

城市公共空间雨水径流的景观化循环利用策略

王皖杰^{1*}, 肖栋¹, 谢圣楠¹, 任雨轩², 张军^{1#}, 郝云涛³

¹西安建筑科技大学环境类专业国家级实验教学示范中心, 陕西 西安

²西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安

³中国启源工程设计研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年3月23日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月24日

摘要

城市公共空间作为城市中重要且独特的空间资源, 在提升城市环境、传承历史风貌和推进城市发展上有着巨大的价值, 城市公共空间的存量资源活化与更新设计研究具有重要的现实意义。以景观小品式径流雨水循环利用系统设计为研究目标, 采用煤矸石和玉米秸秆为主要基质共炭化制备高通孔型生态砌块并对材料的吸附性能、水理性能、力学性能进行表征, 以生态砌块为核心构建了联合循环系统(EBCCS)并通过柱实验方法优化了系统设计条件和对雨水径流溶解性有机质(DOM)的去除效率, 并以EBCCS为核心提出了面向城市公共空间微更新的功能型装配式景观小品设计方案, 为深入挖掘城市空间的多元价值和盘活公共空间存量资源提供新思路。

关键词

生态砌块, 雨水径流, 景观小品, 城市公共空间, 城市微更新

Landscape Design Research on Rainwater Runoff Recycling in Urban Public Spaces

Wanjie Wang^{1*}, Dong Xiao¹, Shengnan Xie¹, Yuxuan Ren², Jun Zhang^{1#}, Yuntao Hao³

¹National Demonstration Center for Experimental Education in Environmental Specialties, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

²College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

³China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 23rd, 2024; accepted: May. 17th, 2024; published: May. 24th, 2024

Abstract

Urban public space, as an important and unique spatial resource in the city, has enormous value in

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王皖杰, 肖栋, 谢圣楠, 任雨轩, 张军, 郝云涛. 城市公共空间雨水径流的景观化循环利用策略[J]. 自然科学, 2024, 12(3): 561-570. DOI: 10.12677/ojns.2024.123065

improving the urban environment, inheriting historical style, and promoting urban development. The research on the activation and renewal design of existing resources in urban public space has important practical significance. The research objective is to design a landscape sketch style system for rainwater runoff recycling. Coal gangue and corn straw are used as the main substrates for co-carbonization to prepare high porosity ecological blocks, which the adsorption performance, water physical properties, and mechanical properties of the materials are characterized. A combined cycle system (EBCCS) is constructed with ecological blocks as the core, which the system design conditions and removal efficiency of dissolved organic matter (DOM) in rainwater runoff are optimized through column experiments. A design plan of functional prefabricated landscape sketch for urban public space micro-renewal is proposed with EBCCS as the core, providing new ideas for exploring the diverse value of urban space and activating the stock resources of public space.

Keywords

Ecological Blocks, Rainwater Runoff, Landscape Sketches, Urban Public Spaces, Urban Micro-Renewal

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入十四五时期的新发展阶段,城市规划发展的模式已从“增量扩张”全面转向“存量更新”、从“粗放型发展”转向“精细化发展”、从“以需定供”转向“以供调需”[1][2],以存量空间资源为载体的城市发展将成为重要的发展模式,城市空间转型、城市更新治理和城市内部空间的挖潜盘活已经成为城市更新发展的重要途径。城市公共空间是城市空间形态和环境景观的重要体现主体,也是人们感受城市意象、形成地域文脉和场所认知的重要空间对象。面对城市景观斑块多样化需求矛盾、景观氛围需整体提升等现实问题,需要合理利用景观设计方法和生态化设计理念,探讨如何实现城市公共空间的微更新策略和空间生态效益最大化。

随着城市化进程的快速发展,由径流雨水引起的非点源污染逐渐成为城市水体污染物的重要来源[3]。溶解性有机物(Dissolved organic matter, DOM)是广泛存在于天然及径流雨水中的一类结构复杂、性质稳定的有机高分子混合物[4][5][6]。DOM代表能通过0.45 μm滤膜的具有不同结构及分子量的有机物(如低分子量的游离氨基酸、碳水化合物、有机酸等和大分子量的酶、氨基糖、多酚和腐殖质等)[7]。对于径流雨水中的DOM,研究主要关注其化学组成及环境因素对其结构的影响[8]。不同分子量区间DOM的分布在很大程度上影响着与其共存的污染物含量和赋存方式。传统单一工程管网化的城市雨水管理模式在如何科学、有效、系统性地实现径流雨水净化和资源化利用方面逐渐暴露出一系列问题。以缓解市政排水管网压力、积极践行生态设计、促进雨水资源景观化利用为目标,研究基于雨水资源多途径利用的景观策略,构建城市雨水资源景观化处理的模型,以期通过景观介入的手段来缓解城市雨洪灾害,实现雨水资源科学合理利用,可以为雨水净化与利用技术及设施提供一定的理论研究基础,为城市雨水资源专业系统化的管理提供对策。

