DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240946

# 雨水生物滞留设施改良填料的氮磷淋出和吸附特性

王雨婕,李京玲,杨 淇,牛辰宇,赵鹏宇

(太原理工大学水利科学与工程学院,山西 太原 030024)

**摘要**:现阶段雨水生物滞留设施改良填料存在氮磷及重金属淋出和污染物去除效果不稳定的问题。为筛选出安全高效的改良材料,选取木屑生物炭、蛭石、沸石、粉煤灰和赤泥5种不同类型的材料进行批量淋洗试验和等温吸附试验,探究各材料的污染物淋出和氮、磷吸附特性。结果表明,木屑生物炭和蛭石的氮磷营养盐淋出量最小,符合地表Ⅲ类水水质标准;木屑生物炭和沸石无重金属(铁、铝、铅、镉、锰、铜)淋出污染的风险,蛭石、赤泥和粉煤灰3种材料淋出液中超标重金属主要为Fe、Al;相比之下,生物炭对$NH_4^+$-N和$PO_4^{3-}$-P的吸附效果显著,在典型雨水径流浓度(2 mg/L的$NH_4^+$-N和1 mg/L的$PO_4^{3-}$-P)下,可吸附0.157 mg/g的$NH_4^+$-N和0.049 mg/g的$PO_4^{3-}$-P;木屑生物炭对$NH_4^+$-N的吸附和赤泥对$PO_4^{3-}$-P的吸附符合Freundlich模型,其他材料更适合用Langmuir等温吸附模型来描述。从污染物淋出特性和吸附性能方面综合考虑,可选择生物炭作为生物滞留设施的改良填料。

**关键词**:生物滞留设施;淋出特性;吸附特性;改良填料;木屑生物炭

**中图分类号**:X52 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)05-0071-05

## 1 引言

山西黄土地区城市内涝频发、雨水径流氮磷污染严重,水资源短缺,水生态脆弱,这使得该地区海绵城市建设愈发重要和迫切[1-2]。生物滞留设施作为海绵城市低影响开发的主要技术措施,由于能实现水文削峰和污染物控制的双重效应,因而被全世界推广应用,然而传统生物滞留系统(土+沙组合)由于吸附能力和水力停留时间短往往表现出对雨水径流氮、磷污染物的去除效果不理想。为提高生物滞留设施对氮、磷污染物的去除效果,对生物滞留系统填料改良进行了大量的研究。李家科等[3]在传统生物滞留系统中添加粉煤灰,发现其对氮、磷污染物的综合去除率可达85.03%,净化效果显著;孟依柯等[4]利用生物炭改良填料土,使$NH_4^+$-N和$PO_4^{3-}$-P的去除率分别由31.30%、61.90%提高至64.10%、90.00%,最大吸附量分别提高了2.80、1.28倍。目前,由于所添加改良材料大多为具有较大比表面积和吸附能力的有机再循环利用材料、工业固废和矿物等材料,因此在作为改良材料添加到生物滞留设施后存在一定的污染物淋出风险,对水环境构成潜在危害。但目前仍缺乏有关改良填料污染物淋出规律和对雨水径流中典型氮磷浓度的吸附研究。为此,本文选取木屑生物炭、蛭石、沸石、粉煤灰、赤泥5种不同类型的改良材料,通过批量淋洗和吸附试验,评估了不同改良填料对氮磷营养物质和重金属的淋出风险,分析了其对北方地区雨水径流污染物典型浓度下的吸附规律,筛选安全高效的改良材料,以期为黄土生物滞留系统传统填料改良提供科学依据。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

试验选用木屑生物炭、蛭石、沸石、粉煤灰、赤泥5种材料。其中木屑生物炭由枣木在600 ℃下热解制成,所选材料均具有比表面积大、吸附性能好等优点。5种改良材料的粒径大小及物质组成

**收稿日期**:2024-05-23,**修回日期**:2024-08-01

**基金项目**:山西省基础研究计划资助项目(202303021211048,201901D111059);山西省回国留学人员科研资助项目(2023-051)

**作者简介**:王雨婕(2000-),女,硕士研究生,研究方向为水污染控制与生态修复,E-mail:3136182349@qq.com

**通讯作者**:李京玲(1979-),女,博士、副教授,研究方向为水污染控制与生态修复,E-mail:lijingling@tyut.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

