不同植物对富营养化水体中氮和磷的去除效果研究

刘娇妹

(1. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600;
2. 北京中铁生态环境设计院有限公司, 北京 102600)

摘要:【目的】研究不同水生植物对污染水体中氮、磷的去除效果, 为构建沟渠湿地系统提供支撑。【方法】选择我国水泽地区常见的芦苇、蒲草、空心菜和睡莲作为研究对象, 以轻度、中度、重度富营养化3种污染等级水体中氮和磷质量浓度的变化为依据, 分析4种水生植物对不同质量浓度污水中氮和磷的吸收效果, 同时对水生植物在不同生长阶段去除氮和磷的情况进行研究。【结果】芦苇、蒲草、空心菜在3种污染质量浓度水体中, 随着氮、磷污染质量浓度的增加, 脱氮、除磷效果有所增强; 脱氮方面, 芦苇、蒲草、空心菜在萌发期和生殖生长期脱氮效果最好; 除磷方面, 芦苇在营养生长期对磷的吸收最多, 蒲草和空心菜在萌发期对磷的吸收量大, 睡莲适应性有限, 脱氮除磷效果不是很好。【结论】综合考虑4种水生植物的脱氮除磷效果以及景观、经济价值, 选择芦苇、蒲草、空心菜3种挺水植物作为沟渠湿地生态修复优势植物种。

关键词: 水生植物; 脱氮除磷; 富营养化; 农业面源污染

中图分类号: X703

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022261

刘娇妹. 不同植物对富营养化水体中氮和磷的去除效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 97-103.

LIU Jiaomei. Study on the Removal Effect of Nitrogen and Phosphorus in Eutrophic Water by Different Plants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 97-103.

0 引言

【研究意义】近年来, 化肥、农药的大量施用引起的农业面源污染问题引起人们的关注和重视^[1]。随着最佳管理措施(BMPs)的推广, 植物在治理面源污染方面的应用研究得到了重视^[2-3]。排水沟渠中的水生植物在修复农业面源污染过程中起着十分重要的作用, 既可直接吸收氮、磷等营养物, 又可产生根区效应, 促进营养物质的氧化分解^[4-5]。由于不同的水生植物对污染物具有不同的吸附、吸收、降解、固定能力, 因此, 研究不同水生植物对污染水体的净化能力对于构建沟渠湿地生态系统非常重要^[6]。此外, 用水生植物对排水沟渠中的氮、磷等营养物进行吸附处理已成为当前营养型污水处理的一种新趋势, 既能达到污水净化的效果, 又可应用水生植物点缀美化环境, 具有很好的市场前景及推广价值^[7]。【研究进展】国内外有关植物对面源污染的净化研究主要以植被过滤带和人工湿地为主^[8]。在美国, 植被缓冲区是防治面源污染的有效措施, 有较好的环境效益和经济效

益。法国对植被缓冲带的试验研究也表明, 缓冲带可有效地降低农药莠去津, 氮约降低47%~100%^[9]。国内大量研究表明, 人工湿地对于TN、TP、COD、BOD、重金属等具有较高的去除效果, 可以获得污水处理与资源化的最佳生态效益、经济效益和社会效益^[10-11]。如晏维金等^[12]在六岔河流域面源污染的研究中发现, 在中等水文条件下, 水稻田-水塘湿地系统对总氮、总磷的截留率分别在50%和90%以上; 徐红灯等^[13]通过模拟试验, 研究排水沟渠对农田流失氮、磷的净化作用, 结果表明沟渠中的水生植物茭白和菖蒲对氮、磷的截留和转化有明显的促进作用。姜翠铃等^[14]在研究沟渠湿地时得出, 湿地系统能有效地截留氮磷污染物, 但湿地植物如果秋季不回收, 在冬季和初夏会产生严重的二次污染。【切入点】植物因其对水体中的氮、磷污染具有较好的净化效果, 在农业面源污染生态治理中具有非常重要的作用。但如何筛选恰当的水生植物, 从而构建高效的沟渠湿地生态系统, 以达到更好的降解效果, 仍是重要的研究方向。

