

# 湿地植物对农村生活污水中氮磷的净化作用

张靖雨<sup>1,2</sup>, 汪邦稳<sup>1,2</sup>, 龙昶宇<sup>1,2</sup>, 张卫<sup>1,2</sup>, 张世杰<sup>1,2</sup>, 朱昊宇<sup>1,2</sup>

(1.安徽省·水利部淮河水利委员会 水利科学研究院,

安徽 合肥 230088; 2.水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:** [目的] 探讨水生植物修复技术对农村生活污水的治理效果, 为乡村生态综合治理提供思路借鉴和参考资料。[方法] 通过模拟室内控制试验的方法, 选取不同生态型的 6 种湿地植物为研究对象, 分析植株生物量、去除率、植物积累量、底泥吸附量等多项指标变化, 研究不同水生植物及其组合对污水中氮磷的净化效果差异以及水生植物系统的脱氮除磷特征。[结果] 无论单一种植组或混合种植组, 水生植物系统对污水中 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TP 均有较好的净化效果, 平均去除率分别达到 96.6%, 93.2% 和 95.9%, 显著高于对照组。单一种植的再力花长势最好, 鸢尾地上和地下部分生物量的比值最大, 混合种植的美人蕉以及单一种植的梭鱼草相对生长速率最低。挺水植物对氮素的吸收作用更好, 苦草对磷的吸收效果更好。植物吸收氮、磷占系统总去除量的比例在 6.9%~18.3% 和 4.1%~13.6% 之间, 底泥吸附氮、磷占总去除量的比例在 14.0%~31.5% 和 26.3%~68.4% 之间。微生物及其他植物的间接作用是植物系统脱氮除磷的主要影响因素。[结论] 再力花、鸢尾及苦草的镶嵌组合是在淮北平原区湿地植物种植的理想选择。对水生植物的组合方式、数量、时间等进行优化配置, 能够有效用于农村生活污水的净化。

**关键词:** 农村生活污水; 植物组合; 植物吸收; 底泥吸附; 生态治理

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)05-0015-08

**中图分类号:** X52, X703.1

**文献参数:** 张靖雨, 汪邦稳, 龙昶宇, 等. 湿地植物对农村生活污水中氮磷的净化作用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 15-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.003; Zhang Jingyu, Wang Bangwen, Long Changyu, et al. Purification effects of various aquatic plants on nitrogen and phosphorus in rural sewage [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 15-22.

## Purification Effects of Various Aquatic Plants on Nitrogen and Phosphorus in Rural Sewage

Zhang Jingyu<sup>1,2</sup>, Wang Bangwen<sup>1,2</sup>, Long Changyu<sup>1,2</sup>, Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Shijie<sup>1,2</sup>, Zhu Haoyu<sup>1,2</sup>

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei, Anhui 230088, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu, Anhui 233000, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of aquatic plant remediation technology on rural domestic sewage characteristics were studied in order to provide ideas and reference information for comprehensive and ecological treatment methods in rural areas. [Methods] Using simulated indoor controlled tests, wetland plants of six different ecological types were selected for measurement and analysis of plant biomass, and removal rate, plant accumulation, sediment adsorption capacity of nitrogen and phosphorus. Purification efficiency and removal characteristics of different plants for combinations of nitrogen and phosphorus in wastewater were also studied. [Results] Both single species and combinations of plant species used as an aquatic plant system resulted in a good level of purification of TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , and TP from sewage. The average removal efficiencies of hydrophyte systems for TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , and TP were 96.6%, 93.2%, and 95.9%, respectively, and these values were significantly higher than the values observed in the control group. *Thalia dealbata* in single-crop cultivation grew best. The ratio of aboveground to underground biomass of *Iris tectorum* was the largest. The

收稿日期: 2021-07-02

修回日期: 2021-08-12

资助项目: 安徽省重点研发计划项目“农村规模化畜禽养殖水污染防治技术研究”(1804b06020346); 安徽省水利科技项目(slkj2021-02); 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院科技创新基金项目(KY201908)

第一作者: 张靖雨(1988—), 男(汉族), 安徽省凤阳县人, 硕士, 工程师, 主要从事水污染处理、水生态修复工作。Email: qingrelation@163.com。

通讯作者: 汪邦稳(1981—), 男(汉族), 安徽省肥西县人, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与环境工作。E-mail: 357733852@qq.com。

relative growth rates of *Canna indica* in combination planting and *Pontederia cordata* in single planting were the lowest. Emergent plants had better absorption of nitrogen, and *Vallisneria natans* had better absorption of phosphorus. The proportion of nitrogen and phosphorus uptake by plants in the total removal capacity of the system was 4.5%—17.1% and 4.1%—13.6%, respectively, and the proportion of nitrogen and phosphorus accumulated by sediment was 11.6%—26.2% and 26.3%—68.4%. Microorganisms and the indirect effects of other plants were the most important mechanisms of nitrogen and phosphorus removal in plant systems. [Conclusion] *T. dealbata*, *I. tectorum*, and *V. natans* and their mosaic combination were ideal wetland plants for purification of rural sewage in Huaibei Plain. Optimizing the combination, number of species, and timing of aquatic plants will be useful for purification of sewage in rural areas.

**Keywords:** rural sewage; plant combinations; plant uptake; sediment accumulation; ecological management

农业面源污染是水体富营养化的主要原因,其贡献率大大超过城市、工业的点源污染。农村生活污水排放量较少且时间集中,日变化系数大<sup>[1]</sup>。水生植物修复技术因其环境友好、成本低、净化能力突出等特点,逐渐成为一种重要的生态治理方法<sup>[2-3]</sup>。水生植物除本身能吸收同化氮磷等污染物外,还能通过根系沁氧<sup>[4]</sup>、细胞释放无机离子、糖类和有机酸等方式,为微生物提供生长代谢所需碳源。

