曹东海,孙小婷,朱元浩,等.煅烧改性净水厂污泥去除雨水中典型污染物性能研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):769-775.
Cao D H, Sun X T, Zhu Y H, et al. Study on the performance of calcined modified water treatment plant sludge in removing typical pollutants from rainwater [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):769-775.

煅烧改性净水厂污泥去除雨水中典型污染物性能研究

曹东海[1],孙小婷[2],朱元浩[1],马思佳[1],张丝艺[1],董黎明[1*] (1.北京工商大学,中国轻工业清洁生产和资源综合利用重点实验室,国家环境保护食品链污染防治重点实验室,北京 100048；2.北京城市排水集团有限责任公司,北京 100044)

摘要：探讨煅烧改性净水厂污泥(DWTR)在去除雨水中典型污染物方面的性能.结果表明,DWTR 中的铝含量高达 14g/kg,显著高于一般土壤,且 XRD 图谱分析显示出较高的氧化铝峰,煅烧改性可进一步提高污泥的比表面积和表面特征;DWTR 对典型雨水污染物磷酸盐、氨氮和 Pb 离子的等温吸附特性均较好拟合 Langmuir 和 Freundlich 模型,动力学实验结果表明吸附过程更符合准二级动力学模型,说明吸附过程以化学吸附为主,同时伴随物理吸附,煅烧改性污泥的吸附性能普遍优于仅风干筛分污泥,且形态分析表明更多的吸附 Pb 能以相对稳定的碳酸盐结合态 Pb 存在;基于净水厂污泥基质的土壤柱对典型雨水污染物(正磷酸盐、Pb 离子、氨氮、COD)的去除率分别可达 100%、98%、86.94%和 85%,对北京地区 COD 为 65~85mg/L 的自然降雨和屋顶雨水的去除率可达 59%~78%,出水能满足 30mg/L 的地表水Ⅳ类水环境质量标准,表明风干筛分和煅烧改性后的净水厂污泥均具备用于城市人工湿地基质进行土壤替代和雨水净化的应用潜力.

关键词：净水厂污泥；煅烧改性；雨水净化；磷；COD
中图分类号：X703.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-0769-07

Study on the performance of calcined modified water treatment plant sludge in removing typical pollutants from rainwater.

CAO Dong-hai[1], SUN Xiao-ting[2], ZHU Yuan-hao[1], MA Si-jia[1], ZHANG Si-yi[1], DONG Li-ming[1*] (1.Key Laboratory of Cleaner Production and Integrated Resource Utilization of China National Light Industry, State Environmental Protection Key Lab of Food Chain Pollution Control, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China；2.Beijing Urban Drainage Group Co, Beijing 100044, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：769~775

Abstract：The aim of this study was to investigate the performance of calcination-modified Drinking Water Treatment Residual (DWTR) in removing typical pollutants in stormwater. The results showed that the aluminium contents of DWTR were as high as 14g/kg, which were significantly higher than that of general soil, and the XRD pattern showed higher alumina peaks, and the calcination modification could further improve the specific surface area and surface characteristics of the sludge; the isothermal adsorption characteristics of DWTR for the typical stormwater pollutants of phosphate, ammonia, nitrogen, and lead ions were better fitted to both Langmuir and Freundlich model, and the results of kinetic experiments showed that the adsorption process was more in line with the quasi-secondary kinetic model, indicating that the adsorption process was dominated by chemical adsorption and accompanied by physical adsorption, and the adsorption performance of calcined modified sludge was generally better than that of air-dried and screened sludge only, and the morphology analysis showed that more adsorbed lead could exist in the relatively stable carbonate-bound state of lead; The adsorption performance of soil columns based on the substrate of sludge from a water purification plant for typical The soil columns based on the water purification plant sludge matrix could remove 100%, 98%, 86.94% and 85% of the typical rainwater pollutants (orthophosphate, lead ion, ammonia nitrogen, COD), and 59% to 78% of the natural rainfall and rooftop rainfall in Beijing with a COD of 65~85mg/L, and the effluent could meet the environmental quality standard of 30mg/L for surface water IV, which indicated that both air-dried sieved and calcined modified sludge have the potential to be used for the treatment of water purification plant sludge. This indicates that both air-dried and calcined water purification plant sludge have the potential to be used as urban artificial wetland substrate for soil replacement and rainwater purification.

