

杨焯, 董鹏, 陆敏博. 生物滞留池中 6 种植物的氮磷吸收动力学特征[J]. 净水技术, 2023, 42(3):143-150.

YANG Y, DONG P, LU M B. Characteristics of nitrogen and phosphorus absorption kinetics by six species of plants in bioretention ponds[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 143-150.

生物滞留池中 6 种植物的氮磷吸收动力学特征

杨焯^{1,*}, 董鹏², 陆敏博¹

(1. 悉地<苏州>勘察设计顾问有限公司, 江苏苏州 215000; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210037)

摘要 为了筛选出对氮、磷等营养物具有高效吸收性能的生物滞留池植物, 通过营养物耗竭法研究了翠芦莉、美人蕉、黄菖蒲、再力花、鸢尾和雨久花 6 种常见植物对硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮、溶解性总磷(TSP)的吸收动力学特征。结果表明, 48 h 水力停留时间内 6 种受试植物对 NO_3^- -N 的去除率在 12.89%~53.58%, 对氨氮的去除率在 36.38%~88.25%, 6 种植物对氨氮亲和力 and 吸收效果高于 NO_3^- -N; 对 TSP 的亲力和吸收效果较好, 去除率最高可达 80%。考虑雨水中污染物的去除效果, NO_3^- -N 含量较高时, 宜选用黄菖蒲, 低、中浓度 NO_3^- -N 含量宜选用鸢尾; 氨氮含量较低时, 宜选用翠芦莉, 中、高浓度氨氮含量宜选用黄菖蒲; 低浓度 TSP 宜选用翠芦莉, 中、高浓度 TSP 宜选用雨久花。

关键词 翠芦莉 美人蕉 黄菖蒲 再力花 鸢尾 雨久花 生物滞留池 氮磷 吸收动力学

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)03-0143-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.018

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Absorption Kinetics by Six Species of Plants in Bioretention Ponds

YANG Ye^{1,*}, DONG Peng², LU Minbo¹

(1. CCDI <Suzhou> Exploration & Design Consultant Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract In order to screen out the plants with high absorption capacity of nitrogen and phosphorus, the absorption kinetics of nitrate nitrogen (NO_3^- -N), ammonia nitrogen and total dissolved phosphorus (TSP) by six common plants, namely, *Ruellia brittoniana*, *Canna indica* L., *Iris pseudacorus* L., *Thalia dealbata* Fraser, *Iris tectorum* Maxim. and *Monochoria korsakowii* Regel & Maack were studied by nutrient depletion method. The results showed that the removal rates of NO_3^- -N and ammonia nitrogen for 6 tested plants were 12.89%~53.58% and 36.38%~88.25%, respectively, and the affinity and absorption of ammonia nitrogen for 6 plants were higher than those of NO_3^- -N within 48 hours. The affinity and absorption of TSP were better, and the removal rate was up to 80%. Considering the removal effect of pollutants in rain water, When the content of NO_3^- -N is high, *Acorus calamus* is the best choice, and *Iris tectorum* is the best choice for low and medium concentration of NO_3^- -N; when the ammonia nitrogen content is low, it is better to choose *Ruellia brittoniana*, and when the ammonia nitrogen content is medium or high, it is better to choose *Acorus calamus*; *Ruellia brittoniana* is suitable for low concentration TSP, *Monochoria korsakowii* is suitable for medium and high concentration TSP.

Keywords *Ruellia brittoniana* *Canna indica* L. *Iris pseudacorus* L. *Thalia dealbata* Fraser *Iris tectorum* Maxim. *Monochoria korsakowii* Regel & Maack bioretention pond nitrogen and phosphorus absorption kinetics

生物滞留池是低影响开发系统的核心技术措施之一, 对营养物氮、磷等具有较好的去除效果^[1], 对总氮的去除率最高可达 70%, 总磷的去除率最高可

达 85%^[2-3]。生物滞留池对氮、磷的去除主要依靠植物的同化吸收作用、土壤中微生物的修复作用、填料的物理过滤、吸附、离子交换以及砾石层的固体沉淀作用。其中, 植物同化吸收是生物滞留系统净化水体效能的关键因素之一, 研究^[4]表明, 种植植物提高氨氮的去除率最高可达 90%, 提高硝态氮

[收稿日期] 2022-06-14

[通信作者] 杨焯(1989—), 女, 硕士, 研究方向为海绵城市低影响开发技术, E-mail: 782372074@qq.com。

(NO_3^- -N) 的去除率 27% ~ 70%, 提高溶解性总磷 (TSP) 的去除率可达 31% 以上。植物生长过程中吸收氮、磷营养物, 并通过定期收割等方式, 实现营养物从生物滞留池中彻底去除, 这是植物净化污染物最直接的方式^[5], 也是作用占比较大的方式^[6-7]。不同植物对氮、磷营养物的吸收净化能力不尽相同, 因此, 开展不同植物吸收效果的研究, 对于筛选具有高效吸收性能的生物滞留池植物, 具有重要的现实意义。

