

屋面雨水原位接续储用系统研发与应用

高诗宜, 高 赞, 张琼华, 韩 森

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 屋面雨水储用的水质保障是雨水资源高质量回用的关键。传统储水系统由于结构性缺陷和污染物质接续扩散的影响, 导致储水水质不佳。该研究采用 Fluent 软件, 通过改变进水水力条件和系统结构, 模拟和识别了储水系统接续过程中的污染物质归趋; 创新性提出增设隔离生态净化层, 构建基于沉淀区、过渡区和澄清区的新型屋面雨水原位接续储用系统; 通过 4 场降雨的原位净化效果研究, 结果表明该新型储水系统净化效果极佳, 水质稳定达到城市杂用及景观水回用标准, 可作为屋面雨水储用系统装备广泛使用。

关键词: 屋面径流; 储水系统; Fluent; 初期雨水; 生态净化

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202306036

Development and application of in-situ continuous roof runoff storage system

GAO Shiyi, GAO Zan, ZHANG Qionghua, HAN Sen

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The water quality guarantee of the roof rainwater storage is crucial for ensuring the high-quality reuse of rainwater resources. Traditional water storage systems suffer from poor water quality due to structural defects and the continuous diffusion of pollutants. Fluent software was used to simulate and identify the fate of pollutants during the connection process of the water storage system by altering the hydraulic conditions and system structure of the inlet water. A novel approach was proposed by adding an isolated ecological purification layer and constructing a new type of roof rainwater in-situ continuous storage system based on a sedimentation zone, transition zone, and clarification zone. Through the in-situ purification effect study of four rainfall events, the results showed that the new water storage system had excellent purification effect, and the water quality was stable and met the standards for urban miscellaneous and landscape water reuse. It could be widely adopted as the equipment for roof rainwater storage systems.

Keywords: roof runoff; storage system; fluent; first flush; ecological purification

CLC number: X703.1

雨水作为非常规水资源, 其开发和利用对缓解城市化发展过程中带来的水资源短缺问题具有重要的战略地位。2012 年我国提出“海绵城市”理念, 旨在提升城市生态系统功能和降低洪涝灾害风险的同时, 优先将雨水资源进行就地消纳和利用^[1-2]。然而, 据《2021 中国水资源公报》显示, 统计年我国非常规水资源利用量为 138.3 亿 m³, 仅占年供水总量的 2.3%, 其中雨水资源的开发利用极低^[3]。如何提高雨水储用效率, 规范雨水利用模式成为雨水战略实施的关键。道路作为汇入市政管网前的末

端集水空间受人为活动的干扰较大, 同时与城市功能的正常运转密切相关, 因此道路径流的安全泄放尤为关键。屋面空间占城市硬质下垫面近 2/3, 且受人类活动影响较小, 其在水质与水量方面具有独特的储用优势^[4-6]。传统的城市灰色储水设施主要担负地表径流洪峰削减的功能。除此之外, 初期冲刷携带的高浓度污染负荷在储水系统中累积, 直接影响回用水质^[7-8]。因此, 开发面向屋面径流接续储用的新型雨水系统是城市雨水战略实施和雨水资源高质量回用的主要方向。

收稿日期: 2023-03-15 录用日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52270094)

作者简介: 高诗宜(2000—), 女, 硕士研究生。研究方向: 雨污水再生利用。E-mail: 2006624523@139.com

通信作者: 张琼华(1981—), 男, 博士、副教授。研究方向: 雨污水再生利用。E-mail: qionghuazhang@126.com

引用格式: 高诗宜, 高 赞, 张琼华, 等. 屋面雨水原位接续储用系统研发与应用[J]. 环境保护科学, 2023, 49(4): 15-20.

