

城镇水系统研究与应用

张舟,包木平,朱利,等.球形滤料滤床对道路径流雨水的净化效果[J].净水技术,2025,44(8):129-137,187.

ZHANG Z, BAO M P, ZHU L, et al. Purification effect of spherical bead-media filter on road rainfall runoff [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 129-137,187.

球形滤料滤床对道路径流雨水的净化效果

张舟¹,包木平^{2,3},朱利⁴,郑玉¹,边维³,任勇翔^{3,*}

(1.西安水务<集团>有限责任公司,陕西西安 710061;2.中冶南方城市建设工程技术有限公司,湖北武汉 430077;3.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西省环境工程重点实验室,陕西西安 710055;4.成都惟尚建筑设计有限公司,四川成都 610000)

摘要 【目的】针对传统砂滤床易堵塞、难清理和高运行费用等问题,需开发新型雨水净化滤床。【方法】保持滤床厚度和滤料粒径一致,对比不同材质滤料在6种进水条件下滤后水浑浊度及悬浮物(SS)浓度,优选出最佳滤料材质;保持滤床厚度一致,对比塑料滤珠在不同粒径条件下滤后水SS浓度及颗粒物粒径分布,优选出最佳滤料粒径。根据优选的滤料材质及粒径构建滤床,对比顶部至底部不同床深处滤后水SS浓度及颗粒物粒径分布,优选出最佳滤床厚度;对比不同水流方向下滤后水SS浓度及颗粒物粒径,优选出最佳滤床过流方向。【结果】滤珠滤床对雨水中的SS具有显著的截留和吸附作用,且对溶解态的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)也有一定的去除。当进水SS质量浓度为400~500 mg/L,经不同粒径滤珠(1、3、5 mm)过滤后雨水出水SS质量浓度均可降至13 mg/L左右,SS去除率均大于94%。5 mm滤珠在滤层厚度为400 mm的滤珠滤床以水平流、上向流、下向流3种不同水流方向运行时,下向流滤速为0.38~0.76 m/h时,滤床对SS去除率和出水颗粒态污染物的粒径最小。【结论】滤珠滤床因其模块化易于安装替换,以及占地面积小、截留效果好、积泥易清除,可作为一种新型的高效雨水净化装置。

关键词 球形滤珠 过滤 雨水 模块化滤床 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)08-0129-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.017

Purification Effect of spherical Bead-Media Filter on Road Rainfall Runoff

ZHANG Zhou¹, BAO Muping^{2,3}, ZHU Li⁴, ZHENG Yu¹, BIAN Wei³, REN Yongxiang^{3,*}

(1. Xi'an Water Group Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. MCC Southern City Construction Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

3. Key Laboratory of Environmental Engineering of Shaanxi Province, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

4. Chengdu WeiShang Architectural Design Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract [Objective] In view of the problems of easy clogging, difficult cleaning and high operating cost of traditional filter, need develop a new type of rainwater purification filter bed. [Methods] Maintaining consistent filter bed depth and media particle size, the turbidity and suspended solids (SS) concentration of the filtered water were compared under six different influent conditions across various filter media materials to select the optimal media material; subsequently, with the filter bed depth held constant, the SS concentration and particle size distribution in the filtered water were compared for plastic filter beads of differing particle sizes to

[收稿日期] 2024-01-25

[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-SF-31-6)

[作者简介] 张舟(1969—),男,主要从事排水设施运维管理、海绵城市建设与研究等工作,E-mail:380852111@qq.com。

[通信作者] 任勇翔(1968—),男,教授,研究方向为污水处理理论与技术、水环境修复理论与技术,E-mail:ryx@xauat.edu.cn。

determine the optimal media particle size. Based on the selected optimal material and particle size, a filter bed was constructed and the SS concentration and particle size distribution in the filtered water were compared at different depths from the top to the bottom of the bed to identify the optimal filter bed depth; finally, the SS concentration and particle size distribution were compared under different flow directions to select the optimal filter bed flow direction. [Results] The result showed that the beads filter had significant functions of retain and adsorption on SS, company with a certain removal on dissolved chemical oxygen demand, total nitrogen and total phosphorus. When the influent SS concentrations were from 400 mg/L to 500 mg/L, the SS in effluent was reduced to 13 mg/L after the filtering with different beads diameter (1, 3, 5 mm), and the SS removal efficiency was more than 94%. The filter with 5 mm beads in 40 mm of medium, running in downward flow under the filtering speed from 0.38 m/h to 0.76 m/h, the removal on SS was the best, and the SS size in effluent was the smallest, comparing with the horizontal, and upward flow. [Conclusion] The assembled bead filter can be used as an efficient rainwater purification device because of its modularity, easy installation and replacement, small footprint, good retention effect and easy removal of mud.

Keywords spherical bead filtration rainwater modular filter bed sponge city

径流雨水是典型的非点源污染,已成为城市水质恶化的主要原因之一^[1-2]。城市径流雨水流量变化大,污染物种类繁多复杂,生物可降解性差^[3],浓度范围分布广,爆发性明显^[4],以及在输入上的间歇性。城市雨水径流污染物主要为悬浮物(SS)和化学需氧量(COD)。SS是径流雨水中主要的污染物之一,通常又是其他污染物的载体,特别是细微颗粒更易吸附COD、总氮(TN)、总磷(TP)及重金属等污染物,甚至能附着城市雨水径流中80%以上的污染物^[5-6]。报道^[7-8]显示,虽然径流雨水中SS的粒度变化大,但主要集中在200 μm以下,属于难沉降颗粒,且SS与COD、TP、氨氮浓度的相关性系数均超过0.65,具有较强相关性^[9]。因此,控制径流中的SS对雨水径流净化就显得尤为关键。

过滤是去除SS的重要技术之一,也是目前城市径流雨水污染控制的有效方法,传统砂滤料滤床在净化高浑浊度地表径流时,普遍存在占地面积大、过滤周期短、积泥清除困难、反冲洗系统复杂、能耗高,以及易堵塞等问题^[10-11]。因此,针对间歇性输入的径流雨水,需要设计一种随机启动、不需自控、易于清理和维护的新型过滤装置。

