

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.020

# 热带珊瑚岛生物滞留设施构建方法及适宜性评价

赵志伟<sup>1,2</sup>, 李恒<sup>1</sup>, 李莉<sup>1</sup>, 沈力<sup>1</sup>, 李谕<sup>1</sup>, 胡小凤<sup>3</sup>,  
李芸邑<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 广东工业大学 土木与交通工程学院,  
广东 广州 510006; 3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

**摘要:** 生物滞留设施具有调控雨水径流量、改善径流水质、保障植物生长等优点,在淡水资源匮乏的热带珊瑚岛上具有良好的应用前景。为此,以珊瑚砂为基质,利用红土、草炭、椰糠、蛭石、生物炭作为混合填料,构建了7组不同结构的生物滞留设施,设计汇流面积比为1:10,当降雨强度为80 mm/h时,平均径流总量削减率为52.9%,当降雨强度为10~40 mm/h时,径流总量削减率达到100%,表明构建的生物滞留设施具有良好的径流削减能力。为了考察设施对雨水的滞留能力,研究了种植土层的含水率变化,结果显示,当种植土层为珊瑚砂掺混红土时,能够显著减缓种植土层含水率的下降速率( $0.000\ 9\sim0.008\ 0\ \text{h}^{-1}$ ),且随着深度的增加,含水率下降速率逐渐降低。将经济成本纳入评估体系,利用层次分析法进行比选,结果表明,种植土层为珊瑚砂掺混红土、填料层为珊瑚砂掺混蛭石的生物滞留设施综合得分最高,适宜在热带珊瑚岛应用。

**关键词:** 生物滞留设施; 珊瑚砂; 填料改良; 层次分析法

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0129-08

## Construction Method and Suitability Evaluation of Bioretention Facilities on Tropic Coral Islands

ZHAO Zhi-wei<sup>1,2</sup>, LI Heng<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, SHEN Li<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, HU Xiao-feng<sup>3</sup>,  
LI Yun-yi<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,

Guangzhou 510006, China; 3. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044,  
China)

**Abstract:** Bioretention facilities possess the merits of regulating rainwater runoff, enhancing runoff quality and guaranteeing plant growth, and exhibit a favorable application prospect on tropic coral islands where freshwater resources are scarce. In this paper, seven groups of bioretention facilities with diverse structures were constructed by utilizing coral sand as the matrix and laterite, peat, coconut bran, vermiculite, and biochar as the mixed packing media. The designed catchment area ratio was 1:10. When the rainfall intensity was 80 mm/h, the average total runoff reduction rate was 52.9%, and when the rainfall intensity was 10–40 mm/h, the total runoff reduction rate reached 100%, suggesting that the

基金项目: 国家重点研发计划项目(“海洋环境安全保障与岛礁可持续发展”重点专项 2021-01)

通信作者: 李莉 E-mail: freelini729@163.com

constructed bioretention facility possessed a superior runoff reduction capacity. To investigate the retention capacity of rainwater, the variation of moisture content in the planting soil layer was examined. When the planting soil layer consisted of coral sand mixed with laterite, the decrease rate of moisture content in the planting soil layer could be significantly slowed down ( $0.000\ 9\text{--}0.008\ 0\ \text{h}^{-1}$ ), and the decrease rate of moisture content gradually reduced with the increase of depth. The economic cost and other parameters were evaluated using the analytic hierarchy process (AHP). The bioretention facilities featuring the planting soil composed of coral sand mixed with laterite and the filling layer consisting of coral sand mixed with vermiculite obtained the highest comprehensive score, being suitable for application on tropic coral islands.

**Key words:** bioretention facility; coral sand; modification of packing medium; analytic hierarchy process

热带珊瑚岛孤悬海上,淡水资源匮乏,其淡水保障主要靠雨水收集、海水淡化、污水再生、船运水<sup>[1]</sup>。热带珊瑚岛属于海洋性季风气候,年降雨量约2 300 mm,多为短时强降雨,同时由于珊瑚砂的高孔隙度(45.9%)、高渗透性(1 012.8 mm/h)特点,大量雨水流经珊瑚砂后快速下渗,导致雨水资源流失。一方面珊瑚砂滞水、蓄水能力不足,另一方面热带珊瑚岛蒸发剧烈,使得土壤的含水率快速下降,导致植物无法在珊瑚岛上正常生长。若采用上覆红土的方式来改善植物的生长条件,由于红土与珊瑚砂渗透系数存在千倍级差异,容易导致红土横向迁移,存在面源污染的风险。因此,提高珊瑚岛雨水资源利用率、减缓珊瑚砂土壤含水率下降速率和控制面源污染对改善珊瑚岛生态具有实际意义。