本研究从水质和水量两个方面对现有屋面雨水储用现状进行了分析和讨论, 尝试构建雨水原位储用系统, 采用 Fluent 软件对该系统内部流态和接续污染归趋进行实态模拟, 基于模拟结果构建了一种原位新型雨水储用系统, 可有效净化初期雨水污染, 实现雨水资源高质量回用。

1 屋面雨水储用现状

1.1 水质

雨水径流中污染物浓度峰值常常出现在径流初期。车伍等^[9]和王倩等^[10]研究发现初期雨水中含有大量悬浮固体(如 SS)、耗氧污染物(如 COD、BOD)、营养物(如 N、P)和重金属等, 可生化性较差, 将其弃流进入河道会造成受纳水体水质恶化, 进入污水收集管网势必会降低污水处理效能。传统储水系统用于水质质量控制的辅助设备主要为初期雨水分流器、碎屑筛和过滤器。其中, 分流器作用是将初期径流导流, 大幅度降低污染物质在系统中的富集, 进而提高回用水水质并延长储水周期。然而, 由于初期冲刷的随机性、多变性和复杂性, 针对高污染负荷初期雨水的导流量核算目前仍存在争议^[11-12]。目前, 人们主要通过降雨历时、降雨深度两种方法表征初期雨水阶段, 但降雨强度和下垫面的差异性导致初期雨水阶段定量应以降低径流污染物负荷到一定当量为宜^[13]。碎屑筛和过滤器主要用于拦截固体(沉积物、碎屑、树叶等)和颗粒态物质防止其进入储水系统^[14]。传统储水系统由于单一的箱结构形式, 污染物自然沉降累积在储水系统底部, 不仅不利于排泥和运维管理, 同时在接续降雨过程中水力扰动和卷携会使沉积污染物二次弥散在储水系统中, 导致水质恶化。除此之外, 类比对雨水窖水质演变过程的研究, 认为长期储存过程中存在水质恶化甚至腐败的风险^[15]。而目前对于储水过程中的水质恶化和净化相关研究鲜有报道, 同时缺乏以具体回用用途为导向的雨水水质标准作为参考和指导。

1.2 水量

储水规模是雨水资源回用过程中的关键参数, 直接影响到投资成本、占地空间、储水水量以及供水规模, 甚至影响储水水质^[16]。同时, 它也是基于多个变量平衡而确定。目前针对雨水储水系统规模主要是通过建模进行多目标优化设计。由于降

雨和需水量在时间上是可变的, 储水系统评估模型经常被用作一种设计工具, 用于计算平衡流入和流出所需的储水量, 从而充分满足特定建筑物或地点的用水需求^[17]。储水系统的规模设计主要包括经验设计、随机分析和接续储用下的连续物质平衡模拟。典型的连续物质平衡模型包含 4 个模块^[18]: (1)用水需求分析模块; (2)雨水流入模块; (3)物质平衡计算模块; (4)输出模块。研究表明, 引入环境目标可能会对水箱尺寸产生重大影响, 这取决于安装储水系统的建筑物类型^[19]。除此之外, 储水过程中系统的接续空间与多次进水规模的优化平衡是在保障储水水质的基础上提高储用效率的主要研究方向。

2 新型屋面雨水储用系统的模拟

2.1 系统概述

为了保障和提升雨水储水系统的水质, 尝试优化传统雨水储水系统结构并分隔构建沉淀区和澄清区, 通过 Fluent 软件模拟, 进一步识别降雨过程尤其是携带大量污染的初期雨水接续储水的水质扰动, 掌握污染物质接续扩散的水力学特性。

2.2 系统模拟

基于 Space claim 建立箱体物理模型, 长宽高均设置为 2 m, 由高 1.8 m、厚 4 mm 的隔板分成沉淀区与澄清区。沉淀区设置 60°斜板, 进水管直径为 DN110, 见图 1(a)。三维计算区域采用 Workbench meshing 进行网格划分, 见图 1(b), 并对进水管、进出口及挡板处进行网格加密处理, 共计网格单元 2 601 249 个。

