

不同配置人工湿地植物群落对生活污水净化效果

吴雨涵¹, 余俊¹, 王锐涵²

(1.苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215000; 2.南京林业大学 艺术设计学院, 南京 210037)

摘 要:植物群落是湿地生态系统的重要组成部分,湿地植物群落物种组成对水体净化功能具有重要作用。选择茭草(*Zizania caduciflora*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)4种湿地常见物种和CK(无植被)的人工湿地,对不同湿地植物群落净化污水的效果进行了对比研究。结果表明:4种不同植物群落人工湿地对生活污水净化效果不同,其中BOD₅, COD_{Cr}, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP质量浓度随时间变化逐渐降低,相同月份BOD₅, COD_{Cr}, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP质量浓度大致表现为CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;BOD₅, COD_{Cr}, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP去除率随时间变化逐渐增加,相同月份去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,局部有所波动。4种不同植物群落地上生物量变化范围为25.9~39.6 g/m²,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,其中眼子菜和菖蒲差异不显著($p>0.05$),鸢尾和茭草差异不显著($p>0.05$);地下生物量变化范围在31.2~41.3 g/m²,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,不同植物差异均显著($p<0.05$);地下N, P累积量均高于地上N, P累积量,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,不同植物地上和地下P累积量差异均不显著($p>0.05$)。相关性分析表明,茭草、鸢尾、菖蒲和眼子菜TP与P累积量呈显著正相关;TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N与N累积量呈显著正相关;COD_{Cr}, BOD₅与地下生物量呈显著正相关,与地上生物量和P累积量没有显著相关性($p>0.05$)。由此表明,地下生物量在净化水质过程中起着重要作用,根系发达的植物具有更强的净化效果。

关键词:人工湿地; 植物群落; 生活污水; 净化

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0364-08

Effects of Sewage Purification by Different Plant Communities in the Constructed Wetland

WU Yuhan¹, YU Jun¹, WANG Ruihan²

(1.Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

2.College of Art and Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract:Hygrophyte is an important part of a constructed wetland system. Species composition of wetland plant communities are important in the water-cleaning functions of wetlands. Four common wetland plants (*Zizania caduciflora*, *Iris tectorum*, *Acorus calamus* and *Potamogeton pectinatus*) in natural wetlands were chosen. The effect of the different plant communities on the treatment of domestic sewage were compared. The results showed that the four different plant communities in constructed wetlands had different impact, and the concentrations of BOD₅, COD_{Cr}, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP decreased with the time, decreased in the order: CK>*Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*>*Acorus calamus*>*Potamogeton pectinatus*; the purification effects of BOD₅, COD_{Cr}, TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP increased with the time, decreased in the order: CK>*Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*>*Acorus calamus*>*Potamogeton pectinatus*; the aboveground biomass ranged from 25.9~39.6 g/m², following the order: *Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*>*Acorus calamus*>*Potamogeton pectinatus*, effects of *Zizania caduciflora* and *Iris tectorum* had no significant difference ($p>0.05$), effects of *Acorus calamus* and *Potamogeton pectinatus* had no significant difference ($p>0.05$); the belowground biomass ranged from 31.2~41.3 g/m², following the order: *Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*>*Acorus calamus*>*Potamogeton pectinatus*, and presenting the significant difference ($p<0.05$); N and P accumulations in belowground were higher than aboveground, which decreased in the

收稿日期:2018-01-20

修回日期:2019-02-20

资助项目:江苏高校哲学社会科学项目“苏南农业特色小镇发展途径和评价标准研究”(2018SJA1422)

第一作者:吴雨涵(1990—),女,江苏南京人,硕士,讲师,主要从事湿地生态学研究。E-mail:Hanyu_wuu@163.com

order: *Zizania caduciflora* > *Iris tectorum* > *Acorus calamus* > *Potamogeton pectinatus*, difference of P accumulation between the aboveground and belowground was not significant ($p > 0.05$). The correlation analysis showed that there was the significant positive correlation between TP and P accumulations in water bamboo, irises, calamus and brassica. TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and N accumulations were significantly positively correlated. COD_{Cr} and BOD_5 were positively correlated with underground biomass, but not correlated with aboveground biomass and P accumulation. In total, the underground biomass plays an important role in the process of purifying water quality, and the plants with well developed root have the greater clean-up effect.