离子吸收动力学为研究植物对离子的吸收提供了工具和载体。20 世纪 50 年代, Epstein 等^[8]首次将米氏方程用于植物吸收的研究, 提出了米氏常数 K_m 和最大吸收速率 I_{\max} 等量化指标, 为比较不同植物对氮、磷等营养物吸收的差异性提供了技术手段。目前, 应用离子吸收动力学研究植物对营养物的吸收特性已十分普遍^[9-10], 如 Abbasi 等^[11]研究表明, 毛竹的 I_{\max} 和 K_m 相对较小, 适合于低营养盐浓度的环境, 而紫花苜蓿和芥菜的 I_{\max} 和 K_m 相对较大, 适合处理高营养盐浓度的废水; 檀香逸等^[12]研究发现, 观音竹能够适应广泛的氮素浓度, 而绿萝对氨氮和 NO_3^- -N 的亲力和吸收速率较小, 仅可处理较高浓度的氮素水体; 陈韬等^[13]研究表明, 当雨水中氨氮、TSP 浓度较高, 生物滞留系统植物宜选用萱草, 当雨水中 NO_3^- -N 浓度较高宜选用丹麦草。通常, 生物滞留池植物选择应依据本土植物优先、净化能力强、耐涝抗旱、经济和景观价值良好等原则^[14], 南方地区常见植物主要包括翠芦莉 (*Ruellia brittoniana*)、美人蕉 (*Canna indica* L.)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.)、再力花 (*Thalia dealbata* Fraser)、鸢尾 (*Iris tectorum* Maxim.) 以及雨久花 (*Monochoria korsakowii* Regel & Maack), 但目前为止, 尚未见关于上述水生植物的吸收动力学报道。因此, 系统开展上述植物对氮、磷营养物的吸收动力学研究, 筛选出适用于苏南地区的生物滞留池植物, 可以为生物滞留池在苏南地区的工程应用提供基础支撑和技术参考。

基于以上现状, 本试验研究了植物对雨水中氮、磷营养物的吸收动力学, 表征了植物在 48 h 水力停留时间内对营养物的吸收能力, 比较了翠芦莉、美人蕉、黄菖蒲、再力花、鸢尾以及雨久花对 NO_3^- -N、氨氮以及 TSP 这 3 种离子的吸收动力学特征, 验证了 6 种植物对氮、磷污染物的吸收喜好, 为目标污染物的高效吸收与特征植物的筛选提供科学依据。同时,

通过对离子浓度、植物种类及营养物种类进行双因素方差分析, 研究不同因素以及因素之间的交互作用对吸收动力学参数的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料与培养

试验以翠芦莉、美人蕉、黄菖蒲、再力花、鸢尾和雨久花 6 种常见的生物滞留池植物为研究对象, 植物均购于南京当地某花卉市场。试验前, 植物的生物量分别为: 翠芦莉 0.040 g/cm^2 、美人蕉 0.050 g/cm^2 、黄菖蒲 0.047 g/cm^2 、再力花 0.038 g/cm^2 、鸢尾 0.041 g/cm^2 和雨久花 0.043 g/cm^2 。

试验在温室内进行, 平均气温为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度为 70%。为了减少植物组织内氮、磷积累对试验产生的干扰, 试验正式启动前, 用去离子水将 6 种受试植物冲洗干净, 转入 CaSO_4 溶液 (0.2 mmol/L , pH 值 = 6.5) 中饥饿处理 3 d。培养过程将植物放入 1/2 Hogland 营养液中培养 2 周, 每 3 d 更换一次营养液。为了满足植物光合作用, 光照条件如下: 光照强度为 5000 lx , 光照周期为 14 h/10 h (明/暗)。

1.2 试验方法

采用营养物耗竭法确定 48 h 水力停留时间内植物对雨水中氮、磷的吸收动力学参数。植物放入 1 L 烧杯中培养, 并在设计时间取样, 试验设置了不培养植物的空白对照组。结合自测水质, 参考其他研究^[15-16]对南京市政道路的雨水水质的分析, 分别配置了低、中、高 3 种浓度的吸收液, 试验吸收液的营养物质浓度如表 1 所示。吸收液以 0.2 mmol/L CaSO_4 溶液为支持液, 溶液中含有的 NO_3^- -N、氨氮、TSP, 分别由硝酸钾 (KNO_3)、氯化铵 (NH_4Cl) 和磷酸二氢钾 (KH_2PO_4) 配制, 均为分析纯。另外, 在吸收液中添加 10 mg/L 的氨苄青霉素, 抑制微生物生理活性, 避免微生物的干扰。试验分别于 0、1、2、4、8、12、22、26、30、36、48 h 取样。试验结束后, 剪下根部并测量根部干重。

表 1 试验吸收液的营养物质浓度
Tab. 1 Nutrient Concentration of Experimental Absorption Solution