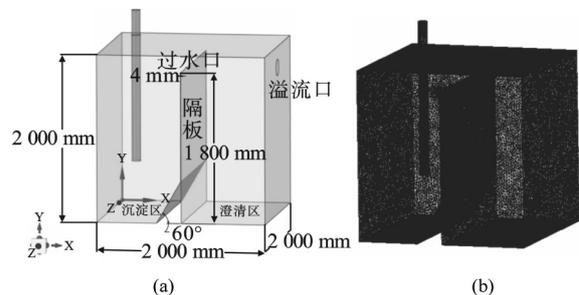


图 1 新型屋面雨水储水系统 (a) 箱体模型及 (b) 网格化设置

Fig. 1 New roof rainwater storage system (a) tank model and (b) meshing

本研究借助稳态与瞬态 Eulerian 固-液两相流混合模型分别模拟单场次降雨及雨水接续扰动过程。降雨过程采用 SST k- ω 湍流模型求解, 静置时

黏性模型选用层流,且均使用 Simple 压力速度耦合算法,其中压力差值设置为 Body Force Weighted。动量、湍流动能和比耗散速率均设置为 Second Order Upwind,其亚松弛因子分别为 0.3、0.5 和 0.5。水为第一相且各项参数采用系统默认设置,固体颗粒为第二相。以 SS 作为固体颗粒物模拟对象,并参考西安市屋面初期径流污染特征及 Dufresne 数据,设置 SS 浓度:440 mg/L;密度:1 100 kg/m³;平均粒径:0.1 mm;黏性系数:2.001×10⁻²,并换算出固体颗粒体积分数 0.04%^[20-21]。以 SS 浓度和速度为 0 作为初始状态,设置速度入口和压力出口(出口压力为 1 个标准大气压)边界条件,固体壁面边界条件设置为无滑移壁面。

采用式(1~2)对 SS 在沉积区与澄清区的分布

特征进行计算^[22]:

$$\eta_1 = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{\phi_1 - \phi_3}{\phi_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:η₁为沉淀区对 SS 的沉积率,%;η₂为箱体对 SS 的截留率,%;φ₁、φ₂、φ₃分别为进口、过水口、溢流口处 SS 的体积分数,%。

2.2.1 单场次降雨模拟 通过调控系统进水速率(1、3、5 m/s)以及进水管出口角度(0°、90°、180°)分别模拟单场次降雨条件下储水系统的水力特性以及 SS 归趋特性,模拟结果见图 2。同时,根据模拟结果计算出调控条件下 SS 归趋分布与污染物截留率,见表 1。

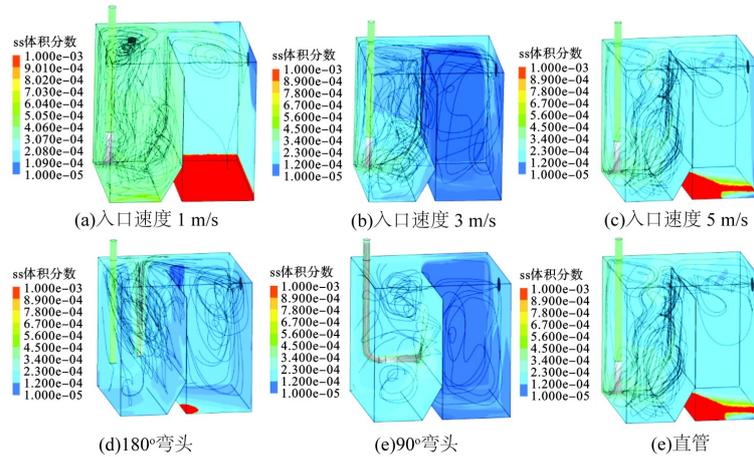


图 2 不同进水控制条件下储水系统的水力特性以及 SS 归趋特性模拟

Fig. 2 Simulation of hydraulic characteristics of water storage system and SS motion characteristics under different inlet conditions

表 1 单场次降雨中各面 SS 分布及对系统污染物沉积率和截留率

Table 1 Distribution of SS on each surface in a single rainfall event and the deposition and retention efficiency of pollutants in the system

