

3 种人工湿地植物生长期内对土壤氮磷的富集特征

郭汝凤¹, 刘鑫铭¹, 李冠军¹, 黄 婷¹, 吴承祯^{2*}, 林勇明¹, 李 键^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院生态与资源工程学院,

福建省生态产业绿色技术重点实验室, 福建 南平 354300)

摘要: 为筛选出可用于修复土壤 N、P 污染的植物种类, 以武夷山生活污水处理厂人工湿地再力花(*Thalia dealbata*)、花叶芦荻(*Arundo donax* var. *versicolor*)和香根草(*Vetiveria zizanioides* L.) 3 种植物为研究对象, 通过测定一个生长季内(第 7、14、21 和 28 周)3 种植物的生物量和 N、P 含量及其对应土壤的 N、P 含量, 分析其生物量、N、P 积累量、富集系数和迁移系数的变化特点, 并建立植物 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量的线性回归关系。结果显示: 1) 人工湿地 3 种植物的生物量和 N、P 积累量在不同取样时间和不同植物间均存在显著性差异($p < 0.05$); 除第 7 周外, 再力花和花叶芦荻在其他取样时间的叶茎生物量比均小于 1; 再力花和花叶芦荻的叶 N 积累量平均值大于茎, 叶 P 积累量平均值小于茎($p < 0.05$)。2) 除再力花茎和花叶芦荻茎的 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶的 P 积累量与 P 含量外, 其他植物不同器官的 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量均存在显著的线性回归关系($p < 0.05$)。3) 3 种植物不同器官在各取样时间的 N、P 富集系数均大于 1; 再力花除在第 7 周的 P 迁移系数小于 1 外, 其他取样时间的 N、P 迁移系数均大于 1; 花叶芦荻在各取样时间的 N 迁移系数大于 1, 而 P 迁移系数小于 1。综上所述, 3 种植物对 N、P 的吸收、富集和迁移能力有所不同, 花叶芦荻对 N、P 的去除效果最佳, 在人工湿地植物配置中可优先考虑种植花叶芦荻。

关键词: 再力花; 花叶芦荻; 香根草; 氮积累; 磷积累; 富集能力; 迁移能力

中图分类号: Q 948.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2020)04-0499-08

人工湿地是一种由土壤、植物和微生物等组成的自适应人工生态系统^[1-2], 通过利用物理、化学和生物三者的协同作用对特定污染物进行高效净化^[3], 具有投资少、耗能低、运行费用低和环境优等特点^[4], 已被广泛运用于工业、生活污水净化和水环境富营养化治理中, 并且取得了良好效果^[5]。植物作为人工湿地生态系统的重要组成部分, 在污水净化中发挥着不可忽视的重要作用^[6], 其不但具有拦截、过滤污染物的功能, 还具有同化吸收污染物的作用^[7], 且不同湿地植物有很强的地域性, 对污染物的净化效果存在一定差异^[8]。武夷山是国家级自然保护区, 大量的游客流动不可避免地带来含有 N、P 元素的污染物产生与排放^[9-10]。尹爱经等^[11]发现高 N、P 含量的生活污水灌溉能增加稻田土壤对 P 的最大吸附量, 从而促进水稻的生长, 但过高 N、P 含量的污水可能会造成稻田周边环境水体的富营养化, 对水环境和水循环过程产生严重

威胁, 由此引发水资源短缺和 N、P 污染等问题^[12-13]。因此, 筛选出适宜武夷山生长且净化 N、P 能力强的人工湿地植物对环境污染的防护治理具有重要意义。

目前, 关于人工湿地植物的研究开始向多功能化发展, 有研究发现种植植物的人工湿地对 N、P 的去除效果显著高于不种植植物的人工湿地^[14]。植物从人工湿地中直接吸收的 N 占人工湿地 N 去除总量的 90%, 且植物群落的物种丰富度与植物净化 N 的效果呈正相关, 其通过降低土壤的矿质 N 活性进而降低 N₂O 的排放^[15]。在提高人工湿地植物的物种丰富度的同时, 为实现植物净化 N、P 效果的最优化, 刘建伟等^[16]在实验室中进行植物对富营养化水体的 N、P 去除效果筛选, 研究结果表明不同湿地植物对 N、P 的去除效果存在差异, 美人蕉(*Canna chinensis* W.) 对水体中 P 的净化能力较强, 而黄菖蒲(*Pseudacorus* L.) 对 N 的去除效果比其他植物好。然而这些研究主要集

收稿日期: 2019-11-20 录用日期: 2020-02-28

基金项目: 福建农林大学科技创新专项(CXZX2016055, CXZX2018122); 福建农林大学林学院林学高峰学科优秀博硕士培养工程(71201800781)

* 通信作者: fjwcz@126.com(吴承祯); hmllycau@163.com(李键)

引文格式: 郭汝凤, 刘鑫铭, 李冠军, 等. 3 种人工湿地植物生长期内对土壤氮磷的富集特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(4): 499-506.

