

水生蔬菜型湿地植物对氮、磷营养盐的吸收动力学

韩璐瑶^{1,2}, 吕锡武^{1,2,*}

1. 东南大学能源与环境学院, 南京 201196
2. 东南大学无锡太湖水环境研究中心, 无锡 214000

摘要 采用改进的常规耗竭法研究了 6 种蔬菜型湿地植物根系对氮、磷营养盐的吸收特征及差异。这 6 种植物根系对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 H_2PO_4^- 的吸收动力学特征均可采用 Michaelis-Menten 方程描述。结果表明:不同植物对氮、磷的最大吸收速率 $I_{\max}$ 和最小亲和力 K_m 有显著差异。6 种植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率最大,对 H_2PO_4^- 的亲和力常数较小,所以当水体中氮、磷浓度较低时,优先选择吸收磷,但对铵态氮的吸收速率最快。通过对 6 种植物根系吸收氮、磷的最大吸收速率 $I_{\max}$ 和亲和力常数 K_m 的比较可知,空心菜根系拥有最大的 $I_{\max}$ 和最小 K_m ,说明空心菜能够适应任意浓度的水体净化,芋头 $I_{\max}$ 较低而 K_m 较大,说明芋头不适宜作为生态修复植物;韭菜适合高氮、磷水平的水体净化,可用作水体修复中的先锋植物,生菜适合低氮、磷水平的水体净化;雪里蕻适宜用于低 P、低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 水体修复,金花菜则是对高 P、高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 水平的污染水体处理效果相对较好;但考虑食用安全性问题,重金属含量可能超标,工程应用时需谨慎。

关键词 水生蔬菜;水生植物;吸收动力学;富营养化;污染水体净化

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)05-2828-08 DOI 10.12030/j.cjee.201512162

Absorption kinetics of nitrogen and phosphorus in aquatic vegetables in wetland

HAN Luyao^{1,2}, LYU Xiwu^{1,2,*}

1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China
2. Taihu Lake Water Environment Engineering Research Center(Wuxi), Southeast University, Wuxi 214000, China

Abstract The nitrogen and phosphorus uptake kinetics of six kinds of aquatic vegetables' root system were investigated by using the modified depletion method. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and H_2PO_4^- uptake kinetics of the six plants' root systems could be expressed with the Michaelis-Menten equation. Results showed that the maximum uptake rate ($I_{\max}$) and the Michaelis-Menten constant (K_m) was significantly different between the six plants' root systems. The six kinds of aquatic vegetables in wetland had higher $I_{\max}$ for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and less K_m for H_2PO_4^- . In condition of low nitrogen and phosphorus concentration wastewater, the plants preferred absorbing phosphorus, but the absorption rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was fastest. *Ipomoea aquatica* Forsk. ' root system owned the maximum $I_{\max}$ and minimum K_m , which was suitable for treatment of all levels of polluted water. *Colocasia esculenta* L. Schoot. had lower $I_{\max}$ and higher K_m , which showed that *Colocasia esculenta* L. was not suitable for ecological rehabilitation. *A. tuberosum* Rottl. ex Spreng should be selected as pioneer plant to purify polluted water with high level of nitrogen and phosphorus and *Lactuca sativa* Linn. was proper to purify polluted water with low level of nitrogen and phosphorus. *Brassica juncea* var. was more fit for low H_2PO_4^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and high $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration wastewater purification, while *Medicago hispida* Gaertn. was applicable to repair polluted water with high H_2PO_4^- , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and low $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration and inedible. While take the safety of vegetable into consideration, the heavy metal concentrations could overstep the standard, so engineering application need more careful.

Key words aquatic vegetables; water plant; absorption kinetic; eutrophication; purification of polluted water

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-005)
收稿日期:2015-12-22;录用日期:2016-02-24
第一作者:韩璐瑶(1990—),女,硕士研究生,研究方向:水污染控制和生态修复。E-mail: hlyseu@163.com
* 通信作者, E-mail: xiwulu@seu.edu.cn

水体中氮磷等营养盐浓度升高而导致的富营养化已经成为全球性的水环境问题^[1],利用具有生态效应的人工湿地调节和净化富营养化水体的方法受到越来越多的关注,湿地水生植物富集氮、磷成为治理、调节和抑制水体富营养化的一个有效途径。

研究^[2-4]表明,水生植物对富营养化水体中的氮、磷等营养物质具有明显的去除效果。水生植物不仅可以直接吸收利用水中的营养物质和重金属等有害物质,还可通过其根际微生物的分解作用净化水体。

