

寒旱地区生态沟渠基质去除氨氮和磷最优配比筛选及影响因素

王志超, 王战, 李卫平, 于玲红, 杨文焕, 吕伟祥, 王高强

(内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 基质是生态沟渠的重要组成部分,但在我国北方寒旱地区,由于高寒、降雨少、蒸发强等原因,导致土壤和水体中盐度较高,可供选择的基质种类较少,从而限制了生态沟渠技术在该地区的应用。选取天然沸石、麦饭石、无烟煤、炉渣、废砖块 5 种北方地区常见基质作为试验材料,通过静态吸附试验对选用材料进行氨氮和磷的吸附,并将吸附效果较好的 3 种基质组合成不同比例的生态沟渠基质试样,再次通过筛选试验确定出去除效果最好的基质比例组合,同时研究了温度、pH 和盐度对最优基质组合去除氨氮和磷效果的影响。结果表明:废砖块、天然沸石、炉渣在质量比例为 1:1:3 时对氨氮和磷的去除率最优,均达到 90% 以上。随着温度的升高,氨氮的吸附量降低,磷的吸附量升高。pH 对氨氮和磷的吸附效果有显著的影响,对磷的去除率随着 pH 升高而降低,对氨氮的去除率随着 pH 升高呈现先增后减的趋势,在 pH=7 时,氨氮去除效果最好,去除率为 91.78%。氨氮和磷的去除效果均随着溶液盐度的增加而降低,对磷的吸附效果影响不明显,但对氨氮影响较大,表现为盐度低于 1% 时,溶液中氨氮的去除效果下降幅度并不明显,均在 3% 左右,而当盐度达到 2% 时,氨氮的去除率仅有 68%,比盐度为 0 时的去除率(92%)降低了 24%。

关键词: 生态沟渠; 寒旱地区; 等温吸附; 组合基质; 盐度

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0262-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.038

Selection of the Optimum Ratio Matrix for Removal of Ammonia Nitrogen and Phosphorus in Eco-Ditch and Its Influencing Factors in Cold and Arid Areas

WANG Zhichao, WANG Zhan, LI Weiping, YU Linghong,

YANG Wenhuan, LÜ Weixiang, WANG Gaoqiang

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010)

Abstract: Substrate is an important component of ecological ditches, but its application in ecological ditch have been limited even there are few kinds of it can be employed, as high salinity in soil and water that caused by cold, limited rainfall, and strong evaporation in cold and arid areas in north China. Five kinds of common materials as zeolite, maifanite, anthracite, slag and fragment of waste brick were selected as test materials in this study, and the adsorption characteristics of ammonia nitrogen and phosphorus had been investigated by static adsorption test. Three kinds of substrates with good adsorption effect were combined in different proportions into ecological ditch substrates and matrix proportion combination with the best removal efficiency had been determination. The effects of temperature, pH, and salinity on the removal efficiency of ammonia nitrogen and phosphorus were also studied in the test. The experimental results showed that the removal rate of ammonia nitrogen and phosphorus reached maximum when the matching proportion of fragment of waste brick, zeolite and slag was 1:1:3, and its removal rate of ammonia nitrogen and phosphorus was higher than 90%. With the increase of temperature, adsorption capacity of ammonia nitrogen decreased, while adsorption capacity of phosphorus increased. A significant effect of pH was observed on the adsorption of ammonia nitrogen and phosphorus, the removal rate of phosphorus decreased with increment of pH. However the removal rate of ammonia nitrogen had increase first and then decrease with increment of pH, and the removal rate of was 91.78% when pH was 7. The removal efficiency of ammonia nitrogen and phosphorus decreased with the increment of salinity in solution, the effect of salinity on ammonia nitrogen adsorption was more significant than that of phosphorus. When salinity was less than 1%, the decrease of removal efficiency

收稿日期: 2019-07-18

资助项目: 内蒙古自治区科技创新引导项目(KCJB2018033);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY19132);内蒙古自然科学基金项目(2018LH04002);包头市南海湿地管理处科研项目(NH2018003)

第一作者: 王志超(1988-),男,博士,讲师,主要从事水土环境污染控制与生态修复研究。E-mail:wzc5658@126.com

通信作者: 于玲红(1967-),女,教授,硕士生导师,主要从事水污染控制与生态修复研究。E-mail:ylh0730@163.com

of ammonia nitrogen in solution was not obvious, removal rate of ammonia nitrogen and phosphorus was about 3%. The removal rate of ammonia nitrogen was only 68% when salinity was 2%, of which have decreased by 24% compared with its removal rate was 92% when salinity was 0.