2. 实验方法

2.1. 植生型功能化生态砌块制备方法

本研究采用煤矸石和玉米秸秆共炭化烧结材料为核心吸附材料制备出高通孔材料,然后利用水热合

成法对煤矸石基高通孔材料进行沸石化改性, 得到一种具有吸附性能的高通孔类沸石材料。再利用这种吸附材料对含有 NOM 的雨水径流进行吸附, 探索具有高的比表面积和孔隙率、且抗压强度较强的高通孔类沸石材料。

称取一定质量的煤矸石和秸秆原料置于可编程管式炉中, 在限氧条件下以 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率进行炭化, 分别设置最高炭化温度为 350°C 、 450°C 和 550°C , 炭化时间 1 h。待制得的生物炭固体样品冷却后研磨过 60 mesh 筛, 干燥器中保存备用。材料的灰分含量采用马弗炉(KSL-1200X)测定, 表面形貌采用扫描电镜(JSM-6510LV)测定, 材料比表面积和孔径分布采用比表面积与孔道测定仪(V-Sorb2800P)按 BET-N2 吸附法测定。采用 L18(3^7)正交表设计材料制备方案, 材料选择及配比见表 1。采用 Excel 软件对数据进行整理, 以材料对 DOM 去除率为指标, 通过对每一因子每个水平的指标得分进行加和 K 值计算及平均值统计, 比较正交试验结果极差 R 值, 结合采用 Statistics 22.0 软件对 18 种试验方案进行单因素方差分析, 确定砌块材料的最优制备方案。

Table 1. Orthogonal experimental setup for the preparation of ecological block

表 1. 生态砌块制备的正交试验设置

材料名称	功能	因素	配比水平		
pH	煤矸石改性	F1	~2	~7	~9
煤矸石(325 mesh)	吸附剂	F2	60%	70%	80%
玉米秸秆(16 mesh)	生物炭基质	F3	10%	20%	30%
石蜡粉	造孔剂	F4	1%	2.5%	5%
焙烧温度 T	水热合成条件	F5	350°C	450°C	550°C
十六烷基溴化铵	发泡剂	F6	1%	2.5%	5%
白水泥	强度胶粘剂	F7	1%	2.5%	5%

2.2. 生态砌块联合循环系统优化的柱实验方法

按照可渗透反应屏障(Permeable Reactive Barrier, PRB)技术原理, 批实验中无法实现 PRB 实际的固液比, 需要柱实验提供活性反应介质和污染物相互作用的详细信息以支撑设计。柱实验为设计提供了一阶反应动力学常数(k)、半衰期($t_{1/2}$)、水力停留时间(t_{res})、渗透系数(K)、理论寿命(N)和滞留池最小厚度(B)。

1) 活性反应材料半衰期。

通过柱实验数据绘出污染物浓度与时间的变化曲线图, 确定反应材料与污染物的反应动力学, 确定污染物的反应速率常数(k)和反应半衰期($t_{1/2}$), 计算见公式(1)和(2)。

$$c = c_0 \cdot e^{-kt} \quad (\text{公式 1})$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (\text{公式 2})$$

式中: c 为 t 时刻出水口的污染物浓度, mg/L ; c_0 为污染物溶液的初始浓度, mg/L ; k 为柱实验反应速率常数, h^{-1} ; t 为出水口取样时间(系统运行时间), h ; $t_{1/2}$ 为系统反应半衰期, h 。

2) 污染物最短水力停留时间。

根据公式(3)中的反应速率常数计算停留时间, 当系统存在多种污染物时, 停留时间由半衰期最长的污染物决定。

$$t_{res} = \frac{\ln(c_t/c_0)}{-k} \quad (\text{公式 3})$$

式中： t_{res} 为污染物溶液流经系统所需的停留时间，h； c_0 为污染物溶液的初始浓度，mg/L； c_t 为污染物修复或风险管控的目标浓度，mg/L； k 为柱实验反应速率常数， h^{-1} ；

