

长江流域农田生态排水沟渠氮削减效应研究

秦沂樟, 白静, 赵健, 谢崇宝, 杨延梅, 罗琳

引用本文:

秦沂樟, 白静, 赵健, 谢崇宝, 杨延梅, 罗琳. 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(2): 389-400.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0517>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 王凤, 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>

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, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2387-2396 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0741>

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174-184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应

朱金格, 张晓姣, 刘鑫, 郭西亚

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 405-411 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0511>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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(2): 389-400.

QIN Y Z, BAI J, ZHAO J, et al. Nitrogen removal effect of agricultural ecological drainage ditches in the Yangtze River Basin, China [J].

Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(2): 389-400.



开放科学 OSID

长江流域农田生态排水沟渠氮削减效应研究

秦沂樟^{1,2}, 白静^{1*}, 赵健¹, 谢崇宝³, 杨廷梅², 罗琳⁴

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 4. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要:为研究长江流域农田生态排水沟渠对总氮(TN)的削减效果,本研究收集长江流域生态排水沟渠的639项野外现场试验数据,通过Mann-Whitney U检验和K-W检验方法探究了不同植被类型、沟渠类型、强化措施类型、温度范围和进水浓度范围等因子对生态排水沟渠TN削减效率的影响。结果表明:在农田生态排水沟渠中,不同植被类型中的多种人工植被对TN削减效果最好,平均削减效率为47.72%;沟渠类型为边坡半衬砌(沟壁材质为部分混凝土,沟底材质为全土)对TN去除效果最佳,其平均削减效率为58.18%;强化措施类型中,添加基质类和设置拦截类强化措施的生态排水沟渠对TN削减效果最好,其平均削减效率为54.24%;气温处于>25~35℃时生态排水沟渠TN削减效果更有效,而在低温环境下可以通过种植耐寒植物(绿狐尾藻、黑麦草等)提高削减率;沟渠进口TN浓度多数集中在>2~4 mg·L⁻¹之间,沟渠出口TN浓度主要分布在0~2 mg·L⁻¹之间,TN进口浓度为>2~4 mg·L⁻¹时沟渠TN削减效果最佳;不同浓度条件下,沟渠选择种植多种人工植被,对沟壁进行半衬砌,设有强化措施都能有效提高TN的净化效果;TN削减效率与水力停留时间、沟渠长度、水深呈现正相关;在多种因素最优的情形下,TN表面去除负荷随着TN进口浓度增大而增大。研究表明,长江流域农田生态排水沟渠选择多种人工挑选的植被、沟渠类型选择边坡半衬砌、同时添加基质类和设置拦截类强化措施更能有效地削减TN,并且控制气温在>25~35℃和进口浓度为>2~4 mg·L⁻¹来削减TN,另外延长沟渠长度和控制水体的水深、水力停留时间可更好地削减TN。

关键词:长江流域;生态排水沟渠;农业面源;氮;Mann-Whitney U检验;K-W检验

中图分类号:X71;X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0389-12 doi:10.11654/jaes.2023-0517

Nitrogen removal effect of agricultural ecological drainage ditches in the Yangtze River Basin, China

QIN Yizhang^{1,2}, BAI Jing^{1*}, ZHAO Jian¹, XIE Chongbao³, YANG Yanmei², LUO Lin⁴

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chinese Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China; 4. Development Research Center of the Ministry of Water Resource of China, Beijing 100038, China)

Abstract: To improve the total nitrogen (TN) removal efficiency of ecological drainage ditches (EDDs) in the Yangtze River Basin, this study collected 639 field test data from EDDs in the basin and investigated the effects of different vegetation types, ditch materials, reinforcement measures, temperature ranges, and TN influent concentration ranges on the TN removal efficiency (TNRE) of the EDDs using Mann-Whitney U test and K-W test methods. The results showed that EDDs covered with various types of selected vegetation performed better in TN mitigation than ditches with other types of vegetation, producing an average TNRE of 47.72%. Among different ditch types, EDDs with semi-lined side slopes (ditch slope material was partially concrete, and ditch bottom material was full soil) had the

收稿日期:2023-06-29 录用日期:2023-11-02

作者简介:秦沂樟(1997—),男,重庆忠县人,硕士研究生,研究方向为水环境治理及水环境模拟。E-mail:1114545786@qq.com

*通信作者:白静 E-mail:baijing@craes.org.cn

基金项目:中央财政科技计划结余经费(2021YSKY-05);国家重点研发计划项目(2021YFC3201505)

Project supported: Budget Surplus of Central Financial Science and Technology Plan (2021YSKY-05); National Key Research and Development Program of China (2021YFC3201505)

best effect on TNRE, with an average removal efficiency of 58.18%. Among the different reinforcement measure types, EDDs with artificial substrates and interception-type reinforcement measures added had the best TNRE, with an average reduction efficiency of 54.24%. The TN reduction effect of EDDs was greater when the temperature was $>25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$. In low-temperature environments, the TN reduction effect could be improved by planting certain cold-tolerant plants. The TN inlet concentration of the ditch was mainly within $>2\text{--}4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the TN outlet concentration of the ditch was mainly within $0\text{--}2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The reduction effect in the EDDs was best when the TN inlet concentration was within $>2\text{--}4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Under different concentration conditions, ditches were selected for the planting of various selected vegetation, semi-lined side slopes, and reinforcement measures to improve the purification effect of TN. The TNRE was positively correlated with hydraulic retention time, ditch length, and water depth. The TN surface removal load increased with inlet concentration. The results showed that EDDs in the Yangtze River Basin could more effectively reduce TN under the following conditions: implementation of various selected vegetation and ditches with semi-lined side slopes, addition of artificial substrates and interception-type reinforcement measures, temperature and inlet concentration controlled at $>25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $>2\text{--}4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and extended length of ditch and controlled water depth and hydraulic retention time of water bodies.

Keywords: Yangtze River Basin; ecological drainage ditch; agricultural non-point source; nitrogen; Mann-Whitney U test; K-W test

长江流域是我国主要粮食生产基地,耕地面积占全国耕地总面积的24%,中下游流域农业集约化程度高^[1-2]。2020年长江经济带11省(市)的农用化肥施用强度($275.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)是国际化肥安全施用强度上限($225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的1.22倍,农用氮肥施用量占全国农用氮肥施用量的39.4%^[3]。农业生产过程中氮肥的过量施用、资源化利用率低,氮类污染物流失严重,导致湖泊等水体富营养化,破坏水生态系统^[4-5]。农业面源氮污染物的最佳控制措施是国内外研究的重点,并取得了良好的实践效果。生态排水沟渠是一种占地少、环境友好的农田面源污染治理措施。生态排水沟渠中氮的去除机制包括硝化和反硝化作用、植物吸收、沉降、挥发、微生物同化等,其中硝化和反硝化作用是主要去除途径^[6-7]。沟渠中的 NH_4^+ 被植物藻类的光合作用和异养生物吸收或者沉积物吸附,也会被硝化作用消耗, NO_3^- 被生物吸收和反硝化作用去除^[8]。当沟渠底部处于好氧条件下发生硝化作用,将 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ,异养细菌直接吸收 NO_3^- ,沟渠底部沉积物在有碳源的厌氧环境中发生反硝化作用消耗 NO_3^- ^[9]。生态排水沟渠中氮的去除需要具有良好的氧化还原条件、比较充足的碳源和较长的滞留时间等因素。

近年来,国内外开展了不同条件下沟渠对TN削减能力的影响研究。例如,Kumwimba等^[10]分析了植被类型、季节、沟渠类型等因素对生态沟渠削减氮的影响,并提出在沟渠中构建堰坝可以提高TN削减效果。张树楠等^[11]探究不同植被对生态沟渠削减TN的影响,发现水生美人蕉、绿狐尾藻对TN的吸收效果最好,其TN削减效率高达64.3%。陈淑芬等^[12]研究发现种植石菖蒲和水芹的生态沟渠对TN平均去除效率为12.66%。祝浩翔等^[13]研究发现夏季时植被对TN削减

