

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.059

芦苇和香蒲组合对北方农田排水沟氮磷去除影响与优选

王雅楠 李仙岳 史海滨 陈宁 郭淑豪 黄悦

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 北方农田排水沟中氮磷含量高,是下游水体富营养化的主要来源,为了提高排水沟中氮(N)、磷(P)去除效果,在内蒙古河套灌区通过盆栽试验,针对排水沟中3种氮磷浓度(低、中、高)设置芦苇、香蒲与芦苇+香蒲3种植物组合模式,每种模式水生植物设3种植植密度(15、30、50株/m²),包括空白对照共30个处理。研究了植物组合模式和种植密度对不同排水浓度氮磷去除的影响,并基于熵权TOPSIS模型对不同处理去除效果进行了综合评价。结果表明,针对不同氮磷浓度水体,单一水生植物与组合水生植物在不同种植密度下对水体中总氮(TN)、总磷(TP)均具有较高去除效率,其中组合模式下对TN平均去除率比单一采用芦苇和香蒲分别提高7.41、15.61个百分点,TP平均去除率分别提高11.71、19.32个百分点。另外,水生植物对TN、TP去除率与种植密度呈正比,相比种植密度15、30株/m²,高密度种植(50株/m²)对TN平均去除率分别提升4.75、1.61个百分点,TP平均去除率分别提升6.58、2.64个百分点。同时,3种组合模式对TN、TP去除率与水体浓度呈正相关关系,其中高氮磷浓度下水生植物对TN平均去除率比中、低氮磷浓度分别提高2.78、18.56个百分点,TP平均去除率分别提高4.24、10.63个百分点。通过熵权TOPSIS评价显示,在低、中、高氮磷浓度下组合模式芦苇+香蒲按照低密度(15株/m²)种植时综合评价最高,氮磷去除率与经济成本综合效益最优。研究结果对北方农田排水沟应用芦苇与香蒲植物修复具有指导作用。

关键词: 排水沟水体; 氮磷去除; 植物组合模式; 种植密度; 熵权TOPSIS

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0628-10

OSID:



Synergistic Effects and Optimized Configuration of Reed and Cattail Co-planting Systems on Nitrogen and Phosphorus Removal in Northern Agricultural Drainage Ditches

WANG Ya'nan LI Xianyue SHI Haibin CHEN Ning GUO Shuhao HUANG Yue

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The high content of nitrogen and phosphorus in the northern farmland drainage ditch is the main source of eutrophication in the downstream water body. In order to improve the removal effect of nitrogen and phosphorus in the drainage ditch, a pot experiment was carried out in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia. According to the low, medium and high nitrogen and phosphorus concentrations in the drainage ditch, three plant combination modes of reed, cattail and reed + cattail were set up, and three planting densities of 15 plants/m², 30 plants/m² and 50 plants/m² were set up for each mode of aquatic plants, including 30 treatments in the blank control. The effects of plant combination patterns and planting density on the purification of nitrogen and phosphorus at different drainage concentrations were studied, and the purification effects of different treatments were comprehensively evaluated based on the entropy weight TOPSIS model. The results showed that for different concentrations of nitrogen and phosphorus in water, single aquatic plants and combined aquatic plants had higher removal efficiency of TN and TP in water under different planting densities. The average removal rate of TN under the combined mode was 7.41 percentage points and 15.61 percentage points higher than that of single reed and cattail, and the average removal rate of TP was increased by

收稿日期: 2024-03-15 修回日期: 2024-04-28

基金项目: 内蒙古科技计划项目(2022YFHH0039)、内蒙古水利科技计划项目(NSK202103)和国家重点研发计划项目(2021YFC3201202)

作者简介: 王雅楠(2001—),女,硕士生,主要从事农田水环境处理研究,E-mail: wangyn0005@163.com

通信作者: 李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农田生态环境效应研究,E-mail: lixianyue80@126.com

11.71 percentage points and 19.32 percentage points, respectively. In addition, the removal rate of TN and TP by aquatic plants was proportional to the planting density, compared with the planting density of 15 plants/m² and 30 plants/m². The average removal rates of TN were increased by 4.75 percentage points and 1.61 percentage points, respectively, and the average removal rates of TP were increased by 6.58 percentage points and 2.64 percentage points, respectively, under high planting density (50 plants/m²). At the same time, the removal rates of TN and TP in the three combined modes were positively correlated with the water concentration. The average removal rates of TN by aquatic plants at high nitrogen and phosphorus concentrations were 2.78 percentage points and 18.56 percentage points higher than those at medium and low nitrogen and phosphorus concentrations, respectively, and the average removal rates of TP were increased by 4.24 percentage points and 10.63 percentage points, respectively. The entropy weight TOPSIS evaluation showed that the comprehensive evaluation was the highest when the combination mode of reed + cattail was planted at low density (15 plants/m²) under low, medium and high nitrogen and phosphorus concentrations, and the comprehensive benefits of nitrogen and phosphorus removal rate and economic cost were the best. The research results had a guiding role in the phytoremediation of reeds and cattails in northern farmland drainage ditches.

Key words: water of drainage ditch; nitrogen and phosphorus removal; plant combination model; planting density; entropy weight TOPSIS

0 引言

我国是化肥和农药使用大国,化肥年使用量从1978年的 8.84×10^6 t增长到2021年的 5.19×10^7 t,但利用效率仍较低,目前不足1/3^[1]。当强降雨或灌溉后,大部分肥料通过农田地表径流和地下渗透,再经过排水沟等方式进入附近水体,导致严重的水环境问题^[2],是农业面源污染的主要来源^[3]。2020年第二次全国污染普查公报显示,农田排水中的总氮(TN)、氨氮和总磷(TP)分别占全国水污染物排放量的46.5%、22.4%和67.2%^[4]。可见,降低或去除排水中氮磷是缓解农业面源污染的重要途径。

水生植物通过吸附或吸收作用、协同微生物降解等方式能直接或间接降低水体中的氮磷含量,是净化农田排水污染的重要措施^[5-7]。影响水生植物氮磷去除能力的因素较多^[8],其中组合模式和种植密度对其净化效果影响较大。杨帆等^[9]选取芦苇、香蒲、千屈菜、菖蒲等10种水生植物为研究对象,在室内静水条件下发现不同植物对TN、TP的去除率分别为64.96%~86.03%、64.64%~85.12%,其中芦苇效果最好。而且,ZHENG等^[10]指出,芦苇与香蒲的组合结构可以提高其净化效果。另外,不同水生植物对水体中氮磷浓度阈值要求不同,超过水生植物容忍适宜浓度,生长会受到抑制^[11]。比如,水浮莲对水体中营养盐浓度阈值高于水葫芦,当水体中氮磷等浓度偏低时,水体叶绿素a含量降低,净化效果减弱^[12]。李春华等^[13]研究发现,水生植物种植密度过大或过小都不利于浅水湖泊的健康。种植密度过高时水生植物衰亡腐解,会加速湖泊沼泽