生物滞留设施作为海绵城市建设的绿色技术设施之一,具有滞蓄雨水、控制雨水径流、净化径流水质、提高生物多样性、美化景观以及缓解城市热岛效应等优点<sup>[2-3]</sup>,与热带珊瑚岛的迫切需求相吻合。但是,一方面热带珊瑚岛与内陆地区气候有较大差异,降雨历时短、强度大,而且降雨时间分配不均,有明显的雨季和旱季,大约80%的降雨集中在7月—12月,特殊气候条件下传统生物滞留设施对雨水径流的削减及固体悬浮物(TSS)的控制作用有限。另一方面,传统生物滞留设施大多就地选取渗透性较好的天然土壤掺混石英砂作为基质材料<sup>[4-5]</sup>,而在热带珊瑚岛上就地选取珊瑚砂掺混石英砂作为基质材料,虽然具有良好的渗透性能,但是无法满足“滞”的要求。因此在热带珊瑚岛上,生物滞留设施采用传统的构建方式具有较大风险。对珊瑚

砂进行改良后用作生物滞留设施基质,是一种可行且具有前景的方法。

生物滞留设施以补充地下水为目标时常采用渗透型,以雨水收集利用为目标时则常采用非渗透型,而在热带珊瑚岛特殊土壤条件下需同时满足补充淡水和植物生长的要求。因此,相比之下,半渗透型生物滞留设施兼具上述功能,更适用于热带珊瑚岛。另外,传统生物滞留设施的评价指标体系着重于评价雨水径流的“量”和“质”<sup>[6-8]</sup>,但对于热带珊瑚岛的生物滞留设施而言,保证植物正常生长、减少生态用水是关键指标,因此引入了种植土层含水率的下降速率来考量生物滞留设施的适宜性。笔者以珊瑚砂为基质,采用红土、草炭、椰糠、蛭石、生物炭作为混合填料,构建了7组半渗透型生物滞留设施,系统性地探究了其在不同降雨条件下的水文效应、TSS去除率、减缓种植土层含水率下降速率等方面的性能;同时,综合考虑填料的成本,采用层次分析法,筛选适宜热带珊瑚岛的生物滞留设施,以期对热带珊瑚岛生物滞留设施的建设与应用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方案

试验用生物滞留设施的结构如图1所示。试验装置直径为200 mm,填料最大粒径为2 mm,装置直径与填料粒径之比不小于50,可忽略边壁效应的干扰。为了防止不同层填料的流失,在种植土层和填料层底部配备了透水土工布。生物滞留设施的装填方式采用了自上而下的湿填法,每填充3~4 cm用木槌压实。在试验前,清洗已填充完成的生物滞留

设施以确保其出水水质稳定。试验采用蠕动泵进水来模拟生物滞留设施的降雨条件。

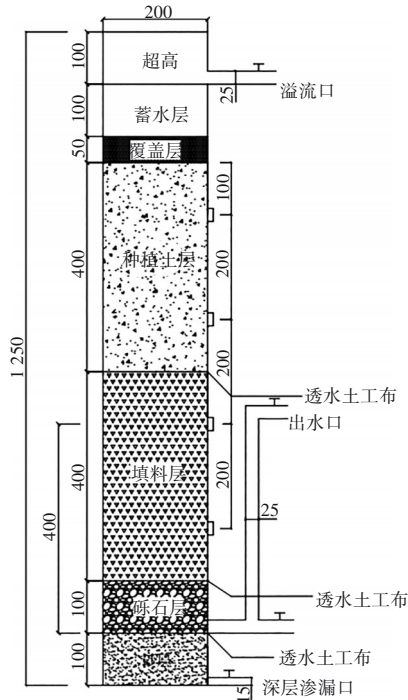


图1 生物滞留设施的结构

Tab.1 Structure of bioretention facility

综合考虑渗透性、持水性、TSS去除效果,分别选取红土和草炭为种植土层的改良填料,生物炭、蛭石、椰糠为填料层的改良填料。7组生物滞留设施的覆盖层均装填木麻黄凋落物,砾石层均装填砾石;装置A1~A3的种植土层均装填75%珊瑚砂+20%草炭+5%红土,填料层分别装填90%珊瑚砂+10%蛭石、90%珊瑚砂+10%生物炭、90%珊瑚砂+10%椰糠;装置B1~B3的种植土层均装填90%珊瑚砂+10%红土,填料层分别装填90%珊瑚砂+10%蛭石、90%珊瑚砂+10%生物炭、90%珊瑚砂+10%椰糠;装置C的种植土层和填料层均装填珊瑚砂。

