



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202208073 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

马春麟, 李军, 刘阳, 等. 基于过滤沉淀法的屋面与路面雨水径流污染控制技术及其在北京某城中村中的应用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4168-4176. [MA Chunlin, LI Jun, LIU Yang, et al. Pilot-scale research and application of modified zeolite filtration and coagulation sedimentation for the treatment of roof and pavement rain-runoff in urban village of Beijing city[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4168-4176.]

基于过滤沉淀法的屋面与路面雨水径流污染控制技术及其在北京某城中村中的应用

马春麟¹, 李军^{2,✉}, 刘阳³, 孙志涛⁴, 周邦磊⁵

1. 中国人民大学后勤集团, 北京 100872; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京市水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 3. 广州开发区财政投资建设项目管理中心, 广州 510663; 4. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 5. 浙江江南工程管理股份有限公司, 杭州 310012

摘要 通过对比北京市西大望路和郊区城中村 B 村 3 类屋面雨水径流和 8 类路面雨水径流样品检测结果, 分析北京市区和城中村屋面与路面雨水径流的污染特征。针对不同污染特征, 分别采用改性沸石过滤法和混凝沉淀法处理城中村屋面和路面雨水径流。开展改性沸石过滤法固定床吸附实验发现: 雨水流速越小、滤柱越高和沸石粒径越小, 对氨氮吸附效果越好。开展混凝沉淀法批次实验发现: 当初始 pH 为 6~7、PAC 投加量为 80~100 mg·L⁻¹ 时, 混凝沉淀效果最佳, 且初始 pH 和混凝剂投加量对混凝沉淀效果影响程度大。设计改性沸石过滤法处理城中村屋面雨水径流工艺与装置, 通过实际运行验证处理效果, 设计蓄水池-混凝反应罐处理城中村路面雨水径流。混凝反应罐在内的雨水处理单元与城中村污水处理厂(站)联合运行, 经过处理后的雨水可用于河道补给, 可用于郊区 B 村处理实际雨水径流。本研究结果可为城市城中村的屋面径流污染处理提供参考。

关键词 雨水资源化利用; 过滤法; 混凝法; 处理装置

雨水是优质天然水资源, 但其利用率低。“城中村”雨水径流冲刷地表产生的受污染雨水直接进入合流制管道和河道, 会导致水体水质恶化。因此, 有必要明确城中村屋面与路面雨水径流污染特征并研究雨水径流污染处理技术, 对城中村屋面和路面雨水径流进行回收利用。北京市是我国最早开展雨水利用技术研究及实践的城市之一^[1]。去除雨水径流污染物的方法有物理吸附、离子交换^[2-3]、混凝沉淀^[4-5]、渗滤、膜分离技术等; 采取措施包括植被控制^[6-7]、滞留池^[8]、人工湿地^[9]和渗滤系统等。沸石具有多孔性、高比表面积和阳离子交换特性, 沸石过滤法^[10-13]吸附雨水污染物效果明显, 以 Kruger 公司、Infilco Degremont 为代表的公司已成功商业化应用混凝沉淀工艺于溢流雨水处理领域^[14]。混凝沉淀法用于处理雨水径流, 具有无相变、操作简单、成本低和处理效果好等优点^[4-5]。

本研究分析北京市区和城中村屋面与路面雨水径流的污染特征, 针对雨季集中、间歇性降雨和短期降雨强度大的特点, 开展受污染的雨水径流处理利用技术研究, 设计改性沸石过滤法和混凝沉淀法处理屋面和路面雨水径流的装置, 并提出应用于“城中村”的雨水径流处理应用方案, 考

收稿日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-12-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07103-001)

第一作者: 马春麟 (1994—), 女, 硕士, 助理工程师, m13241724366@126.com; *通信作者, ; ✉通信作者: 李军 (1964—), 男, 博士, 教授, jgljun@bjut.edu.cn

察其实际应用效果，以期为建设可因地制宜快速高效削减雨水径流污染负荷、提高雨水利用效率与河道治理的独立小排水单元面源污染控制系统工程提供参考。

1 材料与方 法

1.1 雨水径流采样点布 设方法

如图 1 所示，采样类型包含屋面雨水径流和路面雨水径流。西大望路地处 CBD 核心地区，南北垂直于长安街，本研究选择西大望路附近住宅区、交通区、商业区和教学区作为北京市区雨水径流取样点。郊区 B 村处于北京六环外，北京城市副中心建设全面提速，留下了相当一部分城中村，本研究选择 B 村附近住宅区、交通区、河道溢流口、小型厂区作为城中村雨水径流取样点。

