



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202002003

中图分类号 X131.2

文献标识码 A

王煜钧, 王若凡, 汪文飞, 等. 生物炭和混凝土渣在人工湿地中除磷效应的对比[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 136-142.

WANG Yujun, WANG Ruofan, WANG Wenfei, et al. Comparison of phosphorus removal effect of biochar and concrete slag in constructed wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 136-142.

生物炭和混凝土渣在人工湿地中除磷效应的对比

王煜钧, 王若凡*, 汪文飞, 盛杨, 刘傲展

兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070

第一作者: 王煜钧(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 人工湿地污水处理。E-mail: wangyujun4948@163.com

*通信作者: 王若凡(1983—), 女, 博士, 副教授。研究方向: 人工湿地污水处理。E-mail: wangruofan@mail.lzjtu.cn

摘要 为了寻找适合西北农村地区人工湿地的除磷填料, 结合西北地区温度特征, 对混凝土渣和生物炭 2 种填料的除磷效应进行了对比研究; 基于等温吸附实验和动力学吸附实验, 构建了 2 种静态潜流人工湿地; 通过模拟运行, 对比验证了 2 种填料对生活污水中磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 的去除效果和稳定性。结果表明: 与生物炭相比, 混凝土渣对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附作用较好, 吸附速率最快、吸附量最高达到了 $2.206 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 混凝土渣对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附既有单层吸附, 又有单层吸附, 说明其吸附过程是非均匀的, 而生物炭对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附多为单层吸附; 在加入生活污水且 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均浓度为 $4.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 水力停留时间 (HRT) 达到 24 h 后, 混凝土渣湿地和生物炭湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别达到了 94.86% 和 86.37%。综合对比, 混凝土渣更适宜作为西北地区潜流人工湿地除磷填料。以上研究结果可为人工湿地除磷提供选材参考。

关键词 西北地区; 磷的去除; 人工湿地

随着城镇化水平的不断提高, 地表水体的污染负荷日益加重^[1]。人工湿地作为污水处理技术之一^[2], 利用填料的吸附作用、微生物降解作用和植物吸收等作用去除水中的污染物。人工湿地进行磷的去除主要以填料吸附作用为主^[3]。目前, 人工湿地中常用的填料主要有砾石^[4]、沸石^[5]、石灰石^[6]、钢渣^[7]、粉煤灰砖^[8-9]、陶粒^[10]等。并且, 填料的吸附作用除了与填料本身材质有关, 还受到理化性质、吸附时间和 pH 的影响。因此, 选择人工湿地的填料是至关重要的。

本研究结合西北地区地域气候特征, 就地取材, 以生物炭、混凝土渣为主要研究对象, 从吸附动力学和热力学的角度研究了其对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附特性。基于以上研究结果, 构建了 2 种类型的潜流人工湿地, 加入生活污水, 考察了其对生活污水中磷的去除效果, 并探究了填料对磷的吸附机理及其稳定性, 以为西北地区人工湿地选材及人工湿地的构建提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

以废弃混凝土渣和生物炭为实验填料, 将一部分进行研磨过筛, 选择 20~60 目的填料, 清洗

收稿日期: 2020-02-01; 录用日期: 2020-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51969011); 兰州交通大学青年基金资助项目 (2017008); 兰州交通大学大学生创新创业训练计划项目 (2019056)

烘干后备用。混凝土渣取自本地区某建筑工地。生物炭购买于本地区活性炭厂，该生物炭由农业秸秆经风干、破碎及炭化处理制备而成。2 种材料物理化学特性^[10-15]见表 1。

表 1 填料的物理化学性质
Table 1 Physical and chemical properties of filler

| 填料 | 密度/(g·cm ⁻³) | 孔隙率/% | 渗透系数/(cm·s ⁻¹) | 比表面积/(m ² ·g ⁻¹) | Al 含量/% | Fe 含量/% | Ca 含量/% | Mg 含量/% |
|------|--------------------------|--------|----------------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 混凝土渣 | 1.040 | 57.150 | 0.276 | 6.770 | 6.060 | 10.130 | 68.520 | 0.910 |
| 生物炭 | 0.549~0.580 | 50.00 | 0.076 | 64.300~504.300 | 0.16~1.72 | 0.36~7.16 | 0.67~8.24 | 0.27~8.96 |

