除效果均优于常规沟渠。然而,与0°坡度相比,6°坡度条件显著降低了生态沟渠的磷消纳能力,TP去除率下降了约15.34%。这表明相对于平原地区,丘陵地区的坡度是限制生态沟渠磷消纳性能的一个关键环境因素。

(3)丘陵地区生态沟渠具有实际的磷削减潜力。在南京汤山丘陵地区的生态沟渠中,50 m长的沟渠对TP实现了18.06%的去除率,TP去除负荷达29.81 $g\cdot d^{-1}$,这证实了在存在显著坡度的真实丘陵环境中,经过合理设计的生态沟渠仍能有效拦截和削减农田排水中的磷负荷,这对控制区域水体富营养化具有积极的实际应用价值。

参考文献:

[1] DAL FERRO N, IBRAHIM H M S, BORIN M. Newly-established free water-surface constructed wetland to treat agricultural waters in the low-lying Venetian plain: performance on nitrogen and phosphorus removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 852-859.

[2] JIN J Y, TIAN X, LIU G L, et al. Novel ecological ditch system for nutrient removal from farmland drainage in plain area: performance and mechanism[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115638.

[3] 李可芳, 黄霞. 磷肥的使用与农业面源污染[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(增刊1): 189-190. LI K F, HUANG X. Application of phosphate fertilizer and agricultural non-point source pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 27(Suppl 1): 189-190.

[4] 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. WANG D, LI H F, LIU F, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1717-1723.

[5] 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. ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4516-4522.

[6] LIU F, WANG Y, XIAO R L, et al. Influence of substrates on nutrient removal performance of organic channel barriers in drainage ditches[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:380-386.

[7] XIONG Y J, PENG S Z, LUO Y F, et al. A paddy eco-ditch and wetland system to reduce non-point source pollution from rice-based production system while maintaining water use efficiency[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(6):4406-4417.

[8] 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. LIU F X, CHEN G F, FU Z S, et al. Comparison on effects of practical application of ecological ditches with different construction in treating agricultural non-point pollutants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6):787-794.

[9] NSENGA KUMWIMBA M, MENG F G, ISEYEMI O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): design, mechanism, management strategies, and future directions[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639:742-759.

[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 Y, WANG J G, LI W, et al. Comparison on removal of nitrogen and phosphorus form hibernal farmland drainage by three kinds of ditches[J]. *Soils*, 2009, 41(6):902-906.

[11] 张雨晴, 段婧婧, 侯勇, 等. 沟塘系统对面源污染物的工程拦截效果评估[J/OL]. 农业环境科学学报. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20241209.0828.002. ZHANG Y Q, DUAN J J, HOU Y, et al. Research on the engineering interception effectiveness of Gou Tang systems for non-pointsource pollutants[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*. https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20241209.0828.002.

[12] WANG Y W, CHEN L, ZHU K H, et al. Ditches and ponds can be the sources or sinks of non-point source pollution: observations in an upland area in the Jinglinxi catchment, China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10(4):607-626.

[13] 佟德利, 李梦琦, 王海翔, 等. 流速对沟渠磷消纳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1):117-125. TONG D L, LI M Q, WANG H X, et al. Effects of flow rate on phosphorus absorption in ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(1):117-125.

[14] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5):970-976.

[15] 秦沂樟, 白静, 赵健, 等. 生态沟渠磷拦截效应对不同因子的响应特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊1):122-130. QIN Y Z, BAI J, ZHAO J, et al. Response characteristics of phosphorus interception effects to different factors in ecological ditches[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(Suppl 1):122-130.

[16] VYMAZAL J, BŘEZINOVÁ T D. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 118:97-103.

[17] WU X, WU H, YE J Y. Purification effects of two eco-ditch systems on Chinese soft-shelled turtle greenhouse culture wastewater pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21(8):5610-5618.

[18] HUAI W X, ZHANG J, KATUL G G, et al. The structure of turbulent flow through submerged flexible vegetation[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(2):274-292.