Key words：drinking water treatment residual；calcined modified；stormwater purification；phosphorus；COD

我国每年产生数百万吨的净水厂污泥(DWTR)[1],目前垃圾填埋场填埋仍是DWTR的主要处置方法[2-3].然而,DWTR 由于净水过程混凝工艺的使用,使其富含混凝剂中的铝等物质,且通常含有重金属等有害物质[4-5].研究发现DWTR对磷等污染物有去除作用,经柠檬酸钠、镧和锌改性后对磷和氨

收稿日期：2025-07-16

* 责任作者, 教授, donglm@btbu.edu.cn

氮等也有较好去除效果[1,6-7];经 100~700℃下煅烧改性后的 DWTR 对磷的理论饱和磷吸附量可达 6.26mg/g,且去除水中 Pb 和 Cd 等重金属也有显著效果[8-9].近年来,我国城市雨水径流引发的黑臭和营养化问题越来越突出.雨水径流分为道路、屋顶和自然雨水径流,其中道路径流的各项污染物浓度普遍较高,Pb 浓度可达 0.100~0.118mg/L[10-11].而屋顶和自然雨水由于受空气污染等大气沉降和屋面及雨水管道清洁的影响,也会表现出不同的污染特征,相关研究表明[12-14],雨水中含有氮(1.4~39mg/L)、磷(0.13~4.85mg/L)和 Pb 等重金属污染物,易导致水体富营养化及影响人类健康[15-17].人工湿地是常见的城市雨水管理及海绵城市建设的重要措施,其主要基质层的沙子或土壤需求量大,且其去除磷、氨氮和重金属效果不佳[18].本研究探讨 DWTR 及其煅烧改性后作为人工湿地基质对雨水中典型污染物磷酸盐、氨氮和 Pb 的去除性能,为 DWTR 资源化应用及城市雨水净化提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 实验材料及污泥预处理

采用北方某净水厂污泥,其重金属含量(干基)(mg/kg)汞 1.1,砷 3.7,铜 33,镍 31.1,铬 10.0, Pb11.2,和锌 19.9,均满足《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188-2009)[19]和《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)[20]中对应重金属限值要求.将含水率 60%的 DWTR 风干,再手工破碎并筛选出 1~3mm 颗粒,记为风干 DWTR(F-D).将 F-D 在 105℃下烘干 2h,再放入马弗炉中 550℃下煅烧 2h,冷却后破碎筛选出 1~3mm 的颗粒,记为煅烧 DWTR (D-D).实验药品包括磷酸二氢钾(KH_2PO_4)、氯化铵(NH_4Cl)和氯化铅($PbCl_2$).污染物分析方法:COD 采用重铬酸钾法,氨氮使用纳氏试剂分光光度计法,正磷酸盐采用钼酸铵分光光度计法, Pb 采用火焰原子吸收光谱法.实验设备包括冷场发射扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU-8010)、比表面积及孔隙测定仪(NOVA2000e)、高功率转靶多晶 X 射线衍射仪(XRD, Smartlab)、马弗炉(ZL2012 3)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP7200HS)、分光光度计(UV-1600)和火焰原子吸收光谱仪(Agilent 240FS)等.

1.2 污泥基质对正磷酸盐、氨氮、Pb 的等温吸附性能及准二级动力学模型

在 50mL 离心管中,分别加入 0.25gF-D 和 D-D,依次加入 30mL 不同初始浓度 5,10,15,20,25,30,35,40,50,60,80,100mg/L 的 KH_2PO_4 和 NH_4Cl,以及 30,40,50,80,100,120mg/L$PbCl_2$ 溶液,以 160r/min,(25±1)℃条件振荡 24h,4000r/min 离心 3min 后过 0.45μm 滤膜,测定溶液中正磷酸盐,氨氮和 Pb 离子浓度.此外,分别加入 30mL20mg/LKH_2PO_4,NH_4Cl 和 40mg/L$PbCl_2$ 溶液,分别振荡 0.5,1,2,4,6,8,10,12,16,24h 后离心过滤,测定各溶液中正磷酸盐,氨氮和 Pb 离子浓度并计算吸附量,模拟出吸附剂达到其最大吸附能力的点,模拟采用 Langmuir,Freundlich 等温模型[21],每个模型都与准一级动力学模型及准二级动力学模型相结合.

同时对吸附后污泥中的 Pb 形态参考 Tessier 连续提取法[22]分析易迁移的可交换态 Pb 和碳酸盐结合态 Pb.Tessier 连续提取法中可交换态是用中性盐溶液(如 $MgCl_2$)提取,对应吸附在颗粒物表面、易被交换的部分,测定其中 Pb 浓度;碳酸盐结合态:用乙酸-乙酸钠缓冲液提取,对应与碳酸盐结合的部分为碳酸盐结合态 Pb.

1.3 土壤柱的搭建及净化效果分析方法

依照《人工湿地污水处理工程技术规范》[23]构建实验室土壤柱,材质为 PVC 有机玻璃,模型尺寸:高度×直径=926mm×160mm,基质填充顺序为碎石、DWTR、陶粒和鹅卵石,主体基质层填充等高的 F-D 和 D-D,其余填充材料及高度保持一致,每个基质层末端设置 4 个出水口(F1~F4 和 D1~D4),如图 1 所示.