【拟解决的关键问题】本研究通过分析不同水生植物对污染水体中氮、磷吸收的动态变化, 以及水生植物在不同生长阶段去除氮和磷的效果, 对水生植物进行筛选, 以期能够初步确定适宜进一步推广应用的植物,

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(70010364)

作者简介: 刘娇妹(1976-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事生态修复、水环境治理研究。E-mail: ljm627@126.com

为水生植物在面源污染治理中的应用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河水利科学院新乡节水试验基地, 试验基地占地面积约 2.0 万 m², 隶属黄河水利科学院节水与农业生态试验室, 是开展农业水资源高效利用与防旱抗旱技术研究以及节水产品计量认证的开放式试验场地。主要包括模拟降雨区、气象观测场、测坑区、田间试验区以及模拟试验大厅。拥有自动气象站、地中渗透仪、土壤墒情遥测系统等多种仪器设备和数据采集系统。

试验基地地处北纬 35°18', 东经 113°54', 属暖温带大陆性季风气候, 冬寒夏热, 秋凉春早, 年平均气温 14 °C; 7月最热, 平均 27.3 °C; 1月最冷, 平均 0.2 °C; 年平均降水量 656.3 mm, 年蒸发量 1 748.4 mm, 6—9月降水量最多, 为 409.7 mm, 占全年降水的 72%, 且多暴雨。年平均湿度 68%, 最大冻土深度 280 mm。

1.2 试验设计

试验设计主要包括植物选择与培养、营养液配制以及试验监测项目与方法。

1.2.1 植物选择与培养

根据生态学原理, 一般应选用当地或本地区天然湿地中存在的植物。综合考虑植物的易成活性、耐污染性以及经济性, 选择芦苇、蒲草、睡莲、空心菜为研究对象。植物来源为新乡周边地区典型水生植被, 通过人工野外采挖和市场购买的方式获得。对植物进行水洗, 冲去淤泥, 放进培养容器内进行一段时间的稳定, 然后用营养液水养。

根据研究目的, 对所选植物种类进行纯水培的方式种植。采用容器内静水培养方式, 半封闭环境, 保证所有植物水样自然条件一致。每种植物分别在轻、中、重度富营养溶液中培养, 同质量浓度下每个植物样做一组平行样, 设置一组空白样。根据植物生长规律, 培养期为 4—10 月。

试验在节水试验基地大棚内进行, 选用 PPT 塑料桶作为培养容器。试验采用容积为 0.47 m³ 的塑料桶 27 个, 尺寸: 上底直径 42 cm, 下底直径 35 cm, 高 40 cm, 加入营养液总体积为 0.47 m³, 水位始终保持在 40 cm 处。

1.2.2 培养液配置

选用二元复合肥料磷酸二铵与无氨水进行营养液配置。磷酸二铵规格一般为: 含氮 ≥ 18%、有效磷 ≥ 46%、水溶磷 ≥ 40%、含水率 ≤ 2.5%、粒度 1~4 mm 占比 ≥ 90%。水溶液呈弱碱性, pH 值为 8.0。

目前, 水体富营养化评价方法有综合营养状态指

数法(中国环境监测总站推荐)和评分法(水利部门推荐)。受试验条件限制, 采用评分法中的轻度、中度、重度富营养 3 级指标的总氮、总磷数据作为试验依据, 以总氮作为限制因素, 具体见表 1。

表 1 各级富营养化指标中氮、磷量

Table 1 Nitrogen and phosphorus content in eutrophication indicators at all levels

污染质量浓度	总氮质量浓度/(mg L ⁻¹)	总磷质量浓度/(mg L ⁻¹)
轻度富营养化	1	0.1
中度富营养化	2.0~6.0	0.2~0.6
重度富营养化	9.0~16.0	0.9~1.3

通过选择典型水生植被进行水培的方式, 根据水体富氧化的总氮含量限制范围, 利用二元复合肥和无氨水配置轻度、中度、重度富营养化 3 种污染水体, 总氮取每种富营养化氮质量浓度的平均值作为配制营养液的总氮质量浓度, 总磷依据复合肥中磷量计算质量浓度数值, 污染水体氮、磷量见表 2。

