

不同介质组成的粗放型绿色屋面降雨出流水质

李 田¹, 陈昱霖¹, 顾俊青²

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海绿世绿化工程有限公司, 上海 200010)

摘要: 构建 5 个绿色屋面中试设施, 考察不同介质组成的设施在实际降雨条件下出水水质状况并与降雨、沥青屋面径流、空白对照设施出水水质进行对比。结果表明, 常用屋顶绿化复合介质设施的出流中, TP, NH₄⁺-N 和 COD 的平均质量浓度分别达到 0.95, 1.66, 115 mg · L⁻¹, 高于沥青屋面径流和空白对照设施的出水水质, 使用无机复合介质和废弃物利用介质的设施出水水质优于对照屋面; 从出水污染物质量负荷角度分析, 使用上述 3 种类型介质的绿色屋面设施都不是 TN, TP, TSS 和 COD 的污染源, 并能够减少雨水带来的 NH₄⁺-N 负荷; 绿色屋面设施植被层生长状况和出水中营养物质浓度呈现相关性, 长势较好的设施出流中营养物质浓度较高; 介质中添加给水厂污泥能够有效控制介质层 P 的淋失且不影响植物生长。

关键词: 绿色屋面; 出流水质; 污染负荷; 介质层; 低影响开发

中图分类号: X52

文献标志码: A

Effluent Quality of Extensive Green Roofs with Different Substrates

LI Tian¹, CHEN Yulin¹, GU Junqing²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Green Roof Engineering Co. Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: Effluent qualities of pilot-scale green roof facilities with different substrate compositions were evaluated and compared with runoff qualities of an asphalt roofing, the blank control roof and rain water for total 20 rainfall events. The results show that the concentration of TP, NH₄⁺-N and COD in effluent of the facility using commercial green roof medium are 0.95, 1.66 and 115 mg · L⁻¹, respectively, which are higher than those of runoff from asphalt roofing and control facility effluent. The effluent quality of the experiment facility using light inorganic medium and the cheap medium made of brick scrap and sand are better than the effluent of control facility. Considering runoff volume reduction effect,

the pollution loads of different green roof facilities are not pollution source for every monitored pollutant compared with the load of asphalt roof and control facility, for NH₄⁺-N load the green roof facilities can even reduce the load of rain water. The aboveground biomass of green roof is positively related to the effluent quality, and the facility using commercial green roof medium presents a better growth status than those using media emphasizing effluent water quality. Application of water treatment residual as component of the medium, the leaching of P from commercial green roof medium is significantly reduced and the growth of vegetation is not affected.

Key words: extensive green roof; effluent quality; pollution load; substrate composition; low impact development (LID)

近年来,绿色屋面(green roof)技术在国内外受到广泛关注^[1-2]。除了景观意义和建筑节能作用,绿色屋面在城市雨水管理领域的应用效果成为近期研究的热点^[3-4]。对于人口密度高,土地资源紧缺的国内大中城市,绿色屋面技术能够利用不透水下垫面实现对降雨径流的源头控制,这对于推进城市雨水综合管理有着积极的意义^[5-6]。

绿色屋面可按照的绿化形式分为粗放型(extensive)和密集型(intensive)。粗放型绿色屋面不需要灌溉,养护成本低,便于大面积推广,适合应用于城市雨水管理。根据粗放型绿色屋面希望免维护,可建于现有屋面的特点,其栽培介质需要满足堆密度小、排水性能好、持水能力强,能够为植物生长提供基本营养的要求^[7-8]。目前常用介质材料主要以轻质无机材料为主,其中添加有机物质维持介质的土壤结构,为植物提供营养^[9]。现有的粗放型绿色屋面应用研究主要关注其水文控制效果,有关介质组成对设施出流水质的影响研究较少。已有的研究结果认为,绿色屋面介质层的营养物质易随出水流造成

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-001)

第一作者: 李 田(1956—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向城市雨水管理。E-mail: tianli@tongji.edu.cn

成污染^[10]. Morgan 等^[11]在美国的研究发现绿色屋面设施有明显的 N, P 淋失现象. Molineux 等^[12]发现利用废砖等回收材料作为介质的绿色屋面存在金属污染风险. 现有的有关绿色屋面出流水质的研究, 多以不同供应商提供的商业介质为实验材料, 通常不提供介质组成、配比的具体信息, 研究结果的普遍意义受到影响^[13-15].

为了考察介质层组成对粗放型绿色屋面出流水质的影响, 本文参考国内外绿色屋面设计标准, 设置不同介质层组成的实验设施, 考察出流水质的影响因素; 结合植物生长状况和出水污染物质量负荷, 评价不同介质组成的粗放型绿色屋面设施的径流水质控制效果, 以期对粗放型绿色屋面的应用提供依据.