为了考察不同降雨条件下生物滞留设施对径流和TSS的控制效果,根据热带珊瑚岛气象数据统计,将降雨强度设为10、40和80 mm/h,降雨历时设为0.5、1和1.5 h,前期干燥时间设为1、3、7和10 d。以降雨强度=40 mm/h、降雨历时=1 h、前期干燥时间=1 d为基准条件,设计单因素试验。

1.2 试验用水

生物滞留设施的进水流量:根据径流产流公式 $Q=\varphi qF$ 计算。其中,径流系数 $\varphi$ 取0.9;生物滞留设

施面积与汇水面积 $F$ 之比为1:10;设计暴雨强度 $q$ 根据降雨频率分析结果确定。生物滞留设施设计进水流量见表1。

表1 生物滞留设施的设计进水流量

Tab.1 Design inlet flow rate for bioretention facilities

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨场次	降雨频率/%	设施面积/cm <sup>2</sup>	汇流面积/cm <sup>2</sup>	设计进水流量/(L·h <sup>-1</sup> )
80	3	0.4	314	3 140	25.12
40	108	15.0	314	3 140	12.56
10	609	84.6	314	3 140	3.14

生物滞留设施的进水水质:据调研,热带珊瑚岛雨水径流中TSS的主要来源是红土,TSS浓度介于50~450 mg/L之间。因此,本研究采用粒径<1 mm的红土配制TSS浓度为250 mg/L的模拟雨水径流作为装置进水。

1.3 评价指标及检测方法

试验主要评价指标包括水文效应、种植土层含水率下降速率、TSS去除率。其中,水文效应指标包括径流总量削减率、径流峰值削减率、径流延迟时间、峰滞时间,采用时间和体积法每隔2 min测定出流流量、溢流流量并记录出流发生时间和溢流开始时间;种植土层含水率下降速率为降雨结束后24 h内种植土层含水率下降值与时间(24 h)的比值,种植土层含水率采用便携式含水率测试仪测定;TSS浓度采用重量法测定。

2 结果分析与讨论

以降雨强度、降雨历时和前期干燥时间为主要影响因素,研究不同生物滞留设施的水文效应、种植土层含水率下降速率、TSS去除效果的变化规律。其中,在不同降雨条件下,不同生物滞留设施通过物理拦截、化学吸附等作用均对TSS有较好的去除效果,去除率均在90%以上,因此本研究对TSS的控制不作探讨。

2.1 生物滞留设施水文效应的变化规律

2.1.1 降雨强度的影响

不同降雨强度条件下生物滞留设施的水文过程线如图2所示,水文效应计算结果见表2。当降雨强度为10和40 mm/h时,7组生物滞留设施均无溢流发生;而当降雨强度为80 mm/h时,7组生物滞留设施均出现了不同程度的溢流,平均径流总量削减率约为52.9%。溢流的产生表明雨水径流速率受