表 2 污染水体氮、磷量

Table 2 Nitrogen and phosphorus content in polluted water

污染质量浓度	总氮质量浓度/(mg L ⁻¹)	总磷质量浓度/(mg L ⁻¹)
轻度富营养化	1	2.22
中度富营养化	5	11.11
重度富营养化	10	22.22

根据计算数值, 配置的营养液中氮和磷的质量浓度非常大, 尤其是磷质量浓度, 完全超出了水质标准中的质量浓度范围, 因此对磷质量浓度的变化只进行定量分析, 不与以往研究结果进行对比。

1.2.3 监测项目与方法

根据研究内容, 水样监测分析项目为: pH 值、温度、总氮(TN)、总磷(TP)。分析方法参照《水和废水监测分析方法》第四版中相关方法进行, 详见表 3。

表 3 水质监测项目分析方法

Table 3 Analysis method of water quality monitoring project

监测项目	分析方法	方法检出限
pH 值	pH 试纸检测	0.1
温度	水温计检测	0.1 °C
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	0.05~4 mg/L
TP	钼酸铵分光光度法	0.01~0.6 mg/L

总氮指可溶性及悬浮颗粒中的氮, 包括水中亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、无机铵盐、溶解态氨及大部分有机含氮化合物中氮的总和, 以 NO₃⁻-N 计; 总磷包括溶解的、颗粒的、有机磷和无机磷。

2 结果与分析

2.1 水生植物对总氮的吸收

芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种植物对轻度富营养化、中度富营养化、重度富营养化 3 种水体中总氮的净化效果如表 4 所示。整个生长期总氮质量浓度的变化大致可分为 4 个阶段：4 月为生长萌发期，5—7 月为营养生长期，8 月生殖生长期，9—10 月为成熟期。

在轻度富营养化条件下，4 种植物在整个生长期对水体中总氮均有去除净化效果。水体中总氮质量浓度下降速率比较大的月份是 4 月和 8 月，尤其是 4 月，总氮质量浓度从 1 mg/L 降至 0.64~0.40 mg/L，其次是 5—7 月。9—10 月植物进入成熟期，此时植物停止营养生长，对氮的需求减少，水体中总氮质量浓度下降缓慢。在 10 月末，各试验水体中总氮质量浓度分别降至 0.08~0.14 mg/L，均达到地表水 I 类标准。在整个生长期，蒲草、空心菜对水体中总氮的去除率均为 92%，芦苇的去除率为 87.26%，睡莲的去除率为 85.93%。出现这种现象的原因是 4 种植物水培之后生长状况不同，在轻度富营养化水体中水培的芦苇、蒲草、空心菜均很快适应水培方式并长出发达的新生根系，萌发新的植株，表明这 3 种植株水培能力和耐污能力比较强；睡莲的新生根系出现缓慢，同时叶片发黄腐烂，适应性差，导致对总氮的去除率低。

4 种植物在生长期对中富营养化水体中的总氮均具有吸收净化作用。4 月末，总氮质量浓度从 5 mg/L 降至 1.47~1.76 mg/L；在 5—7 月营养生长期，先期的氮吸收满足了植物生长需要的部分氮，在此期间总氮质量浓度变化比较平缓，7 月末水体中总氮质

量浓度在 1.30~1.37 mg/L 之间；8 月总氮质量浓度又出现了一个比较明显的下降过程，分别为 0.55、0.2、0.16、0.31 mg/L，空心菜水体中总氮质量浓度下降最大，芦苇最小。10 月末，各试验水体中总氮质量浓度降至 0.10~0.15 mg/L，均达到地表水 I 类标准。4 种水生植物对中度富营养化污水中总氮的去除效果比较理想，去除率都在 90% 以上，其中空心菜最高为 97.90%、睡莲为 97.88%、蒲草为 97.00%，芦苇最低为 96.91%。

重度富营养化污水中睡莲样品在试验后期完全死亡，数据中断，因此只对芦苇、蒲草、空心菜在此质量浓度污水中的净化效果进行分析。4 月植物对总氮的吸收速度最快，到 4 月末，总氮质量浓度从 10 mg/L 降至 1.56~1.81 mg/L；5—10 月，总氮质量浓度变化趋势与中度富营养化水体相似。到 10 月末，各试验水体中总氮质量浓度降至 0.10~0.21 mg/L，均达到地表水 II 类标准。3 种水生植物对水体中总氮的去除率都在 90% 以上，蒲草去除率最高为 99.03%，芦苇最低为 97.91%，空心菜介于中间为 98.55%。

