

3 种人工植物群落对污水净化模拟试验

郝桂枝¹, 张银龙², 祝浩翔^{1*} (1. 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715; 2. 四川博远达建筑工程有限公司, 四川成都 610000)

摘要 [目的] 研究不同植物群落对氮磷的去除能力以及腐烂植物对水体的二次污染影响。[方法] 通过构建模拟试验, 选取 6 种重庆市常见的湿地植物进行组合配置, 形成了 3 个人工湿地植物群落, 比较分析人工湿地植物群落对生活污水净化的差异。[结果] 在生物量方面, 3 个人工湿地植物群落的总生物量存在显著差异 ($P < 0.05$), 同种植物在不同人工群落的生物量也存在显著差异; 在净化效果方面, 各人工湿地植物群落的 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 月平均去除率表现为群落 3 (再力花+菖蒲+鸢尾+狐尾藻) > 群落 2 (再力花+菖蒲+水葱+狐尾藻) > 群落 1 (美人蕉+菖蒲+水葱+狐尾藻), TP 月平均去除率排序依次为群落 1 > 群落 3 > 群落 2; 对比 2 种腐烂植物对水体的二次污染影响发现, 相同时间内狐尾藻水体中的 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 浓度升高比菖蒲快, 沉水植物相对于挺水植物更容易分解。[结论] 该研究为重庆地区构建健康稳定的植物群落和提高湿地系统的净化能力提供科学依据。

关键词 湿地植物; 植物群落; 生长状态; 生活污水; 净化效果

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)11-0081-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.11.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation Experiment of Sewage Purification by Three Artificial Plant Communities

HAO Gui-zhi¹, ZHANG Yin-long², ZHU Hao-xiang¹ (1. College of Horticulture and Landscape, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Sichuan Boyuanda Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000)

Abstract [Objective] The research aimed to study the ability of different plant communities to remove nitrogen and phosphorus and the secondary pollution of decaying plants to water bodies. [Method] By constructing a simulation experiment, six common wetland plants in Chongqing were selected for combined configuration and three plant wetland plant communities were formed. The differences in the purification of domestic sewage by constructed wetland plant communities were compared. [Result] There were significant differences in total biomass of the three wetland plant communities ($P < 0.05$). There were also significant differences in biomass of same plants in different communities. In terms of purification effect, the average removal rate of TN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in each constructed wetland plant community was as follows: community 3 (re-flower + calamus + iris + foxtail algae) > community 2 (re-flower + calamus + water onion + Myriophyllum sp.) > Community 1 (canna + calamus + water onion + Myriophyllum verticillatum), the average removal rate of TP was community 1 > community 3 > community 2. Comparing the effect of two rotted plants on secondary pollution, it was found that the concentration of TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and P in water of Myriophyllum verticillatum increased faster than Acorus calamus during the same time. Submerged plants decomposed more easily than emergent plant. [Conclusion] This study can provide a scientific basis for the construction of healthy and stable plant communities in Chongqing and the improvement of the purification capacity of wetland systems.

Key words Wetland plants; Plant community; Growth state; Domestic sewage; Purification effect

湿地植物不仅可以直接吸收污水中的污染物, 还可以使污水中的营养物质得到再循环和利用, 同时在为微生物提供根际环境、改善小气候和美化环境等方面都有着积极作用。近年来, 学者们对湿地植物的去污机制、作用及筛选原则进行了大量研究^[1]。目前在植物组合配置研究方面, 由于不同植物在营养吸收能力、根系分布深度、生长季节、生物量和抗逆性等方面存在差异, 所以湿地植物之间的搭配组合成为当前的研究热点, 但现有报道研究多集中在植物种类等比例组合上^[2-5], 较少见到对湿地植物群落构建的研究, 且不同湿地群落的净化效果差异、植物物种之间是否存在相互作用和影响目前尚缺乏深入研究。该研究依托西南大学后山实验基地, 选取 6 种重庆市常见的湿地植物进行组合配置, 形成了 3 个人工湿地植物群落, 对比分析不同人工湿地植物群落生物量变化差异以及对生活污水净化的效果, 探讨造成相关现象的内在原因, 以期为重庆地区构建健康稳定的植物群落和提高湿地系统的净化能力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 植物群落配置及试验场地构建 将重庆市地区常见的美人蕉、菖蒲、水葱、再力花、鸢尾和狐尾藻 6 种湿地植物, 根据植物生态学形态特点, 组合配置成 3 个群落类型: 群落 1 (美人蕉+菖蒲+水葱+狐尾藻)、群落 2 (再力花+菖蒲+水葱+狐尾藻) 和群落 3 (再力花+菖蒲+鸢尾+狐尾藻), 植物之间的数量配置比例为 1:1。2015 年 4 月依次种植到人工湿地的 3 个处理单元(详见图 1)。