屋面雨水径流采样点布设于在西大望路南 侧北京工业大学教学区建工西楼 (图 1 中 W1 所示)，B 村某厂房 (W2)、B 村某二层居住建筑 (W3)；路面雨水径流市区采样点布设于西大望路住宅区居民楼下 (CS1)、市区交通主干道 (CS2)、商圈广 场区 (CS3) 和北工大校园道路 (CS4)，均为沥青路面，城中村采样点布设于 B 村村民庭院内 (CZ1)、 城中村乡村道路 (CZ2)、城中村附近河道溢流口 (CZ3) 和城中村内小型厂区内 (CZ4)。

1.2 取样方案及检测指标分析方法

对近 3 年内数次降雨及雨水径流进行人工取样及水质检测，同一样品检测 3 次，以保证结果的准确性。采用常规标准方法进行各项指标检测：总悬浮物采用重量法；总磷采用钼酸铵分光光度法；氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定；硝态氮采用紫外分光光度法测定；有机污染物 (以 COD 计) 采用重铬酸钾法测定；pH、溶解氧、电导率采用德国 WTW pH3310 便携仪测定。

1.3 实验方法

1) 屋面雨水径流实验。实验装置如图 2 所示。固定床吸附柱为玻璃材料制品，高度为 3 m，内径为 10 cm。设置了 1.0 m、2.0 m 和 3.0 m 3 个出水口。在固定床的底端设置石英砂，作为承托层。实际雨水采用下向流的方式进入固定床中进行吸附实验。实验选用的主要材料为沈阳法库天然斜发沸石，用氯化钠溶液进行改性处理^[15]。

2) 路面雨水径流实验。混凝沉淀处理路面雨水径流的正交实验与单因素影响实验装置采用六联搅拌机 (ZR4-6)，其配带 6 个 1 L 的圆柱状塑料杯。主要实验试剂为聚合氯化铝 (PAC)、硫酸 (H_2SO_4) 和氢氧化钠 (NaOH)。

3) 实验雨水径流水质。实验室实验所采用的雨水径流水质如表 1 所示。



图 1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in Beijing

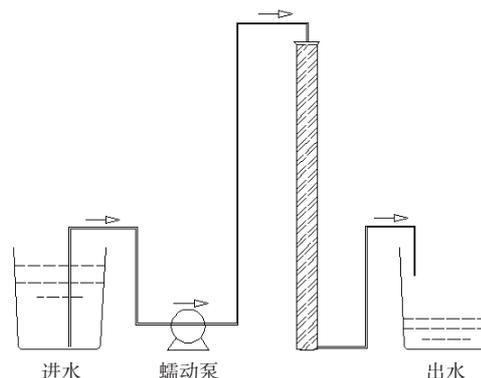


图 2 屋面雨水径流吸附过滤装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the roof rainwater adsorption filter

表1 雨水径流水质

Table 1 Experimental rain-runoff quality

屋面雨水径流			路面雨水径流			
COD/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	COD/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)
87.3	18.6	124	202	1 073	2.8	788

2 结果与讨论

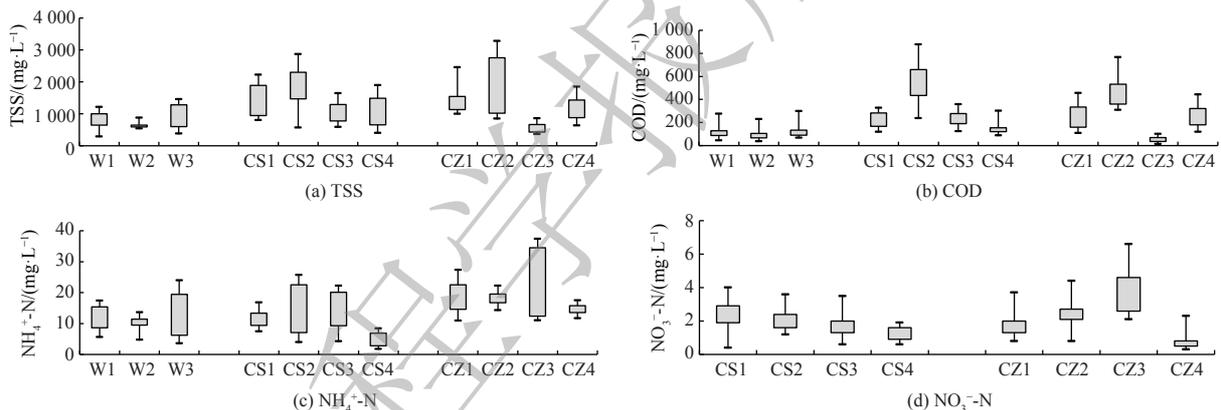
2.1 市区与城中村雨水径流污染特征分析

对3类屋面雨水径流和8类路面雨水径流水质指标进行监测(表2),对总悬浮物含量(TSS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)负荷进行对比分析(图3)。