据调查统计,中国水生植物共有 61 科,168 属,741 种<sup>[5]</sup>,用于湿地、河道修复等生态处理的研究多数集中在芦苇、菖蒲以及苦草、金鱼藻等常见的单一生态型<sup>[6-7]</sup>,这一类存在易受季节影响以及抗逆性差等问题,合理的植物群落组合的净化效果更稳定<sup>[8]</sup>。李欢等<sup>[9]</sup>认为混合群落中植被相对生长速率和累积生物量显著高于单独种植时期,Rodriguez 等<sup>[10]</sup>发现芦苇与藇草的组合可以维持高效去污和低硝酸盐浓度之间的稳定关系。另一方面,不同的植物组合和种植条件构建的湿地系统其脱氮除磷特征也存在差异。周玥等<sup>[11]</sup>发现高浓度污水中单种挺水植物对 TP 的净化效果较好而多种植物组合对 TN 的净化效果更好。一般来说,湿地系统对污水中氮、磷的去除率平均能达到 60%~90%<sup>[12]</sup>,但植物吸收对氮、磷去除贡献率平均只在 6%~20%之间<sup>[13]</sup>,氮、磷物质的吸收同化是植物修复的主要去除方式<sup>[14]</sup>。相当部分的氮磷养分以沉积的方式被底泥截留,沉积物蓄积是氮、磷最主要的支出途径,占总支出氮、磷的比例为 28.6%和 42.3%<sup>[15]</sup>。关于适宜区域环境和不同生态型湿地植物组合的净化效果仍有待深入研究,同时有关湿地系统内氮磷养分去向特征的研究少有报道。因此,深入探讨氮磷高效吸收的最优植物组合模式对提高乡村生态综合治理效益具有重要的现实意义和工程价值。

本文选取不同生态型的 6 种湿地植物,在室内静水条件下通过植物生物量、污水氮、磷去除率、植物和底泥吸附量等多方面研究其镶嵌组合对污水的净化

效果,分析污染物去除特征和途径,旨在优化水生植物配置,为构建湿地植物和乡村生态综合治理模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

所用水生植物来自安徽省蚌埠市新马桥试验站沟塘内种植并自然生长较好的植株,包括苦草、菖蒲、梭鱼草、再力花、美人蕉、鸢尾共 6 种挺水和沉水植物,均属于中—富营养生境营养特征。种植水箱为方形聚乙烯塑料材质,长 510 mm,宽 380 mm,高 790 mm,白色半透明避光。水箱铺设底泥采自植株预培养时大沟内的污泥,沙姜黑土,土壤容重约 1.48 g/cm<sup>3</sup>。距桶底 300 mm 处的设出水龙头,用于排水和采集水样。受试水体来源于试验站内集中式生活污水化粪池,其污水来源主要为厨房炊事、沐浴洗涤和厕所排水,与周边农村生活污水特征相近,主要污染指标浓度范围: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在 5~20 mg/L 之间, TN 在 15~50 mg/L 之间, TP 在 2~10 mg/L 之间。

### 1.2 试验设计

将所选取的各类植株,按照生长习性和景观效益进行组合配置,依次为:单一挺水种植组的再力花(Z)、美人蕉(M)、菖蒲(C)、梭鱼草(S)、鸢尾(Y),单一沉水种植组的苦草(K),组合种植组的苦草+再力花(K+Z)、苦草+美人蕉(K+M)、苦草+菖蒲(K+C)、苦草+梭鱼草(K+S)、苦草+鸢尾(K+Y)。各组试验水箱内种植密度保持一致,同时以无植物种植的水箱作为空白试验组。试验共 12 组处理,每组 3 个重复。

试验于 2020 年 7 月 2 日至 9 月 2 日开展,共计 63 d,在自然通风条件下进行,场地设有挡雨棚,雨天时打开避雨。先采集底泥,待搅拌、混合均匀后覆于箱底,每桶底泥厚度为 200 mm。再挑选沟塘内预培养的各类长势良好,大小一致的植株冲洗干净后移至箱内,加入同位置水样直至高出底泥基质 200 mm

处,再培育 6~7 d 左右。待植物长势稳定后排净培养水,最后每桶加入 40 L 试验站内化粪池中的生活污水。期间定期(5~7 d)补加少量蒸馏水至初始高度,以维持水位。

### 1.3 采样与测试

(1) 水样。自试验开始时每 7d 采集 1 次水样,分两部分完成测试,一部分不过滤用全自动化学分析仪(Smartchem\_200)测试总氮(TN)—过硫酸钾分光光度法、总磷(TP)—过硫酸钾氧化—钼蓝比色法,另一部分经 0.45 $\mu$ m 的滤纸过滤测氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)—纳氏试剂比色法。

(2) 底泥样品。试验开始时于每个水箱内的底泥表层 5 cm 深度处,沿对角线等距离取土,采集 10 g 底泥样品作为本底值;另在试验中期(7 月 29 日)和试验结束时(9 月 2 日)分别采集各箱内的底泥。样品分为 2 份:一份鲜样用自封袋保存在 4 $^{\circ}$ C 冰箱中,用于测定底泥 pH 值, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量等;另一部分经自然风干研磨成粉末,过 100 目筛用于测定 TN, TP 含量。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量采用氯化钾浸提—流动注射仪法测定;TN 含量经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消解后,用半微量凯氏定氮法测定;采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法,用全自动化学分析仪测定 TP 含量。

(3) 植物样品。试验开始时,取大小、长势较为接近的样品,测定初始生物量及各项指标;试验结束时每组收获大小、长势较为平均的整株植物,测定其生长量及各项指标。采集后的植株样品依次用自来水、去离子水冲洗干净,滤纸吸干水分,分根、茎叶称鲜重,之后放置在 85 $^{\circ}$ C 烘箱内烘干至恒重,测量植株干重。经粉碎研细后用 0.15 mm 筛,采用半微量开氏方法,用凯氏定氮仪测定植株 TN 含量;采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法,用全自动化学分析仪测定植株 TP 含量。

### 1.4 数据分析

植物相对生长速率的计算公式<sup>[16]</sup>如下:

$$RGR = [\ln(B_t/B_0)]/t \quad (1)$$

式中:RGR 为植物的相对生长速率(%/d); B<sub>0</sub> 和 B<sub>t</sub> 分别为实验开始和结束时植物的总生物量(g); t 为实验周期(d),本研究中 t 为 60 d。

单位面积植物平均氮(磷)吸收量计算公式为:

$$Q_p = P_{C_i} \times P_{B_i} \quad (2)$$

式中:Q<sub>p</sub> 为单位面积植物平均氮(磷)吸收量[mg/(m<sup>2</sup>·d)]; P<sub>B<sub>i</sub></sub> 为试验开始时、结束时单位面积植物干重(g/m<sup>2</sup>); P<sub>C<sub>i</sub></sub> 为试验开始时、结束时植株内氮(磷)含量(mg/g)。

