

生态浮床中植物和基质 对氮、磷的去除特性

冯春翰¹, 臧吴琪², 杨林军²

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019;
2. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为研究不同植物和基质对水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的去除特性, 从而选取最佳材料构建生态浮床, 实验拟合计算常绿鳶尾、水竹、黄菖蒲、灯芯草等4种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸收动力学特性, 研究砾石、蛭石、绿沸石、海绵铁等4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的等温吸附及动力学吸附特性。结果表明: 黄菖蒲对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸收效果最好, 适合应用于生态浮床中; 绿沸石和海绵铁对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附效果最佳, 适合作为浮床基质。

关键词: 水生植物; 基质; $\text{NH}_3\text{-N}$; TP

中图分类号: X52

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)02-0027-0007

Removal characteristics of nitrogen and phosphorus by hydrophyte and filler in ecological floating bed

FENG Chunhan¹, ZANG Wuqi², YANG Linjun²

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study the removal characteristics of ammonia nitrogen and total phosphorus (TP) from water bodies by different plants and filler, so as to select the best material to build ecological floating bed, the absorption kinetics characteristic of ammonia nitrogen and TP in iris tectorum, phyllostachys heteroclada, iris pseudacorus and juncus effuses were calculated, and the isothermal adsorption and kinetic adsorption characteristics of ammonia nitrogen and TP of gravel, vermiculite, zeolite and sponge iron were studied. The results show that iris pseudacorus is suitable for ecological floating bed for its best absorption of ammonia nitrogen and TP; As floating bed filler, zeolite and sponge iron has the best adsorption effect on ammonia nitrogen and TP, respectively.

Key words: hydrophyte; filler; ammonia nitrogen; total phosphorus

生态浮床是一种主要利用植物水培技术的生态治理系统, 具有绿色经济、管理方便、不额外占用土地等优势, 自20世纪70年代德国利用生态浮床净化水体后, 浮床系统逐渐在亚洲、美国、欧洲和澳大利亚等地被广泛用于处理富营养化湖泊和河

水。漂浮床体、植物、基质是生态浮床的主要组成部分^[1], 而植物吸收、基质吸附能力对生态浮床净水效果起到重要的作用, 植物和基质的种类选择对构建适宜的生态浮床系统至关重要。

米氏学说是关于植物根系吸收能力及机理判

收稿日期: 2022-08-02

作者简介: 冯春翰(1989—), 男, 本科, 主要从事水环境综合治理研究工作。E-mail: 1795131320@qq.com

断的理论基础,可以此为依据进行筛选吸收效果最佳植物^[2];等温吸附和吸附动力学则起到考察基质的吸附性能作用。因此,本研究选取常绿鸢尾(*Iris tectorum*)、水竹(*Phyllostachys heteroclada*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、灯芯草(*Juncus effuses*)4种植物进行吸附动力学实验,计算其对NH₃-N、TP的最大吸收速率(I_{\max})和米氏常数(K_m),探讨其对污染物的吸附能力及适应能力;选取砾石、蛭石、绿沸石和海绵铁4种基质,利用等温吸附和吸附动力学实验分析其对NH₃-N、TP的去除效果,为生态浮床系统科学选取最佳植物和基质提供理论依据。

1 实验与方法

1.1 实验材料

本文选取的植物有常绿鸢尾、水竹、黄菖蒲、灯芯草;选取的基质材料为砾石($\Phi 5\sim 8$ mm)、蛭石($\Phi 3\sim 6$ mm)、绿沸石($\Phi 1\sim 3$ mm)和海绵铁($\Phi 1\sim 3$ mm);基质用去离子水浸泡洗净、烘干备用。

植物放在人工培养箱中进行水培和实验。人工光照培养箱运行参数为光照时间(h):黑暗时间(h)=14:10;光照、黑暗时温度分别为25℃、20℃;光照强度为3 000勒克斯(Lx);湿度70%~80%。实验前植物定植于装有0.6 L营养液的烧杯中培养驯化,烧杯四周贴上黑色不透光锡纸,避免光照下营养液中滋生藻类,同时及时清理腐败的根、叶。