见表 1。

**表 1 材料粒径及物质组成**

**Tab. 1 Size and composition of different fillers**

| 材料 | 粒径/mm | 物质组成 |
|---|---|---|
| 生物炭 | <0.075 | 有机碳(72.6%)、灰组分(11.3%)、$Na_2O$(0.09%)、$Al_2O_3$(0.03%)、$Fe_2O_3$(0.02%) |
| 蛭石 | <0.075 | $SiO_2$(42.3%)、$Fe_2O_3$(23.4%)、$Al_2O_3$(14.7%)、MgO(11.6%)、$K_2O$(5.9%) |
| 粉煤灰 | <0.075 | $SiO_2$(46.6%)、$Al_2O_3$(33.2%)、CaO(4.2%)、$Fe_2O_3$(3.2%)、MgO(1.5%) |
| 沸石 | <0.075 | $SiO_2$(48.5%)、$Al_2O_3$(25.8%)、$Na_2O$(5.64)、$K_2O$(2.95%)、CaO(2.36%) |
| 赤泥 | <0.075 | $Fe_2O_3$(44.7%)、$Al_2O_3$(22.6%)、$SiO_2$(14.6%)、$Na_2O$(10.1%)、$TiO_2$(5.4%) |

### 2.2 淋洗试验

为研究不同改良材料污染物淋出特性,通过连续淋洗试验分析淋出液氮磷营养盐及重金属离子含量变化规律。参考孟依柯等[5]的淋洗试验方法,设置固液比为 1∶20,淋洗时长为 24 h。5 种材料以 70 ℃烘干至恒重后各取 8 g,分别放入装有 160 mL 去离子水的 250 mL 锥形瓶中,在恒温振荡器中以 25 ℃的温度、150 r/min 的转速振荡 24 h。振荡完成后,用离心机将淋出液以 5 000 r/min 的转速离心 20 min,取上清液测定其铵态氮($NH_4^+$-N)、磷酸盐($PO_4^{3-}$-P)、总氮(TN)、总磷(TP)及重金属(铁、铜、锌、镉、铅、铝)的含量。重复上述步骤,共淋洗 8 次,每种材料做 2 组重复试验。

### 2.3 吸附试验

为探索不同材料对雨水径流氮磷污染物的吸附效果,对其进行不同氮磷浓度下的等温吸附试验。参考同行吸附试验研究[5-6],试验选用固液比为 1∶50,设定吸附时长为 24 h。利用分析纯氯化铵($NH_4Cl$)和分析纯磷酸二氢钾($KH_2PO_4$)配置浓度为 0.5、1.0、2.0、4.0、7.0、10.0 mg/L 和 0.2、0.6、1.0、1.4、1.8、2.2 mg/L 的 $NH_4^+$-N/$PO_4^{3-}$-P 溶液。5 种低温烘干的材料各取 2 g,放入 250 mL 锥形瓶中,分别加入上述浓度的溶液 100 mL,以 25 ℃的温度、150 r/min 的转速振荡 24 h。振荡完成后,取液离心,将上清液过滤后测定其中 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的含量。每种材料做 2 组重复试验。

### 2.4 数据分析

$NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附量和去除率计算公式分别为:

$$q_e=(c_0-c_e)V/m \tag{1}$$

$$\eta=[(c_0-c_e)/c_0]\times 100\% \tag{2}$$

式中,$q_e$ 为平衡吸附量,mg/g;$c_0$、$c_e$ 分别为吸附前、吸附平衡后溶液中 $NH_4^+$-N、$PO_4^{3-}$-P 的浓度,mg/L;$V$ 为溶液体积,L;$m$ 为材料质量,g。

各改良材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的等温吸附模型分别采用 Langmuir、Freundlich 进行描述。即:

$$q_e=q_{max}\frac{K_L c_e}{1+K_L c_e} \tag{3}$$

$$q_e=K_F c_e^{1/n} \tag{4}$$

式中,$q_{max}$ 为理论饱和吸附容量,mg/g;$K_L$ 为 Langmuir 模型参数;$K_F$ 为 Freundlich 模型参数;$n$ 为 Freundlich 特征常数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 材料污染物淋出特性分析