Keywords: ecological ditches; cold and arid areas; isothermal adsorption; composite matrix; salinity

近年来,随着城镇化进程的加快,频繁的人类活动和多变的自然气候使得大多数湖泊面临水体富营养化,对周边水生态环境和人类的生活环境造成极大的威胁^[1-4]。面源污染是导致水体富营养化的主要原因之一^[5],因此通过有效手段降低面源污染中的氨氮和磷含量是改善水体富营养化问题的关键。目前主要采用构建生态沟渠^[6]、人工湿地技术^[7]、多水塘技术^[8]、沟渠底泥清淤^[9]等处理手段,在污染物向河流、湖泊迁移的过程中对其进行截留和去除,控制营养物质进入水体并取得显著的效果。

作为沟渠湿地系统的核心部分,基质在水体治理中发挥着重要作用,因为基质不仅可以通过吸附作用直接去除水中的氮、磷污染物,还可以为沟渠中植物和微生物创造有利于生长的微环境,增强了沟渠湿地的净化效果^[10]。但是,在中国北部寒旱地区,由于降水量少、降水相对集中、蒸发剧烈^[11]等特点,导致土壤和水体中的含盐量较高,可供选择的基质种类较少,这就限制了生态沟渠技术在该地区的应用。因此,筛选适合寒旱地区生态沟渠的基质材料显得尤为重要。

目前国内外学者对人工湿地基质的处理性能已经作了大量研究,最常见的人工湿地填料包括沸石、活性炭、粉煤灰、砾石、火山岩、炉渣、砖块、钢渣、陶粒等。武轩韵等^[12]比较了活性炭、沸石、无烟煤和陶粒对氨氮的吸附效果,得到对氨氮吸附效果由大到小为沸石>活性炭>粉煤灰>陶粒;王振等^[13]对海砺壳、废砖块、火山岩、沸石 4 种填料的除磷能力进行了考察,结果表明,废砖块的表面微结构更有利于微生物的生长且具有较高的除磷潜能;Lima 等^[14]通过研究废砖块、砾石等材料对低浓度污水的处理效能,结果表明,单独使用砖块的处理系统对污水处理的整体性能优于其他基质系统;Abdelhakeem 等^[15]通过对比砾石和蛭石湿地系统在不同运行条件下对污水处理性能发现蛭石系统对氨氮和总磷相对于砾石系统有显著提高。已有文献中大多是研究单一基质对氨氮和磷等污染物的去除研究,关于组合基质对污染物去除的研究较少。因此,在参考众多国内外文献研究及实际应用的基础上,综合各种基质的实用性、有效使用寿命、对污染物的净化效果等因素,本文选用天然沸石、麦饭石、无烟煤、炉渣、废砖块 5 种常见的基质作为研究对象,通过静态吸附试验考察不同填料对氨氮和磷的去除效果。然后,根据试验结果选取 3 种去除效果好的基质进行配比优化,选出对氨氮和磷具有稳定去除效果的

填料组合方式进行影响因素试验研究,为选出高效脱氮除磷生态沟渠基质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用天然沸石、无烟煤、炉渣、废砖块、麦饭石 5 种基质材料,其理化性质见表 1。天然沸石和无烟煤购于河南某环保公司,天然沸石粒径 2~4 mm,炉渣来自包头某热力公司,砖块取自学校工地,麦饭石购于内蒙某滤料厂,研磨过筛后粒径为 2~4 mm,上述材料均用去离子水反复冲洗,烘干备用。试验用水采用优级纯的 NH₄Cl 和 KH₂PO₄ 与去离子水配制而成的自配水。

表 1 基质填料理化性质

指标	天然沸石	炉渣	无烟煤	废砖块	麦饭石
堆积密度/(g·cm ⁻³)	0.97	1.7	0.96	0.79	0.91
孔隙率/%	51.4	31.2	48	51.8	46.3
SiO ₂ /%	68.4	41.2	—	28.7	64.3
Al ₂ O ₃ /%	11.3	14.2	—	6.3	14.6
Fe ₂ O ₃ /%	1.5	6.4	—	2.3	3.7
CaO/%	1.7	9.3	—	1.7	1.9
MgO/%	0.76	3.1	—	3.8	1.4
Na ₂ O/%	—	0.7	—	—	2.8
K ₂ O/%	0.48	0.3	—	—	4.9