1.2 实验方法及指标测定

在进行动力学实验时，各称取 0.500 g 填料于 150 mL 锥形瓶中，加入 50 mg·L⁻¹ 的磷酸二氢钾 (KH₂PO₄) 溶液 50 mL，置于 (25±1) °C、转速为 150 r·min⁻¹ 的恒温振荡器中连续振荡，分别在 0.17、0.33、0.5、1.0、1.5、3、5、10、18、24 h 取出，取上清液过 0.45 μm 滤膜，测其 PO₄³⁻-P 含量。

在进行热力学实验时，各称取 0.500 g 填料于 150 mL 锥形瓶中，加入磷浓度为 1.0、2.0、4.0、8.0、12.0、20.0、40.0、60.0 mg·L⁻¹ 的 KH₂PO₄ 溶液 50 mL，置于 (25±1) °C、转速为 150 r·min⁻¹ 的恒温振荡器中振荡，由所得的平衡时间，取上清液过 0.45 μm 滤膜，测其磷含量。在 15 °C 和 35 °C 下使用同样的方法进行实验。

PO₄³⁻-P 的测定采用钼酸铵分光光度法，具体操作步骤参见文献中的方法^[16]。

1.3 人工湿地的构建

采用 10 mm 厚的有机玻璃，构建 2 种长宽高为 100 cm×60 cm×50 cm 的静态潜流人工湿地，其可处理污水容积为 20 L。在垂直方向，湿地自下到上由厚度为 5 cm 的下垫层、30 cm 填料层 (下部为 20 cm 粗填料层，上部为 10 cm 细填料层) 和 10 cm 土壤层构成，如图 1 所示。下垫层由粒径为 15~25 mm 的鹅卵石构成，粗填料层和细填料层分别由粒径为 6~10 mm 和 3~5 mm 的填料铺设而成，土壤层为过 10 目筛的均匀黄土。在水平方向，共设置 5 个长宽高为 60 cm×20 cm×50 cm 的隔室，进水来自居民生活污水，由湿地进水池均匀投配，经填料层到达湿地出水池后由收集管排出。水中 pH 为 7.2~7.8，溶解氧为 3.4~3.8 mg·L⁻¹，PO₄³⁻-P 浓度为 3.8~5.9 mg·L⁻¹。

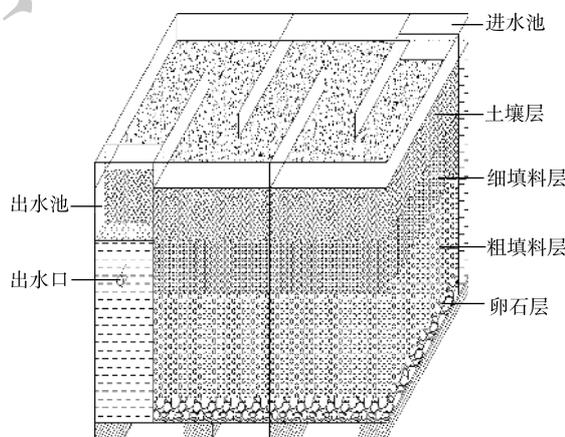


图 1 潜流人工湿地

Fig. 1 Subsurface flow constructed wetland

1.4 人工湿地运行效果实验测定

构建人工湿地，进行驯化培养，待运行稳定后，采用间隔配水方式。由图 1 可知，湿地有效表面积为 0.6 m²，有效过流体积为 0.02 m³，实测平均水力停留时间为 24 h，计算获得有效水力负荷为 0.034 m³·(m²·d)⁻¹^[17]。实验总计重复 3 次，控制水温为 10~12 °C，分别在 6、12、24、36、48、60、72、84、96、108、120 h 追踪测定出水磷含量，分析其运行参数和稳定性。

1.5 数据分析方法

填料对磷的动力学吸附过程一般用准一级、准二级动力学模型、颗粒内扩散模型和 Elovich 模型进行拟合分析，如式 (1)~式 (4) 所示。

$$\ln C_t = a - k_1 t \quad (1)$$

$$\ln Q_t = a + k_2 \ln t \quad (2)$$

$$Q_t = k_3 \sqrt{t} + a \quad (3)$$

$$Q_t = a + k_4 \ln t \quad (4)$$

式中： C_t 为 t 时刻吸附溶液中 PO_4^{3-} -P平衡质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； Q_t 为 t 时刻基质对 PO_4^{3-} -P的吸附量， $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ； a 为动力学常数， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； k_1 为准一级动力学模型速率常数， $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ； k_2 为准二级动力学模型速率常数， $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ； k_3 为颗粒内扩散模型速率常数， $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ； k_4 为Elovich模型速率常数， $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ； t 为反应时间，h。

