

## 基于植物-基质协同作用的模拟生态沟渠对农田面源污染的削减

涂欣, 李娟英, 陈以芹

引用本文:

涂欣, 李娟英, 陈以芹. 基于植物-基质协同作用的模拟生态沟渠对农田面源污染的削减[J]. *农业环境科学学报*, 2026, 415(1): 179-188.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0284>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

*农业环境科学学报*. 2020, 39(10): 2397-2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

#### 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>

#### 农田汇水河道水生植物原位净化工程处理效果分析

张迎颖, 闻学政, 姚一丹, 杨非, 王岩, 刘海琴, 张志勇

*农业环境科学学报*. 2019, 38(7): 1607-1615 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1429>

#### 不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

*农业环境科学学报*. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

#### 氮负荷升高对苦草(*Vallisneria spiralis*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)生长的影响

李启升, 胡忠军, 李永吉, 何虎, 韩燕青, 靳辉, 李宽意

*农业环境科学学报*. 2019, 38(7): 1589-1596 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1599>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

涂欣, 李娟英, 陈以芹. 基于植物-基质协同作用的模拟生态沟渠对农田面源污染的削减[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 179–188.

TU X, LI J Y, CHEN Y Q. Reduction of agricultural non-point source pollution by simulated ecological ditches based on the synergistic effect of plants and substrates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 179–188.



开放科学 OSID

# 基于植物-基质协同作用的模拟生态沟渠对农田面源污染的削减

涂欣<sup>1</sup>, 李娟英<sup>1,2</sup>, 陈以芹<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海河湖生物链构建与资源化利用工程技术研究中心, 上海 201702)

**摘要:**为了探讨不同植物组合在模拟生态沟渠中的协同作用,解析植物、基质和微生物对污染物去除的贡献机制,本研究通过实验筛选出再力花与苦草作为优势植物组合,结合沸石和牡蛎壳基质构建模拟生态沟渠系统,采用质量平衡分析,量化不同去除途径的贡献。结果表明:植物筛选实验中再力花与苦草组合在总氮、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和总磷的去除中表现最佳,去除率分别达68.8%、97.4%和97.1%,该组合显著提高了硝态氮的去除效率;动态实验(水力停留时间为6 d)中模拟生态沟渠对总氮、总磷、三唑磷和毒死蜱的去除率分别达到88.1%、73.7%、99.9%和99.9%,总氮的去除中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除贡献最大,其占总氮去除量的71.8%。污染物去除机制分析表明,生态沟渠系统中磷的去除主要通过植物吸收(55.4%)实现,基质(33.4%)与土壤吸附(11.0%)次之。再力花依靠较大的生物量对磷的绝对去除量高于苦草,而苦草则因更高的根系表面积与相对生长速率,在单位生物量磷去除效率上表现出更高的效率。毒死蜱和三唑磷的去除以生物降解与水解作用为主,毒死蜱因较强的疏水性更易被基质吸附和微生物降解,三唑磷则更倾向于水解途径。

**关键词:**稻田面源污染;植物组合;基质组合;生态沟渠;脱氮除磷;有机磷农药

中图分类号:X71;X52;X17 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2026)01-0179-10 doi:10.11654/jaes.2025-0284

## Reduction of agricultural non-point source pollution by simulated ecological ditches based on the synergistic effect of plants and substrates

TU Xin<sup>1</sup>, LI Juanying<sup>1,2</sup>, CHEN Yiqin<sup>1\*</sup>

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China. 2. Shanghai Engineering Research Center of River and Lake Biochain Construction and Resource Utilization, Shanghai 201702, China)

**Abstract:** To explore the synergistic effects of different plant combinations in constructed ecological ditches and quantitatively elucidate the mechanisms by which plants, substrates, and microorganisms contribute to pollutant removal, this study identified *Thalia dealbata* and *Vallisneria natans* as the optimal plant combination through experimental screening. Zeolite and oyster shell substrates were integrated into the constructed ecological ditch system, and a mass balance analysis was employed to quantify the contributions of various removal pathways. The results indicated that in the plant screening experiment, the combination of *Thalia dealbata* and *Vallisneria natans* achieved optimal removal efficiencies for total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), and total phosphorus (TP), with removal rates reaching 68.8%, 97.4%, and 97.1%, respectively. This plant combination significantly enhanced denitrification, thus improving the removal

收稿日期:2025-03-25 录用日期:2025-05-16

作者简介:涂欣(1996—),女,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为农业面源污染治理。E-mail:t1742983606@163.com

\*通信作者:陈以芹 E-mail:yqchen@shou.edu.cn

基金项目:上海市农业科技创新项目(12024003)

Project supported:Shanghai Agricultural Science and Technology Innovation Project(12024003)

efficiency of nitrate nitrogen. Furthermore, in the dynamic experiment (hydraulic retention time=6 d), the constructed ecological ditch system exhibited removal rates of 88.1%, 73.7%, 99.9%, and 99.9% for TN, TP, triazophos, and chlorpyrifos, respectively. Among these,  $\text{NH}_4\text{-N}$  removal contributed most substantially to TN removal, accounting for 71.8% of total nitrogen reduction. Mechanistic analysis of pollutant removal revealed that phosphorus removal within the ecological ditch system was primarily achieved through plant uptake (55.4%), followed by substrate (33.4%) and soil adsorption (11.0%). *Thalia dealbata* exhibited a higher absolute phosphorus removal capacity due to its larger biomass, whereas *Vallisneria natans* demonstrated higher phosphorus removal efficiency per unit biomass, owing to its greater root surface area and relative growth rate. The removal of chlorpyrifos and triazophos primarily occurred through biodegradation and hydrolysis. Due to its strong hydrophobic properties, chlorpyrifos was more readily adsorbed onto substrates and degraded by microorganisms, while triazophos predominantly underwent hydrolysis.