#### 3.1.1 氮磷淋出特性分析

不同改良材料的氮磷营养盐淋出情况分别见表 2、3。从氮、磷的总淋出量看,5 种材料中赤泥的氮、磷淋出量远高于其他材料,氮、磷淋出量最小的分别为蛭石、木屑生物炭,淋出量分别为 0.030、0.006 mg/g,仅为赤泥的 18.5%、5.7%。这主要是由于生物炭在热解过程中,大部分氮磷元素在高温下被氧化为稳定的化合物,蛭石属于矿物材料,自身氮磷含量很少。从氮、磷的首次淋出浓度和首次淋出率来看,只有赤泥的首次淋出浓度超出了地表Ⅲ类水水质标准($NH_4^+$-N/TN≤1 mg/L、TP≤0.2 mg/L),其他材料均未超标;赤泥和粉煤灰的氮、磷首次淋出率明显高于其他材料,最高可达 57.52%、37.06%,是其他材料的 1.46~2.42 倍。

**表 2 材料在整个淋洗过程中的氮淋出情况**

**Tab. 2 Leaching conditions of nitrogen during the whole leaching process**

| 材料 | $NH_4^+$-N | | | | TN | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总淋出量/(mg·g$^{-1}$) | 首次淋出量/(mg·g$^{-1}$) | 首次/总淋出量/% | 首次淋出浓度/(mg·L$^{-1}$) | 总淋出量/(mg·g$^{-1}$) | 首次淋出量/(mg·g$^{-1}$) | 首次/总淋出量/% | 首次淋出浓度/(mg·L$^{-1}$) |
| 生物炭 | 0.042 | 0.018 | 43.60 | 0.390 | 0.078 | 0.031 | 39.39 | 0.924 |
| 蛭石 | 0.023 | 0.009 | 39.13 | 0.021 | 0.030 | 0.010 | 33.33 | 0.062 |
| 沸石 | 0.039 | 0.015 | 38.80 | 0.267 | 0.056 | 0.019 | 33.28 | 0.431 |
| 粉煤灰 | 0.050 | 0.025 | 50.07 | 0.678 | 0.051 | 0.029 | 57.52 | 0.842 |
| 赤泥 | 0.150 | 0.081 | 54.17 | 2.977 | 0.162 | 0.088 | 54.25 | 3.265 |

中国知网 https://www.cnki.net

**表 3　材料在整个淋洗过程中的磷淋出情况**

**Tab. 3　Leaching conditions of phosphorous during the whole leaching process**

| 材料 | $PO_4^{3-}$-P | | | TP | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总淋出量 | 首次淋出量 | 首次/总淋出量/% | 总淋出量 | 首次淋出量 | 首次/总淋出量/% | 首次淋出浓度 |
| 生物炭 | 0.002 | 0.000 3 | 14.15 | 0.006 | 0.000 9 | 15.33 | 0.031 |
| 蛭石 | 0.013 | 0.003 4 | 26.91 | 0.013 | 0.003 2 | 24.81 | 0.158 |
| 沸石 | 0.004 | 0.001 0 | 23.18 | 0.004 | 0.001 0 | 25.42 | 0.095 |
| 粉煤灰 | 0.006 | 0.002 0 | 31.47 | 0.007 | 0.002 1 | 31.92 | 0.104 |
| 赤泥 | 0.058 | 0.018 4 | 31.62 | 0.105 | 0.038 8 | 37.06 | 1.940 |

注：总淋出量、首次淋出量单位均为 mg/g；首次淋出浓度单位为 mg/L。

不同改良材料的氮、磷累计淋出量见图 1。由图 1 可知，随淋洗次数的增加，各材料的氮、磷累计淋失量不断增加，其中蛭石、沸石、粉煤灰、赤泥在 1～4 次的增幅较大，第 5 次之后增幅减慢；第 5 次淋洗之后，各材料的累计淋失量增幅明显降低，均低于 10%；相较于前 4 次淋洗，氮、磷累计淋失量增幅分别降低了 2.16～8.76、3.56～10.06 倍。其中，粉煤灰第 5 次淋洗后氮磷累计淋失量的平均增幅最小，只有 3.83% 和 5.85%；蛭石第 5 次淋洗前后的氮磷累计淋失量增幅的差距最大，分别为 38.56% 和 48.32%，赤泥的差距最小，分别为 8.13% 和 25.15%。而木屑生物炭的 $NH_4^+$-N 累计淋失量增幅在第 5 次后明显降低，但总氮和磷累计淋失量增幅虽有减小但差距并不明显，说明木屑生物炭有除 $NH_4^+$-N 外其他形式的氮被淋出，且会以几近恒定的速率少量持续地淋出磷，这是热解后生物炭材料的固有特点[5]。