类型	NO_3^- -N/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
高浓度	14.7	6.7	2.4
中浓度	7.3	3.4	1.2
低浓度	3.7	1.7	0.6

1.3 分析方法

离子吸收曲线方程通常采用一元二次多项式方程^[17]如式(1)。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

其中: x ——吸收时间, h;

y ——离子质量浓度, mg/L;

a 、 b 、 c ——常数。

对式(1)求负导得到浓度变化速率方程如式(2)。

$$y' = -(2ax + b) \quad (2)$$

令 $x \rightarrow 0$, 得到 $y' = -b$ 即为浓度最大变化速率, 由此可得到最大吸收速率如式(3)。

$$I_{\max} = -bV/M \quad (3)$$

其中: I_{\max} ——最大吸收速率, $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;

V ——加入的吸收液体积, L;

M ——植物根干重, g。

将 $y' = -1/2b$ 带入式(2)中求出 x , 将其带入式(1)所得的 y 值为米氏常数 K_m , 即植物吸收离子速率降到最大速率 1/2 时对应的离子浓度。米氏常数 K_m 值体现了植物根系细胞膜对氮、磷的亲合力, 是评价植物耐贫瘠能力的指标之一, K_m 值越小, 植物对某种离子耐贫瘠能力越强; 亲和力常数 $\alpha = I_{\max}/K_m$ 则是表征氮、磷营养物进入根部的速率, α 值越大, 营养物进入植物根部的速率越快。

利用 SPSS 软件进行双因素方差分析, 确定因素 A 离子浓度、因素 B 植物种类、因素 C 营养物种类及其两两交互作用对吸收动力学参数的影响。

1.4 测定项目与方法

水质指标检测方法及主要仪器如表 2 所示。

表 2 水质指标检测方法及主要仪器

Tab. 2 Detection Methods and Main Instruments for Water Quality Indices

指标	分析方法	主要仪器名称
NO_3^- -N	《水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法》(GB/T 7480—1987)	紫外分光光度计
氨氮	《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)	紫外分光光度计
TSP	《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)	紫外分光光度计、高压灭菌锅

2 结果与分析

2.1 氮、磷离子吸收曲线

通过试验发现, 未培养植物的空白对照组中氮、磷浓度无明显变化, 6 种植物对不同水平营养液中不同浓度的氮、磷营养物吸收曲线如图 1 所示。可知, 氮、磷营养物离子浓度随着吸收时间的增加逐渐降低, 经过 30 h 吸收后曲线趋向平缓, 说明植物对各种营养物的离子吸收逐渐饱和。

在低浓度处理组中, 6 种受试植物在 48 h 水力停留时间内, 对氨氮的去除率在 37.83%~88.25%、 NO_3^- -N 的去除率在 15.02%~53.58%; 中浓度处理组中, 氨氮的去除率在 54.51%~81.18%、 NO_3^- -N 去除率在 15.94%~41.64%; 高浓度处理组中, 氨氮的去除率在 36.38%~63.75%、 NO_3^- -N 则在 12.89%~38.9%。6 种受试植物对氨氮的吸收效果好于 NO_3^- -N, 其原因主要是氨氮进入植物细胞是一个主动运输过程, 而 NO_3^- -N 进入植物细胞是被动运输过程, 植物吸收 NO_3^- -N 比吸收氨氮更加耗能^[18]。羽衣甘蓝对各种氮素的吸收动力学研究表明, 向营养

液中添加氨氮会降低植物对 NO_3^- -N 的吸收能力^[19]; 宽叶香蒲以氨氮作为唯一氮源时比 NO_3^- -N 表现出更好的吸收速率和生长速率^[20]。

6 种受试植物 48 h 内对不同浓度的 TSP 有较好的吸收效果, 除低浓度的再力花以外, 去除率均在 30% 以上, 最高可达 80%。植物对 TSP 吸收效果较好的原因是 TSP 进入植物细胞是一个主动运输过程, 当植物体外磷的浓度大于植物细胞液的浓度时, 植物就会通过细胞膜的主动运输从外界吸收磷^[21-22]。部分研究表明, 种植植株的生物滞留池与未种植植株的相比, TSP 的去除率提高了 16%^[24], 相同条件下人工湿地去除率提高了 14.9%^[23]。

2.2 氮、磷吸收动力学

各浓度处理组氮、磷动力学参数计算结果如表 3 所示。在低浓度组中, 对于 NO_3^- -N 营养物, 6 种植物亲和力常数 α 为 1.65~22.25, 排序为鸢尾>翠芦莉>黄菖蒲>美人蕉>雨久花>再力花, 鸢尾 α 值最大, 再力花 α 值最小, 表明 NO_3^- -N 进入鸢尾速率最