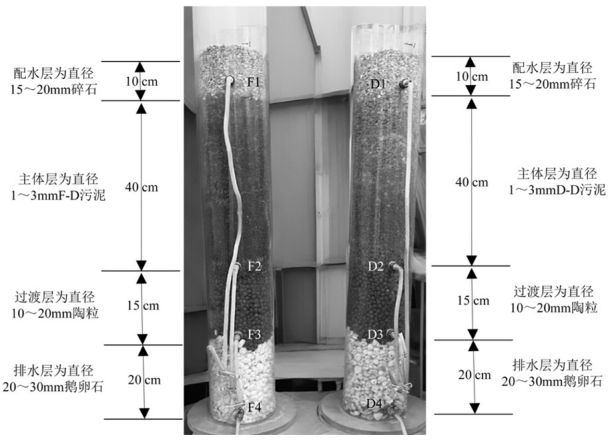


图 1 实验室土壤柱示意

Fig.1 Physical map of the soil column in the laboratory

分别选取 3 种正磷酸盐浓度为 0.5,1.0,1.5mg/L,氨氮浓度 2.0,2.5,3.0mg/L, COD 浓度 60,80,100mg/L 和 Pb 浓度 0.2,0.5,1mg/L 的溶液进行模拟雨水净化实验,每组浓度重复 10 次.每个土壤柱进水 1.2L,浸没超过配水层 3cm,2h 后测定不同层出水口污染物浓度.在 2023 年雨季 6~8 月期间,采集校园自然降水和屋顶雨水开展相同净化实验,2h 后在不同出水口分别取样测定正磷酸盐,氨氮,COD 和 Pb 的浓度.

2　结果与讨论

2.1　煅烧改性净水厂污泥的理化特性

通过 SEM 和 XRD 对 F−D 和 D−D 进行了表征分析,如图 2(a)所示.F−D 的表面是一个平坦而致密的结构,表面粘附着许多小颗粒,而通过煅烧处理,D−D 的表面粗糙不平,内部具有较多的孔隙和凹陷,从而使得 D−D 比表面积增加,为微生物生长和吸附反应提供了更大的空间,有助于吸附能力提高[24].如图 2(b)所示,XRD 图谱中显示出较高的氧化铝峰,说明氧化铝含量均较高,这与混凝净水一般采用过量铝基混凝剂有关,Wu 等[25]研究表明较高的氧化铝含量可以更好的去除磷.表 1 显示通过煅烧处理 DWTR 基质的 D−D 中有机质含量为 0,且 D−D 的表观密度减少了 0.072g/cm^3,表明单位体积的质量更小.D−D 比表面积(81.35m^2/g)相较于 F−D 比表面积(50.4m^2/g)增加了 30.95m^2/g,两种 DWTR 均高于 Li[26]所制备的 DWTR 的比表面积(43.8m^2/g),同时空隙率和结晶度分别增加了 7.59%和 49.1%,增加了 D−D 与污染物的接触面积和机械强度,D−D 和 F−D 中的铝含量变化不大,达到了 14g/kg,远高于一般湿地土壤中铝的平均含量 3.23~6.91g/kg[27],较高的铝含量对水体磷的去除有明显效果[25].

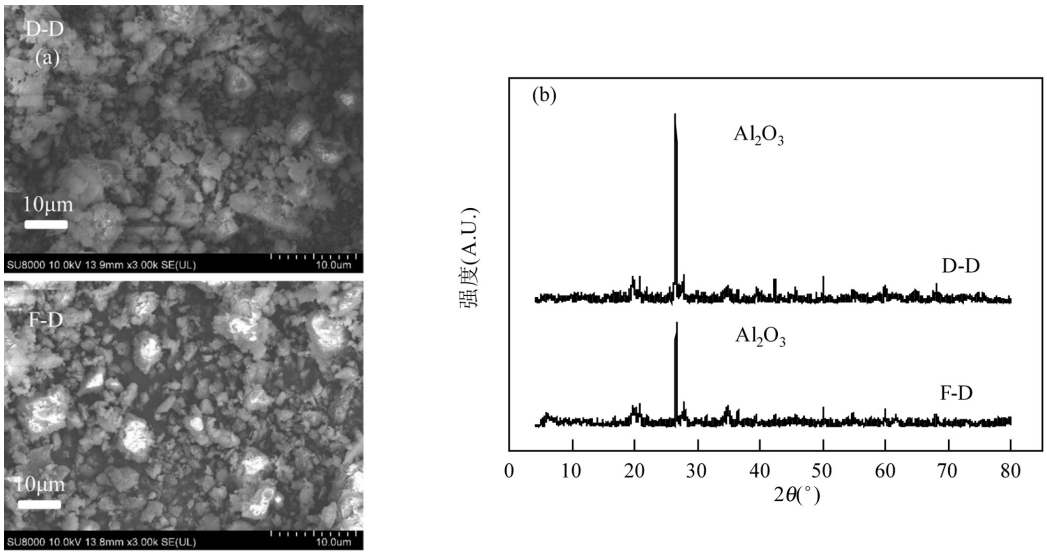


图 2　不同预处理条件下 DWTR 的扫描电镜图、XRD 能谱图

Fig.2　Scanning electron microscope image and XRD energy spectrum of DWTR under different pretreatment conditions