3) 活性反应材料的渗透系数计算。

利用达西定律，估算反应材料的渗透系数，计算见公式(4)。

$$K = \frac{LV}{At\Delta h} \quad (\text{公式 4})$$

式中： K 为活性反应材料的渗透系数，m/d； V 为 t 时间段内的出水体积， m^3 ； L 为实验柱中的反应材料长度，m； A 为实验柱的过水断面面积， m^2 ； t 为时间，d； Δh 为水流经过介质上下两头的水头差，m。

4) 吸附/离子交换型活性反应材料理论寿命。

柱实验中反应材料的使用时间为出水口的出水样的污染物浓度高于修复或风险管控目标值时所需的时间。理论计算需要根据公式(5)来进行计算，该公式没有考虑径流温度变化、化学成分的变化以及微生物菌群的影响，因此公式计算得到的值往往比实际值要高。

$$N = \frac{(V \cdot \rho_{soil} \cdot q)}{Qc} \quad (\text{公式 5})$$

式中： N 为活性反应材料的理论寿命，d； V 为活性反应区域体积， m^3 ； ρ_{soil} 为混合浆料堆积密度， kg/m^3 ； q 为单位活性反应材料对污染物的最大去除量， kg/kg ； Q 为活性反应区域的流量， m^3/d ； c 为径流中污染物的浓度， kg/m^3 。

5) 滞留池最小厚度。

滞留池的最小厚度需由沿水流方向的实际流速与污染物停留时间及安全系数得到，可采用公式(6)和(7)确定。

$$B = V_{PRB} \cdot t_{res} \cdot SF \quad (\text{公式 6})$$

式中： B 为水流方向上滞留池的最小厚度，m； V_{PRB} 为水流通过滞留池的实际流速，m/d； t_{res} 为最短水力停留时间； SF 为安全系数。

$$V_{PRB} = \frac{(K \cdot I)}{n_e} \quad (\text{公式 7})$$

式中： V_{PRB} 为径流通过滞留池的实际流速，m/d； K 为混合浆料的渗透系数，m/d； I 为水力梯度； n_e 为混合浆料的有效孔隙度。

2.3. 水理性能和力学性能实验方法

水理性能试验方案包括：① 吸水率试验：将砌块材料放入真空饱和缸，抽真空后注水，室温浸泡 24 h，分别称量湿重和烘干后干重，计算吸水率。② 蒸发率试验：将砌块材料统一用 10 cm 高度水面浸泡后取出，在室温下 24 h 内每隔一小时称重，计算蒸发率。③ 含水率试验：将砌块材料放入高度为 500 mm 的保水性能试验槽内，从表面每 150 mm 开设一个采样孔，分别在第 3、7、14 天测定各分层上材料的含水率。

力学性能试验方案包括：① 压碎指标试验：采用万能试验机和压碎值指标测定仪，对砌块材料进行压碎值指标的测定，设定 1 kN/s 匀速加压至 200 kN 并稳定 10 s，卸载压力后采用 8 目标准筛过筛后，称量筛余质量进行计算。② 休止角试验：采用高 45 cm、下直径 7 cm 的漏斗进行休止角的测试，将砌块材料在漏斗口上方 10 cm 处倾倒入自然下落，通过漏斗形成自然的堆积坡角，测量三次堆积后的平均直径，

根据正切值,利用反三角函数确定休止角大小。③ 坚固性试验:在 300 g/L 硫酸钠溶液中浸泡砌块材料,第一轮浸泡 20 h 并烘干 4 h,第二轮至第五轮均为浸泡 4 h 并烘干 4 h,用清水洗净硫酸钠后再次烘干,用试样粒级下限筛孔过筛称重。