Keywords: constructed wetland; plant community; sewage; purification effects

在社会经济不断深入发展的同时,水污染等问题也日益突出,为了有效解决这一问题,多种污水处理方式应运而生,尤其是人工湿地的运用很大程度上提升了污水处理水平,这种人工构建的湿地兴起于 20 世纪 70 年代,是对土壤、砾石及炉渣的综合运用,充分发挥了三者有机结合的净化效果,三者经过一定比例混合后形成特定的基底,加之相应植被的种植,能够对污染物进行较好的净化^[1-2];作为重要的污水处理系统,其不仅包括了基底及植被,同时还有水体及微生物,这 4 大基本要素借助于相应的理化反应来吸附过滤污染物,从而形成较好的去污效果,不仅成本较低,且具有低能耗的明显益处,在现代社会水体净化方面效果突出,同时利于水体富营养化的治理,在很多地区的实验及实地运用效果显著^[3]。对于人工湿地而言,其净化效果不仅通过吸附过滤,同时还有沉积等作用,此外,不同类型的湿地,其对不同污染物的处理能力存在较明显差异,因此能够有针对性地处理不同污染物^[4-5]。常用的基质不仅有砾石和炉渣,同时还可以利用工业副产品作为基质填充,近些年来混合基质应用较为广泛,尤其是沸石、白云石等^[6]。随着研究的不断深入,关于湿地的研究不仅仅在于基质填充物及植被的研究,更向其不同处理能力的深入分析进行探讨,大量研究表明,对于香蒲 (*Typha orientalis*),美人蕉 (*Canna indica*) 而言,其能够作为良好的湿地植被,在净化水质方面效果显著,且其能够凭借良好的适应性而被广泛运用^[7-8]。随着生活污染和工业废水的不断排放,污水治理已经刻不容缓,这直接关乎社会经济发展,更关乎居民社会生活,因此开展此方面的研究能够带来较大的现实意义^[9],且具有现实必要性,这将对水质的优化起着积极的意义,能够为社会生活创造更好的环境^[10]。

对于湿地而言,植被在其中起着重要的过滤及吸附作用,且能够利于微生物活动,为之创造较好的新陈代谢环境^[11],不同的湿地植被起着不同的吸附过滤效果,通过有侧重地进行植被种植,能够对特定污染物进行有效去除,从而提升净化水质的效果,尤其

是不同植被的混合能够显著增强污水的综合治理水平,对其营养物质进行有效平衡,利于湿地物质和能量交换,同时促进水生生物发育,促进湿地生态平衡,最终提升的是湿地的综合净化能力^[12-13]。对于湿地而言,不同湿地植被的组合能够产生不同的水质净化效果,且其能够产生相互作用,最终促使湿地系统产生不同的污水去除效果,提升湿地的功能差异,尤其是在污水具有多种污染物的情况下,植被错配能够起到良好的综合净化效果,最终提升整个湿地的净化水质能力。近年来,大量学者开展湿地相关研究,尤其是基质填充物方面及植被方面^[14],但多集中在单植被方面,对于植被的错配研究相对较少。基于此,本研究从多种植被错配的角度开展相应的研究,从而探究人工湿地在净化水质方面的效果,研究所选的植被不仅包括茭草、鸢尾,还有菖蒲及眼子菜,这些都是常用的植被,为了进行试验对比,特设定未进行植被种植的对照组,从而通过综合对比来探究植被在湿地污水治理方面的效果,从而为提升湿地的综合净化能力提供有益参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

人工废水配置:TN(26.3 mg/L);TP(0.39 mg/L); COD_{Cr} (156.3 mg/L); BOD_5 (102.3 mg/L); $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (15.3 mg/L); $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (0.45 mg/L)。

1.2 人工湿地设计与流程

本试验在南京林业大学进行,所构造的人工湿地将底部作为集水区,并将尼龙网铺设其上,根据所选择的湿地植被,共构造了 4 类湿地单元,为了增强实验准确性,特对各单元开展 5 次重复,要求各单元的长、宽、深分别达到 20,5,1 m,其间借助于 0.5 m 的土壤分开;对于基质填充物主要进行 3 层分布,其铺设厚度均为 25 cm:最底层为排水层,其用大粒砾石填充,要求粒径在 20~30 mm;将中号炉渣作为中层基质填充物,要求粒径在 15~25 mm;最上层则用小号炉渣作为

填充,要求其粒径在 10~15 mm,同时用泥沙加以填充;对于湿地植被种植而言,要求其密度为 3~7 颗/m²,由于集水区位于单元底部,因此需要在其上铺设尼龙网,这样能够有效降低填料的下渗,同时在对角线方向铺设 PVC 管,要求其直径达到 10 mm,这样能够实现循环水的流通,能够很好地进行样品采集。

本实验开始于 2016 年 5 月,为了较好地进行试验对比,首先需要开展植被的驯化,采取的是微污染水培养,时间长达一个月,选用的植被不仅有茭草(*Zizania caduciflora*)、鸢尾(*Iris tectorum*),还有菖蒲(*Acorus calamus*)及眼子菜(*Potamogetonaceae*),将长势较为接近的植株植于沙质基质,首先用自来水灌溉至饱和,然后利用地下水开展长达 1 个月的培养,要求其上的水层厚度约为 2 cm,并进行 3~5 次的换水;于 7 月 20 日在湿地中注入污水,并通过布水管逐渐下渗,放水时间长达 12 h;最终处理过的污水将通过 PVC 管排出,待植被生长 1 年后开展相应的指标测定。

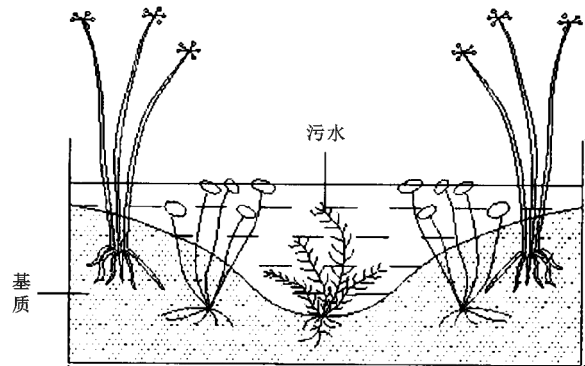


图 1 人工湿地植物群落构建示意图^[14]