表2 雨水径流水质指标

Table 2 Numerical range of rainwater runoff quality

pH	浊度/NTU	DO/(mg·L ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)	TSS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	硝态氮/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
6.95~8.69	127.9~4692	9.3~9.59	37.8~878.3	289~3278	1.7~37.3	0.3~6.6	0.7~3.1



注:分位数是变量的特征数之一。在箱线图中,方框为25%~75%分位数范围,线条为所有数值范围。

图3 屋面和路面雨水径流污染物负荷分布图

Fig. 3 Distribution for pollutant loading of roof and surface rainwater runoff

屋面雨水在形成径流的过程中先与集水屋面接触,因此,屋面材质对水质有重要影响。本研究选择市区与城中村中3种不同种类材质、不同建筑类型的3类屋面雨水径流进行监测分析。其中,市区屋面W1、城中村厂房W2和住宅W3分别为水泥、钢板和石板与混凝土材质。钢板屋面的TSS污染负荷平均值为709.5 mg·L⁻¹,低于水泥屋面749 mg·L⁻¹和石板与混凝土材质917 mg·L⁻¹。钢板屋面的氨氮平均负荷、COD也低于其他2种,分别为11.4和133.9 mg·L⁻¹。该结果与MENDEZ等^[16]和GIKAS等^[17]的研究结果一致,金属材质集水面收集的雨水水质更好。

根据地理位置和土地使用方式不同,分别选取市区与城中村各4类路面雨水径流进行监测分析。结果表明,市区地表雨水TSS污染物平均质量浓度特征为:交通区>住宅区>高校教学区>商业区;氨氮平均负荷和COD平均值大小:交通区>商业区>住宅区>高校教学区。TSS、COD、氨氮和硝态氮负荷峰值分别为:2 870 mg·L⁻¹、878.3 mg·L⁻¹、25.7 mg·L⁻¹、4 mg·L⁻¹,且峰值水样均来自交通区。城中村路面雨水径流TSS、COD、氨氮和硝态氮负荷峰值分别为:3 278 mg·L⁻¹、767.2 mg·L⁻¹、37.3 mg·L⁻¹、6.6 mg·L⁻¹,COD和TSS峰值水样来自交通区,氨氮、硝态氮负荷峰值水样来自河道

溢流口。同时，河道溢流口平均 COD 为 $57.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均 TSS 质量浓度为 $609 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，低于其他类型径流。这与 B 村生活污水、农业面源污染混入和径流量大会降低部分污染物质量浓度有关。对比市区与城中村路面雨水径流监测结果发现，城中村交通区 TSS 和氨氮污染负荷高于市区，城中村住宅区 3 种污染物负荷均高于市区，城中村路面雨水径流氨氮污染负荷均高于市区。这与城中村污染物来源、生活习惯、土地使用方式有关。

2.2 雨水径流处理利用技术小试研究

北京城中村屋面和路面雨水径流的生物可降解性较差，结合快速削减需求，故采用物理与化学的方法处理屋面和路面雨水径流。屋面雨水径流方便收集、污染负荷小，采用改性沸石滤料进行过滤处理。探究不同实验条件对固定床实验吸附效果的影响。针对降雨间歇式发生、路面雨水径流污染负荷高且强度大的特点，采用混凝沉淀法处理，通过使用 PAC 混凝剂进行正交实验和单因素影响实验，探究不同影响因素及最优实验条件。

2.2.1 屋面雨水径流处理利用技术

研究雨水流速、滤柱高度和沸石粒径对实验的影响。在其他条件不变的基础上，分别调整恒流蠕动泵的转速，控制其为 $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $150 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $250 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。设置沸石填充高度分别为

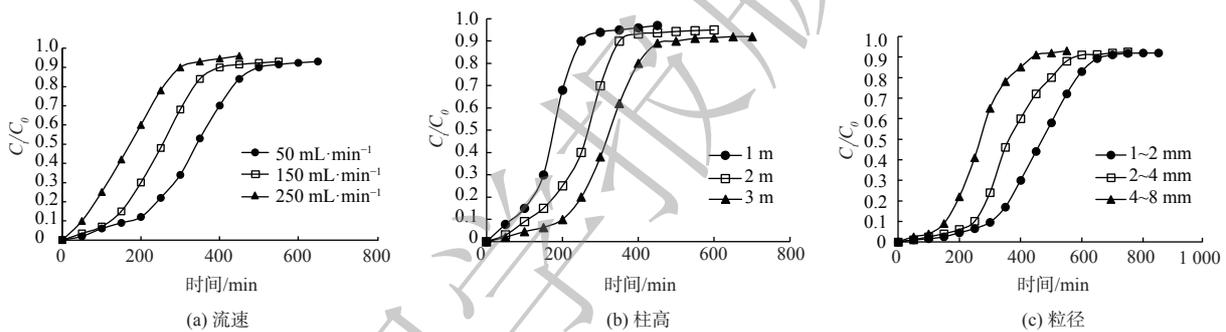


图 4 不同条件下改性沸石对屋面雨水中氨氮的吸附穿透曲线

Fig. 4 Adsorption and breakthrough curves of ammonia nitrogen in the roof rainwater at different conditions