单位面积底泥平均氮(磷)吸收量计算公式为:

$$Q_s = 1\ 000 \times \rho_b \times V \times (C_{S_t} - C_{S_0})/S \quad (3)$$

式中:Q<sub>s</sub> 为单位面积底泥平均氮(磷)吸收量[mg/(m<sup>2</sup>·d)];  $\rho_b$  为底泥容重(g/cm<sup>3</sup>); V 为水箱内底泥体积(m<sup>3</sup>); C<sub>S<sub>t</sub></sub> 为第 t 天时底泥氮(磷)含量(mg/g); C<sub>S<sub>0</sub></sub> 为试验开始时底泥氮(磷)背景含量(mg/g); S 为有效面积(m<sup>2</sup>)。

采用 Microsoft Excel 计算数据、绘图,采用统计分析软件 SPSS22.0 进行数据分析。

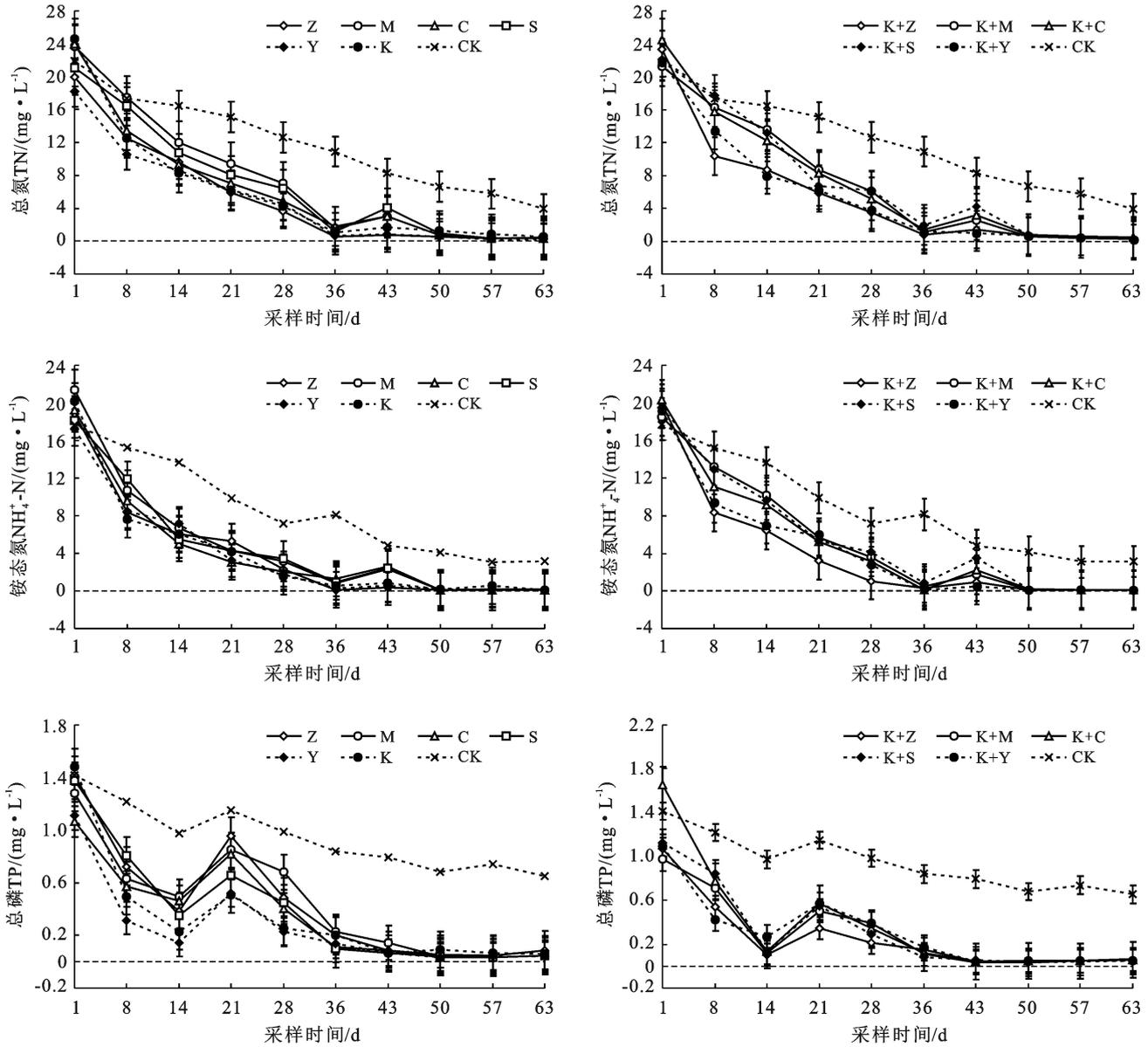
## 2 结果与分析

### 2.1 污染物去除效果

包括空白对照组在内,各试验水箱内水体中 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP 浓度随着时间变化均呈现逐渐降低的趋势。第 8 d 各组 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度即有显著降低的表现,并在 36 d 达到最低值,平均为 1.19, 0.54 mg/L,好于 II 类地表水质标准,说明植物对水体中氮素的吸收反应十分迅速,由于试验开展在夏季,环境及水体温度较高有利于水体中氮素的挥发。43 d 时各组水体 TP 浓度变化趋于平缓,单一种植组略高,平均在 0.34 mg/L,而组合种植组 TP 浓度平均仅 0.15 mg/L。水体中 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP 平均去除率分别达到 96.6%, 93.2% 和 95.9%,显著高于对照组。单一植物中再力花的 TN 去除率最高,美人蕉最低;鸢尾组、苦草+鸢尾组对 TP 去除率最高,苦草+梭鱼草组最低。苦草在种植培养前后长势虽变化不大,但其对 TN, TP 的去除效果依然较好;整体上单一种植组中 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果与混合种植组并无显著差异,混合种植组对 TP 去除率略高于单一种植组(图 1)。

### 2.2 植物生长情况及氮磷积累量变化

如表 1 所示,苦草的茎干、根系在培养前后的变化均不显著。在单种或混种培养方式下,再力花、菖蒲和梭鱼草培养后的茎干长度均显著高于培养前。长势最好的是单一种植的再力花,根、茎长度的相对生长速率为最大,且显著高于苦草和菖蒲,混合种植培养的再力花的干重相对生长速率最大。混合种植培养的美人蕉以及单一种植培养的梭鱼草最低,与其他各类植株的干重均存在显著差异。鸢尾地上和地下部分生物量的比值最大,从植物收获的可操作性方面来看,地上部分生物量的占比越大,越有利于污水净化系统通过收割地上茎叶去除氮、磷物质。因此单从植物生长状况这一层面来说,再力花、鸢尾在淮北平原区是适宜种植的湿地植物,种植梭鱼草、美人蕉对污水净化的功效相对较差。