1.3 测定方法

当湿地的运营时间长达 1 年后方进行取水实验,

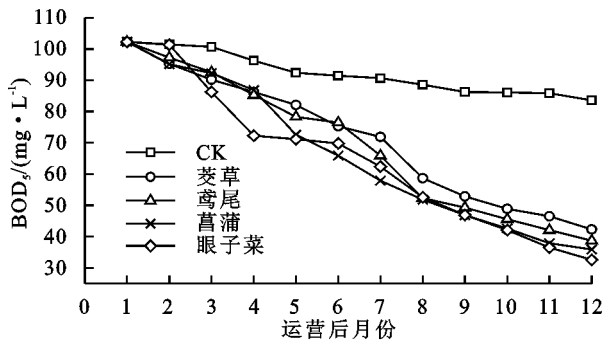


图 2 水体 BOD₅ 变化及去除率

并对各项指标开展分析,各水质指标的去除率=[(进水口值-出水口值)/出水口值]×100%^[15]。

同时对各单元植被情况进行对比分析,并做好记录,尤其是其中 1 m² 样方的植被数量、长势情况,为了对比地上及地下部分生物量,需要将其进行收割,并分为地上及地下两部分,指标测定之前首先进行烘干处理,并粉碎后经过 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮使之成为溶液,对于 TN、TP 的测定分别采用光度法、钼钼蓝法进行。

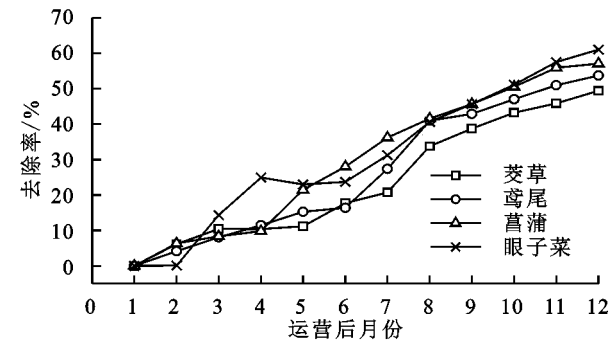
植被 N、P 积累量=植被体内 N、P 浓度×植被生物量^[16]

实验过程中不仅需要 对 TN、TP 开展相应的指标测定,还需要对 NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD_{Cr} 进行指标测定,分别采取光度法、接种法、氧化法进行^[17]。

2 结果与分析

2.1 水体 BOD₅ 变化

由图 2 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 BOD₅ 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 83.6~102.3 mol/L,茭草 BOD₅ 质量浓度变化范围为 42.3~102.3 mol/L,鸢尾质量浓度变化范围为 38.7~102.3 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 35.9~102.3 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 32.6~102.3 mol/L,相同月份 BOD₅ 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;BOD₅ 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 BOD₅ 去除率变化范围为 0~49.4%,鸢尾去除率变化范围为 0~53.7%,菖蒲去除率变化范围为 0~57.1%,眼子菜去除率变化范围为 0~61.0%,相同月份 BOD₅ 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草。



2.2 水体 COD_{Cr} 变化

由图 3 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 COD_{Cr} 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 92.3~156.3 mol/L,茭草 COD_{Cr} 质量浓度变化范围为 85.6~156.3 mol/L,鸢尾质量浓度

变化范围为 72.3~156.3 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 65.9~156.3 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 52.1~156.3 mol/L,相同月份 COD_{Cr} 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;COD_{Cr} 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 COD_{Cr} 去除

率变化范围为 0~7.3%,鸢尾去除率变化范围为 0~20.7%,菖蒲去除率变化范围为 0~28.6%,眼子菜

菜去除率变化范围为 0~43.6%,相同月份 COD_{Cr} 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>鸢尾。

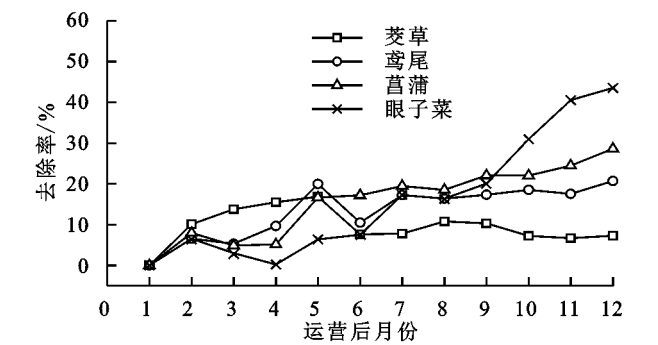
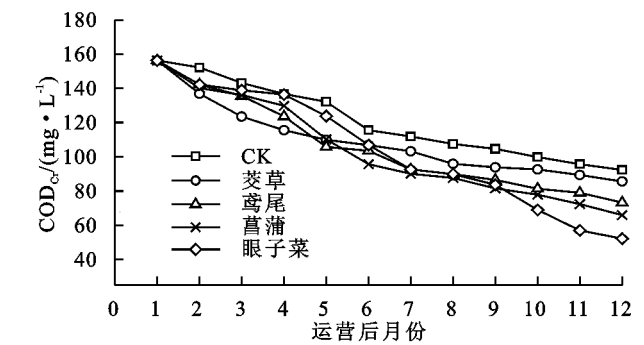