表 1　DWTR 理化性质参数

Table 1　Parameters of physical and chemical properties of DWTR

参数	F−D	D−D
有机质含量(%)	17.32	0
堆积密度(g/cm^3)	0.7398	0.6369
表观密度(g/cm^3)	1.74	1.668
结晶度(%)	26	75.1
空隙率(%)	55.65	63.24
比表面积(m^2/g)	50.4	81.35
铝(g/kg)	14.6	14.9
钙(g/kg)	28.5	21.1

2.2　污泥煅烧改性对磷、氨氮和 Pb 的吸附性能

2.2.1　等温吸附　如表 2 所示,从 R^2(0.81~0.95)来看,两种 DWTR 基质对 3 种典型雨水污染物的吸附特性均符合两模型,刘译阳等[1]研究指出,DWTR 吸附正磷酸盐过程中化学吸附占据主要作用,该吸附过程为单层吸附,是一个自发的吸热反应,体系自由度不断增大;罗书舟等[6]研究表明,DWTR 主要通过离子交换作用去除水中氨氮;Zubrytė 等[28]研究结果,表明 DWTR 通过化学沉淀以及表面络合实现对 Pb

的去除;说明 DWTR 吸附由物理吸附和金属离子(如铝离子)的化学吸附共同驱动.F-D 对正磷酸盐的理论吸附饱和量(35.4mg/g)是 D-D 的 4 倍,F-D 的理论氨氮饱和吸附量(20.81mg/g)是 D-D 的 3 倍,但 D-D 的吸附能力(K 更大)更强,对于缓冲能力来说 D-D 的 $K_f \cdot q_m$(0.131L/mg)大于 F-D.D-D 对 Pb 理论吸附饱和量(10.565mg/g)是 F-D 的 2 倍.Freundlich 模型中,D-D 的 $1/n$ 较小,表明其吸附能力和效果优于 F-D.与已有文献对磷[1,8]、氨氮[6]和 Pb[28]的等温吸附结果对比,本研究吸附量和吸附能力都要略优.

表 2 DWTR 基质对典型污染物的等温吸附方程拟合参数

Table 2 Fitting parameters of isothermal adsorption equations for typical pollutants on DWTR substrates

吸附剂	污染物	Langmuir 等温吸附模型				Freundlich 等温吸附模型		
		q_m(mg/g)	K_l(L/mg)	R^2	$K_f \cdot q_m$(L/mg)	K_f	$1/n$	R^2
F-D	PO_4^{3-}	35.40	0.002	0.901	0.088	0.128	0.87	0.909
	NH_3-N	20.81	0.001	0.933	0.030	0.029	0.981	0.93
	Pb^{2+}	5.946	0.018	0.870	0.107	0.337	0.598	0.947
D-D	PO_4^{3-}	9.08	0.01	0.812	0.131	0.443	0.541	0.855
	NH_3-N	7.171	0.007	0.952	0.054	0.089	0.785	0.950
	Pb^{2+}	10.565	0.010	0.938	0.106	0.747	0.490	0.869

2.2.2 吸附动力学研究 由表 3 可知,准二级动力学方程能更好拟合 DWTR 吸附磷的动力学过程,说明吸附过程是化学吸附,D-D 的吸附容量(q_{e2}=2.177mg/g)高于 F-D(q_{e2}=1.11mg/g),两种 DWTR 基质的吸附容量均高于文献制备的 DWTR(q_{e2}=0.831mg/g)[8],表明 D-D 对正磷酸盐的吸附能力更强.对于氨氮吸附,准一级和准二级动力学拟合效果均较好,F-D 和 D-D 的吸附容量相近,但 F-D 的吸附速率常数(k_2=21g/(mg·h)显著高于 D-D 基质(k_2=11.652g/(mg·h),表明 F-D 对氨氮的吸附速率更快.对于 Pb 的吸附,准一级和准二级动力学模型的拟合效果均不理想(R^2<0.6),但准二级动力学模型的 R^2 相对较高,表明 Pb 的吸附过程更符合准二级动力学模型.D-D 的吸附容量(q_{e2}=3.078mg/g)高于 F-D(q_{e2}=2.48mg/g),表明 D-D 对 Pb 的吸附能力更强.研究表明 DWTR 基质对 3 种污染物的吸附过程更符合准二级动力学模型,吸附过程以化学吸附为主,同时伴随物理吸附[26].经过煅烧改性的 D-D 基质在吸附容量和速率上普遍优于 F-D 基质,尤其是在正磷酸盐和 Pb 的吸附中表现更为显著.

