

Research on the Enhancement Technology of Interception and Filtration Functions in Rainwater Overflow Facilities

Lixin Xia¹ Xiaofeng Jie² Qihui Zhang² Haiping Sun³

1. Xiamen Academy of Building Sciences Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361000, China

2. China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd. Beijing Branch, Beijing, 100043, China

3. Sanming Sponge City Construction Service Center, Sanming, Fujian, 353000, China

Abstract

With the continuous advancement of urbanization, pollutants such as nitrogen (N), phosphorus (P), and suspended solids (SS) in initial rainfall runoff pose significant threats to the ecosystems of receiving water bodies. Existing stormwater overflow facilities struggle to effectively remove pollutants from initial rainwater. To enhance the pollutant removal efficiency at stormwater overflow outlets, this study focuses on the stormwater sand trap filtration system, conducting research on the screening of filtration media and the factors influencing the nitrogen and phosphorus removal effectiveness of mixed filter materials. The aim is to develop a highly efficient and economically feasible mixed filter material system to improve the pollutant removal capability at stormwater overflow outlets. The results indicate that the optimal filter materials in the stormwater sand trap are quartz sand, aluminum-based phosphorus-locking agents, and zeolite, which are suitable for application in removing pollutants such as nitrogen and phosphorus from stormwater runoff.

Keywords

nitrogen; phosphorus; suspended solids; filter media; stormwater runoff.

雨水溢流设施截污过滤功能提升技术研究

夏立新¹ 揭小锋² 张其慧² 孙海平³

1. 厦门市建筑科学研究院有限公司, 中国·福建 厦门 361000

2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司北京分公司, 中国·北京 100043

3. 三明市海绵城市建设服务中心, 中国·福建 三明 353000

摘要

随着城市化进程的不断推进, 初期降雨径流中氮(N)磷(P)和悬浮物(SS)等污染物对受纳水体的生态系统构成了显著威胁。现有雨水溢流设施难以对初期雨水中污染物进行有效去除。为提升雨水溢流口污染物去除效果, 本研究以雨水沉砂槽过滤系统为研究对象, 开展过滤介质筛选与混合滤料氮磷去除效果影响因素研究, 旨在开发一种高效且经济可行的混合滤料系统用于提升雨水溢流口的污染物去除能力。结果表明, 雨水沉砂槽中的最佳滤料类型为石英砂、铝基锁磷剂和沸石, 混合滤料适用于应用在去除雨水径流的氮磷等污染物中。

关键词

氮; 磷; 悬浮物; 滤料; 雨水径流

1 引言

随着城市化进程加速, 不透水面积比例持续攀升, 城市初期降雨径流携带的大量悬浮物、氮和磷等污染物成为水体富营养化的重要诱因^[1]。初期雨水径流中, 氮磷和悬浮物(SS)浓度较高, 若直接通过雨水溢流设施排入自然水体, 易导致受纳水体水质下降, 破坏水生态平衡。

现有雨水溢流设施虽能疏导雨水, 但普遍缺乏高效的截污净化功能, 雨水口堵塞、过流能力不足等问题也会影响

其正常运行。因此, 如何通过优化雨水溢流设施的结构与功能, 提升对初期雨水的净化效率, 成为改善城市水环境、缓解内涝压力的研究热点。雨水沉砂槽过滤系统作为城市雨水管理的关键技术设施, 在溢流污染控制中具有重要的应用潜力, 可有效处理地表径流和溢流雨水, 是实现雨水净化的重要组成部分。该系统融合自然生态原理与工程实践, 不仅在结构上具有稳定性, 也表现出多方面的功能价值^[2,3]。

鉴于此, 本研究聚雨水沉砂槽的优化, 通过筛选高效过滤介质并研究混合滤料氮磷去除效果的影响因素, 旨在开发一种高效且经济可行的混合滤料系统用于提升雨水溢流口的污染物去除能力, 为城市雨水径流污染控制提供技术支撑。

【作者简介】夏立新(1991-), 男, 中国福建三明人, 本科, 工程师, 从事海绵城市、绿色建筑研究。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

(1) 过滤介质。本试验所用铝基锁磷剂原材料为厦门市某自来水厂脱水污泥(含水率70%-75%)，该水厂所用絮凝剂为聚合双酸铝铁(PFACS)。制备方法：首先，将水厂脱水污泥自然风干(污泥含水率为30%以下)；其次，将其在马弗炉内以400℃下有氧煅烧2.5h，冷却至室温；最后，机械破碎处理，筛分得到1~2mm颗粒，即为铝基锁磷剂。煅烧过程中的工艺参数以及煅烧前后污泥的理化性质详见参考文献^[4,5]。本试验所用的沸石、无烟煤和石英砂均为普通基质滤料，购置于河南省承洁净水材料有限公司，其粒径均为1~2mm，过滤棉购自北京市京遇荷花科技发展有限公司。