Citation: GUO R F, LIU X M, LI G J, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus enrichment from soil of three plant species in an artificial wetland during growth periods[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2020, 59(4): 499-506. (in Chinese)



中在室内盆栽实验或水培实验,实验周期短;将湿地植物应用到实际人工湿地,并进行 N、P 去除的具体表现和季节动态对比的长周期跟踪研究却鲜见报道。

本研究选取武夷山污水处理厂人工湿地的 3 种典型湿地植物进行一个生长季的原位观测,测定湿地植物不同器官的生物量、N、P 含量及其对应土壤的 N、P 含量,从而探讨植物生长期对 N、P 的累积、富集和迁移变化特点,并建立 N、P 积累量与其生物量和 N、P 含量之间的线性回归关系,以期筛选出对污染物净化能力强的植物,为人工湿地水质净化和水环境保护提供借鉴,同时也为武夷山国家级自然保护区人工湿地的构建和推广提供数据支持和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省武夷山市生活污水处理厂人工湿地(27°32′36″~27°55′15″ N, 117°24′12″~118°02′50″ E),亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,1 月平均气温为 7.8 °C,7 月平均气温为 27.8 °C,年平均降雨量为 2 000 mm 左右,年平均生长期为 263 d,无霜期为 270 d。武夷山生活污水处理厂处理规模 15 000 m³/d,一期工程于 2008 年通水运行,二期工程于 2011 年通水运行,采取的是垂直流间歇式进水,布水负荷达到 0.62 m³/(m²·d),水力停留时间 7 d。人工湿地以砂石为基质,上部选用砂土(粒径 0~0.3 cm)为填料,厚度 20 cm,砂土混合填料可增加土壤表面积,有利于微生物新陈代谢。

人工湿地植被:再力花(*Thalia dealbata*),竹芋科挺水型水生植物,株高 1~2 m,叶片卵状披针形,叶柄极长,夏至秋季开花,观赏价值高,生长繁殖速度快,对污染物具有较强的耐受能力,耐寒能力强,腐烂分解速度慢^[17-18];花叶芦荻(*Arundo donax* var. *versicolor*),禾本科草本植物,地下茎粗壮、分枝多,叶片披针形,对生长环境适应性强,污水净化效果好^[19];香根草(*Vetiveria zizanioides* L.),禾本科草本植物,株高 1.3~2 m,叶片条形、质硬和挺直,根系发达,地下根系深达 3 m,是一种植物生物量高且净化污水潜力强的两栖植物^[20]。3 种植物于每年 3 月栽入人工湿地开始生长,种植密度为 3 株/m²,花叶芦荻和香根草在 8 月进入生长旺盛期,再力花在 9 月进入生长旺盛期,香根草在 9 月生长逐渐停滞,开始衰亡,而花叶芦荻与再力花在 11 月进入枯落期,12 月对 3 种植物进行收割。

人工湿地生活污水配置:化学耗氧量(COD)184 mg/L,5 日生物耗氧量(BOD₅)50.8 mg/L,氨氮 12.14 mg/L,全氮(TN)19.44 mg/L,全磷(TP)1.11 mg/L,pH 值在 6.72~6.78 之间^[10]。

1.2 样品采集与测定

本实验周期自 2014 年 4 月 26 日至 11 月 8 日,共 197 d。于 4 月 26 日在武夷山生活污水处理厂人工湿地设置 6 个 10 m×10 m 样地,调查时再力花、花叶芦荻和香根草的株高分别为(0.556±0.061) m、(0.345±0.038) m 和(0.530±0.044) m,生物量分别为(7.695±0.436) g、(11.598±0.664) g 和(3.866±0.805) g,土壤 N 含量分别为(5.453±0.263) mg/kg、(6.218±0.187) mg/kg 和(5.574±0.133) mg/kg,土壤 P 含量分别为(0.664±0.014) mg/kg、(0.807±0.019) mg/kg 和(0.645±0.012) mg/kg。

在一个生长季内 4 个不同时间(第 7,14,21 和 28 周)分别对 3 种植物及其对应土壤进行样品采集和测定。在各样地选取生长状况良好、大小相似的植物,每种植物 3 个重复,进行地上部分和土壤的采集,洗净植物样品泥土,分开叶茎(香根草的叶茎难以区分,整株测量),用牛皮纸包好后置于 65 °C 条件下烘干至恒量,测定生物量,经微型植物粉碎机(FZ102,天津市泰斯特)粉碎后过孔径 2 mm 筛,装袋备用;同时,采用土钻法按 S 型对土壤进行取样,取样深度为 0~20 cm,每份样品 3 个重复,在剔除土壤样品中的根系杂质后,置于 65 °C 条件下烘干至恒量,过孔径 0.149 mm 筛,用于 TN 和 TP 含量的测定。植物样品和土壤样品分别用浓硝酸-高氯酸消煮法和浓硫酸-高氯酸消煮法进行消煮制备成待测液,植物和土壤的 TN 使用元素分析仪(EA3000,意大利欧维特)测定,TP 采用钼锑比色法测定^[21]。