试验场地位于重庆市北碚区西南大学后山实验基地厚艺园内, 利用园中原有污水排水渠, 于 2017 年 12 月—2018 年 4 月将其改建为人工湿地污水处理系统, 模拟人工湿地长 30 m、宽 3 m, 平均深度达 0.6 m。湿地两岸构造为黏土砖和水泥砌成, 底部覆以三合土压实并抹水泥防渗。试验设置 3 个处理单元(10 m×3 m), 即 3 个种植池, 每个处理单元底部设 20 cm 厚度直径 5~10 cm 的鹅卵石, 上层铺 30 cm 土壤。人工湿地的主要污水来自实验基地排放的生活污水和山体农田渗水, 以满足补充湿地水源的作用。

1.2 研究指标及测定方法

1.2.1 植物株高、生物量测定。 试验于 2018 年 6、8 和 10 月分别测定 3 个群落中每种植物株高和生物量。对人工湿地中 3 种植物群落的种植单元选择 1 个 3 m×1 m 的样方, 测量

基金项目 重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jcsx-msybX0218)。
作者简介 郝桂枝(1993—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向: 风景园林生态。* 通信作者, 实验师, 硕士, 从事园林生态研究。
收稿日期 2018-11-29

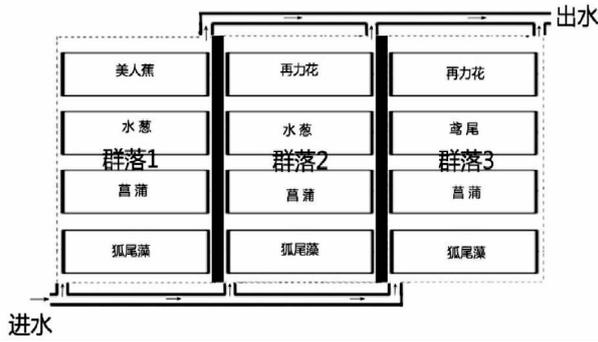


图1 人工湿地系统平面布置

Fig. 1 Artificial wetland system layout plan

每个样方中各种湿地植物的株高等生长状况,对各个样方中每种湿地植物进行地上部分收获。现场用自来水冲洗掉泥土等大部分杂质后,带回实验室再进行蒸馏水冲洗,先放入105℃的烘箱内烘干2h,再调节温度到80℃烘干至恒量,计算单位面积植株其地上部分生物量^[6]。

1.2.2 水样收集及水质指标测定。水样采集:在每个种植单元的进水口和出水口用聚乙烯塑料瓶各采集水样3瓶,每瓶容量为500 mL,尽快带回实验室进行分析。水质指标测定:TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP采用钼酸铵分光光度法^[7]。

1.3 数据处理与分析 用Excel和SPSS 19.0对获得数据进行统计分析,并用Origin 7.5绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同人工植物群落单位面积地上部分生物量比较

2.1.1 总生物量变化。由图2可知,3个人工湿地植物群落的总生物量存在显著差异($P < 0.05$),总生物量是285.85~617.89 g/m²,最小值是6月的群落2,最大值是10月份的群落1。总体上看,3个湿地植物群落的总生物量随着月份的变化也都呈现递增趋势,在3个测定时间点中,都是10月的生物量达到最大值。从增长率上来看,3个群落在6—8月平均增长率为29.48%,增长率按大小依次排序为群落2(33.20%)>群落3(32.05%)>群落1(23.19%);总生物量8—10月的平均增长率为5.24%,增长率大小依次排序为群落2(7.25%)>群落1(6.79%)>群落3(1.69%),6—8月的增长率显著高于8—10月增长率。

2.1.2 3个人工群落中各植物生物量变化。从3种湿地植物群落的各种植物单位面积生物量变化(表1)可看出,不同群落中相同植物的生物量变化存在显著差异($P < 0.05$),在同一群落中不同湿地植物在生物量上也存在显著差异($P < 0.05$),在同一群落中相同植物的生物量随着月份的变化显著($P < 0.05$),通过运用Two-way ANOVA分析表明,群落组合对植物生物量的影响大于月份改变带来的影响。

在3个群落中都配置的植物是菖蒲和狐尾藻,菖蒲在3个群落中的生物量平均值依次为群落3(193.58 g/m²)>群落1(115.65 g/m²)>群落2(81.9 g/m²),群落3与群落1、群落2都存在显著性差异($P < 0.05$);狐尾藻在3个群落中的平均值依次为群落1(732.03 g/m²)>群落2(184.94 g/m²)>群落

