

活性炭吸附与化学沉淀处理生活污水中氮磷的多指标检测与分析研究

刘娜¹ 郝丽伟^{*通讯作者 2}

1. 河北华清环境科技集团股份有限公司, 河北 石家庄 050000

2. 河北华测检测, 河北 石家庄 050000

摘要: 本研究目的在于探究活性炭吸附同化学沉淀法联合处理生活污水中的氮磷污染物是否有效, 通过设立诸多实验组, 用不同剂量的活性炭和沉淀剂组合来处理生活污水, 然后检测氨氮(NH_4^+-N), 硝态氮(NO_3^--N), 总氮(TN), 总磷(TP), 正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)等水质指标. 结果显示, 活性炭吸附同化学沉淀有着明显的协同效应, 能明显提升氮磷去除率, 从多指标综合评价来看, 此联合工艺有着很强的应用潜力, 给污水处理领域给予了新的技术途径和理论支撑。

关键词: 活性炭吸附; 化学沉淀; 生活污水; 氮磷去除; 多指标评价

DOI: 10.63887/fns.2025.1.3.7

城市化进程加速、人们生活水平提升之后, 生活污水排放量一直在增多, 这里面氮磷这些营养物质过量排放, 成为造成水体富营养化的关键要素, 高浓度氨氮和磷会破坏水体生态系统稳定, 还可能威胁到人类健康。现阶段常用的污水脱氮除磷方法有生物法、化学法、物理吸附法等。生物法效率高但受温度和微生物的影响较大, 化学沉淀法反应速度快、操作简单且适用性强, 活性炭吸附技术因孔隙结构发达、比表面积大而被广泛应用于微污染控制, 两者结合使用可能可以取长补短。活性炭主要依靠表面物理吸附以及化学吸附来去除水中的污染物, 化学沉淀剂则是通过形成难溶盐类, 把溶解态的氮磷转变成沉淀物从而从水中除去, 这两种方法联用也许可以做到对污染物的高效协同去除。单一指标很难把污水处理效果体现出来, 所以要采用包括氮, 磷, 有机物(COD), pH, 电导率, 浊度等一系列指标, 对处理过程和效果加以评定, 从而给工艺改进给予更为精确的依照。本研究尝试性地把活性炭吸附同化学沉淀技术融合起来, 依靠系统的实验规划以及多种指标的检测, 细致探究它们在生活污水处理时对于氮磷去除的效果及其机理, 然后用统计学手段全面分析出最合适的工艺条件, 从而给以后工程化应用给予理论上的支撑^[1]。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本次研究主要采用的吸附材料是椰壳基粒状活性炭, 这种材料来源自然、比表面积大、孔隙结构发达, 被大量用于污水处理中, 而实验用到的活性炭则来源于河北某环保材料公司, 粒径控制在 1~2mm 之间, 这样既能保持颗粒在反应器内的流动状态, 又能使表面充分暴露出来, BET 检测结果显示其比表面积达到 950m²/g, 微孔占比较高, 达到 80%以上, 利于小分子污染物的有效吸附, 在实验前都会对活性炭样品用去离子水反复清洗去除粉尘, 并且在 105℃ 下烘干到恒定重量, 以保证实验的统一性^[2]。

化学沉淀剂方面, 本研究选用了明矾($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)、**石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)**、三氯化铁(FeCl_3)这三种常见的药剂来比较它们对氮磷去除的影响, 明矾和三氯化铁都是分析纯试剂, 由国药化学试剂有限公司提供, 石灰从当地工业材料市场购买, 研磨成小于 150μm 的粉末之后使用, 药剂溶液在使用之前都会按照浓度来配置, 现配现用, 防止发生水解或者降解影响实验效果。

实验所用的生活污水样品取自河北某住宅区的污水预处理站, 水质具有典型的城镇生活污水特征。取

样时避免雨天、早晚高峰，用聚乙烯瓶现场取样，迅速封口，存放在 4℃ 冷藏箱中，在 24 小时内完成检测和实验准备，保证水样质量稳定。原始水样基本理化指标如下所示：