球形滤料即滤珠形状规则,颗粒大小均匀,水入流速度稳定,水流阻力小,易于清理,价格低廉,是一种潜在的优质滤料。本研究首先筛选出塑料滤珠作为过滤材料,然后考察不同运行条件下(滤珠粒径、滤层厚度和水流方向)装置对道路径流雨水的净化效果,以期对雨水径流、景观水体以及黑臭水体等的水质净化提供一种简便的技术途径。

1 试验材料与方法

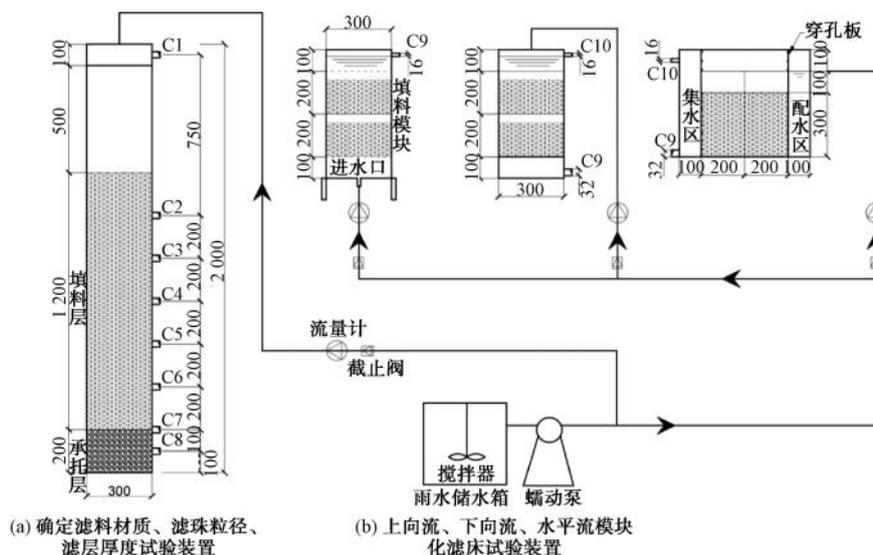
1.1 试验装置

滤料材质、滤珠粒径和滤层厚度的试验装置如图1(a)所示,滤柱为圆柱体,有机玻璃材质,内径为300 mm,装置横截面面积为0.07 m²,高度为2 000 mm,在柱体不同高度处分别设置溢流管(C1)、取样管(C2~C7)、放空管(C8)。滤柱上部为500 mm的上覆水层,中间为1 200 mm的滤珠填料层,底部为200 mm的石英砂承托层。试验中使用的滤料为市场采购,瓷砂滤料为实心多孔陶瓷掺加稀土材料材质,密度为2.57 g/cm³,表面光滑,形状规则且为相对均匀的球体,吸水率约为0.2%,热变形温度约为1 000 ℃,磨损率约为0.02%。石英砂滤料为实心二氧化硅材质,密度为2.65 g/cm³,表面粗糙且形状不规则,吸水率<0.2%,热变形温度>1 500 ℃,磨损率约为0.3%。塑料滤料为实心聚对苯二甲酸二醇酯(PBS)材质,密度为1.31 g/cm³,表面光滑,形状规则且均为完全相同的球体,吸水率<0.1%,热变形温度约为155 ℃,磨损率约为0.1%。粒径为3 mm的瓷砂滤料、石英砂滤料、塑料滤料对应的空隙率分别为0.49、0.54、0.47。后期研究所用的塑料滤料粒径为1、3、5 mm对应的空隙率分别为0.46、0.49、0.57。

水平流、上向流、下向流模块化滤床试验装置设计参数如下:滤床为聚氯乙烯板(PVC)材质,试验装置使用的滤珠粒径为5 mm,水平流模块化滤床尺寸为600 mm×250 mm×500 mm,内置的2个滤珠填料模块尺寸均为200 mm×250 mm×400 mm,滤床厚度为300 mm,过流横截面积为0.15 m²。填料模块外壁为不锈钢材质,外壁上开有众多细小孔洞便于

透水,其孔径小于滤珠粒径。填料模块与配水区和集水区之间由穿孔板固定,穿孔板为 PVC 材质,板面开孔孔径为 3 mm。在滤床配水区和集水区分别设置放空管(C9)、溢流管(C10)。上向流和下向流模块化滤床尺寸为 300 mm×300 mm×600 mm,内置

的 2 个滤珠填料模块尺寸均为 300 mm×300 mm×200 mm,填料层长度为 300 mm,宽度为 300 mm,厚度为 160 mm,上向流和下向流滤床试验装置过流横截面面积为 0.09 m²。水平流、上向流、下向流滤床内滤珠填充率均为 80%,其试验装置如图 1(b)所示。



(a) 确定滤料材质、滤珠粒径、滤层厚度试验装置

(b) 上向流、下向流、水平流模块化滤床试验装置

注:装置尺寸单位为 mm。

图 1 试验系统

Fig. 1 Experiment System

1.2 水质与水量

根据西安市道路雨水水质监测结果和西安市道路雨水浑浊度监测情况确定 2 种进水水质浓度^[9,12],在自来水中投加不同量的道路沉积物(取自街道路面)、葡萄糖、硝酸钾、磷酸二氢钾,配制不同浓度 SS、COD、TN、TP。试验用高浓度进水的浑浊度为 150 NTU,SS、COD、TN、TP 质量浓度分别为 400~500、400、14、1 mg/L;低浓度进水的浑浊度为 75 NTU,SS、COD、TN、TP 质量浓度分别为 200~300、200、7、0.5 mg/L。西安气象局模拟的城市暴雨强度计算公式如式(1),计算共得 20 种暴雨强度,将这 20 种暴雨强度按从小到大排序,分别取第 1~6 位、第 7~14 位、第 15~20 位暴雨强度的平均值作为暴雨强度,分别为 11.3、22.9、44.3 mm/h,降雨历时均为 60 min,通过暴雨强度和汇水面积算得降雨量,据此对应本试验装置的进水负荷则为 26.6、50.4、104.3 L/h。确定滤料材质试验采用上述 6 种进水条件,确定滤珠粒径、滤层厚度的试验采用高浓度水质和最大进水负荷。水平流、上向流、下向流模块化滤床试验装置同样采用高浓度水质,为排除进水负