注:Z,M,C,S,Y 分别为单一挺水种植组的再力花、美人蕉、菖蒲、梭鱼草、鸢尾,K 为单一沉水种植组的苦草,(K+Z),(K+M),(K+C),(K+S),(K+Y) 分别为组合种植组的苦草+再力花、苦草+美人蕉、苦草+菖蒲、苦草+梭鱼草、苦草+鸢尾。下同。

图 1 不同处理组 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP 浓度变化

培养前再力花处理组中植物 TN, TP 积累量最高, 分别为 449.9, 130.7 mg/m<sup>2</sup>, 苦草最低。不同处理组中植物体内氮积累量均随时间推移呈现上升趋势(图 2), 培养前后各组植物体内 TN 积累量均有显著差异; 而磷积累量随时间变化不显著。培养后, 苦草组的 TN, TP 积累量增幅最高, 分别较初期增加了 12.4, 1.3 倍, 显著高于其他挺水植物, 说明沉水植物比挺水植物对污水中 TP 的吸收效果更好。苦草+再力花组中 TN 积累量、再力花组中 TP 积累量最大, 分别为 1 683.2, 173.2 mg/m<sup>2</sup>。除梭鱼草外, 组合处理组与单一处理组的 TN, TP 积累量之间无显著差异。水生植物对污水中氮素有更好的吸附作用, 对

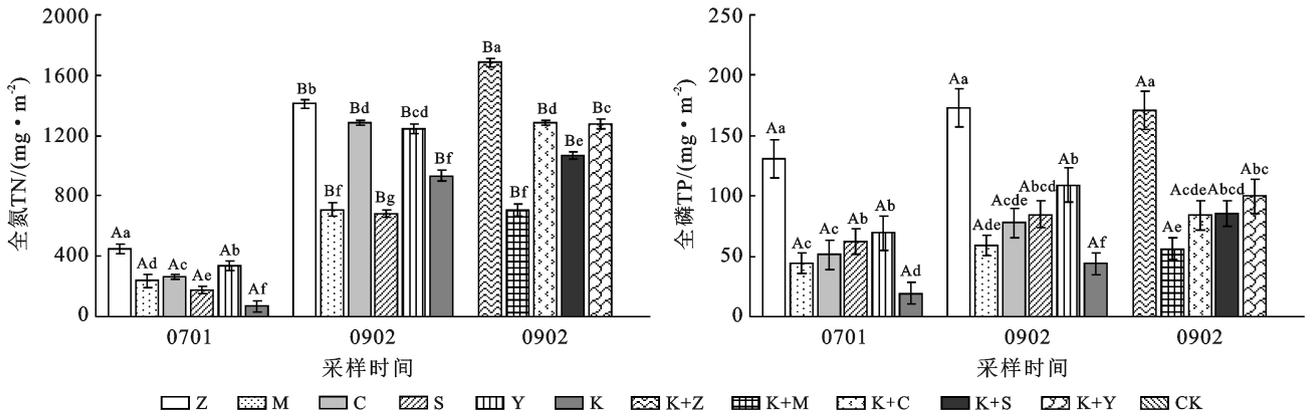
磷素的吸收效果一般; 挺水植物生物量越大, 对氮的吸收同化作用越好, 这与周玥等<sup>[11]</sup>、Catalina 等<sup>[17]</sup>的研究结果较为接近。

不同处理组中氮磷在植株体内的分配情况见图 3。如图 3 所示, 培养前, 再力花、梭鱼草根部的 TN, TP 含量显著大于茎部, 含量占全部的比例分别为 81.4%, 74.3% 和 80.6%, 71.0%, 培养后该比例分别下降至 35.7%, 53.4% 和 27.5%, 50.1%。氮、磷等养分呈现出由根部向茎叶转移的趋势。试验末期美人蕉、苦草中氮、磷的分配比例较试验开始时变化较小, 养分转移变化规律并不显著, 与培养期间植物的生长状态较差有关。

表 1 不同水生植物试验前后生长状况

试验阶段	试验组别	植物株高/cm		干重/g		相对生长速率	
		根长	茎长	茎重	根重	根茎长度	干重
培养前	Z	16.50±2.41 <sup>def</sup>	41.9±3.56 <sup>defgh</sup>	0.95±0.19 <sup>de</sup>	4.16±0.95 <sup>abcd</sup>	—	—
	M	12.10±1.93 <sup>defgh</sup>	29.50±3.29 <sup>efghi</sup>	0.86±0.27 <sup>de</sup>	0.59±0.06 <sup>de</sup>	—	—
	C	19.70±5.43 <sup>ab</sup>	38.10±3.78 <sup>defghi</sup>	1.04±0.33 <sup>de</sup>	0.67±0.16 <sup>de</sup>	—	—
	S	32.50±6.94 <sup>a</sup>	27.60±4.74 <sup>efgh</sup>	0.78±0.03 <sup>de</sup>	2.26±0.77 <sup>bcd</sup>	—	—
	Y	16.9±2.19 <sup>abc</sup>	41.2±4.43 <sup>defgh</sup>	1.40±0.47 <sup>de</sup>	1.43±0.32 <sup>cde</sup>	—	—
	K	8.50±0.55 <sup>d<sup>efgh</sup></sup>	13.70±1.62 <sup>hi</sup>	0.06±0.03 <sup>e</sup>	0.12±0.03 <sup>e</sup>	—	—
培养后	Z	19.85±5.57 <sup>bcd</sup>	104.80±10.23 <sup>a</sup>	8.08±2.01 <sup>bc</sup>	7.02±1.44 <sup>a</sup>	1.14±0.42 <sup>a</sup>	1.57±1.11 <sup>a</sup>
	M	8.90±1.29 <sup>defgh</sup>	49.50±6.92 <sup>def</sup>	0.49±0.08 <sup>de</sup>	1.03±0.31 <sup>cde</sup>	0.56±0.18 <sup>abcd</sup>	0.03±0.37 <sup>a</sup>
	C	15.45±4.64 <sup>defg</sup>	53.40±10.34 <sup>cde</sup>	4.29±2.02 <sup>cd</sup>	1.15±0.51 <sup>cde</sup>	0.02±0.05 <sup>de</sup>	2.03±0.79 <sup>a</sup>
	S	16.10±1.49 <sup>cde</sup>	66.30±4.53 <sup>bcd</sup>	0.95±0.21 <sup>de</sup>	1.74±0.58 <sup>cde</sup>	0.56±0.27 <sup>abcd</sup>	-0.09±0.44 <sup>c</sup>
	Y	26.10±4.42 <sup>cde</sup>	65.15±11.94 <sup>bcd</sup>	4.31±1.88 <sup>cd</sup>	4.795±1.57 <sup>abc</sup>	0.76±0.18 <sup>abc</sup>	1.91±0.75 <sup>a</sup>
	K	4.60±1.33 <sup>fgh</sup>	11.80±3.58 <sup>i</sup>	0.07±0.05 <sup>e</sup>	0.31±0.03 <sup>e</sup>	-0.51±0.09 <sup>e</sup>	1.61±1.03 <sup>a</sup>
	K+Z	22.90±6.96 <sup>abc</sup>	90.55±10.65 <sup>ab</sup>	14.36±3.75 <sup>a</sup>	5.71±2.91 <sup>ab</sup>	1.13±0.2 <sup>a</sup>	2.27±0.15 <sup>a</sup>
	K+M	7.55±2.08 <sup>efgh</sup>	44.15±6.59 <sup>def</sup>	0.66±0.19 <sup>de</sup>	0.69±0.38 <sup>de</sup>	0.4±0.25 <sup>bcd</sup>	-0.06±1.34 <sup>c</sup>
	K+C	8.70±3.07 <sup>defgh</sup>	54.75±13.60 <sup>cd</sup>	3.27±1.22 <sup>de</sup>	1.52±0.84 <sup>cde</sup>	0.23±0.22 <sup>de</sup>	1.61±0.47 <sup>a</sup>
	K+S	19.15±6.18 <sup>bcd</sup>	57.85±5.37 <sup>bcd</sup>	1.48±0.55 <sup>de</sup>	2.82±1.46 <sup>bcd</sup>	0.46±0.38 <sup>abcd</sup>	0.71±0.84 <sup>a</sup>
	K+Y	24.60±9.65 <sup>abc</sup>	76.45±15.66 <sup>abc</sup>	2.30±1.04 <sup>de</sup>	3.45±1.82 <sup>bcd</sup>	0.98±0.38 <sup>ab</sup>	1.14±0.97 <sup>a</sup>