1.2 实验方法

1.2.1 水生植物动力学吸附特性研究

实验前对植株进行饥饿处理,消除自由空间中残留的氮磷元素对实验的影响。饥饿处理的步骤是:用去离子水将植物根部冲洗干净转入0.1 mmol硫酸钙溶液中饥饿培养3 d。之后进行植物静态吸附实验,步骤为:分别在0 h、1 h、2 h、3 h、5 h、8 h、10 h、24 h、48 h、72 h、96 h时取水样来检测NH₃-N、TP质量浓度,每次取完水样后便及时补充相同水量的去离子水,每组数据检测3次。试验结束后立即取出植株,并用去离子水冲洗干净,剪下根部放入烘箱中烘至恒重,称量根的干重。

1.2.2 基质等温吸附实验

5 g基质装入锥形瓶中,加入100 mL溶液;5组氮磷溶液浓度分别为NH₃-N:5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L;TP:2 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L;锥形瓶置于恒温摇床中,于25℃、125 r/min条件下振荡48 h后进行取样,经0.45 μm滤膜过滤后检测NH₃-N、TP质量浓度,每组数据检测3次。

测3次。

1.2.3 基质吸附动力学实验

5 g基质装入锥形瓶中,加入100 mL NH₃-N为20 mg/L、TP质量浓度为5 mg/L的溶液(加2~3滴氯仿溶液)。将锥形瓶置于恒温摇床中,于25℃、125 r/min条件下振荡,分别在0.5 h、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、36 h、48 h时取样,经0.45 μm滤膜过滤后检测NH₃-N、TP质量浓度,每组数据检测3次。

1.3 计算公式

1.3.1 离子吸附动力学方程

离子消耗曲线方程:

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

式中: x 为吸附时间,h; y 为处理离子质量浓度,mg/L。

对方程(1)求负导数,得浓度变化速率方程:

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

对方程(2),使 x 趋于0,则 $y' = -b$ 即为浓度最大变化速率,由此可得到最大吸收速率 I_{\max} 为

$$I_{\max} = \frac{-bV}{W} \quad (3)$$

式中: V 为吸附试验加入的溶液体积,L; W 为根干重。

将 $y' = -b/2$ 带入方程(2)中可求出 x 值,将该值带入方程(1)所得的值即为 K_m (米氏常数,即植株吸收离子速率一半时的溶液中离子的浓度), K_m 越小,表明植物对NH₃-N的亲合力越大。

公式中 I_{\max} 高、 K_m 低表示植物适应广泛的营养条件; I_{\max} 、 K_m 均高时,表明植物适应在高浓度营养物质水体生存;当具有低 I_{\max} 和低 K_m 时,植物更适宜低浓度营养条件;而低 I_{\max} 和高 K_m 表明此类植物在任意浓度营养条件下都不适宜^[3]。

1.3.2 等温吸附方程

利用Langmuir和Freundlich等温吸附方程进行等温吸附拟合。

$$q_e = \frac{q_m K_L c_e}{1 + K_L c_e} \quad (4)$$

$$q_e = K_F c_e^{1/n} \quad (5)$$

式中: q_e 为污染物的平衡吸附量,mg/g; q_m 为污染物的最大吸附量,mg/g; K_L 为Langmuir吸附常数,L/mg; c_e 为污染物的平衡质量浓度,mg/L; K_F 为Freundlich吸附常数,mg^{1-1/n} L^{1/n}/g; $1/n$ 为异质因子。

1.3.3 动力学方程

利用准一级和准二级吸附动力学方程^[4]进行基质吸附NH₃-N、TP的动力学分析。

$$q_t = q_e \times (1 - e^{-k_1 t}) \quad (6)$$

$$t/q_t = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

式中: q_t 为 t 时刻污染物的吸附量,mg/g; k_1 为一级动力学吸附速率常数, h^{-1} ; t 为吸附时间,h; q_{e1} 为一级动力学平衡吸附量拟合值,mg/g; q_{e2} 为准二级动力学平衡吸附量拟合值,mg/g; k_2 为准二级动力学吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 。