凤眼莲、水花生和大藻等植物对水体有很好的净化作用,因此,选取一些人类可以直接利用的、具有一定经济价值且能高效净化水质的蔬菜型湿地植物成为水体污染植物修复中的一个重要方向。

根系养分离子吸收动力学对植物元素吸收的研究十分重要,它是20世纪50年代初开创并发展的将米氏(Michaelis-Menten)学说及其方程应用到解释植物根系对离子吸收的一种理论,为植物养分吸收特性的研究、吸收速率机理的阐明、植物鉴定和筛选都提供了有利的手段^[5]。迄今为止,动力学研究主要应用于研究作物(玉米、水稻、棉花、油菜等)吸收营养物质的特性^[6-13],近年来关于水生植物吸收营养动力学的研究也有报道,如浮萍^[14]、竹叶眼子菜^[15]、雍菜^[16]、凤眼莲^[17]等的动力学吸收已有研究,但是对于湿地植物尤其是蔬菜型湿地植物对污水中污染物质的吸收动力学特征的研究还较少;因此,本文选取了6种兼具食用价值、生态价值和经济价值的蔬菜型湿地植物开展了氮、磷营养盐的吸收动力学研究,目的在于明确各蔬菜型湿地植物对氮、磷营养盐的吸收特征及其吸收差异,为筛选出进行生态修复工程中针对不同营养特征的富营养化水体具有高效吸收并具有一定经济价值的蔬菜型湿地植物提供科学的理论基础和实际数据实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料及培养

供试材料选取无锡太湖水环境工程研究中心正在实验中的人工湿地里生长健壮并大小一致的6种植物:生菜(*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.)、金花菜 *Medicago hispida* Gaertn.)、空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk.)、雪里蕻(*Brassica juncea* var.)、芋头(*Colocasia esculenta* L. Schoot.)、韭菜(*A. tuberosum* Rottl. ex Spreng.)作为研究对象。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,用pH计测定pH值并用0.1 mol·L⁻¹ NaOH或者HCl调节营养液pH,使其保持在5.0~6.0之间。在培养期间,向营养液中加入微生物抑制剂100 mg·L⁻¹ C₁₆H₁₈NaN₃O₄S(MERCK)可排除微生物的影响^[18]。实验正式启动前,用去离子水将植物冲洗干净,转入无氮、磷的0.1 mmol·L⁻¹ CaSO₄支持溶液中饥饿培养3 d,以消除自由空间中残留的氮、磷对实验的影响。

1.2 实验方法

目前,根系对水分吸收的动力学研究方法主要有耗竭法和系列浓度法。系列浓度法指配制不同浓度系列的溶液,让植物进行短时间吸收,求出吸收动力学参数。这种方法虽然也能取得有参考价值的结果,但存在许多不足之处。如离体根与整株植物的吸收特性是有差别的;测定时要用许多植株样品,必然存在较大的取样差异,增大实验误差;所用溶液往往为单盐溶液,与植物正常生长的养分条件很不一致等^[19]。为了克服这些缺陷,CLAASSEN等^[20]于1974年提出了用完整的植株进行离子吸收动力学研究的耗竭法。用含不同离子的单一营养液进行较长时间的吸收实验,通过定期测定溶液中的离子浓度,求出浓度随时间而变化的曲线方程,经数学计算求出吸收动力学参数。本研究采用耗竭法探讨植物对氮、磷的吸收特性。

将经饥饿处理后的植株移入装有0.8 L吸收液的2 L烧杯中(使植物根部浸泡在水中)进行吸收实验。以硫酸钙(0.1 mmol·L⁻¹)为支持溶液,用去离子水和分析纯KH₂PO₄、KNO₃、(NH₄)₂SO₄配制吸收液,浓度分别为2.2、20和15 mg·L⁻¹;每种植物在各吸收液中分别设置3个平行重复,实验在温度为(25±1)℃、光照强度为5 000 lx、相对湿度为75%的人工气候培养箱中进行。分别在0、0.5、1、2、3、4、6、8、10 h时取样,每次取样1 mL补充1 mL去离子水,并测定吸收液的单盐离子浓度。取样完毕后立即取出植株,剪下根部,用滤纸吸干根表面附着的水分后称鲜重,并在70℃下烘干至恒重后称重。根据吸收液浓度与吸收时间绘制吸收曲线图,再根据吸收曲线方程求出动力学参数,比较分析不同植物的动力学特性。

H_2PO_4^- 浓度的测定用钼锑抗分光光度法^[21], NH_4^+ 浓度的测定用纳氏试剂分光光度法^[22], NO_3^- 浓度的测定用紫外分光光度法^[21], 取 3 次重复的平均值。