图3 水体 COD_{Cr} 变化及去除率

2.3 水体 TN 变化

由图 4 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 TN 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 19.2~23.6 mol/L,茭草 TN 质量浓度变化范围为 17.3~23.6 mol/L,鸢尾质量浓度变化范围为 16.5~23.6 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 16.2~23.6 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 15.7~23.6 mol/L,

相同月份 TN 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;TN 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 TN 去除率变化范围为 0~9.9%,鸢尾去除率变化范围为 0~14.1%,菖蒲去除率变化范围为 0~15.7%,眼子菜去除率变化范围为 0~18.2%,相同月份 TN 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>鸢尾。

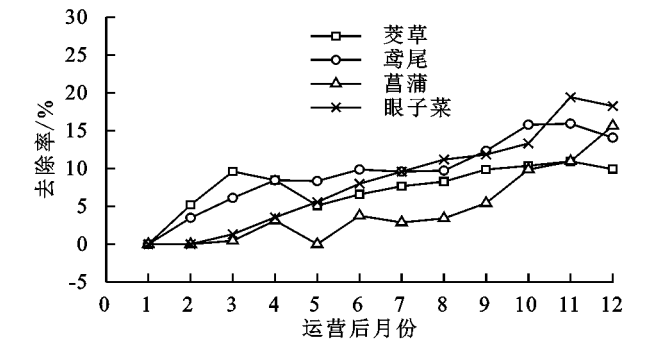
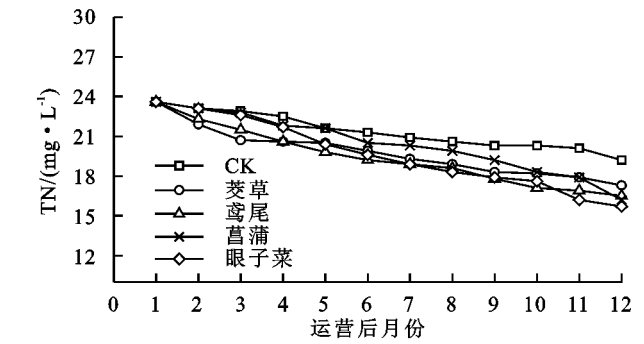


图4 水体 TN 变化及去除率

2.4 水体 NH_4^+-N 变化

由图 5 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 NH_4^+-N 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 12.9~15.3 mol/L,茭草 NH_4^+-N 质量浓度变化范围为 10.3~15.3 mol/L,鸢尾质量浓度变化范围为 9.5~15.3 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 8.3~15.3 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 6.7~15.3

mol/L,相同月份 NH_4^+-N 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜; NH_4^+-N 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 NH_4^+-N 去除率变化范围为 0~20.2%,鸢尾去除率变化范围为 0~26.4%,菖蒲去除率变化范围为 0~35.7%,眼子菜去除率变化范围为 0~48.1%,相同月份 NH_4^+-N 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>鸢尾。

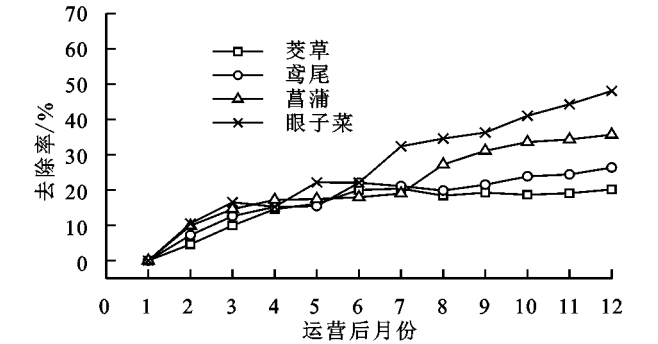
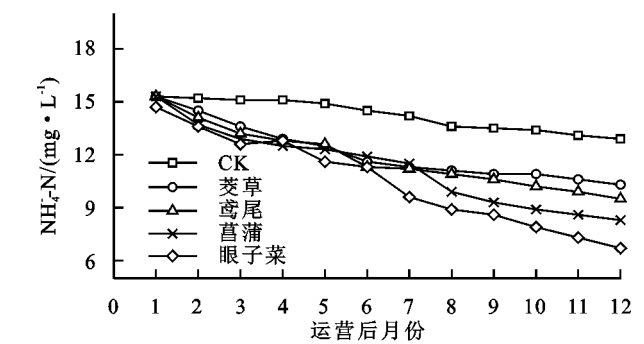


图5 水体 NH_4^+-N 变化及去除率

2.5 水体 NO₃⁻-N 变化

由图 6 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 NO₃⁻-N 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 0.29~0.45 mol/L,茭草 NO₃⁻-N 质量浓度变化范围为 0.16~0.45 mol/L,鸢尾质量浓度变化范围为 0.12~0.45 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 0.11~0.45 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 0.09~0.45