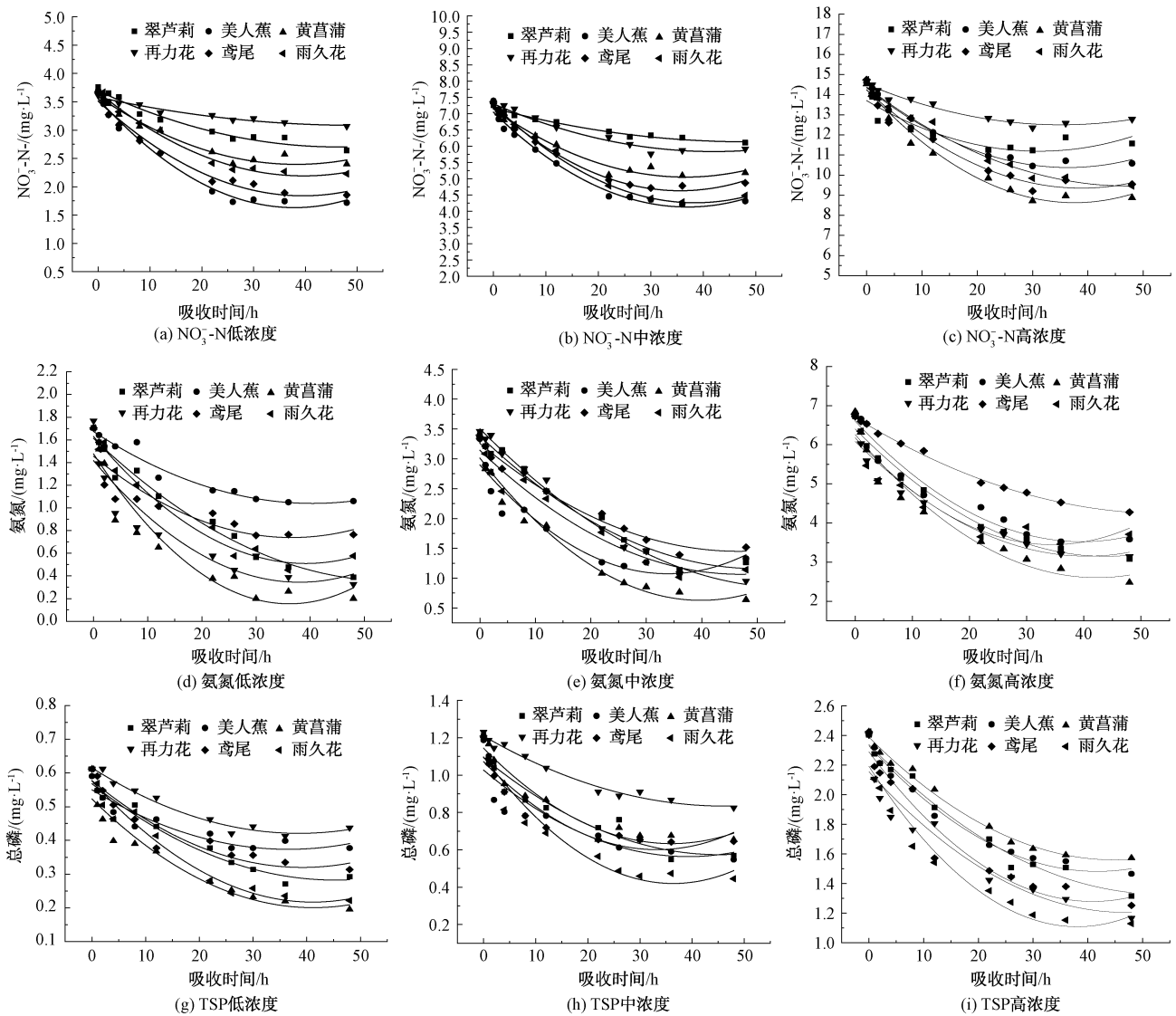


图 1 6 种植物对不同水平营养液中不同浓度的氮、磷营养物质吸收曲线

Fig. 1 Absorption Curve of Six Plants for Different Concentrations of Nitrogen and Phosphorus in Rainwater

快,进入再力花速率最慢。从亲和力常数来看, NO_3^- -N 进入鸢尾和翠芦莉的速率较快;米氏常数 K_m 值为 1.21~3.21,大小排序为再力花>翠芦莉>黄菖蒲>雨久花>鸢尾>美人蕉,美人蕉 K_m 值最小,再力花 K_m 值最大,表明美人蕉的耐贫瘠能力最好而再力花的耐贫瘠能力最差。从米氏常数来看,美人蕉和鸢尾具有良好的耐贫瘠能力;最大吸收速率 I_{\max} 值为 4.72~54.61,大小排序为翠芦莉>鸢尾>黄菖蒲>雨久花>再力花>美人蕉。从最大吸收速率来看,翠芦莉、鸢尾有较高的最大吸收速率。综合分析亲和力参数、米氏常数、最大吸收速率,鸢尾对低浓