注:—表示含量过少未检出。

1.2 试验方法

试验于 2019 年 4 月 20 日至 5 月 16 日在内蒙古科技大学寒区水环境系统工程研究中心进行,通过静态吸附试验筛选出适合寒旱地区生态沟渠的基质材料。试验分为单一基质对氮、磷的吸附、不同比例组合基质对氮、磷的吸附和组合基质去除氮、磷效果的影响因素研究 3 个部分,每组试验在相同条件下设 3 次重复,试验结果取平均值以减少误差。

1.2.1 单一基质对氮、磷的等温吸附 由于本次试验针对的是地表富营养化水体,故为了选出适合地表富营养化水体这种污染程度小、水质指标低等特点的基质材料,本吸附试验在浓度梯度设置时集中考察低浓度范围基质的吸附效能。

分别加入 5 种基质各 5 g 于 250 mL 的锥形瓶中,再分别加入氨氮(磷)浓度为 2,2.5,5,10,20,50 mg/L 的 NH₄Cl(KH₂PO₄)溶液(pH 为 7)100 mL,加 2~3 滴三氯甲烷以防止微生物活动对试验结果的影响。将锥形瓶置于温度为 20℃、转速为 150 r/min 的恒温摇床中振荡 24 h,取上清液测定氨氮、磷浓度,计算吸附量及去除率,绘制等温吸附曲线。

1.2.2 组合基质筛选试验 由于北方寒旱地区地表富营养化水体氨氮浓度范围是 2.45~4.69 mg/L,总磷浓度范围是 0.27~0.86 mg/L^[16-17],同时结合前期试验水样测定的氨氮和总磷浓度,故组合基质试验中氨氮浓度为 5 mg/L 的 NH₄Cl 溶液和总磷浓度为 2 mg/L 的 KH₂PO₄溶液(pH 为 7)。

通过 1.2.1 的等温吸附试验选择对氨氮、磷吸附量较大的 3 种基质,按照不同比例(表 2)配制成组合基质,分别称取 5 g 不同比例的混合基质于 250 mL 的锥形瓶中,再分别加入配置好的 NH₄Cl 溶液和 KH₂PO₄溶液 100 mL,加 2~3 滴三氯甲烷以防止微生物活动对试验结果的影响。将锥形瓶置于温度为 20 ℃、转速为 150 r/min 的恒温摇床中振荡,分别测定 12,24,48 h 氨氮、磷的吸附量和去除率。

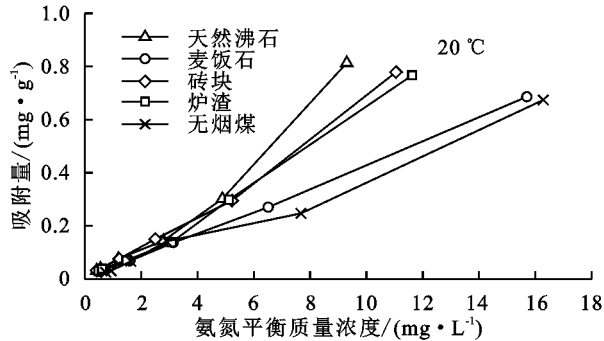
表 2 组合基质比例

基质组合	组合代号	组合质量比例
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL111	1:1:1
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL112	1:1:2
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL113	1:1:3
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL211	2:1:1
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL311	3:1:1
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL121	1:2:1
废砖块:天然沸石:炉渣	FTL131	1:3:1

1.2.3 组合基质去除氮、磷效果的影响因素试验 称取 1.2.2 中最优组合基质 5 g 于 250 mL 锥形瓶中,试验方法与 1.2.2 相同。分别调节吸附温度为 5,10,15,20,25 ℃;用 0.1 mol/L 的 NaOH 和 HCl 溶液调节 pH 为 5,6,7,8,9;根据盐碱地盐碱化程度分级表^[18],用 NaCl 含量分别为 0,0.5%,1%,1.5%,2%的溶液配制浓度为 5 mg/L 的 NH₄Cl 和 2 mg/L 的 KH₂PO₄溶液,研究不同盐度对最优组合基质吸附氨氮和磷的影响。