植物某元素积累量(PA),单位为 μg/株,计算公式如下:

$$PA = PC \times PB, \quad (1)$$

式中,PC 为植物不同器官某元素含量(mg/kg),PB 为植物不同器官生物量(g/株)。

植物的富集系数(BCF)是指植物体内某元素含量与其对应土壤中该元素含量的比值,可以反映植物对土壤中该元素吸收积累的难易程度,当 BCF>1 时表示植物体内的某元素含量大于植物生长环境中的该元素含量,说明该植物的生长有利于修复土壤污染^[22],计算公式如下:

$$BCF = PC/S, \quad (2)$$

式中,PC 为植物不同器官某元素含量(mg/kg),S 为

植物对应土壤的该元素含量(mg/kg).

植物的迁移系数(BTF)是指植物叶的某元素含量与其茎中对应元素含量的比值,反映植物某元素在植物体内的迁移能力,当 $BTF>1$ 时表示植物体内(茎、叶)运输该元素的能力较强^[23],计算公式如下:

$$BTF = L/ST, \tag{3}$$

式中, L 为植物叶的某元素含量(mg/kg), ST 为植物茎的该元素含量(mg/kg).

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 22.0 软件和 R 语言程序进行数据处理,R 语言程序进行绘图.先对 3 种植物在不同时间的生物量,N、P 积累量,富集系数和迁移系数的统计数据进行正态分布检验和方差齐次检验,对不满足方差齐性假设条件的数据进行对数转换、平方根转换和倒数转换等变量变换,直至均满足正态分布和方差齐性的假设条件;再利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异法- t 检验(LSD- t test)多重比较分析,检验不同取样时间植物的生物量,N、P 积累量,富集系数和迁移系数在 $p<0.05$ 水平上的显著性,分析不同取样时间植物的生物量,N、P 积累量,富集系数和迁移系数的变化特征;然后建立植物 N、P 积累量与植物生物量和 N、P 含量的线性回归关系,经

统计学分析得到它们的拟合参数 r^2 与 F 检验值,并检验 3 种植物的 N、P 积累量与其对应生物量和 N、P 含量的相关系数在 $p<0.01$ 或 $p<0.05$ 水平上的显著性,通过拟合参数 r^2 、 F 检验值和回归检验显著水平筛选线性回归模型.

2 结果与分析

2.1 不同湿地植物的生物量及其分配特征

由表 1 可知:随着植物的生长,生物量逐渐增加,3 种植物的生物量平均值均在第 28 周达到最大值,分别为 127.190,198.090 和 72.095 g,且总体显著高于其他取样时间($p<0.05$).3 种植物的总生物量表现为花叶芦荻>再力花>香根草,且在各取样时间均存在显著性差异($p<0.05$).其中,再力花和花叶芦荻叶的生物量平均值分别为 27.780 和 56.336 g,茎的平均值分别为 50.349 和 67.546 g,且花叶芦荻的叶、茎生物量在植物生长的过程中显著高于同一时期再力花的叶、茎($p<0.05$);除第 7 周再力花和花叶芦荻的叶茎生物量比大于 1 外,其他取样时间均小于 1,且随着植物的生长,再力花的叶茎生物量比逐渐减小,而花叶芦荻的呈先减后增趋势.

表 1 不同取样时间植物的生物量及其分配
Tab. 1 Plant biomass and its distribution at different sampling times

植物器官	生物量/g			
	第 7 周	第 14 周	第 21 周	第 28 周
再力花叶(TD-l)	9.523±0.510 ^{Dd}	24.285±4.896 ^{Cd}	35.718±2.807 ^{Bc}	41.595±2.525 ^{Af}
再力花茎(TD-s)	8.779±0.179 ^{Dd}	35.161±1.215 ^{Ced}	71.862±5.646 ^{Bd}	85.595±1.352 ^{Ad}
花叶芦荻叶(AD-l)	13.372±1.198 ^{Dc}	43.470±5.707 ^{Cc}	72.408±4.849 ^{Bd}	96.095±4.818 ^{Ac}
花叶芦荻茎(AD-s)	12.143±0.265 ^{Dc}	65.110±6.070 ^{Cb}	90.938±3.545 ^{Bc}	101.995±5.396 ^{Ac}
再力花全株(TD)	18.302±0.682 ^{Db}	59.446±6.025 ^{Cb}	107.580±5.115 ^{Bb}	127.190±3.515 ^{Ab}
花叶芦荻全株(AD)	25.515±1.458 ^{Da}	108.580±11.755 ^{Ca}	163.346±8.302 ^{Ba}	198.090±9.833 ^{Aa}
香根草全株(VZ)	8.174±0.608 ^{Cd}	37.045±4.762 ^{Bc}	62.353±6.995 ^{Ad}	72.095±6.862 ^{Ac}
再力花叶茎生物量比	1.085	0.691	0.497	0.486
花叶芦荻叶茎生物量比	1.101	0.668	0.796	0.942