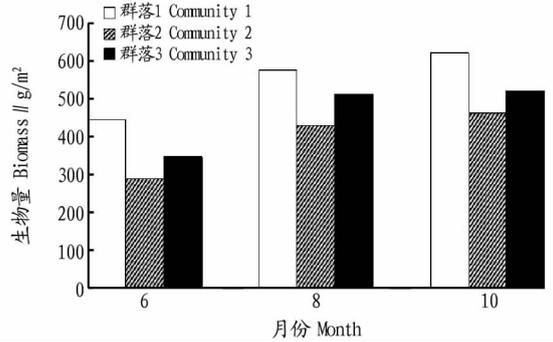


图2 3种湿地植物群落单位总生物量变化

Fig. 2 Total biomass changes of three kinds of wetland plants' community units

3(53.33 g/m²),其在群落1、群落2和群落3中的生物量相互之间都存在极显著差异($P < 0.01$)。

在2个群落中配置的植物是水葱和再力花,水葱所在群落的生物量平均值为群落2(88.29 g/m²)>群落1(72.35 g/m²),2个群落中水葱的生物量不存在显著差异($P > 0.05$);再力花所在群落的生物量平均值为群落3(599.85 g/m²)>群落2(429.29 g/m²),2个群落中再力花生物量差异也不显著。只在1个群落中配置的植物是美人蕉和鸢尾,其生物量平均值分别为170.75和70.47 g/m²。

表1 3种湿地植物群落单位生物量变化

Table 1 Biomass changes of three kinds of wetland plants community

植物群落 Plants community	植物 Plant	6月 June	8月 August	10月 October
群落1 Community 1	美人蕉	105.21	186.01	221.03
	菖蒲	55.63	134.99	156.32
	水葱	42.63	79.21	95.21
	狐尾藻	681.23	751.65	763.21
	总计	884.70	1 151.86	1 235.77
群落2 Community 2	再力花	295.63	471.20	521.03
	菖蒲	65.43	85.62	94.65
	水葱	56.34	96.51	112.03
	狐尾藻	154.30	202.48	195.03
	总计	571.70	855.81	922.74
群落3 Community 3	再力花	436.21	659.94	703.41
	菖蒲	156.34	224.03	200.36
	鸢尾	55.63	75.10	80.69
	狐尾藻	45.21	61.33	53.44
	总计	693.39	1 020.40	1 037.90

2.2 不同人工植物群落中植物株高变化 在群落1中(图3a),4种湿地植物平均株高排序是水葱(135.44 cm)>菖蒲(86.11 cm)>美人蕉(80.77 cm)>狐尾藻(33.67 cm)。随着月份变化,4种湿地植物中在8—10月狐尾藻出现了负增长(-10%),可能是由于狐尾藻受到天气和自身生长周期的影响,出现了枯萎的现象,而其他植物在整个观测期间都是正增长的趋势,但是6—8月的增长率显著大于8—10月。其中增长率最大的是6—8月的水葱株高,增长率达165%。美

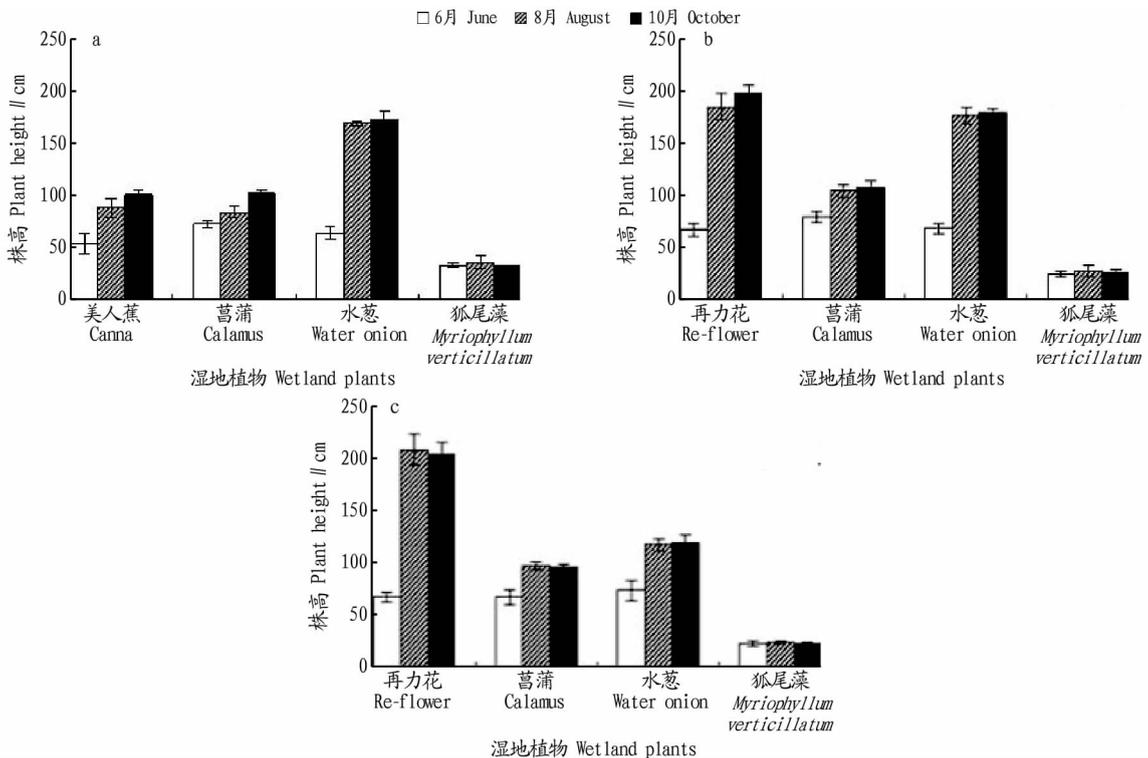
人蕉在整个观测期间都表现不如在单种或者两两组合混种,可能是 4 种植物配置时,出现了相应的抑制情况,具体原因需要进一步试验考证。