1.0 m、2.0 m 和 3.0 m，沸石粒径分别为 1~2 mm、2~4 mm 和 4~8 mm。根据固定床吸附雨水中的氨氮实验结果，绘制穿透曲线(图 4)。由于改性后沸石内部的 Na^+ 与雨水中的阳离子进行了离子交换，故氯化钠改性沸石能更有效地去除雨水径流中氨氮(式(1))。另外，通过氯化钠改性还可以有效扩宽沸石的孔穴与孔道，以改善其对其他污染物的吸附效果。如表 3 所示，屋面雨水径流通过流速越小、填充高度越大、沸石颗粒粒径越小，雨水径流与改性沸石便可更深入地接触，反应向有利于吸附反应发生的状态发展，则表现出更好的吸附效果。由此说明，采用改性沸石过滤吸附处理雨水径流中的污染物质是有效的。同时，通过长期实验室固定床屋面雨水径流处理研究发现，其对多种污

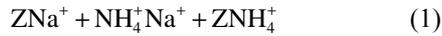
表 3 改性沸石吸附屋面雨水实验参数表

Table 3 Test parameters of roof rainwater absorption by modified zeolite

反应条件	达到穿透点 时间/min	达到饱和点 时间/min	吸附饱和 时间/min
流速为 $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	165	495	330
流速为 $150 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	125	395	270
流速为 $250 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	55	305	250
柱高为 1 m	85	255	170
柱高为 2 m	125	315	190
柱高为 3 m	205	485	280
沸石粒径为 1~2 mm	305	655	350
沸石粒径为 2~4 mm	255	595	340
沸石粒径为 4~8 mm	185	415	230

注： C_t 为固定床出水氨氮质量浓度， C_0 进水氨氮质量浓度。本试验选 $C_t/C_0=0.1$ 时达到吸附穿透点， $C_t/C_0=0.9$ 时达到吸附饱和点。

染物质吸附具有不同效果, 故决定采用该技术处理屋面雨水径流, 并进行中试滤罐装置的应用研究。



2.2.2 路面雨水径流处理利用技术

1) 单因素实验。初始 pH 值实验。设定初始 pH 变化范围为 3、4、5、6、7、8、9、10; PAC 投加量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 搅拌方式为快速搅拌 ($300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 1 min+中速搅拌 ($150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 3 min+慢速搅拌 ($70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 5 min。在快速搅拌开始时加入 PAC 混凝剂, 反应结束后沉淀 20 min, 取上清液测定各项指标。如图 5 所示, 浊度、SS、TP、COD 去除率明显随着初始 pH 的增加先升高后降低, 在初始 pH 为 6~7 时保持较高去除效率, 分别为 96.8%~97.8%、95.1%~96%、98.1%~98.4%、51%~64.4%。当 pH 在 6~7 时, PAC 的存在形式主要以氢氧化铝聚合物为主, 对有机物质以吸附架桥和羟基配合物的电性中和作用为主, 能去除大部分悬浮颗粒及多量溶解性有机物。因此, 该雨水径流的最佳初始 pH 为 6~7。