**Keywords:** non-point source pollution of paddy field; plant combination; substrate combination; ecological ditch; nitrogen and phosphorus removal; organophosphorus pesticides

农业面源污染已逐渐取代点源污染成为河流、湖泊等地表水体污染的主要来源。据第二次全国污染源普查公报统计,农田径流污染的总氮和总磷排放量分别高达71.95万t和7.62万t。作为农业大国,我国耕地面积占国土总面积的13.3%,其中水田面积占比达到24.5%,水田的氮、磷流失负荷显著高于旱地,研究表明,六大稻区全氮和全磷径流损失量范围分别在 $5.09\sim 21.32\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.70\sim 3.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [1-2]。因此,研究针对水稻田排水污染的控制措施,是解决水体富营养化和农业可持续发展的关键。

生态沟渠技术作为一种高效且经济的农业面源污染控制措施,展现出广阔的应用前景。目前,关于生态沟渠中水生植物的研究主要集中于单一水生植物[3-4]及同一类型的不同植物组合(如挺水+挺水植物[5]、沉水+沉水植物组合[6])对污染物去除效果的对比分析。然而,对于不同类型的植物组合(如挺水+沉水植物)的净化效能研究仍相对匮乏。选择植株大小差异明显的不同类型植物进行组合配置,既能够实现空间上的互补,不影响水下光照条件,又能丰富物种多样性。因此,深入探究不同类型水生植物组合的净化效果具有重要的科学意义和实践价值。此外,关于生态沟渠中氮磷污染物拦截效果的研究较多,耦合农田中常用农药的复合污染物归趋的研究较少。我国作为全球最大的化肥和农药生产消费国,2024年单位面积农药使用量达到世界平均水平的2.5倍[7]。农药在环境中的残留和累积可能对生态系统和人类健康构成潜在风险。其中有机磷农药作为高效广谱杀虫剂广泛用于农作物的虫害防治,且部分有机磷农药(如三唑磷和毒死蜱)有较长的环境半衰期,能够在稻田及其周围环境中检出[8-9],对稻田周围水环境有

较大影响。

因此,探索生态沟渠对氮磷和有机磷农药的协同去除机制,对于农业面源污染治理及水体生态安全具有重要意义。本研究通过水生植物组合实验优选生态沟渠内的水生植物配置,并在室内搭建模拟生态沟渠,研究了夏季稻田排水峰值下生态沟渠对污染物的拦截效果。同时,采用质量平衡方法系统揭示了污染物在生态沟渠内的迁移与归趋。研究旨在通过优化生态沟渠的配置,提高其对污染物的拦截效果,并定量分析沟渠各组成部分(如植物、基质、土壤等)对污染物去除的贡献。研究结果将为深入理解生态沟渠在污染控制中的作用机制提供科学依据,并为构建高效、稳定的生态沟渠系统提供理论支持,助力实现农田排水的可持续管理和水环境的长期保护。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

水生植物:本研究选取上海地区常见的挺水植物[美人蕉(*Canna indica*)、再力花(*Thalia dealbata*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)]和沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)作为生态沟渠植物备选对象。美人蕉、再力花和黄菖蒲均具有观赏价值高、生命力强、生态功能良好等特点。苦草具有较强的生态修复能力和环境适应性。水生植物购自丰沃源生态环境科技有限公司。实验开始前,所有植物先在清水中培养7d至根系生长良好,随后转入Hoagland营养液继续培养7d。选择生长良好、株高相近且生物量相似的植株用于实验。

基质:天然斜发沸石和牡蛎壳分别购自河南广汇水处理材料有限公司和阳西县聚鑫蚝壳厂。基质使

用前用清水冲洗,去除表面的粉尘和泥沙,随后置于烘箱烘干至恒质量,装入预先准备好的尼龙网袋中备用。

**土壤:**土样采自上海临港滴水湖周边稻田。土壤捣碎、去除其中的植物根系及石块后备用。土壤的pH值为 $7.65 \pm 0.22$ ,含水率为 $33.58\% \pm 2.11\%$ ,密度为 $(1.33 \pm 0.04) \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ,溶解性有机碳含量为 $(18.79 \pm 0.34) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

**实验用水:**本研究采用人工配制的模拟稻田径流排水作为实验用水,其主要成分包括尿素、磷酸氢二钾、氯化铵、硝酸钾及有机磷农药乳油。常规污染物浓度的确定基于对相关文献的查阅,选取实际稻田排水中非极端情况下的普遍浓度。农药选择毒死蜱和三唑磷这两种有机磷杀虫剂,其浓度设定为略高于稻田环境中所监测到的最高值 $(0.607 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})^{[10]}$ 。模拟稻田径流排水的各成分浓度如下:总氮为 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,硝酸盐氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )为 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总磷为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,三唑磷为 $837 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,毒死蜱为 $814 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## 1.2 水生植物筛选

植物筛选实验在直径20 cm、高60 cm的圆柱形透明玻璃缸中进行。开始前向容器中加入约30 cm深的富营养化废水(采用稀释15倍的霍格兰营养液配制),将预处理过的挺水植物和沉水植物放入容器中,并用玻璃珠固定。用蒸馏水弥补实验过程中蒸发及植物蒸腾所消耗的水分并维持水位不变。实验期

间光强为6 463 lx,光暗比为12 h:12 h。实验前期每天进行采样分析,待污染物浓度变化趋于稳定时,改为每2 d采集一次水样,并测定水样中总氮、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、总磷和高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )的含量。实验设置1个空白对照组和3个实验组(美人蕉+苦草、再力花+苦草、黄菖蒲+苦草),实验组植物生物量均为120 g(鲜质量),生物密度为 $3 818 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,实验组和对对照组分别设置3个平行。

## 1.3 生态沟渠模拟实验

模拟沟渠装置为玻璃缸,具体参数如图1所示。土壤添加量约为46.8 kg(干质量),沸石和牡蛎壳的添加量分别为3.50 kg和230 g。沟渠中共种植12株再力花(每株约25.0 g)和12株苦草(每株约2.50 g),总生物量为330 g。实验光照强度6 463 lx,光暗周期为12 h:12 h。

模拟实验为动态连续进水,采用人工配制的模拟稻田径流排水作为实验用水。实验温度控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,水力停留时间设置为6 d,总实验周期为24 d。实验期间,每天取样分析进出水中总氮、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )和总磷的浓度。实验第0、3、6、9、12、15、18、21、24天,取水样测定有机磷农药(三唑磷和毒死蜱)的浓度。在实验开始前及实验结束后,分别采集土壤、基质和植物样品,测定其中磷及有机磷农药的含量,以进一步评估实验系统中污染物的迁移、转化与拦截效果。实验设置1个空白对照组(水+