在群落 2 中(图 3b),4 种湿地植物平均株高排序是再力花(151.11 cm)>水葱(142.33 cm)>菖蒲(98.11 cm)>狐尾藻(27.00 cm)。狐尾藻在 8—10 月仍然出现负增长趋势(-5%),而其他湿地植物的株高均呈正增长趋势,增长率最大值是 6—8 月的再力花,达 175%,4 种湿地植物在 8—10 月的株高增长率较小,仅为 1%~4%。

在群落 3 中(图 3c),4 种湿地植物平均株高排序是再力花(161.55 cm)>鸢尾(104.22 cm)>菖蒲(87.78 cm)>狐尾藻(22.89 cm)。随着月份的变化,在 8—10 月出现负增长的植

物有再力花、菖蒲和狐尾藻,增长率分别是-2%、-1%和-6%。

在 3 个群落中都配置的植物是菖蒲和狐尾藻,菖蒲在 3 个群落中的株高平均值依次是群落 2(98.11 cm)>群落 3(87.77 cm)>群落 1(86.11 cm),3 个群落中菖蒲株高不存在差异显著($P>0.05$);狐尾藻在 3 个群落中的平均值依次是群落 1(33.67 cm)>群落 2(27.00 cm)>群落 3(22.89 cm),其在群落 1、群落 2 和群落 3 中的生物量相互之间都不存在显著差异($P>0.05$)。在 2 个群落中有配置的植物是水葱和再力花,水葱所在群落的株高平均值是群落 2(142.33 cm)>群落 1(135.44 cm),再力花所在群落的生物量平均值是群落 3(161.56 cm)>群落 2(151.11 cm)。



注:a. 群落 1;b. 群落 2;c. 群落 3

Note:a. Community 1;b. Community 2;c. Community 3

图 3 3 种湿地植物群落中各植物株高变化

Fig. 3 Each plant height changes of three kinds of wetland plants communities

2.3 不同人工植物群落对污水净化效果比较

2.3.1 对污水 TN 净化效果。从图 4 可看出,3 种湿地植物组合群落对生活污水的 TN 均具有较好的去除,虽然 3 种群落的去除效率不尽相同,但随着月份的变化,水体中 TN 含量都呈现较为一致的变化趋势。3 个湿地植物组合群落的月平均去除率依次是群落 3(80.74%)>群落 2(76.87%)>群落 1(75.67%)。多重比较分析表明,群落 3 和群落 1 的 TN 去除率存在显著差异($P<0.05$),群落 2 的 TN 去除率与群落 1、3 之间不存在显著性差异($P>0.05$)。

在 9 月底前,各湿地植物群落中的 TN 浓度均出现下降趋势,这是因为植物在这段时间处于生长期,特别是像再力花这种叶形较宽大的植物对氮元素的需求量较大,促使到 9 月测定时水体中 TN 浓度均达到最低点,其中群落 3 中的 TN

浓度仅为 0.45 mg/L,相应的去除率达 87.18%。在 10 月底测定时,发现 3 个植物群落水体中的 TN 浓度出现回升现象,水体 TN 浓度回升至 0.52~0.70 mg/L,去除率也相应减小。

2.3.2 对污水 NH_4^+-N 净化效果。从图 5 可看出,3 个湿地植物群落水体中的 NH_4^+-N 变化总体趋势与 TN 变化趋势(图 4)相近。在不同月份生活污水经过植物群落后水体中的 NH_4^+-N 浓度都有明显下降,其浓度为 0.30~0.76 mg/L。3 个湿地植物组合群落的月平均去除率依次是群落 3(82.94%)>群落 2(76.13%)>群落 1(75.67%)。多重比较分析表明,3 个湿地植物群落水体中 NH_4^+-N 去除率无显著性差异($P>0.05$)。