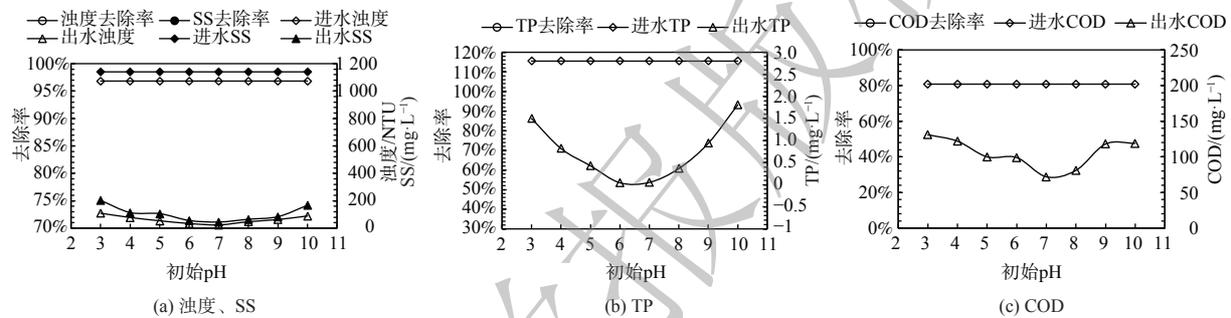


图 5 不同初始 pH 下的污染物去除效果

Fig. 5 Pollutant removal effect curve of different initial pH values

PAC 投加量实验。设定初始 pH 为 7, PAC 投加量变化范围为 50、60、70、80、90、100、110、120、130、140 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其他条件同上。如图 6 所示, PAC 投加量在 50~70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 浊度、SS、TP、COD 去除率逐渐分别增长至 86.2%、90.7%、94.6%、48%。并当 PAC 投加量为 80~140 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 前三者保持在 90% 以上, COD 保持 50% 以上的去除率。实验中可观察到, 搅拌器专用烧杯底部絮体量会随着无机混凝剂 PAC 投加量增加而增加。当投加量为 80~100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 通过化学机理分析可知, 聚合氯化铝 PAC 发生了水解作用, 产生了大量带电荷的高分子聚合物, 其与路面雨水径流中带电荷的有机物发生电性中和作用从而形成了密实絮体, 同时还发生了吸附架桥作用, 絮体具有“胶粒-高分子-胶粒”吸附结构。因此, PAC 合理投加量为 80~100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2) 正交实验。在雨水径流处理利用技术实际应用时, 城中村雨水径流处理单元与城中村污水

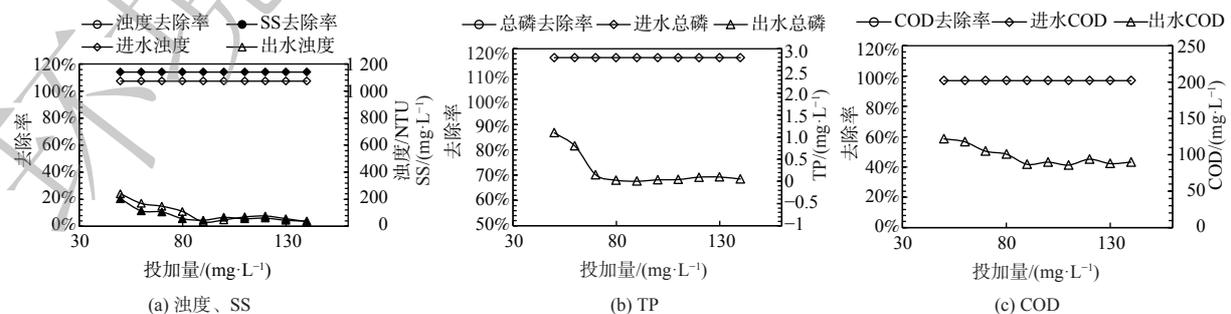


图 6 不同混凝剂投加量下的污染物去除效果

Fig. 6 Pollutant removal effect curve of different coagulant dosage

处理厂(站)联合运行,参照《北京市农村生活污水处理设施水污染物排放标准》,COD为重要考察指标。因此,采用4因素3水平正交实验,以COD去除效果作为评价标准,对PAC处理城中村雨水径流的效果进行研究。4种影响实验的反应因素分别为初始pH、混凝剂投加量、中速和慢速搅拌方式。表4为正交实验的因素设置和水平设置,作为混凝实验操作依据。

表5说明以PAC作为混凝剂时,系统对有机物(以COD计)具有较好的处理效果,最高去除率为67.03%。而4种不同因素对有机物去除效果的影响(表6)依次为:初始pH>混凝剂投加量>慢速搅拌时间>中速搅拌时间。随着PAC混凝剂投加量的增加,COD去除率增大,中性条件下混凝效果最好。中速和慢速搅拌时间对COD去除率的影响较小,初始pH和PAC混凝剂投加量因素对混凝沉淀实验影响程度大。因此,在雨水径流处理利用技术方案和实际工程中,应关注体系pH和混凝剂投加量等因素,设置pH计、药剂投加量控制单元,并实时显示相关元件的各项参数,以便于在实际应用中应对不可控的雨水径流量变化。

2.3 城中村雨水径流处理利用技术

2.3.1 屋面雨水径流处理利用方案

在实验室固定床屋面雨水径流处理利用技术研究基础上,开展改性沸石滤料处理屋面雨水工艺与装置研究。由于屋顶绿化形式多样但需要设置在平面屋顶上,对建筑具有选择性^[18];而雨水罐等储存方式在理论上简单且实用,但往往因水体的循环流动性较差,长期储存后水质不达标,丧失可利用的价值^[19]。由此决定采用可快速处理屋面雨水径流的工艺和滤罐装置进行进一步的应用研究。

设计流程为:屋面雨水径流沿雨水管从屋面流向集雨装置,采用自上而下的方式进入过滤装置(高为3m,直径为1m)实现雨水的高效处理;经反冲洗后,滤料可重复多次使用;经过改性沸石滤料处理后的屋面雨水径流可用于浇灌附近绿地。如图7所示,改性沸石滤料处理屋面雨水装置包含收集单元和过滤单元;