荷差异对不同过滤水流方向结果的影响又细分为 5 种不同的暴雨强度,分别为 5.6、11.3、22.9、33.0、44.3 mm/h。

$$q = \frac{2210.87 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

其中:q——暴雨强度,L/(s·hm²);

P——重现期,分别取 1、2、3、5、10 a,a;

t——降雨历时,分别取 30、60、90、120 min,min。

1.3 试验设计

通过对比粒径为 3 mm 不同材质的滤料在 6 种进水条件下滤后水浑浊度和 SS 浓度,优选出最佳滤料材质,滤床厚度为 1 200 mm;通过测定不同粒径(1、3、5 mm)滤珠,滤床厚度为 1 200 mm 处出水 SS 浓度及截留污染物粒径分布,优选出最佳滤料粒径;通过测定 5 mm 滤珠滤床在顶部至底部(200、400、600、800、1 000、1 200 mm)处出水 SS 浓度及颗粒物粒径分布,优选出最佳滤床滤层厚度;通过测定在滤层厚度为 400 mm 处试验不同水流方向(上向流、下

向流、水平流)出水 SS 浓度及污染物粒径,优选出最佳滤床水流方向。

1.4 试验方法

通过激光粒度仪(美国麦奇克 Sync 型)测定颗粒污染物粒径,水质浊度仪(中国上海昕瑞 WGZ-200 型)测定水质浊度,103~105 °C 烘干称量法测定 SS 含量,COD 采用酸性重铬酸钾法测定,TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂法测定,TN 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法。上述指标详细检测过程参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[13]。

2 结果与讨论

2.1 滤料材质对雨水产浊物质去除效果的影响

统一使用 3 mm 粒径滤料作为试验滤料,以每种进水条件重复过滤 3 次取平均值的方法,确定 3 种材质滤料对浊度和 SS 的去除效果和稳定性,考察 3 种滤料对产浊物质的去除效果,筛选出最佳滤料材质。当进水浊度为 75 NTU 时,瓷砂滤料、石英砂滤料和塑料滤料的出水浊度分别为 7.03、8.99、6.05 NTU;当进水浊度为 150 NTU 时,瓷砂滤料、石英砂滤料、塑料滤料的出水浊度分别为 12.29、16.1、12.38 NTU。如图 2 所示,3 种滤料对浊度的平均去除率均在 82% 以上,其中瓷砂滤料、石英砂滤料、塑料滤料在 6 种进水条件下对浊度的平均去除率分别为 90.93%、86.59%、91.68%。当进水 SS 质量浓度为 250 mg/L 时,瓷砂滤料、石英砂滤料、塑料滤料的出水 SS 质量浓度分别为 16.33、17.00、19.33 mg/L;当进水 SS 值为 400 mg/L 时,瓷砂滤料、石英砂滤料、塑料滤料的出水 SS 质量浓度分别为 23.67、32.33、18.18 mg/L。3 种滤料对 SS 的平均去除率分别为 93.87%、92.19%、92.87%,无明显差异。

就对产浊物质的去除效果而言,3 种滤料的截留作用表现为塑料滤料优于瓷砂滤料优于石英砂滤料,可能是石英砂滤床空隙率最大所致。另外,结合三者对 SS 的去除效率无明显差别的结果,最终确定塑料滤珠为优先选用滤料。

2.2 滤珠粒径对滤床去除雨水 SS 效果的影响

由图 3 可知,当进水 SS 质量浓度为 460 mg/L、暴雨强度为 44.3 mm/h、进水负荷为 104.3 L/h、下向滤速为 1.48 m/h、滤层厚度为 1 200 mm 时,3 种

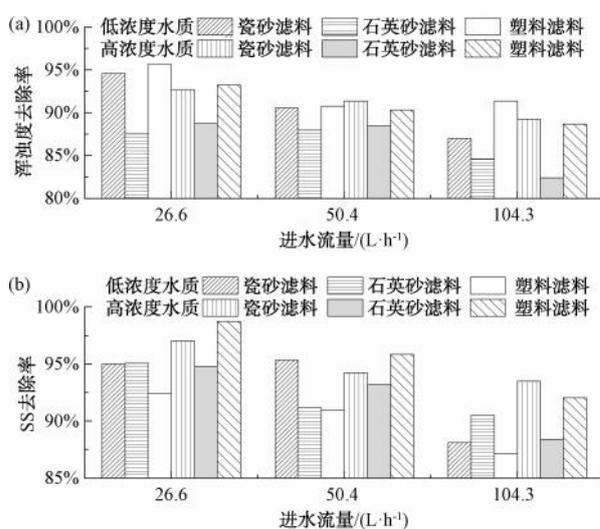


图 2 不同材质滤料滤床在多种进水条件下对浊度和 SS 的去除效果

Fig. 2 Effect of Filter with Different Medium Materials under Various Influent on Turbidity and SS Removal

粒径(1、3、5 mm)的滤珠滤料过滤系统对雨水的 SS 有显著的去除效果,平均去除率均大于 94%。滤后水 SS 最低质量浓度为 3.5 mg/L,最高质量浓度为 74 mg/L,且大部分集中在 13 mg/L 左右。较好的去除效果主要是滤珠表面具有更高的曲率,导致液体在滤珠表面以较为紧凑、贴合的形态流过,而且滤珠之间相互堆放接触的面积更小且空隙均匀^[14-15],从而提高了滤珠对 SS 的截留效率。

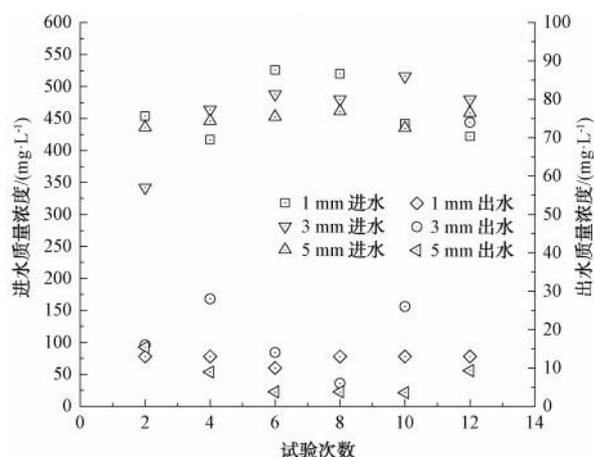


图 3 不同粒径滤珠滤床在多降雨场次下对 SS 的净化效果
Fig. 3 Purification Efficiency of SS under Rainfall Frequency in the Filter with Different Beads Size