结合图 4 和图 5 可看出,3 个湿地植物群落在 8—9 月对

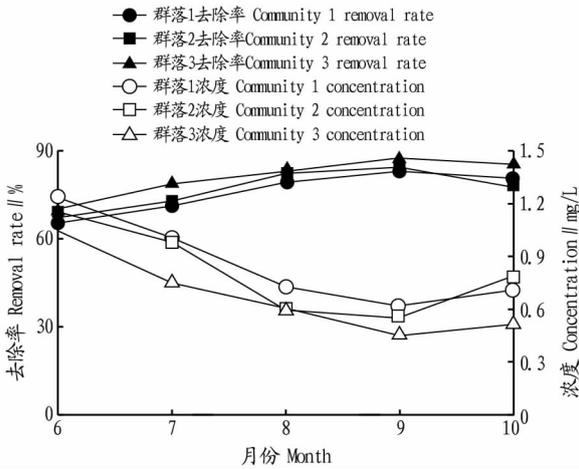
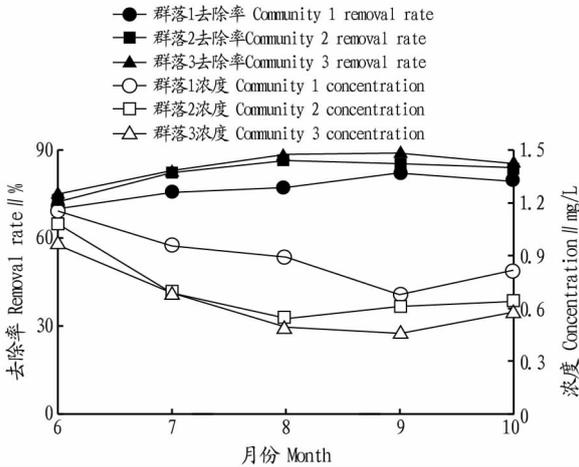


图4 不同群落水体中 TN 浓度及去除率变化

Fig. 4 Changes of TN concentration and removal rate in different community waters

氮的去除效果明显高于其他季节,在试验的生活污水中氮的主要组成部分就是氨氮。氨氮的去除主要依靠的是植物吸收和根际间硝化细菌的作用,所以在该月份,随着气温的变化,湿地植物群落利用植物吸收和微生物作用在这段时间保持了较高的去除率。

图5 不同群落水体中 NH₄⁺-N 浓度及去除率变化Fig. 5 Changes of NH₄⁺-N concentration and removal rate in different community waters

2.3.3 对污水 TP 净化效果。从图 6 可以看出,各植物群落对生活污水 TP 的净化趋势基本一致,但是各植物群落对 TP 的吸收效率则不完全一致。在 3 种植物群落作用下,水体中的 TP 浓度在每个阶段都有较大幅度的降低,在所有测试点中 TP 浓度基本上都降至 0.45 mg/L 以下。3 种湿地植物群落中的 TP 平均去除率依次排序是群落 1 (77.83%) > 群落 3 (76.38%) > 群落 2 (72.32%)。方差分析表明,3 个湿地植物群落水体中 TP 去除率无显著性差异 ($P > 0.05$)。

随着月份的变化,尽管 3 个群落的变化趋势一致,但是对 TP 去除率出现的峰值不一样,群落 1 在 8 月就达到了去除率的峰值,水体中 TP 浓度为 0.23 mg/L,去除率达 83.33%,这可能是美人蕉和狐尾藻在 8 月份陆续开花,需要

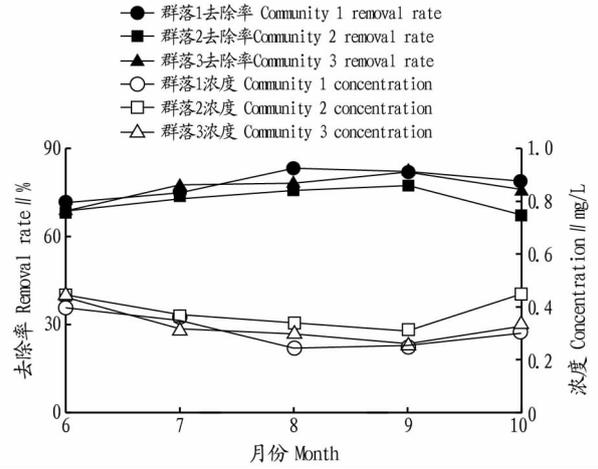


图6 不同群落水体中 TP 浓度及去除率变化

Fig. 6 Changes of TP concentration and removal rate in different community waters

大量的 P 元素供给,造成该月份出现峰值;而群落 2 和群落 3 则是 9 月出现峰值,水体中 TP 浓度分别为 0.31 和 0.23 mg/L,去除率分别为 77.54% 和 81.88%,这可能是再力花和狐尾藻开花结果时间主要集中在 8 月份,9 月份则是再力花和水葱产生种子,这段时间需要大量 P 元素,从而造成 9 月出现峰值。

在 9—10 月 3 种湿地群落 TP 去除率都出现降低现象,但是群落 2 下降的趋势为 10%,远远高于其他 2 个群落的下降趋势,说明群落的组合结构对气温变化的抗受能力不一样,也进一步说明了物种组合对外界环境抗压力有一定提升。