制于一定的降雨强度,在 10 和 40 mm/h 降雨强度下,雨水汇流速度较慢,小于或接近生物滞留设施

的入渗能力,使得雨水全部被生物滞留设施拦截,因此无溢流产生。

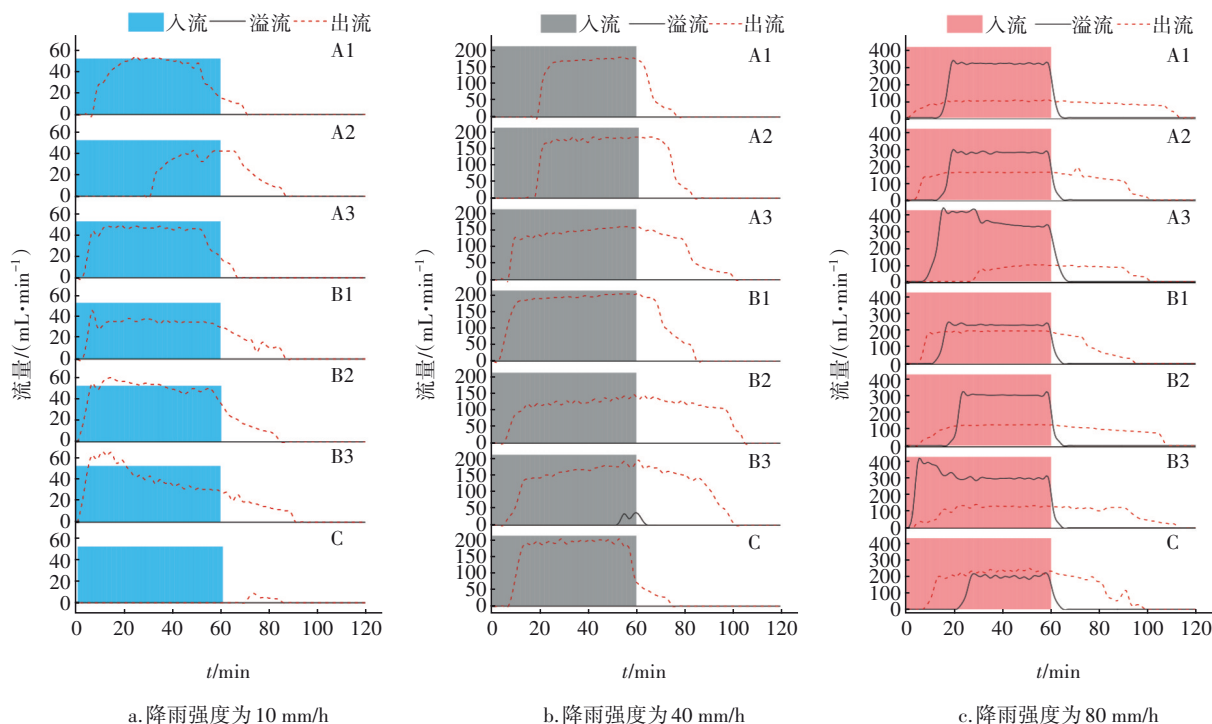


图2 不同降雨强度下的水文过程线

Tab.2 Hydrological process lines at different rainfall intensities

表2 降雨强度为 80 mm/h 时生物滞留设施的水文效应

Tab.2 Hydrological effect of bioretention facilities at rainfall intensity of 80 mm/h

项目	径流总量削减率/%	峰值流量削减率/%	径流延迟时间/min	峰滞时间/min
A1	46.6	22.0	18	18
A2	73.5	32.0	18	23
A3	30.5	0	13	27
B1	60.0	42.9	16	19
B2	55.0	28.3	23	27
B3	30.9	10.7	5	9
C	73.8	50.9	27	29

此外,填料层的性质也会影响生物滞留设施的性能。当以珊瑚砂掺混生物炭作为填料层时,在径流总量削减率、径流延迟时间、峰滞时间方面表现最佳,其次是珊瑚砂掺混蛭石,而珊瑚砂掺混椰糠的效果最差。分析原因,当填料层为珊瑚砂掺混生物炭时,体系孔隙度及饱和含水率最大,可以更有效地储存雨水,从而提高了径流削减率。因此,在高降雨强度下,珊瑚砂掺混生物炭或蛭石更适合作为填料层。在峰值流量削减率方面,珊瑚砂掺混蛭

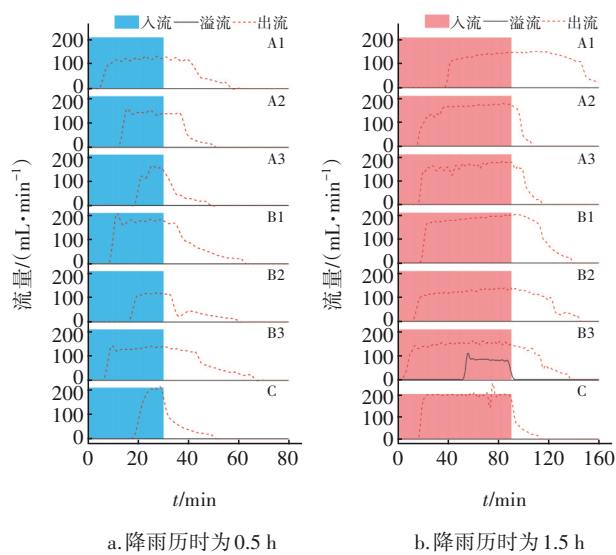
石表现最佳,这可能是因为珊瑚砂掺混蛭石与种植土层的渗透系数较为接近,使得雨水在入渗过程中更容易渗透到土壤中。而珊瑚砂掺混生物炭或椰糠的渗透系数高于种植土层,导致入渗过程受到填料层的影响。由于能量的不连续和孔隙连续性的影响,湿润锋到达界面后,水分不能连续向下运移,而在界面处积聚,从而导致峰值流量削减率降低<sup>[9]</sup>。

对于单个生物滞留设施而言,在降雨强度为 80 mm/h 条件下,除了纯珊瑚砂之外,装置 A2 和 B1 在削减径流总量和峰值流量方面表现出了优异的性能;而装置 B2 在径流延迟时间和峰滞时间方面表现出最佳效果。因此, A2、B1、B2 三个生物滞留设施对不同降雨强度下水文效应的控制效果较好。

### 2.1.2 降雨历时的影响

在不同降雨历时条件下,雨水进入生物滞留设施的过程与不同降雨强度时相似。图 3 展示了不同降雨历时条件下生物滞留设施的水文过程线,其中降雨历时为 1 h 的水文过程线同图 2(b)。在降雨历时为 0.5、1、1.5 h 的条件下,除了装置 B3 之外,其余 6 个装置均无溢流,而且装置 B3 的溢流量随着降雨