项目	浓度
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	25.3 mg/L
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	7.6 mg/L
TN	36.2 mg/L
TP	4.8 mg/L
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	3.5 mg/L
COD	210 mg/L
pH	7.4
浊度	42 NTU

1.2 实验装置与流程

实验系统大部分置于实验室，以批式间歇处理，便于控制各组的反应参数及收集样品，整体装置由搅拌装置，恒温反应器，沉淀筒，pH 计，电导仪，比色计构成，每次实验反应体积达 1000mL，用高硼硅玻璃烧杯做实验，置于磁力搅拌器上，保持均匀混合，恒温水浴箱控制反应温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，仿照常温运作条件。

实验按如下步骤进行：
按实验组需求将污水样品注入反应容器
加入设定质量的活性炭，搅拌吸附 20~30 分钟，初步去除部分污染物
加入特定浓度的沉淀剂，持续搅拌 30 分钟以促进反应
静置沉淀 60 分钟后，取上清液进行水质检测
实验组设置如下：

实验组	处理方式	活性炭投加量	沉淀剂种类及投加量
A1	控制组（不加）	0 g/L	无
B1~B3	单一吸附组	5, 10, 20 g/L	无
C1~C3	单一沉淀组	无	明矾（50, 100, 150 mg/L）
D1~D3	联合处理组	10 g/L	明矾（50, 100, 150 mg/L）

每组实验独立进行，避免交叉污染，每组实验进行三次重复实验，保证实验数据可重复，统计可靠性，在反应过程中，注意观察 pH 和温度的变化，记录沉淀形成过程中可见的现象，如絮体大小、沉降速度等。

1.3 检测指标与方法

为了解各处理方案对水质改善的效果，本研究选择氮类、磷类、有机物指标以及水体基本物理化学性质共 8 个指标进行检测，检测方法和使用的仪器试剂均按照《水和废水监测分析方法》（第四版）标准执行，以保证检测结果的准确性与可比性。

各项指标的检测方法如下：

指标	检测方法	方法原理
----	------	------

氨氮 (NH ₄ ⁺ -N)	纳氏试剂比色法	形成黄色络合物，在波长 420 nm 下比色
硝态氮 (NO ₃ ⁻ -N)	紫外分光光度法	在波长 220 nm 下测定
总氮 (TN)	碱性过硫酸钾消解-紫外法	消解后检测硝酸盐形式
总磷 (TP)	钼酸铵分光光度法	形成蓝色络合物，波长 700 nm
正磷酸盐 (PO ₄ ³⁻ -P)	钼蓝比色法	波长 700 nm 比色
COD	重铬酸钾回流法	氧化还原滴定
pH、电导率、浊度	多功能水质分析仪	直接测定

样品检测时，每一项指标都要做对照和空白校准，还要做三次平行检测，取平均值当作最终结果，所有仪器在实验前都会校准，保证测试线性范围内的正确读数。特别是 TP 和 PO₄₃-P 的测定，为了避免磷酸盐共存形式互相干扰，用分段消解和选择性比色结合的方式来处理。

1.4 数据处理方法

为保证数据的科学性以及统计的有效性，本次实验在实验设计中遵循重复原则，每组实验均重复三组样本，对得到的测量数据求平均并计算标准差，实验数据初步处理使用 Excel，包含数据录入、归一化、基本统计描述等。

为了进一步发现各处理之间的显著差异及多因素之间的关联关系，使用 SPSS26.0 软件进行统计分析。主要使用的方法有：

单因素方差分析（ANOVA）：分析不同投加量组间污染物去除率是否具有显著性差异（p<0.05 为显著差异）。

多元回归分析：污染物去除率与实验变量的定量关系分析

隶属度函数法：基于指标极值对处理组进行归一化评分以综合反映整体效能

隶属度评价时，给每个指标相同的权重，用加权平均法算出综合得分，最后的得分用来筛选最佳工艺组合和给出建议^[3]。

2 结果

2.1 活性炭吸附实验结果

不同活性炭投加量（5、10、20g/L）下氮磷去除效果对比：

投加量 (g/L)	NH ₄ ⁺ -N 去除率	TN 去除率	TP 去除率	PO ₄ ³⁻ -P 去除率
5	28.40%	22.10%	31.20%	35.50%
10	46.70%	38.50%	52.90%	56.30%
20	58.20%	49.30%	64.10%	68.70%