模拟条件		进口SS 体积分数/%	出口SS 体积分数/%	进水口SS 体积分数/%	沉淀区污染物 沉积率/%	污染物 截留率/%
直管	入口速度 1m/s	0.04	0.000 2	0.027 0	0.33	0.99
	入口速度 3 m/s	0.04	0.005 5	0.010 0	0.75	0.86
	入口速度 5 m/s	0.04	0.016 9	0.018 5	0.54	0.58
入口速度 5 m/s	弯管 90°	0.04	0.011 4	0.017 0	0.58	0.72
	弯管 180°	0.04	0.012 8	0.014 3	0.64	0.68

结果显示,单场次降雨过程中其他参数不变的情况下,增大进水管弯头角度或降低进水速率有利于 SS 在储水系统中沉积。沉淀区对 SS 的沉积率在入口速度 3 m/s 时最佳,见图 2(b),而相同进水速率下,带有 180°弯头进水条件下的沉淀区的沉积率最高,见图 2(e)。直管条件下,入口速度 5 m/s

时,沉淀区靠近挡板处紊动程度较大,越过挡板后大部分 SS 直接被卷携带出,只有少部分沉积到底面;1 m/s 时,沉淀区整体紊动程度较大而澄清区仅上端形成较小涡流,易于 SS 沉降;而 3 m/s 时,沉淀区紊动程度大小介于其他两状态之间,但在澄清区形成大涡流导致 SS 沉降困难。相同速度下,增加

弯头易于 SS 沉积, 见图 2(f), 180°弯头下紊动区域集中在后端及水管出口处, 且沿澄清区溢流口附近形成的较大涡流易扰动并带出底部中后端沉积的 SS, 而在 90°弯头澄清区扰动范围较大, 但携带出的 SS 较少。

2.2.2 接续降雨模拟 基于 fluent 软件模拟降雨事件对储水系统的扰动过程, 设置时长 30 min 的降雨事件, 待降雨结束, 静置 10 min 后模拟二次降雨事件, 系统接续进水 30 min, 见图 3。同时, 根据模拟结果计算出 SS 归趋分布与污染物截留率, 见表 2。

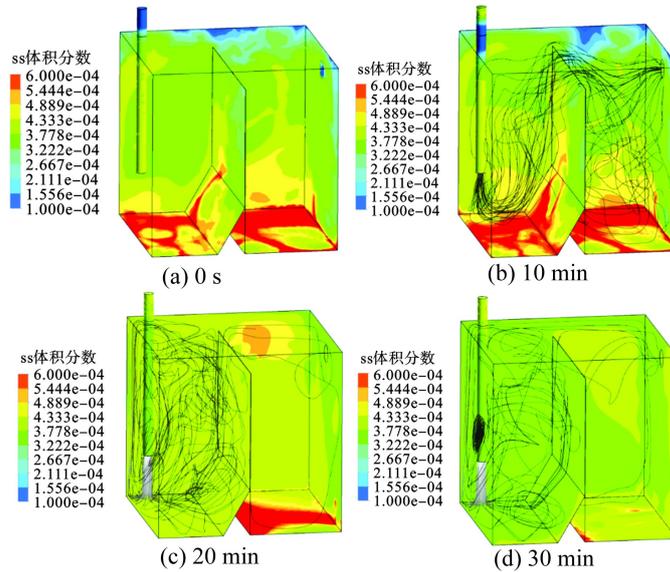


图 3 新型屋面雨水储水系统接续降雨模拟

Fig. 3 Simulation of successive rainfall with a new roof rainwater storage system

表 2 接续降雨过程不同时间段 SS 分布及系统污染物沉积率和截留率

Table 2 Distribution of SS and deposition and retention efficiency of systemic pollutants at different time intervals of successive rainfall processes

进水时间/min	进口SS体积分数	出口SS体积分数	过水口SS体积分数	沉淀区污染物沉积率	污染物截留率/%
10	0.04	0.037 3	0.037 6	-0.06	0.07
20	0.04	0.039 6	0.041 6	0.04	0.01
30	0.04	0.040 0	0.038 9	-0.03	0.00