效率为81.33%,冬季时植被对TN削减效率为52.18%。沟渠对TN的削减能力受到不同条件(植被种类、沟渠类型、环境因子、进水浓度)影响,导致TN削减效率变化范围很大^[14]。为了揭示长江流域生态排水沟渠对TN的削减效率分布,以及探讨提高生态排水沟渠对TN的削减效果的优选因素,本文通过在公开文献数据库中搜索长江流域中农田生态排水沟渠削减TN的相关数据,基于多源数据统计分析方法,研究不同条件下农田生态排水沟渠对TN削减效率及优选因素,为农田生态排水沟渠优化设计、氮类污染物削减效应评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

在中国知网数据库(CNKI)和Web of Science检索1990—2022年长江流域生态排水沟渠野外现场试验研究,通过直接引用或利用Getdata软件从文献(正文、图、表)中获取TN进出口浓度和削减效率。数据筛选条件为:沟渠为野外现场试验且为农田排水;沟渠进出口之间没有地表水汇入,且沟渠为农田排水沟渠;试验类型为动态试验。经过数据筛选及整理最终共获取来自63篇文献(中文文献43篇,英文文献20篇)的639项数据,各试验地点分布见表1。生态排水沟渠TN削减效率通过进口、出口的TN浓度计算得出:

$$R=(C_{in}-C_{out})/C_{in}\times 100\% \quad (1)$$

其中, R 为生态排水沟渠TN削减效率; C_{in} 为生态排水沟渠进口TN浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{out} 为生态排水沟渠出口TN浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

根据生态排水沟渠排水特征,计算单位时间单位面积TN的表面去除负荷,公式如下:

$$\eta = (C_{in} - C_{out})Q/A \quad (2)$$

式中: η 为生态排水沟渠TN表面去除负荷, $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; Q 为生态排水沟渠流量, $m^3 \cdot d^{-1}$; C_{in} 为生态排水沟渠TN进口浓度, $mg \cdot L^{-1}$; C_{out} 为生态排水沟渠TN出口浓度, $mg \cdot L^{-1}$; A 为生态排水沟渠沟底面积, m^2 。

表1 文献数量及研究点分布

Table 1 Number of literatures and the distribution of research sites

序号 Serial number	省份 Province	文献数量 Number of Literature
1	江苏省	11
2	上海市	11
3	湖南省	10
4	安徽省	7
5	四川省	6
6	江西省	7
7	云南省	6
8	湖北省	3
9	贵州省	2

在生态排水沟渠中植被类型、沟渠类型、环境因子等条件对TN削减的影响较大,根据收集的生态排

水沟渠数据库中各条件的样本量进行分组,包括植被类型、沟渠类型、强化措施类型、温度、进水浓度,各组分样本量见表2。

(1)依据植被类型分组。植被类型分为自然植被(如当地生长的过江草、水花生和水芹等植被)和人工植被(经过人工挑选的植被如水葱、绿狐尾藻、狗牙根和美人蕉等)两组,进一步细分为单一自然植被、多种自然植被、单一人工植被、多种人工植被等。

(2)依据沟渠类型分组。沟渠类型分为人工沟渠(沟渠材质为部分混凝土)和自然沟渠(沟渠材质全土)两组,其中人工沟渠分为边坡半衬砌(沟壁材质为部分混凝土,沟底材质为全土)、边坡完全衬砌(沟壁材质为全混凝土,沟底材质为全土)、完全半衬砌(边坡和沟底材质均为部分混凝土)。

(3)依据强化措施类型分组。强化措施类型分为无强化措施、拦截类措施、基质类措施、拦截+基质类措施,其中沟渠中设置坝、堰、闸等属于拦截类强化措施,沟渠中设置具有吸附功能的沸石、陶粒、砾石等属于基质类强化措施。

(4)温度分为3个区间:0~15、>15~25、>25~

表2 数据分组及分析方法

Table 2 Data grouping and analysis methods

分组 Group	类型/区间 Type/range	样本量 Sample size	分析方法 Analysis method
植被大类 Vegetation type	自然植被 R_n, nv -Natural vegetation	42	Mann-Whitney U 检验
	人工植被 R_{sv}, sv -Selected vegetation	597	
植被细类 Detailed vegetation type	单一自然植被 R_{sn}, sn -Single natural vegetation	7	K-W 检验
	多种自然植被 R_{vn}, vn -Various natural vegetation	35	
	单一人工植被 R_{ss}, ss -Single selected vegetation	233	
	多种人工植被 R_{vs}, vs -Various selected vegetation	364	
沟渠类型 Ditch type	人工沟渠 R_l, l -Semi-lined ditches	340	Mann-Whitney U 检验
	自然沟渠 R_s, s -Soil ditches	299	
人工沟渠类型 Semi-lined ditch	边坡半衬砌沟渠 R_{ds}, ds -Ditches with semi-lined slope	162	K-W 检验
	边坡完全衬砌渠 R_{df}, df -Ditches with fully-lined slope	101	
	完全半衬砌沟渠 R_{ds}, sb -Ditches with semi-lined slope and bottom	77	
强化措施 Reinforcement measure	无强化措施 R_{wr}, wr -Ditches without reinforcement	180	K-W 检验
	拦截类 R_i, i -Ditches with interception	335	
	基质类 R_{as}, as -Ditches with artificial substrate	108	
	拦截类+基质类 $R_{i&a}, i&a$ -Ditches with interception and artificial substrate	16	
温度 Temperature	0~15 °C R_{T1}	15	K-W 检验
	>15~25 °C R_{T2}	126	
	>25~35 °C R_{T3}	223	
TN 进水浓度 TN influent concentration	0~2 $mg \cdot L^{-1}$ R_{c1}	149	K-W 检验
	>2~4 $mg \cdot L^{-1}$ R_{c2}	225	
	>4 $mg \cdot L^{-1}$ R_{c3}	168	

35 ℃,分别接近长江流域冬季气温区间、春秋两季气温区间和夏季气温区分。

(5)依据TN进水浓度范围分组。TN进水浓度共分为3个区间,分别为0~2、>2~4、>4 mg·L⁻¹。

1.2 分析方法

本文利用 Mann-Whitney U 检验和 K-W 检验分析不同影响因素条件下农田生态排水沟渠 TN 削减效率及分布范围的变化特征,具体分析方法见表2。通过 Excel 2010 对数据记录和整理,利用 SPSS Statistic 26 和 Origin 2021 进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 TN 削减效率总体情况

生态排水沟渠 TN 削减效率(R)波动大,各区间样本量分布见图1, R 分布在20%~30%样本量最多,其次是50%~60%,而 R 整体分布范围为-31.31%~90.25%,TN平均削减效率为40.02%,可见通常情况下生态排水沟渠能够有效削减TN,在控制农业面源污染中发挥着重要作用^[15]。为了进一步提高生态排水沟渠对TN的消减效果,有必要研究不同条件对生态排水沟渠削减TN的影响。

2.2 生态排水沟渠植被类型对TN的削减效率

采用 Mann-Whitney U 检验分析生长自然植被和人工植被的生态排水沟渠的TN削减效率, $P < 0.001$,说明两者TN削减效率的分布具有极其显著性统计学意义。由图2(a)可知, R_m 均低于80%及以下,主要集中在40%及以下; R_{sn} 分布在40%~60%样本量最大,占该类植被样本量的27.14%,超过80%的样本量共有32项。由表3可知, R_{sn} 的均值(40.52%)高于 R_m 的