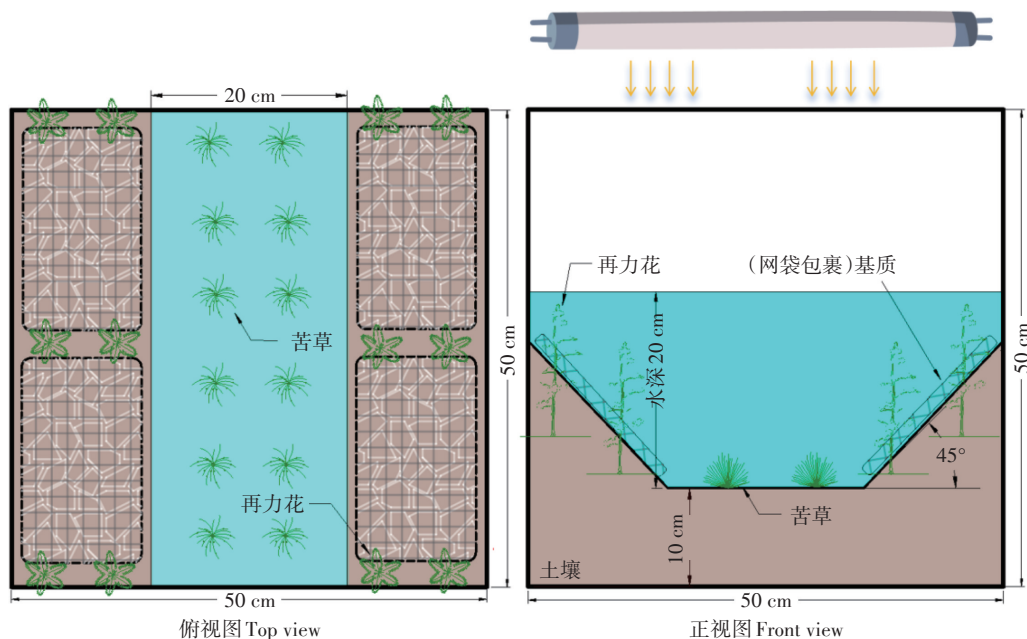


图1 实验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the experimental setup

土壤)和2个平行实验组(水+土壤+基质+植物)。此外,取等量模拟稻田径流排水置于透明的玻璃采样瓶中,设置3种条件:①遮光+密闭;②光照+密闭;③光照+敞口。在模拟生态沟渠实验相同环境条件下放置一个水力停留时间后测定其中有机磷农药含量,通过前后浓度差值计算有机磷农药水解、光解和挥发的量。

#### 1.4 样品预处理及分析方法

有机磷农药的测定方法参考本实验室之前建立的方法<sup>[11]</sup>。水样经0.45 μm滤膜过滤后进行固相萃取,依次活化和洗脱;沉积物、基质和植物样品采用微波萃取,氮吹浓缩;生物样品用ENVI-Carb™/LC-NH<sub>2</sub>小柱净化,其余样品用自填净化柱净化,洗脱后氮吹浓缩并定容待测。

总氮、总磷、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、高锰酸盐指数、植物总磷和土壤基质总磷的测定均采用国标中的方法。

#### 1.5 数据处理与计算

污染物在生态沟渠内的迁移和转化过程通过质量平衡计算并分析。质量平衡公式如下:

$$m_{in} = m_{out} + \Delta m_{plant} + \Delta m_{substrate} + \Delta m_{soil} + m_{loss}$$

$$m_{loss} = m_{photolysis} + m_{hydrolysis} + m_{volatilization} + m_{microbe}$$

式中: $m_{in}$ 和 $m_{out}$ 分别为通过进出水输入和输出生态沟渠的污染物的总量,mg; $\Delta m_{plant}$ 、 $\Delta m_{substrate}$ 和 $\Delta m_{soil}$ 分别为植物、基质和土壤中污染物的变化量,mg; $m_{loss}$ 为污染物在系统内发生转化而产生的质量损失量,mg。由于磷在生态沟渠内仅发生迁移并未发生转化,故磷的 $m_{loss}$ 为0; $m_{photolysis}$ 、 $m_{hydrolysis}$ 、 $m_{volatilization}$ 和 $m_{microbe}$ 分别为有机磷农药因光解作用、水解作用、挥发作用和微生物作用而产生的质量损失量,mg。

所有实验数据均使用SPSS 26.0软件进行统计分析,两组差异性分析采用 $t$ 检验方法,多组差异性分析采用单因素ANOVA方法,并用沃勒-邓肯方法进行事后两两对比检验;绘图采用GraphPad prism和Origin软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植物组合筛选

与空白对照组相比,自实验第12天起,3种植物组合对NH<sub>4</sub>-N、总氮和总磷的去除效果均表现出显著差异( $P<0.05$ ),且3种植物组合的去除效果排序始终为再力花+苦草>黄菖蒲+苦草>美人蕉+苦草(图2a~图2c)。

实验结束时,再力花+苦草组合对总氮和总磷的去除率分别达到68.8%和97.1%,NH<sub>4</sub>-N浓度由初始的10.0 mg·L<sup>-1</sup>显著下降至0.260 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub>-N去除量占总氮去除量的54.1%,表明NH<sub>4</sub>-N的去除是引起总氮浓度下降的主要原因。这一结果与徐英华等<sup>[12]</sup>的研究结果相符,该研究通过同位素示踪技术发现植物吸收和微生物降解是NH<sub>4</sub>-N去除的主要途径,其贡献占比分别为48.7%和44.4%。此外,本实验初始添加的富营养化废水中氮素仅以NO<sub>3</sub>-N和NH<sub>4</sub>-N形式存在。实验结束时,各植物组合处理中的NH<sub>4</sub>-N浓度均降至0.300 mg·L<sup>-1</sup>以下,且各组合之间无显著差异(图2c)。然而,再力花与苦草组合的出水总氮浓度却显著低于其他组合(图2a),表明该组合能够更有效地促进NO<sub>3</sub>-N的去除,从而进一步提高了对总氮的整体去除效果。

植物对氮磷营养元素的去除能力与其生长状况及生物量的变化密切相关。再力花+苦草组合的生物量在实验结束时达到初始生物量的2.04倍(图2d),显著高于其他植物组合( $P<0.05$ ),体现出更强的生长潜力和生态适应性。综合去除率、去除速率及生物量增加量等指标分析,再力花+苦草组合在本实验条件下表现出最佳的氮磷去除性能。因此,本研究选择再力花+苦草组合作为后续模拟生态沟渠实验的植物,以进一步提升生态沟渠净化效能。