表4 正交实验因素水平表

Table 4 Factor level table of orthogonal test

水平	pH	混凝剂投加量/(mg·L ⁻¹)	(中速)搅拌时间/min	(慢速)搅拌时间/min
1	4	50	1	5
2	7	100	2	10
3	9	150	3	15

表5 PAC混凝正交实验设计

Table 5 Results of orthogonal test

实验序号	因素A	因素B	因素C	因素D	COD去除率
1	1	1	1	1	38.11%
2	1	2	2	2	41.43%
3	1	3	3	3	42.32%
4	2	1	2	3	43.32%
5	2	2	3	1	67.03%
6	2	3	1	2	65.30
7	3	1	3	2	50.34
8	3	2	1	3	61.32
9	3	3	2	1	60.41

表6 PAC混凝正交实验结果

Table 6 Results of orthogonal test

结果	因素A	因素B	因素C	因素D
T ₁	121.86	131.77	164.73	167.55
T ₂	177.65	171.78	145.16	157.07
T ₃	172.07	168.03	161.69	146.96
t ₁	40.62	43.92	54.91	55.85
t ₂	59.22	57.26	48.39	52.36
t ₃	57.36	56.01	53.90	48.99
R	16.74	13.34	6.52	6.86

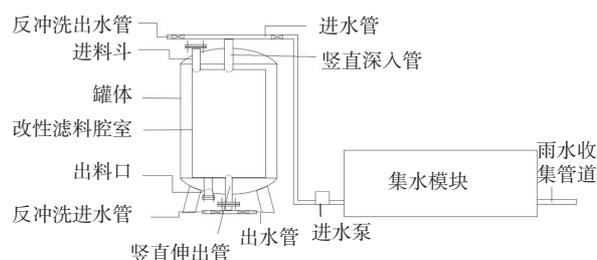


图7 屋面雨水径流处理工艺流程图和过滤装置结构图

Fig. 7 Process flow and structure of roof rainwater runoff treatment

收集单元包含依次连接的雨水收集管道、集水模块、进水泵；过滤单元包含进水管、出水管、反冲洗进水管、反冲洗出水管、进料斗、出料口、进水口、出水口、罐体内含改性滤料腔室，铺设鹅卵石、改性沸石滤料^[20]。

过滤装置的汇水屋面面积可超过 500 m³。屋面雨水沿收集管道进入集水模块中储存，集雨装置采用可折叠收纳的塑料橡胶材质，外围使用金属架支撑。当非雨季时，场地可作他用。在进水泵的作用下，屋面雨水沿进水管进入罐体处理，进水流速为 6 m³·h⁻¹。每隔 30 min 从下端出水管口取样检测出水的各项污染指标。测试指标有氨氮、SS 和 COD。当出水 SS 小于 10 mg·L⁻¹ 时，关闭进水管和出水管上的阀门，打开反冲洗进水管和反冲洗出水管上的阀门，进行反冲洗法处理。反冲洗时间为 15 min。过滤装置处理效果明显，对实际屋面雨水的氨氮去除率高达 80% 以上。同时，出水 SS 小于 10 mg·L⁻¹，COD 去除率高于 60%。前期实验结果表明：改性沸石的粒径越小、流速越小，其吸附过滤屋面雨水径流中氨氮的效果越好。在此基础上，使用过滤装置继续开展中试研究，考察滤料装填方式及进水流速 2 个因素对实际屋面雨水径流影响，考察氨氮、SS、COD 3 种指标的变化。出水水质均满足《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400-2016) 要求^[20]。

2.3.2 路面雨水径流处理利用方案

本研究为郊区 B 村提供混凝沉淀法处理路面雨水径流技术方案，具体工艺流程如图 8 (a) 所示。雨水处理单元与城中村污水处理厂(站)联合运行。受污染雨水处理模块流程为：雨水经过智能弃流井识别后，通过流入蓄水池进入反应罐，在罐中加速处理路面雨水径流。当降雨强度过大时，降雨量在 12 h 内超过 70 mm，路面雨水径流受污染程度降低，雨水量超过蓄水池处理量，溢流雨水直接排入水体。图 8 (b) 为蓄水池-反应罐装置结构示意图。混凝反应罐置于蓄水池内，混凝反应罐包含药剂进口、电机、传动杆、搅拌桨、雨水进口、雨水出口和 pH 传感器。混凝反应罐体采用不锈钢金属材质，具有较强的耐酸耐碱和耐腐蚀性；罐内传动杆将电机和搅拌桨连接可用于控制转速；罐体底部为 V 形沉淀段，便于沉淀物的累积与排放。通过实验室正交实验分析，初始 pH 和混凝剂投加量对混凝沉淀实验影响程度大。罐内设置药剂进口可投加液态混凝试剂、酸液、碱液，设置 pH 传感器实时显示酸碱度，有助于及时调节 pH 保证处理效果。