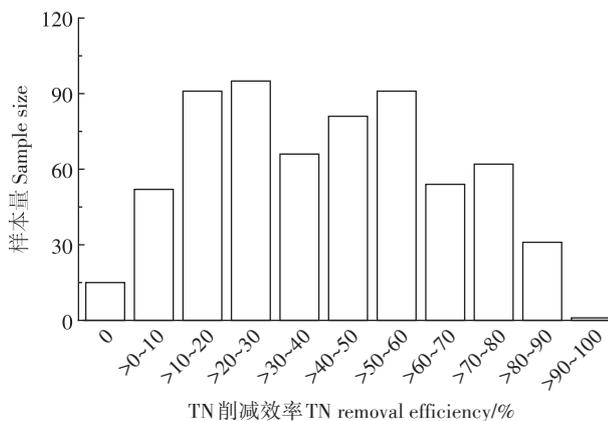


图1 生态排水沟渠对TN削减效率分布

Figure 1 TN removal efficiency distribution of ecological drainage ditches

均值(32.89%)。 R_{sn} 的最大值、75%值、中位值、25%值均比 R_m 相对应的值高。Mann-Whitney U 检验结果表明, R_{sn} 的秩均值(320.64)高于 R_m 的秩均值(314.98)。人工植被覆盖的生态排水沟渠TN削减效率高于自然植被覆盖的生态排水沟渠。

单一自然植被、多种自然植被、单一人工植被、多种人工植被覆盖的生态排水沟渠对TN的削减效率经过K-W检验得到 $P < 0.001$,说明四者之间TN削减效率的差异极其显著。由图2(b)可知, R_{vs} 在40%~60%区间中样本量占该类植被样本量的30.22%,与其他3类植被相比, R_{vs} 超过60%的样本量占比最大; R_{sn} 样本量较少,主要集中在20%以下。由表3可得, R_{vs} 的均值在4种植被细类中最高,达到47.72%; R_{vn} 和 R_{ss} 的均值分别为35.99%和29.26%,处于中游; R_{sn} 的均值仅为17.36%。 R_{vs} 的最大值、75%值、中位值、25%值在4种植被细类中最高。K-W检验表明, R_{vs} 的秩均值明显高于其他3种类型的秩均值。多种人工植被覆盖的生态排水沟渠TN削减效果最优。

2.3 生态排水沟渠材质类型对TN的削减效率

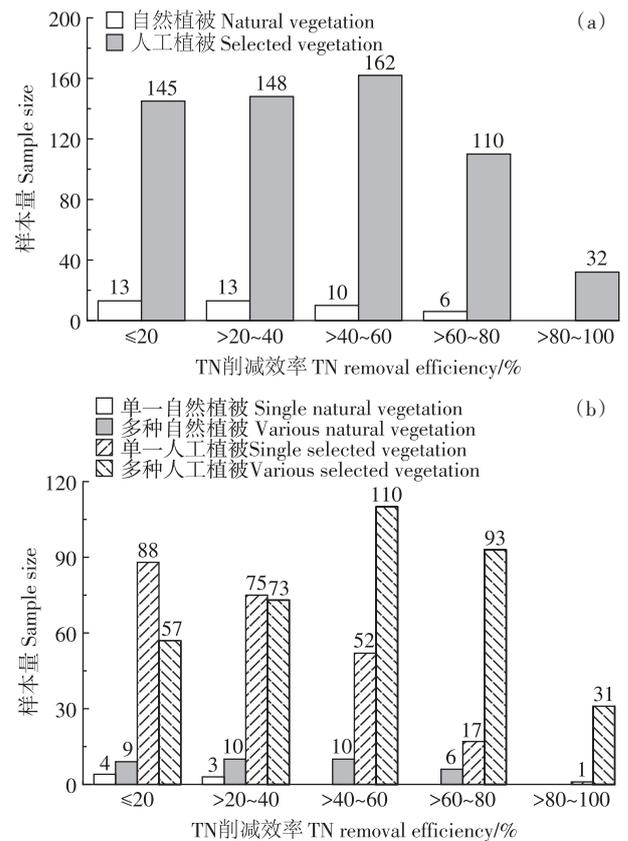


图2 不同植被类型TN削减效率的分布

Figure 2 Distribution of TN removal efficiencies for different vegetation types

人工和自然生态排水沟渠对TN削减效率通过Mann-Whitney U检验分析得到 $P<0.001$,说明两者TN削减效率的差异极其显著。由图3(a)可得, R_i 在40%~60%区间中的样本量占该类植被样本量的27.35%, R_n 的样本主要分布在40%及以下,而高于40%时 R_i 的样本量明显比 R_n 的样本量多。由表4可知, R_i 的均值为46.57%, R_n 的均值为32.56%。 R_i 的最大值、75%值、中位值、25%值、最小值均比 R_n 相应值高。由Mann-Whitney U检验结果可得, R_i 的秩均值高于 R_n 的秩均值。人工生态排水沟渠对TN削减效率更佳。

人工沟渠类型中,边坡半衬砌、边坡完全衬砌、完全半衬砌的生态排水沟渠对TN削减效率经过K-W检验分析,得到 $P<0.001$,说明三者之间TN削减效率的分布具有极其显著统计学意义。由图3(b)可知, R_{is} 在40%及以下的样本量较少,而超过60%以上的样本量在3种人工沟渠类型中最大; R_{sb} 样本主要集中在0~40%。由表4可得 R_{is} 的均值最高,为58.18%;其次是 R_{sb} 的均值,为36.49%;最低的是 R_{df} 的均值,为35.64%。与其他类型人工沟渠相比, R_{is} 的75%值、中位值、25%值、最小值最大。根据K-W检验得到的结果, R_{is} 的秩均值最高(表4)。边坡半衬砌生态排水沟

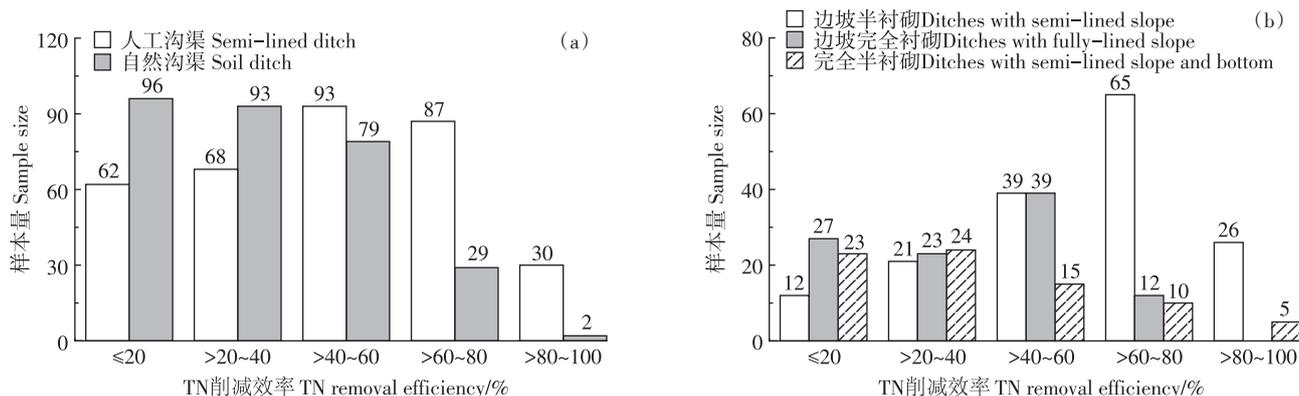


图3 不同沟渠类型TN削减效率的分布

Figure 3 Distribution of TN removal efficiency of different ditch types

表3 不同植被类型生态排水沟渠TN削减效率的分析结果

Table 3 Analysis results of TN reduction efficiency of ecological drainage ditches with different vegetation types