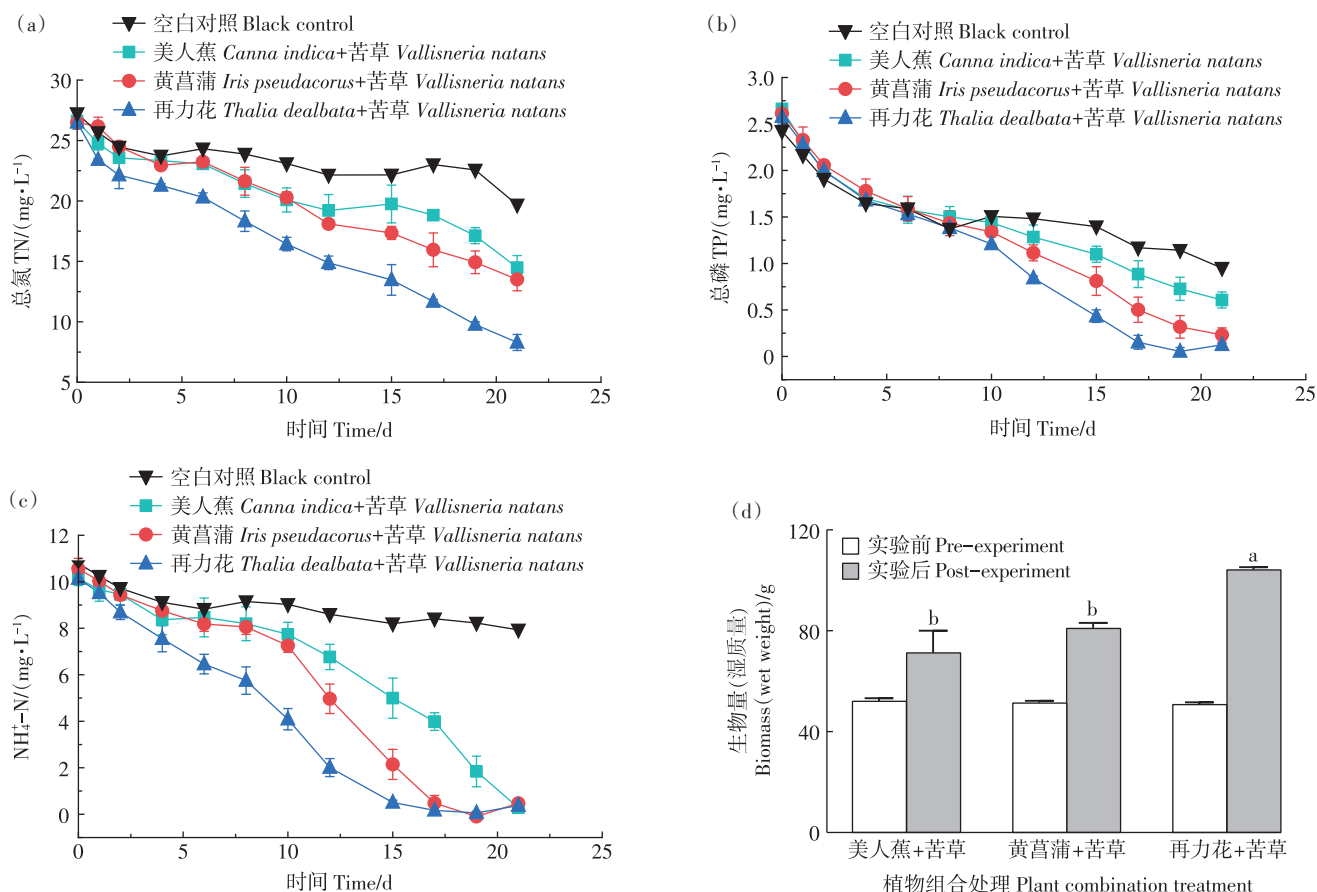
### 2.2 模拟生态沟渠对污染物的去除

#### 2.2.1 总氮的去除

实验期间模拟生态沟渠出水中总氮浓度随时间变化的趋势如图3所示:实验初期(前4 d),总氮浓度迅速从初始的15.0 mg·L<sup>-1</sup>降至7.14 mg·L<sup>-1</sup>,随后下降速率趋缓,并在实验12 d后达到稳定状态(1.79 mg·L<sup>-1</sup>)。整个实验期间的总氮去除率达到88.1%,表明生态沟渠中植物-基质组合系统对总氮具有显著的去除效果( $P<0.05$ )。

实验结束时,实验组的有机氮已完全转化为其他形态的氮,NO<sub>3</sub>-N浓度略有降低,并伴随少量NO<sub>2</sub>-N的产生,这表明系统内发生了明显的氨化、硝化及反硝化作用。同时,NH<sub>4</sub>-N浓度从初始的10.0 mg·L<sup>-1</sup>降至0.510 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub>-N去除量占总氮去除量的71.8%。由此可见,NH<sub>4</sub>-N的去除是总氮浓度下降的关键驱动因素。

NH<sub>4</sub>-N的去除受植物吸收、植物根际氧输送促进的硝化作用,以及基质吸附作用等多因素共同影响。一方面,NH<sub>4</sub>-N作为植物生长所必需的无机氮形态之



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ).

图2 不同植物组合处理下总氮、总磷和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间的变化及实验前后植株生物量变化

Figure 2 Variations in TN, TP, and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations over time and biomass changes of plants before and after experiment under different plant combination treatments

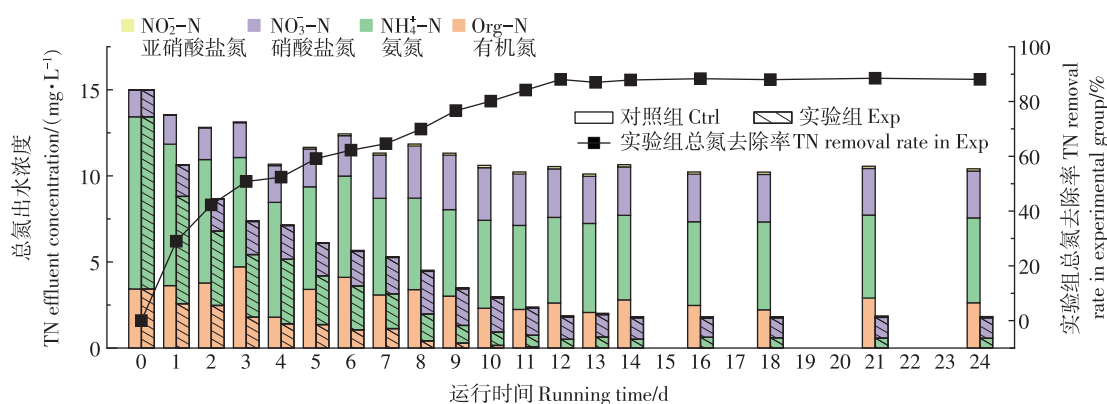


图3 总氮出水浓度及去除率随时间的变化

Figure 3 Variation of TN effluent concentration and removal rate with time

一,可以被植物通过根系中氨基酸转运蛋白(AMT)主动吸收,并将其转化为有机氮(如氨基酸和蛋白质)<sup>[13]</sup>。此外,植物根系可通过通气组织向根际区域输送氧气<sup>[14]</sup>,从而提高根际微环境中的氧供应水平,增强硝化

