钒钛磁铁尾矿基质改良生物滞留设施的研究*

张炜[1,2,3],杨婉秋[1,2,3],陈晓晴[1,2,3],李凯旋[1,2,3],宋立乾[1,2,3],
徐露华[1,2,3],邱子诚[1,2,3],李思敏[1,2,3]

(1.河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸市 056038;
2.河北工程大学 污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 河北 邯郸市 056038;
3.河北工程大学 邯郸市水利用技术重点实验室, 河北 邯郸市 056038)

摘要:为改善生物滞留设施运行效能和拓展钒钛磁铁尾矿资源化途径,以钒钛磁铁尾矿作为生物滞留设施的基质改良剂,探究钒钛磁铁尾矿基质改良生物滞留设施的可行性及除污效果。结果表明,钒钛磁铁尾矿主要重金属离子(Cr、Mn、Zn、Cu)浸出毒性低于标准限值;钒钛磁铁尾矿基质对TP、NH_3和NO_3^--N的吸附符合Freundlich吸附等温模型,TP和NH_3吸附过程以化学吸附为主,受液膜扩散和颗粒内扩散共同控制,NO_3^--N吸附过程则以物理吸附为主;钒钛磁铁尾矿基质对TP、NH_3和NO_3^--N的去除率分别为97.2%、91.4%、70.5%,出水平均浓度分别满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类、Ⅳ类和Ⅴ类水体标准。

关键词:生物滞留设施;钒钛磁铁尾矿基质;可行性分析;吸附特性;除污效果

中图分类号:TU992 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0178-08

Study on the Improvement of Bioretention Facilities by Vanadium-Titanium Magnetite Tailings Substrate

ZHANG Wei[1,2,3], *YANG Wanqiu*[1,2,3], *CHEN Xiaoqing*[1,2,3], *LI Kaixuan*[1,2,3],
SONG Liqian[1,2,3], *XU Luhua*[1,2,3], *QIU Zicheng*[1,2,3], *LI Simin*[1,2,3]

(1.Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2.Hebei Engineering Research Center of Sewage Treatment and Resource Utilization, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
3.Handan Key Laboratory of Water Utilization Technology, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to improve the operation efficiency of bioretention facilities and expand the resource utilization of vanadium-titanium magnetite tailings, vanadium-titanium magnetite tailings were used as the substrate modifier of bioretention facilities to explore the feasibility and decontamination effect of vanadium-titanium magnetite tailings substrate to improve the bioretention facilities. The results show that the leaching toxicity of main heavy metal ions (Cr, Mn, Zn, Cu) in vanadium-titanium magnetite tailings is lower than the standard limit. The adsorption of TP, NH_3 and NO_3^--N by vanadium-titanium magnetite tailings substrate to the Freundlich adsorption isotherm model. The adsorption process of TP and NH_3 is dominated by chemical adsorption, which is controlled by liquid film diffusion and intraparticle diffusion, while the adsorption process of NO_3^--N is dominated by physical adsorption. The removal rates of TP, NH_3 and NO_3^--N by vanadium-titanium magnetite tailings substrate are 97.2%, 91.4% and 70.5%, respectively. The average effluent concentration meets the Class Ⅱ, Class Ⅳ and Class Ⅴ water standards respectively in the *Surface Water Environmental Quality Standard* (GB 3838—2002).

Key words: Bioretention facility, Vanadium-titanium magnetite tailings substrate, Feasibility analysis, Adsorption characteristic, Decontamination effect

* **收稿日期**:2024-09-25
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC1910601)
作者简介:张炜(1981—),男,河北邯郸人,硕士,教授,主要从事海绵城市建设理论与技术方面的研究。E-mail:zhangwei1981@hebeu.edu.cn
通信作者:李思敏(1968—),男,陕西咸阳人,教授,博士研究生导师,主要从事雨水利用及资源化方面的研究。E-mail:chyeli@126.com

0 引言

20世纪50年代,钒钛磁铁矿开发利用被纳入国家战略,但其尾矿长期堆存会对区域生态环境产生较大的风险,尾矿"三化"处置势在必行[1]。当前,尾矿处置途径主要包括二次选别、回填、建材原料和农业生产等[2-5],但因受经济、环境及市场等因素限制,仍未从根本上解决尾矿资源化利用的问题。因此,尾矿的合理处置受到学者的广泛关注。

为应对城市化发展引发的雨洪灾害[6]等问题,我国提出以低影响开发为理念的海绵城市建设[7],可实现雨水径流的量质调控。其中,生物滞留设施作为低影响开发雨水系统的典型海绵生态技术,在国内外应用广泛[8-9]。基质是生物滞留设施发挥功能的关键,而传统生物滞留设施基质组成较为单一,对N、P等污染物的去除不够稳定[10-11]。对此,常通过添加功能性材料强化生物滞留设施的雨水量质调控性能[12]。如简单处理后的建筑废砖[13]、钢渣-稻壳灰[14]和木屑-无烟煤-天然沸石[15-16]等材料对常规污染物及重金属具有较好去除效果,但在应用时需注意基质本身析出对环境产生的二次污染[17]。随着环境保护政策的逐步收紧,"一砂难求"现象愈演愈烈。钒钛磁铁尾矿含有SiO_2、CaO、Fe_2O_3、MgO等金属氧化物[18],不仅能够作为土壤改良剂,也可以通过离子交换、氧化还原、络合沉淀等作用处理环境污染物[19],可代替工程砂用作改良生物滞留设施的基质,从而提高除污效果。