1 材料与方法

1.1 模拟绿色屋面设施及对照屋面设计

模拟绿色屋面设施设置于同济大学校园内某建筑屋顶, 包括 5 个 1 m×2 m 的 PVC 盘和配套的角

钢支架, PVC 盘深 0.3 m, 倾斜坡度约 3°. 在模拟设施的低端, 介质层下方设有出水口, 出水口连接塑料管收集出水, 得到设施出流样品. 对照屋面选择模拟设施所在建筑的一块平顶沥青屋面 (asphalt roofing), 面积约为 200 m², 有独立的水落管.

1.2 模拟绿色屋面结构

模拟设施的结构由上至下为: 植被层、介质层、过滤层、排/蓄水层、PVC 底板. 种植层采用景天科垂盆草 (*sedum sarmentosum bunge*). 基质层参考德国 FFL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) 屋顶绿化指南对介质选择的要求^[16], 并结合长三角地区的绿化种植习惯与材料供应情况, 设置了不同介质组成与深度的 4 种对照 (表 1). 过滤层使用 50 g·m⁻² 的透水土工布, 防止介质层颗粒物随出水流失. 排水层使用厚度约为 3 cm 的塑料蓄水板. 表 1 中介质层使用的介质材料由上海绿世绿化工程公司提供. 相关介质中有机质材料的部分理化性质如表 2 所示.

表 1 模拟设施的介质组成及主要参数

Tab.1 Component of pilot-scale green roof substrates

介质编号	介质名称	介质层深度/cm	介质组成(体积分数)	堆密度/(kg·m ⁻³)
C1	屋顶绿化复合介质	10	田园土 45%+泥炭土 30%+蛭石 10%+珍珠岩 10%+醋糟 5%	831
C2	屋顶绿化复合介质	10	田园土 40%+泥炭土 30%+蛭石 10%+珍珠岩 10%+醋糟 5%+给水厂污泥 5%	826
I1	无机复合介质	10	火山岩 60%+轻质陶粒 20%+泥炭土 20%	679
B1	废弃物利用介质	10	碎砖 40%+分级砂 40%+泥炭土 20%	1 293
Ref	空白对照		无介质层及种植层(空白对照)	

表 2 含有机物介质材料的部分理化性质

Tab.2 Physic-chemical properties of the applied substrates

材料	有机质质量分数/%	堆密度/(g·cm ⁻³)	速效 P 质量比/(mg·kg ⁻¹)	碱解 N 质量比/(mg·kg ⁻¹)
田园土	1.58	1.40	199.02	113.06
醋糟	75.44	0.42	215.03	61.95
泥炭土	61.46	0.50	16.42	8.43

屋顶绿化复合介质在国内屋顶绿化建设中广泛使用, 介质中田园土的 N, P 含量符合《屋顶绿化规范》(DB11/T 281—2005) 的要求 (有效 P 质量比 $\geq 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N 质量比 $\geq 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 在 C2 设施中加入给水厂污泥以减少介质层 P 的淋失^[17]. 无机复合介质使用了火山岩和陶粒 (轻质材料), 具有堆密度小, 蓄水能力好的特点, 加入泥炭土以维持土壤结构. 废弃物利用介质使用了碎砖和分级砂作为主要成分, 意在减少成本, 使用泥炭土作为有机物质. Ref 为空白对照, 用以平行监测实验场地干湿沉降的污染负荷.

1.3 样品采集与分析

使用 5 L 的塑料量杯作为设施出流采样容器, 利用不锈钢盆作为雨水收集容器. 每场降雨之前采样容器用蒸馏水洗净并晾干, 降雨结束后收集样品. 设施出水水样在 24 h 内完成检测, 若有特殊情况不能及时检测, 样品储存于 4 °C 冰箱内, 储存时间不超过 48 h. 在设施所在屋面安装翻斗式雨量计 (SL3-1A) 采集降雨数据, 记录频率为 1 次·min⁻¹. 同时在设施出水口安装翻斗式雨量计, 经过面积换算, 获得每次降雨各设施的出流流量. 中试设施于 2013 年 10 月建成, 经过自来水淋洗, 设施出水污染物浓度基本稳定后采用无养护模式运行^[18], 不施加肥料, 不进行人工灌溉. 实验期间 (2014 年 3 月至 8 月), 共发生雨量大于 0.5 mm 的降雨事件 44 场, 其中 20 次绿色屋面设施发生出流. 对出流事件的设施出流、沥青屋面径流、降雨以及对照设施径流同步采样. 按照实际降雨情况, 等时间间隔进行采样, 将样品等体积混合

后获得每次出流过程的混合样. 所有绿色屋面设施没有发生表面漫溢现象.