化,而种植密度过小时水生植物对藻类的营养竞争和化感作用不明显,导致水体生态系统不稳定、水体自净能力降低等^[14]。目前,已经开展的水生植物净化水体富营养化的研究主要集中于单一水生植物净化^[15-18],且主要针对湖泊富营养净化为主。而北方排水沟中氮磷含量与湖泊中差异较大,且缺乏同时考虑不同水生植物组合和不同种植密度下的综合净化效果研究。由于影响水生植物净化因素较多,筛选最优模式工作量大,通过试验并结合数学分析是优化并筛选出合理方案的重要途径^[19]。目前常用的水体净化评价方法主要有单因子评价法^[20]、主成分分析法^[21]、层次分析法^[22]、灰色关联度分析法^[23]、模糊隶属度综合评价法^[24]和熵权TOPSIS^[25]等。以上评价方法各有优缺点,侧重点也不同^[26-27]。其中,熵权TOPSIS模型是一种逼近理想解的多属性排序法,其根据计算样本靠近/偏离正、负理想解的相对距离来评价样本性能,避免数据的主观性,不需要目标函数,能够很好地刻画多个影响指标的综合影响力度^[28]。熵权TOPSIS模型在耕地质量^[29-30]、灌水施肥^[31]等方面的评价已被大量研究,但在水体净化方面的评价目前相对薄弱。

为此,针对北方农田排水沟不同氮磷浓度水体,本文选取芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha Linn*)两种北方常见的挺水植物为受试材料,利用盆栽试验设置不同组合模式和种植密度,探索北方典型水生植物组合模式和种植密度对不同农田排水浓度的响应规律,并基于熵权TOPSIS模型对不同处理氮磷去除效果进行综合评价,优选出适宜北方农田排水浓度的最佳水生植物种植方案,以期为北方基于水生植物的农田排水沟污染去除提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023年5—7月在内蒙古河套灌区义长灌域联星村节水控盐减污综合试验站(41.16°N, 108.26°E)进行。该地区夏季高温炎热,冬季寒冷干燥,属典型温带大陆性气候,多年平均降雨量130~200 mm,降雨主要集中在6—8月,占全年降雨量的63%~70%,多年平均气温为7℃左右,平均蒸发量高达2 200 mm。灌区年引黄水量为 $4.5 \times 10^9 \sim 4.7 \times 10^9 \text{ m}^3$,而年排水量为 $4.0 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,2001—2020年灌区内年平均TN、TP质量分别为565.23 kg和108.93 kg^[32],且大部分排入大型多功能湖泊乌梁素海中,所以灌区农田排水是乌梁素海产生富营养化的主要因素。

1.2 试验设计

试验采用盆栽方式进行,塑料盆上口径为50 cm,下口径为40 cm,高为43 cm,盆下层铺20 cm底泥,加水至40 cm处,并放置在室外开阔空地上,

上方搭建透光塑料棚用于遮雨。通过调研当地排水沟TN、TP和水生植物特点,试验设置3种排水水质,包括低浓度(TN质量浓度5 mg/L;TP质量浓度0.5 mg/L)、中浓度(TN质量浓度15 mg/L;TP质量浓度1 mg/L)和高浓度(TN质量浓度30 mg/L;TP质量浓度2.0 mg/L);3种水生植物种植密度(15、30、50株/m²)和3种水生植物配置模式(芦苇,香蒲,芦苇+香蒲),另设3个无水生植物的空白对照,共计30个处理,每个处理3个重复,共90盆(表1)。试验前水生植物先在自来水中预培养15 d,选取长势良好的水生植物用于试验。各处理组中芦苇、香蒲株高经统一修剪后均为40 cm,芦苇茎粗为(0.49±0.05) cm、鲜质量为(15.88±0.85) g;香蒲茎粗为(1.20±0.11) cm、鲜质量为(43.42±0.90) g。底泥取自试验站排水沟,去除大颗粒物后均匀混合。试验用水的氮源由硝酸钾(KNO₃)、氯化铵(NH₄Cl)配置,磷源由磷酸二氢钾(KH₂PO₄)配置。每隔5 d补充纯净水使盆内水深保持在40 cm处。

表1 试验处理

Tab.1 Experimental treatment

处理	TN 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	TP 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	种植密度/ (株·m ⁻²)	处理	TN 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	TP 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	种植密度/ (株·m ⁻²)	处理	TN 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	TP 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	种植密度/ (株·m ⁻²)
L11	5.0	0.5	15	L21	15.0	1.0	15	L31	30.0	2.0	15
L12	5.0	0.5	30	L22	15.0	1.0	30	L32	30.0	2.0	30
L13	5.0	0.5	50	L23	15.0	1.0	50	L33	30.0	2.0	50
P11	5.0	0.5	15	P21	15.0	1.0	15	P31	30.0	2.0	15
P12	5.0	0.5	30	P22	15.0	1.0	30	P32	30.0	2.0	30
P13	5.0	0.5	50	P23	15.0	1.0	50	P33	30.0	2.0	50
LP11	5.0	0.5	15	LP21	15.0	1.0	15	LP31	30.0	2.0	15
LP12	5.0	0.5	30	LP22	15.0	1.0	30	LP32	30.0	2.0	30
LP13	5.0	0.5	50	LP23	15.0	1.0	50	LP33	30.0	2.0	50
CK1	5.0	0.5	0	CK2	15.0	1.0	0	CK3	30.0	2.0	0

注:L表示水生植物芦苇,P表示水生植物香蒲,LP表示芦苇+香蒲。

1.3 样品采集与测定方法

试验开始后每隔10 d用250 mL聚乙烯瓶采集水样,并在1~2 d内完成测定,不能及时测定的于4℃冷藏。TN浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP浓度采用过硫酸钾-钼酸铵分光光度法测定^[4],所有样品分析均做3次重复,试验结果均取其平均值。

1.4 熵权 TOPSIS 模型

熵权 TOPSIS 模型是一种逼近理想解的多属性排序法,通过计算评价对象与最优解、最劣解的相对贴切度 o_m ,实现评价对象与最优解、最劣解排序,能反映不同维度指数的综合影响力。该方法对数据分布及样本含量没有严格限制,数据计算简单易行。

具体操作步骤如下:

(1) 原始数据同趋势化

为避免量纲造成的影响,首先对指标进行标准化处理。根据指标含义,主要将指标分为正向指标(取值越大越好)及逆向指标(取值越小越好)。标准化计算式为

$$X_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & (\text{正向指标}) \\ \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & (\text{逆向指标}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\max(x_{ij})$ —— j 指标中最大值

$\min(x_{ij})$ —— j 指标中最小值

(2) 标准化矩阵构建

构建标准化矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z 中每个元素标准化公式为

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

式中 n——试验处理数量

(3) 正、负理想解确定

正理想解为

$$Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+) = (\max(z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}), \max(z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}), \dots, \max(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm})) \quad (4)$$

负理想解为

$$Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-) = (\min(z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}), \min(z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}), \dots, \min(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm})) \quad (5)$$

(4) 指标信息熵计算

j 指标信息熵 E_j 为

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \ln z_{ij} \quad (6)$$

(5) 权重计算

j 指标权重 w_j 为

$$w_j = (1 - E_j) / \sum_{i=1}^n (1 - E_j) \quad (7)$$

(6) 加权矩阵构建

标准化矩阵 Z 每列与对应的权重相乘, 得加权矩阵

$$Z_1 = \begin{bmatrix} w_1 z_{11} & w_2 z_{12} & \cdots & w_m z_{1m} \\ w_1 z_{21} & w_2 z_{22} & \cdots & w_m z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_1 z_{n1} & w_2 z_{n2} & \cdots & w_m z_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(7) 计算各评价指标与最优及最劣向量之间差距

定义第 i 个评价对象与最大值的加权距离为 D_i^+ , 与最小值的加权距离为 D_i^- , 计算式为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_i^+ - z_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_i^- - z_{ij})^2} \quad (10)$$

(8) 评价对象与最优方案接近程度

评价对象与最优方案接近程度 C_i 为

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (11)$$

式中 C_i 在 0~1 之间, 值越大评价对象越优。

1.5 氮磷去除率计算

为分析植物对水体中氮磷污染物的削减效果, 以氮磷污染物去除率作为评价标准, 去除率越大表示植物对氮磷去除效果越好。计算公式为

$$R_v = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中 R_v ——氮磷去除率, %

C_0 ——氮磷初始质量浓度, mg/L

C_1 ——试验结束时氮磷质量浓度, mg/L

1.6 水生植物种植成本

通过调研当地市面在售芦苇与香蒲价格, 取其平均值, 按照芦苇 0.8 元/株、香蒲 1.15 元/株进行计算, 得到低、中、高 3 种水生植物种植密度 (15、30、50 株/m²) 下的水生植物种植成本 (表 2)。

表 2 不同种植密度下水生植物成本

Tab. 2 Aquatic plant costs under different planting densities

	densities			元/m ²
处理	芦苇	香蒲	芦苇 + 香蒲	
低密度	12.00	17.25	14.63	
中密度	24.00	34.50	29.25	
高密度	40.00	57.50	48.75	

1.7 数据分析与处理

使用 Excel 2019 计算数据平均值和标准误差, OriginPro 2021、Surfer 23 软件进行绘图。采用 IBM SPSS 27 进行数学统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同水生植物组合模式和种植密度对氮磷去除的影响

初始阶段, 水生植物生长十分迅速, 各处理组 TN、TP 浓度随时间增加而显著降低 (图 1), 特别在 0~10 d, TN、TP 浓度迅速下降。0~60 d, 低、中、高浓度下芦苇 + 香蒲组合氮磷浓度下降最快, 芦苇次之, 香蒲最低。前 30 d 内, 在低浓度下, 3 种植物组合模式平均 TN 浓度下降由慢到快依次为: 香蒲组 (2.532 mg/L)、芦苇组 (2.203 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合 (1.484 mg/L), 平均 TP 浓度下降由慢到快依次为: 香蒲组 (0.183 mg/L)、芦苇组 (0.180 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合 (0.098 mg/L)。在中浓度下, 3 种植物组合模式平均 TN 浓度下降由慢到快依次为: 香蒲组 (4.486 mg/L)、芦苇组 (3.422 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合 (2.189 mg/L), 平均 TP 浓度下降由慢到快依次为: 香蒲组 (0.348 mg/L)、芦苇组 (0.249 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合 (0.155 mg/L)。在高浓度下, 3 种植物组合模式平均 TN 浓度下降由慢到快依次为: 香

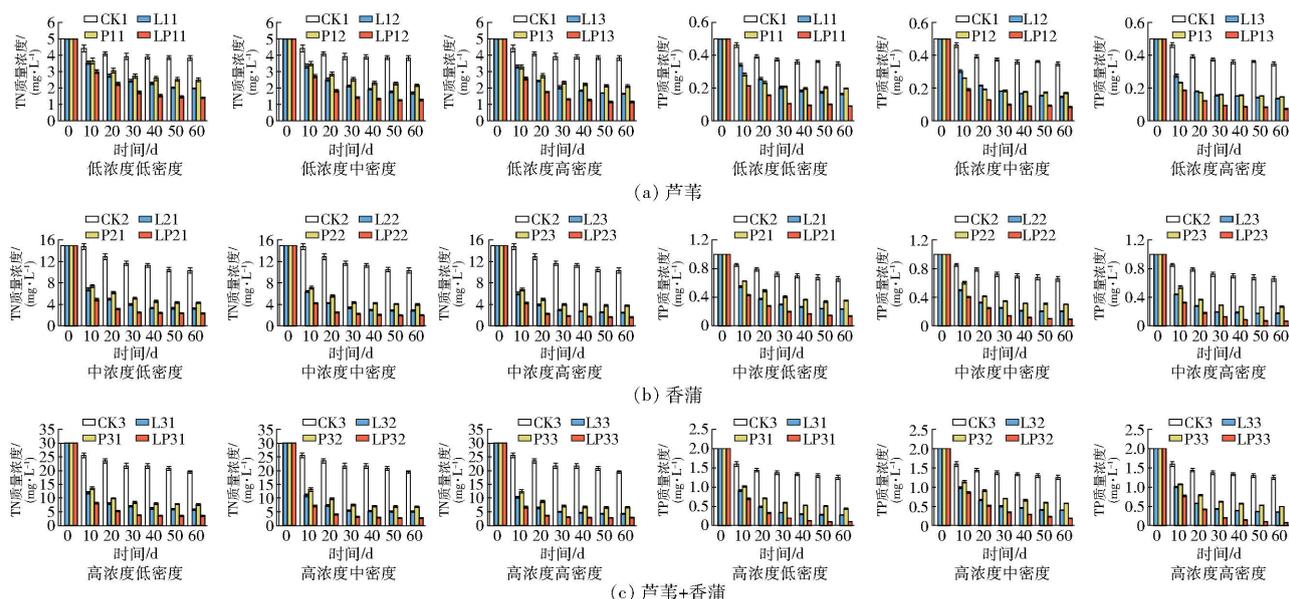


图1 不同处理下 TN、TP 质量浓度随时间变化

Fig. 1 TN and TP concentrations changes with time under different treatments

蒲组(7.660 mg/L)、芦苇组(5.851 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合(3.315 mg/L), 平均 TP 浓度下降由慢到快依次为: 香蒲组(0.640 mg/L)、芦苇组(0.424 mg/L)、芦苇 + 香蒲组合(0.250 mg/L)。