填料对磷的等温吸附过程一般用Langmuir和Freundlich等温曲线经验方程来描述，如式(5)和式(6)所示。

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m K_L C_f} + \frac{1}{Q_m} \quad (5)$$

$$\lg Q = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_f \quad (6)$$

式中： Q 为基质对 PO_4^{3-} -P的吸附量， $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ； Q_m 为基质对 PO_4^{3-} -P的饱和吸附量， $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ； C_f 为吸附平衡后滤液中 PO_4^{3-} -P浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； K_L 为Langmuir吸附特征常数， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； K_F 为Freundlich特征常数， $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ； n 为Freundlich特征常数， $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

研究结果均采用OriginPro8.0及Excel 2019软件进行数据显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 填料对磷的吸附动力学特性

基于浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 的进水条件，实验设3个平行样，2种填料对 PO_4^{3-} -P的吸附动力学实验结果如图2所示。混凝土渣和生物炭基质对磷的吸附量随着时间的延长而不断增加，在吸附时间为18 h时，2种填料均达到吸附的最大值，可以认为此时吸附达到平衡。这与张修稳等^[12]在填料对磷的吸附特性比较中的研究结果相似。整体来看，混凝土渣的最大吸附量为 $2.206 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，是生物炭最大吸附量的2.16倍。分析其原因为，填料除磷不仅和物理吸附有关，还与金属元素Al、Ca、Mg、Fe有关^[18-19]。由表1可知，混凝土渣钙含量高达68.52%，这是因为混凝土渣在制作过程中需要加入大量的石灰石，使其具有丰富的氧化钙，而Ca元素容易磷酸根离子发生化学反应，形成钙结合态磷酸盐(Ca-P)沉淀，从而降低水中的磷含量^[20]，所以混凝土渣对磷的吸附量高于生物炭。由表1可知，生物炭虽然含有金属元素较少，但是其具有较高的比表面积，使其有利于物理吸附，以去除水中的磷。

用准一级动力学方程、准二级动力学方程、颗粒内扩散力学方程和Elovich方程对磷的吸附动力学进行拟合，结果如表2所示。2种填料在动力学吸附过程中Elovich方程模拟拟合效果最佳，这说明在混凝土渣和生物炭对 PO_4^{3-} -P的吸附过程中，主要包含了表面吸附、颗粒内部扩散和外部液膜扩散等多种吸附过程^[9]。在Elovich方程中， k_4 是吸附速率随时间变化快慢的指标，其值越大，表示吸附速率下

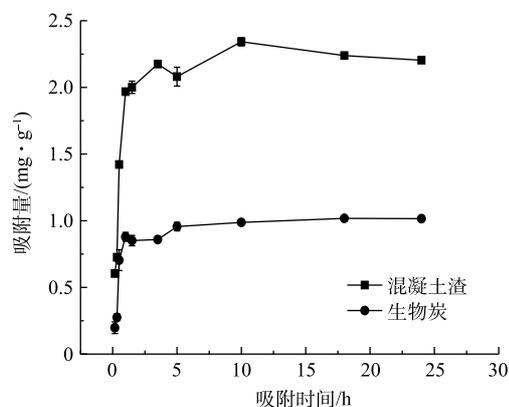


图2 填料对 PO_4^{3-} -P的吸附动力学曲线
Fig. 2 Adsorption kinetics of PO_4^{3-} -P on the fillers

表 2 填料对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附动力学方程参数
Table 2 Fitting parameters of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption kinetics equation on the fillers

| 填料 | 准一级动力学方程 | | | 准二级动力学方程 | | | 颗粒内扩散动力学方程 | | | Elovich方程 | | |
|------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|------------|---------|-------|-----------|-------|-------|
| | a | k_1 | R^2 | a | k_2 | R^2 | a | k_3 | R^2 | a | k_4 | R^2 |
| 混凝土渣 | 2.273 | 0.012 | 0.560 | 0.599 | 0.084 | 0.614 | 1.943 | 0.067 | 0.652 | 1.972 | 0.09 | 0.759 |
| 生物炭 | 1.323 | 0.040 | 0.707 | -0.251 | 0.104 | 0.792 | 0.740 | 0.070 4 | 0.685 | 0.783 | 0.888 | 0.846 |