注:不同大写字母表示同种植物在不同取样时间存在显著差异, $p<0.05$;不同小写字母表示同一取样时间不同植物之间存在显著差异, $p<0.05$ (下同).

2.2 不同湿地植物 N、P 积累量变化特征

由图 1(a)可知:3 种人工湿地植物的 N 积累量具有明显的一致性规律,再力花的叶、茎和花叶芦荻的

叶 N 积累量均随着植物的生长逐渐增加,在第 28 周达到最大值,且均显著高于其他取样时间($p<0.05$);而花叶芦荻的茎和香根草 N 积累量分别在第 28 周和

第 21 周达到最大值,且两个时期差异不显著,但显著高于第 7 周和第 14 周($p<0.05$). 花叶芦荻的叶 N 积累量在植物的生长过程中显著高于同一时期其他植物的不同器官($p<0.05$);再力花和花叶芦荻的叶 N 积累量平均值分别为 541.671 和 1 043.687 $\mu\text{g}/\text{株}$,茎 N 积累量平均值分别为 429.399 和 555.245 $\mu\text{g}/\text{株}$.

由图 1(b)可知:再力花的叶和花叶芦荻的茎 P 积累量随着植物的生长呈先增后减趋势,在第 21 周达到最大值,第 28 周下降至与第 14 周相当,但显著高于第 7

周($p<0.05$);再力花的茎、花叶芦荻的叶和香根草 P 积累量随着植物的生长逐渐增加,均在第 28 周达到最大值,与第 21 周差异不显著,但显著高于第 7 周和第 14 周($p<0.05$). 花叶芦荻的茎 P 积累量在植物的生长过程中始终显著高于同一时期其他植物的不同器官($p<0.05$);再力花和花叶芦荻的叶 P 积累量平均值分别为 61.430 和 110.428 $\mu\text{g}/\text{株}$,茎 P 积累量平均值分别为 97.264 和 150.571 $\mu\text{g}/\text{株}$,且在同一时期花叶芦荻的叶、茎 P 积累量均显著高于再力花的叶、茎($p<0.05$).

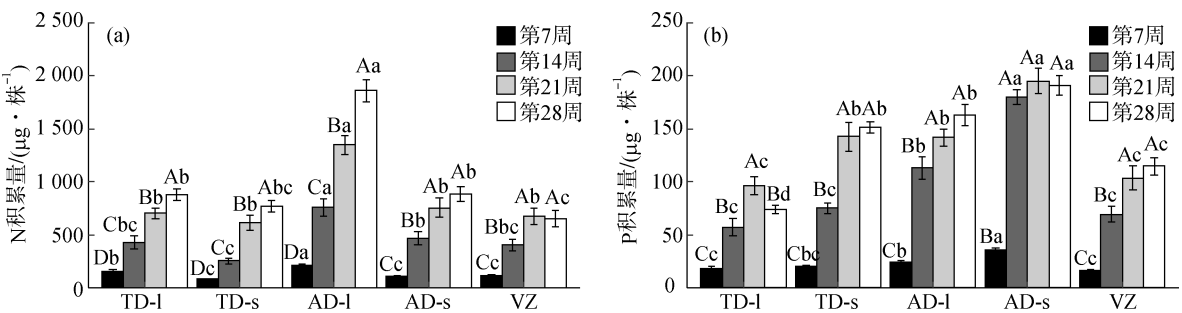


图 1 不同取样时间植物的 N(a)和 P(b)积累量

Fig. 1 Plant N (a) and P (b) accumulation amounts at different sampling times

2.3 不同湿地植物 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量之间的关系

对 3 种人工湿地植物 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量的原始数据进行线性拟合分析,判断植物 N、P 积累量与其生物量和 N、P 含量是否存在相关性. 通过 F 检验,若线性回归关系达到 $p<0.05$ 的显著性,则认为构建该回归关系合理^[24].