注:同一列中不同小写字母表示植株的各类生物量指标之间有显著差异( $P<0.05$ )。



注:不同大写字母表示同一处理组在不同采样时间植株 TN,TP 积累量差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一采样时间不同处理组植株 TN,TP 积累量差异显著( $p < 0.05$ )。

图 2 不同处理组植物中 TN,TP 积累量

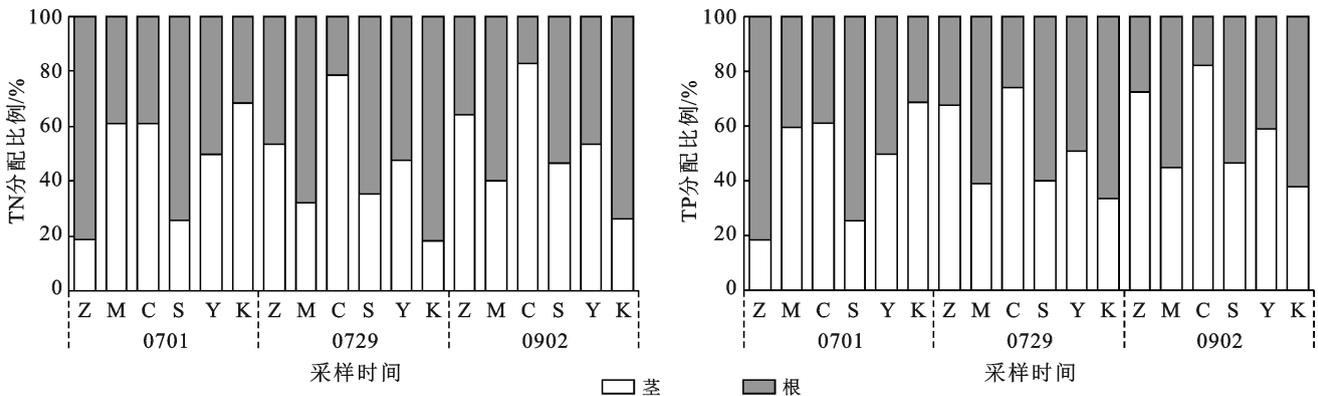


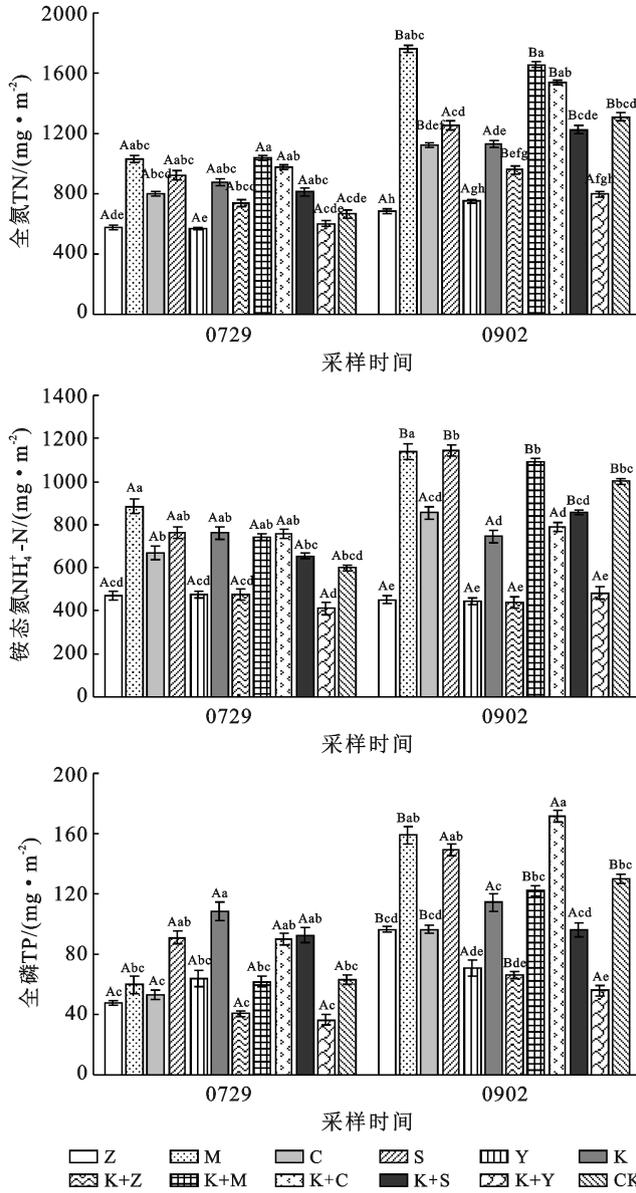
图 3 氮、磷在植株体内的分配特征

### 2.3 底泥氮、磷吸收量变化

如图 4 所示,试验期间底泥 pH 值变化范围为

7.6~8.4,呈弱碱性。底泥中氮、磷含量整体呈现先上升较快后渐近平稳的变化规律。培养前底泥中

TN 含量在 165.5~233.4 mg/kg 之间,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量在 24.6~56.3 mg/kg 之间, TP 变化范围在 194.9~547.3 mg/kg 之间。