水质监测指标包括金属离子, TSS, COD, TP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, COD 采用比色法测定 (HACH DRP2010); 金属离子采用电感耦合等离子质谱法测定 (Agilent 7700), 测定元素包括 Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Cd, Pb (检测限见表 3); 其余指标的分析按照《水和废水监测分析方法》(第 4 版) 的要求进行. 出流中有机质的组成特征采用三维荧光光谱仪分析 (Hitachi F4500)^[19].

表 3 金属元素指标检测限

Tab. 3 Limits of detection of monitored metals ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

金属元素	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cr	Cd	Pb
检测限/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.006	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.003	0.01

植物样品的采集是在各模拟屋面上随机选取 3 个点, 割取 100 cm^2 面积内植物的地上部分, 分别称重后取平均值 (鲜重), 计算地上部生长量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

利用 Tukey 法进行数据分析, 考察不同设施出水水质差异的显著性.

2 结果及讨论

2.1 监测降雨事件

20 次产生溢流的降雨事件中包括中雨 (10.0~24.9 mm) 10 场, 大雨 (25.0~49.9 mm) 6 场, 暴雨 ($\geq 50.0 \text{ mm}$) 4 场 (表 4). 一般情况下, 模拟绿色屋面设施在小雨 ($< 10.0 \text{ mm}$) 场景下不产生出流. 20 次产生出流的降雨事件包括了不同强度的降雨, 水质监测结果具有代表性.

2.2 监测对象的 N, P 及 COD 浓度

20 场发生出流的监测降雨事件不同类型水样的部分检测指标统计结果以四分位图表示 (图 1). 沥青屋面 (A, R) 径流的 TN 显著高于各绿色屋面设施出水及空白对照组, C1 出水与降雨 (R) 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均质量浓度 ($1.66, 1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于其他设施出流. C1 出水中 TP 平均质量浓度 ($1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 最高, 显著高于其他介质设施和沥青屋面; I1 和 B1 设施中出流 TP 的平均质量浓度与降雨、空白对照组接近, 低于沥青屋面径流. 所有设施出水中 COD 平均质量浓度高于对照组, 其中 C1 设施显著高于 I1 和 B1. 经过初期淋洗, 设施出水 COD 已经趋于稳定, 但是由于随着环境温度上升, 落干期内介质

层内发生生物反应, 导致有机物质缓释^[20], 造成出流中 COD 含量升高. 通过三维荧光分析, 确定出流中有机物主要为天然有机物腐殖酸. 环境温度、落干期、前次降雨量、当次降雨量都会影响设施出流中 COD 浓度^[21-22].

表 4 产流降雨事件的降雨特征

Tab. 4 Characteristics of investigated rain events

序号	日期	降雨历时/ min	前期无雨 时间/h	降雨量/ mm
1	2014-03-12	951	191	20.4
2	2014-03-29	689	20	13.8
3	2014-04-11	1 181	86	47.0
4	2014-04-19	1 146	40	18.0
5	2014-04-21	1 454	25	19.4
6	2014-04-25	2 452	87	50.8
7	2014-05-13	675	51	14.2
8	2014-05-19	1 579	18	17.7
9	2014-06-01	1 941	131	52.2
10	2014-06-21	1 228	88	49.0
11	2014-06-25	2 726	83	107.9
12	2014-07-01	1 640	26	22.3
13	2014-07-12	1 240	26	56.9
14	2014-07-15	518	44	81.3
15	2014-07-31	2 364	94	28.9
16	2014-08-17	959	40	22.4
17	2014-08-18	3 260	21	109.3
18	2014-08-24	759	31	34.0
19	2014-08-29	297	29	9.8
20	2014-08-31	1 096	51	89.2