从表 2 中结果可以看出:除再力花茎和花叶芦荻茎的 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶的 P 积累量与 P 含量未达到 $p<0.05$ 的显著性水平外,其他植物不同器官的 N、P 积累量与其对应的生物量和 N、P 含量的线性回归关系均达到 $p<0.05$ 或 $p<0.01$ 的显著性水平. 这说明人工湿地植物对 N、P 的净化效果明显受其生物量和 N、P 含量的影响,即可根据植物的生物量和 N、P 含量来评价植物对 N、P 的去除效果.

2.4 不同湿地植物对 N、P 的富集和迁移能力

分析 3 种植物不同器官对土壤 N 和 P 的富集能力,结果如图 2(a)和(b)所示:除再力花茎和花叶芦荻茎对土壤 N 的富集能力在第 14 周显著增加后基本保持不变,再力花茎对土壤 P 的富集能力在第 21 周显著增加后又在第 28 周显著减小外,3 种植物不同器官对土壤 N 和 P 的富集能力均随着植物的生长呈先增后减趋势;N 的富集系数在第 7 周时最小,且均显著低于其他取样时间($p<0.05$);而 P 的富集系数在第

28 周最小,且除再力花叶、茎和花叶芦荻叶的 P 富集系数与第 7 周差异不显著外,其他植物器官的 P 富集系数均显著低于其他取样时间($p<0.05$). 比较植物不同器官在同一时期对土壤 N 和 P 的富集系数,发现同一植物叶对 N 的富集系数显著高于茎($p<0.05$);而对 P 的富集系数则仅有第 21 周再力花的叶与茎表现出类似差异. 此外,3 种植物不同器官在各取样时间对土壤 N 和 P 的富集系数均大于 1,说明 3 种植物对 N 和 P 均具有较强的富集能力:N 的富集能力表现为再力花叶>花叶芦荻叶>香根草>再力花茎>花叶芦荻茎,富集系数平均值分别为 18.063, 16.117, 8.858, 7.747 和 7.083;P 的富集能力表现为再力花叶>花叶芦荻茎>再力花茎>香根草>花叶芦荻叶,富集系数平均值分别为 3.698, 3.697, 3.417, 3.116 和 3.062.

再力花和花叶芦荻对 N 和 P 的迁移能力如图 2 (c)和(d)所示:仅再力花的 P 迁移能力呈显著先增后减的趋势;而再力花的 N 迁移能力、花叶芦荻的 N 和 P 迁移系数均在第 7 周最小且显著低于其他取样时间($p<0.05$),在第 14 周后则基本保持不变. 同一时期再力花和花叶芦荻的 N 迁移系数均差异不显著,而再力花的 P 迁移系数均显著高于花叶芦荻($p<0.05$). 再力花和花叶芦荻在各取样时间的 N 迁移系数均大于 1,平均值分别为 2.224 和 2.165,说明 N 在再力花

表 2 植物不同器官 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量的相关关系

Tab. 2 Correlation between N, P accumulation amounts and biomass, and N, P contents in different organs of plants

植物器官	x	y	拟合线性方程	r^2	F	p
TD-l	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.044x+3.960$	0.985	709.058	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.373x+4.838$	0.782	40.386	<0.01
	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	N 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.007x+15.112$	0.915	119.003	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	P 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.008x+1.703$	0.299	5.689	<0.05
TD-s	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.107x+4.767$	0.960	265.511	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.547x-2.898$	0.965	304.016	<0.01
	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	N 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.0007x+8.212$	0.030	0.309	
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	P 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=-0.003x+2.320$	0.426	9.164	<0.05
AD-l	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.049x+4.802$	0.993	1568.038	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.545x-3.879$	0.893	93.367	<0.01
	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	N 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.002x+15.189$	0.852	64.686	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	P 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.0006x+1.937$	0.008	0.081	
AD-s	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.108x+7.467$	0.929	145.161	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.487x-5.819$	0.877	79.146	<0.01
	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	N 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=0.0003x+8.179$	0.005	0.048	
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	P 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=-0.005x+3.140$	0.421	8.996	<0.05
VZ	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.101x-1.514$	0.928	143.698	<0.01
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	生物量/g	$y=0.623x-2.429$	0.978	483.931	<0.01
	N 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	N 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=-0.005x+13.625$	0.346	6.814	<0.05
	P 积累量/($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	P 含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$y=-0.003x+2.005$	0.456	10.211	<0.01