2.4. 雨水径流 DOM 去除效果分析方法

取过滤后雨水径流 DOM 样品 5 mL,置于石英比色皿中,使用荧光光谱分析仪(F-6500, Hitachi)进行三维荧光光谱扫描。激发光源设定为 150 W 直流供电密闭式氙灯光源, PMT 电压为 700 V,信噪比大于 110;激发和发射单色器的狭缝设置为 5 nm,响应时间为 0.5 s,扫描激发波长(Ex)范围为 200~450 nm、发射波长(Em)范围为 250~550 nm,扫描速度为 500 nm·min⁻¹。对扫描得到的荧光光谱数据进行预处理,将扫描光谱结果减去去离子水空白样品的光谱数据,同时设置零瑞利散射影响区域光谱数据,分别用以消除拉曼散射、瑞利散射影响之后,使用 Origin2022 软件对三维荧光光谱数据进行处理,形成荧光强度等高图。同时对以上样品进行同步荧光光谱扫描,互定波长差 $\Delta\lambda$ 设定为 30 nm,扫描波长范围设定为 200~550 nm,扫描速度为 240 nm·s⁻¹。

3. 结果与讨论

3.1. 植生型功能化生态砌块的吸附性能表征

多孔材料的制备主要以对 DOM 的吸附作为重要依据,这就要求高孔隙率、高比表面积,还要有一定的强度抵抗水流的冲力。吸附试验以透水吸附为主,即试验制备的煤矸石基多孔材料作为吸附剂,收集的雨水径流溶液作为模拟废水,将废水透过多孔材料,用紫外吸收法和三维荧光法测量 DOM 的浓度。从正交试验结果可知, pH 条件选择碱性,焙烧温度达到 550℃,煤矸石-秸秆添加比为 7:2 时,会对材料吸附能力有显著性提升。

为探究生态砌块介质对雨水径流 DOM 的吸附行为,通过 SEM 和 N₂ 吸附脱附方法表征了填料的理化特征,用于解释本研究开发材料的适用性。SEM 表征结果表明(图 1),材料仍以秸秆片层结构为基础,但形成大量不规则通孔,可大大提高吸附比表面积。从 N₂ 吸附-脱附曲线可知(图 2),共炭化后的砌块材料表现为大孔吸附剂上典型的物理吸附过程,且中间段出现吸附回滞环,其对应的是多孔吸附剂出现毛细凝聚的体系。等温线末端没有明显的饱和吸附平台,表明生成的孔结构很不规整,这符合秸秆基质添加后产生复杂多孔结构的特点,添加 20% 秸秆后的砌块材料比表面积相比基质材料增大近 1 倍,烧结后的砌块空洞率上升,单位吸水量增大,且砌块的渗透性能良好,可为 DOM 去除提供良好的吸附和脱附条件。

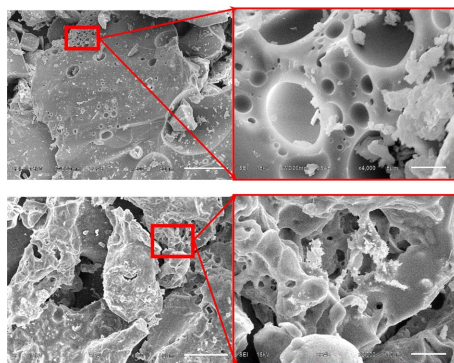


Figure 1. Surface SEM image of ecological block
图 1. 生态砌块的表面 SEM 图

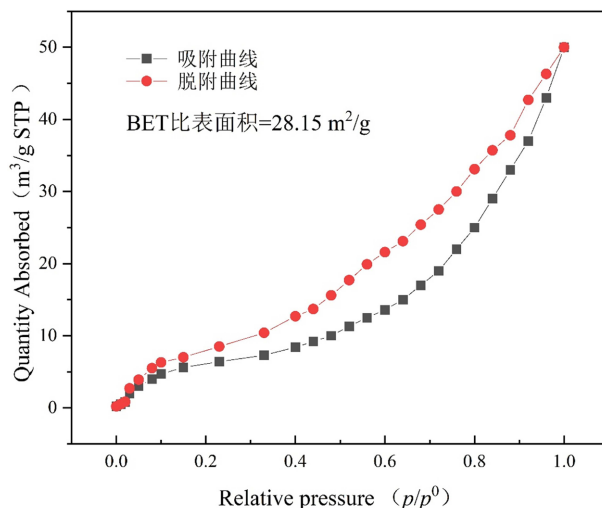


Figure 2. N2 adsorption-desorption curve of ecological block
图 2. 生态砌块的 N2 吸附 - 脱附曲线