分组依据 Group	类型 Type	最大值 Maximum value/%	75%值 75%value/%	中位值 Median value/%	均值 Average value/%	25%值 25%value/%	最小值 Minimum value/%	秩均值 Mean rank
植被大类 Vegetation type	自然植被 R_n	74.79	50.25	30.00	32.89	15.74	3.40	314.98
	人工植被 R_s	90.25	59.05	40.65	40.52	20.33	-31.31	320.64
植被细类 Detailed vegetation type	单一自然 R_{ns}	39.40	30.50	8.90	17.36	8.90	3.40	138.86
	多种自然 R_{ns}	74.79	52.18	30.18	35.99	18.70	4.41	289.37
	单一人工 R_{ns}	73.47	43.54	26.01	29.26	15.06	-7.96	237.98
	多种人工 R_{ns}	90.25	69.00	50.19	47.72	28.47	-15.17	378.93

表4 不同沟渠类型生态排水沟渠TN削减效率的分析结果

Table 4 Analysis results of TN removal efficiency of ecological drainage ditches with different ditch types

分组依据 Group	类型 Type	最大值 Maximum value/%	75%值 75%value/%	中位值 Median value/%	均值 Average value/%	25%值 25%value/%	最小值 Minimum value/%	秩均值 Mean rank
沟渠类型 Ditch type	人工沟渠 R_i	90.25	69.54	49.05	46.57	24.97	-15.17	369.30
	自然沟渠 R_n	89.61	49.31	30.00	32.56	16.95	-31.31	263.93
人工沟渠类型 Semi-lined ditch type	边坡半衬砌 R_{is}	89.79	75.80	65.00	58.18	43.75	3.11	216.63
	边坡完全衬砌 R_{df}	75.00	52.99	40.21	35.64	18.35	-15.17	127.54
	完全半衬砌 R_{sb}	90.25	56.84	32.16	36.49	15.74	0.22	129.80

渠对TN削减效果最好。

2.4 生态排水沟渠强化措施类型对TN的削减效率

根据K-W检验,得到无强化措施、拦截类、基质类、拦截+基质类的生态排水沟渠对TN削减效率四者具有统计学差异($P<0.05$)。由图4可知, R_{wr} 分布在低于20%~40%的样本量最大,其次是低于20%的样本量; R_i 分布在40%~60%的样本量最大,其次是低于20%的样本量; R_{as} 分布在20%~40%的样本量最多,其次是在40%~60%的样本量; $R_{i&a}$ 分布在40%~60%的样本量最大,其次是在60%~80%的样本量。由表5可知, $R_{i&a}$ 的均值最高,为54.24%;其次是 R_{as} 的均值,为42.47%;再者是 R_i 的均值,为41.51%,最低的是 R_{wr} 的均值,为34.49%。与其他类型措施相比, $R_{i&a}$ 的75%值、中位值、25%值、最小值最大。根据K-W检验得到的秩均值,设置拦截+基质类的生态排水沟渠对TN去除效果明显高于仅设置拦截类强化措施。

2.5 不同温度下生态排水沟渠对TN的削减效率

根据K-W检验,0~15、>15~25、>25~35℃3个温度区间生态排水沟渠对TN削减效率存在极显著统计学差异($P<0.001$)。由图5可知, R_{T3} 在40%~60%区间

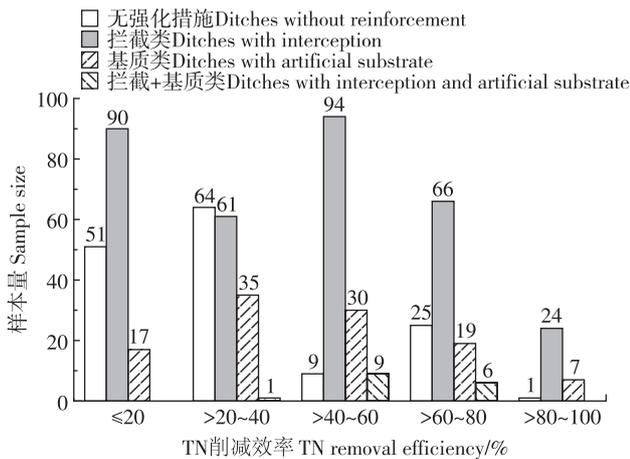


图4 不同强化措施类型TN削减效率的分布

Figure 4 Distribution of TN removal efficiency of different reinforcement measures

表5 不同强化措施类型生态排水沟渠TN削减效率的分析结果

Table 5 Analysis results of TN removal efficiency of ecological drainage ditches with different reinforcement measures

类型 Type	最大值 Maximum value/%	75%值 75%value/%	中位值 Median value/%	均值 Average value/%	25%值 25%value/%	最小值 Minimum value/%	秩均值 Mean rank
无强化措施 R_{wr}	88.49	53.28	29.72	34.49	19.15	0.68	276.91
拦截类 R_i	89.97	61.59	43.61	41.51	17.92	-31.31	331.81
基质类 R_{as}	90.25	59.52	44.45	42.47	22.98	0.22	337.90
拦截+基质类 $R_{i&a}$	74.79	62.76	53.27	54.24	45.63	32.31	436.59

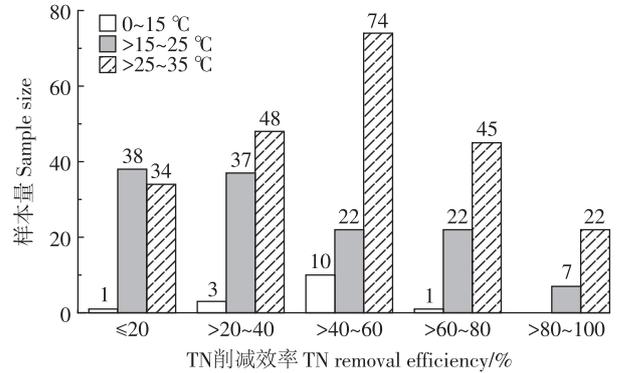


图5 不同温度TN削减效率的分布

Figure 5 Distribution of TN removal efficiency in different temperatures

的样本占该类温度样本量的33.18%,在超过60%的区间中其样本量远高于其他2个温度区间的在该范围中的样本量。由表6可知, R_{T3} 的均值达到最高,为47.06%;其次是 R_{T1} 的均值为45.39%;最低是 R_{T2} 的均值为36.43%。 R_{T3} 的最大值和75%值比其他温度区间相应值高。值得注意的是0~15℃时生态排水沟渠对TN削减效果仅次于夏季且高于春季和秋季,主要是在部分试验中低温条件下通过种植耐寒植物提高生态沟渠削减TN的效果。K-W检验结果表明, R_{T3} 的秩均值最高,>25~35℃时生态排水沟渠对TN削减效果最好。

2.6 TN进水浓度对生态排水沟渠削减TN的影响

沟渠TN进水浓度与出水浓度数据量的分布情况见图6。TN进水浓度中的样本量最大为>2~4 mg·L⁻¹,该浓度范围的样本量占全区间样本的41.51%;TN出水浓度中>2~4 mg·L⁻¹的样本量占全区间样本的17.34%。TN出水浓度的样本量最大为0~2mg·L⁻¹,该浓度范围的样本量占全区间样本的59.04%;TN进水浓度中0~2 mg·L⁻¹的样本量占全区间样本的27.49%。可以得出TN出水浓度的高浓度范围的样本量明显减少,低浓度范围的样本量明显增大,说明农田生态排水沟渠能够有效地削减TN。

表6 不同温度范围生态排水沟渠TN削减效率的分析结果

Table 6 Analysis results of TN removal efficiency in different seasons and different temperatures