度 NO_3^- -N 亲和力最好且 K_m 值较小、 I_{\max} 值较高。因此,鸢尾在低浓度营养物质处理组中,对 NO_3^- -N 的吸收效果最好。

对于低浓度氨氮营养物,从亲和力参数来看,翠芦莉亲和力常数最大,表明氨氮进入翠芦莉速率最快;从米氏常数 K_m 来看,翠芦莉的 K_m 最小,表明翠芦莉对低浓度氨氮具有较好的耐贫瘠能力;从最大吸收速率 I_{\max} 值来看,翠芦莉 I_{\max} 值最大。综合分析 3 个参数,翠芦莉对低浓度氨氮亲和力较好,翠芦莉 K_m 值最低且 I_{\max} 值最大,故翠芦莉更适于净化低浓度氨氮。

对于低浓度 TSP 营养物,从亲和力参数 α 来看,翠芦莉的亲和力常数最大,表明低浓度 TSP 进入翠芦莉速率最快;从米氏常数来看,翠芦莉的 K_m 值最低,表明对低浓度 TSP 有较强的耐贫瘠能力;从最大吸收速率来看,翠芦莉的 I_{max} 值最大。综合分析 3 个参数,翠芦莉对低浓度 TSP 亲和力最好,翠芦莉 K_m 值最低且 I_{max} 值最高,因此,翠芦莉对低

浓度 TSP 的净化能力最好,可作为吸收低浓度 TSP 雨水的先锋植物。

相同原理,在中浓度处理组,鸢尾去除 NO_3^- -N 的效果最好,黄菖蒲处理氨氮的效果最好,雨久花处理 TSP 效果最佳。高浓度处理组中,黄菖蒲处理 NO_3^- -N 的效果最好,黄菖蒲处理氨氮的效果最好,雨久花处理 TSP 的效果最好。

表 3 氮、磷动力学参数计算结果

Tab. 3 Parameters of Nitrogen and Phosphorus Absorption

营养物类型	植物种类	低浓度			中浓度			高浓度		
		$K_m / (mg \cdot L^{-1})$	$I_{max} / (\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	α	$K_m / (mg \cdot L^{-1})$	$I_{max} / (\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	α	$K_m / (mg \cdot L^{-1})$	$I_{max} / (\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	α
NO_3^- -N	翠芦莉	3.01	54.61	18.16	6.31	26.95	4.27	11.82	136.70	11.56
	美人蕉	1.21	4.72	3.89	4.83	23.80	4.93	11.38	17.58	1.54
	黄菖蒲	2.67	26.08	9.76	5.61	35.97	6.42	10.06	70.27	6.99
	再力花	3.21	5.31	1.65	6.16	30.87	5.01	12.97	27.75	2.14
	鸢尾	2.29	51.02	22.25	5.24	44.87	8.56	4.79	28.14	5.87
	雨久花	2.51	16.64	6.62	5.08	37.99	7.49	10.69	47.26	4.42
氨氮	翠芦莉	0.47	58.06	90.42	1.73	55.92	32.24	3.98	125.44	31.52
	美人蕉	2.07	15.26	7.36	1.54	16.28	10.58	4.34	12.55	2.89
	黄菖蒲	0.64	30.36	63.97	1.22	37.57	30.75	3.46	40.61	11.73
	再力花	0.56	14.96	26.52	1.39	42.01	30.21	3.90	34.92	8.94
	鸢尾	0.88	23.67	26.92	1.85	24.01	12.99	10.54	78.37	7.44
	雨久花	0.76	12.75	16.87	1.51	21.38	14.15	4.13	36.03	8.73
TSP	翠芦莉	0.27	16.08	59.43	0.76	14.45	18.94	1.66	12.08	7.28
	美人蕉	0.37	1.46	3.91	0.68	3.57	5.25	1.71	3.28	1.91
	黄菖蒲	0.29	6.52	22.34	0.77	8.91	11.63	1.75	8.65	4.93
	再力花	0.42	2.68	6.32	0.96	7.16	7.43	1.38	9.80	7.09
	鸢尾	0.42	7.91	18.99	0.70	8.76	12.57	1.53	15.43	10.11
	雨久花	0.29	3.91	13.51	0.58	8.99	15.54	1.32	15.93	12.07

2.3 双因素方差分析

吸收动力学参数的双因素方差分析结果如表 4 所示。离子浓度对 K_m 值的影响显著 ($P < 0.05$), 植物种类对 K_m 值的影响不显著 ($P > 0.05$), 营养物种类对 K_m 值的影响高度显著 ($P < 0.0001$), 离子浓度与营养物种类的交互作用对 K_m 的影响高度显著 ($P < 0.0001$)。离子浓度、植物种类对 I_{max} 值的影响显著 ($P < 0.05$), 营养物种类对 I_{max} 值的影响高度显著 ($P < 0.0001$); 在交互作用方面, 3 种交互作用对 I_{max} 值的影响都不显著 ($P > 0.05$)。离子浓度、植物种类以及营养物种类对亲和力参数 α 的影响都

显著 ($P < 0.05$), 3 种交互作用对 α 值的影响不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