本文利用钒钛磁铁尾矿基质改良生物滞留设施,通过理化性质和污染物浸出特性分析评估钒钛磁铁尾矿基质用于改良生物滞留设施的可行性,探究钒钛磁铁尾矿基质的吸附特性,并考察改良生物滞留设施的除污效果,以期通过以"废"治"废"提升海绵设施运行效果,拓展钒钛磁铁尾矿处置途径。

1 材料与方法

1.1 试验装置

生物滞留设施试验装置如图1所示,采用外径160 mm的UPVC管试制,高度为1 000 mm,从上到下依次为超高层(50 mm)、蓄水层(100 mm)、基质层(750 mm)和砾石层(100 mm)。蓄水层上沿设外径15 mm的溢流管,砾石层底部设外径15 mm的出流管。为防止装置内壁水流短流,预先进行打毛处理。

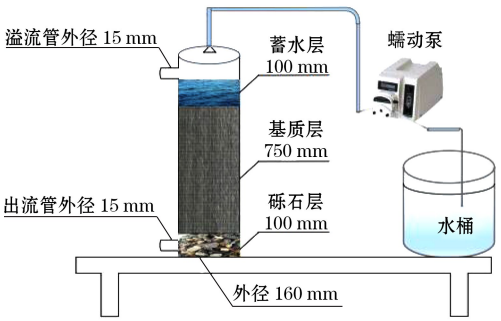


图1 试验装置

Fig.1 Experimental device

1.2 试验材料制备及性质测定

试验用尾矿取自河北省承德市某钒钛磁铁尾矿库,经自然晾晒,采用"四分法"混合均匀后随机取样。土壤取自华北地区典型表层种植土,将自然风干的土壤(<2 mm)及尾矿砂(<2 mm)按体积比1∶2均匀混合制备成改良基质(以下简称"钒钛磁铁尾矿基质")。

为掌握钒钛磁铁尾矿的理化特性,测定其粒度分配、化学成分、微观形貌,以及3种基质的含湿率、pH值、电导率和渗透速率。粒度组成采用筛分法测定;化学成分采用电感耦合等离子谱仪(ICP)测定;微观形貌采用扫描电镜(SEM)表征;含湿率采用重量法测定;pH采用pH计测定;电导率采用电导率仪测定;渗透速率采用环刀法测定。

1.3 毒性浸出试验

污染物浸出量和浸出特性是评估基质改良可行性的先决条件[20]。将自然风干的尾矿样品置于烘箱内,在105 ℃温度下烘干至恒重,存于干燥器内备用。采用逐步稀释法将氢氧化钠、硝酸和去离子水配制为pH=7的浸提剂,探究其对尾矿浸出特性的影响。重金属浸出浓度测试方法:称取100 g过2 mm筛的尾矿样品,与1 000 mL浸提剂混合(固液比为1∶10),在(25±2)℃条件下,以150 r/min的频率连续振荡10 d,每隔24 h,取20 mL浸出溶液,用硝酸酸化至pH<2,并通过载有0.45 μm滤膜的过滤装置过滤,将过滤后的样品置于冰箱保存待测。采用电感耦合等离子体质谱法[21](ICP-MS)测定重金属离子(Hg、Cd、As、Se、Cr、Mn、Cu和Zn)的浓度。

1.4 吸附试验

为探究钒钛磁铁尾矿对污染物的吸附性能,选用TP、NH_3和NO_3^--N作为目标污染物进行吸附试验。

1.4.1 静态吸附试验

称取干燥种植土、钒钛磁铁尾矿基质和砂土基

质各 3 g,加入 150 mL 浓度均为 5 mg/L 的 KH_2PO_4、NH_4Cl 和 KNO_3 混合溶液于 250 mL 锥形瓶中,设置 3 组平行样。将锥形瓶放入恒温振荡器以(25±2) ℃、150 r/min 的条件连续振荡 24 h,再以 5 000 r/min 转速离心 5 min,取上层清液过 0.45 μm 滤膜。采用 1.3 节中介绍的检测方法测定滤液污染物的浓度。

1.4.2 吸附动力学试验

称取钒钛磁铁尾矿基质 3 g,置于分别装有 250 mL 含 KH_2PO_4(10 mg/L)、NH_4Cl(10 mg/L)和 KNO_3(10 mg/L)的溶液中,放入恒温振荡器以(25±2) ℃、150 r/min 连续振荡 0.5 h、1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、12 h、24 h,每组试验取 3 次平行样,计算污染物吸附量。