30~60 d 期间, 氮磷浓度变化范围较小, 芦苇组 TN、TP 质量浓度变化范围分别为 0.41~1.27 mg/L 和 0.018~0.100 mg/L, 香蒲组 TN、TP 质量浓度变化范围为 0.22~0.79 mg/L 和 0.01~0.15 mg/L, 芦苇 + 香蒲组合下 TN、TP 质量浓度变化范围为 0.16~0.39 mg/L 和 0.013~0.16 mg/L, 可见随着试验时间的增长, 水生植物对营养物质需求量达到

饱和。经过 60 d 水生植物吸收, 尽管各处理下水体中氮磷浓度的变化规律并不一致, 但有水生植物各处理 TN、TP 浓度明显低于无水生植物 CK 处理, 说明水生植物能够有效降低水体中 TN、TP 浓度, 另外水生植物组合条件下氮磷去除效果更好。

2.2 水体氮磷去除率对水生植物组合模式和种植密度的响应

试验过程中, 组合植物平均 TN 去除率比芦苇和香蒲分别提高 7.41、15.61 个百分点, 平均 TP 去除率分别提高 11.71、19.32 个百分点(表 3), 组合植物对 TN、TP 去除率较单一植物呈现出更好效果^[33-34]。

表3 不同处理下水生植物对 TN、TP 去除率的影响

Tab. 3 Effects of aquatic plants on TN and TP removal rates under different treatments

处理	TN 去除率			TP 去除率			
	芦苇	香蒲	芦苇 + 香蒲	芦苇	香蒲	芦苇 + 香蒲	
低浓度	低密度	(60.75 ± 0.65) ^f	(50.07 ± 2.50) ^e	(71.89 ± 0.75) ^h	(67.06 ± 0.92) ^g	(60.38 ± 0.60) ^h	(81.85 ± 0.18) ^h
	中密度	(65.94 ± 1.60) ^e	(56.43 ± 1.52) ^d	(74.48 ± 1.16) ^g	(70.79 ± 0.68) ^f	(66.03 ± 0.91) ^f	(83.32 ± 0.52) ^g
	高密度	(67.20 ± 0.39) ^e	(57.71 ± 1.70) ^d	(77.19 ± 0.77) ^f	(72.79 ± 0.78) ^e	(70.87 ± 0.43) ^d	(85.58 ± 0.74) ^f
中浓度	低密度	(78.83 ± 0.91) ^d	(71.16 ± 0.80) ^c	(84.56 ± 0.47) ^e	(76.51 ± 0.59) ^d	(64.49 ± 0.72) ^g	(86.45 ± 0.31) ^e
	中密度	(81.02 ± 0.85) ^c	(73.41 ± 1.23) ^b	(86.86 ± 0.49) ^d	(79.32 ± 0.57) ^c	(69.74 ± 0.60) ^e	(90.53 ± 0.27) ^d
	高密度	(83.74 ± 0.65) ^a	(74.75 ± 0.91) ^b	(89.35 ± 0.48) ^{bc}	(82.32 ± 0.63) ^b	(73.19 ± 1.10) ^c	(93.60 ± 0.10) ^e
高浓度	低密度	(80.80 ± 0.78) ^c	(74.50 ± 1.15) ^b	(88.45 ± 0.52) ^c	(79.96 ± 0.51) ^c	(70.94 ± 0.29) ^d	(90.54 ± 0.09) ^d
	中密度	(83.14 ± 0.84) ^b	(77.33 ± 1.03) ^a	(90.67 ± 0.35) ^a	(82.40 ± 0.21) ^b	(75.30 ± 0.09) ^b	(96.16 ± 0.12) ^a
	高密度	(85.63 ± 0.51) ^a	(77.90 ± 0.82) ^a	(90.31 ± 0.48) ^{ab}	(86.25 ± 0.26) ^a	(77.98 ± 0.77) ^a	(94.78 ± 0.19) ^b

注: 同列数值后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

水生植物在中密度种植下平均 TN 去除率较低密度种植提高 3.14 个百分点, 平均 TP 去除率提高 3.93 个百分点; 在高密度种植下平均 TN 去除率较中密度种植提高 1.61 个百分点, 平均 TP 去除率提高 2.64 个百分点, 说明水生植物对 TN、

TP 去除率随植物种植密度的增加不断增大^[35], 但随着种植密度的提升, 水生植物对 TN、TP 去除率增加的趋势明显减小, 其中香蒲在中密度种植较低密度种植平均 TN 去除率可提高 3.81 个百分点, 而高密度种植与中密度种植相比平均 TN 去除

率仅提高 1.06 个百分点。另外,在种植密度过高时甚至出现去除率降低的情况,芦苇+香蒲在高氮磷浓度高种植密度下(LP33)对 TN、TP 去除率较高氮磷浓度中种植密度下(LP32)降低 1.38 个百分点。

高浓度下水生植物平均 TN 去除率比中浓度和低浓度分别提高 2.78、18.56 个百分点,平均 TP 去除率分别提高 4.24、10.63 个百分点,可见不同植物组合模式在高浓度水体中对 TN、TP 去除率更好,即水体中氮磷浓度与水生植物对 TN、TP 的吸收量呈正相关关系^[36],但随着氮磷浓度增加,水生植物对 TN、TP 去除率增加的趋势明显减小,其中芦苇在中浓度下较低浓度平均 TN 去除率提高 16.57 个百分点,而高浓度较中浓度而言平均 TN 去除率仅提高 1.99 个百分点。