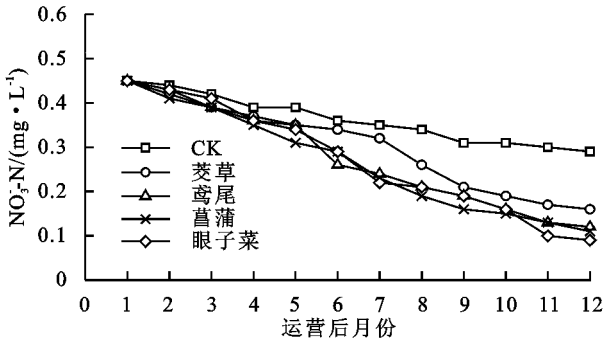
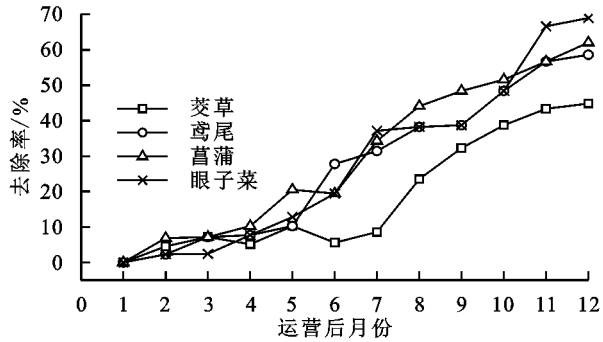


图 6 水体 NO₃⁻-N 变化及去除率

mol/L,相同月份 NH₄⁺-N 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;NO₃⁻-N 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 NO₃⁻-N 去除率变化范围为 0~44.8%,鸢尾去除率变化范围为 0~58.6%,菖蒲去除率变化范围为 0~62.1%,眼子菜去除率变化范围为 0~69.0%,相同月份 NO₃⁻-N 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草。



2.6 水体 TP 变化

由图 7 可知,不同空间配置的 4 种湿地植物群落中 TP 质量浓度随时间变化逐渐降低,CK 质量浓度变化范围为 0.23~0.39 mol/L,茭草 TP 质量浓度变化范围为 0.19~0.39 mol/L,鸢尾质量浓度变化范围为 0.17~0.39 mol/L,菖蒲质量浓度变化范围为 0.15~0.39 mol/L,眼子菜质量浓度变化范围为 0.14~

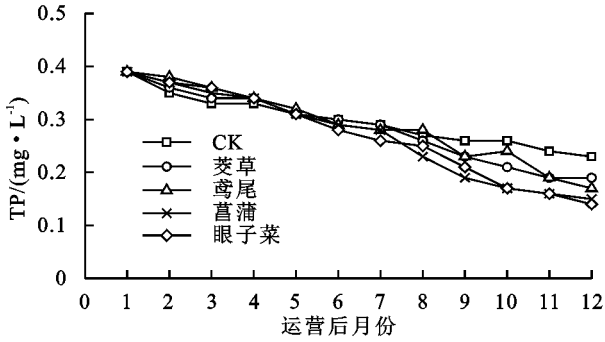
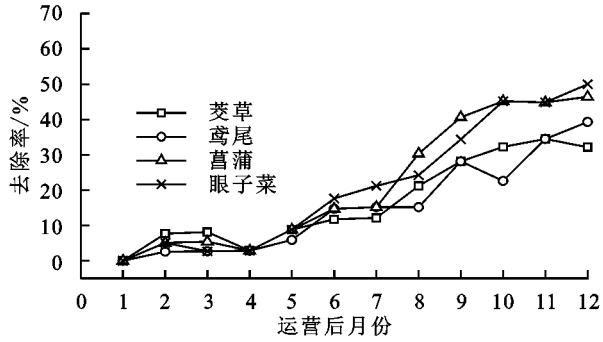


图 7 水体 TP 变化及去除率

0.39 mol/L,相同月份 TP 质量浓度大致表现为 CK>茭草>鸢尾>菖蒲>眼子菜;TP 去除率随时间变化逐渐增加,茭草 TP 去除率变化范围为 0~32.1%,鸢尾去除率变化范围为 0~39.2%,菖蒲去除率变化范围为 0~46.4%,眼子菜去除率变化范围为 0~50.0%,相同月份 TP 去除率大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草。