1.4.3 等温吸附试验

在 25 ℃条件下,在一系列 250 mL 锥形瓶中分别放入 3 g 钒钛磁铁尾矿基质,然后分别加入 0.5,1,2,3,5,10,15,20,40 mg/L 的 KH_2PO_4,以及 0.5,5,8,10,15,20,40,80 mg/L 的 NH_4Cl 和 KNO_3 溶液,放入恒温振荡器中,以 150 r/min 的转速振荡 24 h,每组试验取 3 次平行样。

1.5 人工模拟径流试验

由于降雨随机性强,生物滞留设施采用人工配水模拟降雨径流进行试验,自来水储存在 150 L 水桶内,将配制好的药剂投加水桶并充分搅拌混匀。原水中径流污染物 TP、NH_3、NO_3^--N 的浓度分别为 1 mg/L、10 mg/L、5 mg/L[22],采用 KH_2PO_4、NH_4Cl、KNO_3 配置溶液。

为模拟钒钛磁铁尾矿基质生物滞留设施的运行效果,进行了人工模拟降雨动态试验。将基质装填在生物滞留设施柱内,用自来水以 20 L/d 的速率持续进水两周,压实基质并冲刷基质表面残余杂质。待出水水质稳定后,开始模拟人工降雨,每个试验周期为 3 d,第一天进水,落干期为 2 d,进水时间 30 min。出水 60 min 后于出水口取样分析,检测水中 TP、NH_3 和 NO_3^--N 浓度,每组试验重复 2 次。

1.6 水质测定方法及数据分析

每次试验结果取 3 个平行样的平均值进行分析,水质各项指标检测按照《水及废水监测分析方法》执行。

准一级动力学方程、准二级动力学方程[23]和粒子内扩散模型分别见式(1)、式(2)和式(3)。

$$q_t = q_e(1-e^{(-K_1 t)}) \tag{1}$$

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1+K_2 q_e t} \tag{2}$$

$$q_t = K_t t^{\frac{1}{2}} + c \tag{3}$$

式中:q_e 为平衡吸附量,mg/g;q_t 为 t 时刻吸附量,mg/g;K_1 为准一级吸附速率常数;K_2 为准二级吸附速率常数;K_t 为颗粒内扩散速率常数;c 为常数。

常见等温吸附模型有 Langmuir 模型和 Freundlich 模型[24],公式见式(4)和式(5)。

$$q_t = \frac{K_L q_{max} C}{1+K_L C} \tag{4}$$

$$q_t = K_F C^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

式中:q_{max} 为最大吸附量,mg/g;C 为溶液平衡浓度,mg/L;K_L 为 Langmuir 模型的常数因子;K_F 为 Freundlich 模型常数因子;$1/n$ 为吸附强度与表面异质性的相关常数。

2 结果与讨论

2.1 基质理化特性

钒钛磁铁尾矿的粒度分布如图 2 所示。由图 2 可知,粒度分布集中在 0.35 mm 以上,粒度较大,0.35 mm 以上的颗粒含量为 85.10%。在生物滞留设施中添加钒钛磁铁尾矿,不仅可以提高砂粒含量、降低成本,对调控水量、净化水质也极为重要[25]。钒钛磁铁尾矿的矿物成分如图 3 所示,由图 3 可知,钒钛磁铁尾矿主要成分为 SiO_2、CaO、Fe_2O_3、MgO 和 Al_2O_3,占比为 95.68%。已有研究证实金属氧化物能提高对氮、磷的吸附效果[26],因此,钒钛磁铁尾矿可提高水质净化的效果。对钒钛磁铁尾矿进行 SEM 扫描分析,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,其表面结构粗糙,存在大量吸附位点,可提升对污染物的吸附能力。

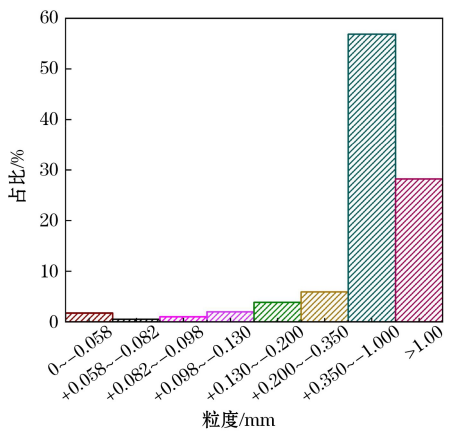


图 2 钒钛磁铁尾矿粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of vanadium-titanium magnetite tailings