降越快。由表 2 可知，混凝土渣的吸附速率随时间下降的比生物炭缓慢，即混凝土渣对生活污水中磷具有更好的持续效应。

2.2 填料对磷的等温吸附特性

基于不同磷酸盐浓度，填料对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等温吸附实验结果见图 3。由图 3 可知，随着温度的升高，在不同磷酸盐初始浓度胁迫下，吸附量整体呈上升趋势。这表明温度的升高对基质吸附有促进作用，同时，也表明混凝土渣和生物炭的吸附过程是吸热过程。混凝土渣和生物炭的吸附变化均呈现 2 个阶段：在第 1 阶段，2 种填料均呈现急速上升的趋势，随着磷酸盐浓度的增加，吸附量开始快速增加；第 2 阶段中，当磷酸盐浓度达到 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，2 种基质的吸附量达到最大，吸附速率变得缓慢，且呈下降趋势。在磷酸盐浓度达到 $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上，混凝土渣较生物炭具有更好的吸附效应。这是由于混凝土渣具有较高的钙含量，使混凝土渣在磷的吸附过程中既有物理吸附过程，又伴有化学吸附过程。崔理华等^[21]在人工湿地填料对磷的吸附特性研究中也证实了这一点，即含钙量多的填料，易与水中的磷生成难溶性盐，从而去除水中的磷。

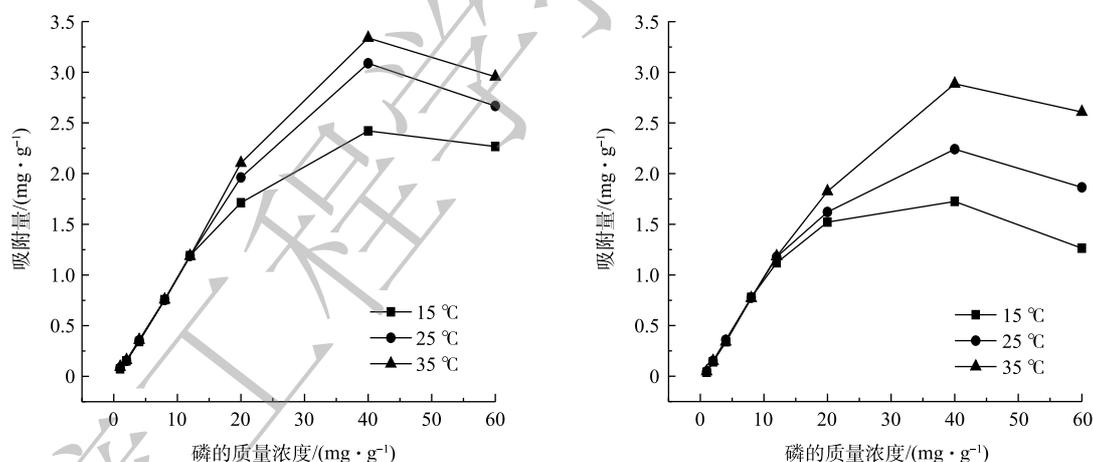


图 3 填料对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等温吸附曲线

Fig. 3 Isothermal adsorption curves of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ by the fillers

用 Langmuir 和 Freundlich 方程拟合混凝土渣和生物炭基质对磷的等温吸附效应，获得拟合值，结果如表 3 所示。通过比较 2 种等温方程的相关系数 R^2 ，发现混凝土渣对磷的吸附更符合 Freundlich 方程。这说明混凝土渣对磷的吸附既有单层吸附，又有多层吸附，且表面是非均匀的。另外，其非线性指数 n 大于 1，表明混凝土渣的吸附容易进行，且为不可逆过程^[22]。这进一步解释了混凝土渣对于磷吸附伴有化学吸附特征。对生物炭来说，Langmuir 方程拟合效果更好，这说明生物炭对磷的吸附多为单分子层吸附。其中， $K_L \cdot Q_m$ 的大小反映了固液体系中填料吸附溶质的缓冲能力的强弱^[23]，其值越大，表示缓冲能力越强。由表 3 可知，混凝土渣在磷的去除效应中具有更好的稳定性。