1.4 检测指标与方法

检测的指标为进出水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP质量浓度;采用纳氏试剂分光光度法测定 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度、过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定TP质量浓度。利用Excel 2016、Origin 2020进行数据处理与分析。

2 结果与讨论

2.1 植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附动力学特性

4种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附动力学特性结果如图1(a)、1(b)所示。黄菖蒲和水竹组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度下降速度较快,水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在

72 h左右趋近0;常绿鸢尾和灯芯草组中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的降低趋近线性变化。黄菖蒲、常绿鸢尾对TP的吸附曲线下降最为明显,分别在24 h、48 h内对TP的去除率达到50%以上;灯芯草和水竹对TP的吸收能力逊于黄菖蒲和常绿鸢尾,吸附时间在100 h左右时对TP的吸收效率才达35%左右。

表1和表2为各植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附动力学参数计算结果。4种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 I_{max} 由大到小排序为黄菖蒲>水竹>灯芯草>常绿鸢尾,亲和力由大到小为常绿鸢尾>水竹>黄菖蒲>灯芯草。黄菖蒲对TP的最大吸附效率分别是常绿鸢尾、灯芯草、水竹的1.46、4.39、6.23倍左右,差异显著($P<0.05$);亲和力由大到小为常绿鸢尾>黄菖蒲>灯芯草>水竹。故对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 来说,黄菖蒲具有最高 I_{max} 和较高 K_m ,适应高浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染水体;常绿鸢尾具有最低 I_{max} 和最小 K_m ,适应低浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染水

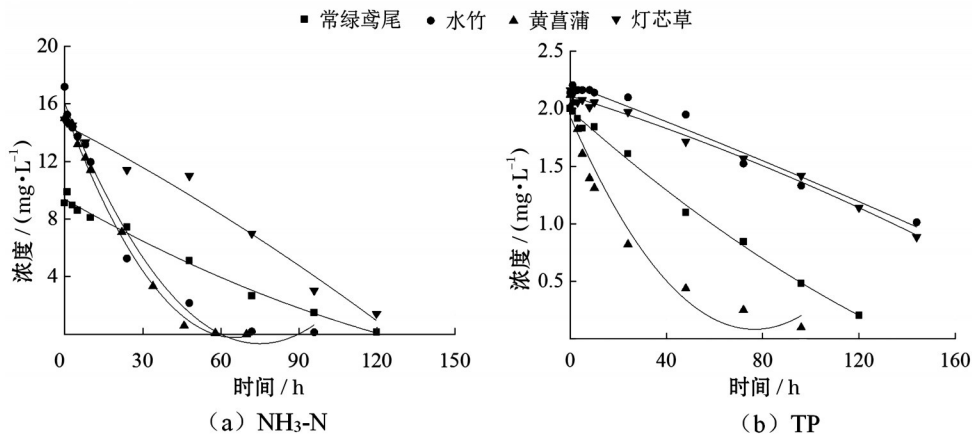


图1 植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附动力学拟合曲线

表1 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附动力学方程参数拟合结果

植物	离子吸附动力学方程	根干重/g	$I_{\text{max}}/[\mu\text{g}(\text{gh})^{-1}]$	$K_m/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
常绿鸢尾	$y=2.16\times10^{-4}x^2-0.104x+9.389$	0.368	169.097	0.089
水竹	$y=2.97\times10^{-3}x^2-0.445x+16.040$	0.639	417.869	3.533
黄菖蒲	$y=3.68\times10^{-3}x^2-0.483x+15.592$	0.626	462.843	3.711
灯芯草	$y=-1.64\times10^{-4}x^2-0.094x+14.546$	0.377	149.323	24.608

表2 TP吸附动力学方程参数拟合结果

植物	离子吸附动力学方程	根干重/g	$I_{\text{max}}/[\mu\text{g}(\text{gh})^{-1}]$	$K_m/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
常绿鸢尾	$y=4.47\times10^{-5}x^2-0.019x+1.990$	0.368	31.714	0.406
水竹	$y=-4.85\times10^{-6}x^2-0.008x+2.211$	0.639	7.417	4.625
黄菖蒲	$y=3.15\times10^{-4}x^2-0.048x+1.929$	0.626	46.198	0.546
灯芯草	$y=-1.27\times10^{-5}x^2-0.007x+2.111$	0.377	10.518	2.753