1 mm 滤珠滤床在进水 SS 浓度波动较大时,滤后水 SS 质量浓度仍能维持在 13 mg/L 左右,稳定性

好;而 3 mm 滤珠滤床滤后水 SS 浓度变化较大,去除效果欠稳定。当降雨场次达到 4 次以上时,5 mm 滤珠滤床滤后水 SS 浓度即为所有供试粒径滤床最低,而 3 mm 滤珠滤床滤后水 SS 浓度波动最大。随着试验次数的增加,三者中 1 mm 滤珠滤床更易堵塞,3 mm 和 5 mm 滤珠滤床也出现了雍水现象,导致滤速下降,整个过滤过程的压力损失变大,过滤周期变短。过滤初期滤珠对 SS 的过滤以拦截和滤料表面的黏附作用为主,随着过滤的降雨场次增加,滤床表层滤料截留的 SS 越来越多,滤珠间的空隙越来越小,滤层内部滤料和表面堆积物形成了新的“滤饼”,如图 4 所示。该滤层在形成后进一步为系统 SS 去除发挥作用,但过水能力明显下降^[16]。杜辉等^[17]在探究土工布对城市雨水径流中 SS 的过滤效果试验研究中发现,随着系统运行时间的累积,被截留的 SS 不断地填充土工布内部空隙,能穿过的 SS 越来越少,对 SS 的去除率逐渐升高。

肉眼观察 1、3、5 mm 滤珠滤床在相同降雨场次

的前提下迎水面形成的“滤饼”表面特征可以发现,在图 4(a)中,1 mm 滤珠滤床迎水面形成的“滤饼”表面 SS 积聚成的颗粒较为细腻且将滤珠迎水面完全覆盖。而在图 4(b)和图 4(c)中,3 mm 和 5 mm 滤珠滤床迎水面形成的“滤饼”表面 SS 凝结成的颗粒较大,而且厚度小于滤珠粒径 1 mm 的“滤饼”滤层,说明初期截留效果的差异会影响后期“滤饼”的形态,这虽然证明 1 mm 滤珠滤床可以去除更多的 SS,同时也说明了 1 mm 滤珠滤床易堵塞的主要原因。因此,虽然粒径 1 mm 滤珠滤床对 SS 的去除效果更好,但对于道路径流污染物强度较大的区域,不建议采用 1 mm 粒径滤珠作为实际工程滤料。

实际应用中,当滤床达到过滤周期或间歇期时,可将模块化滤珠滤床取出清洁,或直接以备用模块化滤床替换。待清洁的滤床模块在自然或人工环境下风干,采用机械振荡或高压水枪冲洗等方式,利用滤珠滚动摩擦的优势,实现对滤料的高效清洁^[18]。

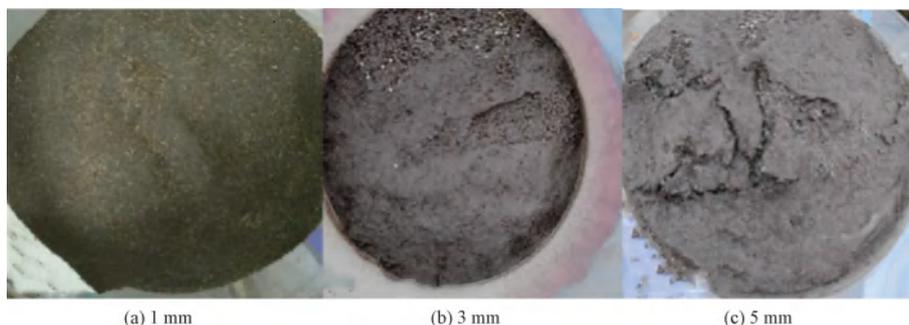


图 4 不同粒径滤珠滤床下迎水面形成的“滤饼”

Fig. 4 "Sludge Cake" over the Filter with Different Size Beads

2.3 滤珠粒径对滤床截留颗粒物的粒径分布的影响

3 种粒径滤珠滤床进出水中颗粒污染物的粒径分布如图 5 所示。1、3、5 mm 滤床进水颗粒物平均粒径分别为 217.63、236.92、208.95 μm 。颗粒物经 1 200 mm 厚滤床过滤后,1 mm 滤珠滤床出水占比最高(4.57%)的颗粒物粒径为 1.34 μm ,出水颗粒物最大粒径为 14.26 μm ,粒径众数为 7.32 μm ; 3 mm 滤珠滤床出水占比最高(4.13%)的颗粒物粒径为 8.15 μm ,最大粒径为 24.95 μm ,粒径众数为 9.37 μm ; 5 mm 滤珠滤床出水占比最高(2.57%)的颗粒物粒径为 8.15 μm ,最大粒径为 57.77 μm ,粒径众数为 10.98 μm 。上述结果表明,粒径为 1 mm

的滤珠滤床可以去除更小粒径的颗粒物,但通过对比三者各粒径颗粒物的体积分数可以发现,经过粒径为 1 mm 和 3 mm 的滤珠处理后的颗粒物粒径较小但其体积占比较高,经过粒径 5 mm 的滤珠处理后的颗粒物粒径较大但其体积占比较低且分布相对均匀。通过计算可以得出 3 种粒径滤珠出水颗粒物粒径平均值分别为 5.27、4.42、7.43 μm ,3 种粒径滤珠滤床出水颗粒物粒径均值相差较小。

上述结果可能是 3 种粒径滤珠滤床迎水面形成的“滤饼”的差异所致,粒径为 1 mm 的滤珠在较小的空隙率下形成的“滤饼”促使过流孔隙越来越小而截留了较大粒径的颗粒物,而粒径为 5 mm 的滤珠在较大的空隙率下形成的“滤饼”所需的时间较