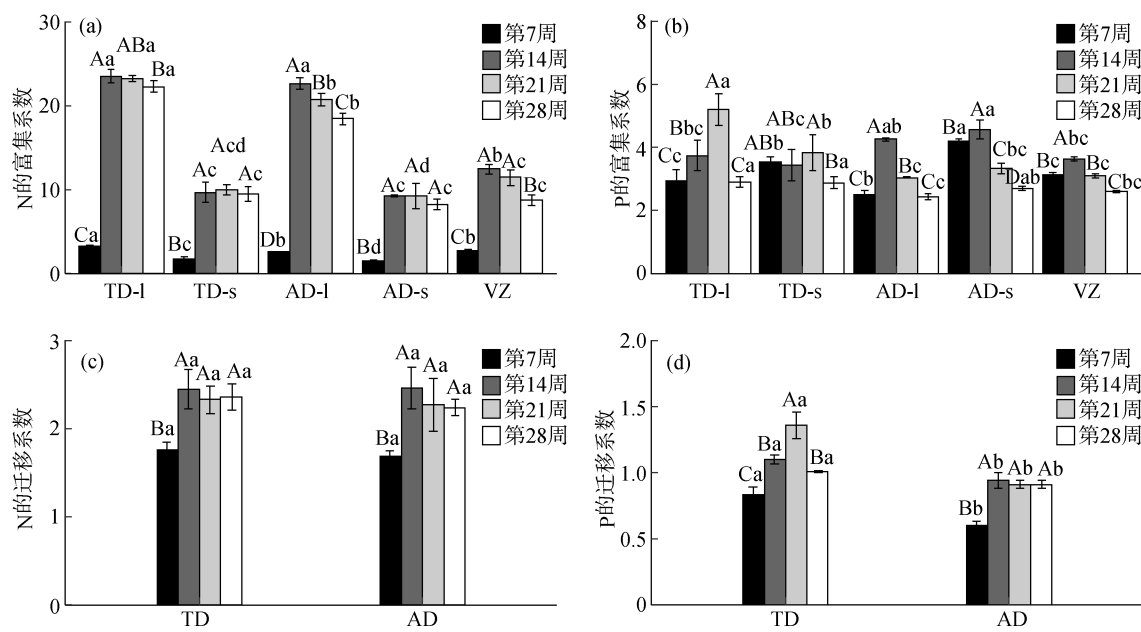


图 2 不同取样时间植物不同器官的富集系数和迁移系数

Fig. 2 Enrichment coefficients and migration coefficients of different organs of plants at different sampling times

和花叶芦荻体内均具有较强的迁移能力,且在再力花体内的迁移能力比花叶芦荻略强;再力花在第 14 周、第 21 周和第 28 周的 P 迁移系数大于 1,而再力花在第 7 周的 P 迁移系数和花叶芦荻在各取样时间的 P 迁移系数均小于 1,平均值分别为 1.075 和 0.838,说明 P 在再力花体内的迁移能力较强。

3 讨论与结论

为探讨人工湿地植物净化生活污水 N、P 元素的机制,在前期监测植物 N、P 含量的基础上^[10],本研究进一步监测植物生长期生物量的变化。研究发现人工湿地植物不同器官的生物量所占比例不同,除第 7 周外,其他取样时间均为茎生物量大于叶生物量;就植物的 N、P 积累量而言,叶 N 积累量大于茎 N 积累量,茎 P 积累量大于叶 P 积累量,说明 P 主要向植物生长迅速的器官供给营养而 N 则相反,这是由于植物对 N、P 元素的运输机制和利用策略不同^[25]。人工湿地植物的 N、P 积累量是评价植物对 N、P 去除效果的重要指标^[26],植物体内营养物质的分配特点决定植物的收割方式^[27],本研究结果表明人工湿地大部分 N、P 积累量的去除可以通过收割植物叶、茎并将其移出人工湿地的方式。本研究还发现,除再力花茎和花叶芦荻茎的 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶的 P 积累量与 P 含量不存在显著的线性关系外,其他植物不同器官的 N、P 积累量均分别与其对应的生物量和 N、P 含量存在显著的线性回归关系,且相比于植物的 N、P 含量,植物 N、P 积累量受生物量影响更大,这与 Bawiec 等^[28]对植物去除 N、P 效果的研究结果一致。因此,选择适宜武夷山生长的人工湿地植物,增加植物茎的生物量可达到更好去除 N、P 的效果^[29]。本研究中 3 种植物对 N、P 的积累量在各取样时间存在显著性差异,除香根草的 N 积累量、再力花叶和花叶芦荻茎的 P 积累量在第 21 周达到最大值外,其他植物不同器官的 N、P 积累量均在第 28 周达到最大值,且第 21 周与第 28 周的 P 积累量差异不显著,这与刘冉等^[30]关于 4 种湿地植物对水产养殖废水 N、P 积累特征的研究结果相似。植物对 N、P 的积累量与其对 N、P 的吸收能力和生长阶段有关,使得 3 种植物在各取样时间对 N、P 的积累量存在差异,在不同生长阶段的 N、P 净化效果亦有所不同^[31-32];但由于植物在生长旺盛期至枯落期时生长速度变缓,对 P 的需求减少,植物体内 P 逐渐趋于饱和状态^[33],因此植物在第 21 周与第 28 周对 P 的积累量无明显差异。此外,人工湿地植物对 N、P