2.4 腐烂植物体对水质二次污染的影响 2018 年 10 月底,通过对群落 1、群落 2、群落 3 枯萎掉落在水中狐尾藻腐烂处水体的 NH₄⁺-N 和 TP 浓度的测定,并与正常生长的含量进行对比,发现腐烂处 NH₄⁺-N 和 TP 明显高于植物正常生长处(表 2)。

群落 3 中狐尾藻的生长密度最小,其植物腐烂处与正常生长处 NH₄⁺-N、TP 浓度明显小于生长密度较大的群落 1 和群落 2。结合取样现场情况,分析可知,由于群落 3 的生长密度较小,其植物个体间对于资源的竞争较小,植物腐烂程度低。同时,生长密度较小的情况下狐尾藻根系有较强的通透性有利于水体流动,从而有助于腐烂植物分解出的 NH₄⁺-N、TP 的扩散,因此在一定程度上亦降低了腐烂处与植物正常生长处 NH₄⁺-N、TP 浓度的大小。

表 2 3 种湿地植物群落取样中 NH₄⁺-N 和 TP 浓度Table 2 NH₄⁺-N and TP concentrations in sampling of three kinds of wetland plant communities mg/L

群落类型 Community type	NH ₄ ⁺ -N	TP
群落 1 Community 1 腐烂处	0.67	0.67
群落 1 Community 1 正常	0.54	0.34
群落 2 Community 2 腐烂处	0.55	0.63
群落 2 Community 2 正常	0.42	0.45
群落 3 Community 3 腐烂处	0.49	0.57
群落 3 Community 3 正常	0.38	0.33

为比较腐烂的挺水、沉水植物对水体影响的差异,该研究将人工湿地群落中腐烂植物狐尾藻和菖蒲带回实验室,将其与正常生长植物叶片放入相同蒸馏水中,并设置不放植物叶片对照组,定期观测 2 组植物叶片对水体中 NH_4^+-N 、TP 浓度变化的影响,其测定结果如表 3 所示。由表 3 可知,随

着试验的进行,腐烂植物处理组水体中 NH_4^+-N 、TP 浓度升高速度明显快于正常植物处理组 and 对照组,说明腐烂植物更容易向水体释放氮磷元素。而在对比腐烂菖蒲和腐烂狐尾藻时发现,狐尾藻水体中的 NH_4^+-N 、TP 浓度升高比菖蒲快,2 种腐烂植物对水体释放氮磷的速率是存在差异的。

表 3 试验水样中 NH_4^+-N 和 TP 浓度变化

Table 3 Changes of NH_4^+-N and TP concentrations in test water samples

处理类型 Processing type	NH_4^+-N			TP		
	初期 Initial stage	5 d	10 d	初期 Initial stage	5 d	10 d
腐烂狐尾藻 Decayed foxtail	0	2.15	3.27	0	2.62	4.36
腐烂菖蒲 Decayed calamus	0	1.35	2.05	0	1.03	3.43
正常处理 Normal processing	0	0.01	0.03	0	0.16	0.18
对照组 Control group	0	0	0	0	0	0

3 结论与讨论

3.1 植物多样性对植物地上部分生物量的影响 该研究发现 3 个湿地植物群落的总生物量存在显著差异 ($P < 0.05$), 总生物量为 285.85~617.89 g/m^2 , 生物量平均值大小依次排序是群落 1>群落 3>群落 2。总体上看, 3 个湿地植物群落的总生物量随着月份的变化也都呈现递增趋势, 在 3 个检测时间段中, 都是 10 月的生物量达到最大值。不同群落中相同植物的生物量变化存在显著差异, 在同一群落中不同湿地植物在生物量上也存在显著差异。

在人工湿地中, 3 个湿地植物群落的生产力都较高, 这可能与植物混种有利于营养吸收和利用有关。在提高湿地群落物种丰富度的情况下, 可以在一定程度上促进植物生物量的积累, 能够较完全地利用土壤和水体中的营养元素。

在上述的 3 个湿地植物群落中, 群落之间的物种组成有所不同, 而 3 个群落地上部分总生物量之间也存在差异。造成这种现象的原因主要有 2 个方面: 一是由于不同的物种其资源利用特性不一致, 从而直接影响到整体生物量的积累, 王海^[8]研究表明群落物种组合的差异主要是不同的物种在生长率、资源利用能力和功能特征方面与不同生物量的物种搭配所产生的差异; 二是由于群落之间的物种成分变化会造成植物多样性的变化, 植物的多样性也会影响整体群落生产力的变化, 这与江小雷等^[9]和 He 等^[10]的研究相同。