体;灯芯草具有较低 I_{\max} 和最大 K_m ,不适宜栽种于生态浮床中用以去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。对于TP来说,黄菖蒲具有最高 I_{\max} 和最小 K_m ,黄菖蒲适应广泛浓度的TP污染水体;而水竹的 I_{\max} 最小, K_m 最大,因此最不宜栽种于生态浮床中用于去除TP。综合考虑 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的 I_{\max} 值和 K_m 值,黄菖蒲是作为生态浮床植物的最佳选择。

其次由表1、表2中吸附动力学参数的计算结果可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸收效率(I_{\max})均远高于TP。高雪梅等^[5]动力学吸附实验计算显示13种水生植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 I_{\max} 均远远大于对TP的 I_{\max} ;韩璐瑶等^[6]研究6种蔬菜吸附氮磷动力学结果亦显示, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、硝态氮的 I_{\max} 是TP的10倍左右。这可能是因为氮素是水生植物最先吸收的营养物质。

2.2 基质的等温吸附特性

2.2.1 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等温吸附

图2(a)和图2(b)分别是4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的Langmuir、Freundlich等温吸附曲线图。由图2可以看出,绿沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附量最大,砾石与之较为接近,蛭石与海绵铁吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的能力与绿沸石、砾石存在一定差距。

Langmuir 和 Freundlich 方程的拟合结果如表3

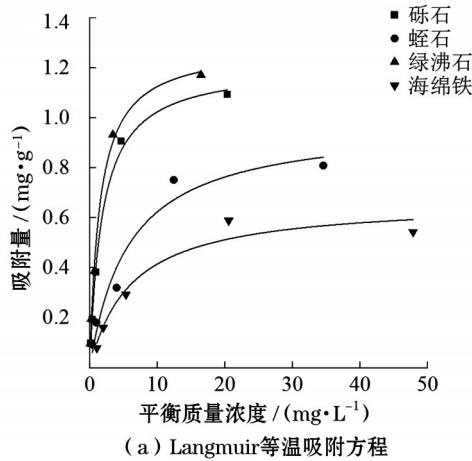


图2 4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的等温吸附曲线

表3 4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的等温吸附模型参数

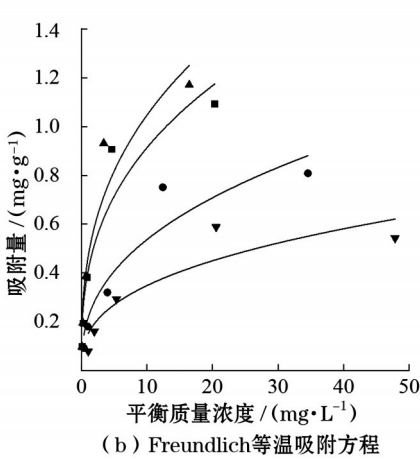
基质	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2	$K_F / (\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{g}^{-1})$	$1/n$	R^2
砾石	1.212	0.543	0.996	0.403	0.355	0.913
蛭石	0.983	0.173	0.962	0.214	0.400	0.910
绿沸石	1.290	0.682	0.998	0.460	0.357	0.916
海绵铁	0.668	0.164	0.958	0.149	0.370	0.851

所示。 R^2 数据显示,Langmuir 方程对基质等温吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的拟合效果更佳。绿沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的最大吸附量最高,达 1.290 mg/g ,参数 k_L 值越大,表明吸附的更牢固紧密,后续不容易脱附析出^[7],4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附牢固程度由大到小分别是:绿沸石、砾石、蛭石、海绵铁,绿沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附效果最佳。李俊义等^[8]发现,比表面积越大的沸石,平均吸附和解吸孔径越小,越容易留住铵离子,所以吸附的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量越多。一般认为, $1/n < 0.5$ 表明吸附质极易被吸附,4种基质的 $1/n$ 值由大到小依次为蛭石>海绵铁>绿沸石>砾石,均小于0.5,表明4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附能力均较强。综合实验结果和等温吸附方程拟合结果,可以看出4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附能力由强到弱顺序为绿沸石、砾石、蛭石、海绵铁。