1.3 分析方法

溶液中氨氮采用纳氏试剂分光光度法^[19],总磷采用钼酸铵分光光度法^[20]通过 UV-6000 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司)测定。吸附量



计算公式为:

$$X=\frac{(N_{co}-N_c)V\times0.001}{M}$$
 (1)

式中:X 为基质的吸附量(mg/g);N_{co}为吸附前溶液中氨氮、磷质量浓度(mg/L);N_c为吸附后溶液中氨氮、磷质量浓度(mg/L);V 为溶液体积(mL);M 为基质质量(g)。

温度恒定时,基质表面的吸附特性可以通过 Langmuir 和 Freundlich 方程对基质吸附氨氮和磷的试验数据进行拟合^[21-22]。Langmuir 等温吸附模型具体公式为:

$$X=\frac{K_LX_mN_c}{1+K_LN_c}$$
 (2)

Freundlich 方程属于一个半经验公式,计算公式为:

$$X=K_FN_c^{\frac{1}{n}}$$
 (3)

式中:X_m为基质的最大吸附量(mg/g);K_L是 Langmuir 平衡常数;K_F为 Freundlich 系数;n 为基质的吸附强度。

2 结果与分析

2.1 单一基质对氮、磷的去除效果

根据不同氨氮、磷溶液浓度下各基质对氨氮和磷的吸附量和平衡浓度,绘制等温吸附曲线见图 1。分别采用 Langmuir 和 Freundlich 方程对基质吸附氨氮、磷的试验数据进行拟合,各基质的拟合参数见表 2。

由图 1 可知,各基质对氨氮和磷的吸附量随着氨氮、磷溶液初始浓度增加而增加。天然沸石对氨氮的吸附量大于其他 4 种基质,其饱和吸附量为 0.84 mg/g 是吸附量最小的无烟煤的 1.3 倍。不同磷浓度下,炉渣对磷的吸附量均比其他 4 种基质大,而天然沸石、麦饭石、废砖块、无烟煤对磷的吸附量差别不大。从总体上看,废砖块对低浓度氨氮的去除效果明显优于天然沸石,炉渣对磷的吸附显著优于其他基质,这一现象可能是由于炉渣中大量的 Ca²⁺与磷酸根离子反应生成磷酸盐沉淀,使磷得以去除。

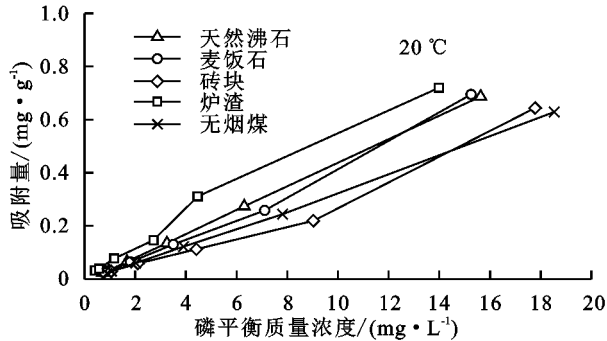


图 1 不同基质对氨氮、磷的等温吸附曲线

由表 3 可知,Langmuir 和 Freundlich 方程均能较好地拟合各基质对氨氮、磷的吸附特征,相关系数 R²>0.95,说明 5 种材料对氨氮和磷的吸附是单分子

层吸附和多分子层吸附共存的。在 Langmuir 模型中 K_L反映的是吸附结合强度,其值越大吸附结合越牢固^[23],5 种基质对氨氮的 K_L 值由大到小依次为天然沸

石、废砖块、炉渣、麦饭石、无烟煤,对磷的 K_L 值由大到小依次为炉渣、麦饭石、天然沸石、废砖块、无烟煤,拟合结果与试验所得结果一致。在 Freundlich 模型中, K_F 反映的是吸附容量,其值越大饱和和吸附量越大^[24],天然沸石对氨氮的 K_F 值和炉渣对磷的 K_F 值均最小,与试验结果不一致, n 表示吸附难易程度,一般认为 $2 < n < 10$

