

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^{2,3*}, 林勇明¹, 李键^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州, 350002; 2. 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 福建 南平, 354300; 3. 武夷学院生态与资源工程学院, 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 种植物生物量、N、P 含量及其对应土壤的 N、P 含量, 分析 3 种植物生物量、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、N、P 含量的线性回归关系。结果显示: 1) 人工湿地 3 种植物生物量和 N、P 积累量在不同取样时间上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(L/S)均小于 1, 再力花和花叶芦荻叶 N 积累量大于其茎($p<0.05$); 2) 除再力花茎和花叶芦荻茎 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶 P 积累量与 P 含量外, 其他植物的不同器官 N、P 积累量与生物量、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个取样时间上的 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, 研究结果可为污水处理厂人工湿地的构建和推广提供参考和借鉴。

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

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、运行费用低和美化环境等特点^[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

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); hmilycau@163.com(李键)

且取得了良好的经济效益和环境效果^[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]，不同湿地植物对污染物的吸收净化具有很强的地域性，对污染物的净化效果存在一定的差异^[8]。武夷山是国家级自然保护区，大量的游客流动不可避免的带来含有 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 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，但是过高 N、P 污水的排放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，对武夷山环境污染的防护治理具有重要现实意义。

目前，国内外对人工湿地基质和植物开展了大量的研究^[14-15]，一般情况下人工湿地基质填料主要有砾石和沙等，但随着基质填料的研究的不断深入，由于矿石及其工业副产品具有较高的性能也逐渐被考虑纳入基质材料选择中^[16]，另一方面关于沸石和白云石等混合基质填料的研究也正起步进行^[17-18]。除此之外，关于人工湿地植物的研究开始向多功能化发展，一些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^[19]，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 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^[20]。在提高人工湿地植物的物种丰富度的同时，实现植物净化 N、P 效果达到最优化，刘建伟等^[21]在实验室中进行植物对富营养化水体的 N、P 去除效果进行筛选，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。但这些研究主要集中在室内盆栽实验或者水培实验，实验周期短，而将湿地植物应用到实际人工湿地并进行 N、P 去除具体表现和季节动态对比的长期跟踪研究却鲜见报道。

本文通过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 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、N 和 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($27^{\circ}32'36''\sim27^{\circ}55'15''$ N; $117^{\circ}24'12''\sim118^{\circ}02'50''$ 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总占地面积15 000 m^3/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 $0.62 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 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和耐寒能力, 腐烂分解速度慢^[22-23]; 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^[24]; 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^[25]。3种植物每年于3月栽入人工湿地开始生长, 种植密度为3株/ m^2 , 再力花在8月进入生长旺盛期迅速生长, 花叶芦荻和香根草在9月进入生长旺盛期, 香根草于9月开始生长停滞, 而花叶芦荻与再力花在9月进入枯落期, 12月对3种植物进行收割。

人工湿地废水配置: COD_{Cr} 184 mg/L, BOD₅ 50.8 mg/L, NH₄⁺-N 12.14 mg/L, TN 19.44 mg/L, 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 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 样地, 调查时再力花、花叶芦荻和香根草的平均株高分别为(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)分别对花叶芦荻、再力花和香根草3种植物和对应土壤进行样品采集和测试, 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，植物样品洗净泥土，叶茎分开（香根草叶茎难以区分，整株测量），用牛皮纸包好后置入 65 °C 条件下烘干至恒重，并测定生物量，经微型植物粉碎机（FZ102，天津市泰斯特）粉碎后过 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，每个样品 3 个重复，在剔除土壤样品中的根系杂质后，置入 65 °C 条件下烘干至恒重，过 0.149 mm 筛，用于全 C、全 N、全 P 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 TN 使用意大利欧维特元素分析仪（EA3000）测定，TP 采用钼锑比色法测定^[26]。