(2) 试验用水

根据文献^[6]，确定模拟雨水径流中氨氮浓度为15mg/L，正磷酸盐浓度为5mg/L，SS浓度为25mg/L，分别采用氯化铵、磷酸二氢钾试剂和高岭土配制。

2.2 实验装置与方法

(1) 单一滤料削减氮磷效果实验。

实验选取了石英砂、无烟煤、沸石、铝基锁磷剂以及过滤棉这五种常见的活性滤料。实验的具体步骤如下：我们分别称取1g滤料于250ml锥形瓶中，向每个锥形瓶中加入200ml浓度为15mg/L的氨氮溶液，用0.1mol/L的盐酸和0.1mol/L的氢氧化钠溶液调节pH至中性，在25±0.5℃、150r/min条件下进行振荡反应，分别于反应2h、4h、8h、16h、24h及48h取样测定氨氮浓度。

采用相同实验方法探究不同滤料对水溶液中磷酸盐的去除能力，正磷酸盐初始浓度为5mg/L。上述实验均设置两组平行样本，并取平均值作为分析基础。

(2) 单一滤料削减SS效果动态实验。

实验装置参考环保型雨水口结构，采用泡沫材料构建截污过滤模型(图1)，单个模拟雨水口的有效过滤面积为0.1m²。孔径0.2mm的过滤棉直接填充于容器底层；铝基锁磷剂、沸石、无烟煤及石英砂采用钢丝网与土工布包裹后装填。

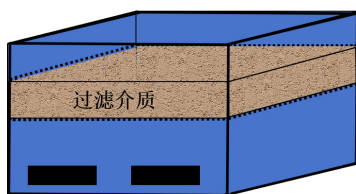


图1 雨水口截污过滤试验装置图

依据气象学降雨等级标准，中雨的12h累积降雨量为15mm。本研究选取了具有代表性的双车道道路为模拟对象，其中道路的宽度为8m。雨水口布设间距为20m，计算单个雨水口的汇水面积为40m²，汇水量为0.6m³。对应降雨历时为12h时，流量为0.834L/min。同样地，设定6h、3h、2h

三种汇流历时，对应流量分别为1.667L/min、3.334L/min、5.004L/min。

本试验采用SS浓度为25mg/L的模拟水样，并设置1L/min、2L/min、3L/min及4L/min四个不同流量梯度，记录过滤前后的SS浓度并计算去除率，同时使用秒表记录各流量梯度下载污装置的溢流时间。在综合考虑滤料去除效果、过流能力、成本及维护便捷性等因素后，筛选了最优过滤介质。

(3) 不同水质条件对混合滤料削减污染物的影响实验。

本研究选取K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻以及NO₃⁻作为共存离子，考察其对混合滤料吸附性能的影响。同时本研究还考察了腐殖酸、富里酸及pH值氮磷吸附去除效果的影响。混合滤料由沸石、铝基锁磷剂和石英砂按质量比1:1:1组成，投加量为10g/L，在25±0.5℃、150r/min条件下振荡48h条件下进行吸附实验。具体条件设置如下：

1) pH值影响

设置溶液pH为3、5、7、9、11。

2) 共存离子影响

各阴阳离子浓度梯度设置为0mg/L、20mg/L、50mg/L、100mg/L、200mg/L，采用0.1mol/LHCl与NaOH溶液调节pH至中性后完成吸附实验。

3) 有机质影响

富里酸(FA)和腐殖酸(HA)浓度分别设为0、10、20、30、40mg/L，调节pH为中性后测定溶液中氨氮和正磷酸盐浓度。

2.3 分析方法

水样中，氨氮采用纳氏试剂分光光度法(检出限0.025mg/L)，正磷酸盐采用钼锑抗分光光度法(检出限0.01mg/L)^[7,8]；SS采用滤纸重量法；金属离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定(检出限均低于2ug/L)^[8]，pH使用便携式设备测定(检出限0.01)，溢流时间使用秒表记录。

2.4 数据处理

(1) 氨氮和正磷酸盐的削减率(R)的计算式为

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中，C₀为初始质量浓度(mg/L)；C_t为吸附后剩余质量浓度(mg/L)。