细菌的活性,加速 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化速率。这一过程可以解释实验中后期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度略有升高的现象,而实验后期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的下降则主要归因于反硝化作用的增强。另一方面,系统底部铺设的

天然斜发沸石[理论最大饱和和吸附量( $Q_m$ )为  $1.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ]可通过物理吸附和离子交换作用去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 也对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的降低起到了重要作用<sup>[15]</sup>。相比之下, 对照组中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在整个实验过程中持续积累, 这主要是由于对照组缺乏植物的存在, 导致根际环境中氧气输送不足, 微生物的硝化-反硝化作用受限。同时, 缺少植物分泌的根系分泌物作为微生物代谢底物, 也进一步削弱了微生物群落的代谢活性, 从而阻碍了氮循环过程, 导致氮素的转化效率明显降低。

### 2.2.2 总磷的去除

如图4所示, 实验期间模拟生态沟渠中总磷浓度随时间的变化趋势表明, 实验组出水总磷浓度显著降低。具体而言, 实验初期(0~5 d)系统表现出较高的总磷去除速率, 随后去除速率逐渐减缓, 并于实验第12天趋于稳定, 出水浓度由初始的  $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $0.263 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率达到73.7%。

生态沟渠系统中磷的去除主要归因于植物吸收与基质吸附的协同效应。植物根系能够主动吸收水体中的磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ ), 并将其转化为植物生长必需的细胞成分[如核酸、磷脂和腺苷三磷酸(ATP)等]<sup>[16]</sup>。另外, 沟渠内基质材料(尤其是牡蛎壳)对磷的直接吸附作用( $Q_m=2.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )也显著增强了系统的磷去除效果。值得注意的是, 尽管系统中沸石基质对磷的直接吸附效能不及牡蛎壳, 但其较大的比表面积( $23 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>为微生物提供了丰富的附着位点, 促进了微生物的定殖和代谢活动<sup>[18]</sup>, 在磷的去除过程中发挥了重要的间接辅助作用。

### 2.2.3 有机磷农药的去除

模拟生态沟渠对三唑磷和毒死蜱两种有机磷农药表现出显著的去除效果(图5)。实验组中, 三唑磷

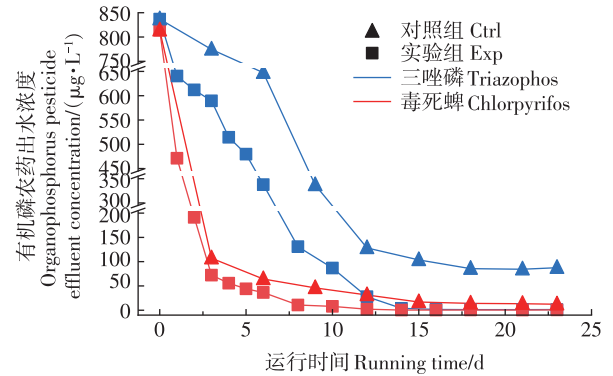


图5 三唑磷和毒死蜱出水浓度随时间的变化

Figure 5 Variation of effluent concentrations of triazophos and chlorpyrifos with time

和毒死蜱的出水浓度分别由初始的  $837 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $814 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $0.330 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.530 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 对应去除率均超过99.9%。相比之下, 对照组出水中两种农药的浓度分别为  $85.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  与  $13.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 实验组的出水浓度分别仅为对照组的0.39%和4.00%, 凸显出植物-基质系统对有机磷农药的高效去除能力。

植物在有机磷农药的去除过程中发挥的作用分为直接与间接两方面。直接作用包括植物对农药的直接吸收、积累及降解作用<sup>[19]</sup>, 但已有研究表明, 由于植物自身的保护机制, 其对有机磷农药的积累能力通常较低, 更主要的贡献体现在对微生物降解环境的优化(间接作用)。

此外, 生态沟渠系统对毒死蜱的去除速率高于三唑磷, 其中毒死蜱的出水浓度在第10天降至  $7.87 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 而三唑磷则在第14天才达到相同水平。这一差异可能与二者的理化特性, 尤其是水溶性和疏水性差异密切相关(表1)。毒死蜱较三唑磷具有更低

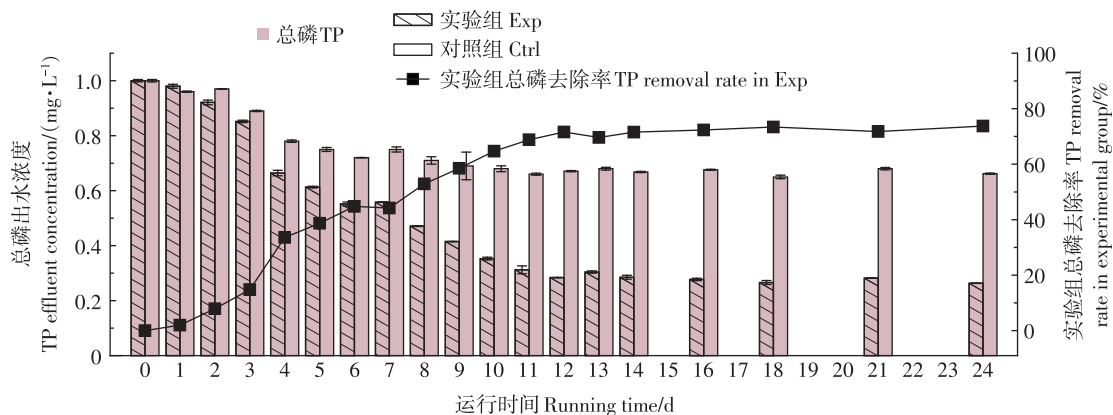


图4 总磷出水浓度及去除率随时间的变化

Figure 4 Variation of TP effluent concentration and removal rate with time

表1 三唑磷和毒死蜱的理化特性

Table 1 Physicochemical properties of triazophos and chlorpyrifos

有机磷农药 Organic phosphorus pesticide	分子式 Molecular formula	官能团 Functional group	水溶性 Solubility (20 °C)/(mg·L <sup>-1</sup> )	lg K <sub>ow</sub>	蒸汽压 Vapor pressure/MPa
三唑磷	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub> PS	P=S, P—O(3)	35.0	3.55	1.33
毒死蜱	C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> Cl <sub>3</sub> NO <sub>3</sub> PS	P=S, P—O(3), —Cl(3)	1.05	4.70	1.43