3.2. 植生型功能化生态砌块的水理性能和力学性能

按照可渗透反应屏障(Permeable Reactive Barrier, PRB)技术原理, 根据城市道路雨水径流污染物的组成特征, 为生态砌块设计被动式反应单元所需的适宜参数(材料配合比、水灰比、灰骨比、孔隙率等), 再运用级配生态混凝土工艺将粗骨料、改性吸附材料和胶合剂制备为单体生态砌块, 并对砌块的水理性能和力学性能进行表征, 结果见表 2。

砌块粒料的吸水率跟材料本身的粒径呈负相关, 即随着粒径的减小, 吸水率逐渐增大。对于单粒级粒料来说, 粒料的最终蒸发率达到 80%~100%, 可知表示其蒸发效能较好, 对于缓解城市热岛效应、降低道路表面温度方面具有较好的效果。粒径对单粒级粒料的蒸发率影响较明显, 单粒级粒料的蒸发率随粒径的增大而减小, 粒径越小的粒料其前期蒸发曲线斜率越小、达到蒸发稳定所用的时间越长。本研究中砌块填料在生物炭烧结孔洞中填充了煤矸石细颗粒, 进一步增强了填料的吸水性。孔隙率大则粒料吸水量多, 相应的蒸发率也大, 砌块粒料的内部孔隙小、分布均匀且不易失水, 因此具有较好的保水性。

砌块粒料强度的影响因素很多, 破碎粒料形态难以进行立方体抗压试验, 故考虑使用压碎、黏着性、坚固性来研究粒料的强度特征。对于粒径在 5 mm 以上的粗粒料来说其压碎指标远小于细粒料, 粒径越大的粒料, 其材料抵抗外力破坏的能力较强, 故其压碎指标越小。参考 JTJ034-2000《公路路面基层施工技术规范》对 2 级公路压碎值指标质量要求为≤30%, 本研究的粒料符合规范值要求。对于单粒级粒料来说, 粒料的休止角随着粒料粒径的增大而增大, 与粒料的粒径大小成正比例关系。粒料形成的休止角越大, 说明其摩擦力越大, 流动性越小, 抗失稳性较好。质量损失率越小代表其抗腐蚀能力越强, 参照 GB/T14685-2001《建筑用卵石、碎石》标准中对集料坚固性的指标质量要求为≤12%。本研究的生态砌块水理性能和力学性能均符合景观设计要求。

Table 2. Hydraulic and mechanical properties of ecological block
表 2. 生态砌块的水理性能和力学性能

性能	指标	参数
吸水性	吸水率	≥53.6%
蒸发性	蒸发率	≥92.7%

续表

保水性	含水率	14 d/450 mm 深度, $\geq 15.28\%$
压碎性	压碎值	28.31%
黏着性	休止角	46.7°
坚固性	质量损失率	9.18%

3.3. 生态砌块联合循环系统构建

采用 2.1 节方法制备的生态砌块, 参考《深层潜水可渗透反应墙技术指南》T/CSER003-2023 和《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》GB50400-2006, 构建可用于景观小品雨水净化和利用的生态砌块联合循环系统(Ecological block combined cycle system, EBCCS)。EBCCS 活性吸附材料的筛选需要以径流雨水中 DOM 去除效率为基础, 在实际使用的物理性状下(如粒度和表面积)进行。首先根据批实验方法进行生态砌块的初步筛选, 通过吸附热力学实验和吸附动力学试验获得生态砌块的单位体积去除量和去除速率, 选择单位体积去除量大、去除速率高和去除特异性好的生态砌块, 通过在雨水调蓄井前端增设同样采用生态砌块为核心的渗滤滞留模块作为中介, 组合为道路雨水径流水质净化设施。然后按照 2.2 节的柱实验方法, 进一步优化确定 EBCCS 系统构成。路面汇流雨水经过, 雨水算将大块固体杂物隔离和自然沉降后, 经过砾石层和细沙层模块过滤粗粒和细粒悬浮物, 最后通过吸附层模块进行 DOM 吸附净化, 同时去除雨水中溶解的营养物、微生物、重金属等, 经过净化的雨水最后收集在雨水调蓄井内, 作为生态景观补水的供水源。综合以上实验结果提出系统构建的设计条件见表 3, 系统结构见图 3。