表3 填料对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的等温吸附方程参数Table 3 Fitting parameters of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ isothermal adsorption equation by the fillers

| 填料 | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | Langmuir等温吸附模型 | | | | Freundlich等温吸附模型 | | |
|------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------|----------------------------------|-------------------------------------|-------|
| | | $Q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ | $K_L/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | $K_L\cdot Q_m$ | R^2 | $n/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ | $K_F/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ | R^2 |
| 生物炭 | 15 | 1.903 | 0.094 | 0.179 | 0.863 | 2.403 | 0.313 | 0.706 |
| | 25 | 2.807 | 0.055 | 0.154 | 0.936 | 1.955 | 0.282 | 0.849 |
| | 35 | 4.434 | 0.031 | 0.137 | 0.955 | 1.625 | 0.245 | 0.906 |
| 混凝土渣 | 15 | 2.782 | 1.116 | 3.104 | 0.829 | 3.843 | 1.552 | 0.822 |
| | 25 | 2.929 | 0.885 | 2.593 | 0.878 | 3.243 | 2.290 | 0.891 |
| | 35 | 2.321 | 2.170 | 5.036 | 0.908 | 4.794 | 1.010 | 0.957 |

2.3 2种填料在潜流人工湿地对磷的去除效果比较

本研究构建了2种长、宽、高为 $100\text{ cm}\times 60\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的静态潜流人工湿地模型,以进行生活污水处理研究,其结构如图1所示。本研究首先对所建人工湿地进行驯化处理,待湿地模型运行稳定之后,然后探究HRT对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果。结合西北地区气候特征,湿地进水水温为 $10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右、pH为 $7.2\sim 7.8$ 、溶解氧为 $3.4\sim 3.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水力负荷为 $0.034\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 、初始加入生活污水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 $3.8\sim 5.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。对3次重复实验所得去除率取平均值,进而绘制潜流人工湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率随HRT的变化曲线。如图4所示,随着HRT的延长,湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率迅速提高,并始终保持呈正相关性,当HRT达到24 h时,潜流人工湿地中的磷的去除效率增加幅度开始减慢。此时,混凝土渣湿地和生物炭湿地对磷的平均去除率分别为94.86%和86.37%。当 $\text{HRT}\geq 24\text{ h}$ 时,湿地中填料对磷吸附速率趋于稳定。此时,由于水中溶解氧源于进水,溶解氧被消耗减少,聚磷菌活性降低,对磷的积累能力降低,反应速率变慢,使填料对污染物的吸附趋于平衡。综上所述,本研究选择24 h为最佳HRT,综合考虑2种人工湿地的除磷效果和经济成本等因素,认为宜选择混凝土渣为填料的人工湿地来处理西北地区生活污水中的磷。

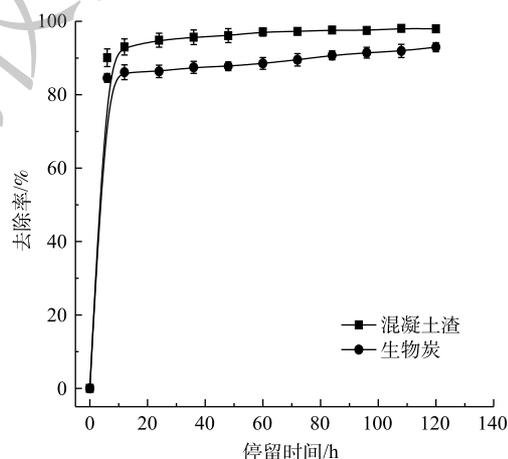


图4 不同停留时间潜流人工湿地 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 净化效果
Fig. 4 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ purification effect by the subsurface flow constructed wetland under different hydraulic retention times

3 结论

1) 混凝土渣和生物炭对磷的静态吸附平衡时间均为18 h,且混凝土渣的最大吸附量是生物炭最大吸附量的2.16倍。动力学吸附过程拟合结果表明,Elvovich模拟方程对2种填料的拟合效果最佳,这表明2种填料对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附有表面吸附、颗粒内部扩散和外部液膜扩散等多种吸附过程。混凝土渣的等温吸附特性与Freundlich方程拟合更好,生物炭更符合Langmuir方程,这表明混凝土渣对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附既有单层吸附,又有多层吸附,表面是非均匀的,而生物炭对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附多为单层吸附。

2) 动力学吸附实验和等温吸附实验结果表明,混凝土渣对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附既有物理吸附亦有化

学吸附。

3) 与以生物炭为填料的湿地相比较, 以混凝土渣为填料的静态潜流人工湿地除去污水中的磷效果更好。在 HRT 为 24 h 时, 混凝土渣湿地和生物炭湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别达到了 94.86% 和 86.37%。