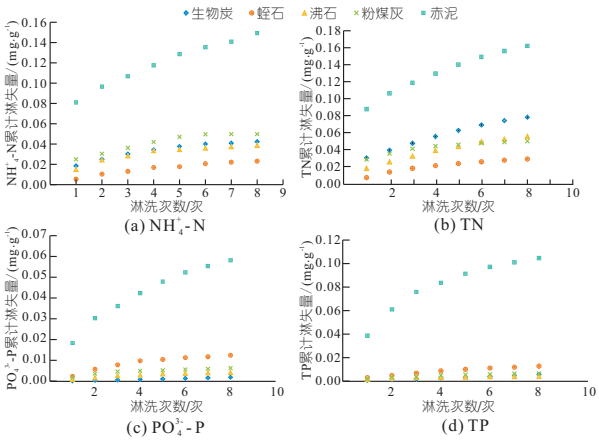



**图 1　不同材料的氮磷累计淋失量**

**Fig. 1　Cumulative nitrogen and phosphorous leaching quantities of different fillers**

### 3.1.2　重金属淋出特性分析

不同改良材料的重金属淋出情况见表 4。由表 4 可看出，与Ⅲ类地表水水质标准[7]进行对比，5 种材料淋出液中主要超标重金属为 Fe、Al，其余重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 均未超标。其中蛭石的

**表 4　不同材料重金属淋出情况**

**Tab. 4　Heavy metal leaching conditions of different fillers**

| 材料 | Fe | Cu | Zn | Cd | Pb | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅲ类水 | 0.30 | 1 000.00 | 1 000.00 | 5.00 | 50.00 | 0.20 |
| 生物炭 | 0.04 | 0.139 | 0.986 | 0.251 | — | — |
| 蛭石 | 2.24 | 5.917 | 7.315 | 0.011 | — | 6.55 |
| 沸石 | — | 1.526 | 11.800 | — | — | 0.044 |
| 粉煤灰 | 0.000 8 | 2.229 | 5.508 | — | — | 0.23 |
| 赤泥 | — | 0.805 | 6.746 | 0.109 | 0.45 | 23.36 |

注：Fe、Al 单位均为 mg/L；Cu、Zn、Cd、Pb 单位均为 μg/L；— 代表低于检出限。

首次淋出液中铁、铝分别超标 7.47、32.75 倍，赤泥和粉煤灰铝含量分别超标 116.80、1.15 倍，生物炭和沸石淋出液重金属含量均未超过Ⅲ类水的水质标准，无重金属淋出风险。

## 3.2　材料吸附特性分析

图 2 为不同初始浓度下各改良材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的平衡吸附量。由图 2(a)可知，在 0.5～10.0 mg/L $NH_4^+$-N 浓度范围，随 $NH_4^+$-N 初始浓度的增加，5 种材料的平衡吸附量也随之增长，各材料对 $NH_4^+$-N 平衡吸附量表现为蛭石＞生物炭＞沸石＞粉煤灰＞赤泥，说明木屑生物炭和蛭石在 $NH_4^+$-N 吸附上具有明显的优势。其中，木屑生物炭对 $NH_4^+$-N 的吸附量是赤泥的 2.93 倍。这主要是因为 $NH_4^+$-N 吸附主要是通过离子交换和材料表面含氧官能团的静电吸引实现的[8]。生物炭表面有大量的含氧官能团包括—OH、C—O、—COOH 等[9]，通过与 $NH_4^+$-N 中的氢原子结合成稳定的氢键达到优越的 $NH_4^+$-N 吸附效果。由图 2(b)可知，在 0.2～2.2 mg/L $PO_4^{3-}$-P 浓度范围，随 $PO_4^{3-}$-P 初始浓度的增加，5 种材料的平衡吸附量均有不同程度的增加，各材料对 $PO_4^{3-}$-P 平衡吸附量表现为生物炭＞粉煤灰＞蛭石＞沸石＞赤泥，其中木屑生物炭对 $PO_4^{3-}$-P 的吸附量是赤泥的 4.14 倍。这是由于 $PO_4^{3-}$-P 的吸附主要是通过金属离子（$Ca^{2+}$、$Al^{3+}$、$Mg^{2+}$ 和 $Fe^{3+}$ 等）、金属氧化物与 $PO_4^{3-}$ 反应形成沉淀或稳固的化合物来实现[6]。粉煤灰中