Table 3. Construction conditions of ecological block combined cycle system

表 3. 生态砌块联合循环系统构建条件

条件	反应速率常数	半衰期	水力停留时间	渗透系数	理论寿命	最小厚度
参数表达	k	$t_{1/2}$	t_{res}	K	N	B
优化参数范围	0.3080 h^{-1}	2.25 h	3.23 h	$\geq 441.7 \text{ m/d}$	$\geq 360 \text{ d}$	$\geq 0.5 \text{ m}$

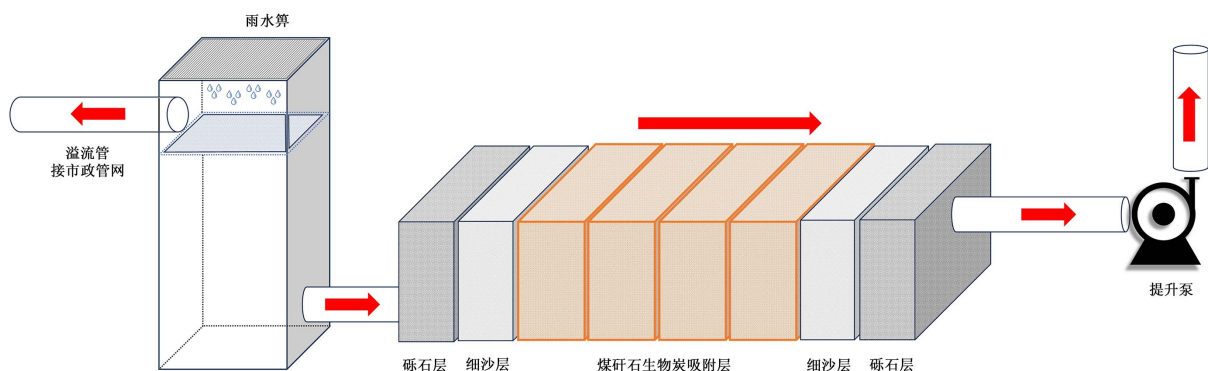


Figure 3. Structure of ecological block combined cycle system

图 3. 生态砌块联合循环系统结构

3.4. EBCCS 对雨水径流 DOM 去除效果

采用 2.3 节方法对 EBCCS 进行 DOM 去除效果测试。从图 4 对比结果可知, 雨水径流 DOM 三维荧光光谱中基本出现了 3 个明显的荧光峰(A, C, D), 荧光峰 A 位置为(Ex/Em: 230~250 nm/390~450 nm), 荧

光峰 C 为(Ex/Em: 320~380 nm/450~470 nm), 荧光峰 D 为(Ex/Em: 310~330 nm/370~380 nm)。其中峰 A 和 C 峰属于类腐殖质荧光峰, A 为低激发波长富里酸类物质, C 为类腐殖酸, 与腐殖质结构中的羰基和羧基等有关, 由分子结构复杂的腐殖质类产生, 一般来源于植物残体的腐烂、降解产物等。D 峰的荧光物质类型为可溶性微生物代谢产物, 主要来源于微生物的生命活动, 包括外源输入生活污水和工业废水等携带的微生物, 以及水体和土壤中自身的微生物。径流 DOM 光谱图中各荧光峰强度不同, 表明各物质组成含量存在差异。基质煤矸石(CG)和联合循环系统(EECBS)对径流 DOM 的去除效果差异显著。在同一产流时刻通过 EBCCS 处理后径流 DOM 中三类荧光峰强度均低于 CG 处理结果, 且 C、D 峰下降更明显, 说明 EBCCS 对 DOM 中类富里酸、类芳香蛋白质吸附能力更强, 且对微生物活动起到一定的抑制作用。实验结果也表明, 随产流历时增加, 各处理后水体种的 DOM 物质组成并未发生变化。

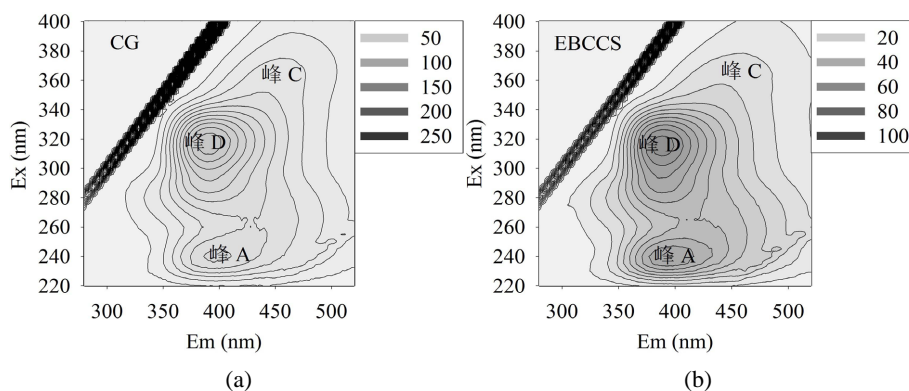


Figure 4. Three-dimensional fluorescence spectra of CG and EBCCS for removing (DOM) from rainwater runoff