注:不同大写字母表示同一处理组在不同采样时间底泥 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TP 吸收量差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一采样时间不同处理组底泥 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TP 吸收量差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 4 不同处理组底泥中 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TP 吸收量

其中美人蕉组底泥中 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量最高, 苦草+菖蒲组底泥中 TP 含量最高。底泥 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  总吸收量前三的是美人蕉组、苦草+美人蕉组和苦草+菖蒲组, 吸收量达到 1 758.9, 1 655.1 和 1 541.2 mg/m<sup>2</sup>, 占各组废水总脱氮量比例为 30.0%, 31.5%, 25.6%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  总吸收量前三的是梭鱼草组、美人蕉组和苦草+美人蕉组, 吸收量分别为 1 146.1, 1 139.1, 1 090.6 mg/m<sup>2</sup>, 占氨氮总去除量的 25.4%, 21.3%,

23.7%。单一种植的再力花组底泥的 TN 吸收量最低, 鸢尾组底泥的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  吸收量最低, 仅占废水氨氮总去除量的 10.4%。底泥 TP 总吸收量前三的分别为苦草+菖蒲组、美人蕉组和梭鱼草组, 苦草+鸢尾组最低。空白对照组底泥的 TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TP 吸收量占总脱氮量的比例分别为 29.1%, 27.6%, 68.4%, 其中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TP 吸收量占比在各处理组中最高, 植物生物量较大的处理组吸附比例较低。

## 2.4 质量平衡

如表 2 所示, 整个水生植物处理系统中, 各处理组中 TN, TP 的平均总拦截量分别为 862.0, 46.1 mg, 单位面积平均去除负荷分别为 85.6, 4.6 mg/(m<sup>2</sup>·d)。其中, 苦草组、苦草+菖蒲组 TN, TP 拦截量最高, 鸢尾组的 TN 去除量最低, 苦草+美人蕉组的 TP 去除量最低。植物吸收总氮占系统总去除量的比例在 6.9%~18.3% 之间, 植物吸收总磷占系统总去除量的比例在 4.1%~13.6% 之间, 与卫小松等<sup>[18]</sup>、Gaballah 等<sup>[6]</sup> 的结果一致, 植物吸收对氮、磷去除的贡献存在一定差异, 美人蕉、梭鱼草及其组合种植处理组中植物吸附量所占比例均与再力花、鸢尾等种植组差异明显。

表 2 污染物质量平衡

污染物	类别	总去除量/mg	单位面积平均去除负荷/(mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	底泥吸收量比例/%	植株吸附量比例/%	其他/%
氮	Z	781.399 5	77.617	13.96	16.88	69.16
	M	935.768 3	92.950	30.04	6.91	63.05
	C	947.971 6	94.163	18.96	14.77	66.27
	S	830.964 5	82.540	24.10	8.34	67.56
	Y	716.397 2	71.160	16.75	17.35	65.90
	K	961.631 2	95.519	18.80	12.29	68.91
	K+Z	921.574 5	91.540	16.63	18.33	65.04
	K+M	840.607 2	83.498	31.46	7.66	60.88
	K+C	962.217 5	95.578	25.60	14.52	59.88
	K+S	867.706 9	86.190	22.55	14.11	63.34
	K+Y	858.321 5	85.258	14.86	15.06	70.08
CK	719.385 3	71.457	29.11	—	70.89	
磷	Z	53.195 9	5.284	28.93	10.95	60.12
	M	49.159 2	4.883	51.66	4.11	44.23
	C	40.922 0	4.065	37.64	8.83	53.53
	S	53.177 3	5.282	44.82	5.72	49.46
	Y	42.693 6	4.241	26.44	12.79	60.77
	K	56.930 7	5.655	32.09	6.06	61.85
	K+Z	40.338 3	4.007	26.29	13.64	60.07
	K+M	36.653 6	3.641	53.29	4.38	42.33
	K+C	64.123 9	6.369	42.76	7.69	49.55
	K+S	43.268 8	4.298	35.54	7.07	57.39
	K+Y	41.856 9	4.158	21.36	10.02	68.62
CK	30.406 7	3.020	68.37	—	31.63	

底泥吸附氮、磷占去除总量的比例范围在 14.0%~31.5%和 26.3%~68.4%之间,底泥吸附对 TP 去除的贡献明显高于对 TN 去除的贡献。此外,空白对照组中底泥吸附氮、磷比例基本高于其他水生植物种植组,通过污染物平衡计算的其他途径对氮、磷去除量占消纳总量的比例平均达到 65.9%和 53.3%,除去营养自然流失等客观因素的考虑之外,一定程度说明存在于底泥、水体等湿地系统中的微生物菌群及酶的直接、间接作用对氮磷的去除发挥着至关重要的作用<sup>[19]</sup>,植物对湿地 N、P 去除的影响不仅直接体现在 N、P 吸收,更在于根系泌氧作用为微生物生长、活动提供了碳源。

### 3 讨论

各组水生植物在生活污水中大多长势良好,经过 2 个多月的生长,株高增长 0.4~1.5 倍,根长前后变化不显著,鲜重增加 0.2~1.8 倍。其中再力花生物量最大,鸢尾地上和地下部分生物量的比值最大。湿地植物对 N、P 的吸收量与其生物量呈显著正相关<sup>[20]</sup>,是降解低浓度生活污水中氮磷的主要力量。植物根系长度对净化水体的程度起着至关重要的作用<sup>[21]</sup>,并且地上部分生物量的占比越大,越有利于污水净化系统通过收割地上茎叶去除氮、磷物质。因此从株高、根茎长度、鲜重等植物生物量指标以及植物收获的可操作性方面来看,再力花和鸢尾具备较强的氮、磷吸收能力,是湿地植物较为理想的选择。美人蕉在整个试验阶段株高和根长增长率最低,且后期出现枯黄现象,种植美人蕉、苦草效果相对较差,原因与当地的气候条件、试验种植采用的底泥厚度、受试水深等多方面因素有关。