历时的增加而增加,这是由于降雨时间延长,生物滞留设施内部孔隙逐渐被充满,蓄水层的积水高度逐渐增加。当降雨历时为1.5 h时,装置B3的径流总量削减率为93%、峰值流量削减率为48%、峰滞时间为60 min。本研究设置的蓄水层高度为10 cm,对于装置B3,当降雨历时为0.5 h时,积水高度约为4.97 cm,表现为无溢流;当降雨历时为1和1.5 h时,分别经过56和54 min后积水高度超过蓄水层高度,表现为部分溢流,对应的溢流持续时间分别为4和36 min。



a. 降雨历时为0.5 h b. 降雨历时为1.5 h

图3 不同降雨历时下的水文过程线

Tab.3 Hydrological process lines at different rainfall durations

### 2.1.3 前期干燥时间的影响

在不同前期干燥时间下,雨水进入生物滞留设施的过程与不同降雨强度时相似。在前期干燥时间分别为1、3和7 d的情况下,除前期干燥时间为1 d时装置B3有溢流发生,其余情况下均未出现溢流,且出水口的出水量逐渐减少,如图4(a)所示。原因可能是随着干燥时间的增加,一方面蒸发持续发生,另一方面深层渗漏补充地下水的体积逐渐增加,导致生物滞留设施内部水分减少,种植土层土壤含水率下降,土壤吸水能力增强,雨水更容易渗透到土壤的孔隙中,从而降低了溢流发生的可能性。因此,在相同的降雨强度和降雨历时条件下,随着前期干燥时间的增加,A、B、C系列装置表现为均无溢流且出水口的出水量逐渐减少。

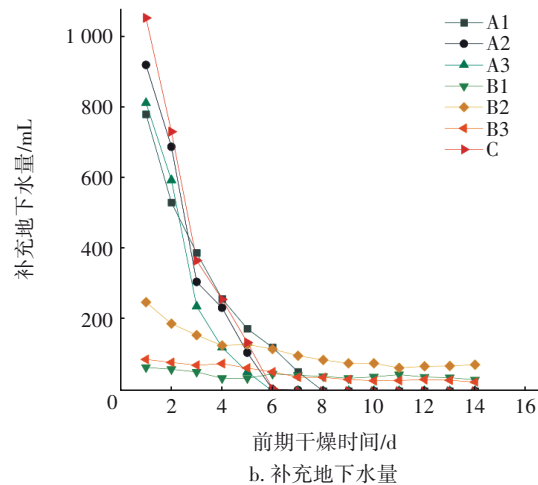
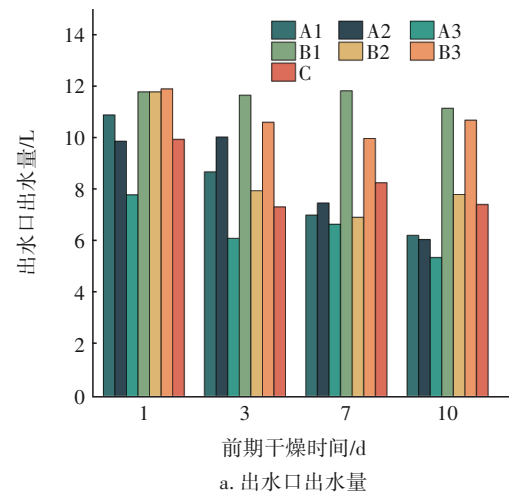


图4 不同前期干燥时间对出水口出水量和补充地下水量的影响

Tab.4 Effects of different pre-drying times on outflow volume and groundwater replenishment amount

此外,通过延长前期干燥时间,可以研究生物滞留设施内部储水区水分损失的速度。结果表明,随着前期干燥时间的延长,A、B、C系列生物滞留设施补充地下水的速率均呈现逐步减小的趋势,如图4(b)所示。这主要是因为随着深层渗漏的持续进行,内部储水区水位不断下降,势能逐渐减小,从而降低了渗漏速率。然而,A、C系列生物滞留设施在降雨结束后仍然表现出较快的地下水补充速率,约为800~1 000 mL/d,在降雨结束后的5~6 d内就完全消耗了内部储水区的水分。而B系列生物滞留设施在降雨结束后以较慢的速率补充地下水,约为60~300 mL/d,甚至在降雨结束后的14 d内仍可以20~70 mL/d的速率补充地下水,内部储水区的水分损失速度较慢。这一现象的发生可能是由于A、C系列