在不同植物群落中相同植物地上部分也存在显著差异, 这可能有 2 个方面原因: 一是在群落中, 不同的湿地植物根系会分泌不同的分泌物, 对群落中其他植物产生促进或抑制生长的作用; 二是在不同的植物群落中, 植物的空间利用形式不一致, 在该研究中, 群落 2 和群落 3 中的再力花的长势较好、叶片生长较多, 严重地影响了下层植物采光环境, 对比群落 1 中美人蕉的长势, 影响程度不如群落 2 和群落 3, 故造成了狐尾藻在群落 1 中生物量显著大于群落 2 和群落 3。

3.2 植物群落对污染物净化效果的影响 模拟试验结果表明, 进行适当的物种组合和人工植物群落构建能够提高人工湿地对水体的净化效果, 且不同的植物群落对水体中的净化效果也是不一样的。在该研究中 3 个群落对于氮的去除能力是群落 3>群落 2>群落 1, 对于磷的去除能力 3 个群落表现

为群落 1>群落 3>群落 2。

人工湿地群落对污水的去除率高于单种及两两组合, 可能是采用了“高+中+低”的植物搭配模式, 这样的组合模式能够在更大程度上利用营养物质和光照。彭婉婷等^[11]研究表明沉水植物在稳定生态系统和净水方面有其特有之处, 而挺水植物和沉水植物的生态位不同, 不会发生生态位重叠。

不同人工植物群落在水体净化方面表现出的差异主要是以下几个方面原因: 一是由于不同的植物对不同污染物的吸收特性不一致, 不同植物的生物量也不一样, 造成了吸收量也存在差异; 二是在进行组合搭配后, 植物分泌物的产生抑制或促进了植物生长, 也会对植物根际或土壤中的微生物产生影响。

3.3 腐烂植物对水体污染影响 试验结果表明, 生长密度较小的群落 3 中的狐尾藻腐烂处与正常生长处的 NH_4^+-N 、TP 浓度明显小于生长密度较大的群落 1 和群落 2。狐尾藻水体中的 NH_4^+-N 、TP 浓度升高比菖蒲快, 更加容易腐烂, 向水体中释放的氮磷元素也更多。

在生长密度较大的群落中, 由于植物的种内竞争较大, 下方水体中的氧气也相对匮乏, 植物则更容易发生腐烂。这与 Tanner 等^[12-13]研究人工湿地中水生湿地的作用机制的结果相似, 即一定植物群落体可以促进整个系统的去污能力, 但是超过一定范围期限, 去除能力就会减小。

通过对比试验发现, 腐烂后的植物体向水体中释放氮磷元素的速率更快, 加速了水体中氮磷含量的增大。不同湿地植物向水体释放氮磷元素也是存在差异的, 这可能与植物分解快慢和植物本身的成分有关, 沉水植物相对于挺水植物更容易分解, 这与唐金艳等^[14]的研究结果一致。但是促进植物体分解具体原因和因子有哪些, 相关的作用机理是什么, 需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 郝明旭, 霍莉莉, 吴珊珊. 人工湿地植物水体净化效能研究进展[J]. 环境工程, 2017, 35(8): 5-10, 24.
- [2] 李柳川, 陈桂珠. 人工实验田中的香蒲对重金属的吸收效应研究[J]. 有色金属环保, 1991(2): 43-46.
- [3] 李莎莎, 天昆, 刘云根, 等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1951-1955.

系统较单作系统具有较高的土壤贮水量,复合系统树盘内 0~150 cm 深土层的土壤含水量高于单作杏园,有利于土壤水分状况的改善。另一方面,研究者认为农林复合系统不具有改善农田土壤水分状况的作用。徐明岗等^[11]研究红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效应得出,在高温干旱的 7—9 月 0~80 cm 土层内的水分含量明显低于梯田果树区,表明在干早期牧草对果树生长有一定的影响。惠竹梅等^[12]研究西北半干旱地区葡萄生产园行间生草对土壤含水量的影响,结果得出,生草可明显降低葡萄园土壤水分含量,这与该研究的结果基本一致,枣棉间作条件下,间作群体耗水量大大增加, C_4R_1 处理耗水量显著高于 C_2R_2 和 C_4R_1 ,表明增加棉花行数的同时,适当减少棉花株距有利于间作耗水量的减小。

水分利用效率是植物生理活动过程中消耗水形成有机物质的基本效率,是确定植物体生长发育所需要的最佳水分供应的重要指标之一,在一定程度上反映了植物的耗水性和干旱适应性^[13]。水分利用效率越高,表明植株节水能力越强,耐旱生产力越高。高水分利用效率是植物适应水分亏缺的一种响应机制或响应干旱环境的一种重要特征。农林复合系统具有提高水分利用率的作用。陆光明等^[14]研究表明,在泡桐树和冬小麦、玉米间作系统中,间作玉米水分利用率较对照高 16.1%,系统中冬小麦水分利用率较对照高 15.2%;卫林等^[15]研究也指出,林带有一种致冷作用,它使小麦的叶温降低,减少叶片的蒸腾,提高农田土的水分含量或水分利用率;晁海等^[16]通过各系统各土层深度含水量的比较,发现合理的株行间距配置,能够较对照显著提高水分利用率。该研究表明,枣棉间作群体较单作能够显著提高水分利用效率,主要原因是农林复合群体中,林木根系一般较深,能充分利用土壤深层营养物质和水分,农作物则利用浅层土壤中的养分和水分,由于根系垂直生长呈多波顺次递推特点,使根系生长中心和吸收中心交错出现,提高了养分和水分的利用效率^[17-18]。