(2) 不同滤料的吸附量计算公式为

$$q = (C_0 - C_t) \times V / m \quad (2)$$

式中，q为吸附量(mg/g)；V为溶液体积(L)；m为滤料质量(g)。

本研究采用Origin 8.5进行数据分析。

3 结果与讨论

3.1 单一滤料对氮磷削减的效果

图2(a)显示五种滤料对氨氮的去除能力依次为：沸石>无烟煤>铝基锁磷剂>石英砂>过滤棉。且各滤料在16h

内基本达到吸附平衡。在 48 h 的吸附过程中，沸石表现最佳，2 h 内去除率即达 50.93%，最终去除率为 84.80%，呈现“快速吸附、缓慢平衡”的特征，与胡细全等人^[9]研究结果一致。方差分析结果显示，不同滤料在氨氮去除效果方面存在显著差异 ($P < 0.05$)。沸石的良好性能源于其孔道结构所带来的吸附与离子交换能力，对氨氮具有选择性吸附优势^[10]。铝基锁磷剂效果最差且不稳定，一方面因其自身含铵态氮，占据吸附位点易达饱和^[11]；另一方面其对氨氮的吸附主要依赖较弱的范德华力，可逆性强，吸附能力受限于内部位点数量^[12]。

正磷酸盐的去除效果如图 2(b) 所示。各滤料的去除能力依次为：铝基锁磷剂>无烟煤>沸石>石英砂>过滤棉。

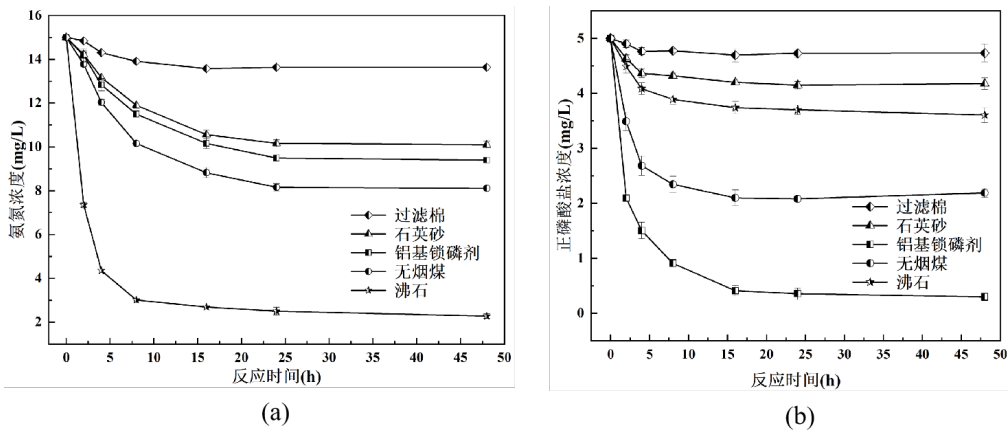


图 2 5 种基质填料系统进出水氨氮的去除效果 (a), 正磷酸盐的去除效果 (b)

3.2 单一过滤介质削减 SS 效果

如图 3 所示，石英砂与铝基锁磷剂截污效能最优，在各流量条件下均表现出良好的稳定性。这两种滤料在不同流量工况下，SS 去除率波动较小。在流量为 2 L/min 时达到最高去除率，分别为 97.23% 和 93.45%。在过滤过程中，流速越低，颗粒接触机率越大，越易被截留。无烟煤和沸石也具备较高的 SS 去除率，其中，在 4 L/min 时无烟煤去除率为 84.34%，沸石为 97.58%，且出水色度未受影响。在五种过滤介质中，过滤棉的截污性能最差，1 L/min 时最高去除率仅为 67.38%，并随流量增加持续下降，但其过滤速度快、过流性能强，各流量下均未发生溢流。

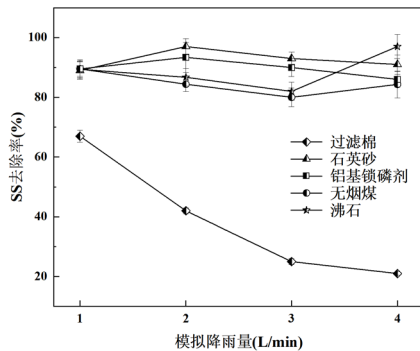


图 3 不同降雨量下不同过滤介质的截污效果

16 h 后各滤料基本达到吸附平衡，不同滤料间去除效果差异显著 ($P < 0.05$)。铝基锁磷剂在 2 h 内去除率超 50%，16 h 后浓度趋于稳定，最终去除率达 93.98%，这与刘啟迪^[7]等人研究结果一致，归因于其含铝、铁等金属元素，比表面积大、孔隙丰富，可通过配体交换和络合反应除磷^[13,14]。无烟煤作为一种常用的磷吸附基质滤料，张翔凌等^[15]使用层状双金属氢氧化物对无烟煤进行了改性，并研究了其作为人工湿地基质时的除磷效果，实验结果表明改性无烟煤对磷平均去除率达 98% 以上，本实验中无烟煤未进行改性，未改性无烟煤在 24 h 去除率为 58.26%，但 48 h 时略降至 56.20%，这可能是部分吸附的磷在震荡条件下发生解吸。