湿地植物可强化填料内部微生物活动,促进根际微生物吸收、根系滞留、根际周围硝化反硝化等作用,提高脱氮除磷效果。不同水生植物及组合对 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的去除效果基本一致,试验初期降幅显著,水生植物主要通过系统中细菌群落的硝化和反硝化作用的连续反应实现对氮素的去除,其中植物根际细菌与 TN 浓度变化存在良好的正相关性<sup>[22]</sup>;植物自身会吸收水中的无机氮用于体内有机氮合成<sup>[23]</sup>。另一方面由于水体中有机物的降解过程也会经氨化作用转化为  $\text{NH}_4^+$ -N,加之植物生长期的生物量变化,对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸收以及硝化、反硝化速率快慢差异等原因<sup>[24]</sup>,试验过程中 TN 及  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度在不同时间点略有变化。不同处理组水体 TP 浓度明显下降,一方面是部分可溶性磷被植物吸收利用,另一方面植物根系的分泌物能够促进磷的沉积、固结和吸附等物理作

用<sup>[25]</sup>。本次试验中组合种植的水生植物对 TP 的净化比单一种植的效果更好,搭配苦草、鸢尾的种植镶嵌组合去除率最高。此外,水体中的磷还存在一定比例的亏损流失<sup>[26]</sup>,因此对照组 TP 浓度也出现了明显下降。

底泥和植物共同作用为污染物截留和降解提供载体和转化途径<sup>[27]</sup>,其对污水中污染物指标的分离富集作用主要可以分为物理吸附、离子交换和絮凝沉淀等过程<sup>[28-29]</sup>。底泥对水体中氮磷的吸附效果各有差异,吸附量变化总体呈现出试验前期迅速增长,而后逐渐趋于平缓的趋势。试验前期微生物结构尚未稳定,氨化、硝化、反硝化作用强,且植物快速生长繁殖、基质吸附未达到饱和,因此系统的氮磷去除率逐步升高。底泥对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸附作用相对较高,大于对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除作用。由于底泥一般带负电荷, $\text{NH}_4^+$ -N 带正电荷,因此在静电引力作用下,底泥表面对水体中氮素的吸附以  $\text{NH}_4^+$ -N 为主。 $\text{NO}_3^-$ -N 带负电荷不易被底泥吸附,加之污水中自身  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度较低,所以各处理组底泥中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量均较低。底泥基质对磷素的去除主要包括对不溶性磷酸盐的物理吸附以及对可溶性磷酸盐的化学沉淀等过程。底泥中 TP 吸附量占废水中 TP 总去除量的比例远远大于各类氮素吸附量的占比,说明底泥对废水中 TP 具有较高的吸附作用。原因主要与循环形式有关,磷元素为沉积性循环,大部分磷与矿质离子形成沉淀,沉积在底泥中<sup>[30]</sup>。此外,空白对照组底泥中氮磷积累量较多,一方面与植物生长吸收营养盐能力有关,另一方面是由于植物生长拦截作用间接影响了氮磷的沉积效果<sup>[31]</sup>。

### 4 结论

(1) 水体中 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP 平均去除率分别达到 96.6%、93.2%和 95.9%,显著高于对照组。单一植物中再力花的 TN 去除率最高,鸢尾组、苦草+鸢尾组对 TP 去除率最高。整体上单一种植组与混合种植组对 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 的去除效果并无显著差异,而混合种植组对 TP 去除率略高于单一种植组。生长情况方面,再力花植株生物量最大,鸢尾地上和地下部分生物量的比值最大,梭鱼草、美人蕉干重的相对生长速率最低。

(2) 相比对磷素的吸收,水生植物对污水中氮素的有着更好的吸附效果。大型挺水植物如再力花、菖蒲等对氮的吸收同化作用更好,沉水植物比挺水植物对污水中 TP 的吸收效果更好。培养前后,大多挺水植物如再力花、梭鱼草等根部的 TN、TP 含量占比明显下降,氮、磷等养分表现出由根向茎叶转移的趋势,

但美人蕉、苦草的营养迁移规律不显著。总体上,再力花、鸢尾及苦草的镶嵌组合在淮北平原区是湿地植物较为理想的选择。

(3) 底泥 TN 总吸收量为苦草+美人蕉组最高,再力花组最低;底泥  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  总吸收量为美人蕉组最高,鸢尾组最低;底泥 TP 总吸收量为苦草+菖蒲组最高,苦草+鸢尾组最低。植物吸收氮、磷占系统总去除量的比例分别在 4.5%~17.1%和 4.1%~13.6%之间,底泥吸附氮、磷占去除总量的比例在 6.9%~18.3%和 26.3%~68.4%之间,底泥吸附和植物吸收对系统中氮素的去除比例均较低,而底泥对系统中磷素的去除贡献率较高。研究水生植物系统对氮磷的去除特征,除考虑控制试验过程中自然损耗的影响外,有必要对湿地系统中微生物菌群对氮磷去除的贡献率及其机制等方面进行更进一步的探讨。