生物滞留设施较大的孔隙度,使其可与空气较好的连通,随着内部水分损耗,逐渐形成负压减缓水分的流失。而B系列生物滞留设施的孔隙度较小,与空气连通性较差,随着内部水分损耗,负压迅速增大,使得水分消耗速率远低于A、C系列。结果表明,在“滞”的作用方面,B系列生物滞留设施相比于A、C系列更为优越,在旱季时更有利于保障植物的生长,符合生态用水的要求。

## 2.2 种植土层含水率下降速率的影响规律

由于珊瑚砂渗透系数高、孔隙率高、持水性能差,无法满足植物正常生长的需求。因此,减缓土壤含水率下降速率成为雨水利用的另一个重要目标。在不同降雨条件下,研究了种植土层在10和30 cm深度处的土壤含水率下降速率的变化,以评估雨水滞用的效果。

### 2.2.1 降雨强度的影响

在不同降雨强度条件下,考察了种植土层在10和30 cm深度处的土壤含水率变化情况,结果如图5所示。

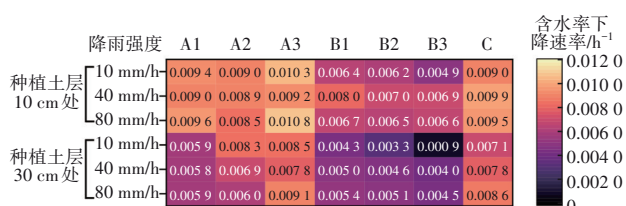


图5 不同降雨强度下种植土层含水率的下降速率

Tab.5 Decline rate of moisture content of planting soil layer at different rainfall intensities

在10 mm/h降雨强度下,B系列装置显著减缓了种植土层含水率的下降速率,装置B3在30 cm处含水率下降速率甚至降至0.000 9 h<sup>-1</sup>,比纯珊瑚砂降低了87%;A系列装置的含水率下降速率与C装置基本相当。在40 mm/h降雨强度下,C装置在10和30 cm处的含水率下降速率分别为0.009 9和0.007 8 h<sup>-1</sup>,而A系列装置分别为0.008 9~0.009 2和0.005 8~0.007 8 h<sup>-1</sup>。上述结果表明,与纯珊瑚砂相比,A系列装置对种植土层含水率下降速率的改善并不显著。推测原因可能是草炭颗粒较大,容易使土壤中的水分继续下渗或蒸发。相比之下,B系列装置能够较有效地改善珊瑚砂土壤的持水性,10和30 cm处土壤含水率下降速率分别减小到了0.006 9~0.008 0和0.004 0~0.005 0 h<sup>-1</sup>。这与珊瑚

砂掺混红土的田间持水量(29.9%)大于珊瑚砂掺混草炭和红土(28.8%)的结果吻合。当降雨强度为80 mm/h时,含水率下降速率所呈现的规律与降雨强度为40和10 mm/h时基本一致。

另外可以发现,同一装置在种植土层相同深度处的含水率下降速率差异较小,表明种植土层含水率下降速率与降雨强度的关系较小,其主要受到种植土层组分的影响。在生物滞留设施中,种植土层含水率下降速率与深度呈反比关系,随着深度的增加,种植土层含水率下降速率逐渐降低。

### 2.2.2 降雨历时的影响

在不同降雨历时条件下,种植土层含水率下降速率的变化规律与不同降雨强度条件下几乎一致,如图6所示。A系列装置中,在种植土层10 cm深度处的含水率下降速率为0.008 9~0.009 3 h<sup>-1</sup>,与装填纯珊瑚砂的C装置差别较小。而在B系列装置中,种植土层10 cm深度处的含水率下降速率为0.005 9~0.008 0 h<sup>-1</sup>,相对于A系列装置,其减缓含水率下降速率的效果更好。在种植土层30 cm深度处,趋势与10 cm深度处相似,但含水率下降速率略有降低。与不同降雨强度条件下类似,种植土层组分可能是影响含水率下降速率的主要因素。

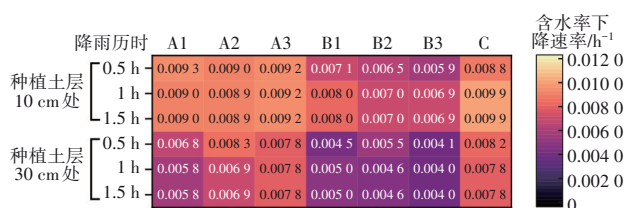


图6 不同降雨历时下种植土层含水率的下降速率

Tab.6 Decline rate of moisture content of planting soil layer at different rainfall durations