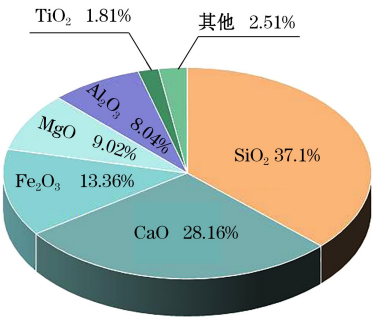


图 3 钒钛磁铁尾矿组成

Fig.3 Composition of vanadium-titanium magnetite tailings

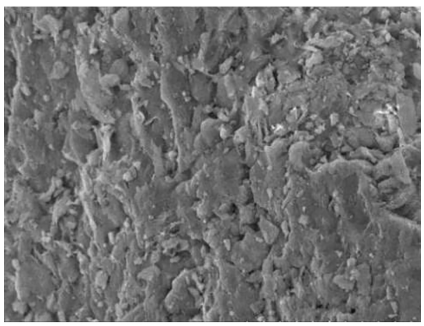


图 4 钒钛磁铁尾矿扫描电镜图片

Fig.4 SEM diagram of vanadium-titanium magnetite tailings

种植土、钒钛磁铁尾矿和钒钛磁铁尾矿基质主要理化性质测定结果见表 1。钒钛磁铁尾矿基质可以改善土壤结构,增强土壤渗透性、持水性和保水性,利于植物生长[27],在 pH 为 8.29～8.45 的弱碱性环境下,钒钛磁铁尾矿基质对雨水径流中污染物有较好的去除效果[28-29]。

表 1 主要理化性质

Table 1 Main physicochemical properties

介质	含湿率 ω/%	pH	电导率 σ/(μS/cm)	渗透速率 K/(mm/h)
种植土	0.86	8.29	108.80	18
钒钛磁铁尾矿	0.13	8.56	99.15	279
钒钛磁铁尾矿基质	0.58	8.45	114.70	138

2.2 浸出特性

钒钛磁铁尾矿的重金属浸出是限制其作为基质改良剂的关键因素,通过浸出试验,测定钒钛磁铁尾矿中重金属(Hg、Cd、As、Se、Cr、Mn、Cu 和 Zn)的最高浸出量和浸出速度。试验中,Hg、Cd、As 和 Se 均未检出,故本文仅讨论 Cr、Mn、Cu 和 Zn 的浸出特性,以评估钒钛磁铁尾矿用作改良剂的可行性。

钒钛磁铁尾矿重金属浸出浓度结果如图 5 所示。在 pH 为 7 时,钒钛磁铁尾矿与浸提剂不同接触时间后,重金属 Cu、Cr、Mn 和 Zn 浸出浓度与浸出时间成正相关,不同重金属的浸出特性有所区别。Cu 和 Cr 的浸出浓度呈现先上升后下降的变化趋势,且在前 4 天的溶解释放速率较高,此时溶液 pH 为碱性,重金属离子与 OH^- 结合生成氢氧化物沉淀,随后浓度呈现下降趋势。Zn 和 Mn 在前 6 天处于快速释放阶段,6～10 d 处于缓慢释放阶段,且在浸出时间为 7 d 时,重金属浸出浓度基本达到平衡。这是因为初始阶段重金属浸出浓度较低,基质中可溶性重金属快速溶于溶液,随着时间延长,可溶性重金属不断减少,溶出速率变缓,浸出液重金属浓度逐渐增加,表明钒钛磁铁尾矿的重金属浸出行为主要受液相扩散的影响。

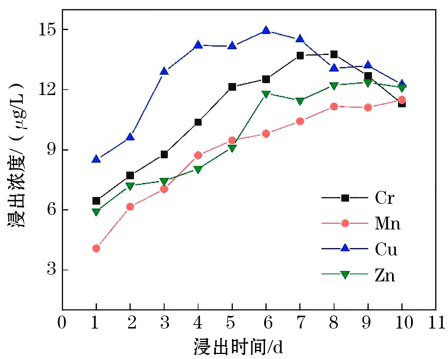


图 5 浸出液重金属浓度的变化

Fig.5 Changes of heavy metal concentration in leaching solution

2.3 吸附特性

2.3.1 吸附动力学分析

钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附动力学模型拟合曲线如图 6 所示,基于准一级动力学方程、准二级动力学方程和颗粒内扩散模型,对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 吸附特性进行拟合分析,拟合参数见表 2。从图 6 可以看出,钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附量均随着时间的延长而增加。对污染物的吸附表现出前期吸附速度快,后期缓慢的特点。在初始阶段,溶液中氮磷浓度较高,钒钛磁铁尾矿基质表面存在大量空余吸附点位和可交换离子,加快其与污染物的接触效率,吸附速度快;随着钒钛磁铁尾矿基质表面电性中和及空余吸附点位逐渐减少,吸附量的增长开始变得缓慢,最终趋于平衡,这与蒋艳红等[30]的研究结果一致。

对比表 3 中三种动力学方程的决定系数 R^2 可知,钒钛磁铁尾矿基质对 TP 和 NH_3 吸附的准二级动力学方程的 R^2 分别为 0.992 和 0.995,说明准二级动力学方程对 TP 和 NH_3 吸附过程的描述更为

符合,这与张芙蓉等[31]的研究结论相同,吸附过程主要以化学吸附为主,由液膜扩散和颗粒的内扩散共同控制,同时还可能包括外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散等作用[32]。而 NO_3^--N 的吸附过程满足准一级动力学方程,以物理吸附为主。此外,准一级动力学拟合钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的平衡吸附量分别为 45.94,81.38,29.66 mg/kg;准二级动力学拟合钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的平衡吸附量分别为 52.94,95.40,40.25 mg/kg。