注:资料来源于农药属性数据库在线(<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/projects/ppdb/index.htm>)。

Note: Data source from pesticide properties database online(<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/projects/ppdb/index.htm>)。

的水溶性、更高的疏水性及更大的辛醇-水分配系数(lg K<sub>ow</sub>),因此其更易通过疏水相互作用吸附于基质和植物根系表面,从而降低了其在水环境中的迁移速率,增加了与生物膜中微生物的接触机会。已有研究表明,附着在基质表面的污染物通常更易被微生物降解。这种吸附-降解的耦合机制有效促进了毒死蜱的降解效率,从而导致其去除速率显著高于水溶性较高、疏水性较弱的三唑磷<sup>[20]</sup>。

相比之下,三唑磷更多地保持在水相中,导致其吸附于基质和植物根系表面的能力明显弱于毒死蜱。因此,三唑磷更难被固定于生态沟渠的固相介质,进而降低了微生物对其的有效降解。针对这一现象,未来可以考虑通过提高基质中有机质含量或引入高效吸附材料(如生物炭、腐植酸改性沸石等),增强基质对高水溶性农药的吸附和固定能力,从而有效提高系统对水溶性较高的三唑磷类农药的去除效率。

### 2.3 生态沟渠内污染物的迁移途径

为深入理解生态沟渠内污染物的去除机制,本研究进一步聚焦磷和有机磷农药在生态沟渠系统中的迁移过程。由于氮在系统内部转化为氮氧化物(如NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>)并逸散至大气,较难进行精确测量,因此本研究重点关注了总磷和有机磷农药。

#### 2.3.1 磷在生态沟渠内的迁移分析

总磷在系统中的拦截途径包括植物吸收、基质吸附和土壤吸附。根据实验数据分析,系统拦截的总磷占输入总量的60.1%,其中植物吸收贡献了33.3%,基质吸附和土壤吸附分别占20.1%和6.60%(图6)。植物吸收是生态沟渠系统中磷去除的主要途径。其中,再力花累积吸收量为40.0 mg,约为苦草(8.42 mg)的5倍(图7a),占系统总磷拦截量的45.6%。尽管再力花表现突出,但其单位生物量的磷吸收量(0.119 mg·g<sup>-1</sup>)仅为苦草(0.233 mg·g<sup>-1</sup>)的一半。这一差异可能与植物生理特征有关<sup>[6,21]</sup>。一般来说,直径小于2 mm

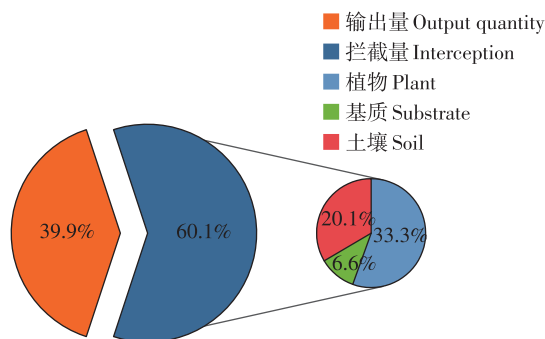


图6 磷在沟渠系统中的迁移归趋

Figure 6 Transport and fate of P in the ditch system

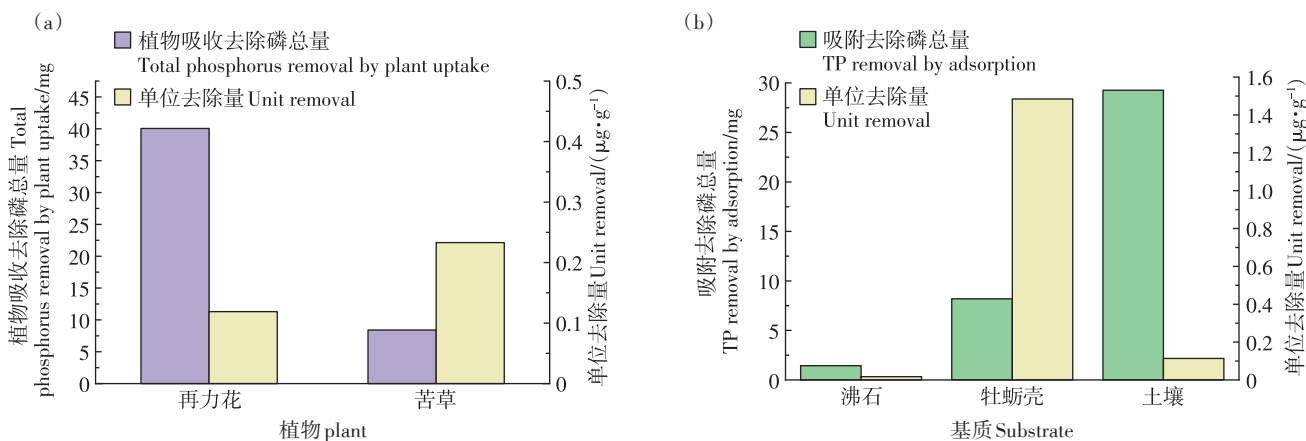


图7 不同植物与基质的去除磷总量及单位去除量

Figure 7 Total and unit phosphorus removal by different plants and substrates

的根系被称为细根,苦草的根系不仅细长,而且具有较高的比根长和根比表面积,这些特征使其能够更有效地获取养分。此外,再力花的相对生长速率为 $0.006\ 10\ \text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,而苦草则表现出更高的相对生长速率( $0.024\ 1\ \text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ),显示出其在磷吸收效率和资源利用方面的优势。苦草不仅能够更有效地将吸收的磷转化为生物量,而且其快速生长能力使其在富营养化水体中展现出更强的生态适应性,因此在磷去除方面具有更大的潜力。