1.3 动力学参数的求算依据

吸收动力学参数根据蒋廷惠等^[19]的计算方法,以 X 为吸收时间, Y 为吸收液中离子浓度,用一元二次方程拟合离子消耗曲线方程:

$$Y = cX^2 + bX + a$$

(1)

对该方程求负导数得浓度变化速率方程:

$$Y' = -(b + 2cX)$$

(2)

对方程(2)作如下处理:令 $X \rightarrow 0$, 此时, $Y' = -b$, 由此得到浓度最大变化速率;考虑到吸收液体积和根干质量,利用公式 $I_{\max} = -bV/m$ (m 为根的干质量),即可得到单位根质量的最大吸收速率。 $I_{\max}$ 反映植物吸收养分的内在潜力。 $Y' = -b/2$ 代入方程(2)求出 X , 将求得 X 代入离子消耗曲线方程(1)求出 Y , 即为 K_m 值($1/2I_{\max}$ 时介质的浓度), K_m 值是植物耐瘠能力的评价指标之一。 K_m 值小,说明根系吸收系统对该离子的亲和力大。令 $Y' = 0$, 求出吸收速率为 0 的时间 X , 代回到方程(1)得到平衡浓度 $C_{\min}$, 即吸收速率为 0 时介质中离子的最低浓度, $C_{\min}$ 值越小,植物越能从离子浓度很低的介质中吸收养分。

运用 SPSS19.0 软件及 Sigmaplot12.0 软件对数据进行统计分析和作图。

2 结果与分析

CACCO 等^[23]将最大吸收速率 $I_{\max}$ 和亲和力常数 K_m 分成 4 种可能的组合。这些组合分别对不同环境养分状态下植物的适应性进行评价:1)高 $I_{\max}$ 和低 K_m , 具有这样特性的植物能适应广泛的营养条件;2)高 $I_{\max}$ 和高 K_m , 具有这样特性的植物能适应于高浓度的养分条件;3)低 $I_{\max}$ 和低 K_m , 适应于低养分状态;4)低 $I_{\max}$ 和高 K_m , 这种特性的植物在任何条件下生长都是不利的。

2.1 蔬菜型湿地植物吸收 H_2PO_4^- 的动力学特性

各供试植物对磷元素吸收的动力学曲线见图 1。随着吸收时间的延长, H_2PO_4^- 浓度逐渐降低, 空心菜对 H_2PO_4^- 的吸收具有明显的优势, 整个吸收时间内的吸收速率较快植物为空心菜。植物对 H_2PO_4^- 的吸收动力学参数见表 1。结果表明, 6 种水生植物对磷吸收动力学特性上存在着较大的差异, 6 种植物吸收 H_2PO_4^- 的最大速率 $I_{\max}$ 介于 $3.06 \sim 74.60 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以根干质量计)之间, 亲和力常数 K_m 介于 $0.4736 \sim 1.6123 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。

从表 1 中可知, 最大吸收速率 $I_{\max}$ 在不同植物中的差异为:空心菜 > 韭菜 > 金花菜 > 生菜 > 雪里蕻 > 芋头, 空心菜的 $I_{\max}$ 分别是韭菜、金花菜、生菜、雪里蕻和芋头的 1.09、2.21、2.88、3.99、26.54 倍; 亲和力常数 K_m 的差异为:芋头 > 金花菜 > 韭菜 > 雪里蕻 > 生菜 > 空心菜, 空心菜 K_m 分别显著低于其余 5 种植物 ($P < 0.05$), 芋头、金花菜、生菜、雪里蕻和韭菜 K_m 值无显著差异 ($P > 0.05$)。

根据 CACCO 等^[23]提出的用 $I_{\max}$ 和 K_m 值评价植物对污染水体中养分的适应性理论可知, 常数 K_m 反映水生植物对水体中磷元素的亲和能力, 其值越小, 则表明该植物的亲和力越强。空心菜具有最大的吸收速率和最小的亲和力常数, 对高供磷水平和低供磷水平的污染水体均有很好的吸附能力, 净化效果好, 适应含任何 H_2PO_4^- 浓度的污水; 雪里蕻和生菜的 $I_{\max}$ 和 K_m 相对较小, 适合于低浓度 H_2PO_4^- 的污水; 而韭菜