随着活性炭的增加，污染物的去除率明显增加，具有吸附饱和的过程，对正磷酸盐吸附能力较强，根据吸附动力学曲线拟合可知，吸附过程基本符合准二级动力学模型，表明化学吸附是主要吸附方式。

2.2 化学沉淀实验结果

投加明矾、石灰与三氯化铁对氮磷的处理效果（以明矾为例）如下：

明矾投加量 (mg/L)	TP 去除率	PO ₄ ³⁻ -P 去除率	TN 去除率
50	58.10%	60.40%	24.60%
100	72.30%	74.80%	30.90%

150

80.60%

83.50%

34.20%

可见沉淀剂对磷去除更有针对性，去除率远高于氮类指标。而且 pH 的调整过程中，发现 pH 值在 6.5~7.5 之间沉淀效果最好，沉淀剂投加越多，系统 pH 越低。浊度随着沉淀剂的增加而降低，表明颗粒沉降效果良

好^[4]。

2.3 联合工艺实验结果

活性炭与明矾联用（D 组）呈现显著协同效果：

实验组	NH ₄ ⁺ -N 去除率	TN 去除率	TP 去除率	PO ₄ ³⁻ -P 去除率	COD 去除率
D1	63.50%	58.40%	82.30%	86.10%	57.90%
D2	70.20%	63.70%	88.40%	91.30%	61.50%
D3	72.60%	65.10%	89.70%	93.00%	64.20%

联合处理在各指标上都好于单独处理组，并且在磷去除上几乎接近完全沉淀化处理，COD 的下降也意味着部分有机物被吸附或参与絮凝沉淀。

运用隶属度函数综合评分评估组合处理的整体效能：

单因素隶属度依据各指标最大值进行归一化处理
加权平均综合得分如下：

2.4 多指标评价结果

组别	综合得分
A1	0
B3	0.618
C3	0.707
D3	0.884

D3 组的综合得分最高，这很明确地显示，在 10g/L 活性炭同 150mg/L 明矾的组合情况下，联合处理工艺在氮磷及其他水质指标的去除上达到最佳状态，这个组合不但做到了对氨氮，总氮，总磷和正磷酸盐的有效去除。而且在 COD 和浊度的把控上也有较好的表现，表现出吸附和沉淀的协同作用，这个结果给今后的污水处理工程中参数改善给予了可信的实验根据，有着不错的实用推广意义，进一步探究可着重在该最优组合的不同水质状况，流量负载以及连续反应体系中的适用性展开，推进联合工艺的工程化，标准化使用。

3 讨论

3.1 活性炭吸附与化学沉淀协同机理研究

本研究证实，活性炭和化学沉淀联用对氮磷去除存在显著的协同作用，这种协同效应主要源自两种机制的互补：

活性炭吸附机制：凭借其极大的比表面积和丰富的微孔，对于氨氮、磷酸盐这些极性 or 带电的小分子，具有很强的物理吸附和化学吸附的能力，特别是在初期浓度较高的时候，表现出快速去除的特点。

化学沉淀机制：利用 Al³⁺ 或者 Fe³⁺ 这类多价金属离子同 PO₄³⁻ 开展化学反应，形成难溶的沉淀物（像 AlPO₄、FePO₄ 之类），从而把磷给固定下来，而且，某些氮化合物也能够通过络合或者共沉的方式被去除掉。两者一起使用的时候，活性炭可以先行削减污水里自由态污染物的浓度，这样就能减小沉淀剂的投放量。而且还能加强沉淀剂对于剩余磷的沉降效率，而且活性炭表面还有助于颗粒絮凝，加快沉淀速度，提升整体处理效果^[5]。