2.3 基于熵权 TOPSIS 的水体氮磷去除综合评价

利用水生植物来净化水体,不仅要考虑其对

污染物的去除率,同时要考虑经济成本问题。以水生植物对 TN、TP 去除率及单位面积种植水生植物成本为评价指标计算不同浓度下各指标所占客观权重(表 4),得到低、中、高浓度下均以水生植物成本所占权重最大。对各处理理想解的相对接近度 C_i 进行排序, C_i 越大表明该处理综合评价越高(表 5)。低浓度下由大到小依次为 LP11、L11、LP12、L12、P11、LP13、L13、P12、CK1、P13,中浓度下由大到小依次为 LP21、L21、L22、LP22、P21、L23、LP23、P22、CK2、P23,高浓度下由大到小依次为 LP31、L31、LP32、L32、P31、L33、P32、LP33、CK3、P33,可见低浓度下 LP11 处理综合评分最高,为 0.822;中浓度下 LP21 处理综合评分最高,为 0.814;高浓度下 LP31 处理综合评分最高,为 0.823。因此,在 3 种氮磷浓度下,芦苇+香蒲按照低密度(15 株/ m^2)种植时其与评价对象最优方案的接近程度最大。

表 4 熵值法计算权重结果

Tab. 4 Weight results of entropy method

评价指标	低浓度			中浓度			高浓度		
	信息熵	信息效用值	权重	信息熵	信息效用值	权重	信息熵	信息效用值	权重
TN 去除率	0.945	0.055	0.277 53	0.951	0.049	0.251 94	0.951	0.049	0.253 73
TP 去除率	0.946	0.054	0.268 52	0.945	0.055	0.281 26	0.947	0.053	0.273 88
水生植物成本	0.909	0.091	0.453 95	0.909	0.091	0.466 80	0.909	0.091	0.472 39

表 5 TOPSIS 评价结果

Tab. 5 TOPSIS evaluation results

低浓度					中浓度					高浓度				
处理	D_i^+	D_i^-	C_i	排序	处理	D_i^+	D_i^-	C_i	排序	处理	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
L11	0.276	0.732	0.726	2	L21	0.228	0.777	0.774	2	L31	0.222	0.782	0.779	2
L12	0.333	0.686	0.674	4	L22	0.320	0.711	0.689	3	L32	0.319	0.715	0.691	4
L13	0.494	0.620	0.557	7	L23	0.488	0.659	0.574	6	L33	0.488	0.666	0.577	6
P11	0.410	0.608	0.597	5	P21	0.366	0.649	0.639	5	P31	0.337	0.670	0.665	5
P12	0.489	0.537	0.524	8	P22	0.482	0.555	0.535	8	P32	0.468	0.581	0.554	7
P13	0.714	0.507	0.415	10	P23	0.718	0.513	0.417	10	P33	0.715	0.531	0.426	10
LP11	0.182	0.843	0.822	1	LP21	0.190	0.830	0.814	1	LP31	0.183	0.849	0.823	1
LP12	0.344	0.781	0.694	3	LP22	0.349	0.772	0.689	4	LP32	0.350	0.801	0.696	3
LP13	0.571	0.746	0.566	6	LP23	0.579	0.738	0.560	7	LP33	0.583	0.723	0.554	8
CK1	0.739	0.674	0.477	9	CK2	0.730	0.683	0.483	9	CK3	0.726	0.687	0.486	9

2.4 水生植物组合模式和种植密度优选

水生植物组合模式与种植密度对其综合评价结果有显著影响,对综合评分进行寻优,得到水生植物净水的最佳区间(图 2,横坐标为 0 表示全部种植芦苇,100% 表示全部种植香蒲,0~100% 中任意数字表示香蒲在植物组合中占比)。在低、中、高浓度下,当香蒲在植物组合中占比为 48%~52%、种植密度为 14~18 株/ m^2 时,综合评分较高。当香蒲在植物组合中占比为 80%~100%、水生植物种植密

度为 10~20 株/ m^2 时,高浓度下综合评分相对于中浓度与低浓度较高,水生植物种植密度高于 20 株/ m^2 或低于 10 株/ m^2 时,综合评分都相对较低。

3 讨论

芦苇和香蒲是北方地区两种最常见的高等水生植物,其植株高大、根系发达、生物量大^[10],对于营养元素有很好的富集过程,经常被用作人工湿地净化物种来削减水体中的氮、磷元素^[37]。然而这两种

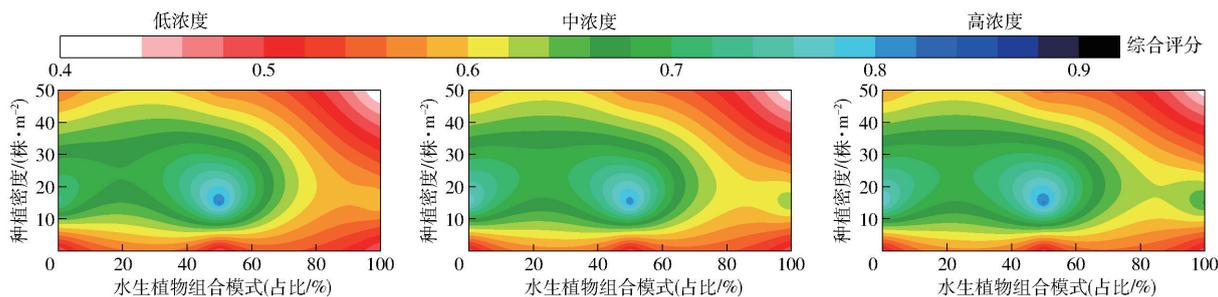


图2 水生植物组合模式和种植密度对综合评分的影响

Fig. 2 Effect of aquatic plant combination pattern and planting density on comprehensive score

挺水性水生植物对于污染物的去除效果受多方面因素影响,对于污染物的去除效果并不一致。研究表明,挺水性水生植物修复富营养化水体主要通过植物根系的吸收来实现,根系形态以及植物所处环境都会影响其对氮磷去除效果^[38],并且芦苇具有优于香蒲的微生物降解功能及脱氮除磷功能^[39]。本试验中,香蒲初始生物量高于芦苇,而对氮磷的去除效果却低于芦苇,考虑是因为香蒲茎组织较粗,根系环境不利于氧气交换,从而影响了其对营养物质的吸收^[40]。另外,单一水生植物芦苇低密度种植时在TOPSIS综合评价中排名第2,其无论是经济成本还是氮磷去除效果都仅次于芦苇+香蒲组合模式,而大量研究证明植物物种多样性可以增加生态系统功能的稳定性,如增加生物量产出、提高分解和回收生物基本营养物质的效率等^[41]。同时,芦苇和香蒲具有的许多共同特征使得这两个物种之间可能存在较强的种间相互作用^[42],种间相互作用可以显著增强其对氮磷去除的贡献^[10],多种植物混合种植往往比单一植物的氮磷去除效果更佳^[43]。因此,建议在富营养化水体修复管理过程中,应适当丰富物种多样性。此外,氮磷是水生植物生长必需的营养物质,在低浓度氮磷水平下其所提供的营养物质不能满足水生植物的正常生长,反而会限制水生植物的生长,而高浓度氮磷水平下不仅能够满足植物生长所需,同时高浓度氮磷使水体由上而下形成了不同浓度梯度,使得上覆水中氮磷向底泥扩散,为微生物吸收和利用提供了有利条件。与前人研究结果一致^[44-45],高浓度水体更有利于水生植物对营养物质的吸收^[36]。