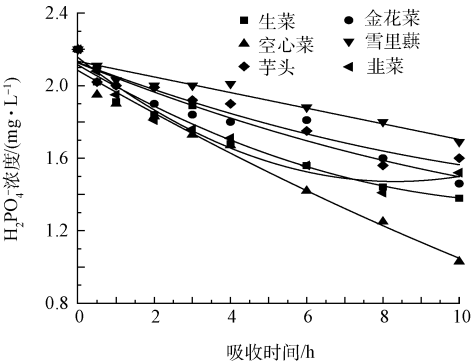


图 1 6 种蔬菜型湿地植物对 H_2PO_4^- 吸收的动力学曲线
Fig.1 Kinetic curves of H_2PO_4^- absorption by six kinds of aquatic vegetables

和金花菜的 $I_{\max}$ 和 K_m 相对较大,适宜处理 H_2PO_4^- 浓度较高的污水;芋头具有较低的 $I_{\max}$ 和较大的 K_m ,说明芋头对 H_2PO_4^- 的吸收能力较弱。各种植物都可去除污染水体总的氮、磷营养元素,且可以用于生产时可取得良好的经济、环境和社会效益。

表 1 6 种蔬菜型湿地植物吸收 H_2PO_4^- 的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of H_2PO_4^- absorption by six kinds of aquatic vegetables

植物	离子消耗曲线方程	$K_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$I_{\max}/(\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1})$
生菜	$y = 0.004\ 0x^2 - 0.123\ 4x + 2.114$	1.399 8	28.21
金花菜	$y = 0.002\ 3x^2 - 0.084\ 7x + 2.125$	1.540 9	36.61
空心菜	$y = 0.001\ 7x^2 - 0.120\ 8x + 2.083$	0.473 6	81.21
雪里蕻	$y = 0.000\ 5x^2 - 0.043\ 0x + 2.134$	1.440 5	20.36
芋头	$y = 0.002\ 3x^2 - 0.079\ 5x + 2.128$	1.612 3	3.06
韭菜	$y = 0.008\ 1x^2 - 0.164\ 1x + 2.155$	1.531 2	74.60

2.2 蔬菜型湿地植物吸收 NO_3^- -N 的动力学特性

6 种湿地供试植物吸收液中 NO_3^- -N 浓度随吸收时间变化情况如图 2 所示,可知随着吸收时间的延长,植物对 NO_3^- -N 的吸收逐渐减缓,雪里蕻在前 6 h 内对硝态氮的吸收尤其缓慢,空心菜在 8 h 时浓度突然变高,可能是一些误差导致而成。表 2 是各植物对硝态氮吸收的动力学参数。6 种植物吸收 NO_3^- -N 的最大速率 $I_{\max}$ 介于 $22.03 \sim 818.29\ \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以根干质量计)之间,亲和力常数 K_m 介于 $15.102\ 7 \sim 16.717\ 6\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。

从表 2 可知,最大吸收速率 $I_{\max}$ 在不同植物中的差异为:空心菜 > 韭菜 > 雪里蕻 > 生菜 > 金花菜 > 芋头,其中空心菜 $I_{\max}$ 值分别是韭菜、雪里蕻、生菜、金花菜、芋头 $I_{\max}$ 值的 1.91、2.07、3.12、3.13 和 37.14 倍;而亲和力常数 K_m 的差异为韭菜 > 芋头 > 生菜 > 金花菜 > 雪里蕻 > 空心菜,韭菜和芋头的 K_m 值无显著差异 ($P > 0.05$),生菜、金花菜、雪里蕻和空心菜的 K_m 值无显著差异 ($P > 0.05$)。对于 NO_3^- -N 的吸收,空心菜依然具有最大的 $I_{\max}$ 和最小的 K_m ,对 NO_3^- -N 的吸收能力最强,适宜各种 NO_3^- -N 浓度水平的污染水体;韭菜与雪里蕻的 $I_{\max}$ 大于生菜和金花菜,而 K_m 值小于这 2 种植物,说明韭菜与雪里蕻比较适合于修复 NO_3^- -N 污染浓度较高的水体,生

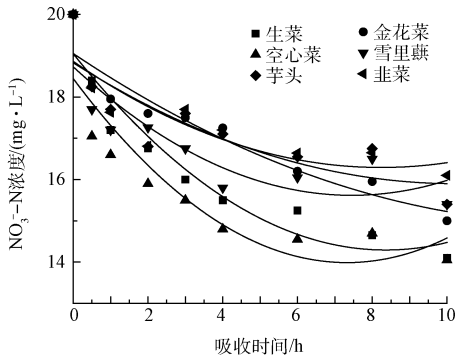


图 2 6 种蔬菜型湿地植物对 NO_3^- -N 吸收的动力学曲线

Fig. 2 Kinetic curves of NO_3^- -N absorption by six kinds of aquatic vegetables

表 2 6 种蔬菜型湿地植物吸收 NO_3^- -N 的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of NO_3^- -N absorption by six kinds of aquatic vegetables