表 3 5 种基质对氮、磷的等温吸附模型参数

溶质	基质	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
		$X_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	n	$K_F / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	废砖块	0.874	0.0851	0.9866	1.031	15.1538	0.9917
	天然沸石	0.887	0.0857	0.9911	0.996	14.8289	0.9797
	麦饭石	0.699	0.0795	0.9905	1.074	20.4428	0.9957
	炉渣	0.777	0.0821	0.9857	0.998	17.8364	0.9800
	无烟煤	0.688	0.0481	0.9865	0.969	27.0823	0.9802
	废砖块	0.744	0.0424	0.9811	0.990	35.3826	0.9814
P	天然沸石	0.752	0.0437	0.9897	0.911	28.3073	0.9970
	麦饭石	0.784	0.0531	0.9487	0.974	26.7978	0.9875
	炉渣	0.876	0.0857	0.9892	1.093	14.9775	0.9911
	无烟煤	0.663	0.0380	0.9944	0.921	37.4142	0.9992

2.2 组合基质比对氮、磷的去除效果

由图 2 可知,不同基质组合不同吸附时间氨氮和磷的去除效果也不相同,在吸附 24 h 时对氨氮和磷的吸附量和去除率均优于 12,48 h。各组合基质对氨氮的吸附量差异不大,FTL113 对于氨氮的吸附效果最好,氨氮吸附量达到 0.091 mg/g,去除率为 90.73%,较单一基质去除效果最好的天然沸石相比,去除率提高了 14.57%。FTL113 对磷的吸附量和去除率明显优于其他组合基

质,磷吸附量达到 0.039 mg/g,去除率为 94.29%,较单一基质去除效果最好的炉渣相比,去除率提高了 15.20%,这可能是因为 FTL113 中炉渣占比高,而炉渣中含有丰富的 Ca、Fe、Mg、Al 等氧化物,这些氧化物溶解后释放的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 与磷酸根离子反应生成磷酸盐沉淀,使磷得以去除^[26]。综上所述,在后续的研究中选择 24 h 对氨氮和磷去除效果最好的基质组合 FTL113 进行影响因素试验。

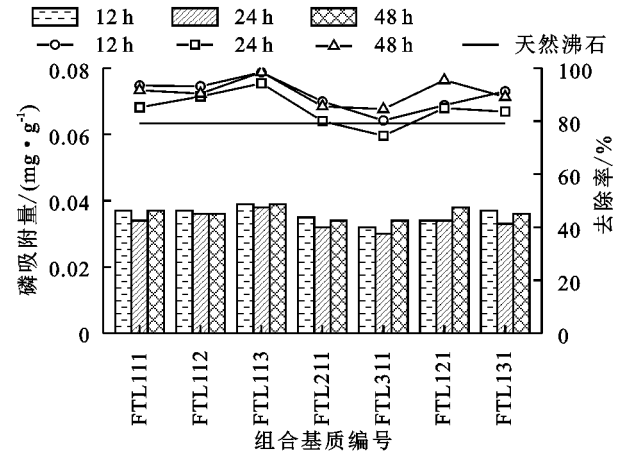
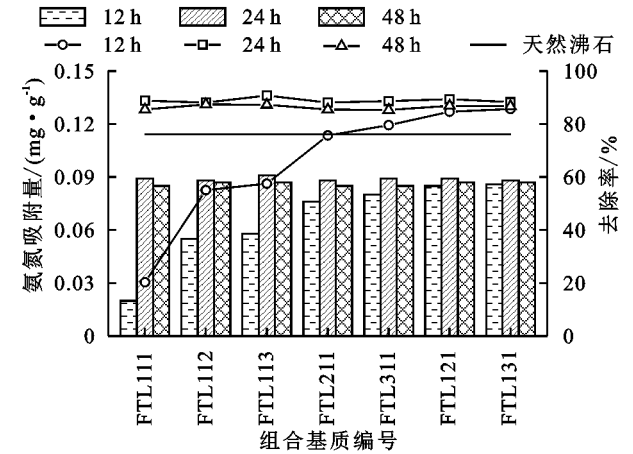


图 2 不同组合基质对氨氮、磷的吸附量和去除率

2.3 组合基质去除氮、磷效果的影响因素试验

2.3.1 温度对最优基质组合的影响 由图 3 可知,FTL113 对磷的吸附量随着温度升高而增加,在 25 ℃时磷的去除率达到最大(94.29%),较 5,10,15,20 ℃分别增加了 7.15%,5.77%,6.60%,1.38%。FTL113 对氨氮的吸附量随着温度升高而降低,5 ℃时达到最优去除效果(94.23%),而不同温度下氨氮和磷的吸附量差异不大。综上所述,FTL113 对磷的吸附属于吸热反应,适当地提高温度导致溶液中