3.3 不同过滤介质过流能力

如表 1 所示，过滤棉的过流性能最优，未出现溢流。铝基锁磷剂和沸石在 1 ~ 3 L/min 时均未发生溢流，但在 4 L/min 时均出现溢流。石英砂与无烟煤截污效能较优，但水力传导性能较弱，除 1 L/min 外均出现溢流与堵塞。2 L/min 时石英砂于 18.02 s 发生溢流，3 L/min 时提前至 12.20 s，4 L/min 时为 10.12 s。无烟煤也由 30.24 s 缩短至 15.32 s。溢流时间随流量增大而提。这一现象表明，石英砂与无烟煤的吸附容量存在一定的上限，且其内部孔隙结构相对较小。

表 1 不同降雨流量下各滤料发生溢流的时间

流量 / (L · min ⁻¹)	石英砂 /s	铝基锁 磷剂 /s	沸石 /s	无烟煤 /s	过滤棉
1	—	—	—	—	—
2	18.02	—	—	30.24	—
3	12.2	—	—	25.02	—
4	10.12	25.12	22.12	15.32	—

综上，确定了雨水沉砂槽滤料类型为石英砂、铝基锁磷剂和沸石，并以三者组合成混合滤料，系统研究影响其氮磷去除效果的关键因素。

3.4 反应条件对混合滤料削减氨磷效果的影响

(1) pH 值对混合滤料削减氨磷效果的影响

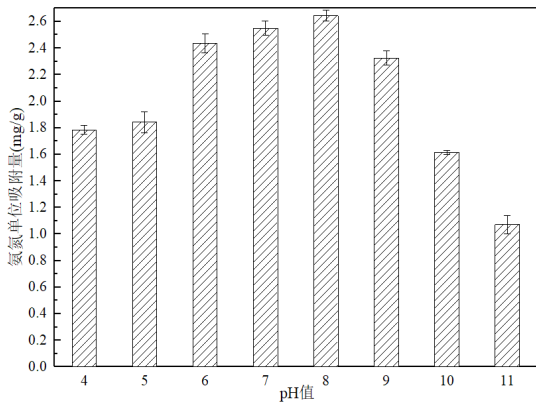


图 4 pH 值对混合滤料吸附削减氨氮效果的影响

图 4 显示不同 pH 条件下混合滤料对氨氮削减率差异显著 ($P < 0.05$)。在 pH 为 4~11 范围内, 氨氮吸附量先增后降, pH=8 时达到峰值 (2.645 mg/L)。在酸性环境中, H^+ 与 NH_4^+ 竞争吸附位点, 抑制吸附; 随 pH 升高, H^+ 浓度下降, 吸附增强, 在 pH=8 时效果最佳; 当 pH 进一步增大时, 氨氮主要以分子态 NH_3 存在, 离子交换作用减弱, 导致吸附量下降 [16,17]。