图 4. CG 和 EBCCS 去除径流雨水 DOM 的三维荧光光谱

3.5. 装配式景观小品设计

随着装配式技术的应用逐渐从建筑行业拓展至景观行业[9], 具有设计“标准化”、构件“模块化”、加工“产品化”和施工“安装化”特色的装配式景观建造技术, 大量应用到城市景观营造领域。依照装配式室外景观产品的“标准化、泛用化、系统化、模块化、人性化、生态化”六项设计原则[10], 本研究设计了一种配备预制潜流式 EBCCS 有机物拦截系统的生态景观小品, 其中地上部分景观采用复合式榫卯拼装方式装配(见图 5), 生态砌块的四角设计成凸条, 底部形成与凸条呈卯榫配合的凹槽, 从而形成四面凹槽通孔的卯榫复合砌块整体, 砌块中的隔板在进一步吸附净化雨水的同时, 也起着蓄水功能。砌块的四面通孔可以任意调节附生攀援植物的生长方向, 既可以由多层平台构成垂直景观植物墙, 也可以采用同层错缝上下层压缝的方式拼接形成花格墙样式。地下部分利用模块化 EBCCS 系统对收集池中的径流雨水进行吸附净化后, 用循环泵提升至景观小品地上部分进行循环利用。

通过对城市微更新的概念、空间、内涵等相关研究的梳理, 结合城市公共空间的分类、功能、特性, 提出在街角原有绿地步道基础上, 围绕休憩交流和市政雨洪管理为核心的功能, 设计了包含雨水净化系统和绿化植物种植的多功能亭式景观小品(见图 6), 小品主体通过卯榫拼接和链接组合设计方式完成景观小品的装配, 具有可拆卸、移动性强的优点, 方块堆积方式也呈现多样化, 建筑单体样式丰富多样。亭顶采用覆盖高密度聚碳酸酯高透光率材料的桁架结构, 并且预留雨水渗漏孔, 既能提供休闲避雨座椅, 也可为绿化植物提供所需的光照和雨水, 保证结构稳定性的同时也美观实用。通过地上和地下部分水力循环, 使径流雨水沿特定的路线在景观小品内部流动, 可达到净化雨水径流、有效拦截有机质和颗粒污染物、辅助排水管网系统缓解城市雨洪压力的效果。

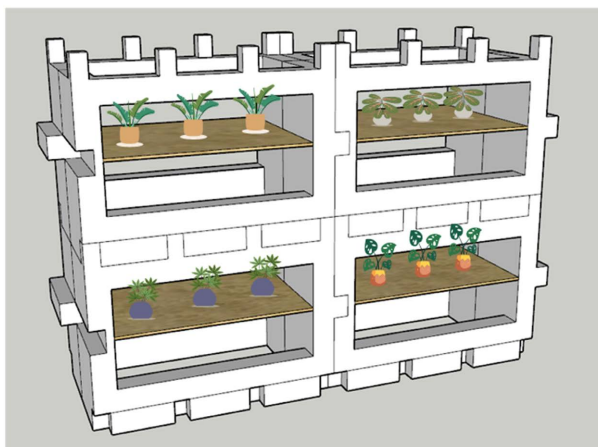


Figure 5. Schematic diagram of the mortise and tenon assembly structure of ecological blocks