离子吸收动力学对研究植物根系吸收速率、阐明吸收机理以及筛选出吸收营养物高效的植物品种具有重要意义^[24]。对比 6 种受试植物对 NO_3^- -N 和氨氮的吸收动力学特性, 发现其对氨氮的亲和力参数 α 均大于 NO_3^- -N 的亲和力参数, 说明植物对氨氮优于 NO_3^- -N 的吸收。研究^[25]表明, 氨氮是缺氧环境中无机氮的主要存在形式, 植物细胞在吸收氮素的过程中, 吸收 NO_3^- -N 比吸收氨氮更加耗能, 所以

表 4 吸收动力学参数的双因素方差分析
Tab. 4 Two Way ANOVA of Absorption Kinetic Parameters

吸收动力学参数	差异源	<i>P</i>
K_m	离子浓度 A	0.001 *
	植物种类 B	0.99
	营养物种类 C	<0.000 1 **
	交互作用 (A×B)	1
	交互作用 (A×C)	<0.000 1 **
	交互作用 (B×C)	0.99
I_{max}	离子浓度 A	0.018 *
	植物种类 B	0.002 *
	营养物种类 C	<0.000 1 **
	交互作用 (A×B)	0.403
	交互作用 (A×C)	0.6
	交互作用 (B×C)	0.4
α	离子浓度 A	0.011 *
	植物种类 B	0.003 *
	营养物种类 C	0.004 *
	交互作用 (A×B)	0.286
	交互作用 (A×C)	0.49
	交互作用 (B×C)	0.271

注:离子浓度、植物种类与营养物浓度对参数的影响由 *P* 值表示; ** 表示 $P < 0.000 1$; * 表示 $P < 0.05$ 。

植物更喜欢吸收氨氮。水生植物的研究中大多表现出对氨氮的优先吸收,研究^[26]表明,芦苇、香蒲等植物对氨氮亲和力大于 NO_3^- -N 的亲和力;谢静等^[27]研究同样发现 6 种植物共同特点是 $K_m(\text{NO}_3^- \text{-N}) > K_m(\text{氨氮})$,即 6 种植物对氨氮具有优先吸附的趋势;藻类植物的研究同样表现出优先吸收氨氮的喜氨特性^[28-29]。但是,上述研究结果并不全面,还有研究发现个别植物优先吸收 NO_3^- -N,如张亚娟等^[30]发现狭叶香蒲根系对 NO_3^- -N 的亲和力大于氨氮,何明洁等^[31]发现烟草对 NO_3^- -N 的吸收作用优于氨氮,金春华等^[32]研究表明凤眼莲有优先吸收 NO_3^- -N 的趋势,以上研究表明,植物对各种形态氮的吸收喜好与植物种类有关。需要指出的是,植物优先吸收氮、磷营养物的顺序受多种因素的共同影响,如植物种类特性、环境条件以及营养物的相对供应量等,具体的影响因素和吸收机理有待进一步研究。

在试验中, K_m 值和 I_{max} 值是在较短时间内、相对均匀的溶液中获得,与实际生物滞留池处理雨

水中氮磷污染物的情况有一定的差异,因此,试验得到的相关结论不能完全作为植物的选择依据,只能对植物选择予以适当参考。另外,植物对氮、磷的吸收效率不仅与动力学参数有关,与植物根系形态、生物量以及植物不同生长时期有关,而且动力学参数也会随着外部条件的改变而发生改变。因此,植物吸收动力学特征只能作为高效植物筛选的依据之一,适用于苏南地区的脱氮除磷生物滞留池植物选择,还需要结合其他条件做进一步考察比较和研究分析。

4 结论

(1) 氮、磷营养物离子浓度随着吸收时间的增加而降低,并在 30 h 后植物对营养物的吸收逐渐饱和。48 h 水力停留时间内 6 种受试植物对氨氮的去除率在 36.38% ~ 88.25%,对 NO_3^- -N 的去除率在 12.89% ~ 53.58%,6 种植物对氨氮亲和力和吸收效果高于 NO_3^- -N。对 TSP 的亲力和吸收效果较好,去除率最高可达 80%。

(2) 在雨水污染物的去除效果方面, NO_3^- -N 含量较高时,宜选用黄菖蒲,低、中浓度 NO_3^- -N 含量宜选用鸢尾;氨氮含量较低时,宜选用翠芦莉,中、高浓度氨氮含量宜选用黄菖蒲;低浓度 TSP 宜选用翠芦莉,中、高浓度 TSP 宜选用雨久花。

(3) 离子浓度对 K_m 值、 I_{max} 值、 α 值的影响显著;植物种类对 K_m 值的影响不显著,植物种类对 I_{max} 值、 α 值影响显著;营养物种类对 K_m 值和 I_{max} 值的影响高度显著,营养物种类对 α 值影响显著。在双因素交互作用下,只有离子浓度和营养物种类交互作用对 K_m 值影响高度显著,其余交互作用对各参数的影响均不显著。