2.2.2 TP等温吸附

图3(a)和图3(b)分别是4种基质对TP的Langmuir、Freundlich等温吸附曲线图。由图3看出海绵铁吸附的TP量最多,对TP的吸附能力最强;蛭石对TP的吸附能力最弱。相较而言,绿沸石和海绵铁对TP的吸附效果远优于砾石和蛭石。

Langmuir 和 Freundlich 方程的拟合结果如表4



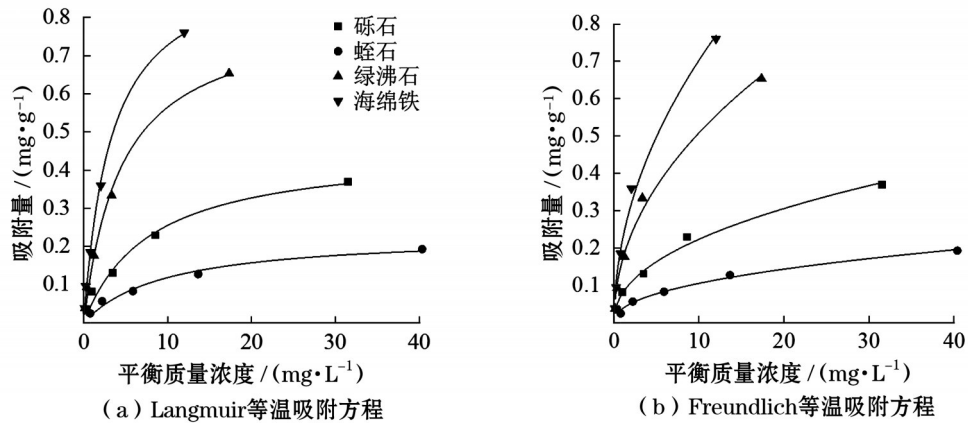


图3 4种基质对TP的等温吸附曲线

所示。由 R^2 数据显示,Langmuir方程对基质等温吸附TP的拟合效果更佳。海绵铁对TP的最大吸附量最高,达到0.963 mg/g。天然基质中含有的金属离子可以与水体中磷元素结合发生化学反应,海绵铁含有的金属离子比较丰富,如K、Si、Ca、Na^[9],这可能是海绵铁比其他3种基质吸附的TP更多的原因。由 k_L 值可以看出4种基质对TP吸附牢固程度由大到小分别是海绵铁、绿沸石、砾石、蛭石。4种基质对TP的 $1/n$ 大于 $\text{NH}_3\text{-N}$,表明相较于TP基质更易吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。综合拟合结果,可以看出海绵铁对

TP的最大吸附量、吸附牢固程度最大,具有最大的TP吸附能力,其次为绿沸石、砾石,蛭石对TP的吸附效果整体最差。

2.3 基质的动力学吸附特性

2.3.1 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附动力学

图4(a)和4(b)分别是4种基质的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附准一级和准二级动力学方程拟合图。由表5中拟合结果来看,准二级动力学模型在模拟基质吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 动力学过程上具有更高的精确度,说明基质吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 受化学吸附的影响。准二级动力学模

表4 4种基质对TP的等温吸附模型参数

基质	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_L/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	$K_F/(\text{mg}^{1-1/n}\cdot\text{L}^{1/n}\cdot\text{g}^{-1})$	$1/n$	R^2
砾石	0.456	0.127	0.981	0.079	0.452	0.989
蛭石	0.233	0.103	0.978	0.038	0.444	0.992
绿沸石	0.818	0.223	0.994	0.169	0.478	0.992
海绵铁	0.963	0.309	0.997	0.225	0.496	0.991