植物某元素积累量（PA），单位为 ug/株，计算公式如下：

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

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

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某元素含量的比值，可以反映植物对土壤该元素的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^[27]，计算公式如下：

$$BCF = \frac{P_i}{S_i} , \quad (2)$$

式中， P_i 为植物不同器官 i 元素含量（mg/kg）， S_i 为植物对应土壤的 i 元素含量（mg/kg）。

生物迁移系数（BTF）是指植物叶的某元素含量与其茎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，表示植物植物体内（茎、叶）运输该元素的能力较强^[28]，计算公式如下：

$$BTF = \frac{L_i}{S_i} , \quad (3)$$

式中， L_i 为植物叶的 i 元素含量（mg/kg）， S_i 为植物茎的 i 元素含量（mg/kg）。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 22.0 和 R 语言进行数据处理，R 语言进行绘图。通过 SPSS 22.0 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

等变量变换方法，直至均满足正态分布和方差齐性的假设条件，利用单因素方差分析（One-way ANOVA）和 LSD-t 多重比较分析，检验不同取样时间植物的生物量、N、P 累积量、富集系数和迁移系数在 $p<0.01$ 或 $p<0.05$ 水平上的显著性，分析不同取样时间植物的生物量、N、P 累积量、富集系数和迁移系数的变化特点，然后建立植物 N、P 累积量与植物生物量和 N、P 含量的线性回归关系，经统计学检验得到它们的拟合参数 r^2 ，并检验 3 种植物 N、P 累积量与其对应的生物量、N、P 含量相关系数在 $p<0.01$ 或 $p<0.05$ 水平上的显著性。

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，植物生物量逐渐增加，3 种植物的生物量均在第 28 周达到最大值，分别为 127.190 g、198.090 g 和 72.095 g，且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>再来花>香根草，且 3 种植物总生物量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的平均值分别为 27.780 g 和 56.336 g，茎的平均值分别为 50.349 g 和 67.546 g，且花叶芦荻的叶、茎的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 周外，再力花和花叶芦荻的叶茎比大于 1，其他取样时间均小于 1，且随着植物的生长，再力花的叶茎比逐渐减小，花叶芦荻的呈现先减后增趋势。

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 ^{Be}	41.595±2.525 ^{Af}
再力花茎(TD-s)	8.779±0.179 ^{Dd}	35.161±1.215 ^{Ccd}	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 ^{Ae}
再力花叶茎比	1.085	0.691	0.497	0.486
花叶芦荻叶茎比	1.101	0.668	0.796	0.942

注：不同大写字母表示同种植物生物量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生物量存在显著差异， $p<0.05$ （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 N 积累量具有明显的一致性规律，再力花和花叶芦荻的叶、茎 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 ($p<0.05$)；而香根草的 N 积累量在第 21 周达到最大值，且与第 28 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 积累量的平均值分别为 $541.671 \mu\text{g}/\text{株}$ 和 $1043.687 \mu\text{g}/\text{株}$ ；茎 N 积累量的平均值分别为 $429.399 \mu\text{g}/\text{株}$ 和 $555.245 \mu\text{g}/\text{株}$ ，其中在同一生长时期，花叶芦荻的叶、茎的 N 积累量均显著高于再力花的叶、茎 ($p<0.05$)。

由图 1 (b) 可知：再力花的叶 P 积累量随着植物的生长，呈现出先增后减趋势，在第 21 周达到最大值，第 28 周时下降至与第 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 积累量的平均值分别为 $61.430 \mu\text{g}/\text{株}$ 和 $110.428 \mu\text{g}/\text{株}$ ，茎 P 积累量的平均值分别为 $97.264 \mu\text{g}/\text{株}$ 和 $150.571 \mu\text{g}/\text{株}$ ，且在同一生长时期花叶芦荻的叶、茎 P 积累量均显著高于再力花的叶、茎 ($p<0.05$)。