参考文献

- [1] 潘国艳,夏军,张翔,等. 生物滞留池水质效应的模拟试验[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 97-101.
PAN G Y, XIA J, ZHANG X, et al. Simulation experiments on pollutant removal of bioretention units [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2012, 40(6): 97-101.
- [2] BRATIERES K, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study[J]. Water Research, 2008, 42(14): 3930-3940. DOI:10.1016/j.watres.2008.06.009.
- [3] LEE J, GIL K. Evaluating bioretention hydrology and nutrient

- removal for restoring wetland function at artificial rainfall [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 150: 105823. DOI:10.1016/j.ecoleng.2020.105823.
- [4] MILANDRI S G, WINTER K J, CHIMPHANGO S B M, et al. The performance of plant species in removing nutrients from stormwater in biofiltration systems in Cape Town[J]. *Water SA*, 2012, 38(5): 655-662. DOI:10.4314/wsa.v38i5.2.
- [5] READ J, WEVILL T, FLETCHER T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5): 893-902. DOI:10.1016/j.watres.2007.08.036.
- [6] DAGENAIS D, BRISSON J, FLETCHER T D. The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 532-545. DOI:10.1016/j.ecoleng.2018.07.007.
- [7] CHEN X C, HUANG L, CHANG T H A, et al. Plant traits for phytoremediation in the tropics[J]. *Engineering*, 2019, 5(5): 841-848. DOI:10.1016/j.eng.2019.07.019.
- [8] EPSTEIN E, HAGEN C E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots[J]. *Plant Physiology*, 1952, 27(3): 457-474. DOI: 10.2307/4258559.
- [9] 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.
- LIU M W, SUN X, LI P F, et al. Comparison of the absorption and removal of nitrogen and phosphorus from waterbody by three aquatic plants and their combinations [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1289-1298.
- [10] 韩璐瑶, 吕锡武. 水生蔬菜型湿地植物对氮、磷营养盐的吸收动力学 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 2828-2835.
- HAN L Y, LÜ X W. Absorption kinetics of nitrogen and phosphorus in aquatic vegetables in wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(5): 2828-2835.
- [11] ABBASI H N, XIE J, VYMAZAL J, et al. Kinetics of nutrient uptake by economical vegetable species grown in constructed wetlands[J]. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2018, 28(3): 726-732.
- [12] 檀香逸, 吕锡武, 杨子萱, 等. 不同水培观赏植物对氮素的吸收动力学特性分析 [J]. *水处理技术*, 2018, 44(6): 42-45, 51.
- TAN X Y, LÜ X W, YANG Z X, et al. Analysis on the kinetic characteristics of nitrogen absorption by different ornamental plants [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(6): 42-45, 51.
- [13] 陈韬, 张本, 李剑洋, 等. 几种生物滞留植物对雨水中营养物的吸收动力学特征 [J]. *环境工程*, 2018, 36(9): 21-25.
- CHEN T, ZHANG B, LI J F, et al. Absorption kinetics of nutrient in stormwater by several bioretention plants [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(9): 21-25.
- [14] 阮添舜, 李家科. 生物滞留设施植物·填料·微生物研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(18): 63-69, 112.
- RUAN T S, LI J K. Research progress of plant, filler, microorganism in bioretention [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(18): 63-69, 112.
- [15] 白莹, 阮晓红, 李荣富, 等. 南京市典型区域城市湿沉降污染成分特征分析 [J]. *水资源保护*, 2013, 29(5): 10-14.
- BAI Y, RUAN X H, LI R F, et al. Contaminant properties analysis of wet precipitation in typical urban areas in Nanjing City [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(5): 10-14.
- [16] 周舒, 骆辉, 赵尘. 南京市梅雨期雨水水质特性分析 [J]. *森林工程*, 2017, 33(2): 60-63, 87.
- ZHOU S, LUO H, ZHAO C. Analysis on rainwater quality of rainy season in Nanjing [J]. *Forest Engineering*, 2017, 33(2): 60-63, 87.
- [17] 蒋廷惠, 郑绍建, 石锦芹, 等. 植物吸收养分动力学研究中的几个问题 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1995(2): 11-17.
- JIANG T H, ZHENG S J, SHI J Q, et al. Several considerations in kinetic research on nutrients uptake by plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1995(2): 11-17.
- [18] MILLER A J, FAN X R, ORSEL M, et al. Nitrate transport and signalling [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2297-2306. DOI: 10.1093/jxb/erm066.
- [19] SONG S W, LI G, SUN G W, et al. Uptake kinetics of different nitrogen forms by Chinese Kale [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47(11). DOI:10.1080/00103624.2016.1178279.
- [20] BRIX H, DYHR-JENSEN K, LORENZEN B. Root-zone acidity and nitrogen source affects *Typha latifolia* L. growth and uptake kinetics of ammonium and nitrate [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(379): 2441-2450. DOI: 10.1093/jxb/erf106.
- [21] LIU Z C, CHEN B N, WANG L A, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from sewage by four aquatic plants [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, 28(12a): 10125-10130. DOI: 10.1166/jbmb.2020.1972.
- [22] 孙传范, 肖凯, 韩胜芳, 等. 植物吸收和转运磷素的分子机理研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(2): 17-24.
- SUN C F, XIAO K, HAN S F, et al. Advances in molecular mechanism of phosphorus uptake and transport in plants [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(2): 17-24.
- [23] LIU X, NING G H, XIE J Z, et al. Purification efficiency of zeolite and two planted grasses on sewage and relationship with carbon-nitrogen-phosphorus ratios in simulated constructed wetland system [J]. *Water Science and Technology*, 2018, 78(3): 545-555. DOI:10.2166/wst.2018.325.
- [24] 洪春来, 王卫, 朱凤, 等. 不同湿地植物对污水中氮和磷的吸