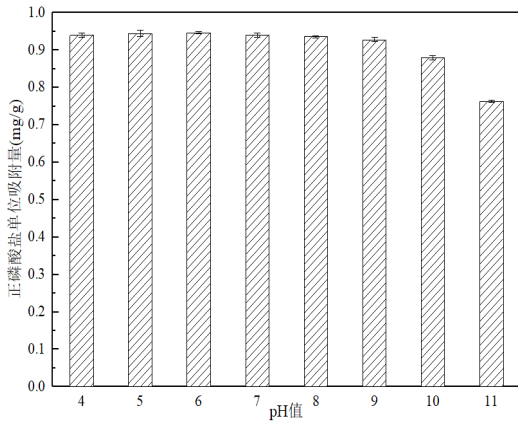


图 5 pH 对混合滤料吸附去除正磷酸盐效果的影响

图 5 显示, PH 值对正磷酸盐吸附效果影响显著。当溶 pH 在 4~11 范围内, 混合滤料对正磷酸盐的吸附能力呈现出一个先逐渐上升、达到某一峰值后, 又逐步下降的变化趋势。这一变化趋势表明, 溶液的 pH 值对混合滤料的吸附性能有着显著的影响, 适宜的 pH 值范围能够显著提升其对正磷酸盐的去除效果, 而过高或过低的 pH 值则可能导致吸附能力的下降。在 pH 为 6 时, 混合滤料对正磷酸盐的吸附量达到最大值 0.946 mg/L, 表明在此 pH 环境下, 混合滤料的吸附效果最为显著。这一现象揭示了 pH 值对混合滤料吸附正磷酸盐效率的重要调控作用。在 pH=4~9 范围内, 吸附量随 pH 升高缓慢增加而后逐步降低, 整体仍保持较高水平, 显示出该滤料在此 pH 区间具有良好的缓冲性能。当 pH 上升至 9~11 时, 吸附量由 0.93 mg/g 迅速下降至 0.76 mg/g, 降幅约为 18%, 表明强碱性环境显著削弱其吸附能力。不同 pH 条件下的去除率差异显著 ($P < 0.05$)。

吸附性能与磷酸盐形态分布密切相关。研究表明, $H_2PO_4^-$ 为最易被铝基锁磷剂吸附的形态。在 pH 由 4 升至 8 的过程中, 磷酸盐逐渐从 H_3PO_4 转化为 $H_2PO_4^-$, 并进一步转变为 HPO_4^{2-} ; pH=6 时 $H_2PO_4^-$ 占比最高, 有利于配体交换反应, 吸附效果最佳 [18,19]。随着 pH 继续提高, OH^- 浓度上升, 既减少了 $H_2PO_4^-$ 含量, 又与磷酸根产生竞争吸附, 导致除磷效率下降 [20]。此外, 酸性条件下 H^+ 吸附使滤料表面带正电, 促进对 $H_2PO_4^-$ 的吸附; 碱性条件下 OH^- 则竞争吸附位点, 抑制吸附过程。

鉴于雨水径流 pH 一般处于 6~9 之间, 由沸石、铝基锁磷剂和石英砂组成的混合滤料表现出良好的 pH 适应性, 适用于该类水体中氮磷污染的治理。

(2) 共存离子对混合滤料削减氨磷的影响

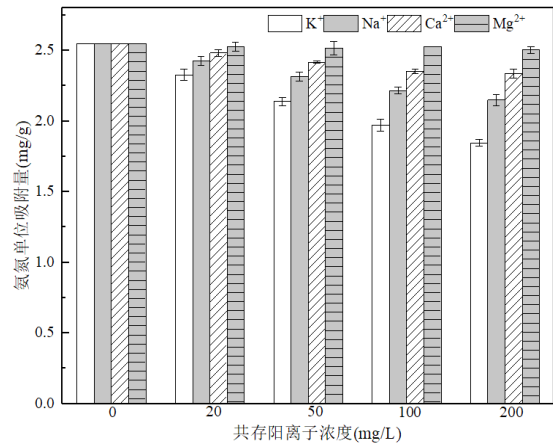


图 6 共存阳离子对混合滤料吸附削减氨氮的影响

共存阳离子对混合滤料去除氨氮的影响如图 6 所示。 Mg^{2+} 对氨氮去除几乎无影响, 而 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 均表现出抑制效应。随着 K^+ 和 Na^+ 浓度从 0 增至 200 mg/L, 氨氮吸附量在经过一系列的实验处理后, 其数值发生了显著的变化。具体来说, 原本的氨氮吸附量在实验开始时为 2.55 mg/g, 但在实验过程中, 通过调整实验条件以及采用不同的吸附剂, 氨氮吸附量有所下降。在实验的第一阶段, 氨氮吸附量降至 1.84 mg/g, 而在实验的第二阶段, 氨氮吸附量进一步降至 2.14 mg/g。这一变化表明, 实验中所采用的方法和吸附剂对氨氮的吸附效果有所影响, 导致吸附量的降低。 Ca^{2+} 浓度从 0 升至 100 mg/L 时, 吸附量由 2.55 mg/g 降至 2.33 mg/g, 此后, 即使 Ca^{2+} 浓度进一步提升, 吸附量基本维持稳定状态。通过方差分析结果可以明确地发现, 在实验设置的不同浓度条件下, 除了 Mg^{2+} 这一特定阳离子之外, 其他类型的阳离子对氨氮去除效果的影响均呈现出显著的统计学差异 (P 值 < 0.05)。这一结果表明, 在所研究的浓度范围内, Mg^{2+} 对氨氮去除的影响并不显著, 而其他阳离子则在不同的浓度水平下对氨氮去除效果产生了明显的不同影响, 进一步验证了这些阳离子在氨氮去除过程中的重要作用和差异性。因此, 在初始氨氮浓度较低且存在多种共存离