类型 Type	最大值 Maximum value/%	75%值 75%value/%	中位值 Median value/%	均值 Average value/%	25%值 25%value/%	最小值 Minimum value/%	秩均值 Mean rank
0~15 °C R_{T1}	62.90	56.27	52.24	45.39	33.70	12.81	194.17
>15~25 °C R_{T2}	85.93	58.42	29.47	36.43	15.21	-31.31	152.88
>25~35 °C R_{T3}	90.25	66.00	46.97	47.06	30.00	-11.00	198.45

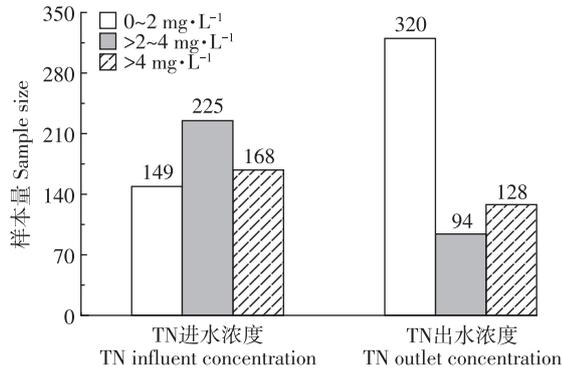


图6 不同TN进出水浓度分布

Figure 6 Different TN influent concentration and effluent concentration distributions

根据K-W检验,0~2、>2~4、>4 mg·L⁻¹3个进水浓度区间的生态排水沟渠对TN削减效率的差异极其显著($P<0.001$)。由图7可知, R_{c2} 在40%~60%的样本量

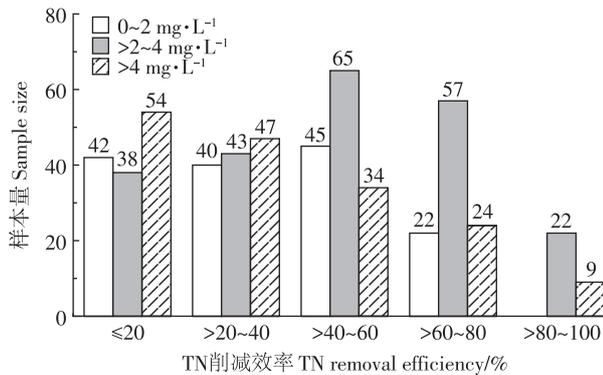


图7 不同TN进水浓度的TN削减效率的分布

Figure 7 Distribution of TN reduction efficiency with different TN influent concentrations

占该类浓度样本量的28.89%,超过60%区间中的样本量高于其他2个浓度区间; R_{c3} 分布在20%及以下的样本量较多。由表7可知, R_{c2} 均值达到最高,为48.17%;其次是 R_{c3} 均值为36.03%;最低是 R_{c1} 均值为35.00%。 R_{c2} 的75%值、中位值、25%值比其他浓度区间所对应值高。K-W检验表明, R_{c2} 的秩均值最高,说明进水>2~4 mg·L⁻¹时生态排水沟渠的TN削减效果最高。

根据前文分析的结果可以明确多种人工植被、边坡半衬砌材质、设有强化措施为优选因素下的生态排水沟渠能更有效地削减TN。将优选因素为定量关系探讨该情况下生态排水沟渠的TN表面去除负荷与进水浓度和R的关系。TN进水浓度与表面去除负荷关系如图8所示, R^2 为0.76,拟合效果好;皮尔逊相关系数为0.87,呈现强正相关。TN进水浓度为0.86~6.14 mg·L⁻¹,在该范围内,进水浓度越大,沟渠TN表面去除负荷越大。已有研究证明在一定的TN进水浓度范

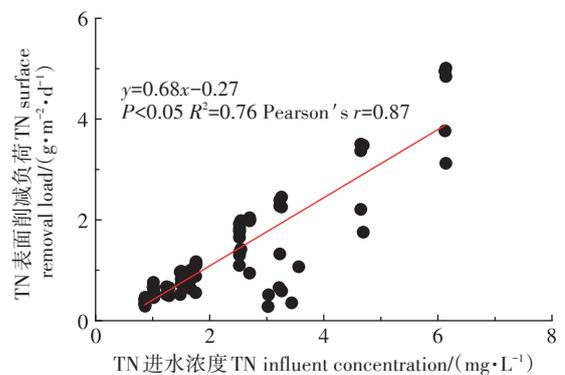


图8 TN进水浓度对TN表面去除负荷的影响

Figure 8 Effects of TN influent concentration on TN surface removal loads

表7 不同TN进水浓度生态排水沟渠TN削减效率的分析结果

Table 7 Analysis results of TN removal efficiency of ecological drainage ditches with different TN influent concentrations

类型 Type	最大值 Maximum value/%	75%值 75%value/%	中位值 Median value/%	均值 Average value/%	25%值 25%value/%	最小值 Minimum value/%	秩均值 Mean rank
0~2 mg·L ⁻¹ R_{c1}	76.32	51.52	36.77	35.00	16.71	-31.31	236.52
>2~4 mg·L ⁻¹ R_{c2}	85.93	70.95	52.33	48.17	25.00	-15.17	318.61
>4 mg·L ⁻¹ R_{c3}	90.52	56.31	31.89	36.03	15.52	-7.96	239.43

国内, TN 表面去除负荷与进水浓度之间有极显著正相关性。

根据 TN 进水浓度范围的样本量分为低浓度(0~2 mg·L⁻¹)、中浓度(>2~4 mg·L⁻¹)、高浓度(>4 mg·L⁻¹), 并比较低浓度、中浓度、高浓度在植被类型、沟渠类型、强化措施下生态排水沟渠的 TN 平均削减效率, 见图 9。在低浓度条件下, 植被类型中多种人工植被(R_{ns})的均值达到最高, 为 38.82%; 沟渠类型中边坡半衬砌(R_{ds})的均值达到最高, 为 54.50%; 强化措施中添加基质类(R_{as})的均值达到最高, 为 40.68%。在中浓度条件下, 植被类型中多种人工植被(R_{ns})的均值达到最高, 为 56.41%; 沟渠类型中边坡半衬砌(R_{ds})的均值达到最高, 为 68.63%; 强化措施中设置拦截类(R_{as})的均值达到最高, 为 51.46%。在高浓度条件下, 植被类型中多种人工植被(R_{ns})的均值达到最高, 为 44.22%; 沟渠类型中边坡半衬砌(R_{ds})的均值达到最高, 为 49.19%; 强化措施中添加基质类(R_{as})的均值达到最高, 为 44.37%。可以发现在不同浓度条件下, 植被类型为多种人工植被的生态排水沟渠对 TN 削减效果较好; 沟渠材质为边坡半衬砌的生态排水沟渠对 TN 削减效果最好。在低浓度和高浓度条件下, 添加基质类措施更能有效削减沟渠中的 TN。而在高浓度条件下, 设置拦截类措施更能有效削减沟渠中的 TN。

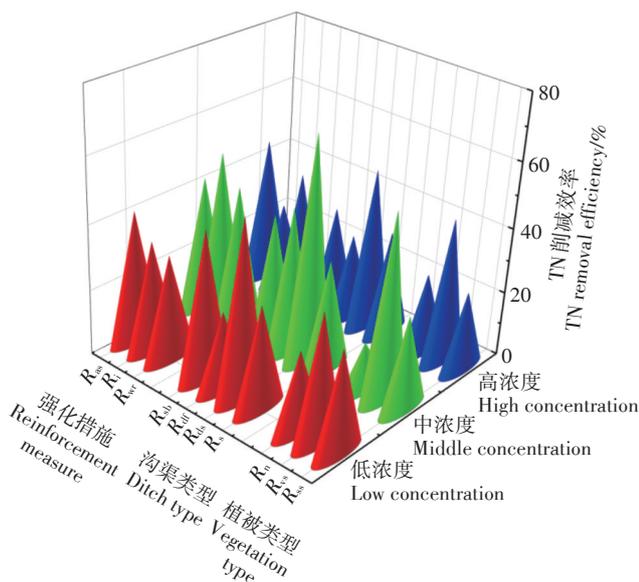


图9 低、中、高 TN 进水浓度的不同措施下的 TN 削减效率
Figure 9 TN removal efficiency under different measures for low, medium, and high TN influent concentrations