3.2 影响处理效果的关键因素

实验表明，多因素影响联合工艺处理效率：

投加量匹配关系：活性炭与沉淀剂的比例显著影响协同效果，过量或不足均可能造成资源浪费或处理不充分

pH 调控：化学沉淀反应对于 pH 比较敏感，特别是铝盐类沉淀剂在弱酸到中性范围内效果较好，活性炭具有一定的 pH 缓冲能力，有助于保持反应环境稳定。

水质初始浓度：污染物初始浓度越高，活性炭吸附速率和容量体现得就越明显，不过当达到饱和之后，效果就变得平稳起来，这时候沉淀的作用就显得越发重要。

3.3 多指标综合分析的意义

传统污水处理研究大多只针对少数关键污染物展开，容易忽略一些副效应或者指标间的联系，借助这个研究引入多指标检测以及隶属度综合评分，可以精确体现处理成果，也能表现不同处理办法在多目标优化时的优劣。比如说联合工艺在除氮磷的时候，对 COD、电导率等等也是有一些改善效果的，所以意味着这种工艺既可以用在控制营养盐上，也可以帮整体出水水质变好一些，能够达到更高标准的排放要求。

3.4 工程应用前景与存在问题

技术成熟度高：活性炭与常规沉淀剂均为市面上常见的材料，价格合理，适合中小型污水处理站使用。

处理稳定性强：工艺抗冲击能力强，适应水质变化，具有推广价值。

便于模块化设计：吸附单元与沉淀反应器可根据实际需求配置，具备良好灵活性。

运行成本问题：活性炭投加与再生成本高昂，若未回收利用，长期运行费用可观。

二次污染风险：沉淀污泥中可能富集重金属与有机污染物，处理不当易引发二次污染。

系统优化需求：联合工艺参数繁多，亟需优化控制策略以实现自动化节能运行。

4 结论

本研究对活性炭吸附和化学沉淀联合工艺处理生活污水中氮磷污染的效果进行了系统研究，并采用多指标检测及综合分析法对处理效果进行评价，研究结果表明：

单独使用活性炭或者沉淀剂都有一定的去除效果，活性炭对正磷酸盐和氨氮的吸附能力比较强，明矾等沉淀剂对磷的去除效率更高。联合处理工艺具有较好的协同效果，在投加 10g/L 活性炭+150mg/L 明矾时，总氮、总磷、正磷酸盐和 COD 去除率分别达到 65.1%、89.7%、93.0%和 64.2%，综合效果远优于单一处理。多指标综合评价方法可以有效的找出最优处理组合，采用隶属度函数法对各个实验组进行综合打分，D3 组（联合处理）综合得分最高（0.884），证明了其处理效果的全面性与稳定性。协同机理分析表明，两种处理方式去除机制互补，活性炭吸附作用提高了沉淀剂沉降效率，一定程度上减缓了沉淀剂投加对 pH 的冲击。活性炭吸附与化学沉淀联合处理工艺在生活污水中氮磷去除具有较好的应用前景，适合于对营养盐有严格控制要求的污水处理工艺。

参考文献

- [1]任钢锋. 活性炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(012): 411-412.
- [2]施恩, 张帅, 张淼, 刘沙沙, 邹钰良, 张祥志. 基于生命周期的污泥基活性炭制备工艺环境影响研究[J]. 环境工程, 1-11.
- [3]徐佳瑞, 刘浩, 栾维豪, 王超, 刘长青, 杨延栋. 负载铁改性活性炭对城市污水厂二级出水中溶解性有机物的吸附性能[J]. 环境工程, 1-8.
- [4]范久林. 市政给排水工程污水处理的技术分析[J]. 清洗世界, 2023, 39(11): 124-126.
- [5]姜侠, 王冠, 刘振华, 等. 改性活性炭对亚甲基蓝的吸附性能及机理[J]. 水处理技术, 2020, 46(026): 734-735.