### 2.2.3 前期干燥时间的影响

在种植土层10 cm深度处,A、B、C系列装置均表现为延长前期干燥时间可减缓种植土层含水率的下降速率;而在30 cm深度处,延长前期干燥时间加快了种植土层含水率的下降速率,如图7所示。这可能是由于长时间的干燥使得土壤孔隙结构发生了变化,增强了种植土层的毛细作用,加速了种植土层深处的水向上补充,最终呈现为随着干燥时间的延长,上层种植土含水率下降速率降低、下层增加。除此之外,通过对比A、B、C系列装置对减缓种植土层含水率下降速率的影响,发现B系列装置

的减缓效果最为显著,且相比于前期干燥时间的贡献,种植土层组分的贡献度更高。

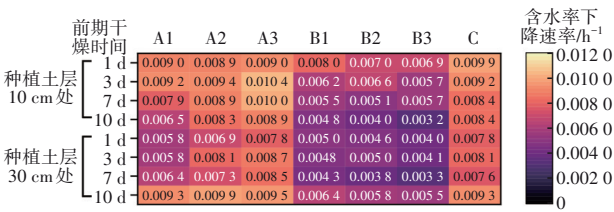


图7 在不同前期干燥时间下种植土层含水率的下降速率

Tab.7 Decline rate of moisture content of planting soil layer at different pre-drying times

3 基于层次分析法的生物滞留设施填料比选

3.1 建立层次结构模型

为筛选性能最优的种植土层和填料层填料,采用层次分析法对试验数据进行了分析决策。以径流总量控制率(P1)、径流延迟时间(P2)、峰值流量控制率(P3)、峰滞时间(P4)、TSS削减率(P5)、种植土层含水率下降速率(P6)和总成本(P7)为评价准则,建立了层次结构模型。而后,构建了两两比较判断矩阵,见表3。对两两比较判断矩阵进行了一致性检验,计算得到其最大特征值为7.272,CI值为0.045,RI值为1.341,CR值为0.034<0.1,判断矩阵的一致性可接受。采用特征值法计算各个评价准则的权重,计算最大特征值对应的特征向量,对求出的特征向量进行归一化,得到每个评价准则的权重,如表3所示。

表3 两两比较判断矩阵

Tab.3 Pairwise comparison judgment matrix

项目	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	权重
P1	1	2	2	2	1/3	1/5	2	0.104 94
P2	1/2	1	1	1	1/4	1/6	3	0.072 23
P3	1/2	1	1	1	1/4	1/6	3	0.072 23
P4	1/2	1	1	1	1/4	1/6	3	0.072 23
P5	3	4	4	4	1	1/2	4	0.239 88
P6	5	6	6	6	2	1	6	0.397 89
P7	1/2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1	0.040 61

3.2 评价指标值计算

取降雨强度为80 mm/h、降雨历时为1 h、前期干燥时间为1 d条件下的试验数据作为模拟场景,计算7组装置的评价指标值。对于总成本,按照草炭土为3.6元/L、红土为1.6元/kg、蛭石为16元/kg、生物炭为34元/kg、椰糠为1元/L计算,珊瑚砂的成本忽略不计。表4为标准化后的评价指标值。其

中,溢流比例、种植土层含水率下降速率和总成本与最终得分呈负相关,因此为了更好地利用层次分析法,将种植土层含水率下降速率转换为种植土层持水量,将总成本转换为剩余资金。

表4 标准化后的评价指标值

Tab.4 Standardized evaluation index values

项目	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C
P1	0.126	0.198	0.082	0.162	0.149	0.083	0.199
P2	0.118	0.171	0.000	0.230	0.151	0.057	0.272
P3	0.150	0.150	0.108	0.133	0.192	0.042	0.225
P4	0.118	0.151	0.178	0.125	0.178	0.059	0.191
P5	0.141	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
P6	0.153	0.136	0.135	0.172	0.143	0.159	0.102
P7	0.142	0.084	0.143	0.159	0.100	0.158	0.214

3.3 评价结果与分析

将标准化后的评价指标值与权重相乘,得到每个装置的最终评分,如表5所示。评分最高的是装置B1,为0.161;其次是装置C,评分为0.154;然后是装置B2、A2、A1、B3;评分最低的是装置A3。

表5 层次分析法评分结果

Tab.5 Scoring results of analytical hierarchy process

项目	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C
P1	0.013	0.021	0.009	0.017	0.016	0.009	0.021
P2	0.009	0.012	0.000	0.017	0.011	0.004	0.020
P3	0.011	0.011	0.008	0.010	0.014	0.003	0.016
P4	0.009	0.011	0.013	0.009	0.013	0.004	0.014
P5	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
P6	0.061	0.054	0.054	0.068	0.057	0.063	0.041
P7	0.006	0.003	0.006	0.006	0.004	0.006	0.009
总分	0.142	0.147	0.123	0.161	0.149	0.124	0.154