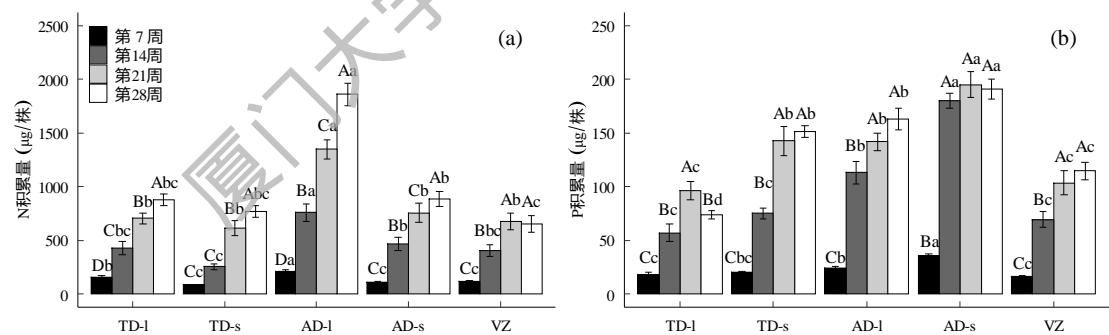


图 1 不同取样时间植物 N、P 积累量

Fig. 1 Plant N and P accumulation 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

对武夷山污水处理厂人工湿地再力花、花叶芦荻和香根草 3 种植物 N、P 积累量和生物量、N、P 含量的原始数据进行线性拟合分析，从而得出植物相应的回归关系，经统计学检验得到它们的拟合参数 r^2 ，并检验其相关系数在 $p<0.05$ 或 $p<0.01$ 水平上的显著性，以此来

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 检验发现，若线性回归关系达到 0.01 水平的显著性，则认为构建该回归关系为合理。

从表 2 中结果可以看出：除再力花茎和花叶芦荻茎 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶 P 积累量与 P 含量未达到 $p<0.05$ 的显著性水平外，其他植物的不同器官 N、P 积累量分别与其对应的生物量、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植物生物量和 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。

表 2 植物不同器官 N、P 积累量与生物量、N、P 含量的相关关系

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

植物器官	x	y	拟合线性方程	r^2	F	p
TD-I	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-I	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($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$y=0.0003x+8.179$	0.0048	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	$y=0.101x-1.514$	0.928	143.698	<0.01
	P 积累量($\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	生物量	$y=0.623x-2.429$	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

2.4 不同湿地植物对 N、P 的富集和迁移能力

通过对 3 种植物不同器官对土壤 N 和 P 的富集能力分析（图 2 (a) 和 (b)）表明：除再力花茎对土壤 N 的富集能力在第 14 周显著增加后保持不变外，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现出先增后减趋势；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的 N 和 P 的富集能力，发现同一植物叶对 N 的富集能力显著高于茎 ($p<0.05$)，而对 P 的富集能力则仅有第 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个取样时间对土壤 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，平均值分别为 18.065、16.118、8.860、7.748 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，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 迁移能力均在第 7 周时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。同一生长时期的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个取样时间的 N 迁移系数均大于 1，平均值分别为 2.224 和 2.165，说明 N 在再力花和花叶芦荻体内的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强；再力花在第 14、21 和 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个取样时间的 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。