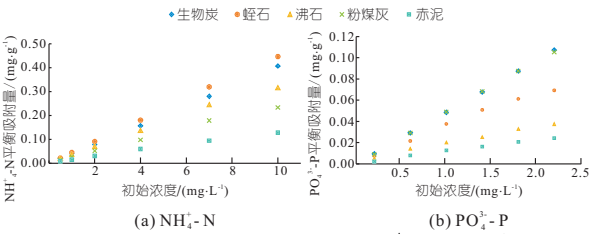


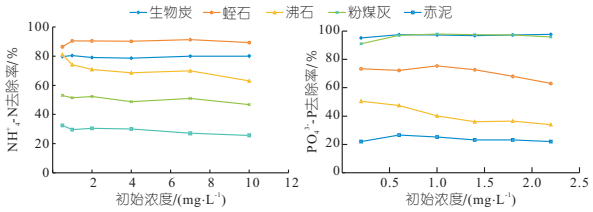

**图 2　不同初始浓度下材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的平衡吸附量**

**Fig. 2　$NH_4^+$-N and $PO_4^{3-}$-P equilibrium absorption capacity of fillers at different initial concentrations**

中国知网　https://www.cnki.net

含有大量的金属氧化物(表 1),更容易与 $PO_4^{3-}$ 反应形成磷酸盐沉淀,具有优越的 $PO_4^{3-}$-P 去除效果[10]。生物炭表面除了有金属离子外,还有丰富的含氧官能团,可与 $PO_4^{3-}$ 形成络合物,或磷酸盐阴离子与生物炭表面的化学键配位形成单齿和双齿配合物,因此对 $PO_4^{3-}$-P 具有极强的吸附能力[11]。

图 3 为不同初始浓度下各材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的去除率。由图 3 可知,在试验浓度范围内,各材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 去除率均表现为随初始浓度的增加而保持相对稳定的趋势。其中,生物炭和蛭石对 $NH_4^+$-N 的平均去除率最高,分别为 80% 和 90%,对 $PO_4^{3-}$-P 的去除率较高的是生物炭和粉煤灰,分别为 97% 和 96%。而在 $NH_4^+$-N 浓度达到 7 mg/L、$PO_4^{3-}$-P 浓度达到 1 mg/L 后,沸石、粉煤灰和蛭石、沸石对 $NH_4^+$-N/$PO_4^{3-}$-P 的去除率开始有明显的下降,说明材料对氮、磷的吸附能力达到上限,致使去除率下降[12]。




(a) $NH_4^+$-N (b) $PO_4^{3-}$-P

**图 3 不同初始浓度下材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的去除率**

**Fig. 3 $NH_4^+$-N and $PO_4^{3-}$-P removal rates of fillers at different initial concentrations**

### 3.3 等温吸附模型的拟合

材料等温吸附的拟合结果见表 5。从拟合参数来看,除生物炭外,其余各材料利用 Langmuir 模型的 $R^2$ 略优于 Freundlich 模型,表明蛭石、沸石、粉煤灰对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附更适合用 Langmuir 等温吸附模型来描述,而生物炭对 $NH_4^+$-N 的吸附和赤泥对 $PO_4^{3-}$-P 的吸附更符合 Freundlich 模型。由 Langmuir 方程参数 $q_{max}$ 可知,对 $NH_4^+$-N 的理论最大吸附量从大到小依次为蛭石(1.954 mg/g)、粉煤灰(0.988 mg/g)、沸石(0.778 mg/g)、赤泥(0.462 mg/g),蛭石的吸附量分别为沸石、赤泥的 2.51、4.23 倍。对 $PO_4^{3-}$-P 理论最大吸附量从大到小依次为生物炭(0.233 mg/g)、蛭石(0.186 mg/g)、粉煤灰(0.217 mg/g)、沸石(0.081 mg/g)。