根据以上分析，在 3 种质量浓度污水中，挺水植物对污染质量浓度的适应范围比较广，净化效果比浮水植物好。芦苇、蒲草在总氮质量浓度 1~10 mg/L 的污水中均能存活并生长良好；睡莲在轻质量浓度污水中去除率高，但随着污染质量浓度升高，适应性下降，甚至死亡，说明浮水植物不适宜在高污染质量浓度水体中生存；空心菜属于蔓生水生植物，在总氮质量浓度 1~10 mg/L 的污水中显示了良好的适应性，而且在试验期间，生长茂盛，对总氮去除率均在 90% 以上。

表 4 3 种不同营养质量浓度下污水中总氮质量浓度变化

营养质量浓度	植物种类	初始质量浓度	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
轻富营养质量浓度	芦苇	1	0.40	0.3	0.28	0.26	0.22	0.19	0.14
	蒲草	1	0.59	0.58	0.57	0.45	0.20	0.16	0.08
	空心菜	1	0.64	0.6	0.48	0.35	0.13	0.11	0.08
	睡莲	1	0.58	0.62	0.54	0.32	0.23	0.19	0.14
中富营养质量浓度	芦苇	5	1.47	1.45	1.40	1.30	0.55	0.40	0.10
	蒲草	5	1.76	1.70	1.60	1.37	0.20	0.15	0.15
	空心菜	5	1.50	1.50	1.35	1.20	0.16	0.12	0.15
	睡莲	5	1.60	1.55	1.45	1.30	0.31	0.15	0.15
重富营养质量浓度	芦苇	10	1.56	1.55	1.45	1.25	0.80	0.70	0.21
	蒲草	10	1.60	1.55	1.45	1.30	0.20	0.10	0.10
	空心菜	10	1.81	1.65	1.5	1.25	0.5	0.40	0.10
	睡莲	10	-	-	-	-	-	-	-

芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种植物在不同生长期对不同污染程度水体中的总氮去除作用如表 5 所

示。芦苇整个生长期对轻度富营养化水体总氮的去除率最低，为 72.33%，对中度、重度富营养化水体总

氮的去除率分别达到 96.91%、97.91%。芦苇每个生长阶段对污水中总氮的去除率有明显的差别,不同生长阶段 3 种水体(以下简称轻度、中度、重度)总氮的去除率以数值高低来排序,萌发期:重度>中度>轻度;营养生长期:轻度>重度>中度;生殖生长期:中度>重度>轻度;成熟期:重度>中度>轻度。

在整个生长期,蒲草对 3 种污染质量浓度水体总氮的去除率都达到了 90%以上,分别为 92%、97%、99.03%,污染质量浓度越高蒲草的去除率越高。不同生长阶段 3 种水体总氮的去除率以数值高低来排序,萌发期:重度>中度>轻度;营养生长期:中度>重度>轻度;生殖生长期:轻度>重度>中度;成熟期:轻度>重度>中度。

在整个生长期,空心菜对 3 种污染质量浓度水体总氮的去除率都达到了 90%以上,分别是 92.00%、

97.90%和 98.55%,重度污染水体中去除率最高。生长分期来看,在萌发期,空心菜对总氮的去除率在重度污染水体中最高,其次是中度污染和轻度污染水体;营养生长期总氮的去除率在轻度污染水体中最高;生殖生长期 3 种污染水体中总氮去除率都在 60%以上,其中中度污染水体中去除率最高;在成熟期总氮去除率最高的是重度污染水体。

在轻度和中度污染水体中,睡莲在萌发期、营养生长期、生殖生长期和成熟期对水体中总氮的去除率相差很大。在轻度污染水体中,睡莲在萌发期、生殖生长期和成熟期的去除率均小于中度污染水体,只有营养生长期的去除率大于中度污染水体,整个生长期的去除率也是中度污染水体高于轻度污染水体。综合分析,睡莲在中度污染水体中比在轻度污染水体中的净化效果好。