图 3 可知, 接续进水对系统沉淀区已沉积的 SS 产生扰动并卷携带入澄清区, 影响澄清区水质。系统在初次进水事件结束并静置 10 min 后的污染物分布见图 3(a) 所示, 沉淀区与澄清区均有 SS 沉积。接续进水 10 min 后, 沉淀区已沉积 SS 发生扰动, 并有进入澄清区的趋势, 见图 3(b)。进水 20 min 后, 紊动范围集中在沉淀区后部及澄清区前部, 因此沉淀区前端及澄清区后端沉积大量 SS。在进水 30 min 后, 由于持续的 SS 溢流, 系统沉淀区和澄清区的沉积态 SS 均有所减少。

3 新型屋面雨水储用系统的构建与应用

3.1 系统构建

基于以上模拟结果发现, 储水系统内部分区有利于污染物物理沉淀和自然澄清, 但接续雨水会扰动已沉淀污染物卷携并产生二次污染。研究表明,

颗粒态物质(如 SS)在径流过程中是其他污染物质(如溶解态物质)的良好载体^[23]。因此, 基于颗粒态物质的重力沉降以及物理截留效果, 试图进一步强化储水系统污染物质截留、富集以及生物净化功能。尝试通过分隔并营造沉淀区、过渡区和澄清区实现净化与储水双重功效, 同时可降低接续扰动对净化水质的影响。基于此, 创新性提出系统加载隔离生态净化层的思路, 研发了新型屋面雨水接续储用系统。

3.2 系统应用

3.2.1 系统设置 为了进一步研究新型屋面雨水接续储用系统的净化效果, 本研究选取西安建筑科技大学雁塔校区建筑外立面落水管, 其汇水面积约 100 m², 匹配屋面雨水接续储用系统容积为 1 m³。储水系统左右分腔容积比 1 : 1, 左侧 0.5 m 处设置隔离生态净化层, 净化层厚度设置 8 cm, 由双层过

滤棉加裹 5 cm 砾石(8 mm)组成,采用轻质不锈钢框架固定在系统中,见图 4。

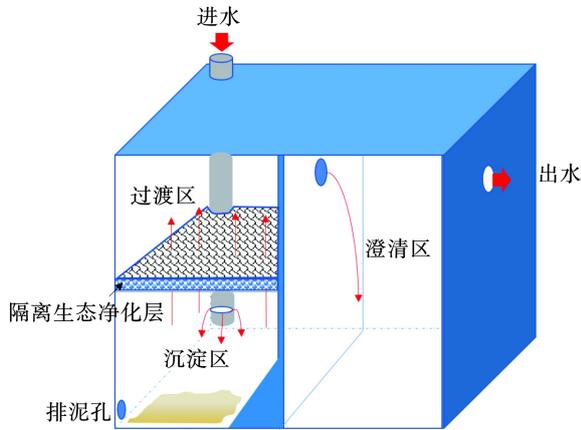


图 4 新型屋面雨水接续储用系统
Fig. 4 New roof rainwater catchment and storage system

3.2.2 实验及分析方法 为保证实验结果的可靠性,本研究选取 2023 年 3 月 27 日、4 月 2 日、4 月 13 日和 4 月 21 日 4 场降雨事件的初期雨水作为装置进水进行平行实验。采集新型储水系统装置进出水水样并放置 4 °C 下保存,同时进行样品预处理和相关指标的测定,测定指标包括 TN、COD、NH₃-N 和 SS。具体的分析方法见表 3。数据采用 Origin 软件进行处理和分析。

3.2.3 净化效果分析 新型储水系统对屋面初期雨水的净化效果见图 5。进水水质 COD、SS、TN 和 NH₃-N 的浓度范围分别为 80 ~ 120 mg/L、55 ~ 90 mg/L、16 ~ 21 mg/L 和 9 ~ 17 mg/L,出水浓度分