磷的拦截过程中,基质的吸附作用是另一重要去除机制。土壤对磷吸附的贡献最大,吸附总量为 $29.3\ \text{mg}$ (图7b),显著高于牡蛎壳和沸石的磷去除量。这一差异主要归因于土壤的质量远高于沸石和牡蛎壳,使其在去除总量上占据优势。然而,从单位质量的吸附能力来看(图7b)牡蛎壳表现最优,最大吸附量( $Q_{\max}$ )为 $2.00\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,远高于沸石( $Q_{\max}=0.351\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )和土壤( $Q_{\max}=0.208\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ),这与吸附实验的测定数据相符。值得关注的是,土壤中吸附的磷在环境条件(如水体氧化还原状态发生变化、水体pH下降等)中的二次释放是未来生态沟渠应用时应该重点关注的问题。

### 2.3.2 有机磷农药在生态沟渠内的迁移与转化

生态沟渠中有机磷农药的去除主要通过生物降解、水解、光解、挥发以及基质吸附等途径实现(图8)。对于毒死蜱,生物降解是最主要的去除途径,占比达到46.58%,其次是水解,占比为34.93%。这表明生态沟渠中微生物的代谢活动与水解反应在毒死蜱降解过程中起主导作用。相比之下,三唑磷的降解途径则以水解为主(42.08%),微生物降解贡献相对次之(32.47%)。这一差异与二者的水溶性特征密切相关(表1)。三唑磷水溶性相对较高,更易溶解于水体并直接与水分子作用发生水解<sup>[23]</sup>;而毒死蜱因较强的疏

水性更易被基质吸附,使其更频繁地与微生物接触,促进微生物降解过程。因此,两种农药理化性质的差异决定了各自在生态沟渠系统中不同的降解机制及去除途径。

植物富集和基质吸附在三唑磷和毒死蜱的去除过程中均表现出较低的贡献,其中三唑磷分别为0.09%和0.55%,毒死蜱分别为0.07%和0.37%。这可能是由于植物自身具备的生理防护机制,限制了农药在植物组织内的过度积累<sup>[24]</sup>;同时,基质对两种农药的吸附能力也较弱,尤其对水溶性较高的三唑磷吸附效率更低。此外,毒死蜱(4.98%)的挥发贡献高于三唑磷(2.93%),这主要归因于毒死蜱的蒸汽压略高于三唑磷(表1),使其更易挥发进入大气。但整体而言,挥发作用在两种农药的去除过程中所占比例仍然较小。在生态沟渠系统中,微生物降解与水解作用是毒死蜱和三唑磷去除的主导机制,而植物富集、基质吸附和挥发仅起辅助作用<sup>[25]</sup>。

生物降解在生态沟渠系统有机磷农药的去除过程中发挥了关键作用,这一过程主要得益于植物与微生物之间的协同作用。首先,植物根系能够分泌多种营养物质,如糖类、氨基酸和有机酸等,为根际微生物提供充足的碳源与能量;同时植物根系的泌氧作用显著改善了根际环境的氧化还原条件,进一步提升了好氧微生物的代谢活性<sup>[26]</sup>。其次,微生物在有机磷农药的降解过程中发挥关键作用,其通过分泌磷酸酯酶、水解酶等,能够有效裂解农药的P—O和P—S键,将其转化为低毒的中间代谢产物<sup>[27]</sup>。此外,微生物还可利用农药作为碳源或磷源,通过共代谢或矿化作用将有机磷农药彻底转化为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ,从而实现完全的降解<sup>[28]</sup>。综上所述,植物、基质与微生物之间的协同作用,共同驱动了生态沟渠系统中有机磷农药的高效去除。

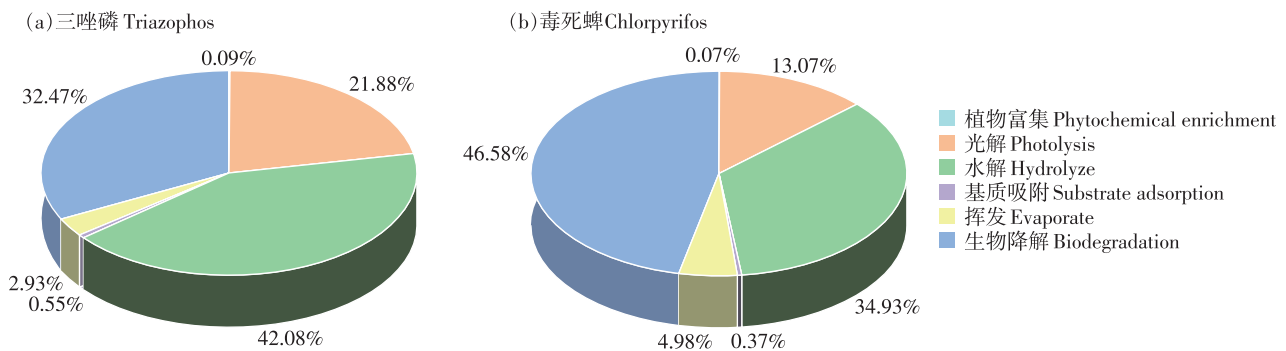


图8 生态沟渠系统中不同农药的去除途径贡献

Figure 8 Contribution of removal pathways for different pesticides in ecological ditch systems

### 3 结论

(1)挺水植物(美人蕉、黄菖蒲和再力花)与苦草组成的植物组合对稻田排水污染物均具有显著的去除效果。其中,再力花与苦草组合表现最佳,对总氮、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和总磷的去除率分别达到68.8%、97.4%和97.1%。

(2)在上述最佳植物组合的基础上,进一步结合沸石和牡蛎壳作为基质构建的优化生态沟渠,对总氮、总磷、三唑磷和毒死蜱的去除率分别高达88.1%、73.7%、99.9%和99.9%。其中, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除对总氮浓度降低贡献最大,占总氮去除量的71.8%。

(3)模拟生态沟渠中磷的去除机制以植物吸收为主,占比达55.4%,其次为基质和土壤的吸附作用;有机磷农药的去除主要依靠生物降解作用,其中三唑磷和毒死蜱的生物降解贡献率分别为32.47%和46.58%。