表 3 DWTR 基质对典型污染物的吸附动力学拟合及相关参数

Table 3 Adsorption kinetic fits and related parameters for typical pollutants on DWTR substrates

吸附剂	污染物	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
		k_1 (/h)	q_{e1} (mg/g)	R^2	k_2 [g/(mg·h)]	q_{e2} (mg/g)	R^2
F-D	PO_4^{3-}	3.560	1.07	0.283	6.415	1.11	0.643
	NH_3-N	3.661	0.213	0.633	21	0.23	0.657
	Pb^{2+}	3.149	2.373	0.291	2.399	2.487	0.469
D-D	PO_4^{3-}	0.265	1.901	0.767	0.167	2.177	0.806
	NH_3-N	3.809	0.357	0.559	11.652	0.389	0.67
	Pb^{2+}	2.682	2.882	0.318	1.339	3.078	0.584

2.2.3 吸附后污泥中的 Pb 形态 如图 3 所示,吸附前的污泥中易迁移的 Pb 形态含量仅为 0.4mg/g,且以可交换态为主,而在吸附后可交换态及碳酸盐结合态均有显著增加,D-D 和 F-D 中碳酸盐结合态 Pb 含量分别为 1.55mg/g 和 1.17mg/g,占比更大.研究表明可交换态 Pb 易被雨水淋洗释放 Pb 离子并产生迁移和相应吸收[29-31].而碳酸盐结合态 Pb 相对稳定,在碱性或中性条件下,碳酸盐结合态 Pb 不易溶解,迁移能力较弱,仅在酸性条件下存在溶解释放风险.实验结果表明 DWTR 吸附后的部分 Pb 离子仍然存在再次释放的风险.

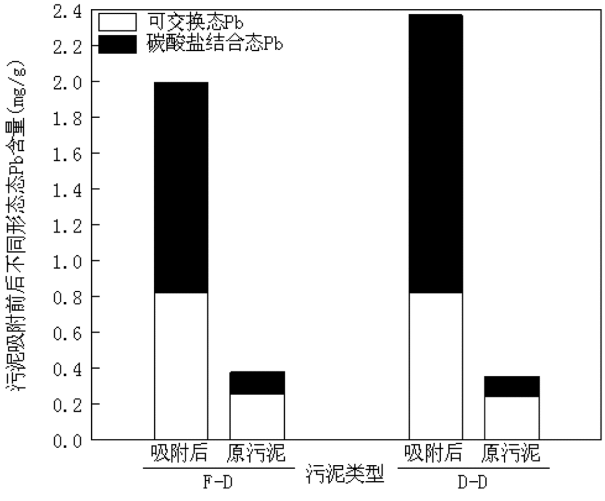


图 3 污泥吸附前后 Pb 的形态对比

Fig.3 Different fractions of Pb before and after sludge adsorption

2.3 土壤柱对正磷酸盐、氨氮、Pb 及 COD 的去除

如图 4 所示,整体来看,DWTR 基质的土壤柱对典型雨水污染物的去除率顺序为:正磷酸盐>Pb>氨

氮>COD,且连续 10 次实验后仍保持较好的净化效果,多数污染物在填充 DWTR 的末端第二出水口已完成污染物的净化,下部的陶粒和鹅卵石主要起骨架支撑作用.图 4(a)中以 D−D 和 F−D 为主体基质层的土壤柱对正磷酸盐去除率接近 100%,去除率显著优于文献报道 DWTR 的 82.5%去除率[8].图 4(b)表明 D−D 和 F−D 对 3 种氨氮浓度的平均去除率分别为 79.95%和 86.94%,显著优于文献对氨氮模拟废水的去除率 36.62%[6];图 4(c)中的 F−D 和 D−D 对 3 种 Pb 浓度平均去除率都大于 98%,略优于 DWTR 直接加入 Pb 模拟废水中的最高去除率 95%[25].对上述 3 种典型雨水污染物的净化效果表明了本实验的 DWTR 的较高品质及预处理成效.此外,图 4(d)表明,D−D 和 F−D 基质的 COD 去除率都在 85%以上,明显高于无烟煤、陶瓷滤料和废石、钢渣等填料对 COD 的去除[15,32].对比来看,煅烧改性后的污泥基质的污染物去除效果略优于仅风干筛分的污泥,但预处理条件及经济成本较高.综合来看,对于初始浓度相对低的典型雨水污染物,风干筛分的给水厂污泥已能满足基本净化要求.