**表 5 材料对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附等温线拟合参数**

**Tab. 5 Fitting data for $NH_4^+$-N and $PO_4^{3-}$-P adsorption by fillers**

| 营养盐 | 材料 | Langmuir 模型 | | | Freundlich 模型 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $q_{max}$ | $K_L$ | $R^2$ | $K_F$ | $1/n$ | $R^2$ |
| $NH_4^+$-N | 生物炭 | 1.732 | 4.358 | 0.986 | 0.192 | 0.835 | 0.994 |
| | 蛭石 | 1.954 | 3.511 | 0.982 | 0.437 | 0.891 | 0.973 |
| | 沸石 | 0.778 | 5.201 | 0.991 | 0.122 | 0.756 | 0.981 |
| | 粉煤灰 | 0.988 | 6.843 | 0.987 | 0.055 | 0.875 | 0.978 |
| | 赤泥 | 0.462 | 9.457 | 0.983 | 0.024 | 0.846 | 0.977 |
| $PO_4^{3-}$-P | 生物炭 | 0.233 | 1.541 | 0.982 | 1.541 | 0.988 | 0.974 |
| | 蛭石 | 0.186 | 1.851 | 0.965 | 0.109 | 0.861 | 0.961 |
| | 沸石 | 0.081 | 1.753 | 0.985 | 0.029 | 0.698 | 0.971 |
| | 粉煤灰 | 0.217 | 0.003 | 0.973 | 0.448 | 0.368 | 0.969 |
| | 赤泥 | 0.079 | 1.668 | 0.949 | 0.016 | 0.844 | 0.958 |

## 4 结论

**a.** 5 种生物滞留设施改良材料中,赤泥的氮、磷营养盐总淋出量最高,且首次淋出浓度高于地表Ⅲ类水水质标准,蛭石和木屑生物炭总淋出量最小,分别为 0.030、0.006 mg/g;蛭石、赤泥和粉煤灰 3 种材料淋出液中超标重金属主要为 Fe、Al,超标范围为 1.15～116.80 倍,生物炭和沸石无重金属淋出风险。

**b.** 相对于其他材料,木屑生物炭可提高对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附和去除,去除率分别可达 80%、90% 以上;在 2 mg/L $NH_4^+$-N 及 1 mg/L $PO_4^{3-}$-P 的典型雨水径流浓度下,木屑生物炭对 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附量分别为 0.157、0.049 mg/g;木屑生物炭对 $NH_4^+$-N 的吸附和赤泥对 $PO_4^{3-}$-P 的吸附符合 Freundlich 模型,其他材料更适合用 Langmuir 等温吸附模型来描述。

**c.** 从淋出污染物特性和吸附性能方面综合考虑,木屑生物炭的氮、磷营养盐和重金属淋出浓度低,且 $NH_4^+$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 的吸附效果好,可推荐作为生物滞留设施的改良填料。

**参考文献:**

[1] 赵凡,王洪浩,李京玲,等.改良黄土填料对生物滞留系统雨水径流氮素的去除效果[J].水电能源科学,2022,40(9):74-78.

[2] 赵凡,王洪浩,李京玲,等.运行时长和淹没高度对雨水生物滞留系统氮素去除的影响[J].节水灌溉,2022(4):16-20,26.

[3] 李家科,梁正,程杨,等.生物滞留系统对城市路面径流的净化性能小型试验与模拟[J].水土保持学报,2016,30(2):20-25,33.

[4] 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.

中国知网 https://www.cnki.net

[5] 孟依柯,王媛,汪传跃. 木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性[J]. 环境科学,2021,42(9):4332-4340.

[6] 刘增超,李家科,蒋春博,等. 4 种生物滞留填料对径流污染净化效果对比[J]. 水资源保护,2018,34(4):71-79.

[7] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB3838-2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[8] 李家科,张兆鑫,蒋春博,等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(1):1-8,17.

[9] 陈友媛,李培强,李闲驰,等. 浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制[J]. 环境科学,2021,42(1):274-282.