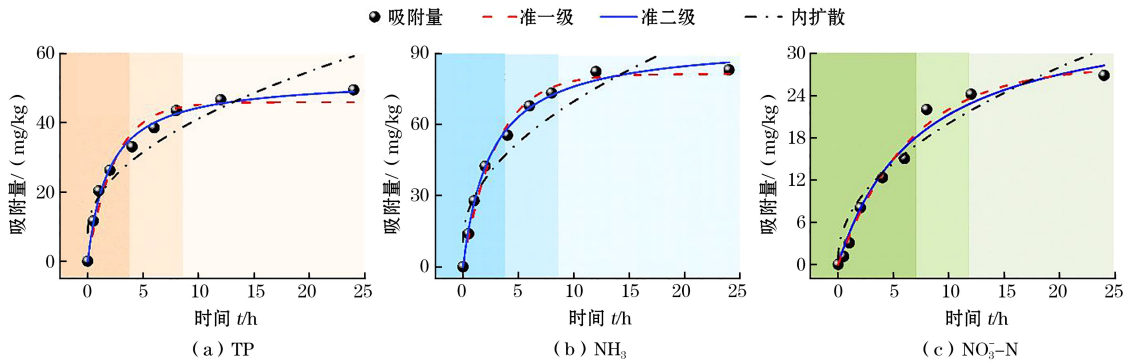


图 6 吸附动力学模型拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of adsorption kinetic modal

表 2 吸附动力学模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of adsorption kinetic model

指标	准一级动力学方程			准二级动力学方程			颗粒内扩散模型		
	q_e/(mg/kg)	K_1	R^2	q_e/(mg/kg)	K_2	R^2	c	K_t	R^2
TP	45.94	0.411	0.966	52.94	0.010	0.992	8.24	10.42	0.880
NH_3	81.38	0.331	0.990	95.40	0.004	0.995	10.55	18.73	0.855
NO_3^--N	29.66	0.152	0.984	40.25	0.005	0.979	0.98	6.09	0.946

2.3.2 吸附等温线分析

不同浓度下钒钛磁铁尾矿基质经过 24 h 振荡吸附后,将 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附结果绘制成等温吸附曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,随着溶液平衡浓度的增加,尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附量不断增大,随后逐渐减缓。这是因为在低浓度条件下,钒钛磁铁尾矿基质的吸附位点相对较多,可用于 TP、NH_3 和 NO_3^--N的吸附,随着浓度升高,吸附位点相对减少,吸附速率变缓,并逐渐趋于平稳[33-34]。

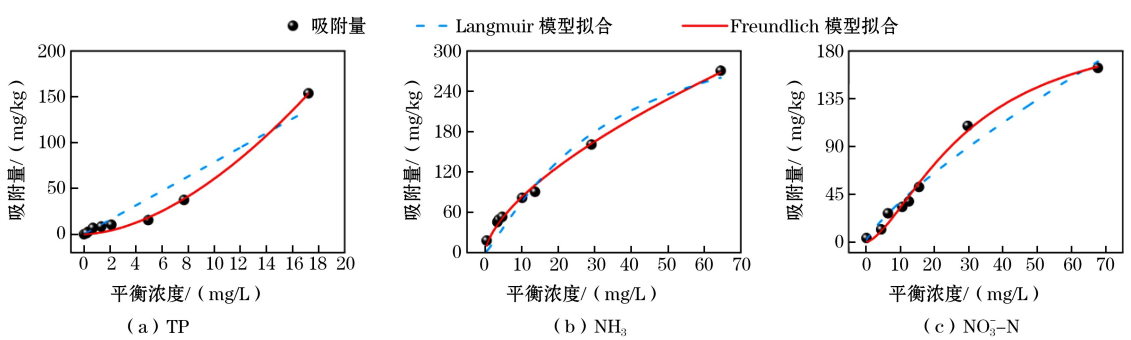


图 7 等温吸附模型拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of isotherm adsorption model

Langmuir 等温吸附模型被认为是均一理想单分子层的化学吸附,Freundlich 模型则被认为是非均一多分子层物理吸附[35]。等温吸附模型拟合参数见表 3,从表 3 可以看出,Langmuir 模型($R^2 \geqslant 0.900$)和 Freundlich 模型($R^2 \geqslant 0.982$)均能较好地拟合钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附特征,说明其对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附过程由化学吸附和物理吸附协同作用。Langmuir 公式中,最大理论吸附值 q_{max} 分别为 242 mg/kg、509 mg/kg 和 292 mg/kg。在 Freundlich 公式中,K_F

和 n 均为与吸附能力和吸附量有关的参数,K_F 越大,吸附能力越强。当 $0.1<1/n<1$ 时,更容易发生吸附,$1/n$ 分别为 0.654,0.115 和 0.724,表明 TP、NH_3 和 NO_3^--N 易于吸附在钒钛磁铁尾矿基质的表面。

表 3 等温吸附模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters for isotherm adsorption model