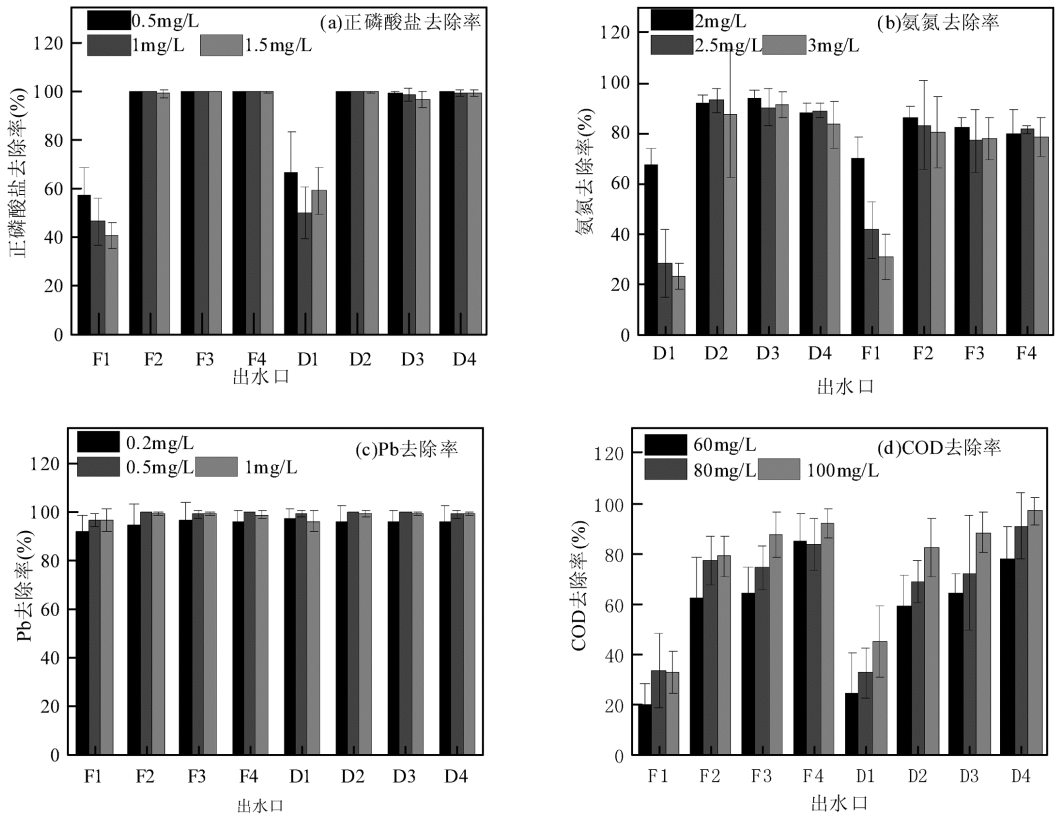


图 4　DWTR 对正磷酸盐、氨氮、Pb 和 COD 去除效果图

Fig.4　Plot of the effect of DWTR on orthophosphate, ammonia, lead and COD removal

2.4　真实雨水净化效果分析

目前一些城市湿地主要作为海绵城市建设用于收集自然降水和屋顶降水,路面雨水多进入城市下水道.选择北京 6~8 月汛期的典型自然降水及屋顶采集雨水进行土壤柱模拟净化,由于收集雨水中氨氮和磷酸盐的含量都低于检测限,因此仅 COD 的去除结果如图 5 所示.可以看出,自然降雨的 COD 约 65mg/L,屋顶雨水的 COD 普遍高于自然降雨 5~20mg/L,土壤柱对雨水中的 COD 去除率达到 59%~78%,出水基本能满足 30mg/L 的地表水Ⅳ类水环境质量标准,优于文献报道改性给水厂污泥 55.3%的 COD 去除率[33],与土壤柱对模拟雨水 COD 的去除率一致,说明 DWTR 可以作为人工湿地主体基质层对雨水中污染物进行净化.此外,DWTR 基质截留的营养物质可促进湿地植物根系及根际微生物生长,根系分泌物可刺激微生物分泌胞外聚合物(EPS),有研究表明可使 Pb、Cd 的吸附容量提升 50%,同时降低营养盐淋失风险[34].

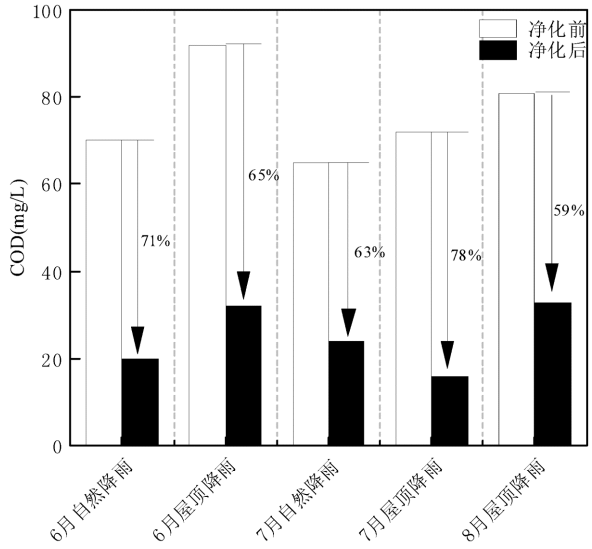


图 5 DWTR 土壤柱对真实雨水的净化

Fig.5 The removal rate of real rainwater with DWTR soil column

3 结论

3.1 净水厂污泥的表征结果表明污泥中的铝含量高达 14g/kg,显著高于一般土壤,且 XRD 图谱中显示出较高的氧化铝峰,这和混凝净水一般采用过量铝基混凝剂有关,有利于净水厂污泥的进一步资源化应用,煅烧改性可进一步提高污泥的比表面积和表面吸附特性.