4) 选用混凝土渣作为潜流人工湿地填料, 能更好地达到有效处理西北地区农村生活污水中磷的目的。

参 考 文 献

- [1] CHENG J, LI Y J, BO Z, et al. Comparison of quartz sand anthracite shale and biological ceramicsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2): 466-477.
- [2] HUANG J, XIAO J, GUO X, et al. Long-term effects of silver nanoparticles on performance of phosphorus removal in a laboratory-scale vertical flow constructed wetland[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 87(1): 319-330.
- [3] 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.
- [4] 陈咄圳, 华进程, 郑向群, 等. 以建筑废砖为基质的人工湿地对农村生活污水的净化效果[J]. *环境工程*, 2017, 35(9): 35-39.
- [5] 杨炳飞. 复合人工沸石颗粒脱氮除磷性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [6] 李兆欣, 周雪, 黄炳彬, 等. 碳化缓释除磷基质的制备与吸附特性分析[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(5): 49-53.
- [7] 郑怀礼, 葛亚玲, 寿倩影, 等. 改性钢渣的制备及其吸附除磷性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(6): 129-134.
- [8] 刘超, 杨永哲, 宛娜. 建筑废料粉煤灰砖块作为人工湿地基质的除磷能力研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(4): 35-39.
- [9] 姜应和, 柳君侠. 粉煤灰碎砖颗粒除磷实验研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(7): 1532-1537.
- [10] 方伟成, 王静, 周新萍. 三种基质吸附磷的特性及其影响因素[J]. *湿地科学*, 2018, 16(3): 341-346.
- [11] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1187-1194.
- [12] 张修稳, 李锋民, 卢伦, 等. 10种人工湿地填料对磷的吸附特性比较[J]. *水处理技术*, 2014, 40(3): 49-52.
- [13] 石发恩, 柯瑞华, 朱萌萌, 等. 建筑拆除垃圾应用于水泥混合材的试验研究[J]. *工业安全与环保*, 2015, 41(3): 50-54.
- [14] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 典型农业生物炭理化特性及产品质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 249-257.
- [15] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 黄炳彬, 孟庆义, 尹玉冰, 等. 潜流人工湿地水力学特性及工程设计[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(11): 4307-4316.
- [18] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [19] 张燕, 庞南柱, 蹇兴超, 等. 3种人工湿地基质吸附污水中氨氮的性能与基质筛选研究[J]. *湿地科学*, 2012, 10(1): 87-91.
- [20] 冀泽华, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统基质及其净化机理研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2234-2243.
- [21] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明. 人工湿地基质磷吸附特性与其物理化学性质的关系[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 250-254.

[22] 蒋煜峰, 刘兰兰, 原陇苗, 等. 秸秆焚烧物对黄土吸附五氯酚的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1826-1836.

[23] 赵桂瑜. 人工湿地除磷基质筛选及其吸附机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Comparison of phosphorus removal effect of biochar and concrete slag in constructed wetland

WANG Yujun, WANG Ruofan*, WANG Wenfei, SHENG Yang, LIU Aozhan

School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

*Corresponding author, E-mail: wangruofan@mail.lzjtu.cn

Abstract In order to find the phosphorus removal filler suitable for constructed wetlands in the Northwest rural areas, in combination with the temperature characteristics in the northwest China, the phosphorus removal effects of concrete slag and biochar were compared in this study. Based on isothermal adsorption and kinetic adsorption experiments, two static subsurface flow constructed wetlands were constructed. Through the simulation operation, the phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) removal effects and stability from domestic sewage by these two fillers were tested and verified by comparison. The results showed that compared with biochar, the concrete slag performed better on $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption with the fastest adsorption rate and the largest adsorption amount of $2.206 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. The $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption by concrete slag contained both single-layer and multi-layer adsorption, indicating a non-uniform adsorption process, while the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ adsorption by biochar mostly belonged to single-layer adsorption. At the average concentration of influent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ with $4.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal rates of concrete slag wetlands and biochar wetlands reached 94.86% and 86.37%, respectively when the hydraulic retention time (HRT) reached 24 h. By the comprehensive comparison, it is feasible to use the concrete slag as the filler for phosphorus removal by the subsurface flow constructed wetland in the northwest. The above research can provide reference for phosphorus removal material selection in constructed wetland.

Keywords Northwestern region; phosphorus removal; constructed wetlands