离子运动加快,有利于磷的去除。FTL113 对氨氮的吸附属于放热反应,适当地降低温度可以加快 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与溶液中离子发生离子交换反应,有利于氨氮的去除。2.3.2 pH 对最优基质组合的影响 由图 4 可知,FTL113 对磷的去除效果受 pH 影响较大,随着 pH 升高而降低。pH 从 5~9,FTL113 对磷的去除率从 96.76%降至 78.35%,这是由于 pH 升高,抑制了溶液中易于磷酸盐反应的金属离子的析出, OH^- 浓度

的增加,与 PO_4^{3-} 形成竞争且吸附剂表面静电排斥作用增大,导致对磷的吸附作用减弱。随着 pH 的升高 FTL113 对氨氮的去除率先升高后降低,在 $\text{pH}=7$ 时去除效果最好,去除率为 91.78%,这是由于在酸性条件下,基质表面结构和化学特性被 H^+ 改变,使得基质表面活性吸附位点数量和形态发生变化, NH_4^+ 与基质表面静电排斥作用增强,降低了材料对 NH_4^+ 的结合力,随着 pH 升高,排斥作用减弱,吸附量也随之升高并至最大值^[27];在碱性条件下,溶液中

NH_4^+ 与 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 存在公式(4)和公式(5)的转化关系^[28], OH^- 浓度升高,导致平衡右移 NH_4^+ 浓度减少,与基质内部阳离子的交换能力被削弱,氨氮吸附量减小。



富营养化水体水的 pH 一般为 7~9,由试验结果可知,最优基质组合 FTL113 在富营养化水体的治理中均能对氨氮和磷进行有效去除。

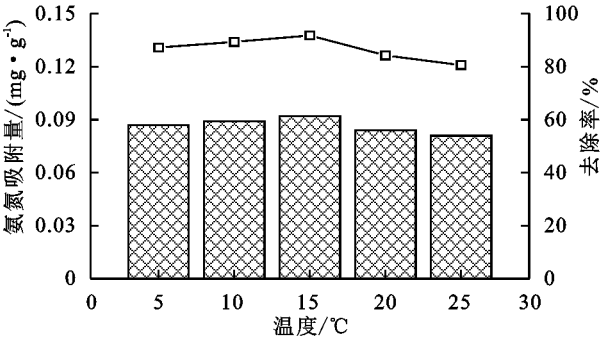


图 3 不同温度对氨氮和磷的吸附量和去除率

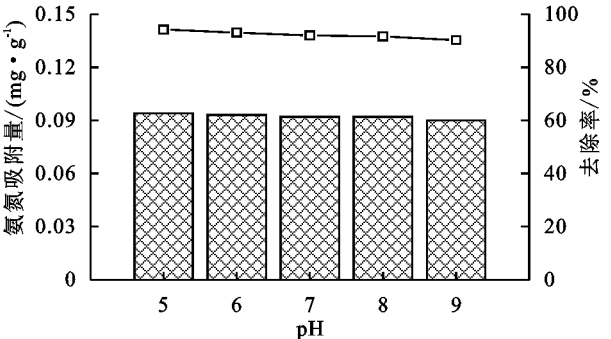
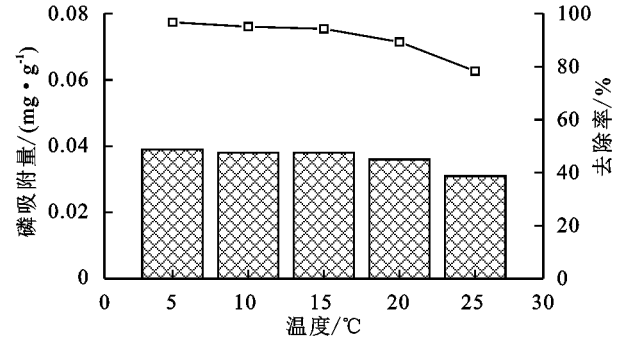
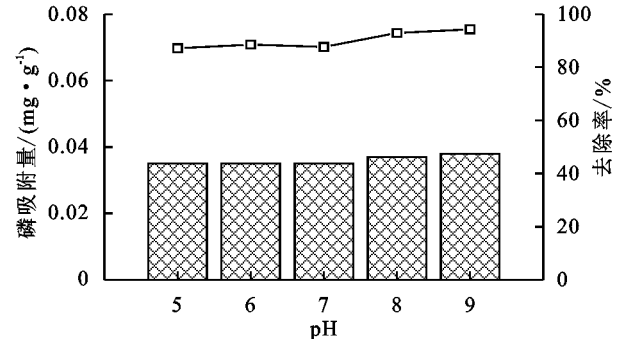