3.2 净水厂污泥对典型雨水污染物磷酸盐、氨氮和 Pb 的等温吸附特性均较好拟合 Langmuir 和 Freundlich 模型,表明金属离子(如铝)的化学吸附和物理吸附共同驱动,煅烧改性后污泥的吸附能力和效果要优于风干筛分污泥.动力学实验结果表明吸附过程更符合准二级动力学模型,说明吸附过程以化学吸附为主,同时伴随物理吸附.经过煅烧改性的污泥在吸附容量和速率上普遍优于风干筛分污泥,尤其是在正磷酸盐和 Pb 的吸附中表现更为显著.吸附前后的污泥 Pb 形态分析表明,更多的吸附 Pb 以相对稳定的碳酸盐结合态 Pb 存在.

3.3 将净水厂污泥用于人工湿地模拟土壤柱主体基质进行不同初始浓度的污染物去除.结果表明,土壤柱对典型雨水污染物的去除率顺序为:正磷酸盐>P>氨氮>COD,且连续 10 次实验后仍保持较好的净化效果,去除率分别可达 100%、98%、86.94%、85%,煅烧改性后的污泥基质的污染物去除效果略优于仅风干筛分的污泥,但预处理条件及经济成本较高.综合来看,对于初始浓度相对低的典型雨水污染物,风干筛分的给水厂污泥已能满足基本净化要求.

3.4 基于净水厂污泥基质的土壤柱用于北京 6~8 月的真实雨水净化,结果表明土壤柱对 COD 为 65~85mg/L 的自然降雨和屋顶雨水的去除率可达 59%~78%,出水能满足 30mg/L 的地表水Ⅳ类水环境质量标准,说明 F-D 和 D-D 均具备用于城市人工湿地基质的应用潜力.

参考文献:

[1] 刘译阳.净水厂污泥改性优化及其污水吸附除磷特性研究 [D]. 济南:济南大学, 2023.
Liu Y Y. Optimization of sludge modification in water treatment plant and its phosphorus adsorption properties for wastewater treatment. [D]. Jinan: University of Jinan, 2023.

[2] Nayeri D, Mousavi S A. A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge [J]. Journal of Environmental Management, 2022,319:115649.

[3] Li P, Sun F Y, Dong Y, et al. Utilization of drinking water treatment sludge with coal fly ash to make permeable bricks for low impact development [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025,212: 107932.

[4] Shen C, Zhao Y Q, Li W X, et al. Global profile of heavy metals and semimetals adsorption using drinking water treatment residual [J]. Chemical Engineering Journal, 2019,372:1019-1027.

[5] 吕宗玮.净水厂污泥基活性炭制备优化及其去除嗅味物质效能研究 [D]. 济南:济南大学, 2024.
Lv Z W, Optimization of the preparation of sludge-based activated carbon for water purification plants and its removal of odorous. [D]. Jinan: University of Jinan, 2024.

[6] 罗书舟,王东田,魏 杰.改性净水污泥颗粒对水中氨氮的动态吸附研究 [J]. 工业水处理, 2021,41(12):66-71,101.
Luo S Z, Wang D T, Wei J. Dynamic adsorption of ammonia nitrogen in water by modified water treatment sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2021,41(12):66-71,101.

[7] 彭相仕,张彦平,王翔宇,等.热改性铁污泥除磷特性研究 [J]. 河北工业大学学报, 2023,52(3):90-96.
Peng X S, Zhang Y P, Wang X Y, et al. Study on phosphorus removal characteristics of thermally modified iron sludge. [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2023,52(3):90-96.

[8] 金弘毅,唐雪平,庄马展,等.净水厂污泥/河道淤泥混合煅烧制备除磷材料及其除磷性能研究 [J]. 环境工程, 2023,41(8):209-217.
Jin H Y, Tang X P, Zhuang M Z, et al. Preparation of phosphorus removal material by calcination of water treatment plant sludge and river silt and its performance [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8):209-217.

[9] Abo-El-Enein S A, Shebl A. Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal [J]. Applied Clay Science, 2017,146:343-349.

[10] Gan H Y, Zhuo M N, Li D Q, et al. Quality characterization and

impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008,140(1):147−159.

[11] 张　仪,姜应和,程　静,等.基于水质水量监测的武汉市雨水径流污染特征分析 [J]. 水电能源科学, 2022,40(1):52−55.
Zhang Y, Jiang Y H, Cheng J, et al. Analysis of pollution characteristics of rainwater runoff in Wuhan city based on water quality and quantity monitoring [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1):52−55.

[12] Wang J L, Zhang P P, Yang L Q, et al. Adsorption characteristics of construction waste for heavy metals from urban stormwater runoff [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015,23(9):1542−1550.