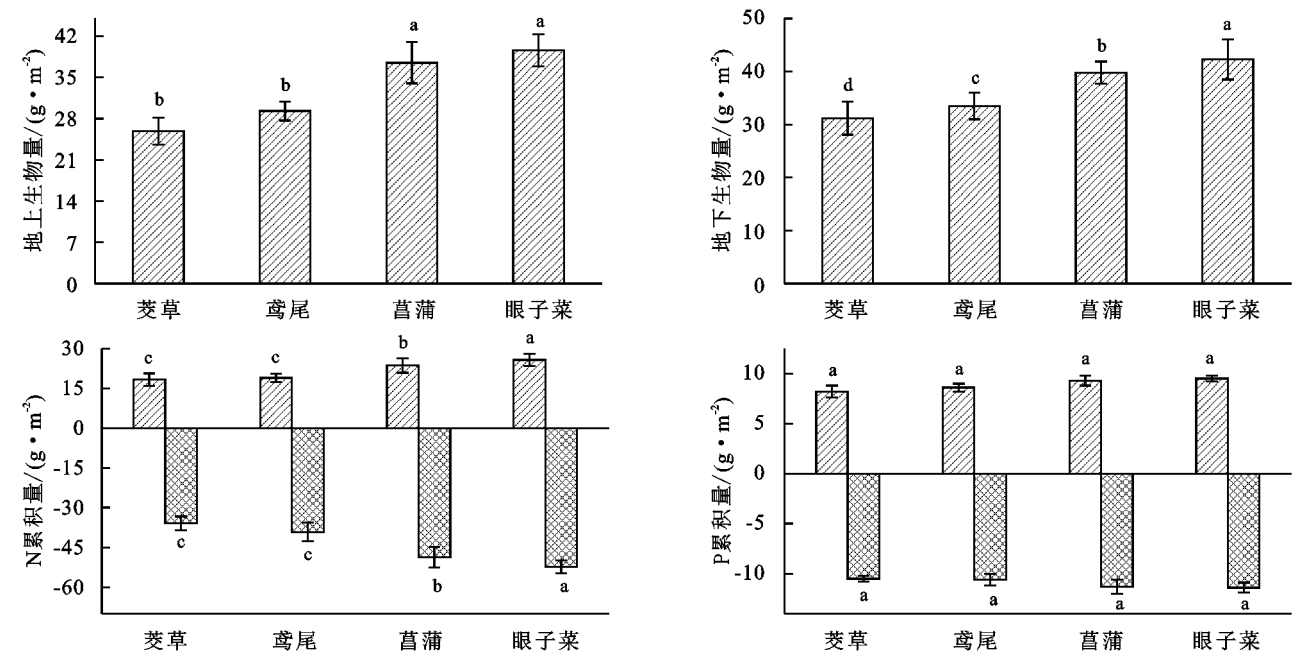
2.7 湿地植被生物量及氮、磷积累量

由图 8 可知,湿地植被地上生物量变化范围为 25.9~39.6 g/m²,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,其中眼子菜和菖蒲差异不显著($p>0.05$),鸢尾和茭草差异不显著($p>0.05$);地下生物量变化范围为 31.2~41.3 g/m²,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢尾>茭草,不同植物差异均显著($p<0.05$)。地上 N 积累量变化范围为 18.3~25.7 g/m²,地下 N 积累量变化范围为 35.9~52.4 g/m²,地上 P 积累量变化范围为 8.2~9.5 g/m²,地下 P 积累量变化范围为 10.5~11.4 g/m²,大致表现为眼子菜>菖蒲>鸢

尾>茭草,不同植物地上和地下 P 积累量差异均不显著($p>0.05$)。

2.8 生活污水各指标之间的相关性

采用 Pearson 相关系数法分析各指标去除率之间的相关性。由表 1 可知,各指标去除效应之间存在一定的相关性,其中茭草、鸢尾、菖蒲和眼子菜 TP 与 P 积累量呈显著正相关,茭草、鸢尾、菖蒲和眼子菜 TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 与 N 积累量呈显著正相关,茭草、鸢尾、菖蒲和眼子菜 COD_{Cr}, BOD₅ 与地下生物量呈显著正相关,与地上生物量和 P 积累量没有显著相关性($p>0.05$)。



注:不同小写字母表示不同湿地植被生物量及氮、磷积累量在 0.05 水平差异显著($p<0.05$)。

图 8 湿地植被生物量及氮、磷积累量

表 1 生活污水各指标之间的相关性($n=20$)

项目		COD _{Cr}	BOD ₅	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP
茭草	地上生物量	0.106	0.236	0.302	0.156	0.259	0.056
	地下生物量	0.621*	0.529*	0.523*	0.415	0.526*	0.203
	N 累积量	0.523*	0.501*	0.623*	0.654*	0.523*	0.157
	P 累积量	0.301	0.256	0.023	0.148	0.247	0.596*
鸢尾	地上生物量	0.316	0.501*	0.125	0.244	0.251	0.302
	地下生物量	0.589*	0.623*	0.516*	0.615*	0.702**	0.101
	N 累积量	0.499*	0.614*	0.685*	0.712**	0.602*	0.089
	P 累积量	0.158	0.207	0.059	0.248	0.014	0.568*
菖蒲	地上生物量	0.248	0.302	0.526*	0.104	0.201	0.201
	地下生物量	0.756**	0.702**	0.704**	0.623*	0.789**	0.125
	N 累积量	0.724**	0.716**	0.753**	0.701**	0.687*	0.098
	P 累积量	0.259	0.347	0.253	0.489	0.275	0.623*
眼子菜	地上生物量	0.417	0.302	0.262	0.450	0.621*	0.201
	地下生物量	0.746**	0.721**	0.789**	0.802**	0.701**	0.329
	N 累积量	0.701**	0.803**	0.763**	0.803**	0.817**	0.078
	P 累积量	0.151	0.423	0.123	0.202	0.247	0.634*

注:**代表相关性在 0.01 水平上显著(双尾),*代表相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