植物	离子消耗曲线方程	$K_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$I_{\max}/(\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1})$
生菜	$y = 0.088\ 0x^2 - 1.147\ 5x + 19.048$	16.242 3	261.29
金花菜	$y = 0.022\ 3x^2 - 0.605\ 8x + 19.052$	15.965 8	261.97
空心菜	$y = 0.083\ 1x^2 - 1.217\ 2x + 18.446$	15.102 7	818.29
雪里蕻	$y = 0.046\ 1x^2 - 0.834\ 9x + 18.730$	15.895 0	395.22
芋头	$y = 0.027\ 9x^2 - 0.572\ 1x + 18.828$	16.628 7	22.03
韭菜	$y = 0.077\ 9x^2 - 0.943\ 8x + 18.862$	16.717 6	429.00

菜和金花菜具有在 NO_3^- -N 浓度相对较低的污染水体环境中吸收该离子的能力; $I_{\max}$ 较低而 K_m 较大的芋头,对 NO_3^- -N 的吸收能力较弱,相比其他几种植物,不适宜作为湿地植物。

实验研究的 6 种植物对 NO_3^- -N 的吸收动力学与其他植物也存在差异。陈国元等^[24]对黄菖蒲和狭叶香蒲根系对氮、磷的吸收动力学研究表明,黄菖蒲和香蒲的 $I_{\max}$ 和 K_m 值分别是 $574、826\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (干质量)和 $24.16、19.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。胡绵好等^[25]研究水芹和豆瓣菜对 NO_3^- -N 的吸收动力学表明,其 $I_{\max}$ 和 K_m 值分别是 $0.23、0.14\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以 FW 计)和 $0.035、1.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由此可知,狭叶香蒲对 NO_3^- -N 的吸收效果最好,其次是空心菜、黄菖蒲、水芹、生菜等。对比 K_m 值发现,空心菜最小,水芹和豆瓣菜对低浓度 NO_3^- -N 溶液有较好的吸收能力。尽管大型景观植物有最大吸收速率,但是 K_m 值也相对较大,因此比较适合污染浓度较高污染水体。

2.3 蔬菜型湿地植物吸收 NH_4^+ -N 的动力学特性

不同湿地植物对营养液中铵态氮的吸收动力学曲线见图 3,表 3 为其吸收动力学参数。从表 3 的数据可以得知,6 种植物吸收对 NH_4^+ -N 的最大速率 $I_{\max}$ 介于 $23.49\sim706.82\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以根干质量计)之间,范围较广,亲和力常数 K_m 介于 $8.036\text{ }\sim13.567\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

最大吸收速率 $I_{\max}$ 在不同植物中的差异为:空心菜 > 金花菜 > 韭菜 > 雪里蕻 > 生菜 > 芋头,空心菜的 $I_{\max}$ 分别是金花菜、韭菜、雪里蕻、生菜和芋头的 2.13、2.87、3.85、4.34 和 30.09 倍;而亲和力常数 K_m 的差异为:雪里蕻 > 芋头 > 金花菜 > 韭菜 > 生菜 > 空心菜,金花菜和韭菜的 K_m 值无显著差异 ($P>0.05$),生菜、金花菜、空心菜和芋头的 K_m 值具有显著差异 ($P<0.05$)。空心菜具有较大的 $I_{\max}$ 和最小的 K_m ,对污水中的铵态氮来说,高低浓度都能适用;金花菜和韭菜的 $I_{\max}$ 相对雪里蕻和生菜较大,而生菜和韭菜的 K_m 值比金花菜和雪里蕻小,因此金花菜和韭菜适用于高 NH_4^+ -N 水平的污水,雪里蕻其次,生菜对低 NH_4^+ -N 水平的污水吸收效果较好;芋头 $I_{\max}$ 低, K_m 值大,作为水体修复植物,去污效果弱,不建议采用。胡绵好等^[25]的研究结果表明,水芹和豆瓣菜对 NH_4^+ -N 的动力学吸收,其 $I_{\max}$ 和 K_m 值分别是 $0.44、0.19\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以 FW 计)和 $0.097、0.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;张亚娟等^[5]的研究结果表明,蕹菜(空心菜) NH_4^+ -N 动力学吸收的 $I_{\max}$ 和 K_m 值分别是 $30.27\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以 FW 计)和 $5.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与实验中各植物对 NH_4^+ -N 吸收动力学常数相比,以上学者得出的 K_m 值均小于笔者实验结果, $I_{\max}$ 值存在较大差异的原因是采取的处理措施不同。单从去除效果考虑,比较而言,空心菜、水芹、金花菜、豆瓣菜、韭菜、生菜作为湿地植物比较可取。