表 5 4 种植物不同生长期对富养污水中的总氮去除率

Table 5 Total nitrogen removal rate of four plants in different growth stages to eutrophic wastewater

%

植物种类	富养质量浓度	生长期	不同生长期			
			萌发期	营养生长期	生殖生长期	成熟期
芦苇	轻	72.33	60.00	36.52	30.24	29.57
	中	96.91	70.20	10.00	58.03	71.35
	重	97.91	73.89	26.58	31.24	74.98
蒲草	轻	92.00	41.50	29.65	59.78	54.04
	中	97.00	84.69	53.77	47.63	36.07
	重	99.03	94.97	40.02	49.36	43.75
空心菜	轻	92.00	36.67	46.12	62.23	39.01
	中	97.90	69.99	18.90	88.53	34.32
	重	98.55	82.51	28.26	61.03	71.78
睡莲	轻	86.87	42.03	50.00	41.54	18.11
	中	98.87	68.84	13.45	77.89	66.23
	重	-	-	-	-	-

2.2 水生植物对总磷的吸收

芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种植物对轻度富营养化、中度富营养化、重度富营养化 3 种水体中总磷的净化效果如表 6 所示。在整个生长期,芦苇、蒲草、空心菜和睡莲 4 种植物生长的轻富养质量浓度污水中总磷质量浓度曲线一直保持持续下降趋势,说明 4 种植物都具有净化总磷的作用。从生长阶段来看,4 种植物对水体中总磷的吸收净化主要集中在 8 月以前,在 9—10 月水体中总磷的质量浓度变化较小。10 月末,试验水体中的总磷质量浓度降至 1.01~1.45 mg/L,均在地表水 V 类水以上。从总磷的去除率来看,4 种水生植物中生长期去除率最高的是睡莲,为 54.5%,其次是蒲草、芦苇和空心菜,分别为 40.99%、39.19%、4.68%,4 种植物的总磷去除率均不是很高,说明在轻度污染水中,芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种水生植物的除磷效果均不是很好。

芦苇、蒲草、空心菜和睡莲 4 种植物对中富养质量浓度污水中的总磷同样具有净化作用,但不同植物对总磷净化的速度快慢不同。芦苇、蒲草和空心菜水体中总磷质量浓度在 6 月之前由 11.1 mg/L 降到了 2.0 mg/L 左右,6 月之后下降较少,而睡莲水体中总磷质量浓度除在初期降低明显外,4—6 月下降缓慢,直至 7 月才再次出现大幅下降。10 月末,水中总磷质量浓度降到了 1.39 mg/L(芦苇)、1.4 mg/L(睡莲)、1.43 mg/L(蒲草)和 1.57 mg/L(空心菜),数值比较接近。从总磷的去除率来看,芦苇、蒲草、空心菜和睡莲对中度污染水体中总磷的去除率分别为 87.49%、87.4%、87.13%、85.89%,相比轻度污染水体中均有所提高。此外,除睡莲外,芦苇、蒲草和空心菜生长状态在整个试验期间较为良好。说明芦苇、蒲草和空心菜的适应性较好,但在高质量浓度含磷污水中,睡莲的适应性较差。

表 6 3 种不同营养质量浓度下污水中总磷质量浓度变化

Table 6 Variation of total phosphorus concentration in sewage under three different nutrient concentrations										mg/L
营养质量浓度	植物种类	初始质量浓度	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
轻富营养质量浓度	芦苇	2.22	1.85	1.70	1.57	1.48	1.42	1.38	1.36	
	蒲草	2.22	2.10	1.55	1.52	1.47	1.43	1.38	1.33	
	空心菜	2.22	1.94	1.83	1.65	1.52	1.48	1.47	1.45	
	睡莲	2.22	1.68	1.53	1.25	1.17	1.08	1.04	1.01	
中富营养质量浓度	芦苇	11.11	5.15	2.71	1.81	1.53	1.47	1.43	1.39	
	蒲草	11.11	2.45	2.32	2.32	1.98	1.85	1.78	1.43	
	空心菜	11.11	4.05	2.71	2.00	1.89	1.85	1.78	1.57	
	睡莲	11.11	7.88	7.76	7.45	3.23	1.85	1.64	1.40	
重富营养质量浓度	芦苇	22.22	7.26	3.21	2.48	2.34	2.32	2.31	2.30	
	蒲草	22.22	2.52	2.38	2.36	2.33	2.32	2.31	2.30	
	空心菜	22.22	7.30	4.71	4.02	3.00	2.54	2.49	2.30	
	睡莲	22.22	-	-	-	-	-	-	-	