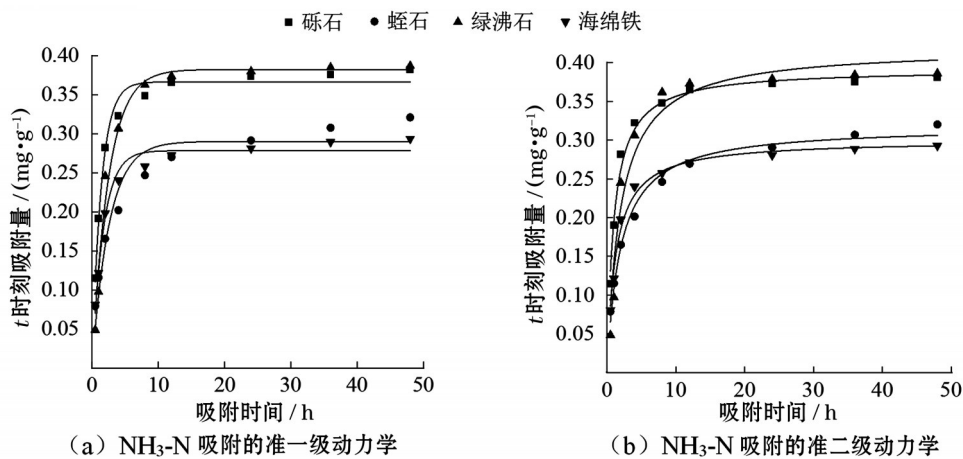
图4 4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吸附的动力学模型拟合

表5 NH₃-N吸附准一级和准二级动力学拟合参数结果

基质	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_{e1}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	k_1/h^{-1}	R^2	$q_{e2}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	R^2
砾石	0.366	0.713	0.983	0.393	2.572	0.988
蛭石	0.290	0.388	0.924	0.319	1.622	0.987
绿沸石	0.382	0.404	0.981	0.420	1.229	0.953
海绵铁	0.278	0.590	0.979	0.301	2.686	0.990

拟得出的平衡吸附量 q_{e2} 比准一级动力学的 q_{e1} 更接近实测平衡吸附量 q_e 。绿沸石的平衡吸附量最大,砾石和海绵铁对NH₃-N的吸附速率较快。综合动力学拟合参数,绿沸石和砾石对NH₃-N的吸附能力较佳。

图5(a)和5(b)分别是4种基质的TP吸附准一级和准二级动力学方程拟合图。由表6中动力学参数拟合结果来看,准二级动力学模型在模拟基质吸附TP动力学过程上具有更高的准确度,同样说明基质吸附TP受化学吸附的影响。4种基质对TP的平衡吸附量(q_{e2})由大到小依次为绿沸石、海绵铁、砾石、蛭石; k_2 显示各基质对TP的吸附速率快慢,基质对TP吸附速率由快到慢依次为海绵铁、砾石、绿沸

石、蛭石。综合考虑 q_{e2} 值和 k_2 值,海绵铁对TP的吸附效果最佳。赵东源等^[10]对沸石、陶粒等基质进行吸附TP动力学分析实验,结果亦显示准二级动力学在模拟含磷污水的平衡吸附量时表现更佳。

综上,绿沸石对NH₃-N的吸附量最多、吸附强度最大;海绵铁对TP的吸附量大、吸附牢固程度最大、吸附速率最快。因此,绿沸石和海绵铁适合作为组合基质用于生态浮床系统中,以保证生态浮床去除水体氮、磷元素。