2.7 多因素与生态排水沟渠 TN 削减效率关系

沟渠长度、水深、水力停留时间等因素对生态排

水沟渠削减 TN 能产生影响, 为探究不同因素的影响, 采用主成分分析法对沟渠长度(L- Length)、水深(D- depth)、水力停留时间(HRT- Hydraulic retention time)和 TN 削减效率(R- TN removal efficiency)共 219 组数据进行分析(图 10), 共提取 2 个主成分, 可以反映出 78.3% 的信息。第一主成分的贡献率为 50.5%, 其中水深和水力停留时间有较高的正载荷, 说明水深和水力停留时间影响较大。第二主成分的贡献率为 27.8%, 主要贡献因子是沟长。

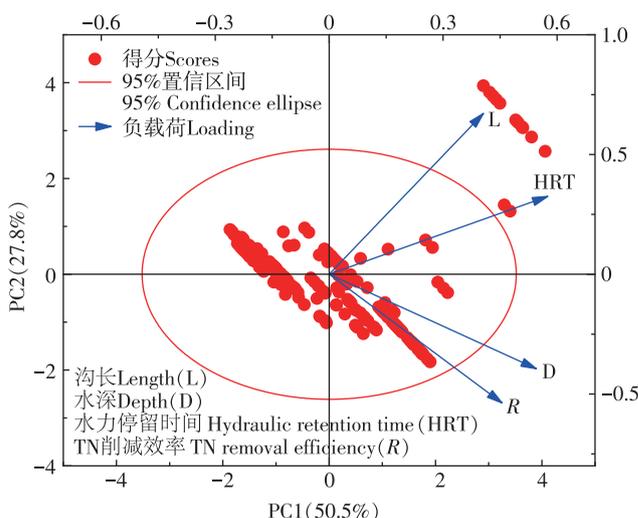


图 10 TN 进水浓度对 TN 表面去除负荷的影响

Figure 10 Effects of TN influent concentration on TN surface removal loads

3 讨论

3.1 植被对生态排水沟渠削减氮的影响

农田生态排水沟渠中植被在脱氮过程中发挥着重要作用^[16]。植被可以直接从底泥和水体中吸收氮, 另外, 植被可以增加沟渠糙率, 减缓水流流速, 延长硝化/反硝化反应的时间。Vymazal 等^[17]在 200 m 的沟渠中, 发现植物吸收氮类污染物占全部去除的 26%。植被不仅可以为根际微生物的生长提供附着空间和氧气, 增强硝化作用, 还可以从根系中分泌碳源, 为生化反应提供能量, 进而促进反硝化作用^[18]。覆盖人工植被的生态排水沟渠对 TN 的削减效果优于覆盖自然植被的生态排水沟渠, 且在详细植被类型中, 覆盖多种人工植被的生态排水沟渠对 TN 削减效果最好, 其平均削减效率比农田生态排水沟渠总体平均削减效率(40.02%)高出 7.70%, 与 Liang 等^[19]的研究结果一致, TN 削减效率的最大值出现在多种人工植被的生态排水沟渠。不同种类的植被削减氮类污染物存在差异,

生物量是影响植物吸收氮类营养盐能力的决定性因素^[20]。Kumwimba等^[21]研究表明在多种植被中水生美人蕉对氮的吸收效果最好, TN削减效率为72%。周晓燕等^[22]发现芦苇对氮类污染物的去除效率能达到77.25%。本研究中自然植被以沟渠内生长的杂草和当地野生植被为主, 该植被类型对氮类污染物的吸收能力比较弱; 而人工植被以水花生、美人蕉、芦苇、菖蒲等为主。人工植被长势高大, 根系发达, 多种植被相辅相成, 对氮类污染物的吸收能力较强。选择种植多种人工植被可以提高农田生态排水沟渠对氮类污染物的削减率^[11, 14]。

3.2 沟渠材质对生态排水沟渠削减氮的影响

农田生态排水沟渠类型中部分混凝土沟渠对氮的削减效果优于全土沟渠。3种不同类型人工生态排水沟渠中, 边坡半衬砌生态排水沟渠对TN削减效果最好, 其平均削减效率比总体平均削减效率(40.02%)高出18.16%。沟壁材质为部分混凝土、沟底材质为全土的边坡半衬砌生态排水沟渠对TN削减效果优于其他类型沟渠, 与Wang等^[23]研究结果一致。与完全半衬砌生态排水沟渠相比, 边坡半衬砌生态排水沟渠给植被生长提供了更大的空间; 与边坡完全衬砌生态排水沟渠相比, 边坡半衬砌生态排水沟渠能增加沟壁的糙率, 进而减缓沟渠内水流流速, 增加水体停留时间; 同时与全土材质生态排水沟渠相比, 其能保持边坡在排水时的稳定性, 避免水土流失引起的二次污染^[24]。

3.3 强化措施对生态排水沟渠削减氮的影响

本研究分析结果表明无强化措施的生态排水沟渠对TN削减效果低于设置拦截类、添加基质类的生态排水沟渠, 同时设置有拦截类和基质类措施削减TN效果最好, 说明具有强化措施的生态排水沟渠能够提升削减TN的效果。而拦截类的TN削减效果稍低于基质类的TN削减效果, 可能是由于沟渠中植被的存在、沟渠自身特征、温度等因素的对冲作用, 致使拦截类措施的作用减小。基质削减氮的主要途径是依赖微生物的硝化/反硝化作用。拦截类措施可以减缓水流流速, 使水力停留时间得到延长, 氮与底泥、植物、微生物相互作用时间越长, 越有利于提高沟渠对氮类污染物的削减效果^[25]。当无拦截措施, 沟渠中水体流速较大时, 氮类污染物在沟渠中的停留时间较短, 不足以影响植物对氮类营养物质的吸收, 不利于氮的吸附和沉积。Baker等^[26]研究发现有堰的沟渠对无机氮拦截效率高达96%。Littlejohn等^[27]对带有堰

的沟渠进行研究, 表明农田排水沟渠中水体的水力停留时间增加, 使氮磷负荷减少14%~67%。Cai等^[28]将天然沸石和稻草组合作为生态排水沟渠的基质, 对氮的削减效率达到39.7%~65.9%, 明显高于单一基质的生态排水沟渠。研究表明有机基质(如木屑、秸秆和草炭等)比矿物基质(如沸石、砾石、陶粒和碎石等)更有利于脱氮反应, 含碳的基质可以为微生物的生长提供碳源, 增强微生物活性, 为硝酸盐的反硝化提供条件^[29-30]。王孜颜等^[31]研究表明填料为木屑的生态沟渠对TN去除效率最高可达68.6%。生态排水沟渠中同时设置拦截措施和添加基质类措施能够极大提高对TN的削减效果, 两类措施能相辅相成, 为生态排水沟渠削减TN提供良好的条件。

3.4 温度对生态排水沟渠削减氮的影响

农田生态排水沟渠中的脱氮率有很强的温度和季节变异性。温度对氮污染物的削减起着重要的作用, 温度影响植被的生长、微生物的活性和生化反应(硝化和反硝化反应)的速率^[32]。本研究中, 在>25~35℃时, 生态排水沟渠对TN平均削减效率比总体平均削减效率(40.02%)高出7.04%。与Chen等^[33]的研究结果一致, 在夏季(5—8月)时生态排水沟渠对TN削减效率达到峰值。数据库中试验研究区域都处在长江流域且是亚热带, 则温度和季节具有很高的重合性, 温度处于>25~35℃的样本量占夏季总样本量的92.35%, 温度处于>15~25℃的样本量占春秋两季总样本量的81.71%, 温度处于0~15℃的样本量占冬季总样本量的100%。