指标	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	K_L	q_{max}/(mg/kg)	R^2	K_F	$1/n$	R^2
TP	0.022	242	0.910	1.187	0.654	0.992
NH_3	0.017	509	0.936	17.254	0.115	0.994
NO_3^--N	0.015	292	0.900	8.830	0.724	0.982

2.4 模拟径流污染物去除效果

通过动态试验,考察钒钛磁铁尾矿基质对各污染物的去除效果,如图 8 所示。由图 8 可知,在种植土、砂土基质和钒钛磁铁尾矿基质吸附拦截作用下,TP、NH_3 和 NO_3^--N 的去除率分别为 94.7%~98.0%、85.5%~91.4%和 63.2%~88.1%,种植土的吸附效果最优,而后依次为钒钛磁铁尾矿基质和砂土基质。钒钛磁铁尾矿基质的 TP、NH_3 和 NO_3^--N 出水平均浓度分别为0.028 mg/L、0.85 mg/L、1.474 mg/L,分别满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类、Ⅳ类和Ⅴ类水体标准。相较于种植土,砂土基质和钒钛磁铁尾矿基质的吸附率虽有所下降,但渗透速率优于种植土[36]。这表明可以利用钒钛磁铁尾矿代替工程砂,既可以改善设施渗透性能,也可以达到去除污染物的效果。

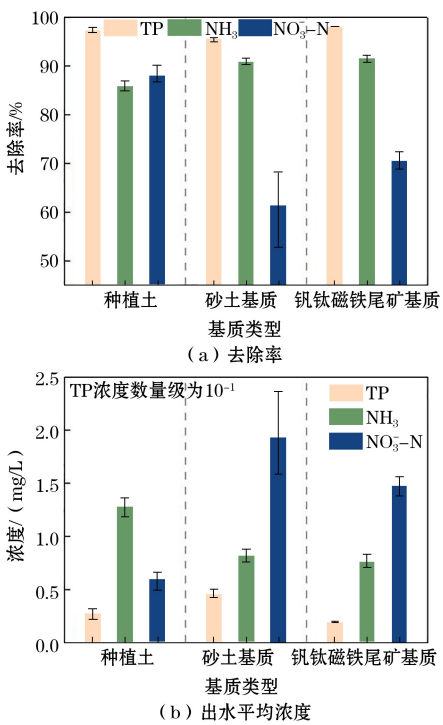


图 8 不同基质对污染物的去除效果

Fig.8 Removal effect of different substrates on pollutants

3 结论

(1) 钒钛磁铁尾矿的主要矿物成分为 SiO_2、CaO、Fe_2O_3、MgO 和 Al_2O_3,粒度集中在 0.3 mm 以上,微观形貌呈现丰富的喉道和孔隙,可提供大量吸附位点;钒钛磁铁尾矿渗透速率为 279 mm/h,符合生物滞留设施的设计要求。

(2) 钒钛磁铁尾矿浸出释放的主要重金属为 Cu、Cr、Mn 和 Zn,且重金属毒性浸出浓度低于限值标准。

(3) 钒钛磁铁尾矿基质对 TP 和 NH_3 的吸附过程符合准二级动力学方程,NO_3^--N 更符合准一阶方程,TP 和 NH_3 的吸附在 8 h 达到平衡,二者的吸附均由液膜扩散和颗粒内扩散多步骤共同控制。Freundlich 等温吸附模型能更好地描述钒钛磁铁尾矿基质对 TP、NH_3 和 NO_3^--N 的吸附过程,且以多分子层吸附为主。

(4) 钒钛磁铁尾矿基质对 TP 和 NH_3 的去除率为 97.2%、91.4%,而对 NO_3^--N 的去除率为 70.5%,去除效果优于砂土基质,出水平均浓度均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类、Ⅳ类和Ⅴ类水质标准。

参考文献(References):

[1] GUO D F, HOU H M, JUN L, et al. Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: evidence from a life cycle perspective[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 96: 106832.

[2] ANDREWS A, NYARKO E F, ADJAOTTOR A A, et al. Reuse and stabilization of sulphide mine tailings as fine aggregate for construction mortar[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131971.

[3] ZHU X Y, SUN N, HUANG Y, et al. Preparation of full tailings-based foam ceramics and auxiliary foaming effect of vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2021, 571(1): 121063.

[4] SHI X L, WANG X L, WANG X L. Dual waste utilization in cemented paste backfill using steel slag and mine tailings and the heavy metals immobilization effects[J]. Powder Technology, 2022, 403: 117413.

[5] 程达,李晨光,李玉灵,等.铁尾矿基质下 2 种人工灌木林特征及其土壤结构改良效益分析[J].西北林学院学报,2018,33(4):36-43.
CHENG Da, LI Chenguang, LI Yuling, et al. Characteristics and benefit of soil structure improvement of planting two shrubs in iron mining tailings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 36-43.

[6] MAHESWARI E, AMBUJAM N K. Ramifications due to urbanization and climate change on stormwater runoff and conduit efficiency:an integrated water management approach [J]. Journal of Water and Climate Change,2022,13(11):3951-3976.