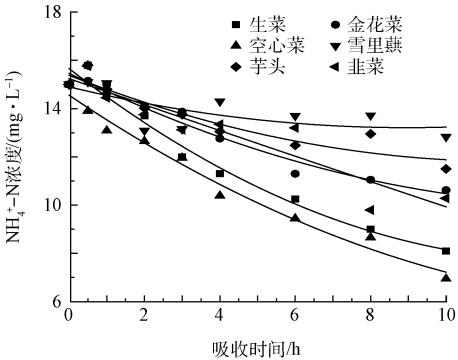


图 3 6 种蔬菜型湿地植物对 NH_4^+ -N 吸收的动力学曲线
Fig. 3 Kinetic curves of NH_4^+ -N absorption by six kinds of aquatic vegetables

表 3 6 种蔬菜型湿地植物吸收 NH_4^+ -N 的动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of NH_4^+ -N absorption by six kinds of aquatic vegetables

植物	离子消耗曲线方程	$K_m/(mg\cdot L^{-1})$	$I_{\max}/(\mu g\cdot (g\cdot h)^{-1})$
生菜	$y=0.051\ 3x^2-1.212\ 8x+15.658$	10.281 8	162.71
金花菜	$y=0.026\ 87x^2-0.767\ 3x+15.460$	11.356 7	331.81
空心菜	$y=0.031\ 84x^2-1.051\ 4x+14.555$	8.036 7	706.82
雪里蕻	$y=0.021\ 05x^2-0.387\ 4x+14.901$	13.567 8	183.38
芋头	$y=0.026\ 03x^2-0.610\ 1x+15.378$	12.693 8	23.49
韭菜	$y=0.001\ 21x^2-0.541\ 7x+15.239$	10.691 8	246.23

3 蔬菜安全性评价

由于我国经济的不断增长,百姓的生活水平提高,而当下存在各种食品安全隐患,人们对各类食物的食用安全性十分的重视。用于富营养化水体净化的蔬菜,吸收水体中的营养物质的同时也对水体中的重金属具有富集作用,人们对其安全食用更是抱有怀疑的态度;因此对人工湿地种植的蔬菜进行卫生检测十分必要,而无公害蔬菜和水果类的检测项目主要包括 2 大类:一类是铬、镉、汞、砷、铅、铜等重金属;另一大类则是六六六、DDT、乐果等农药。另外,也有氯、氟等化学元素和大肠杆菌、沙门氏菌等细菌学指标等,本次实验考虑重金属元素的吸收富集作用。

将用于离子吸收动力学实验的 6 种蔬菜按季节性配置(夏秋种植空心菜、芋头、雪里蕻;冬季气温较低,选择耐寒、温度适应范围较广的金花菜、韭菜,春末种植生菜)种植于无锡分校人工湿地中,收获季节,将每种植物采集并做预处理。植物收割时选取种植同种植物的 3 条槽子前中后位置处的植物,取的均是植物地上可食部分并将 3 条槽子的植物混合。收割好的蔬菜用自来水清洗后用去离子水再清洗 3 遍,洗净风干后,大块蔬菜剪切成小段,用大号信封纸装好置于烘箱中,105 ℃ 杀菌 0.5 h,再把温度调至 70 ℃ 烘 48 h 至恒重后,烘干的样品用黄城高速多功能粉碎机打碎成粉装入封口袋中备用,简称蔬菜干样。将蔬菜干样送检,检测项目和检测方法见表 4,检测结果见表 5。

主要检测仪器:PB303-E 电子天平,HP5890 气相色谱仪,AFS-230a 双道原子荧光光度计,V-640 原子吸收分光光度计。

表 4 蔬菜安全性检测项目
Table 4 Vegetable safety testing items

项目	测定方法
铅(Pb)	GB 5009. 12-2010(食品中总铅的测定方法)
砷(As)	GB/T 5009. 11-2003(食品中总砷的测定方法)
铬(Cr)	GB/T 5009. 123-2003(食品中总铬的测定方法)
铜(Cu)	GB/T 5009. 13-2003(食品中总铜的测定方法)
镉(Cd)	GB/T 5009. 15-2003(食品中总镉的测定方法)
汞(Hg)	GB/T 5009. 17-2003(食品中总汞的测定方法)