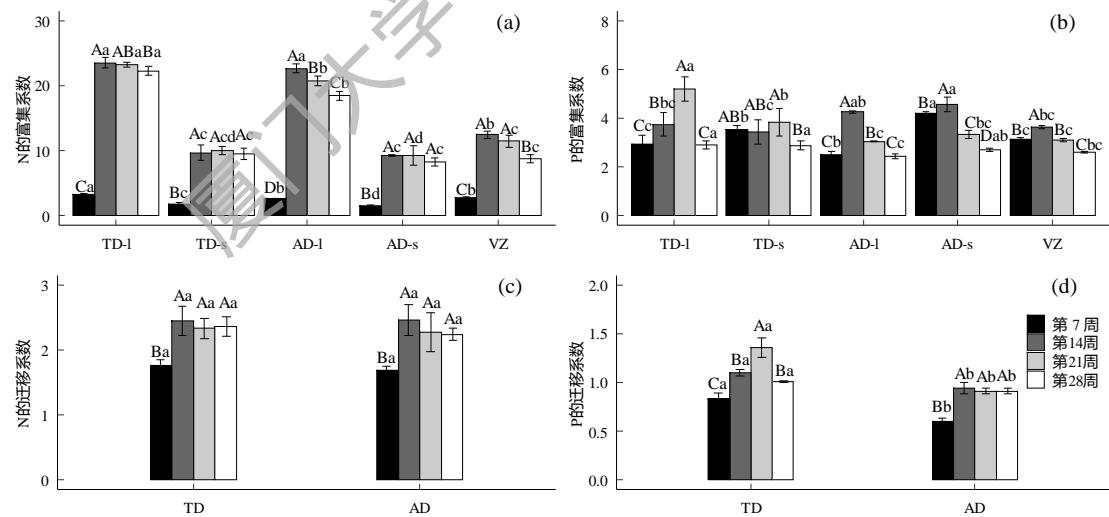


图 2 不同取样时间植物不同器官的富集系数和迁移系数

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

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], 本研究继续监测植物生长期内生物量的变化。通过研究发现, 人工湿地植物的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 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, 这说明 P 主要向植物生长迅速的器官供给营养而 N 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^[29]。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^[30], 植物体内的营养物质的分配特点决定植物的收割方式^[31], 本研究结果表明, 人工湿地系统大部分的 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系统的方式。本研究还发现, 除再力花茎和花叶芦荻茎 N 积累量与 N 含量、花叶芦荻叶 P 积累量与 P 含量不存在显著的线性关系外, 其他植物的不同器官 N、P 积累量分别与其对应的生物量、N、P 含量均存在显著的线性回归关系, 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, 与 BAWIEC 等^[32]对植物去除氮磷效果的研究一致。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的去除 N、P 的效果^[33]。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 N 积累量、再力花叶、花叶芦荻茎 P 积累量在第 21 周达到最大值外, 其余植物的不同器官的 N、P 积累量均在第 28 周达到最大值, 且第 21 周与 28 周的 P 积累量差异不显著, 这与刘冉等^[34]对 4 种湿地植物对水产养殖废水 N、P 元素的累积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^[35-36], 但由于在植物生长旺盛期至枯落期时, 植物生长速度变缓, 对 P 的需求减少, 植物体内的 P 元素渐趋于饱和状态^[37], 因此, 植物在第 21 周与 28 周对 P 的积累量无明显差异; 此外, 人工湿地植物对 N、P 元素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^[38-40]。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, 实现植物搭配最优化, 从而最大限度的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, 花叶芦荻对 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, 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 种植物也可纳入栽种范围进行考虑。

富集系数反映了植物土壤 N、P 的吸收净化能力^[41]。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 元素的富集能力高于再力花。王正等^[42]对消落带草本植物 N、P 富集能力的研究表明, 平均富集系数分别为 13.823、4.656, 而本研究 3 种植物的 N、P 富集系数的平均值分别为 11.573、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。

响^[43]。植物的迁移系数反映 N、P 元素在植物体内的迁移能力^[44]。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时间，这说明 N 在再力花和花叶芦荻体内的迁移能力均较强；P 在再力花体内的迁移能力较强，而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^[45]。

综上所述，3 种植物的生物量、累积量、富集系数和迁移系数在各取样时间上存在显著性差异，3 种植物 N、P 累积量和生物量、N、P 含量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，此外，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，也可在植物配置时进行考虑种植。