别为 30 ~ 45 mg/L、4 ~ 8.5 mg/L、6 ~ 11 mg/L 和 4 ~ 9 mg/L,平均去除率分别为 64.4%、91.2%、52.7% 和 49.6%。新型储水系统对 SS 的净化效率高达 90% 以上,其在对颗粒态污染物质高效富集的过程中实现部分溶解态物质同步去除。经核算,强化隔离生态净化层耦合重力沉降作用可有效截留初期雨水中 60% 以上的污染负荷,大大降低回用水水质恶化风险,保障回用水其水质稳定。依据《城市污水再生利用-景观环境用水水质: GB/T 18921—2019》、《城市污水再生利用-城市杂用水水质: GB/T 18920—2020》和《城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002》一级 A 标准,新型储水系统净化后水质均达到排放至地表水体或景观、杂用水回用标准(图中虚线表示)。

表 3 水质分析方法
Table 3 Methods of water quality analyses

测定指标	分析方法	参考标准
COD	快速密闭催化消解法(含光度法)	《水和废水监测分析方法》第四版
SS	重量法	《水和废水监测分析方法》第四版
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: GB 11894—1989》
NH ₃ -N	纳氏试剂分光光度法	《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: GB 11894—1989》

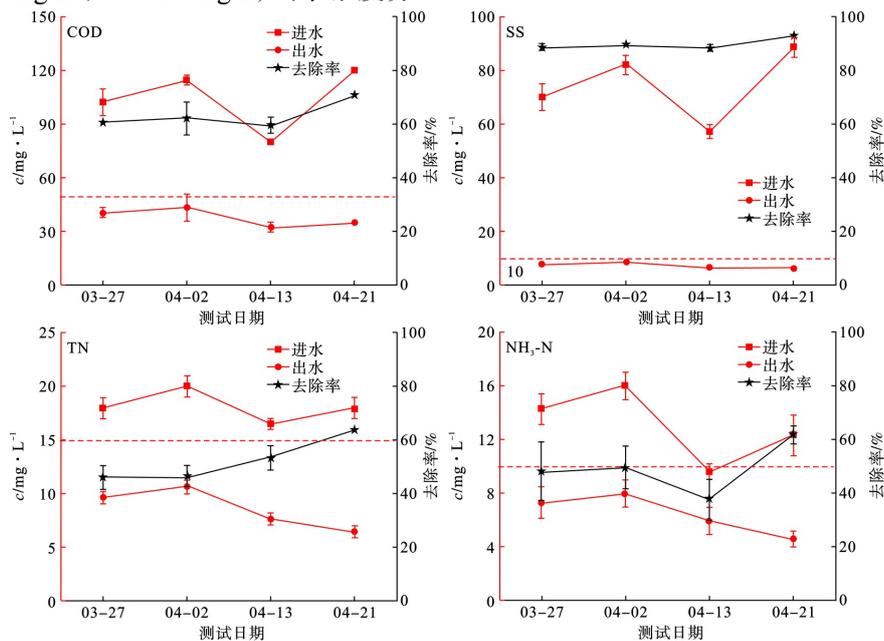


图 5 强化过滤层的污染净化效果

Fig. 5 The effect of the enhanced filtration layer for pollutant purification

4 结论

(1)在优化传统雨水储水系统结构并分隔构建为沉淀区和澄清区,并基于 Fluent 软件进行固-液两相流的模拟结果中发现,单场次降雨过程中,直管进水或降低进水速率有利于颗粒态物质在储水系统中沉积。沉淀区对颗粒态物质的沉积率在进水速率为 3 m/s 时最佳,而相同进水速率下,带有 180°弯头进水条件下沉淀区的沉积率最高。

(2)接续进水对储水系统已沉积污染物扰动影响较大,易产生二次污染。同时在持续的接续进水扰动作用下,优化分区后的储水系统沉淀区污染物被卷携进入澄清区,并有持续溢流污染的趋势。