[13] Zhang L X, Zhao B, Xu G, et al. Characterizing fluvial heavy metal pollutions under different rainfall conditions: Implication for aquatic environment protection [J]. Science of The Total Environment, 2018, 635:1495−1506.

[14] 赫　恬,薛重华,孙家荣,等.城市雨水径流颗粒物中氮磷赋存特征及其影响因子研究进展 [J]. 环境工程, 2024,42(8):61−71.
He T, Xue C H, Sun J R, et al. Research progress on forms and influencing factors of nitrogen and phosphorus in particulate matters in urban stormwater runoff [J]. Environmental Engineering, 2024,42(8): 61−71.

[15] Babatunde A O, Zhao Y Q, Zhao X H Alum sludge−based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: Concept, design and performance analysis [J]. Bioresource Technology, 2010,101(16):6576−6579.

[16] Göbel P, Dierkes C, Coldewey W G Storm water runoff concentration matrix for urban areas [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1):26−42.

[17] Reddy K R, Xie T, Dastgheibi S. Evaluation of biochar as a potential filter media for the removal of mixed contaminants from urban storm water runoff [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014,140(12).

[18] 刘小婷,张翔凌,沈　俊,等.人工湿地常用填料及其不同改性方式对主要污染物净化效果研究进展 [J]. 净水技术, 2025,44(1):16−25, 177.
Liu X T, Zhang X L, Shen J, et al. Research advances on common fillers and different modification modes of constructed wetlands for purification effectiveness of main pollutants [J]. Water Purification Technology, 2025,44(1):16−25,177.

[19] GB/T 24188−2009　城镇污水处理厂污泥泥质 [S].
GB/T 24188−2009　Quality of sludge from municipal wastewater treatment plant [S].

[20] GB/T 23486−2009　城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质 [S].
GB/T 23486−2009　Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge used in gardens or parks [S].

[21] Tejada−Tovar C, Villabona−Ortíz Á, Gonzalez−Delgado Á, et al. Simulation of Pb(II) and Ni(II) adsorption in a packed column: Effects of bed height, flow rate, and initial concentration on performance metrics [J/OL] 2025,13(7):2141.

[22] Sut−Lohmann M, Ramezany S, Kästner F, et al. Using modified Tessier sequential extraction to specify potentially toxic metals at a former sewage farm [J]. Journal of Environmental Management, 2022,304:114229.

[23] HJ 2005−2010　人工湿地污水处理工程技术规范 [S].
HJ 2005−2010　Technical specification of constructed wetlands for wastewater treatment engineering [S].

[24] 马锋锋,郑旭东,张　建,等.污泥生物炭对水体中磷的吸附 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1347−1356.
Ma F F, Zheng X D, Zhang J, et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution by sludge biochar [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1347−1356.

[25] Wu S J, Li R L, Xie S G, et al. Depth−related change of sulfate−reducing bacteria community in mangrove sediments: The influence of heavy metal contamination [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019,140: 443−450.

[26] Li X Q, Cui J, Pei Y S. Granulation of drinking water treatment residuals as applicable media for phosphorus removal [J]. Journal of Environmental Management, 2018,213:36−46.

[27] Yu Y, Zhang J P, Qin J F, et al. Characteristics and influencing factors of metal distribution in different wetlands of the Liaohe Delta, Northeastern China [J]. Frontiers in Marine Science, 2022,9.

[28] Zubrytė E, Gefenienė A, Kaušpėdienė D, et al. Fast removal of Pb(II) and Cu(II) from contaminated water by groundwater treatment waste: impact of sorbent composition [J]. Separation Science and Technology, 2020,55(16):2855−2868.

[29] Elkhatib E A, Moharem M L, Saad A F, et al. Effective elimination of lead from polluted wastewater utilizing a novel nanocomposite derived from byproducts of drinking water industry [J]. BMC Chemistry, 2025, 19(1):188.

[30] Kabata−Pendias A, Mukherjee A B. Trace elements from soil to human [J]. Trace Elements from Soil to Human, 2007:1−550.

[31] Sparks D L, Singh B, Siebecker M G. Chapter 5 − Sorption phenomena on soils [M]. Environmental Soil Chemistry (Third Edition), 2024: 203−281.

[32] Ure A. M, Quevauviller P, Muntau H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European communities [J]. International journal of environmental analytical chemistry, 1993,51: 135−151.

[33] Yang L Wei J, Zhang YM, et al. Reuse of acid coagulant−recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater [J]. Applied Surface Science, 2014,305:337−346.

[34] Wang Z, Chen S, Yang L, et al. Remediation strategies of biochar and microbial inoculum for PAHs−contaminated soil: Quorum sensing−mediated PAHs degradation and element cycling [J]. J Hazard Mater, 2025,490:137854.

作者简介：曹东海(2000−),男,辽宁朝阳人,北京工商大学硕士研究生,研究方向为清洁生产与资源化利用.2513587331@qq.com.