水生植物适宜种植密度选取一直是研究工作的重点^[15],合理加大水生植物的种植密度能显著提升其对氮磷的去除效果,但有时较大的种植密度并不能带来较高的净水效果,水生植物种植密度过大时会引起水生植物死亡及种群间的竞争等情况,并且在高密度环境下,水生植物个体间根系对氮磷污染物的吸收竞争可能会降低个体积累^[46]。本试验中两种挺水性水生植物在生长过程中对资源竞争可能

主要集中于生长空间和有效光合辐射,较高的种植密度导致水生植物在有限的水体空间中产生水生竞争关系,水体中溶解氧含量降低,水生植物出现死亡分解,使得水生植物在生长期吸收的营养盐又释放回水体,成为水体营养物质的内源污染,从而降低了水生植物对水体中氮磷的去除效果,如本研究中LP33处理对TN、TP的去除率低于LP32处理,水生植物对TN、TP去除率与其种植密度呈现负相关。研究发现,水生植物凋落物腐烂分解过程中75% N和80% P能在一年内释放出来^[47]。因此在实际应用中应保持合理的种植密度,及时对过量水生植物进行收割非常重要。

本试验研究了植物组合模式和种植密度对不同浓度氮磷去除的影响,研究结果表明水生植物所处水体氮磷浓度越高去除效果越好,但高密度种植并不能带来最佳的净化效果,在考虑水生植物种植成本的基础上,基于熵权TOPSIS对不同处理进行综合评价,结果发现芦苇+香蒲按照低密度(15株/m²)种植时为适宜当地的最佳净水方案。北方地区排水沟不同于湖泊河流等大型流域,大多数排水沟断面尺寸较小且水位相对较浅,较高的种植密度会影响农田排水,容易淹没农田形成洪涝灾害,进而对后期管理维护带来不小的难题。有研究表明,挺水性水生植物较大的单位面积干物质残留量会增加水体的生物沉积量,加速沼泽化进程^[48]。因此,植物生物量过大也会增加生态修复工程负担。本研究得出种植密度15株/m²下既保证了较高的氮磷去除效率和经济效益,同时又减轻了排水沟负担。针对这一种植密度给出的收割建议为:在灌溉初期对灌区内排水沟进行一次彻底清淤收割,保证在排水沟过水流量最大的时间段水生植物对营养物质的去除效率,此外,不定期地对出现淤塞的渠段进行清理维护,以确保水生植物的健康生长和排水沟的正常运行。收割后的植物通过堆肥、发酵等手段处理后可作为农业肥料继续利用。每次收割后,对收割区域水生植物生长状况及净水能力进行监测和评估,并及时调整收割方案,以实现最佳管理效果。本研究

在静水条件下得出, 研究结果有一定局限性, 芦苇、香蒲、芦苇 + 香蒲 3 种植物组合模式和种植密度对不同农田排水浓度的响应规律, 对于利用水生植物净化沟道水体, 实现农区面源污染物截污净化仍具有一定的参考价值, 后续研究应补充在实际沟渠中的应用。

4 结论

(1) 针对不同氮磷浓度水体, 单一植物与组合植物在不同种植密度下对水体中 TN、TP 均具有较高的去除效率, 其中组合植物对 TN 平均去除率较芦苇和香蒲分别提高 7.41、15.61 个百分点, TP 平均去除率分别提高 11.71、19.32 个百分点。

(2) 水生植物对 TN、TP 去除率与种植密度成正

比, 相比种植密度为 15、30 株/ m^2 , 水生植物高密度种植(50 株/ m^2)对 TN 平均去除率分别提升 4.75、1.61 个百分点, TP 平均去除率分别提升 6.58、2.64 个百分点。

(3) 3 种植物组合模式对 TN、TP 去除率与水体浓度呈正相关关系, 其中高氮磷浓度下水生植物对 TN 平均去除率比中、低氮磷浓度分别提高 2.78、18.56 个百分点, TP 平均去除率分别提高 4.24、10.63 个百分点。

(4) 通过熵权 TOPSIS 综合评价得到, 在低、中、高氮磷浓度下芦苇 + 香蒲按照低密度(15 株/ m^2)种植时为该地区最优方案。当香蒲在植物组合中占比为 48% ~ 52%、种植密度为 14 ~ 18 株/ m^2 时, 氮磷去除率与经济成本综合效益最优。

参 考 文 献

- [1] ZOU L, LIU Y, WANG Y, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978—2017[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400.
- [2] SHENG L W, JUN S L, BING Z, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a modis-derived forelule index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 444 - 460.
- [3] HUANG J, ZHANG Y, BING H, et al. Characterizing the river water quality in China: recent progress and on-going challenges [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117309.
- [4] JI Y J, TIAN X, LIU G, 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.
- [5] 陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 等. 微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2850 - 2858. CHEN Youyuan, WU Yadong, SUN Ping, et al. Purification of slightly salt-alkaline water bodies by microorganism enhanced combined floating bed[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2850 - 2858. (in Chinese)
- [6] 叶春, 王博, 李春华, 等. 沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10): 2653 - 2659. YE Chun, WANG Bo, LI Chunhua, et al. Nutrient release process during decomposition of submerged macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10): 2653 - 2659. (in Chinese)
- [7] LI K, LIU L, YANG H, et al. Phytoremediation potential of three species of macrophytes for nitrate in contaminated water[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2016, 7(8): 1259 - 1267.
- [8] 桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 等. 不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2698 - 2705. SANG Yuxuan, YANG Jiale, XIONG Yi, et al. Comparative phosphorus accumulation and Ca - P content of two submerged plants in response to light intensity and phosphorus levels[J]. *Environmental Science*, 2019, 41(6): 2698 - 2705. (in Chinese)
- [9] 杨帆, 刘赢男, 焉志远, 等. 阿什河流域 10 种水生植物对水质氮磷的净化能力比较[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 708 - 714. YANG Fan, LIU Yingnan, YAN Zhiyuan, et al. Compare the water purification ability of ten aquatic macrophytes about nitrogen and phosphorus in Ashi River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 708 - 714. (in Chinese)
- [10] ZHENG Y, YANG D, DZAKPASU M, et al. Effects of plants competition on critical bacteria selection and pollutants dynamics in a long-term polyculture constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316: 123927.
- [11] 刘利华, 郭雪艳, 达良俊, 等. 不同富营养化水平对挺水植物生长及氮磷吸收能力的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2012(6): 39 - 45, 72. LIU Lihua, GUO Xueyan, DA Liangjun, et al. Effects of different levels of eutrophication on the emergent aquatic plant growth and the nitrogen and phosphorus absorption abilities[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 2012(6): 39 - 45, 72. (in Chinese)
- [12] 刘旻慧, 秦红杰, 张志勇, 等. 不同污染负荷下浮水植物对水体营养盐的去除及生理响应[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(11): 4304 - 4311. LIU Minhui, QIN Hongjie, ZHANG Zhiyong, et al. Nutrient removal and physiological response of floating macrophytes in different pollution loading waters[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(11): 4304 - 4311. (in Chinese)
- [13] 李春华, 叶春, 孔祥臻, 等. 浅水湖泊水生植物适宜生物量评估方法的探讨[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4644 - 4652.