的净化效果还与植物的 N、P 含量,生长速度和植物根际微生物等有关^[34-36]。在人工湿地植物净化污水的实际应用中,还应该考虑当地的气候条件来选择适宜当地生长的植物,实现植物配置最优化,从而最大限度地发挥植物在净化污水中的作用。本研究所选取的 3 种湿地植物中,花叶芦荻的 N、P 积累量与生物量均高于其他 2 种植物,可作为武夷山人工湿地植物配置中的首选;同时由于人工湿地植物的配置应考虑植物多样性原则和美观原则,其他 2 种植物也可考虑纳入栽种范围。

富集系数反映了植物土壤 N、P 的吸收净化能力^[37]。随着植物的生长,3 种植物对 N、P 的富集能力均存在显著性差异,再力花叶、茎的 N 富集系数均分别大于花叶芦荻,表明再力花对 N 的富集能力高于再力花。王正等^[38]对消落带草本植物的研究表明其 N、P 平均富集系数分别为 13.823 和 4.656,而本研究 3 种植物的 N、P 平均富集系数分别为 11.575 和 3.398,整体低于消落带草本植物,这说明植物对 N、P 的富集能力受植物类型的影响^[39]。植物的迁移系数反映 N、P 在植物体内的迁移能力^[40]。本研究中再力花和花叶芦荻的 N 平均迁移系数分别为 2.224 和 2.165, P 平均迁移系数分别为 1.075 和 0.838,且再力花和花叶芦荻在第 7 周的 N 和 P 迁移系数显著低于其他取样时间,说明 N 在再力花和花叶芦荻体内的迁移能力、P 在再力花体内的迁移能力均较强,而 P 在花叶芦荻体内迁移能力较弱,且 N、P 在植物体内的迁移能力因生长阶段不同而不同,这可能与植物在不同生长阶段对 N、P 的需求不同有关^[41]。

综上所述,3 种植物的生物量、N、P 积累量,富集系数和迁移系数在各取样时间存在显著性差异,3 种植物的 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量整体存在一定的线性回归关系。据此,筛选出花叶芦荻为武夷山人工湿地植物配置的首选,其他 2 种植物在武夷山人工湿地生长适应性和 N、P 净化能力也较强,为提高人工湿地植物多样性,也可在植物配置时考虑种植。

参考文献:

- [1] MANDER Ü, MADDISON M, SOOSAAR K, et al. The impact of a pulsing water table on wastewater purification and greenhouse gas emission in a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 80: 69-78.
- [2] ZHANG T, XU D, HE F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-

- 2010[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 189-197.
- [3] 赖巧晖, 张浩, 刘治鹏. 不同植物配置下人工湿地微生物群落特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 89-94, 99.
- [4] 熊家晴, 李珊珊, 葛媛, 等. 处理高污染河水垂直流人工湿地微生物群落特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3): 1959-1965.
- [5] 吕纯剑, 高红杰, 宋永会, 等. 潮汐流-潜流组合人工湿地微生物群落多样性研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2140-2149.
- [6] GE Y, HAN W J, HUANG C C, et al. Positive effects of plant diversity on nitrogen removal in microcosms of constructed wetlands with high ammonium loading[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 614-623.
- [7] 周旭丹, 孙晓刚, 赵春莉, 等. 人工湿地植被根区土壤性质及其净化水质季节效应分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1043-1049.
- [8] CUI L H, OUYANG Y, GU W J, et al. Evaluation of nutrient removal efficiency and microbial enzyme activity in a baffled subsurface-flow constructed wetland system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146: 656-662.
- [9] HU Y A, LIU X P, BAI J M, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9): 6150-6159.
- [10] 郭汝凤, 刘鑫铭, 李冠军, 等. 武夷山人工湿地系统植物生长期内土壤-植物碳氮磷变化特点[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(2): 433-441.
- [11] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水灌溉对稻田土壤磷形态和吸附特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1434-1442.
- [12] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 18-35.
- [13] ANDERSON D M, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences[J]. *Estuaries*, 2002, 25(4): 704-726.
- [14] HUETT D O, MORRIS S G, SMITH G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. *Water Research*, 2005, 39(14): 3259-3272.
- [15] HAN W J, SHI M M, CHANG J, et al. Plant species diversity reduces N_2O but not CH_4 emissions from constructed wetlands under high nitrogen levels[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6): 5938-5948.
- [16] 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.
- [17] 胡红伟, 刘盼, 吴俊峰, 等. 五种挺水植物腐解过程及其对湿地水质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2395-2402.
- [18] 胡茜璐, 金晶, 兰燕月, 等. 6种挺水植物对水位梯度的响应研究[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(3): 49-57.
- [19] 黄芸梦, 汪家权, 胡淑恒, 等. 瓦埠湖陡涧河湿地生态系统构建设计[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(22): 5784-5788.
- [20] 申须仁, 董名扬, 王朝勇, 等. 高锰胁迫对香根草矿质元素吸收及光合系统的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2297-2305.
- [21] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准 森林土壤分析方法: LY/T 1210 1275—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [22] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13(5): 468-474.
- [23] MATTINA M I, LANNUCCI-BERGER W, MUSANTE C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(3): 375-378.
- [24] 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, 264.
- [25] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Per Plant Ecol, Evo Syste*, 2002, 5(1): 37-61.
- [26] 代蕾. 沉水植物对不同水质的净化作用及相关机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 39-53.
- [27] 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.
- [28] BAWIEC A. Efficiency of nitrogen and phosphorus compounds removal in hydroponic wastewater treatment plant[J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(16): 2062-2072.
- [29] CHEN C J, ZHAO T C, LIU R L, et al. Performance of five plant species in removal of nitrogen and phosphorus from an experimental phytoremediation system in the Ningxia irrigation area[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(10): 497.
- [30] 刘冉, 甘淳丹, 赵海燕, 等. 四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿质元素和重金属富集特征的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(5): 859-866.
- [31] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the*