根据试验观察，蒲草、芦苇、空心菜在高质量浓度污水中生长良好，而睡莲出现死亡现象。4 月末，3 种植物所处水体中的总磷质量浓度下降明显，在整个生长周期，蒲草水体中的总磷质量浓度始终最低，其次是芦苇水体和空心菜水体。从生长分期来看，萌发期水体中总磷质量浓度降低幅度最大，5—7 月营养生长期总磷质量浓度变化幅度次之，7 月以后水体总磷质量浓度变化很小，表明 3 种水生植物对污水中磷的吸收主要集中在萌发期和营养生长期。从总磷的去除率来看，去除率最高的是芦苇，为 93.92%，其次是蒲草和空心菜，分别为 93.83% 和 92.98%，说明这 3 种植物在高污染质量浓度的水体中适应性好，对污水中污染物净化效果好。

由表 7 可以看出，芦苇整个生长期轻度、中度和重度污染水体中总磷的去除率分别是 39.19%、87.49% 和 93.92%。其中，在萌发期，轻度、中度和重度污染水体中总磷去除率达到了 15.92%、53.09% 和 67.27%；在 5—7 月的营养生长期，中度和重度污染水体中总磷质量浓度仍然保持了比较高的下降幅度，去除率分别为 67% 和 76.18%，而轻度污染水体中总磷去除率为 19.91%；在生殖生长期和成熟期，植物对水中磷的吸收减弱，3 种污染水体中的总磷质量浓度降低幅度都比较缓慢，但是中度和重度污染水体中的去除率仍然高于轻度污染水体。可以得出结论，在不同的生长阶段，芦苇对水中磷的吸收能力不同；不同的污染质量浓度水中，芦苇对磷的吸收量不同，污染质量浓度较高的水中，芦苇的吸收净化效果明显高于其他 2 种污染质量浓度的水体。

蒲草整个生长期轻度、中度和重度污染水体中总磷的去除率分别是 40.99%、87.13% 和 93.83%。轻度、中度和重度污染水体中植物在不同生长阶段的总磷

去除率也存在差别，在萌发期去除率分别为 5.86%、78.13% 和 88.62%；营养生长期去除率分别为 29.70%、18.73% 和 40.60%；生殖生长期去除率都较低，分别为 2.5%、7.96% 和 2.05%；成熟期去除率比生殖生长期高，分别为 8.54%、20.67% 和 6.87%。综合分析，蒲草在 3 种不同污染程度的水体中降解磷的效果与污染物的质量浓度有关，污染物质量浓度越高降解效果越好。轻度污染水体中总磷的去除主要集中在营养生长期和成熟期，中度污染水体中总磷的去除主要集中在萌发期、营养生长期和成熟期，重度污染水体中总磷的去除主要集中在萌发期和营养生长期。

空心菜整个生长期轻度、中度和重度污染水体中总磷的去除率分别是 34.68%、85.89% 和 92.98%。在不同的生长阶段，轻、中、重度污染水体中去除率也有很大差别，萌发期去除率分别为 10.98%、62.65%、65.17%；营养生长期分别为 22.83%、53.57%、61.55%；生殖生长期分别为 3.14%、13.04%、17.66%；成熟期分别为 1.84%、6.65%、36.34%。轻度污染水体总磷的去除率主要集中在萌发期和营养生长期；中度污染水体总磷的去除主要集中在萌发期和营养生长期；重度污染水体总磷的去除主要集中在萌发期和营养生长期以及成熟期。