- LI Chunhua, YE Chun, KONG Xiangzhen, et al. Preliminary idea on assessment of macrophyte optimal biomass in shallow lake[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 4644–4652. (in Chinese)
- [14] 叶春, 李春华. 太湖湖滨带现状与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] POSTMA J A, HECHT V L, HIKOSAKA K, et al. Dividing the pie: a quantitative review on plant density responses[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(4): 1072–1094.
- [16] 李琳, 岳春雷, 张华, 等. 不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4962–4970.
- LI Lin, YUE Chunlei, ZHANG Hua, et al. Correlation between water purification capacity and bacterial community composition of different submerged macrophytes[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 4962–4970. (in Chinese)
- [17] QIN H, ZHANG Z, LIU M, et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 753–762.
- [18] WU Q, HU Y, LI S, et al. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 451–456.
- [19] 高林林, 吴用, 杨书涵, 等. 河南省氮素农业面源污染风险评价与关键管控区识别[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 311–320.
- GAO Linlin, WU Yong, YANG Shuhan, et al. Risk assessment of nitrogen agricultural non-point source pollution and identification of key control areas in Henan Province[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 311–320. (in Chinese)
- [20] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 等. 贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 3798–3805.
- HE Xiaoli, WU Yanhong, ZHOU Jun, et al. Hydro-chemical characteristics and quality assessment of surface water in Gongga Mountain region[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3798–3805. (in Chinese)
- [21] 解文静, 王松, 娄山崇, 等. 山东南四湖上级湖水水质变化评价(2008—2014年)及成因分析[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 513–519.
- XIE Wenjing, WANG Song, LOU Shanchong, et al. Evaluation of temporal water quality change (2008—2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shandong Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2016, 28(3): 513–519. (in Chinese)
- [22] 陈源, 蔡震, 李金惠. 综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5316–5324.
- CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jinhui. Research on the screening method of priority pollutants with integrated environmental socio-economic indicators: example of E-waste dismantling[J]. *Environmental Sciences*, 2023, 44(9): 5316–5324. (in Chinese)
- [23] 王小焕, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入库水质评价及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 554–565.
- WANG Xiaohuan, SHAO Jing'an, WANG Jinliang, et al. Water quality assessment and its changing trends in the reservoir inflow and outflow along the Yangtze River mainstream in the Three Gorge Reservoir Area[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 37(2): 554–565. (in Chinese)
- [24] WANG Y X, YAN F C, BAI H C, et al. Effects of paclobutrazol on the physiological characteristics of malus halliana koehne seedlings under drought stress via principal component analysis and membership function analysis[J]. *Arid Land Research and Management*, 2019, 33(1): 97–113.
- [25] 冷仙, 曾源, 周键, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 1040–1053.
- LENG Xian, ZENG Yuan, ZHOU Jian, et al. Landscape conservation effectiveness assessment of nature reserves based on entropy weight-TOPSIS in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 43(3): 1040–1053. (in Chinese)
- [26] 王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 等. 杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1502–1511.
- WANG Shanshan, CAO Gongping, XU Mingwei, et al. Change and prediction of water purification function in the South Bank of Hangzhou Bay in the past 20 years[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1502–1511. (in Chinese)
- [27] ZHANG M, MA S, GONG J W, et al. A coupling effect of landscape patterns on the spatial and temporal distribution of water ecosystem services: a case study in the Jianghuai ecological economic zone, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110299.
- [28] HWANG C L, YOON K. *Methods for multiple attribute decision making*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981.
- [29] 解雪峰, 濮俊杰, 朱明, 等. 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5484–5492.
- XIE Xuefeng, PU Lijie, ZHU Ming, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5484–5492. (in Chinese)
- [30] 姜芸, 王军, 滕浩, 等. 基于 TOPSIS 模型的典型黑土区耕地质量评价及土壤侵蚀耦合协调分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 82–94.
- JIANG Yun, WANG Jun, TENG Hao, et al. Coupling coordination analysis of the quality evaluation of cultivated land and soil erosion in typical black soil areas using TOPSIS method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(12): 82–94. (in Chinese)