- United States of America, 2004, 101:11001-11006.
- [32] KITAYAMA K. Comment on "Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences"[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 633.
- [33] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 1-8.
- [34] 陈双, 王国祥, 许晓光, 等. 水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(5): 1424-1433.
- [35] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 旱柳无性系在富营养化水体中的生长及去除氮磷能力[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(3): 317-324.
- [36] 张悦. 水生植物及根际微生物对富营养化水体中氮磷的净化作用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 41-47.
- [37] ZHAN S X, WANG Y, ZHU Z C, et al. Nitrogen enrichment alters plant N : P stoichiometry and intensifies phosphorus limitation in a steppe ecosystem [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 134: 21-32.
- [38] 王正, 肖丽微, 谭秋霞, 等. 三峡水库消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收富集特征[J]. *山地学报*, 2019, 37(2): 151-160.
- [39] 张永涛, 崔保山, 蓝艳, 等. 白洋淀不同年龄芦苇根状茎中氮和磷含量[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 286-291.
- [40] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 45-51.
- [41] 梁安洁, 余传琼, 吴承祯, 等. 不同种源雷公藤叶片营养元素与甲素的季节动态[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(2): 299-306.

Characteristics of nitrogen and phosphorus enrichment from soil of three plant species in an artificial wetland during growth periods

GUO Rufeng¹, LIU Xinming¹, LI Guanjuan¹, HUANG Ting¹,
WU Chengzhen^{2*}, LIN Yongming¹, LI Jian^{1*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory for Eco-industrial Green Technology,
College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China)

Abstract: The purpose of this study was to screen plant species that can be used to repair N, P polluted soil. This study selected *Thalia dealbata*, *Arundo donax* var. *versicolor* and *Vetiveria zizanioides* L. in Wuyi Mountain constructed wetland to measure biomass, content of N and P of plant, and content of N, P of soil in order to analyze the changes in biomass, accumulation of N and P, enrichment coefficients and migration coefficients of these three plant species. A linear regression was established between accumulation of N and P of plant and biomass, and between accumulation of N and P and content of N and P. The results are as follows: 1) there were significant differences in the biomass and accumulation of N and P of the three plant species at different sampling times and among different plants ($p < 0.05$); the ratio of leaf to stem biomass of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* was less than 1 except at the 7th week; the average N accumulation in the leaves of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* was greater than in their stems, while the average P accumulation in leaves was less than that in stems ($p < 0.05$). 2) Significant linear regressions ($p < 0.05$) were found between biomass and accumulation of N and P, and between accumulation and content of N and P, except for the stem of *T. dealbata* and *A. donax* var. *versicolor* whose accumulation of N was not significantly correlated with the content of N, and for *A. donax* var. *versicolor* whose accumulation of P was not significantly correlated with the content of P. 3) The N and P enrichment coefficients of different organs in different plants were higher than 1 at each sampling time; the N and P migration coefficients of *T. dealbata* were greater than 1 except at the 7th week when the P migration coefficient was less than 1; the N migration coefficient of *A. donax* var. *versicolor* at each sampling time was greater than 1, while the P migration coefficient less than 1. In summary, the three plants have different absorbing, enrichment and migration abilities in terms of N and P, and *A. donax* var. *versicolor* has the best effect on the removal of N and P, which could be used as the first choice in allocation of artificial wetland plants.

Keywords: *Thalia dealbata*; *Arundo donax* var. *versicolor*; *Vetiveria zizanioides* L.; N accumulation; P accumulation; enrichment ability; migration ability