参考文献：

- [1] ÜLO M, MARTIN M, KAIDO S, 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: 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土壤-植物碳氮磷变化特点[J/OL]. 应用与环境生物学报, 2019.[2019-10-13].<https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.05038>.
- [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.
- [13] ANDERSON D M, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M. Harmful algal blooms and eutrophication:nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 2002, 25(4): 704-726.
- [14] ZHI W, JI G D. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints[J]. *Water Research*, 2014, 64:32-41.
- [15] 王林, 李冰, 朱健. 高通量测序技术在人工湿地微生物多样性研究中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2016,32(5):10-15.
- [16] CRISTINA Á, MATOMORO V,CAROLINA R,et al. Attenuation of emerging organic contaminants in a hybrid constructed wetland system under different hydraulic loading rates and their associated toxicological effects in wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471:2172-1280.
- [17] MARYAM S, MUHAMMAD A, MUHAMMAD U K, et al. Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria[J]. *Water Research*, 2014, 58C:152-159.
- [18] 吴文卫, 刘昂, 谷照虎, 等. 采用 PCR-DGGE 技术研究处理农田退水组合人工湿地微生物群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6):978-985.
- [19] HUETT D O, MORRIS S G, HUNT N. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. *Water Research*, 2005, 39(14):3259-3272.
- [20] HAN W J, SHI M M , CHANG J, et al. Plant species diversity reduces N₂O but not CH₄emissions from constructed wetlands under high nitrogen levels.*Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24:1-11.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 胡茜靥, 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 国家林业局. LY/T 1210 1275-1999 中华人民共和国林业行业标准—森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [27] 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.
- [28] JANE M, WILLIAM L B, MUASNTE C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(3):375-378.
- [29] SABINE G, WILLEM K. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants [J]. *Per Plant Ecol, Evo Syste*, 2002, 5(1): 37-61.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] BAWIEC A. Efficiency of nitrogen and phosphorus compounds removal in hydroponic wastewater treatment plant.[J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(16):2062-2072.
- [33] 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):497.1-497.13.
- [34] 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.

- [35] 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.
- [36] KITAYAMA K. Comment on “Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequenc-es”[J]. Science, 2005, 308: 633.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 刘源, 崔二萍, 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.
- [45] 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.

Nitrogen and phosphorus enrichment from soil by plant in growth periods of constructed wetland

GUO Rufeng¹, LIU Xinming¹, LI Guanjun¹, HUANG Ting¹,

WU Chengzhen^{2,3*}, LIN Yongming¹, LI Jian^{1*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002 , China; 2. Key Laboratory for Eco-industrial Green Technology of Fujian Provincial, Nanping 354300, China; 3. 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 pollute soil, this study selected *Thalia dealbata*, *Arundo donax* var. *versicolor* and *Vetiveria zizanioides* L. in Wuyi Mountain constructed wetland to measure biomass, N, P content of plant and N, P content of soil in order to analyze the changes in biomass, N and P accumulation, enrichment coefficient and migration coefficient of three plant species, and then established a linear regression relationship between N, P accumulation of plant and biomass, N, P contents. The

result showed that: 1) There were significant differences in the biomass, N and P accumulations of the three plant species between different sampling time and different plants ($p<0.05$); the ratio of leaf and stem biomass of *Thalia dealbata* and *Arundo donax* var. *versicolor* was less than 1 which excepted the 7th week; the N accumulation of *Thalia dealbata* and *Arundo donax* var. *versicolor*'s leaves was greater than their stems ($p<0.05$); 2) excepted N accumulation with N content of stem of *Thalia dealbata* and *Arundo donax* var. *versicolor* and P accumulation with P content of *Arundo donax* var. *versicolor*, the plants' N and P accumulation with biomass, N and P contents has significant linear regression relationship in other time ($p<0.05$); 3) the N and P enrichment coefficients of different organs in different plants were higher than 1 at each sampling time; except the P migration coefficient of *Thalia dealbata* was less than 1 in the 7th week, the N and P migration coefficients that were greater than 1 in other times; the N migration coefficient of *Arundo donax* var. *versicolor* was greater than 1 at each sampling time while the P migration coefficient was less than 1. In summary, the three plants have different absorbing, enriching and migrating ability in N and P, and *Arundo donax* var. *versicolor* has the best effect on the removal of N and P which could be used as the first choice for the construction of artificial wetland plants. The research results can provide reference for the construction and promotion of constructed wetlands in plant selection.

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