图 4 不同 pH 对氨氮和磷的吸附量和去除率



2.3.3 盐度对最优基质组合的影响 由图 5 可知,FTL113 对氨氮和总磷的吸附效果均随着溶液盐度的升高而下降。在溶液盐度低于 1% 时,FTL113 对溶液中氨氮的去除效果下降幅度并不明显,均在 3% 左右,而在盐度达到 2% 时,氨氮的去除率仅有 68%,比盐度为 0 时的去除率(92%)降低了 24%。不同盐度对总磷的去除效果和氨氮相似,在盐度低于 1% 对影响不大,当盐度为 2% 时,磷的去除率降为 77.25%。出现这一现象的主要原因在于,基质对氨氮的吸附包括

离子交换和物理吸附作用,溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等的存在,会与 NH_4^+ 产生竞争吸附作用,从而抑制基质对氨氮的吸附作用。而基质对磷的去除主要是化学吸附作用,其吸附能力受 pH 影响较大,溶液中离子浓度的升高对其吸附效果影响较小,同时高盐度溶液中盐分附着在基质表面, Cl^- 也会腐蚀基质表面,导致基质的微孔数量和比表面积减小,同时单位表面的吸附位点减少,从而使基质对氨氮和磷的吸附能力下降^[29-30]。

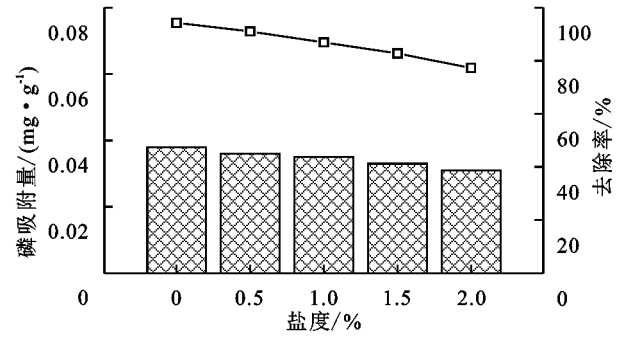
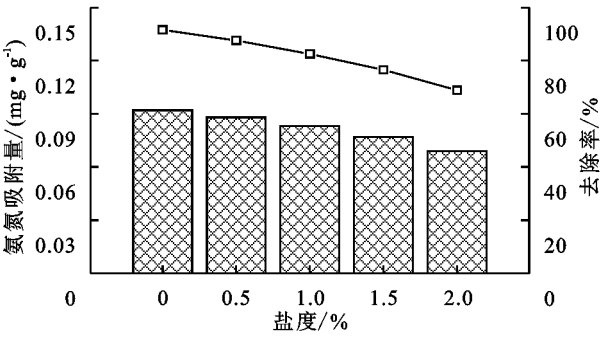


图 5 不同盐度对氨氮和磷的吸附量和去除率

3 结 论

(1)5 种基质对氨氮和磷的吸附量随着氨氮和磷溶液初始浓度增加而增加。Langmuir 和 Freundlich 方程均能较好地拟合 5 种基质对氨氮和磷的吸附特征,其中天然沸石对氨氮的去除效果最好,饱和吸附量可达到 0.887 mg/g,炉渣对磷的吸附效果明显优于其他 4 种基质,饱和吸附量为 0.876 mg/g。

(2)通过组合基质筛选试验得出不同比例组合基质对氨氮、磷的去除效果有一定差异,把废砖块、天然沸石、炉渣按质量比 1 : 1 : 3 组合时对氨氮和磷的去除率最优,均达到 90%以上。

(3)温度升高,组合基质 FTL113 对氨氮的吸附量降低,对磷的吸附量升高;磷的去除效果受 pH 影响较大,随着 pH 升高而降低,随着 pH 升高氨氮的去除率呈现先增后减的趋势,在 pH=7 时,氨氮的去除效果最好可达 91.78%;氨氮和总磷的吸附效果均随着溶液盐度的升高而下降。

参考文献:

[1] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学,2010,22(6):799-810.