3 结 语

黄菖蒲适应高浓度NH₃-N、宽范围TP质量浓度的污染水体,其对NH₃-N、TP具有较高的吸收速率

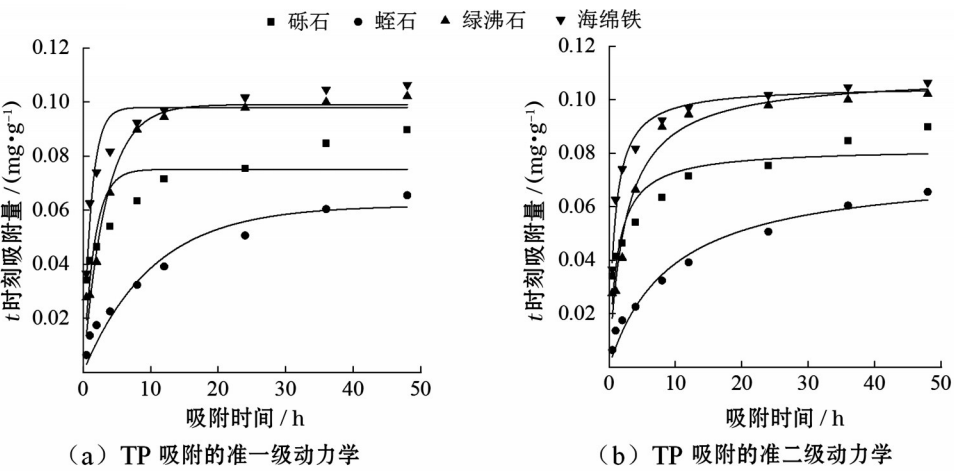


图5 4种基质对TP吸附的准一级和准二级动力学模型拟合

表6 TP吸附准一级和准二级动力学拟合参数结果

基质	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_{e1}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	k_1/h^{-1}	R^2	$q_{e2}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	R^2
砾石	0.075	0.597	0.691	0.082	9.916	0.863
蛭石	0.618	0.098	0.949	0.075	1.449	0.973
绿沸石	0.099	0.299	0.970	0.109	3.664	0.972
海绵铁	0.098	0.839	0.903	0.105	11.212	0.980

和亲和力,适合作为生态浮床植物净化水体。

4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的吸附过程符合Langmuir等温方程和准二级动力学方程,吸附过程为单分子层吸附,受化学吸附的影响。4种基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附效果依次为绿沸石>砾石>蛭石>海绵铁;对TP的吸附效果依次为海绵铁>绿沸石>砾石>蛭石。绿沸石和海绵铁适合作为组合基质应用于生态浮床。

参考文献:

- [1] 崔贺,张欣,董磊.生态浮床技术流域水环境治理中的研究与应用进展[J].净水技术,2021,40(增刊1):343-350.
- [2] 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.
- [3] CACOO G, FERRARI G, SACCOMANI M. Pattern of sulfate uptake during root elongation in maize: its correction with productivity[J]. Physio.Plant, 1980(48):375-378.
- [4] 孙晓旭,徐进,储智强.不同方法改性柚皮制备的活性

炭吸附亚甲基蓝试验[J].河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):536-542.

- [5] 高雪梅,郑洁敏.十三种挺水植物对水体中氮磷吸收动力学比较[J].杭州农业与科技,2012(2):25-30.
- [6] 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.
- [7] 赵东源,张生,赵胜男,等.人工湿地基质组合去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 方案筛选及影响因素的动力学分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):121-126.
- [8] 李俊义,任鹏飞,李振兴,等.从微观检测结果评价沸石吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的效能[J].绿色科技,2021,23(14):119-120.
- [9] WANG W, WANG Y, WEI H, et al. Stability and purification efficiency of composite ecological floating bed with suspended inorganic functional filler in a field study[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020(37): 101482.
- [10] 赵东源,张生,赵胜男,等.基于除磷效果的人工湿地基质组合筛选及影响因素的动力学分析[J].环境污染与防治,2018,40(10):1085-1089,1094.

(上接第21页)

基础设施空间规划、河湖保护规划、现代水网建设规划等对接,深化管控布局研究,细化管控要求与措施,研究提出河湖分级分类空间管控意见,为江苏省河湖空间管控规划提供基础。

参考文献:

- [1] 祖雷鸣.加强河湖水域岸线空间管控 保障河道行洪通畅和河湖功能完好[J].中国水利,2022(7):3-5.

- [2] 兰林,毛媛媛,张颖.基于功能协调与空间管控的河道保护格局研究[J].水利规划与设计,2022(1):9-12,60.
- [3] 尹鑫,沙海飞,张海滨,等.基于分区分类功能的江苏省河湖空间管控框架[J].水资源保护,2020,36(6):86-92.
- [4] 文字立,谢阳村,徐敏,等.构建适应新国土空间规划的流域空间管控体系[J].中国环境管理,2020,12(5):58-64.
- [5] 杨晴,王晓红,张建永,等.水生态空间管控规划的探索[J].中国水利,2017(3):6-9.