图 5. 生态砌块卯榫装配结构示意图

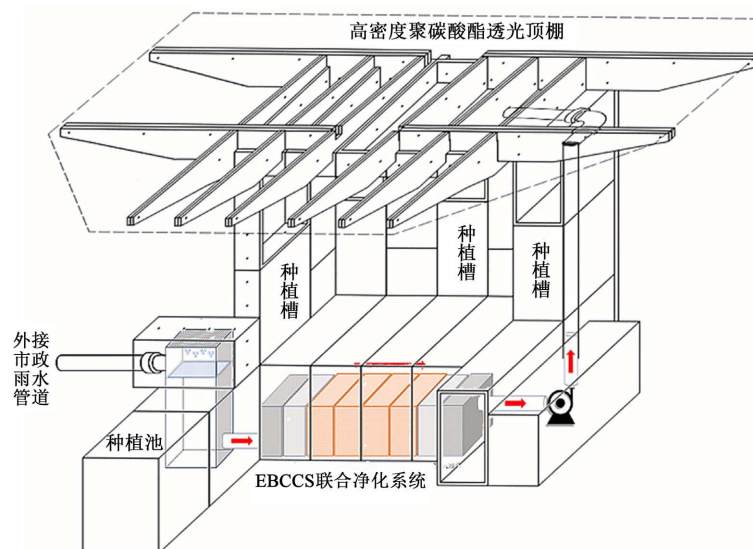


Figure 6. Overall structural design of prefabricated landscape ornaments

图 6. 装配式景观小品整体结构设计

4. 结论

本研究针对城市道路雨水径流污染物有效地拦截处理和循环利用的需求，采用煤基固废改性材料和 PRB 技术原理制备装配式植生型生态砌块，构建了生态砌块联合循环系统用于雨水径流的有机物去除，实现了城市雨水资源的生态化利用。研究表明：1) 通过正交试验法筛选出采用碱性改性、焙烧温度 550°C 、煤矸石 - 秸秆添加比为 7:2 时的共炭化生态砌块大孔吸附剂材料具有最优的水理性能、力学性能和 DOM 吸附能力；2) 设计了一种调蓄并循环利用雨水地表径流的生态景观小品 - 可渗透反应墙联合循环系统，并通过卯榫链接设计方式完成景观小品循环系统的装配，使雨水沿特定的路线流动，可达到净化雨水径流、有效拦截有机质和颗粒污染物、辅助排水管网系统缓解城市雨洪压力的效果，体现了雨水资源科学合理利用和提升景观设计项目的社会价值以及生态价值的双赢效果，为城市雨水资源系统化管理提供了有效对策。

基金项目

本文作者感谢陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-429, 2022JM-277)、陕西省教育厅重点科学研究计划智库内涵建设项目(23JT021)、陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202310703092)的资助。

参考文献

- [1] 王梦琦. 存量背景下的城市滨水空间的更新研究与设计——以亚泰公园为例[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [2] 张波, 于姗姗, 成亮, 廉政. 存量型控制性详细规划编制——以西安浐灞生态区 A 片区控制性详细规划为例[J]. 规划师, 2015, 31(5): 43-48.
- [3] 李俊奇, 车伍. 城市雨水问题与可持续发展对策[J]. 城市环境与城市生态, 2005, 18(4): 5-8.
- [4] Zhao, C., Wang, C.C., Li, J.Q., *et al.* (2015) Dissolved Organic Matter in Urban Stormwater Runoff at Three Typical Regions in Beijing: Chemical Composition, Structural Characterization and Sources Identification. *RSC Advances*, **90**, 73490-73500. <https://doi.org/10.1039/C5RA14993B>
- [5] Zhao, C., Wang, C.C., Li, J.Q., *et al.* (2016) Chemical Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Stormwater Runoff of a Typical Residential Area, Beijing. *Desalination and Water Treatment*, **57**, 19727-19740. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1106345>
- [6] Santos, P.S., Santos, E.B. and Duarte, A.C. (2012) First Spectroscopic Study on the Structural Features of Dissolved Organic Matter Isolated from Rainwater in Different Seasons. *Science of the Total Environment*, **426**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.023>
- [7] 赵晓丽, 毕二平. 水溶性有机质对土壤吸附有机污染物的影响[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 256-261.
- [8] Mcelmurry, S.P., Long, D.T. and Voice, T.C. (2013) Stormwater Dissolved Organic Matter: Influence of Land Cover and Environmental Factors. *Environmental Science & Technology*, **48**, 45-53. <https://doi.org/10.1021/es402664t>
- [9] 施惠. 装配式施工技术在园林工程中的应用[J]. 现代园艺, 2020, 43(18): 170-172.
- [10] 盛金龙, 刘环. 水泥基材料室外景观产品的装配式设计研究[J]. 城市建筑空间, 2023, 30(5): 47-49.