3 讨论与结论

对于不同的湿地植被而言,其在污水净化过程中能够产生相互作用,这就是植被的群落分布,其作为初级生产者,为了应对变化的自然环境,往往形成了不同的群落分布,并随着环境的变化而有所不同^[18]。就不同群落分布的植被而言,其拥有独特的多样性及生长特点,能够据之开展相应的物质和能量交换及循环,对于污水中的物质交换同样有所差异,其不同的

分布特点,能够对水质中的养分产生不同的反应,这就形成了较为明显差异的净化效果,污水中常见 N、P 等物质,多种植被的组合能够起到更好的净化效果,这就是植被不同特点的组合效果,也是植被群落分布的协同效应,能够将其效能进行更大程度的发挥,对于能量交换作用显著,促进生态平衡,这对于湿地植被错配起着重要意义^[19-20]。通过对比分析可知,虽然植被错配有所差异,但是均在污水净化过程中起到了良好效果,对于 TN、TP、NH₄⁺-N 净化效果最好

的是眼子菜,其次是菖蒲及鸢尾,而茭草的净化效果稍差,对 BOD_5 、 COD_{Cr} 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化效果亦是如此,这说明湿地植被在污染物去除方面具有较显著的作用,这与以往研究一致^[5-6]。大量的研究表明,就除氮效果来讲,沉水植被起着重要作用,且效果显著,在湿地构建过程中需要注重加以利用,从而更好地进行除氮;此外,通过湿地植被的根系对比可知,更为发达的根系能够促进植被对污染物的吸附及过滤效果的提升,从而促进净化效果的提升,尤其是挺水植被,其根系尤为发达^[21]。通过实验对比得知,不同的湿地植被,其在水质净化方面具有不同的效果,与鸢尾和茭草对比而言,眼子菜和菖蒲具有更强的净化能力,对于 COD_{Cr} 污染物去除而言,主要通过根系吸附利用及微生物的分解,这一过程中离不开氧气的支撑,而茭草缺乏发达的根系,难以充分地吸收利用 COD_{Cr} ,因此对之难以产生较强的去污能力,从空间错配的角度来讲,眼子菜和菖蒲具有更为复杂的群落分布,能够形成更明显的多样性分布,在去污方面的效果较强^[22-23]。对于不同植被而言,由于其存在不同的生长能力及根系,对养分的需求也有所差异,因此在水质净化方面的效果存在较大差异^[24],因此只有注重植被的错配,才能形成良好的综合去污能力,提升湿地的净化效果。通过实验对比不难发现,通过植被的合理搭配,能够带来更好的污水净化效果,眼子菜和菖蒲凭借其长势特点形成了较好的去污效果,在湿地净化效果发挥方面较为突出,有效地促进了湿地系统平衡。时间差异也在影响着湿地去污效果,眼子菜和菖蒲对 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 具有良好的去污效果,尽管其时间在不断变化,但是其去污能力依然较强。不少学者通过实验对比得知,沉水植被能够通过其根系将底质的氮元素进行有效吸收,通过植物体对水中的氮素吸收利用,其对氮的去除能力远超过浮叶植被^[25],因此来说,与鸢尾和茭草相比而言,眼子菜和菖蒲能够产生更好的去氮效果。

通过实验分析得知,从 N 的去除角度来讲,其过程较为复杂^[17],一方面充分利用了硝化及反硝化作用,另一方面充分利用了植被的吸附过滤效果,同时借助于微生物的固氮效应,加之氮素具有一定的迁移转化特点^[22];对于城市径流而言, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 产生了大量的 TN ,硝化作用能够有效去除。对于人工湿地而言,其复氧能力并不强,在氨化及硝化作用较弱的情况下,其难以产生较强的反硝化效应^[26],这就容易形成较高的 TN ;从 TP 去除效果来讲,人工湿地并无较强的净化能力;湿地植被及基质主要通过吸附 P 素来实现其净化效果,此外,微生物也会为之产生较

为明显的分解效应。通过本实验分析得知,本湿地的 pH 值并不高,基质的 Ca 、 Fe 含量较高,容易形成明显的 $\text{Ca}-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$ 沉淀;当其吸附能力无法继续增加的情况下,磷素将难以被吸附,甚至可能被释放,从而在基质的参与下形成了磷调节^[19-20]。

对于湿地植被而言,其不仅通过茎叶有效吸附过滤水质中的污染物,还能够通过根系对基底污染物吸附,从而形成较强的污水净化效果;另外,还能够为微生物活动提供良好的环境,促进其对污染物的分解及利用,最终促进水质净化效果的提升,促进湿地净化效果。更为发达的根系能够促进植被对污染物的吸附及过滤效果的提升^[25-26],从而促进净化效果的提升,尤其是挺水植被,其根系尤为发达,尤其是植被错配能够带来较突出的净化效果。通过研究分析得知,随着湿地运行的增加,其去污效果不断增强,在其运行初期,由于植被尚未形成较为发达的根系及茎叶,无法产生明显的吸附过滤效果,因此在去污方面的效果弱于其成熟期,而经过 1 年的运行,其效果日益凸显;但是尽管在其进入衰老期,其净化效果依然未发生显著的下降,这说明其具有较好的净化持续性,也从另一个方面说明根系在水质净化方面的突出效果。通过对比植株体内 N 、 P 含量可知,其地上部分高于地下部分,这主要与其养分供给有关;植被对其积累量反映着其直接的去除能力,也可以通过收割的方式将其积累量去除。