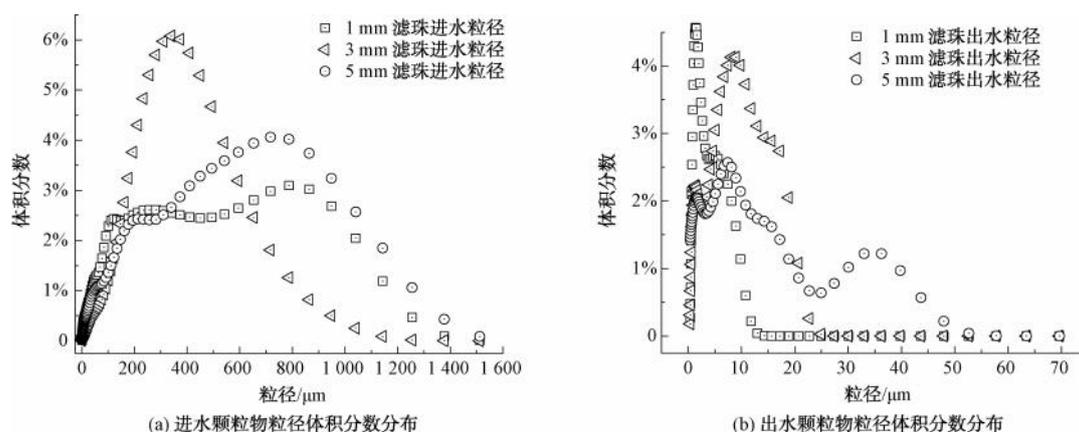


图 5 不同粒径滤珠滤床进出水颗粒物粒径体积分数分布

Fig. 5 Volume Fraction Distribution of Particle Size in Influent and Effluent in the Filter Bed with Different Beads Size

长,与粒径 1 mm 的滤珠同期相比形成的过流孔隙较大,促使较大粒径的颗粒物跟随过流水冲刷“滤饼”表面夹杂少许颗粒物进入滤珠滤层直至排出装置外。

而粒径为 1 mm 和 5 mm 的滤珠滤床在形成“滤饼”时间上产生差异,在出水 SS 浓度和出水颗粒物粒径平均值接近一致的前提下,粒径为 5 mm 的滤珠滤床延缓了滤床雍水、堵塞的时间,延长了滤床的使用周期,而且单位体积滤料用材大幅少于 1 mm 滤珠,故在实际工程中推荐采用粒径为 5 mm 的滤珠作为滤料。

2.4 滤床厚度对雨水 SS 过滤效果和颗粒物截留特性

当进水 SS 质量浓度为 448.3 mg/L、暴雨强度为 44.3 mm/h、进水负荷为 104.3 L/h、下向滤速为

1.48 m/h 时,每隔 200 mm 的滤层厚度测定出水 SS 浓度,考察 5 mm 滤珠滤床不同滤层厚度对模拟雨水的过滤效果。由图 6(a)可知,5 mm 球形滤珠滤床在滤层 200~1 200 mm 深度处出水粒径的分布情况为 0~110、0~80、0~75、0~50、0~50、0~60 μm,随着滤层厚度不断增加,出水中的 SS 粒径越来越小。进水 SS 粒径平均值为 208.9 μm,滤层不同厚度处出水 SS 粒径平均值分别为 29.73、29.64、19.38、14.21、10.23、7.40 μm,表明 5 mm 滤珠对大粒径的 SS 具有显著的去除效果。SS 随进水由向下经滤层进行过滤时,首先经过上部的滤层,在 SS 浓度相同的条件下,上部的滤层将先截留更多的 SS,流入上部滤料层的水中 SS 浓度要比流经下部滤料层的大,SS 截留速度快,导致滤层层层的去除效果较好。其次,水开始流过滤层时,水中 SS 的浓度大幅度降低,

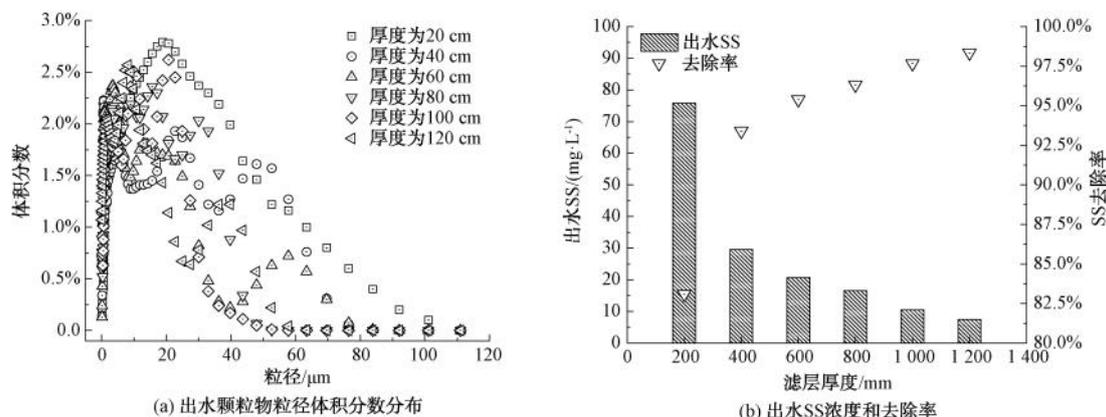


图 6 不同滤层厚度下 5 mm 粒径滤珠滤床出水颗粒物粒径体积分数分布、出水 SS 浓度和去除率

Fig. 6 Particle Size Volume Fraction Distribution, Effluent SS Concentration and Removal Rates in the Filter with 5 mm Beads under Different Filter Bed Layer Depth