睡莲整个生长期轻度、中度污染水体中总磷的去除率分别是 54.50% 和 87.4%。睡莲在中度污染水体中不同生长阶段总磷的去除率均高于轻度污染水体。轻度污染水体中总磷的减少主要集中在萌发期和营养生长期，生殖生长期和成熟期去除率不超过 10%；中度污染水体中总磷质量浓度减少集中在营养生长期和生殖生长期，萌发期和成熟期去除率在 20%~30% 之间。

表 7 4 种植物不同生长期对富养污水中的总磷去除率

Table 7 Total phosphorus removal rate of four plants in different growth stages to eutrophic wastewater

%

植物种类	富养质量浓度	生长期	不同生长期			
			萌发期	营养生长期	生殖生长期	成熟期
芦苇	轻	39.19	15.92	19.91	5.87	4.69
	中	87.49	53.09	67.00	12.12	7.33
	重	93.92	67.27	79.18	14.01	10.03
蒲草	轻	40.99	5.86	29.70	2.50	8.54
	中	97.13	78.13	18.73	7.96	20.67
	重	93.83	88.62	40.60	2.05	6.87
空心菜	轻	34.68	10.98	22.83	3.14	1.84
	中	85.89	62.65	53.57	13.04	6.65
	重	92.98	65.17	61.55	17.66	36.34
睡莲	轻	54.50	24.10	30.75	7.32	7.11
	中	87.4	29.88	58.46	46.69	21.85
	重	-	-	-	-	-

3 讨论

通过研究芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种水生植物对污水中氮、磷的净化效果可以发现, 相同植物在不同的月份, 对氮磷的净化效果有很大的差异, 主要原因是植物在不同的生长阶段对氮、磷的需求和吸收利用能力有所差别。高吉喜等^[15]试验表明, 同一植物在不同月份对富营养化水体中氮、磷的净化率不同, 与本研究具有相同的结论; 此外, 相同的植物在不同浓度的污水中对氮、磷的净化效果也有差异, 表现为水生植物随着污染物浓度提高, 去除效率也随着增高, 但是当污染浓度超过一定的范围会对睡莲的生长产生负面影响。严国安等^[16]也提出凤眼莲对污水中氮、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, 则净化效率反而下降。通过不同种类的水生植物对污水中氮、磷的去除效果研究可以发现, 芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种水生植物有很大的差异, 主要是由于不同种类的植物生长特性不同, 脱氮除磷的途径也有所不同。夏汉平等^[17]利用芦苇和香蒲作为湿地植物进行试验, 结果表明芦苇比香蒲具有更强的吸收磷的能力; 郑于聪等^[18]利用水葫芦、百喜草、水花生和香根草 4 种植物对垃圾污水进行植物净化, 发现不同植物在不同浓度的污水中表现为不同的生长状态和净化效率。施思^[19]研究了漂浮栽植圆币草、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、化学需氧量的去除情况, 发现不同水生植物净化相同浓度污水效果不同, 同种水生植物净化不同浓度污水效果也不同, 且不同时间段水生植物净化水体中污染物速率也不同, 与本研究得出的结论基

本一致。

本研究通过系统的试验, 认为芦苇、蒲草、空心菜 3 种植物对富营养化水体中的氮磷具有较好的净化效果, 参考已有研究, 芦苇、蒲草和空心菜的脱氮除磷效果已经被证实^[20-21]。因此, 选择芦苇、蒲草、空心菜 3 种挺水植物作为沟渠、湿地生态修复优势植物种, 为构建高效沟渠生态湿地系统提供了借鉴。本研究仍存在有待改进之处, 如试验仅对水体中的氮、磷浓度进行了分析, 并未对植物体以及污泥中的氮、磷进行研究, 无法很好地揭示氮、磷污染物的迁移转化过程; 此外, 由于试验条件所限, 本次研究所采用的高浓度污水未设置多个等级, 缺乏植物在极限高浓度污水中对氮磷污染物净化效果的研究。另外, 本次研究仅选取了芦苇、蒲草、空心菜、睡莲 4 种水生植物进行脱氮除磷效果的研究, 水生植物的种类有待进一步丰富, 可以结合区域特点, 因地制宜选取多种水生植物进行试验, 这也为今后的研究提供了方向。