[7] 戴伟,孟梦,卢培骏.基于自然解决方案的滨海城市雨洪规划策略研究[J].城市规划,2023,47(8):66-78.
DAI Wei, MENG Meng, LU Peijun. A study on the strategies of flood control planning for coastal city from the perspective of nature-based solutions [J]. City Planning Review,2023,47(8):66-78.

[8] 杨凤茹,陈亮,张雅卓,等.低影响开发雨水系统规划研究综述[J].水力发电学报,2021,40(6):62-78.
YANG Fengru, CHEN Liang, ZHANG Yazhuo, et al. Review of low impact development rainwater system planning[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(6):62-78.

[9] ZHENG K, SHAO Z Y, SHEN Y, et al. Comprehensive evaluation of stormwater pollutants characteristics, purification process and environment impact after low impact development practices[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,278:123509.

[10] 张伟,唐一凡,王晨,等.海绵城市生物滞留设施中土壤换填介质研究进展[J].环境工程,2023,41(8):277-285.
ZHANG Wei, TANG Yifan, WANG Chen, et al. Research progress on soil replacement medium in biological retention facilities for sponge city construction [J]. Environmental Engineering,2023,41(8):277-285.

[11] 姜登岭,张丹荣,何连生,等.生物滞留设施净化城市面源污染研究进展[J].环境工程技术学报,2019,9(1):62-78.
JIANG Dengling, ZHANG Danrong, HE Liansheng, et al. Advance of research on urban non-point source pollution control by bioretention facilities [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2019,9(1):62-78.

[12] AYOUBLU A S, VAFAKHAH M, POURGHASEMI R H. Efficiency evaluation of low impact development practices on urban flood risk [J]. Journal of Environmental Management,2024,356:120467.

[13] YANG L W, YU H, PENG Z X, et al. Application of iron-manganese oxide fillers in bioretention facility: Enhanced removal of antibiotics and conventional contaminants [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(3):112744.

[14] 张彤,冯燕,何明智,等.基于初期雨水径流氮磷去除效果的生物滞留设施填料层研究[J].中国农村水利水电,2020(6):82-86.
ZHANG Tong, FENG Yan, HE Mingzhi, et al. Filling layer's optimal ratio of bioretention facilities based on removal effect of nitrogen and phosphorus in initial rainwater runoff[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6):82-86.

[15] 潘俊奎,刘燕,屈昱安,等.复合填料生物滞留设施对径流污染物去除效果[J].人民黄河,2020,42(8):93-99.
PAN Junkui, LIU Yan, QU Yu'an, et al. Removal effect of runoff pollutants by bioretention of composite filler [J]. Yellow River,2020,42(8):93-99.

[16] CHEN X Y, FENG H B, LIANG Y F, et al. Filtration columns containing waste iron shavings, loofah, and plastic shavings for further removal of nitrate and phosphate from wastewater effluent[J]. Science of the Total Environment, 2023,876:162799.

[17] 张炜,韩成梅,李橙,等.剩余污泥改良生物滞留设施雨水径流控制效果[J].水力发电学报,2023,42(2):66-73.
ZHANG Wei, HAN Chengmei, LI Cheng, et al. Effect of rainwater runoff reduction by bioretention system improved with excess sludge [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(2):66-73.

[18] LI L, JIANG T, CHEN B J, et al. Integrated utilization of vanadium-titanium magnetite tailings for synthesis of lightweight foamed ceramics:effect of chemical composition on the properties and phase evolution [J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2022,8(2):646-657.

[19] 赵聪,彭道平,李芹,等.MgO改性赤泥复合材料对废水中氮磷的同步回收[J].中国环境科学,2022,42(1):135-145.
ZHAO Cong, PENG Daoping, LI Qin, et al. Simultaneous recover of nitrogen and phosphorus in wastewater by MgO modified red mud composite material [J]. China Environmental Science,2022,42(1):135-145.

[20] JIANG C B, PENG X Z, DANG Z G, et al. Temporal process and leaching characteristics for runoff pollutants in typical solid waste improved bioretention filters[J]. Water, Air, & Soil Pollution,2023,234:458.1-458.16.

[21] 李思敏,赵子兴,徐利,等.承德某钼尾矿重金属淋溶释放规律及影响因素[J].有色金属工程,2023,13(12):169-176.
LI Simin, ZHAO Zixing, XU Li, et al. Leaching characteristics and influencing factors of heavy metals from molybdenum tailings in chengde [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(12):169-176.

[22] 李畅,涂晓杰,秦雅琪,等.南宁市道路初期雨水径流污染物浓度分析[J].环境工程,2017,35(7):70-75.
LI Chang, TU Xiaojie, QIN Yaqi, et al. Analysis of pollutants concentration of initial rainwater in Nanning roads [J]. Environmental Engineering,2017,35(7):70-75.