子时，其对沸石吸附氨氮的抑制程度依次为： $K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 。沸石对阳离子的典型选择顺序为 $K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ [21]。 K^+ 因具有比 NH_4^+ 更强的选择性，会优先占据沸石表面活性位点并堵塞孔道，同时高浓度的 K^+ 和 Na^+ 也会阻碍 NH_4^+ 的离子交换过程。相比之下， Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的选择性较弱，且离子半径大于 Na^+ ，空间位阻较大，难以进入沸石孔道进行交换 [22]。

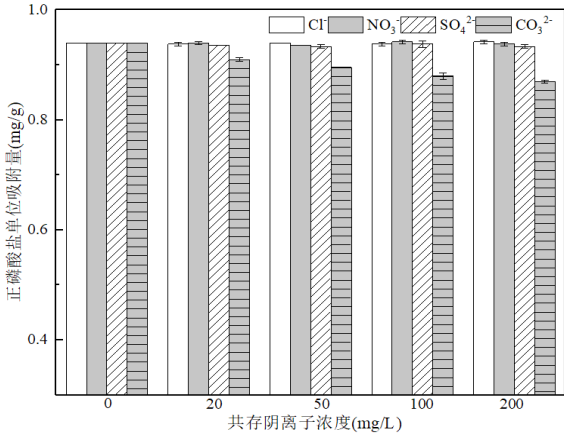


图7 共存阴离子对混合滤料吸附去除正磷酸盐的影响

共存阴离子对混合滤料去除正磷酸盐的具体影响情况如图7所详细展示。通过实验数据分析可以看出， Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 这三种常见的阴离子在吸附过程中所产生的影响相对较小。即便它们的浓度水平升高至正磷酸盐浓度的40倍之多，也并未观察到对正磷酸盐去除效果的显著抑制作用，这一现象充分表明该混合滤料在去除正磷酸盐方面展现出了极为优异的选择性吸附能力。进一步的方差分析结果也支持了这一结论，数据显示在不同阴离子浓度条件下，正磷酸盐的去除率之间并未呈现出统计学上的显著差异（ P 值大于 0.05），从而验证了混合滤料在不同阴离子干扰下仍能保持稳定的去除效果。根据 Zhang [23] 与林建伟等 [24] 的研究，若磷酸盐通过内层配合物形式（如配体交换）被吸附，离子强度对其影响较小甚至可能促进吸附；若依赖静电作用与外层配合，则易受离子强度抑制。因此可推断，本实验中正磷酸盐的去除主要依靠配体交换机制，而非静电吸附。相比之下， CO_3^{2-} 会轻微抑制吸附效果，且差异显著（ $P < 0.05$ ）。当其浓度从 0 增至 200 mg/L 时，吸附量由 0.94 mg/g 降至 0.87 mg/g，降幅约 7%。这主要是因为 CO_3^{2-} 与磷酸盐竞争表面活性位点，且作为弱酸根离子，其水解可能改变溶液 pH，进一步影响吸附过程 [25]。

通常雨水径流中 K^+ 、 Na^+ 浓度较低 [26]， CO_3^{2-} 含量受 pH 影响较大 [27,28]，但整体对氮磷去除影响有限。从离子共存的角度分析，沸石、铝基锁磷剂与石英砂混合滤料的组合，在雨水径流中氮磷的治理方面展现出良好的适用性。