[10] 张敏,郭彬,傅庆林,等. 不同基质去除水中氮、磷的作用机理及效应[J]. 水土保持学报,2011,25(3):63-67.

[11] 王书燕,张新波,彭安萍,等. 生物炭回收水中氮磷营养物质的研究进展与挑战[J]. 化工进展,2023,42(10):5459-5469.

[12] 薛恬鑫,李京玲,王洪浩. 镁改性赤泥强化去除雨水径流氮磷污染物效果[J]. 水电能源科学,2024,42(3):64-67,72.

# Nitrogenand Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Modified Fillers in Bioretention Facilities

WANG Yu-jie, LI Jing-ling, YANG Qi, NIU Chen-yu, ZHAO Peng-yu

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract**: At present, the improved fillers of bioretention facilities are limited by the problems such as leaching of nitrogen, phosphorus and heavy metal and the unstable removal effect of pollutants. In order to screen out safe and efficient improved materials, 5 different types of fillers including hardwood biochar, vermiculite, zeolite, fly ash and red mud were selected, batch leaching experiments and isothermal adsorption experiments were carried out to explore the leaching and adsorption characteristics of each material. The results show that the leaching amount of nitrogen and phosphorus nutrients from hardwood biochar and vermiculite was the smallest, which met the quality standard of Class Ⅲ surface water. Hardwood biochar and zeolite have no risk of leaching pollution of heavy metals (iron, aluminum, lead, cadmium, manganese, copper), while the main over-standard heavy metals in the leachate of vermiculite, red mud, and fly ash are Fe and Al. In contrast, biochar can adsorb 0.157 mg/g of $NH_4^+$-N and 0.049 mg/g of $PO_4^{3-}$-P at typical stormwater runoff concentrations (2 mg/L of $NH_4^+$-N and 1 mg/L of $PO_4^{3-}$-P). The adsorption of $NH_4^+$-N by hardwood biochar and $PO_4^{3-}$-P by red mud fit the Freundlich model, and other materials were more suitable to be described by Langmuir isothermal adsorption model. Hardwood biochar can be selected as an improved filler for bioretention facilities considering the leaching characteristics and adsorption properties of pollutants.

**Key words**: bioretention facilities; leaching characteristics; adsorption properties; improved fillers; hardwood biochar

(上接第 87 页)

# Analysis of Characteristics of Water and Sediment Evolution and Causes of Sediment Transport Changes in the Daxiahe River

CHEN Kai[1,2], WU Yan-zhao[1], WANG Yu[3], SONG Jian-jun[1]

(1. Hydrologic Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 2. Qingyang Hydrologic Station of Gansu Province, Qingyang 745000, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract**: In order to gain a deeper understanding of the water and sediment evolution characteristics and the causes of sediment transport changes in the Daxiahe River Basin, based on the precipitation, runoff, sediment transport, hydropower stations and land use data from 1970 to 2023, Mann-Kendall mutation test, Pearson correlation coefficient method, partial least squares quadratic polynomial regression method, and double cumulative curve method were used to study the water and sediment evolution characteristics and driving factors of sediment transport changes in the middle and lower reaches of the Daxiahe River. The results indicate that the upper and middle reaches of the Daxiahe River are the main water producing areas, while the lower reaches are the main sediment producing areas. The erosion modulus of the Shuangcheng Hydrological Station, a representative station in the upper and middle reaches, ranges from 63.09 t/($km^2$ · a) to 155.39 t/($km^2$ · a), and the lower reaches range from 101.26 t/($km^2$ · a) to 606.96 t/($km^2$ · a); The distribution of water and sediment in the Daxiahe River Basin is uneven within the year and shows a decreasing trend between years, with a sudden change occurring in the 1980s; The changes of sediment transport in the middle and upper reaches are not related to changes of runoff, while there is a correlation in the lower reaches but not the dominant factor. The overall impact of human activities is the main factor, mainly manifested in water conservancy projects and farmland construction; The correlation between sediment transport and runoff is significant, while the impact of cultivated land on sediment transport is relatively small.

**Key words**: Daxiahe River; partial least squares quadratic polynomial regression method; Mann-Kendall method; double cumulative curve method

中国知网 https://www.cnki.net