#### 参考文献:

- [1] 赵杨, 赵心清. 生物对逆境环境的适应和抗逆分子育种[J]. 生物技术通报, 2023, 39(11): 1-5. ZHAO Y, ZHAO X Q. Adaptation of organisms to stress environments and molecular breeding for stress resistance[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(11): 1-5.
- [2] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3292-3302. ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Research progress on nitrogen and phosphorus loss from paddy fields in China and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3292-3302.
- [3] 洪瑜, 何紫琪, 方晰, 等. 12种水生植物对农田退水氮磷的去除效果[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(10): 105-115. HONG Y, HE Z Q, FANG X, et al. The removal effect of 12 aquatic plants on nitrogen and phosphorus in the return flow of farmland[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(10): 105-115.
- [4] 张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 等. 29种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 392-402. ZHANG Q N, CHEN Y H, YANG H R, et al. Study on the purification ability of 29 aquatic plants to rural domestic sewage[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 392-402.
- [5] 李纯洁. 常见水生植物对城市河道水质净化影响试验研究[J]. 水资源开发与管理, 2020, 6(9): 28-33. LI C J. Experimental study on purification of urban river water by common aquatic plants[J]. *Water Resources Development and Management*, 2020, 6(9): 28-33.
- [6] 邢春玉, 胡馨月, 李景. 不同水生植物组合对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(21): 10-12. XING C Y, HU X Y, LI J. Effects of different aquatic plant combinations on nitrogen and phosphorus removal in eutrophic water bodies[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(21): 10-12.
- [7] 高树琴, 胡兆民, 王竑晟, 等. 智慧农业助力粮食生产节本增产增效的“九步法”[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(1): 198-209. GAO S Q, HU Z M, WANG H S, et al. Nine-step method of smart agriculture assisting cost reduction, yield increase and efficiency improvement in grain production[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(1): 198-209.
- [8] 付岩. 典型农药在稻田及周围水环境中对微生物群落的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. FU Y. Effects of typical pesticides on microbial community diversity in paddy ecosystems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] 马新生. 三唑磷在水稻及其环境中的分布、迁移与残留[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. MA X S. Distribution, migration and residue of triazophos in rice and paddy environment media[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [10] 赵华, 徐浩, 叶兴祥. 甲胺磷和三唑磷在稻田中的降解迁移及吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 284-288. ZHAO H, XU H, YE X X. Degradation, movement and adsorption of methamidophos and triazophos in paddy field system[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2): 284-288.
- [11] 徐佳艳. 池塘养殖水产品体内农药和多溴联苯醚残留及基于固相萃取技术的预测研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018. XU J Y. Study on residues of pesticides and polybrominated diphenyl ethers in pond aquaculture products and prediction based on solid phase microextraction[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [12] 徐英华, 李希, 谢陈, 等. 基于 $^{15}\text{N}$ 稳定同位素示踪技术的植物组合湿地对氨氮去除途径研究[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(7): 933-942. XU Y H, LI X, XIE C, et al. Nitrogen removal pathways in plant combination wetlands based on  $^{15}\text{N}$  stable isotope tracer technique[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(7): 933-942.
- [13] 姚珊, 张璇凌, 蔡雨欣, 等. 分光光度法对白洋淀各形态氮磷分布特征及源解析的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1306-1312. YAO S, ZHANG X L, CAI Y X, et al. Study on distribution characteristics of different nitrogen and phosphorus fractions by spectrophotometry in Baiyangdian Lake and source analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(4): 1306-1312.
- [14] 陈琳, 李晨光, 单欣, 等. 水生态修复植物生物活性评价与应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(11): 159-166. CHEN L, LI C G, SHAN X, et al. Evaluation and application of the bioactivity of aquatic plant in water purification and ecological restoration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(11): 159-166.
- [15] 何强, 陈博文, 杨雨静, 等. 3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1577-1585. HE Q, CHEN B W, YANG Y J, et al. Absorption of ammonium by three substrates materials in constructed wetland system[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1577-1585.
- [16] PENN C, CHAGAS I, KLIMESKI A, et al. A review of phosphorus removal structures; how to assess and compare their performance[J]. *Water*, 2017, 9(8): 583.
- [17] 郭慧东. 天然沸石的碱处理与污染物处理效能及其机制[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021. GUO H D. Alkali treatment and contamination removal efficiency of natural zeolite and their

- mechanisms[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [18] 严依. 水培蔬菜型生态沟渠对稻田退水的净化研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023. YAN Y. Study on the purification of paddy field backwater by hydroponic vegetable type ecological ditches[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [19] TANG X Y, YANG Y, TAO R, et al. Fate of mixed pesticides in an integrated recirculating constructed wetland (IRCW)[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 935–942.
- [20] ELSAESSER D, BLANKENBERG A B, GEIST A, et al. Assessing the influence of vegetation on reduction of pesticide concentration in experimental surface flow constructed wetlands: application of the toxic units approach[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 955–962.
- [21] 张敏, 郭彬, 傅庆林, 等. 高效去除水体中氮、磷的植物及组合植物研究[J]. *浙江农业学报*, 2011, 23(6): 1210–1215. ZHANG M, GUO B, FU Q L, et al. Screening of hydrophyte plant species with high uptake of N and P potential for remediation of polluted water[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(6): 1210–1215.
- [22] 万正芬, 张学庆, 卢少勇. 19种人工湿地填料对磷吸附解吸效果研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(4): 35–39. WAN Z F, ZHANG X Q, LU S Y. The adsorption and desorption of phosphorus by nineteen constructed wetland substrates[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(4): 35–39.
- [23] 秦曙, 乔雄梧, 王霞, 等. 三唑磷原药及其中相关杂质治理磷的水解特性研究[J]. *农药学报*, 2009, 11(1): 126–130. QIN S, QIAO X W, WANG X, et al. Hydrolysis behaviour of technical triazophos and its relevant impurity sulfotep[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2009, 11(1): 126–130.
- [24] MOORE M T, KRÖGER R, COOPER C M, et al. Diazinon reduction and partitioning between water, sediment and vegetation in stormwater runoff mitigation through rice fields[J]. *Pest Management Science*, 2009, 65(11): 1182–1188.
- [25] WANG C, LIU B Y, XU D, et al. Mitigation of wastewater-borne chlorpyrifosin constructed wetlands: the role of vegetation partitioning[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(1): 347–354.
- [26] MENG P P, PEI H Y, HU W R, et al. How to increase microbial degradation in constructed wetlands: influencing factors and improvement measures[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 157: 316–326.
- [27] DASH D M, OSBORNE W J. A systematic review on the implementation of advanced and evolutionary biotechnological tools for efficient bioremediation of organophosphorus pesticides[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137506.
- [28] LIU T, XU S R, LU S Y, et al. A review on removal of organophosphorus pesticides in constructed wetland: performance, mechanism and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2247–2268.

(责任编辑:李丹)