表 5 检测结果
Table 5 Testing result

蔬菜名称	铅(Pb)	砷(As)	铬(Cr)	铜(Cu)	镉(Cd)	汞(Hg)
生菜	0.080	0.024	0.144	0.241	<0.004	0.010
金花菜	0.159	0.068	0.672	0.876	<0.010	0.021
空心菜	0.016	0.020	0.105	0.142	<0.003	0.012
雪里蕻	0.055	0.021	0.162	0.235	<0.004	0.010
芋头(球茎)	0.003	0.011	0.032	0.086	<0.004	0.003
韭菜	0.167	0.029	0.017	0.331	<0.007	0.008
叶菜类(GB 15201-1994)	0.3	0.05	0.5	10	0.2	0.01
球茎类(GB 15201-1994)	0.3	0.05	0.5	10	0.1	0.01

从表 5 中可以明显看出,各蔬菜中重金属铜和镉的含量都远远低于国标限量值,水培金花菜的砷、铬、汞含量分别是国标值的 1.36、1.34 和 2.1 倍,水培空心菜的汞含量略微超出食用安全标准值。其余蔬菜重金属含量都低于国标限量值,这可能跟植物的特性有关,不同植物对重金属的喜好程度不同。

4 讨论

从表 1~表 3 的动力学参数变化可知,植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率最大,对 H_2PO_4^- 的亲合力常数较小,所以当水体中氮、磷浓度较低时,优先选择吸收磷,但对铵态氮的吸收速率最快。6 种湿地植物对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的亲合力、最大吸收速率存在明显的差异,共同点是植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的亲合力大于对

NO_3^- -N 的亲合力 ($K_m(\text{NH}_4^+-\text{N}) > K_m(\text{NO}_3^--\text{N})$), 这可以说明 6 种植物对 NH_4^+-N 具有优先吸附的趋势。这和周晓红等^[26]对空心菜的研究, 孙敏等^[27]对小麦的研究和沈根祥等^[28]对浮萍的研究结果一致。

通过植物对氮、磷的动力学吸收实验得出不同植物的最大吸收速率 $I_{\max}$ 和亲和力常数 K_m , 可知不同植物对氮、磷的吸收速率和不同浓度下的亲和力程度是不同的。空心菜和芋头分别拥有最大的 $I_{\max}$ 和最小的 $I_{\max}$ 值, 芋头不适合种植于潜流湿地中; 因此可以考虑在复合人工湿地中, 水生蔬菜滤床中种植芋头而潜流湿地中种植空心菜; 韭菜对高浓度污水的吸收能力较强而生菜尽管根系发达且能提供良好的好氧环境, 但其比较适应低浓度污水, 因此可以将两者结合搭配到组合人工湿地中; 金花菜和雪里蕻对氮、磷的最大吸收速率处于中间阶段, 两者搭配可提高湿地系统的处理效果。

对 6 种湿地中的蔬菜进行重金属项目检测, 从实验结果可知, 金花菜 As、Cr 和 Hg 超标, 空心菜 Hg 含量略微超标, 分析原因, 金花菜属叶菜类, 一般 25 ~ 30 d 可采摘, 采收周期较短, 使重金属富集渠道更加通畅, 空心菜有庞大的根系系统, 吸收吸附能力均较强, 对水体中的重元素元素也有一定的积累; 另可能是原水中汞、砷和铬的含量较高, 实验进水水来源于东南大学无锡分校污水管网, 包含实验室化验水 (COD 实验)、生活污水及创业园区的排水, 其中重金属汞、砷和铬的含量相对较高, 水质情况比一般富营养化水体较为复杂。因此, 选用金花菜作为湿地植物时, 考虑食用安全性问题, 需考虑具体水质指标, 慎重选用。

在实际运行中, 温度对湿地运行的影响很大, 主要影响植物生长、微生物活性等方面。若不考虑季节性变化种植蔬菜, 在冬季低温时, 蔬菜可能会枯萎或进入休眠状态, 在生态和形态上都会发生变化, 从而影响水体净化效率。因此, 冬季种植蔬菜可考虑以下几点: 1) 选用耐寒耐冻的蔬菜品种, 如文中提到的雪里蕻、金花菜等; 2) 采取人工曝气、预处理、延长水力停留时间、回流等措施, 优化蔬菜生境; 3) 对于方便整体做保温隔离的湿地, 可做大棚、地膜等保温结构。

5 结论

1) 实验结果和分析表明, 所选水生植物对氮、磷的吸收特性分别存在一定的差异。通过对 6 种植物吸收氮、磷的最大吸收速率 $I_{\max}$ 和亲和力常数 K_m 的比较可知: 空心菜适合处理任何氮、磷浓度的尾水; 雪里蕻适合低磷浓度高硝态氮浓度的尾水; 生菜适合处理氮、磷浓度较低的尾水; 金花菜比较适合尾水中磷和铵态氮浓度高、硝态氮浓度较低的尾水; 韭菜比较适合氮、磷浓度都较高的尾水; 芋头对氮、磷的吸收都较差, 根据其生长特性, 芋头不适宜作为潜流人工湿地植物。