- 收动力学特性[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1):122-126.
HONG C L, WANG W, ZHU F, et al. The uptake dynamic characteristics of N and P in polluted water by different wetland plants [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1): 122-126.
- [25] PIWPUAN N, ZHAI X, BRIX H. Nitrogen nutrition of *Cyperus laevigatus* and *Phormium tenax*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, nitrate reductase activity and N uptake kinetics [J]. Aquatic Botany, 2013, 106: 42-51. DOI: 10.1016/j.aquabot.2013.01.002.
- [26] 张熙灵,王立新,刘华民,等. 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2238-2245.
ZHANG X L, WANG L X, LIU H M, et al. Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetus* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2238-2245.
- [27] 谢静,吕锡武,李洁. 6 种湿地植物吸收污水中氮和磷的动力学[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4067-4072.
XIE J, LÜ X W, LI J. Uptake dynamics of N and P in polluted water by 6 different wetland plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8): 4067-4072.
- [28] WANG C Y, XIE H Q. Study on nutrients uptake kinetics of typical enteromorpha algae from Lianyungang [J]. Advanced Materials Research, 2013, 610/611/612/613: 111-114. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.111.
- [29] CHUN Y Y, XU H, QING M C. The study on main nutrients uptake kinetics by three species of algae[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 2987: 355-358. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.355.
- [30] 张亚娟,刘存歧,李洪波,等. 薹菜对富营养化水体的氮磷去除及吸收动力学研究[J]. 环境工程学报, 2011(5): 1057-1061.
ZHANG Y J, LIU C Q, LI H B, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance and kinetics absorption by *Ipomoea aquatica* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011(5): 1057-1061.
- [31] 何明洁,范腾飞,杨超,等.¹⁵N 短时标记法鉴定烟草‘K326’和‘红花大金元’吸收 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的生理动力学特征[J]. 植物生理学报, 2017, 53(4): 572-580.
HE M J, FAN T F, YANG C, et al. Physiological characterization of NO₃⁻ and NH₄⁺ uptake kinetics of tobacco ‘K326’ and ‘Honghuandajinyuan’ using a short-time ¹⁵N-substrate labeling approach [J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(4): 572-580.
- [32] 金春华,陆开宏,胡智,等. 粉绿狐尾藻和凤眼莲对不同形态氮吸收动力学研究[J]. 水生生物学报, 2011, 35(1): 75-79.
JIN C H, LU K H, HU Z, et al. Kinetics of ammonium and nitrate uptake by *Myriophyllum aquaticum* and *Eichhornia crassipes* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(1): 75-79.

学术资讯

《学术论文编写规则》(GB/T 7713.2—2022) 即将实施

学术论文新标准——《学术论文编写规则》(GB/T 7713.2—2022) 将于 2023 年 7 月 1 日起正式实施。该文件部分代替《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》(GB/T 7713—1987), 属于国家级推荐标准。因此, 作者在投稿前须参照最新的标准, 对文章的规范性进行修改。

标准从学术论文的组成部分及编排格式两个方面, 对学术论文的编写做出了规定, 包括题名、摘要、作者信息、关键词、主体、结论、参考文献等。与 GB/T 7713—1987 相比, GB/T 7713.2—2022 对题名字数、摘要的规定进行了调整。题名字数由“不宜超过 20 字”更改为“为便于交流和利用, 题名应简明, 一般不宜超过 25 字”; 摘要由“中文摘要一般不宜超过 200~300 字, 外文摘要不宜超过 250 个实词”更改为“中文摘要的字数, 原则上应与论文中的成果多少相适应, 在一般情况下, 报道性摘要以 400 字左右、报道/指示性摘要以 300 字左右、指示性摘要以 150 字左右为宜。中文摘要、外文摘要内容宜对应, 为利于国际交流, 外文摘要可以比中文摘要包含更多信息”。

更多《学术论文编写规则》(GB/T 7713.2—2022) 的相关内容, 欢迎扫码下载标准原文查看。



扫码下载