复合群体水分利用效率的提高受到组分作物产量、耗水

特征及群体微环境的共同作用,间作组分作物间各影响因子的变化决定了群体水分利用状况,在研究群体耗水特征的同时,应该注意,土壤水分分布状况及土壤水分效应在一定程度也反映了种间竞争与互补的一种重要结果,因此,在研究了解种间水分相互作用结果的表现形式的同时,更应深入研究种间互作过程及其影响机制。

参考文献

- [1] 郭雄飞,黎华寿,陈红跃. 农林间作生态系统研究进展探析[J]. 绿色科技,2016(16):176-179.
- [2] 王娟,江天才,万素梅. 水分胁迫下间作棉田土壤水分及产量分析[J]. 干旱区研究,2016,33(1):89-93.
- [3] 万素梅,郑德明,翟玉龙,等. 南疆棉田不同产量构成因素及棉铃空间分布特征研究[J]. 中国棉花,2006,33(8):8-21.
- [4] 蒋青松,杨超,董君成,等. 基于可持续发展的南疆区域农业水资源优化配置模型研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):14739-14741,14851.
- [5] 高路博. 晋西黄土区苹果农作物间作系统种间关系研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [6] 陈国栋,万素梅,冯福学,等. 带型对小麦间作玉米产量和种间竞争力的影响[J]. 西北农业学报,2017,26(7):990-997.
- [7] 张曦. 紫花苜蓿响应干旱胁迫的叶性状机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.
- [8] 蔡崇法,王峰,丁树文,等. 间作及农林复合系统中植物组分间养分竞争机理分析[J]. 水土保持研究,2000,7(3):219-221,252.
- [9] 赵斯,赵雨森,王林,等. 东北黑土区农林复合土壤效应[J]. 东北林业大学学报,2010,38(5):68-70.
- [10] 高峻. 太行山低山丘陵区两种农林复合模式中水肥光分布特征研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [11] 徐明岗,文石林,高菊生. 红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效果与生态环境效应[J]. 水土保持学报,2001,15(1):77-80.
- [12] 惠竹梅,李华,刘延琳,等. 果园生草对土壤性状的作用研究进展[J]. 中国农学通报,2005,21(5):284-287.
- [13] 山仑. 提高农田水分利用效率的途径[J]. 植物生理学通讯,1997,33(6):475-476.
- [14] 陆光明,孟平,马秀玲,等. 林-果-农复合系统中植物蒸腾及系统蒸散的研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(5):103-109.
- [15] 卫林,江爱良,宋兆民. 林带对农田小麦叶温的影响[J]. 林业科学,1982,18(2):135-142.
- [16] 晁海,张大海,徐林,等. 杏棉间作系统小气候水平分布特征研究[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(1):35-39.
- [17] 冯良山. 花生谷子间作水分养分高效利用机制研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [18] 张恩和,李玲玲,黄高宝,等. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控[J]. 应用生态学报,2002,13(8):939-942.

(上接第 85 页)

- [4] 陈进军,郑翀,郑少奎. 表面流人工湿地中水生植被的净化效应与组合系统净化效果[J]. 环境科学学报,2008,28(10):2029-2035.
- [5] 杨珏. 不同水生植物配置模式对垃圾填埋场渗滤液尾水的净化能力研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [7] 鲁光四,周怀东,李怡庭. 水质分析方法[M]. 北京:学术书刊出版社,1989.
- [8] 王海. 人工湿地中植物多样性对生物量及无机氮的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [9] 江小雷,岳静,张卫国,等. 生物多样性,生态系统功能与时空尺度[J]. 草业学报,2010,19(1):219-225.
- [10] HE J S, BAZZAZ F A, SCHMID B. Interactive effects of diversity, nutri-

- ents and elevated CO₂ on experimental plant communities [J]. *Oikos*, 2002, 97(3):337-348.
- [11] 彭婉婷,邹琳,段维波. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报,2012,32(3):612-617.
- [12] TANNER C C, CLAYTON J S, UPSDELL M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands. II. Removal of nitrogen and phosphorus [J]. *Water research*, 1995, 29(1): 27-34.
- [13] TANNER C C. Plants for constructed wetland treatment systems: A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species [J]. *Ecological engineering*, 1996, 7:59-83.
- [14] 唐金艳,曹培培,徐驰,等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(1):83-89.