4 结论

1) 芦苇、蒲草、空心菜、睡莲在不同程度富营养化水体中, 脱氮除磷效率有很大的差别。芦苇、蒲草、空心菜在 3 种污染浓度水体中, 随着氮、磷污染浓度加大, 脱氮、除磷效果增强。脱氮方面, 芦苇、蒲草、空心菜在萌发期和生殖生长期脱氮效果最好; 除磷方面, 芦苇在营养生长期对磷的吸收较多, 蒲草和空心菜萌发期对磷的吸收量大, 睡莲适应性有限, 脱氮除磷效果均不是很好。

2) 根据典型水生植物对污水中氮和磷的吸附影响以及植物不同生长阶段对氮和磷的吸附影响, 综合考虑景观以及经济价值, 选择芦苇、蒲草、空心菜 3 种挺水植物作为沟渠、湿地生态修复优势植物种。

参考文献：

- [1] 刘纪辉, 赖格英. 农业非点源污染研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 29-32.
- [2] 孙浩然, 边睿, 李若男, 等. 基于 SWAT 模型的磷负荷削减最佳管理措施(BMPs)评估研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2 629-2 637.
- [3] 张梦佳, 文方芳, 卢静, 等. 最佳管理措施(BMPs)在北京市化肥面源污染防治中的应用[J]. 中国农技推广, 2018, 34(4): 46-48.
- [4] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 36-40.
- [5] 苑永魁. 生态沟渠系统对农田排水中污染物截留效果的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [6] 李鹏飞, 李小杰. 农业面源污染防治中湿地植物的应用分析[J]. 农业与技术, 2019, 39(22): 52-53.
- [7] 张亚莹. 沟塘湿地对农田排水氮磷污染的截留作用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [8] 于江华, 徐礼强, 高永霞, 等. 面源污染管理中不同类型工程设施的性能比较[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 3 692-3 700.
- [9] 黄沈发, 唐浩, 吴健. 美国农业面源污染控制最佳管理措施(BMPs)概述[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2007(14): 105-109.
- [10] 陈洪波, 王业耀. 国外最佳管理措施在农业非点源污染防治中的应用[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(4): 279-282.
- [11] 姜翠玲, 崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去除效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 471-473, 476.
- [12] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312-316.
- [13] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007(2): 84-88.
- [14] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 702-706.
- [15] 高吉喜, 叶春, 杜娟, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997(3): 56-60.
- [16] 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.
- [17] 夏汉平, 王庆礼, 孔国辉. 垃圾污水的植物毒性和植物净化效果之研究[J]. 植物生态学报, 1999(4): 2-14.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 崔星怡. 以空心菜为主的复合人工湿地净化猪场沼液污水的效应[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.

Study on the Removal Effect of Nitrogen and Phosphorus in Eutrophic Water by Different Plants

LIU Jiaomei

- (1. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co, LTD., Beijing 102600, China;
2. Beijing China Railway Eco-Environment Design Institute Co., LTD., Beijing 102600, China)

Abstract: 【Objective】 To study the removal effect of different aquatic plants on nitrogen and phosphorus pollutants in polluted water, so as to provide support for the construction of ditch wetland system. **【Method】** The common aquatic plants such as reed, papyrus, water spinach and water lily in the water area of my country were selected as the research objects. The dynamic changes of nitrogen and phosphorus uptake in sewage with different concentrations by four aquatic plants were studied, and the removal of nitrogen and phosphorus by aquatic plants at different growth stages was also studied. **【Result】** In the three polluted water bodies of reed, papyrus and water spinach, with the increase of nitrogen and phosphorus pollution concentrations, the denitrification and phosphorus removal effects were enhanced. In terms of phosphorus removal, reed absorbs the most phosphorus in the vegetative growth period, and pupa and water spinach absorb a large amount of phosphorus in the germination period. **【Conclusion】** In comprehensive consideration of the denitrification and phosphorus removal effects of four aquatic plants, as well as their landscape and economic values, three emergent plants, reed, papyrus and water spinach, were selected as the dominant plant species for ecological restoration of ditch wetlands.

Key words: aquatic plants; nitrogen and phosphorus removal; eutrophication; agricultural non-point source pollution

责任编辑：韩洋