从综合评分来看,以珊瑚砂+红土作为种植土层、珊瑚砂+蛭石作为填料层的生物滞留设施性能最佳。表5的结果表明,除了装置A3和B3在雨水径流控制效果上有明显的劣势以外,其余装置的雨水径流控制效果基本持平;种植土层含水率下降速率成为衡量装置性能的决定性因素。值得注意的是,由于珊瑚砂本身具有较高的孔隙度和较大的渗透系数,且成本可以忽略不计,在评价准则P1~P7上的评分具有显著的优势,但由于其蒸发速度快,在含水率下降速率上获得了最低分。这说明改性土壤和填料均能有效改善生物滞留设施的持水性能,改良效果最好的是B系列设施。

#### 4 结论

① 对于种植土层而言,A、B系列生物滞留设施在径流总量削减率和径流延迟时间指标上表现相似。以峰值流量削减率为评价指标时,B系列为27.3%,明显高于A系列(约18.0%);对于填料层而言,珊瑚砂掺混生物炭,径流总量削减率、径流延迟时间、峰滞时间均为最佳,而珊瑚砂掺混蛭石的峰值流量削减率最大。

② 相比降雨条件的影响,种植土层含水率下降速率主要受制于种植土层的组成和深度。珊瑚砂掺混红土的种植土层能够显著减缓种植土层含水率的下降速率,且随着深度的增加,含水率下降速率减缓。

③ 综合考虑填料成本、雨水径流控制效果、TSS控制效果和种植土层含水率下降速率,通过层次分析法比选,确定了热带珊瑚岛上适宜的生物滞留设施配置:以珊瑚砂掺混红土为种植土层,以珊瑚砂掺混蛭石为填料层。

#### 参考文献:

- [1] 沈彤,赵志伟,李莉,等.珊瑚海岛淡水资源综合利用模式探讨[J].净水技术,2020,39(11):12-15.  
SHEN Tong, ZHAO Zhiwei, LI Li, *et al.* Discussion on comprehensive development and utilization mode of freshwater resources in coral islands [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (11): 12-15 (in Chinese).
- [2] 欧阳友,潘兴瑶,杨默远,等.生物滞留设施水文要素精细化监测与水量平衡分析[J].中国给水排水,2023,39(11):127-131.  
OUYANG You, PAN Xingyao, YANG Moyuan, *et al.* Refined monitoring of hydrological elements and analysis of water balance in bioretention facility[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 127-131 (in Chinese).
- [3] 张珊,李俊奇,李小静,等.生物滞留设施对城市雨水径流热污染的削减效应[J].中国给水排水,2021,37(3):116-120.  
ZHANG Shan, LI Junqi, LI Xiaojing, *et al.* Reduction effect of bioretention on urban stormwater runoff thermal pollution [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (3): 116-120 (in Chinese).
- [4] 杨飞凯.生物滞留池过滤层配合比及其水文效应的试验与模拟[D].南京:东南大学,2018.  
YANG Feikai. Experiment and Simulation on Composition of the Filter Media and Hydrologic Performance of Bioretention [D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese).
- [5] 朋四海,李田,黄俊杰.合肥地区生物滞留设施的合理构型和设计参数[J].中国给水排水,2014,30(17):145-149.  
PENG Sihai, LI Tian, HUANG Junjie. Reasonable configuration and design parameters of bioretention facilities in Hefei [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(17): 145-149 (in Chinese).
- [6] 张炜,王浩远,赵玉华,等.基于HYDRUS-1D生物滞留设施雨水径流水文调控模拟[J].水资源保护,2022,38(3):102-108.  
ZHANG Wei, WANG Haoyuan, ZHAO Yuhua, *et al.* Hydrological regulation simulation of rainwater runoff of bioretention based on HYDRUS-1D [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 102-108 (in Chinese).
- [7] MEHMOOD T, LU J, LIU C, *et al.* Organics removal and microbial interaction attributes of zeolite and ceramicsite assisted bioretention system in copper-contaminated stormwater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112654.
- [8] GU X Y, RODGERS T F M, SPRAAKMAN S, *et al.* Trace organic contaminant transfer and transformation in bioretention cells: a field tracer test with benzotriazole [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55 (18): 12281-12290.
- [9] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤中水分运动与溶质迁移[M].北京:中国水利水电出版社,2007:12-14.  
WANG Quanjiu, SHAO Ming'an, ZHENG Jiyong. Moisture Movement and Solute Transport in Soil [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007: 12-14 (in Chinese).

**作者简介:**赵志伟(1976—),男,吉林四平人,博士,教授,研究方向为水质安全保障技术、水处理功能纳米材料研发与应用、水污染控制技术。

**E-mail:**hit\_zzw@163.com

**收稿日期:**2023-11-10

**修回日期:**2024-03-20

(编辑:刘贵春)