2) 分析吸收动力学参数 $I_{\max}$ 和 K_m 的意义可知, 对于含低浓度氮、磷的尾水, 亲和力常数 K_m 意义更为重要, 可作为工程应用中筛选植物的指标之一, 因此生菜很适合作为人工湿地植物, 对氮、磷的去除都较好。

3) 离子动力学吸收的研究对工程应用中对植物筛选和搭配具有重要意义。在水体修复的前期, 可以选择吸收速率大, 亲和力常数小的植物作为先锋植物来处理高浓度污水, 如空心菜、韭菜等, 等水体水质得到一定的改善时, 可以选择去污能力低的植物, 如生菜、雪里蕻等进行水体水质的维持和提高。

4) 从食用安全性角度考虑, 实验用的 6 种蔬菜, 除金花菜对 As、Cr 和 Hg 重金属的吸收富集量较大, 作为水体净化蔬菜时, 需根据水体富营养化程度慎重选用, 其他 5 种均可用于水体生态修复并具有食用性。

参考文献

- [1] HEALY M G, RODGERS M, MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(12): 2268-2281
- [2] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 低温季节水生植物对污染水体的净化效果研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 159-162
- [3] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1351-1353
- [4] 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2000(1): 99-102

- [5] 余勤, 邝炎华. 根系养分吸收动力学研究及应用[J]. 华南农业大学学报, 1997, 18(2): 105-110
- [6] 童依平, 李继云, 李振声. 不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究Ⅲ: 影响利用效率的因素分析[J]. 西北植物学报, 1999, 19(4): 598-604
- [7] 周焱, 罗安程. 有机肥处理对小麦根系生长、活力和磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(3): 243-248
- [8] 魏朝富, 谢德体, 郭碧花, 等. 酸性水稻土上水稻对硅、钾、钙、镁的吸收及其动力学研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 452-457
- [9] 郭碧花. 水稻对硅、钾、钙、镁的吸收动力学研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 396-401
- [10] 张志勇, 王刚卫, 田晓莉, 等. 棉花钾吸收动力学的初步研究和应用[J]. 棉花学报, 2005, 17(3): 165-170
- [11] WEN Zhiyou, ZHONG Jianjiang. Effects of initial phosphate concentration on physiological aspects of suspension cultures of rice cells: A kinetic study[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1997, 83(4): 381-385
- [12] YANG Tianyi, ZHU Li'na, WANG Shiping, et al. Nitrate uptake kinetics of grapevine under root restriction[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 111(4): 358-364
- [13] 尹力初, 张杨珠, 周卫军, 等. 婆婆纳、离子草与小花糖芥三种麦田杂草吸收 NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ 的动力学研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 68-71
- [14] 蔡树美, 刘文桃, 张震, 等. 不同品种浮萍磷素吸收动力学特征[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(2): 48-52
- [15] 刘锋, 黎明, 李洪林, 等. 不同营养条件下竹叶眼子菜 NH_4^+ -N 吸收动力学的初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(1): 98-101
- [16] 张亚娟, 刘存歧, 李洪波, 等. 蕹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(5): 1057-1061
- [17] 金春华, 陆开宏, 胡智勇, 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
- [18] 常会庆, 李娜, 徐晓峰. 三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 511-514
- [19] 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, 1(2): 11-17
- [20] CLAASSEN N, BARBER S A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants[J]. Plant Physiology, 1974, 54(4): 564-568
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [23] CACCO G, FERRARI C, SACCOMANI M. Pattern of sulfate uptake during root elongation in maize: Its correlation with productivity[J]. Physiologia Plantarum, 1980, 48(3): 375-378
- [24] 陈国元, 李国新, 唐凯. 黄菖蒲和狭叶香蒲根系对氮磷的吸收动力学[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 4638-4642
- [25] 胡绵好, 袁菊红, 向律成, 等. 富营养化水体中水生植物氮代谢酶特性与不同形态氮去除的关系[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1489-1494
- [26] 周晓红, 王国祥, 杨飞, 等. 空心菜对不同形态氮吸收动力学特性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 84-87
- [27] 孙敏, 郭文善, 朱新开, 等. 不同氮效率小麦品种苗期根系的 NO_3^- 、 NH_4^+ 吸收动力学特征[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 84-87
- [28] 沈根祥, 姚芳, 胡宏, 等. 浮萍吸收不同形态氮的动力学特性研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 505-508