在具体使用蓄水池-反应罐装置处理路面雨水径流时，受污染的地表径流雨水经管道和沟渠流入蓄水池，在蓄水池存储。降雨量在 12 h 内超过 15 mm。蓄水池雨水量达到雨水进口水位时，雨水自动流入混凝反应罐，启动电机通过连接传动杆控制搅拌桨速度。通过药剂进口投加混凝剂和助凝剂，pH 传感器实时显示酸碱度，控制 pH 条件为 6~7。从罐体外读取数据继续投加酸碱试剂控

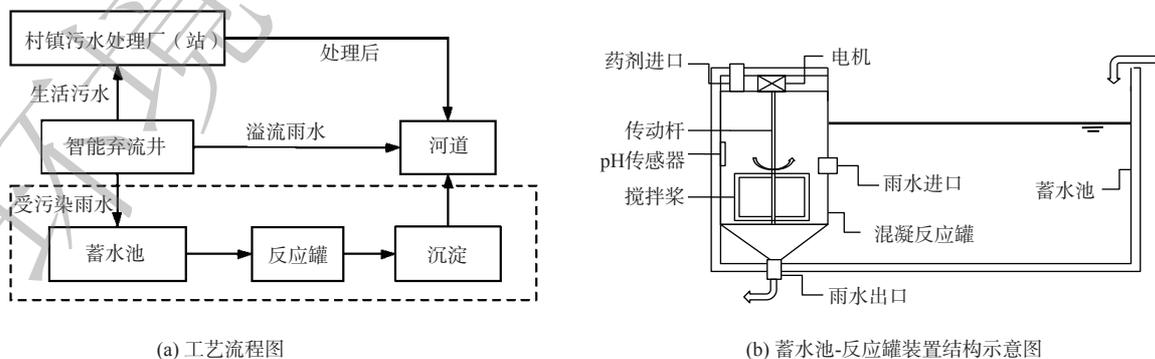


图 8 路面雨水处理过程

Fig. 8 Process flow of surface rainwater

制处理条件, 处理过的雨水通过 V 型沉淀段后经雨水出口流出罐体。经过蓄水池-反应罐装置处理路面雨水径流, 总悬浮物 (TSS)、浊度、总磷 (TP) 的去除率可达到 90% 以上。有机物 (以 COD 计) 的去除率为约 70%, 出水水质达到地表水 3 类标准, 处理后的雨水可用于河道补给。

3 结论

1) 根据对 3 种屋面雨水径流和 8 种路面雨水径流的 COD、TSS、氨氮和硝态氮监测结果的分析发现, 金属材质屋面收集雨水径流水质最好。在路面雨水径流方面, 城中村交通区 TSS 和氨氮污染负荷高于市区, 城中村住宅区 3 种污染物负荷均高于市区, 城中村路面雨水径流氨氮污染负荷均高于市区。

2) 开展改性沸石过滤法固定床吸附小试实验发现: 雨水流速越小、滤柱越高和沸石粒径越小, 对氨氮吸附效果越好。当流速分别为 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $150 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 吸附饱和时间分别为 250、270 和 330 min, 当滤柱高度分别为 1.0 m、2.0 m 和 3.0 m 时, 吸附饱和时间分别为 170、190 和 280 min; 当沸石粒径分别为 1~2 mm、2~4 mm 和 4~8 mm 时, 吸附饱和时间为 350、340 和 230 min。开展混凝沉淀法批次实验发现: 当初始 pH 为 6~7、PAC 投加量为 $80 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 混凝沉淀效果最佳。通过正交实验发现, 初始 pH 和混凝剂投加量对有机物 (以 COD 计) 去除影响程度大。

3) 根据过滤沉淀法控制屋面与路面雨水径流污染技术研究, 设计出改性沸石过滤法处理城中村屋面雨水径流工艺与装置, 出水水质满足《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400-2016) 要求。设计蓄水池-混凝反应罐处理城中村路面雨水径流, 并将混凝反应罐在内的雨水处理单元与城中村污水处理厂(站)联合运行, 经过处理后的雨水可用于河道补给。