但随着水流穿过一定厚度的滤层后,单位滤料表面积上截留的速率开始逐渐减小,所以之后随滤层厚度的增加,SS 去除效率变化将不再显著^[19]。

由图 6(b)可知,当滤层厚度为 1 200 mm 时,不同厚度的滤层均具有纳污能力,且随着滤层厚度的增加,滤后水 SS 浓度逐渐减小。5 mm 滤珠在滤层厚度为 200~1 200 mm 深度处滤后水 SS 质量浓度分别为 75.83、29.62、20.74、16.51、10.5、7.42 mg/L,去除率分别为 83.09%、93.40%、95.39%、96.31%、97.66%、98.34%。当滤层厚度由 200 mm 增加到 400 mm 时,滤后水 SS 质量浓度由 75.83 mg/L 降至 29.62 mg/L,SS 去除率由 83.09% 升至 93.40%,可知该深度区间内 SS 的浓度和去除率变化幅度较大。而当滤层厚度由 400 mm 增加至 1 200 mm 过程中,滤后水 SS 质量浓度由 29.62 mg/L 降至 7.42 mg/L,SS 去除率由 93.40% 升至 98.34%,该厚度区间内 SS 的浓度和去除率变化幅度较小,系统对 SS 的去除过程趋于完成。类似的结果还发生于 Graham 等^[20]在探究慢滤池滤层厚度对出水水质影响的研究中,使用合成纤维作为滤料分别对 200、300、500 mm 3 种滤层厚度开展试验,结果表明,增加滤层厚度会促使出水水质变好,但滤层厚度为 200 mm 的慢滤池便可以满足世界卫生组织(WHO)规定的大部分出水指标要求。因此在工程实际应用中,考虑建设成本的前提下,推荐使用滤层厚度为 400 mm 作为 5 mm 滤珠的滤床厚度。

2.5 5 mm 滤珠滤床对 COD、TP、TN 的去除效果

5 mm 滤珠滤床在进水水量为 104.3 L/h、水质为高浓度,暴雨强度为 44.3 mm/h、下向滤速为 1.48 m/h、滤层厚度为 400 mm 时,对 COD、TP、TN 的去除效率分别为 13.51%、14.27% 和 8.23%。试验进水 COD 质量浓度多在 350~450 mg/L,5 mm 滤珠滤床对 COD 均有一定的去除效果。“滤饼”形成后对颗粒态 COD 形成了更好的截留作用,虽然道路径流雨水中溶解性 COD 占总 COD 不足 40%^[21],但试验配水中,由于采集的道路沉积物中 COD 严重不足,辅以葡萄糖后,溶解性 COD 占总 COD 的 80%左右,故本试验条件下滤珠滤床可以去除少量的溶解性物质。同样,当进水溶解性 TP、TN 质量浓度平均值为 1.0、14 mg/L 时,5 mm 滤珠滤床对其也有一定的去除效果。

2.6 水流方向对过滤效果的影响

当滤珠粒径选用 5 mm,滤层厚度选用 400 mm,暴雨强度为 5.6、11.3、22.9、33.0、44.3 mm/h,滤速为 0.19、0.38、0.76、1.10、1.48 m/h 时,进水方向以上向流、下向流和水平流 3 种不同方式运行,且暴雨强度逐步增大时,考察模块化滤床对 SS 的净化效果。水平流、上向流和下向流的滤床对 SS 的控制效果如图 7(a)所示,进水 SS 平均质量浓度为 483.06 mg/L,滤后水 SS 都持续地保持在一个较低水平,平均质量浓度分别为 34.01、34.34、39.70 mg/L,对 SS 的平均去除率分别为 92.96%、92.89%、91.78%。此时水平流、上向流、下向流的平均滤速相同,均为 0.78 m/h。如图 7(b)所示,3 种流向滤床对 SS 去除效果随进水量的增加呈现先增加后减小的趋势,进水量(降雨量)的增加提高了滤池的滤速,滤速的提高促使水流剪切力增大,导致杂质脱离滤料或阻碍杂质颗粒在滤料上的附着,最终导致出水中颗粒物增加,其中上向流过滤装置对 SS 去除效果的变化尤为明显。在整个试验运行周期中,上向流滤床在中、小进水量时对 SS 控制效果较好,在暴雨强度为 5.6、11.3、22.9 mm/h 时,上向流滤床对 SS 的去除率分别为 91.41%、97.05%、98.16%,水平流和下向流滤床对 SS 的去除率分别为 93.19%、93.04%、96.3% 和 89.7%、94.56%、94.24%,但试验后期去除效果逐渐减弱。当暴雨强度为 33.0 mm/h 和 44.3 mm/h 时,上向流滤床对 SS 的去除率分别降至 90.07%、88.13%,水平流和下向流滤床对 SS 的去除率分别为 93.16%、89.04% 和 93.22%、87.12%,去除效果上向流明显弱于水平流和下向流,主要原因可能是在试验初期进水量小,水流携带的 SS 由于自身重力作用部分沉降至滤池底部的配水区,并没有进入滤床;但在试验后期,随着进水量增大,试验初期沉降的 SS 经水流冲刷进入滤床,使得实际进水浓度急剧增大,导致滤后水中 SS 浓度增大。另一方面可能是在上向流装置底部迎水面由于颗粒物的沉淀作用难以形成滤饼,少量的积聚物在高滤速下易脱离,使得上向流对 SS 的去除效果不稳定。

由图 8(a)可知,进水颗粒物粒径众数:上向流为 500.43 μm 、下向流为 429.21 μm 和水平流为 567.87 μm 。图 8(b)中出水粒径众数:上向流为 34.89 μm 、下向流为 34.59 μm 和水平流为 41.69 μm ,上向流滤后水中颗粒物粒径 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 对应的值分

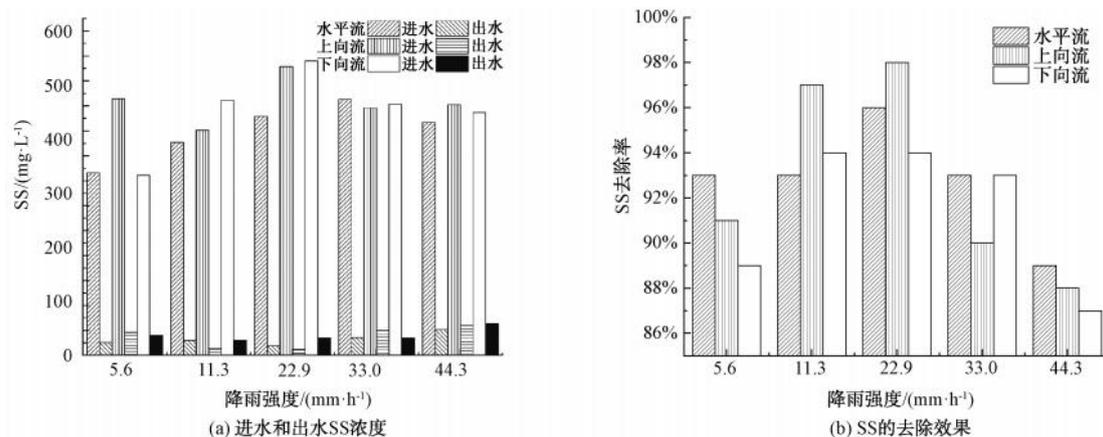


图 7 滤床水流方向在不同雨强下对 SS 去除效果的影响

Fig. 7 Influence of Filter's Flow Direction on SS Removal Efficiency under Different Rainfall Intensity