[19] 张旭琳, 张梓涵, 尹高飞, 等. 农田氮磷流失与沟渠输移转化过程及影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(10):1278-1286. ZHANG X L, ZHANG Z H, YIN G F, et al. The process and factors of nitrogen and phosphorus loss from farmland and transport in ditch[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(10):1278-1286.

[20] AHLAWAT O P, YADAV D, WALIA N, et al. Root exudates and their significance in abiotic stress amelioration in plants: a review[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2024, 43(6):1736-1761.

[21] 宋振阳, 孙志高, 师自香, 等. 外源氮输入对闽江河口芦苇湿地土壤磷形态赋存特征的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(14):5902-5915. SONG Z Y, SUN Z G, SHI Z X, et al. Effects of exogenous nitrogen enrichment on distribution of phosphorus fractions in soils of *Phragmites australis* marsh in the Min River estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(14):5902-5915.

[22] 侯著霞, 郑晨, 朱宇. 水生植物修复污染水体研究现状及展望[J]. 绿色科技, 2024, 26(6):153-158. HOU Z X, ZHENG C, ZHU Y. Current research status and future prospects of aquatic plant remediation of polluted waters[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2024, 26(6):153-158.

[23] MA L, YANG L L, LIU W, et al. Environmental factors and microbial communities jointly regulate biological dephosphorization process in pond-ditch circulation systems (PDCSs) for rural wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758:143629.

[24] 张治宏, 杨诗卡, 韩超, 等. 环境胁迫对水生植物根系分泌小分子量有机酸(LMWOAs)的影响特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2):462-471. ZHANG Z H, YANG S K, HAN C, et al. Effects of environmental stress on characteristics of low molecular weight organic acids secreted by macrophyte roots[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2):462-471.

[25] CHIOU T J, LIN S. Signaling network in sensing phosphate availability in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62:185-206.

[26] BORNETTE G, PUIJALON S. Response of aquatic plants to abiotic factors:a review[J]. *Aquatic Sciences*, 2011, 73(1):1-14.

[27] DING Y, WANG H, ZHANG Q, et al. Effects of dissolved oxygen on phosphorus transformation in reservoir sediments: novel insights on bacterial community and functional genes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(7):2094-2104.

[28] 潘吴意, 张迎颖, 张志勇, 等. 生态沟渠对太湖流域稻田径流的净化效能及其配置规模[J/OL]. 农业环境科学学报, https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250407.1357.002. PAN W Y, ZHANG Y Y, ZHANG Z Y, et al. Purification efficiency and allocation scale of ecological ditches for pollutants from paddy field runoff inTaihu Lake basin[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250407.1357.002.

[29] 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 等. 生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染[J]. 环境科学, 2022, 43(6):3160-3167. SHI L, YANG X L, WU Q Y, et al. Combination of ecological ditch and bioretention pond to control rural runoff pollution[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3160-3167.

[30] 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. XUE L H, DUAN J J, YANG L Z. Ecological transformation technology and related standards of farmland irrigation and drainage system in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(1):81-86.

[31] LEE H J, PARK H K, CHEON S U. Effects of weir construction on phytoplankton assemblages and water quality in a large river system [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11):2348.

[32] 李海彩, 邵庆军, 杨珍, 等. 五级跌水复氧式沟渠处理污水性能改进研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12):232-236. LI H C, SHAO Q J, YANG Z, et al. Performance improvement of sewage treatment based on five - stage water - dropping aeration ditch[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(12):232-236.

[33] WANG X L, LI J S, LI S M, et al. A study on removing nitrogen from paddy field rainfall runoff by an ecological ditch-zeolite barrier system[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(35):27090-27103.

[34] 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. ZHANG Y Y, LI M, PAN W Y, et al. Purification efficiency of pollutants in farmland runoff by the ecological ditch and its configuration scale[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(1):105-116.

[35] BAI J, QIN Y Z, ZHAO J, et al. Investigation of agricultural nutrient removal by ecological ditches using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 380:109401.

(责任编辑:宋潇)