[23] 常思露,高茜,魏佳宇,等.钙改性玉米芯生物炭对水中氮磷吸附特性[J].环境工程学报,2024,18(2):481-491.
CHANG Silu, GAO Xi, WEI Jiayu, et al. Adsorption characteristics of calcium-modified corncob biochar for nitrogen and phosphorus in water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2024,18(2):481-491.

[24] 孟依柯,王媛,汪传跃,等.木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水持留改良影响[J].环境科学,2021,42(12):5876-5883.

MENG Yike, WANG Yuan, WANG Chuanyue, et al. Improvement of nitrogen and phosphorus adsorption and stormwater retention capacity by hardwood biochar as an additive material in filler soil[J]. Environmental Science, 2021,42(12):5876-5883.

[25] 郭超,王璐瑶,谢潇,等.海绵城市LID设施运行效能衰减机理及寿命分析研究综述[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):45-52+61.
GUO Chao, WANG Luyao, XIE Xiao, et al. Research progress on the decay mechanism of operational performance and life analysis of sponge city LID facilities[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2022,33(5):45-52+61.

[26] 苏浩杰,吴俊峰,王召东,等.金属改性生物炭及其去除水中氮、磷的研究进展[J].工业水处理,2022,42(11):46-55.
SU Haojie, WU Junfeng, WANG Zhaodong, et al. Research progress of metal-modified biochar and its removal of nitrogen and phosphorus in water[J]. Industrial Water Treatment,2022,42(11):46-55.

[27] 柴宏祥,陈一凡,邵知宇,等.硫铁矿基质生物滞留系统对雨水径流的处理效能[J].中国给水排水,2022,38(3):112-117.
CHAI Hongxiang, CHEN Yifan, SHAO Zhiyu, et al. Performance of pyrite substrate bioretention system for treatment of rainfall runoff[J]. China Water & Wastewater, 2022,38(3):112-117.

[28] 孙彤,纪艺凝,李可,等.弱碱性玉米地土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J].环境化学,2020,39(9):2469-2478.
SUN Tong, JI Yining, LI Ke, et al. The speciation distributions of heavy metals in weakly alkaline maize soils and its potential ecological risk [J]. Environmental Chemistry,2020,39(9):2469-2478.

[29] 陈韬,李剑洋,邹子介,等.氧化还原电位和pH对生物滞留系统硝酸盐异化还原为氨作用的影响[J].科学技术与工程,2018,18(4):368-373.
CHEN Tao, LI Jianfeng, ZOU Zijie, et al. Effects of redox potential and pH on the effect of dissimilatory nitrate reduction to ammonium in bioretention system[J]. Science Technology and Engineering,2018,18(4):368-373.

[30] 蒋艳红,李安玉,严发,等.载镁香蕉秆基生物炭对氮磷的吸附性能研究[J].农业资源与环境学报,2018,35(6):559-567.
JIANG Yanhong, LI Anyu, YAN Fa, et al. Research on adsorption properties of Mg-loaded banana stalk biochar on nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2018,35(6):559-567.

[31] 张芙蓉,雷行,常冰,等.铝锰复合氧化物负载沸石对氨氮和磷的同步吸附特性[J].环境工程学报,2017,11(4):2163-2169.
ZHANG Furong, LEI Xing, CHANG Bing, et al. Characteristics of simultaneous adsorption of phosphate and ammonia nitrogen onto aluminum-manganese bimetal oxide coated zeolite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(4):2163-2169.

[32] 何琨,姜应和,周龙,等.铁改性生物炭吸附初雨中氮磷的试验研究[J].环境科学与技术,2022,45(7):78-86.
HE Kun, JIANG Yinghe, ZHOU Long, et al, Study on adsorption of nitrogen and phosphorus from initial rain by iron-modified biochar [J]. Environmental Science & Technology,2022,45(7):78-86.

[33] 林宏军,王建龙,周文韬,等.建筑垃圾对雨水径流中磷的吸附特性[J].环境化学,2020,39(3):726-734.
LIN Hongjun, WANG Jianlong, ZHOU Wentao, et al. Adsorption characteristics of construction waste for phosphorus removal from stormwater runoff[J]. Environmental Chemistry, 2020,39(3):726-734.

[34] 李娟,张伟,桑敏,等.生物滞留设施对雨水径流氮磷污染物净化机理和运行优化方式研究进展[J].环境工程,2020,38(4):77-82+113.
LI Juan, ZHANG Wei, SANG Min, et al. Review on purification mechanism and performance optimization methods of bioretention for nitrogen and phosphorus in urban stormwater [J]. Environmental Engineering,2020,38(4):77-82+113.

[35] 肖其亮,熊丽萍,彭华,等.不同基质组合对氮磷吸附能力的研究[J].环境科学研究,2022,35(5):1277-1287.
XIAO Qiliang, XIONG Liping, PENG Hua, et al. Nitrogen and phosphorus adsorption capacity of different substrate combinations [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(5):1277-1287.

[36] CHAI H X, MA J C, MA H Y, et al. Enhanced nutrient removal of agricultural waste-pyrite bioretention system for stormwater pollution treatment [J]. Journal of Cleaner Production,2023,395:136457.