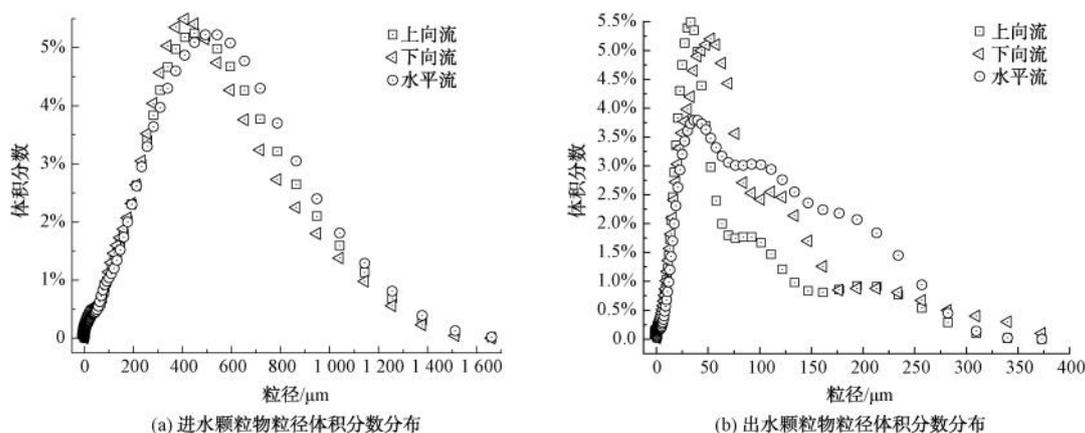


图 8 不同水流方向滤床下进水中颗粒物粒径体积占比分布

Fig. 8 Particle Size Volume Fraction Distribution of Influent and Effluent of the Filter Bed under Different Flow Direction

别为 9.20、32.89、109.40 μm , 下向流的值分别为 10.03、40.33、165.40 μm , 水平流的值分别为 13.14、48.80、170.6 μm 。因上向流配水区中难以避免大颗粒物的沉降,易造成配水不均匀,使下向流滤床的截留效果优于水平流。综合分析 3 种流态的模块化滤床对 SS 去除效果的稳定性、对不同粒径污染物颗粒的控制效果、滤床运行稳定性及实际工程中对滤料的清理难易程度,下向流的模块化滤床更利于工程应用,故推荐采用下向流的模块化滤床作为雨水深度净化的预处理设施。

3 结论

(1)球形滤珠滤床对雨水中的 SS 具有显著的吸附和截留作用,在滤床厚度为 1 200 mm 处,不同粒径(1、3、5 mm)滤珠滤床对 SS 去除率均达到 94% 以上,能有效地去除雨水中 60 μm 以上的颗粒物。

(2)5 mm 粒径滤珠滤床在滤层厚度为 400 mm

处,对 SS 的去除率达到 93.40%,颗粒物粒径控制在 80 μm 以下,且对 COD、TP、TN 也有一定的去除效果。

(3)当模块化滤珠滤床以(上向流、水平流、下向流)3 种不同方向进行运行时,下向流具有更高效和更稳定的过滤效果。

(4)模块化滤珠滤床具有可作为雨水高效简便净化的一种新技术途径。

参考文献

- [1] 王永,赵萍,颀亚玮,等. 海绵城市径流污染控制模型参数研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 129-133.
WANG Y, ZHAO P, JIE Y W, et al. Parameters of runoff pollution control models of sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(23): 129-133.
- [2] 杨雅峥,孙皓珺,孙懿铭,等. 潮汐流-垂直潜流人工湿地对城市径流污染物净化效果[J]. 环境工程学报, 2023, 17