- [31] 张智,杨志,黎景来,等. 基于灰色关联与TOPSIS耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报,2021,52(9):302-311,330.
ZHANG Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):302-311,330. (in Chinese)
- [32] 易绍荣,冯雪娇,王宗伟,等. 基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J]. 农业环境科学学报,2023,42(11):2550-2559.
YI Shaorong, FENG Xuejiao, WANG Zongwei, et al. Spatial-temporal changes of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Hetao Irrigation District based on SWAT[J]. Journal of Agro-Environmental Sciences,2023,42(11):2550-2559. (in Chinese)
- [33] 李欢,吴蔚,罗芳丽,等. 4种挺水植物、4种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较[J]. 湿地科学,2016,14(2):163-172.
LI Huan, WU Wei, LUO Fangli, et al. The comparison of removal effect of total nitrogen and total phosphorus in simulated eutrophic water among 4 kinds of emergent plants, 4 kinds of submerged plants and their mixed communities[J]. Wetland Science,2016,14(2):163-172. (in Chinese)
- [34] 曾明颖,顾凡强,王仁睿. 不同水生植物种植模式对富营养化水体的净化效果研究[J]. 四川农业大学学报,2021,39(5):674-680.
ZENG Mingying, GU Fanqiang, WANG Renrui. Study on purification effect of different aquatic plant configuration modes on eutrophic water[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2021,39(5):674-680. (in Chinese)
- [35] 张来甲,叶春,李春华,等. 不同生物量苦草在生命周期的不同阶段对水体水质的影响[J]. 中国环境科学,2013,33(11):2053-2061.
ZHANG Laijia, YE Chun, LI Chunhua, et al. The effects of submerged macrophyte (*Vallisneria spiralis*) at different biomass levels in one-year life cycle on water quality[J]. China Environmental Science,2013,33(11):2053-2061. (in Chinese)
- [36] 秦红杰,张志勇,刘海琴,等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. 中国环境科学,2016,36(8):2470-2479.
QIN Hongjie, ZHANG Zhiyong, LIU Haiqin, et al. Growth characteristics and water purification of two free-floating macrophytes[J]. China Environmental Science,2016,36(8):2470-2479. (in Chinese)
- [37] LI L, HAN W, THEVS N, et al. A comparison of the functional traits of common reed (*Phragmites australis*) in Northern China: aquatic vs. terrestrial ecotypes[J]. Plos One,2014,9(2):e89063.
- [38] 张熙灵,王立新,刘华民,等. 芦苇、香蒲和蘆草3种挺水植物的养分吸收动力学[J]. 生态学报,2014,34(9):2238-2245.
ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al. Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetus*[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(9):2238-2245. (in Chinese)
- [39] 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 Yucong, YANG Qian, YANG Dan, et al. Effect of competition between reed and cattail species on purification characteristics of polluted river water in mixed planted constructed wetland[J]. Journal of Environmental Sciences,2022,42(2):156-163. (in Chinese)
- [40] BRIX H, DYHR-JENSEN K, LORENZEN B. Root-zone acidity and nitrogen source affects *Typha latifolia* L. growth and uptake kinetics of ammonium and nitrate[J]. Journal of Experimental Botany,2002,379(53):2441-2450.
- [41] CARDINALE B J, DUFFY J E, GONZALEZ A, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity[J]. Nature,2012,486(7401):59-67.
- [42] 王亚露,赵建宁,许彦晓,等. 种间竞争对香蒲与芦苇生长的影响[J]. 生态学报,2022,42(7):2891-2898.
WANG Yalu, ZHAO Jianing, XU Yanxiao, et al. Effects of interspecific competition on the growth of *Typha domingensis* and *Phragmites australis*[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2891-2898. (in Chinese)
- [43] 葛之葳,方水元,李川,等. 苏北溱湖芦苇和芦苇+香蒲群落中植物对湿地土壤N、P的固持效果[J]. 湖泊科学,2017,29(3):585-593.
GE Zhiwei, FANG Shuiyuan, LI Chuan, et al. Analysis of the plant N and P sequestration from common reed and common reed + cattail communities in wetland soil in Qinhu Lake of northern Jiangsu, China[J]. Journal of Lake Science,2017,29(3):585-593. (in Chinese)
- [44] 卢笑玥,赵雪,徐莉萍,等. 氮磷添加对黄土丘陵区撂荒地优势植物功能性状的影响[J]. 中国草地学报,2023,45(3):49-59.
LU Xiaoyue, ZHAO Xue, XU Liping, et al. Effects of nitrogen and phosphorus supplementation on functional traits of dominant plants in abandoned grassland in loess hilly area[J]. Chinese Journal of Grassland Science,2023,45(3):49-59. (in Chinese)

- microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 727: 138609.
- [30] SJOLLEMA S B, REDONDO-HASELERHARM P, LESLIE H A, et al. Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? [J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, 170: 259 – 261.
- [31] 韩锋, 刘亥扬, 王浩权, 等. 两种微塑料对生菜生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(8): 1698 – 1709. HAN Feng, LIU Haiyang, WANG Haoquan, et al. Effects of two microplastics on the growth and physiological characteristics in lettuce[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1698 – 1709. (in Chinese)
- [32] DONG Hegan, LIU Tone, HAN Zhiqian, et al. Determining time limits of continuous film mulching and examining residual effects on cotton yield and soil properties[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2015, 36(3): 677 – 684.
- [33] LIU Yiyang, XU Fangji, DING Liping, et al. Microplastics reduce nitrogen uptake in peanut plants by damaging root cells and impairing soil nitrogen cycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 443: 130384.
- [34] LAGARDE F, OLIVIER O, ZANELLA M, et al. Microplastic interactions with freshwater microalgae: hetero-aggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215: 331 – 339.
- [35] WU Xiang, HOU Huijie, LIU Yao, et al. Microplastics affect rice (*Oryza sativa* L.) quality by interfering metabolite accumulation and energy expenditure pathways: a field study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126834.
- [36] GAO Haihe, YAN Chanrong, LIU Qin, et al. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a Meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 484 – 492.
- [37] URBINA M A, CORREA F, ABURTO F, et al. Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140216.
- [38] 郑婷, 张海韵, 吕卫光, 等. 不同浓度和表面修饰的聚苯乙烯微塑料对水稻种子萌发、生长和氧化应激的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(3): 666 – 676. ZHENG Ting, ZHANG Haiyun, LÜ Weiguang, et al. Effects of polystyrene microplastics on seed germination, growth, and oxidative stress in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(3): 666 – 676. (in Chinese)
- [39] CECCANTI C, DAVINI A, LO PICCOLO E, et al. Polyethylene microplastics alter root functionality and affect strawberry plant physiology and fruit quality traits[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134164.
- [40] KATSUMITI A, LOSADA-CARRILLO M P, BARROS M, et al. Polystyrene nanoplastics and microplastics can act as Trojan horse carriers of benzo (*a*) pyrene to mussel hemocytes in vitro[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 22396.

(上接第 637 页)

- [45] 朱士江, 贵树彪, 徐文, 等. 4 种挺水植物在高浓度氮磷污染条件下耐受性试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(2): 34 – 38. ZHU Shijiang, GUI Shubiao, XU Wen, et al. Experimental study on tolerance of 4 emerging plants under high nitrogen and phosphorus pollution[J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2022(2): 34 – 38. (in Chinese)
- [46] JACOBS A, DE B L, DROUET T, et al. Phytoextraction of Cd and Zn with *Noccaea caerulea* for urban soil remediation: influence of nitrogen fertilization and planting density[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 116: 178 – 187.
- [47] 厉恩华, 刘贵华, 李伟, 等. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(6): 667 – 671. LI Enhua, LIU Guihua, LI Wei, et al. Decomposition rate and nitrogen and phosphorus dynamics of three kinds of hydrophyte in Lake Honghu[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 667 – 671. (in Chinese)
- [48] 李锋民, 陈琳, 姜晓华, 等. 水质净化与生态修复的水生植物优选指标体系构建[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(12): 2411 – 2422. LI Fengmin, CHEN Lin, JIANG Xiaohua, et al. Construction of aquatic plant optimization index system for water purification and ecological restoration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(12): 2411 – 2422. (in Chinese)