(3)通过设置隔离生态净化层的新型储水系统对 SS 的净化效率高达 90% 以上,其在对颗粒态污染物高效富集的过程中实现部分溶解态物质同步去除。经核算,强化隔离生态净化层耦合重力沉降作用可有效截留初期雨水中 60% 以上的污染负荷,大大降低雨水水质恶化风险,保障回用水质稳定。

参考文献

- [1] 习近平. 中央城镇化工作会议[R/OL]. (2013-12-14)[2023-04-23]. https://www.gov.cn/ldhd/2013-12/14/content_2547880.htm.
- [2] 李文娟. 国务院办公厅印发指导意见推进海绵城市建设[J]. 工程建设标准化, 2015(10): 39 - 39.
- [3] 中华人民共和国水利部. 2021 中国水资源公报[R/OL]. [2023-04-23]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/16/content_5695973.htm.
- [4] PINFOLD J V, HORAN N J, WIROJANAGUD W, et al. The bacteriological quality of rainwater in rural northeast Thailand[J]. *Water Research*, 1993, 27(2): 297 - 302.
- [5] SIMMONS G, HOPE V, LEWIS G, et al. Contamination of potable roof-collected rainwater in Auckland, New Zealand[J]. *Water research*, 2001, 35(6): 1518 - 1524.
- [6] FARRENY R, MORALES-PINZÓN T, GUIASOLA A, et al. Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain[J]. *Water Research*, 2011, 45(10): 3245 - 3254.
- [7] GRUNG M, MELAND S, RUUS A, et al. Christensen, Occurrence and trophic transport of organic compounds in sedimentation ponds for road runoff[J]. *Science of The Total Environment*, 2021(751): 141808.
- [8] MATTEO M D, LIANGR H, MAIER R, et al. Controlling rainwater storage as a system: An opportunity to reduce urban flood peaks for rare, long duration storms[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019(111): 34 - 41.
- [9] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质污染控制[J]. *给水排水*, 2003, 29(10): 38 - 42.
- [10] 王倩, 张琼华, 王晓昌. 国内典型城市降雨径流初期累积特征分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1719 - 1725.
- [11] 张琼华, 王晓昌. 初期雨水识别及量化分析研究[J]. *给水排水*, 2016, 52(S1): 38 - 42.
- [12] VIALLE C, SABLAYROLLES C, SILVESTRE J, et al. Pesticides in roof runoff: Study of a rural site and a suburban site[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 120(15): 48 - 54.
- [13] GAO Z, ZHANG Q H, LI J, et al. First flush stormwater pollution in urban catchments: A review of its characterization and quantification towards optimization of control measures. [J]*Journal of Environmental Management*, 2023, 340, 117976.
- [14] ABBASI T, ABBASI S A. Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(23): 2097 - 2167.
- [15] 杨浩. 窖水中细菌群落结构和功能的季节性变化及其与水质因子的交互响应[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [16] UNAMI K, MOHAWESH O, SHARIFI E, et al. Stochastic modelling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 88: 185 - 195.
- [17] TAFFERE G R, BEYENE A, VUAI S A H, et al. Dilemma of roof rainwater quality: applications of physical and organic treatment methods in a water scarce region of Mekelle, Ethiopia[J]. *Urban Water Journal*, 2017, 14(5): 460 - 466.
- [18] LASH D, WARD S, KERSHAW T, et al. Robust rainwater harvesting: probabilistic tank sizing for climate change adaptation[J]. *Journal of water and climate change*, 2014, 5(4): 526 - 539.
- [19] MORALES-PINZÓN T, RIERADEVALL J, GASOL C M, et al. Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 613 - 626.
- [20] 陈望. 西安市屋面径流污染特征及控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [21] DUFRESNE M, VAZQUEZ J, TERFOUS A, et al. Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(5): 1042 - 1049.
- [22] 谭志程. 基于数值模拟的新型 CSO 调蓄池结构优化与运行参数研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [23] MIGUNTANNA N P, LIU A, EGODAWATTA P, et al. Characterising nutrients wash-off for effective urban stormwater treatment design[J]. *Journal of environmental management*, 2013, 120: 61 - 67.