#### [参 考 文 献]

- [1] 谢东升,朱文逸,陈劲鹏,等.5种华南地区水生植物对城市生活污水的净化效果[J].环境工程学报,2019,13(8):1903-1908.
- [2] 高海龙,程寒飞,詹茂华,等.太湖水生植物研究进展[J].湿地科学,2019,17(1):9-15.
- [3] Sardana A, Cottrell B, Soulsby D, et al. Dissolved organic matter processing and photoreactivity in a wastewater treatment constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2019,648:923-934.
- [4] Wang Qian, Xie Huijun, Zhang Jian, et al. Effect of plant harvesting on the performance of constructed wetlands during winter: Radial oxygen loss and microbial characteristics [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(10):7476-7484.
- [5] 陈耀东.中国水生植物[M].郑州:河南科学技术出版社,2012:1-2.
- [6] Gaballah M S, Abdelwahab O, Barakat K M, et al. A novel horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Typha angustifolia* for treatment of polluted water [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(22):28449-28462.
- [7] Pincam T, Jampeetong A. Treatment of anaerobic digester effluent using *Typha angustifolia* L.: Growth responses and treatment efficiency [J]. Journal of Water and Environment Technology, 2020,18(2):105-116.
- [8] 刘建伟,周晓,吕臣,等.三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J].湿地科学,2015,13(1):7-12.
- [9] 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.
- [10] Rodriguez M, Brisson J. Does the combination of two plant species improve removal efficiency in treatment wetlands? [J]. Ecological Engineering, 2016,91:302-309.
- [11] 周玥,韩玉国,张梦,等.4种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J].应用生态学报,2016,27(10):3353-3360.
- [12] 余雪花,陈垚,任萍萍,等.生物滞留系统植物筛选与综合评价[J].环境工程学报,2019,13(7):1634-1644.
- [13] 张彩莹,王妍艳,王岩.湿地植物齿果酸模对猪场废水净化作用研究[J].环境工程学报,2011,5(11):2405-2410.
- [14] 刘明文,孙昕,李鹏飞,等.3种水生植物及其组合吸收去除水中氮磷的比较[J].环境工程学报,2021,15(4):1289-1298.
- [15] 陶冶,朱健,李冰,等.基于氮、磷收支的人工湿地—池塘循环水养殖系统净化效果评价[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(2):36-45.
- [16] Spitters C J T, Kramer T. Changes in relative growth rate with plant ontogeny in spring wheat genotypes grown as isolated plants [J]. Euphytica, 1985,34(3):833-847.
- [17] de Los Reyes C P, Villamar C A, Neubauer M E, et al. Behavior of *Typha angustifolia* L. in a free water surface constructed wetlands for the treatment of swine wastewater [J]. Journal of Environmental Science and Health (Part A), 2013,48(10):1216-1224.
- [18] 卫小松,夏品华,袁果,等.湿地植物对富营养化水体中氮磷的吸收及去除贡献[J].西南农业学报,2016,29(2):408-412.
- [19] 张闻涛.洱海缓冲带对农业径流中氮磷的去除效果及机理分析[D].北京:北京科技大学,2016.
- [20] Putra R S, Cahyana F, Novarita D. Removal of lead and copper from contaminated water using EAPR system and uptake by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. Procedia Chemistry, 2015,14:381-386.
- [21] 梁奇奇,沈耀良,吴鹏,等.植物种类与水力负荷对人工湿地去除污染物的交互作用[J].环境工程学报,2016,10(6):2975-2980.
- [22] 李伟斯,李长虹,徐斌,等.人工湿地植被净化水质效果及其氮磷累积研究[J].水土保持研究,2018,25(3):250-257.
- [23] 詹金星,支崇远,夏品华,等.水生植物净化污水的机理及研究进展[J].西南农业学报,2011,24(1):352-355.
- [24] Güsewell S, Bollens U. Composition of plant species mixtures grown at various N: P ratios and levels of nutrient supply [J]. Basic and Applied Ecology, 2003,4(5):453-466.
- [25] 杨林,伍斌,赖发英,等.7种典型挺水植物净化生活污水中氮磷的研究[J].江西农业大学学报,2011,33(3):616-621.

- 滚河上游河谷土壤理化性状特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):251-256.
- [4] 丁青坡,王秋兵,魏忠义,等.抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特征研究[J].土壤通报,2007,38(2):262-267.
- [5] Ribeiro R A, Giannini T C, Gastauer M, et al. Topsoil application during the rehabilitation of a manganese tailing dam increases plant taxonomic, phylogenetic and functional diversity [J]. Journal of Environmental Management, 2018,227:386-394.
- [6] 王梦,张继卫,李昊宇,等.哈密大南湖二矿区土壤理化性质分析[J].陕西农业科学,2020,66(3):70-76.
- [7] 田佳榕,马伟波,戚旭东,等.内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):601-608.
- [8] 金立群,李希来,孙华方,等.高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究[J].土壤,2020,52(4):831-839.
- [9] 冯锦,初雯雯,端肖楠.新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及系统发育研究[J].野生动物学报,2018,39(4):737-744.
- [10] 徐文轩,杨维康,张弛,等.准噶尔盆地东部卡拉麦里山有蹄类自然保护区主要植物群落及其特征[J].植物生态学报,2016,40(5):502-507.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [12] 韩轶,杨永梅,郭志林,等.大青山小井沟自然植物群落及其土壤环境特征调查[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):115-121.
- [13] Margalef R. Information theory in ecology [J]. International Journal of General Systems, 1958,3:36-71.
- [14] Greenberg J H. The measurement of linguistic diversity [J]. Language, 1956,32(1):109-115.
- [15] Magurran A E. Why diversity? [M]//Ecological Diversity and Its Measurement. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988:1-5.
- [16] Pielou E C. Ecological Diversity [M]. New York: Wiley, 1975.
- [17] 郗金标,张福锁,毛达如,等.新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J].土壤通报,2005,36(3):299-303.
- [18] 韩煜,王琦,赵伟,等.草原区露天煤矿开采对土壤性质和植物群落的影响[J].生态学杂志,2019,38(11):3425-3433.
- [19] Herrera M A, Salamanca C P, Barea J M. Inoculation of woody legumes with selected arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia to recover desertified Mediterranean ecosystems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993,59(1):129-133.
- [20] 乌仁其其格,张德平,雷霆.呼伦贝尔草原采煤塌陷区植物群落变化分析:以内蒙古宝日希勒煤矿区为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(12):141-145.
- [21] 李晓娜,张微微,赵春桥,等.延庆区荒滩地土壤理化性质及其对植物多样性的影响[J].草地学报,2019,27(3):695-701.
- [22] 龚艳宾,郭建斌,赵秀海,等.吉林蛟河天然阔叶红松林草本植物多样性及其与土壤因子的关系[J].浙江农林大学学报,2016,33(4):620-628.

(上接第 22 页)

- [26] 徐晓锋,史龙新,许海,等.水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果[J].生态学杂志,2006,25(4):383-388.
- [27] Nguyen X C, Chang S W, Nguyen T L, et al. A hybrid constructed wetland for organic-material and nutrient removal from sewage: Process performance and multi-kinetic models [J]. Journal of Environmental Management, 2018,222:378-384.
- [28] Yang Yan, Zhao Yaqian, Liu Ranbin, et al. Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2018,261:441-452.
- [29] Listosz A, Kowalczyk-Jusko A, Józwiakowski K, et al. Productivity and chemical properties of *Salix viminalis* in a horizontal subsurface flow constructed wetland during long-term operation [J]. Ecological Engineering, 2018,122:76-83.
- [30] 董佳,田相利,董双林,等.三疣梭子蟹和凡纳滨对虾混养系统的氮磷收支的研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(12):16-24.
- [31] 杨忠臣.人工湿地植物根系泌氧和分泌物影响污染物去除的机制研究[D].山东 济南:山东大学,2016.