(3) 有机物对混合滤料削减氮磷的影响

有机物对混合滤料吸附削减氨氮的影响如图8所示。

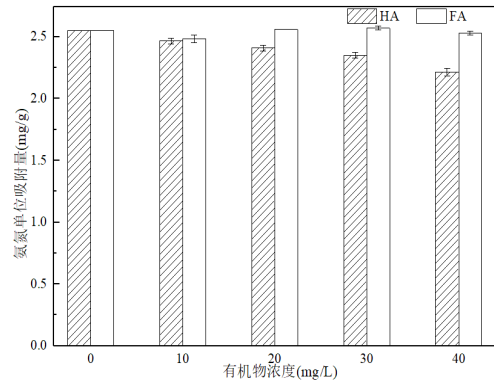


图8 有机物对混合滤料吸附削减氨氮的影响

由图8所展示的实验数据可以明显观察到，不同种类的天然有机物在作用于混合滤料进行氨氮去除的过程中，其效果呈现出显著的差异性（ $P < 0.05$ ）。具体而言，在保持有机物浓度一致的前提下，腐殖酸（HA）对混合滤料氨氮去除的抑制作用表现得尤为明显，其抑制效果显著强于富里酸（FA）。经过更为深入的分析和研究，我们发现了一个有趣的现象：当有机物的浓度处于 0 至 40 mg/L 这一特定范围内时，富里酸（FA）这种有机物质对混合滤料在吸附氨氮过程中的能力影响表现得相对较为有限。具体而言，在这一浓度区间内，富里酸的存在并不会显著削弱或增强混合滤料的吸附效能。这意味着在低浓度条件下，富里酸对氨氮去除的负面影响并不显著，反而可能在一定程度上有助于提升氨氮的去除效率。单位吸附量维持在 2.49~2.57 mg/g 之间；而腐殖酸则表现出明显抑制，随着浓度上升，吸附量从 2.55 mg/g 下降至 2.20 mg/g，降幅达 13.7%。方差分析表明，两者对氨氮去除的影响具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。富里酸分子量较低，可增强溶液电负性 [29]，从而促进对 NH_4^+ 的静电吸附；腐殖酸则因结构复杂、含较多官能团，不仅占据滤料表面吸附位点，还可与金属离子发生螯合作用，干扰对氨氮的去除 [30]。

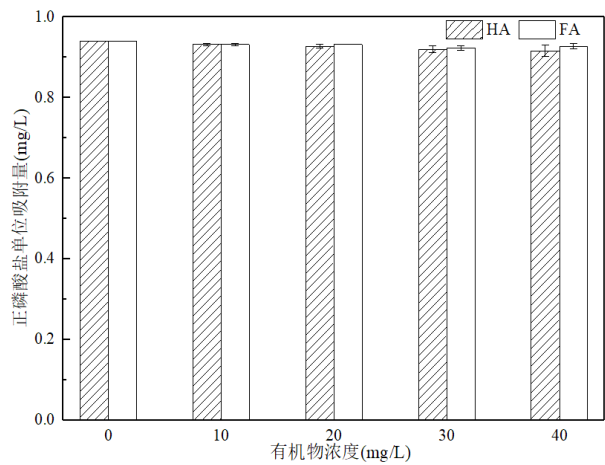


图9 有机物对混合滤料吸附去除正磷酸盐的影响

由图9可知，天然有机物的影响不显著（ $P > 0.05$ ）。

腐殖酸和富里酸浓度在 0~40 mg/L 范围内时, 单位吸附量分别保持在 0.918~0.940 mg/g 和 0.924~0.940 mg/g 之间。方差分析显示, 两者对磷酸盐吸附效果无显著差异 ($P > 0.05$), 说明混合滤料对磷酸盐的吸附受有机物干扰较小, 具备实际工程应用的潜力。

综上所述, 该混合滤料适用于应用在去除雨水径流的氮磷污染物中, 且具有良好的氮磷去除效果。

4 结论

(1) 沸石对氨氮去除效果最佳 (84.80%), 铝基锁磷剂对磷酸盐去除效果最佳 (76.21%), 石英砂对 SS 去除效果最佳 (97.23%)。综合以上结果, 确定雨水沉砂槽滤料类型为石英砂、铝基锁磷剂和沸石。

(2) 以等质量的沸石、铝基锁磷剂和石英砂组成的混合滤料在 pH 6~9 范围内氮磷去除效果稳定; 强酸或强碱环境均显著抑制去除效果。K⁺ 和 Na⁺ 浓度超过 50 mg/L 时对氨氮吸附有轻微抑制, CO₃²⁻ 对磷酸盐吸附有微弱抑制。腐殖酸 (0~40 mg/L) 对氨氮吸附有轻微抑制, 富里酸影响不明显且在某些条件下有促进作用; 两种有机物对磷吸附均无明显影响。

(3) 由沸石、铝基锁磷剂和石英砂构成的混合滤料于雨水沉砂槽中展现出良好的氮磷削减成效, 对水环境较为友好, 且抗干扰能力较强, 具备实际工程应用的潜力, 可作为雨水沉砂槽的基质滤料予以推广运用。

参考文献

[1] Lanmiao Li, Wu Linjun, Yang Lingxiao, et al. Combined impact of organic matter, phosphorus, nitrate, and ammonia nitrogen on the process of blackwater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(25): 1-13.

[2] 王柯, 郭义强, 张建军, 等. 基于时空分析的生态保护与修复试点工程实施效果评估——以赣州市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8867-8877.

[3] Shan Chen, Zhang Wei, Zhang Jiahui, et al. Local habitat heterogeneity determines the differences in benthic diatom metacommunities between different urban river types[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669711-720.

[4] 刘启迪, 周真明, 张红忠, 等. 煅烧改性净水厂污泥制备除磷材料工艺参数优化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(01): 51-56.