不同生长期植物对氮类污染物的去除效果也不相同。农田生态排水沟渠数据库中的植物以水花生、美人蕉、菖蒲、茭白等为主。春季时, 植被处于生长阶段且生物量较小, 对氮吸收能力较差。秋末植被易枯萎腐败, 造成二次污染, 降低沟渠对TN削减效率^[6]。研究表明, 硝化作用的最佳温度范围为25~35℃, 其中30℃时硝态氮的削减效率达到最大, 适宜的温度有利于氨的挥发以及氮的反硝化作用^[10, 34]。同时夏季适宜植被生长, 植物吸收氮的能力增强, 植被覆盖密度高, 生物量大, 对氮的积累量增加, 净化效果达到最好。

另外, 在温度为0~15℃, 农田生态排水沟渠对TN平均削减效率高于春秋两季, 主要原因是试验中种植了耐寒植被绿狐尾藻, 其具有较高的生物量, 能直接吸收氮类营养物质, 促进硝化和反硝化反应, 有效削减氮类污染物。而春季时对氮吸收能力较小, 秋季时植被枯萎腐败, 导致沟渠削减氮的效果较差。研

究发现黑麦草、金钱蒲和西伯利亚鸢尾等属于常绿性耐寒植物,能提高农田生态排水沟渠在低温下对氮类污染物的削减效果^[35]。

3.5 TN 进水浓度对生态排水沟渠削减氮的影响

对于不同浓度的排水,氮去除的主要机理不同。氮的去除主要还是依靠硝化和反硝化反应。Li 等^[36]研究表明 TN 进水浓度、悬浮物浓度、进水流量和水深等 4 个因素中, TN 进水浓度对生态沟渠去除氮类污染物的影响最显著。在一定浓度范围内,生态排水沟渠对氮类污染物削减效率随进水浓度增加而增大,当进水浓度超出净化能力, TN 削减效率下降。本文中农田退水 TN 进水浓度为 $>2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生态排水沟渠对 TN 削减效果最佳,主要是在该浓度范围样本量较大,且沟渠中种植吸收氮能力较强的植物(美人蕉、铜钱草、黑三棱、绿狐尾藻等),使得沟渠能够高效地削减 TN。徐涵等^[37]发现较低浓度下生态沟渠对氮削减效果高于较高浓度。刘福兴等^[38]在实际应用生态沟渠中,在低浓度($2.33\sim 3.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和中浓度($3.82\sim 4.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时, TN 平均去除效率分别为 58.00% 和 55.10%。沟渠中水体的氮负荷较低时,对氮类污染物去除效果更明显。研究表明氨氮负荷在 $0.15\sim 30.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 范围内,湿地具有较高的去除能力^[39-40]。沟渠对氮类污染物有着一定的承受能力,超过沟渠的容纳范围,过量的氨会阻碍沟渠中的植被生长,甚至导致植被死亡,则沟渠的净化效果减弱。对于不同 TN 进水浓度,氮去除的主要机理不同。郑于聪等^[41]研究发现水葫芦、百喜草、水花生和香根草 4 种植物在不同浓度的污水中表现为不同的生长状态和不同的氮净化效率。施思^[42]研究了圆币草、菖蒲和美人蕉在低、中、高 3 种浓度污水中对总氮、氨态氮、总磷、化学需氧量的去除效果,发现不同水生植物净化相同浓度污水的效果不同,同种水生植物净化不同浓度污水的效果也不同。严国安等^[43]研究发现凤眼莲对污水中氮、磷等营养物质的净化效率与污水中氮、磷的浓度负荷有相关性,随着氮、磷负荷的增加,凤眼莲对氮、磷的去除也增加,但若氮、磷负荷太高,超过凤眼莲的吸收速率,则净化效果反而下降。对于不同的 TN 进水浓度,沟渠需要定制合理的措施有效地削减 TN。

3.6 多因素对生态排水沟渠削减氮的影响

沟渠的长、宽、深对氮的截留效果有很大影响,沟渠规格不同,沟渠内能容纳的植物和微生物的数量和能力不同,规格越大,容纳量越大,净化氮磷潜能也越大。随着沟渠长度增加,污染物浓度逐渐降低,说明

污染物在生态排水沟渠中的迁移具有一定的规律性^[44]。有研究表明,水位 0.4 m 相比于 0.1 m 和 0.2 m 时,绿狐尾藻的生长高度最高,根系最长,说明较高水位对植被的生长有一定的保护作用^[45]。一般来说,沟渠长度较长且沟渠深度较深时,沟渠中水生植物生长状况更好,与水体接触时间更长,有利于水生植物对氮磷的吸收和利用。不同水深对氮去除效果不同,水体中溶解氧的浓度会随着水深的增大而减小,硝化反应需要在有氧环境,而反硝化时需要在低氧环境下。一般认为进水污染物浓度越高,停留时间越长,水质净化效果越好^[46]。张燕^[47]研究了生态沟渠中水力停留时间对氮去除效果的影响,结果发现在较低的流速下,水力停留时间得到延长,沟渠能更有效地去除氮。

4 结论

(1) 确定生态排水沟渠削减 TN 的优选因素。种植人工植被的生态排水沟渠 TN 削减效果优于自然植被;多种人工植被的 TN 削减效果优于多种自然植被、单一人工植被、单一自然植被。沟渠类型中半衬砌材质沟渠对 TN 削减效果优于全土材质;半衬砌材质中,选择边坡半衬砌的生态排水沟渠 TN 削减效果优于边坡完全衬砌和完全半衬砌。设置有强化措施的生态排水沟渠对 TN 去除效果优于未设置强化措施;设置有拦截+基质类的生态排水沟渠对 TN 削减效果比单独添加基质类或设置拦截类强化措施好。

(2) 在不同温度条件下,生态排水沟渠处于 $>25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 TN 削减效果最佳,其 TN 平均削减效率为 47.06%。在低温条件下需要通过种植耐寒植物来提高农田生态排水沟渠对氮类污染物削减效果。

(3) 农田排水沟渠 TN 进水浓度在 $>2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,占全区间样本的 41.51%, TN 出水浓度在 $0\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,占全区间样本的 59.04%。TN 进水浓度为 $>2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生态排水沟渠对 TN 削减效率最佳, TN 平均削减效率达到 48.17%。

(4) TN 削减效率随着沟渠长度、水深、水力停留时间增大而增大。在多种人工植被、边坡半衬砌材质、设有强化措施的沟渠中, TN 表面去除负荷与 TN 进口浓度呈现正相关性。

参考文献:

- [1] 段扬, 吴文俊, 蒋洪强, 等. 长江经济带农田氮素平衡特征与污染风险评估分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1344-1351. DUAN Y, WU W J, JIANG H Q, et al. Characteristics of nitrogen balance model