参 考 文 献

- [1] 于磊, 潘兴瑶, 马盼盼, 等. 北京雨水管控体系下年径流总量控制率实现效果分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(19): 121-125.
- [2] 耿雪, 刘梓聪, 赵娟, 等. 沸石无烟煤组合填料处理雨水径流的小试实验[J]. 科技经济市场, 2017, 6(3): 6-7.
- [3] 仇付国, 王珂, 于栋, 等. 沸石改良雨水生物滞留系统去除污染物研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(3): 124-129.
- [4] 王丽娟, 刘鑫, 靖一丹, 等. PAC/PAM 强化混凝沉淀法处理校园屋面雨水径流的研究[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(4): 98-102.
- [5] 郭冀峰, 黄宇华, 关卫省, 等. 混凝/平板膜光催化联合反应器工艺处理高速公路桥面雨水径流研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1465-1469.
- [6] GONG Y W, ZHANG X W, LI J Q, et al. Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff[J]. Science of The Total Environment, 2020, 732(C): 139248.
- [7] CHANDRASENA G I, SHIRDASHTZADEH M, LI Y L, et al. Retention and survival of *E. Coli* in stormwater biofilters: Role of vegetation, rhizosphere microorganisms and antimicrobial filter media[J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 166-177.
- [8] LIU Y, HOU L G, BIAN W, et al. Turbidity in combined sewer sewage: An identification of stormwater detention tanks[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(9): 3053.
- [9] WALASZEK M, BOIS P, LAURENT J, et al. Micropollutants removal and storage efficiencies in urban stormwater constructed wetland[J]. Science of The Total Environment, 2018, 645: 854-864.
- [10] 方媛媛, 刘玲花, 吴雷祥, 等. 5种填料对污水中氮磷的吸附特性研究[J]. 应用化工, 2016, 45(9): 1619-1623.
- [11] 李璐桃, 程海翔, 季竹霞. NaCl改性沸石去除废水中氨氮的条件优化研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2018, 17(1): 78-82.
- [12] 古励, 潘龙辉, 何强, 廖欣蕾. 沸石对降雨径流中氨氮的吸附特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 107-112.
- [13] 耿雪, 刘梓聪, 秦红焯. 4种不同填料对氮磷吸附效果的实验研究[J]. 工程技术研究, 2016(6): 3-4.
- [14] 马捷汀, 王丽花, 汪喜生, 等. 高效溢流雨水净化装置在海绵城市建设中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(S2): 116-121.
- [15] 李文静, 李军, 张彦灼, 等. NaCl改性沸石对水中氨氮的吸附机制[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3567-3575.
- [16] MENDEZ C B, KLENZENDORF J B, AFSHAR B R, et al. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater[J]. Water Research, 2010, 45(5): 2049-2059.
- [17] GIKAS G D, TSIHRINTZIS V A. Effect of first-flush device, roofing material, and antecedent dry days on water quality of harvested rainwater[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(27): 21997-22006.

- [18] 和晓艳. 屋顶绿化的相关技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [19] CHAPLOT V, SELALA M S, THENGA H, et al. Comparison of the chemical quality of rainwater harvested from roof and surface run-off systems[J]. *Water S. A.*, 2018, 44(2): 223-231.
- [20] 马春麟, 张晶, 李军, 等. 改性沸石滤料处理屋面雨水的中试试验研究[J]. *给水排水*, 2019, 55(6): 108-113.

(责任编辑: 靳炜)

Pilot-scale research and application of modified zeolite filtration and coagulation sedimentation for the treatment of roof and pavement rain-runoff in urban village of Beijing city

MA Chunlin¹, LI Jun^{2*}, LIU Yang³, SUN Zhitao⁴, ZHOU Banglei⁵

1. The Logistics Group of Renmin University of China, Beijing, 100872, China; 2. Beijing Key Laboratory of Beijing water quality science and water environment restoration project, Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 3. Guangzhou Development Zone financial investment and construction project management center, Guangzhou 510663, China; 4. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 5. Zhejiang Jiangnan Engineering Management Co. Ltd., Hangzhou 310012, China

*Corresponding author, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

Abstract In this paper, the pollution characteristics of roof runoff and pavement runoff in urban area and village of Beijing were analyzed by comparing the detection results of three types of roof runoff and eight types of pavement runoff samples from west side of Dawang road and B village in suburban area of Beijing. According to different pollution characteristics, modified zeolite filtration method and coagulation sedimentation method were used to treat roof and pavement runoff of villages in the city. The results show that the smaller the rainwater flow rate, the higher the filter column and the smaller the zeolite particle size are, the better the ammonia nitrogen adsorption effect is. The batch experiment of coagulation sedimentation method was carried out. The results showed that the best coagulation sedimentation effect was obtained when the initial pH value was 6~7 and PAC dosage was 80~100 mg·L⁻¹, and the initial pH value and coagulant dosage had more influence on the coagulation sedimentation effect. The process and device of modified zeolite filtration method to treat the roof rain-runoff of village in the city are designed. The treatment effect is verified through actual operation. The reservoir coagulation tank is designed to treat the road rain-runoff of village in the city. The rainwater treatment unit including coagulation tank and village sewage treatment station are operated jointly. The treated rainwater can be used for river replenishment, which has great significance for rural village B to deal with the actual rain-runoff.

Keywords rainwater resource utilization; filtration method; coagulation method; treatment unit