[2] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution,2010,158(5):1159-1168.

[3] 张民,孔繁翔.巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013 年)[J].湖泊科学,2015,27(5):791-798.

[4] 韦立峰.浅谈水体富营养化的成因及其防治[J].中国资源综合利用,2006,24(8):25-27.

[5] 白明英.农业非点源污染及控制对策研究[J].安徽农业科学,2010,38(8):4228-4230.

[6] Han H, Cui Y, Gao R, et al. Study on nitrogen removal from rice paddy field drainage by interaction of plant species and hydraulic conditions in eco-ditches [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019,26(7):6492-6502

[7] Li D, Chu Z S, Huang M S, et al. Multiphasic assessment of effects of design configuration on nutrient removal in storing multiple-pond constructed wetlands [J]. Bioresource Technology,2019,290:e121748.

[8] 李玉凤,刘红玉,刘军志,等.农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J].环境科学,2018,39(11):4999-5006.

[9] 张震宇.河湖生态清淤及淤泥固化技术研究进展[J].工程技术(全文版):2016(5):99.

[10] 柯德峰.人工湿地基质的筛选及其除磷机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.

[11] 高静洁,王晓云,李卫平,等.包头南海湿地生态系统健康评价[J].湿地科学,2017,15(2):207-213.

[12] 武轩韵,孙向阳,栾亚宁,等.5 种基质对污水中氨氮的去除

效果筛选及研究[J].水处理技术,2015,41(2):52-55.

[13] 王振,刘超翔,董健,等.人工湿地中除磷填料的筛选及其除磷能力[J].中国环境科学,2013,33(2):227-233.

[14] Lima M X, Carvalho K Q, Passig F H, et al. Performance of different substrates in constructed wetlands planted with crassipes treating low-strength sewage under subtropical conditions [J]. Science of The Total Environment,2018,630:1365-1373.

[15] Abdelhakeem S G, Aboulroos S A, Kamel M M. Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions[J]. Journal of Advanced Research,2016,7(5):803-814.

[16] 姜庆宏,潘彤,李卫平,等.南海湖冬季浮游植物特征及与水质因子关系[J].东北林业大学学报,2019,47(4):71-75.

[17] 张晔.南海湖水水质特征及沉积物重金属季节性分布特征研究[J].西南农业学报,2017,30(5):1205-1213.

[18] 郭勃.基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲盐碱地分级与治理研究[D].济南:山东师范大学,2015.

[19] 国家环境保护部.HJ 535—2009《水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法》[S].北京:中国标准出版社,2009.

[20] 国家技术监督局.GB 11893—89《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》[S].北京:中国标准出版社,1989.

[21] Rossi C G, Heil D M, Bonumã N B, et al. Evaluation of the langmuir model in the soil and water assessment tool for a high soil phosphorus condition [J]. Environmental Modelling and Software,2012,38:40-49.

[22] Ge D T, Shi W, Ren L, et al. Variation analysis of affinity-membrane model based on Freundlich adsorption [J]. Journal of Chromatography A,2006,1114(1):40-44.

[23] 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.

[24] 于长江,董心雨,王苗,等.海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(Ⅱ)的吸附性能和机制[J].环境科学,2018,39(8):3719-3728.

[25] 许萍,黄俊杰,张建强,等.6 种生物滞留填料对磷的吸附特性研究[J].工业安全与环保,2016,42(6):62-66.

[26] 王万宾,胡飞,孔令瑜,等.人工湿地脱氮除磷基质的吸附能力及其影响因子[J].湿地科学,2016,14(1):122-128.

[27] 焦巨龙,杨苏文,谢宇,等.多种材料对水中氨氮的吸附特性[J].环境科学,2019,40(8):3633-3641.

[28] Sugahara H, Takano Y, Ogawa N O, et al. Nitrogen isotopic fractionation in ammonia during adsorption on silicate surfaces [J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2017,1(1):24-29.

[29] 孙璵,刘月敏,薛倩,等.盐度对渗滤系统填料性质和除磷影响的试验研究[J].环境科学与技术,2017,40(8):25-29.

[30] 秦娟娟.人工湿地填料对含盐污水中污染物吸附性能研究[D].山东 青岛:中国海洋大学,2014.