参考文献:

- [1] Lü T, Zhang Y, Zhang L, et al. Removal of the pesticides imazalil and tebuconazole in saturated constructed wetland mesocosms[J]. *Water Research*, 2016, 91: 126-136.
- [2] Oon Y L, Ong S A, Ho L N, et al. Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 203: 190-197.
- [3] Hang Q, Wang H, Chu Z, et al. Application of plant carbon source for denitrification by constructed wetland and bioreactor: review of recent development[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(9): 8260-8274.
- [4] Fu G, Huangshen L, Guo Z, et al. Effect of plant-based carbon sources on denitrifying microorganisms in a vertical flow constructed wetland[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 224: 214-221.
- [5] De R P, Greenway M, El H A. Phosphorus removal from secondary sewage and septage using sand media amended with biochar in constructed wetland mesocosms[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 123-133.
- [6] 雷旭,李冰,李晓,等.复合垂直流人工湿地系统中不同植物根际微生物群落结构[J].*生态学杂志*, 2015, 34(5):

1373-1381.

[7] 史鹏博,朱洪涛,孙德智.人工湿地不同填料组合去除典型污染物的研究[J].环境科学学报,2014,34(3):704-711.

[8] 刘曦,赵亚芳,张小玲,等.2012 年洱海地区邓北桥人工湿地和永安江生态护岸植物群落多样性[J].湿地科学,2018,16(1):45-50.

[9] 胡世琴.人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究[J].水土保持研究,2017,24(1):200-206.

[10] 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):15-20.

[11] 左倬,陈煜权,成必新,等.不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2016,36(4):953-960.

[12] 张骁栋,李伟,潘旭,等.表流人工湿地氮素形态组成及去除效率研究[J].生态环境学报,2016,25(3):503-509.

[13] 李紫霞,唐晓丹,崔理华.3 种负荷对模拟垂直流人工湿地去除氮,磷效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(2):637-642.

[14] 黄余春,田昆,岳海涛,等.云南高原 4 种湿地植物群落对生活污水 TP、COD 净化效果研究[J].西部林业科学,2012,41(2): 33-37.

[15] 武俊梅,徐栋,张丽萍,等.人工湿地基质再生技术的研究进展[J].环境工程学报,2015,9(11):5133-5141.

[16] 李振灵,丁彦礼,白少元,等.潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J].环境科学,2017,38(9): 3713-3720.

[17] 刘阳,李丹,孙红英,等.模拟人工湿地植物丰富度对硝氮去除及净温室效应的影响[J].生态学杂志,2015,34(8):2173-2180.

[18] 陶敏,贺锋,胡晗,等.碳氧调控下人工湿地净化效果的协同与拮抗研究[J].中国环境科学,2015,35(12): 3646-3652.

[19] 晋凯迪,于鲁冀,陈涛,等.植物碳源调控对人工湿地脱氮效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(10):5611-5616.

[20] 陈咄圳,华进程,郑向群,等.以建筑废砖为填料的人工湿地对农村生活污水的净化效果[J].环境工程,2017,35(9):35-39.

[21] 房昀昊,彭剑峰,宋永会,等.高通量测序法表征潜流人工湿地中不同植物根际细菌群落特征[J].环境科学学报,2018,38(3):911-918.

[22] 张彩莹,杜瑞卿,王岩.季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(4):1706-1712.

[23] 张长宽,倪其军,杨栋,等.低温条件下高效复合人工湿地对尾水的净化效应[J].环境工程学报,2017,11(4): 2034-2040.

[24] 唐孟煊,吴娟,代嫣然,等.组合式垂直流人工湿地工艺及其污水处理效果[J].环境工程学报,2016,10(3): 1017-1022.

[25] 张玉,徐德福,李映雪,等.2 种动物对复合垂直流人工湿地基质中磷形态的影响[J].环境工程学报,2016,10(5):2413-2419.

[26] 郭士林,叶春,李春华,等.水位波动对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响[J].中国环境科学,2017,37(3): 932-940.

(上接第 363 页)

[16] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等.秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量,酶活性及产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.

[17] 张洁梅,武继承,杨永辉,等.不同节水灌溉方式对小麦产量及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2016(8): 30-32.

[18] 潘复燕,薛利红,卢萍,等.不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(5):928-936.

[19] 张翼,张根峰,曹雯梅.施磷量对旱作区小麦产量及氮、磷、钾利用效率的影响[J].河南农业科学,2015,44(7): 29-31.

[20] 苗艳芳,李生秀,扶艳艳,等.旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J].应用生态学报,2014,25(4):1013-1021.

[21] 顾克军,张斯梅,顾东祥,等.稻秸还田与播后镇压对稻茬小麦产量与品质的影响[J].核农学报,2015,29(11): 2192-2197.

[22] 俄胜哲,杨志奇,罗照霞,等.长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(1):104-110.

[23] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,等.西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响[J].生态学报,2014,34(19):5503-5513.

[24] 张玉娇,李军,郭正,等.渭北旱塬小麦产量和土壤水分对保护性耕作的响应模拟[J].应用生态学报,2015,26(3):800-808.