- and pollution risk assessment in Yangtze River economic zone[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7):1344-1351.
- [2] 赵健, 籍瑶, 刘玥, 等. 长江流域农业面源污染现状、问题与对策[J]. 环境保护, 2022, 50(17):30-32. ZHAO J, JI Y, LIU Y, et al. Current situation, problems and suggestions on agricultural non-point source pollution in the Yangtze River Basin[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(17):30-32.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国农村统计年鉴-2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China rural statistical yearbook-2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [4] 江南, 周明华, 李红, 等. 长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(10):4539-4546. JIANG N, ZHOU M H, LI H, et al. Spatial-temporal variations and the regulators of nitrate status in shallow groundwater of the typical mountainous agricultural watershed in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10):4539-4546.
- [5] 梁新强, 杨姣, 何霜, 等. 关于长江三角洲地区推进稻田退水零直排工程建设的建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(7):814-822. LIANG X Q, YANG J, HE S, et al. Promoting construction of zero-direct discharge engineering for agricultural wastewater from paddy fields in Yangtze River Delta Region[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(7):814-822.
- [6] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3):48-65.
- [7] ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97:363-369.
- [8] 王吉莘. 源头流域氮的来源迁移与转化[D]. 厦门: 厦门大学, 2007. WANG J P. Nitrogen source, transport and transformation in headwater catchment[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [9] 王吉莘, 曹文志, 朱木兰, 等. 五川源头溪流系统氮的迁移和转化[J]. 生态学报, 2009, 29(1):351-358. WANG J P, CAO W Z, ZHU M L, et al. Nitrogen transports and transformations in the Wuchuan headwater stream[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):351-358.
- [10] KUMWIMBA M N, 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.
- [11] 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.
- [12] 陈淑芬, 郭莲秀, 尹萌萌, 等. 生态沟渠植被对坡地径流冲刷物质的拦截去除效应试验研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊1):158-161. CHEN S F, GUO L X, YI M M, et al. Experimental study on intercepting and removing the water-erosion material from sloping runoff effects of plants in ecological drainage ditch[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(Suppl1):158-161.
- [13] 祝浩翔, 林立, 徐伟, 等. 彩云湖湿地公园7种湿地植物吸氮纳磷能力在不同季节的比较研究[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1):645-652. ZHU H X, LIN L, XU W, et al. Comparative study on nitrogen and phosphorus absorbency of seven wetland plants in Caiyun lake wetland park in different seasons[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(1):645-652.
- [14] SHEN W Z, LI S S, MI M H, et al. What makes ditches and ponds more efficient in nitrogen control?[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 314:107409.
- [15] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的“村面源理论与工程实践:生态拦截技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1697-1704. SHI W M, XUE L H, WANG J G, et al. A reduce-retain-reuse-restore technology for controlling rural non-point pollution in China:eco-retain technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1697-1704.
- [16] KUMWIMBA M N, ZHU B, MOORE M T, et al. Can vegetated drainage ditches be effective in a similar way as constructed wetlands? heavy metal and nutrient standing stock by ditch plant species[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 166:106234.
- [17] VYMAZAL J, BREZINOVA T D. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 118:97-103.
- [18] WU H L, WANG X Z, HE X J, et al. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598:697-703.
- [19] LIANG M Q, ZHANG C F, PENG C L, et al. Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2):309-316.
- [20] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1571-1575. JIN S Q, ZHOU J B, ZHU X L, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1571-1575.
- [21] KUMWIMBA M N, DZAKPASU M, ZHU B, et al. Uptake and release of sequestered nutrient in subtropical monsoon ecological ditch plant species[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227:1-13.
- [22] 周晓燕, 贾涛, 杨涓, 几种水生植物去污能力比较研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(21):36-38, 114. ZHOU X Y, JIA T, YANG J, et al. Study on purification ability of four different hydrophytes[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(21):36-38, 114.
- [23] 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 & Environment*, 2020, 299:106989.
- [24] 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, et al. 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.
- [25] 赵建宁, 张贵龙, 刘红梅, 等. 农田排水氮磷拦截潜流坝的设计与运行[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2):88-92. ZHAO J N, ZHANG G L, LIU H M, et al. Design and operation of subsurface flow dam for intercepting nitrogen and phosphorus of farmland drainage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2):88-92.
- [26] BAKER B H, KROGER R, PREVOST J D, et al. A field-scale investigation of nutrient and sediment reduction efficiencies of a low-technology best management practice: low-grade weirs[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91:240-248.
- [27] LITTLEJOHN K A, POGANSKI B H, KROGER R, et al. Effectiveness of low-grade weirs for nutrient removal in an agricultural landscape in the Lower Mississippi Alluvial Valley[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131:79-86.
- [28] CAI M, ZHANG X, ABDELHAFEZ A A, et al. Feasibility of improving nitrogen removal by integrating the rice straw and zeolite with drainage ditches for farmland runoff control[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 21(4):101359.
- [29] BLANKENBERG A G B, HAARSTAND K, SOVIK A K. Nitrogen retention in constructed wetland filters treating diffuse agriculture pollution[J]. *Desalination*, 2008, 226(1/2/3):114-120.
- [30] CUI N X, ZHANG X, CAI M, et al. Roles of vegetation in nutrient removal and structuring microbial communities in different types of agricultural drainage ditches for treating farmland runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 155:105941.
- [31] 王孜颜, 罗梅, 陈国梁, 等. 长广溪清水廊道新型生态沟技术中试试验研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(3):91-95. WANG Z Y, LUO M, CHEN G L, et al. Pilot experimental study of a novel ecological ditch technique for clear water gallery construction on Changguangxi River[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 40(3):91-95.
- [32] WANG W H, WANG Y, LI Z, et al. Effect of a strengthened ecological floating bed on the purification of urban landscape water supplied with reclaimed water[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622:1630-1639.
- [33] 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.
- [34] WOOD S L, WHEELER E F, BERGHAGE R D, et al. Temperature effects on wastewater nitrate removal in laboratory-scale constructed wetlands[J]. *Transactions of the Asae*, 1999, 42(1):185-190.
- [35] KUMWIMBA M N, ZHU B, WANG T, et al. Nutrient dynamics and retention in a vegetated drainage ditch receiving nutrient-rich sewage at low temperatures[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741:140268.
- [36] LI S M, WANG X L, TU J M, et al. Nitrogen removal in an ecological ditch based on an orthogonal test[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227:1-9.
- [37] 徐涵, 苏国军, 袁永坤, 等. 不同形式生态沟渠截除农田径流污染物效果分析[J]. *人民长江*, 2016, 47(21):9-14. XU H, SU G J, YUAN Y K, et al. Impact of different layout of ecological ditches on pollutant removal efficiency from agricultural runoff[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(21):9-14.
- [38] 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. LIU F X, WANG J L, FU Z S, et al. Comparative research on effects of ecological ditches different in specification treating pollutants in drainage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):561-570.
- [39] ZACHRITZ W H, HANSON A T, SAUCEDA J A, et al. Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 39(1):16-23.
- [40] SAEED T, SUN G Z. A comparative study on the removal of nutrients and organic matter in wetland reactors employing organic media[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(2):439-447.
- [41] 郑于聪, 杨乾, 杨丹, 等. 芦苇和香蒲种间竞争对混合种植人工湿地污染河水净化特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(2):156-163. ZHENG Y C, YANG Q, YANG D, et al. Effects of competition between *Phragmites australis* and *Typha orientalis* on the purification of polluted river water in a mixed-planted surface flow constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2):156-163.
- [42] 施思. 水生植物净化不同浓度梯度污水能力试验研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017. SHI S. Aquatic plant purification different concentration gradient sewage experimental study ability[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2017.
- [43] 严国安, 李益健, 唐赢中. 水生植物系统对污水的处理及设计探讨[J]. *环境工程*, 1993, 11(2):16-21. YAN G A, LI Y J, TANG Y Z. Discussion on the treatment and design of aquatic plant systems for wastewater treatment[J]. *Environmental Engineering*, 1993, 11(2):16-21.
- [44] 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. LIU F X, WANG J L, FU Z S. Comparative research on effects of ecological ditches different in specification treating pollutants in drainage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):561-570.
- [45] ZHANG S N, LIU F, HUANG Z R, et al. Are vegetated drainage ditches effective for nitrogen removal under cold temperatures?[J]. *Biore-source Technology*, 2020, 301:122744.
- [46] 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, 304:9.
- [47] 张燕. 农田排水沟渠对氮磷的去除效应及管理措施[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013. ZHANG Y. Removal effect and management measures of nitrogen and phosphorus in agricultural drainage ditches[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013.

(责任编辑:叶飞)