- (2): 471-484.
- YANG Y Z, SUN H J, SUN Y M, et al. Removal of pollutants from urban runoff by tidal flow vertical flow constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(2): 471-484.
- [3] 曾思育, 董欣. 城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J]. *给水排水*, 2015, 41(10): 1-3.
- ZENG S Y, DONG X. Development and practice of urban rainfall runoff pollution control technology [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(10): 1-3.
- [4] 李晶. 降雨对污水处理厂进水污染物浓度的影响[J]. *净水技术*, 2021, 40(4): 68-72.
- LI J. Effect of rainfall on influent pollutants concentration of wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(4): 68-72.
- [5] 周传庭, 王梦玉, 幸韵欣, 等. 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J]. *净水技术*, 2022, 41(7): 17-26.
- ZHOU C T, WANG M Y, XING Y X, et al. Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measures [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(7): 17-26.
- [6] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(08): 1634-1644.
- YANG M Y, PAN X Y, LIU H L, et al. Urban non-point pollution characteristics in China: A meta-analysis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(8): 1634-1644.
- [7] 谢尚宇, 邱春生, 张昱, 等. 天津某住宅区降雨径流颗粒粒径分布及污染物赋存形态[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 566-573.
- XIE S Y, QIU C S, ZHANG Y, et al. Particle size distribution and pollutant speciation analyses of rainfall runoff in urban residential community of Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 566-573.
- [8] 程丰, 王庆国, 刘朝榕, 等. 城市路面径流颗粒污染物研究现状分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(4): 181-185.
- CHENG F, WANG Q G, LIU Z R, et al. Analysis on research status of particulate pollutants in urban road runoff [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(4): 181-185.
- [9] 袁宏林, 陈海清, 林原, 等. 西安市降雨水质变化规律分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 43(3): 391-395.
- YUAN H L, CHEN H Q, LIN Y, et al. Analysis of rainwater quality variation in Xi'an [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 43(3): 391-395.
- [10] 刘宏远, 陶娟娟, 朱海涛, 等. 反粒度生物滤池初滤水浊度控制研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(11): 56-60.
- LIU H Y, TAO J J, ZHU H T, et al. Turbidity control in initial effluent of reverse grain biological filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(11): 56-60.
- [11] 赵瑾, 王文华, 姜天翔, 等. 水处理中滤料应用的研究进展[J]. *净水技术*, 2018, 37(4): 41-46.
- ZHAO J, WANG W H, JIANG T X, et al. Research progress of application of filter materials in water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(4): 41-46.
- [12] 李家科. 城市雨水径流净化与利用LID技术研究——以西安市为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LI J K. Study on urban rainwater runoff purification and utilization of LID technology——A case study of Xi'an City [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- State Environmental Protection Administration The *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* Editorial Board. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [14] 胡瑞, 熊乐, 许春霞, 等. 曲率半径系数优化下弹性推力球轴承减摩特性研究[J]. *南昌工程学院学报*, 2020, 39(4): 55-60.
- HU R, XIONG L, XU C X, et al. Study on friction reduction characteristics of elastic thrust ball bearings under curvature radius coefficient optimization [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2020, 39(4): 55-60.
- [15] 田红亮, 余媛, 陈甜敏, 等. 考虑表面粗糙度和几何曲率的两球体接触问题[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(3): 1-7, 44.
- TIAN H L, YU Y, CHEN T M, et al. Contact problem between two spheres considering surface roughness and geometrical curvature [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(3): 1-7, 44.
- [16] 赵鹏飞, 翟国亮, 邓忠, 等. 玻璃球滤料在微灌过滤装置中的应用试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(4): 65-68.
- ZHAO P F, ZHAI G L, DENG Z, et al. Experimental study on the feasibility of using glass beads as micro-irrigation filter [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4): 65-68.
- [17] 杜辉, 陈群, 郑咏璘, 等. 土工布对城市雨水径流中悬浮物的过滤效果试验研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(s2): 131-133, 135.
- DU H, CHEN Q, ZHENG Y J, et al. Experimental study on filtration effect of geotextiles on suspended solids in urban stormwater runoff [J]. *Yellow River*, 2022, 44(s2): 131-133, 135.
- [18] 孙珊珊, 苏勇, 季顺迎. 颗粒滚动-滑动转换机制及摩擦系数的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(s1): 110-115.
- SUN S S, SU Y, JI S Y. Experimental study of rolling-sliding transition and friction coefficients of particles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(s1): 110-115.

(下转第187页)

指标,从而更合理地调整工艺运行参数,应对寒冬季
节等极端天气对污泥泥性的影响。

参考文献

- [1] 郑松超,张彦平,李添添,等. 紫外协同零价铁活化过硫酸盐调理污泥脱水研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 15-22.
ZHENG S C, ZHANG Y P, LI T T, et al. Ultraviolet coupled with zero-valent iron to activate persulfate for improving sludge dewaterability[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 15-22.
- [2] 夏云峰,周艳,王涛,等. 地下式污水处理厂AAO+MBR工艺的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(8): 140-145.
XIA Y F, ZHOU Y, WANG T, et al. Application of AAO+MBR processes in underground wastewater treatment plant (UWWTP) [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8): 140-145.
- [3] 王瑞,杨福兴,曲广森. 颗粒污泥处理高负荷有机含油废水的形成过程及特性探究[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 84-88.
WANG R, YANG F X, QU G M. Study on the cultivation process and characteristics of granular sludge in treatment of high-load organic oily wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(3): 84-88.
- [4] 王磊. 城市污水厂污泥产率季节变化与影响因素分析[J]. 净水技术, 2018, 37(6): 36-40.
WANG L. Analysis of seasonal variation and influencing factors of sludge yield in municipal sewage plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(6): 36-40.
- [5] 谭学军,田兆运,张辰,等. 城市污水A²/O处理工艺剩余污泥产率研究[J]. 给水排水, 2012, 38(7): 43-46.
TAN X J, TIAN Z Y, ZHANG C, et al. Urban sewage A²/O process excess sludge yield study [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(7): 43-46.
- [6] 韩小蒙,马艳,周新宇,等. pH值对微气泡臭氧释放剩余污泥内碳源的影响[J]. 净水技术, 2020, 39(3): 115-119, 139.
HAN X M, MA Y, ZHOU X Y, et al. Influence of pH value on release of internal carbon source from excess activated sludge by microbubble ozone [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 115-119, 139.
- [7] 刘旭辉,高静思,袁佳佳,等. 深圳市L区水质净化厂污泥产率分布规律及影响因素分析[J]. 环境工程, 2023, 41(6): 181-186.
LIU X H, GAO J S, YUAN J J, et al. Distribution law and influencing factors of sludge yield of waste purification plants in L District, Shenzhen [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(6): 181-186.
- [8] 郭波,田瑜,范晨,等. 绿色纳米铁/H₂O₂联用两性脱水剂调理污泥研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 62-67.
GUO B, TIAN Y, FAN C, et al. Sludge conditioning by green iron nanoparticles/HO combined with amphoteric dewatering agent [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 62-67.
- [9] 金润,李祥,谈新伟,等. 高铁酸钾氧化剩余污泥效能及破解液性质[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 118-123.
JIN R, LI X, TAN X W, et al. Performance of potassium ferrate for excess sludge oxidation and property of cracking solution [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 118-123.
- [10] 张辰,王磊,谭学军,等. 我国重点流域城市污泥有机污染物含量与溯源研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 37-42.
ZHANG C, WANG L, TAN X J, et al. Study on the content and source of municipal sludge organic pollutants in key watershed of China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24): 37-42.
- [19] 李圭白. 水质工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 129-172.
LI G B. Water quality engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 129-172.
- [20] GRAHAM N J D, CLARKE B A, JONES C J, et al. Effect of reduced depth, fabric-protected slow sand filters on treated water quality[C]. London: Advances in slow sand and alternative biological filtration, 1996: 233-243.
- [21] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 331-336.
CHEN Y, ZHAO J Q, HU B. Study on pollution and sedimentation property of urban trunk road runoff in Xi'an city [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(2): 331-336.

(上接第137页)