[5] Zhou Zhenming, Qidi Liu, Shuwen Li, et al. Characterizing the correlation between dephosphorization and solution pH in a calcined water treatment plant sludge[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2018, 25(19): 18510-18518.

[6] 马英, 马崑文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染转移规律研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(12): 1983-1990.

[7] 刘启迪, 周真明, 张红忠, 等. 煅烧改性净水厂污泥的除磷特性[J]. *环境化学*, 2019, 38(02): 325-333.

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-246, 276-281.

[9] 胡细全, 胡志操, 王春秀, 等. 天然沸石吸附氨氮和磷的研究[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(04): 72-74.

[10] 许育新, 喻曼, 陈喜靖, 等. 天然沸石对水中氨氮吸附特性的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(03): 250-256.

[11] 张玉妹, 杨兰, 刘宗元, 等. 净水污泥对水中氨氮的吸附效能研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(01): 192-196.

[12] 仇付国, 王瑜. 水厂铝污泥去除水中污染物研究进展[J]. *水处理技术*, 2014, 40(06): 1-8.

[13] Zhenming Zhou, Huang Tinglin, Yuan Baoling, et al. Remediation of Nitrogen-Contaminated Sediment Using Bioreactive, Thin-layer Capping with Biozeolite[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2016, 25(1): 89-100.

[14] Zhu Bolin, Shuwen Li, Canyang Lin, et al. The effect of secondary capping on the control of phosphorus release from sediment by activated thin-layer capping with Al-PIA[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(14): 18062-18069.

[15] 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 等. 不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(08): 3012-3017.

[16] Mulan Zhang, Zhang Huayong, Xu Dan, et al. Removal of ammonium from aqueous solutions using zeolite synthesized from fly ash by a fusion method[J]. *Desalination*, 2011, 271(1): 111-121.

[17] Haibo Liu, Peng Shuchuan, Shu Lin, et al. Effect of Fe3O4 addition on removal of ammonium by zeolite NaA[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 390(1): 204-210.

[18] Y Yang, Zhao Y-Q, Babatunde A-O, et al. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 51(2): 193-200.

[19] Zhenming Zhou, Huang Tinglin, Yuan Baoling, et al. Remediation of Nitrogen-Contaminated Sediment Using Bioreactive, Thin-layer Capping with Biozeolite[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2016, 25(1): 89-100.

[20] Shunlong Meng, Li Yongdan, Zhang Tian, et al. Influences of Environmental Factors on Lanthanum/Aluminum-Modified Zeolite Adsorbent (La/Al-ZA) for Phosphorus Adsorption from Wastewater[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(6): 1556.

[21] Don-R Durham, Marshall Leda-C, Miller James-G, et al. New Composite Biocarriers Engineered To Contain Adsorptive and Ion-Exchange Properties Improve Immobilized-Cell Bioreactor Process Dependability[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(11): 4178-4181.

[22] 陆风海, 张新颖, 吴志超, 等. 天然沸石颗粒对NH₄⁺动态吸附过程中的离子交换特性研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(04): 795-800.

- [23] Gaosheng Zhang, Liu Huijuan, Liu Ruiping, et al. Removal of phosphate from water by a Fe–Mn binary oxide adsorbent[J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2009, 335(2): 168-174.
- [24] 林建伟, 王虹, 詹艳慧, 等. 氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用[J]. *环境科学*, 2016, 37(01): 208-219.
- [25] Haoyang Fu, Yang Yixuan, Zhu Runliang, et al. Superior adsorption of phosphate by ferrihydrite-coated and lanthanum-decorated magnetite[J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2018, 530704-713.
- [26] 郭伟强, 宋进喜, 刘琪, 等. 漓河冬季潜流带水交换对沉积物间隙水水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(05): 1957-1967.
- [27] Daniele la Cecilia, Porta Giovanni-M, Tang Fiona-H-M, et al. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115106424.
- [28] Nadeem-Ahmad Bhat, Ghosh Prasun, Ahmed Waseem, et al. Hydrochemical Characteristics and Quality Assessment of Stream Water in Parts of Gadag, Koppal and Ballary Districts of Karnataka, India[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2019, 94(6): 635-640.
- [29] 赵发敏, 海热提, 韩晓丽. 人工湿地填料去除氨氮优化配比及影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(09): 26-30.
- [30] Haiyun Zhang, Li Aimin, Zhang Wei, et al. Combination of Na-modified zeolite and anion exchange resin for advanced treatment of a high ammonia–nitrogen content municipal effluent[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 468128-135.