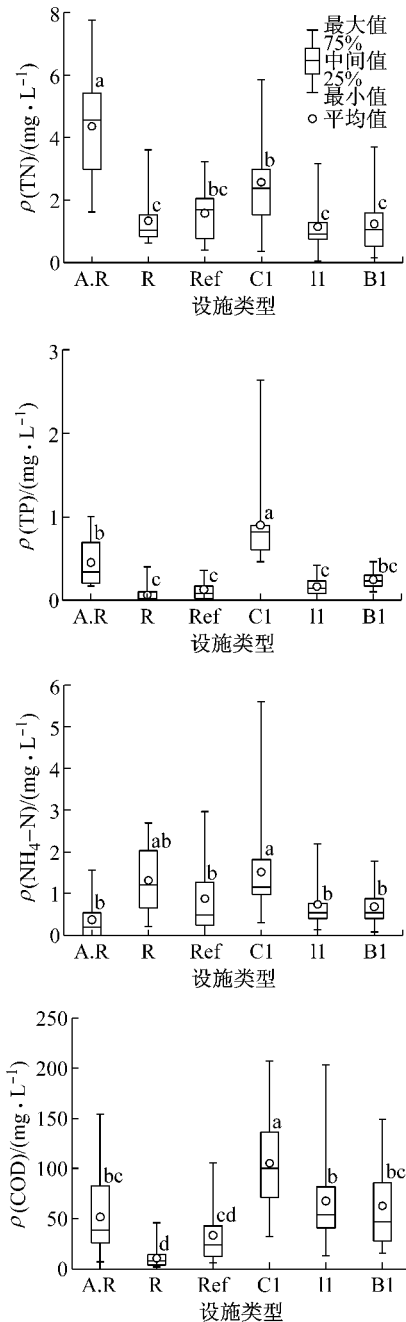
2.3 金属物质及 TSS 质量浓度

列入监测指标的 Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Cd, Pb 8 种金属元素中, 各绿色屋面设施出流中仅检测到 Zn, Fe, Mn, Pb. 图 2 表明, 各实验设施出流中 TSS 和金属元素平均质量浓度显著低于沥青屋面. 不同类型水样中金属元素质量浓度和 TSS 质量浓度呈现一定的正相关性^[23]. 绿色屋面设施不存在表面漫溢, 出水经过介质层以及土工布过滤有效减少了 TSS 质量浓度. 沥青屋面存在干沉降累积, 而且存在自身老化破损, 经过雨水冲刷后, 产生大量 TSS 进入屋面径流, 导致了金属元素质量浓度较高^[24].

2.4 植物生长状况与出流水质的关系

实验期间所有设施未进行人工灌溉. 至 2014 年 8 月, 3 种介质的设施的植被覆盖率均达到 90% 以上. 所有设施中, 垂盆草均直立, 无匍匐枝, 高度不超过 20 cm. 4 月至 7 月内每月测定一次植物地上生长量 (鲜重), 平均值见表 5. 分析 C1, I1, B1 设施植物地上部生物量和设施出流营养物质平均质量浓度, 发现两者呈现正相关性. C1 设施介质中有机质含量较高, 营养物质丰富, 保证了种植层的景观效果, 但

是设施出流中 TP 平均质量浓度接近 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度也高于雨水. I1 和 B1 设施出流水质营养物质浓度较低,除了不易降解的 COD 外,其他检测的水质指标均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水体标准,使用相应填料的绿色屋面不会引起受纳水体的面源污染.但是 I1, B1 设施的植物长势较差,介质层在第一年尚够支持植物正常生长,植物色泽基本正常.



注:图中标有不同小写字母者表示组间差异显著($P < 0.05$);标有相同小写字母者表示组间差异不显著($P > 0.05$).

图 1 各设施类型的 N, P 及 COD 质量浓度

Fig.1 Statistical concentrations of N, P and COD of evaluated water samples

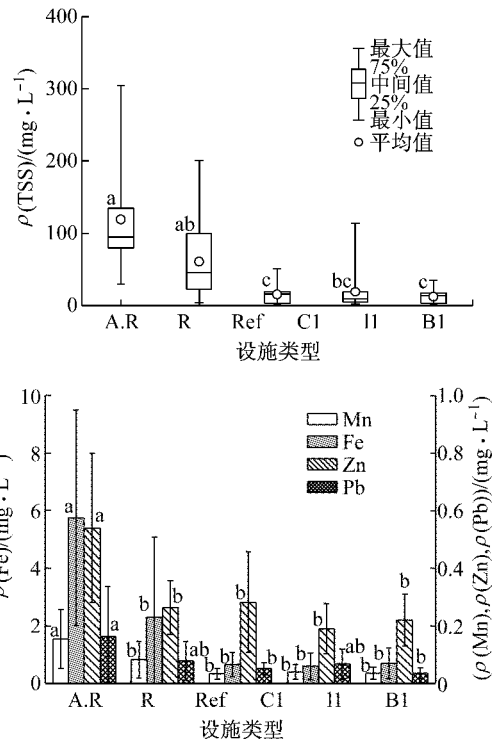


图 2 各设施类型出流中金属物质及 TSS 质量浓度

Fig.2 Statistical concentrations of metals and TSS of evaluated samples

C2 设施在 C1 介质中添加了给水厂污泥,有效降低了屋顶绿化介质的 P 淋失.添加给水厂污泥对出水 TP 削减超过 40%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 削减接近 60%.对比植被生长状况,未发现显著差异.给水厂污泥对 P 淋失的控制能力在生物滞留技术中已经应用^[25],而在绿色屋面介质中添加给水厂污泥同样能够有效减少出流中 P 含量,且不影响植物的正常生长.

表 5 设施植被地上部生物量与出流水质比较

Tab.5 Comparison of aboveground biomass and effluent quality of different facilities

介质	地上部生物量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	出流营养物质平均 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
		$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	TP
C1	4.03	1.66	2.81	0.28	0.95
C2	4.00	1.20	2.67	0.12	0.49
I1	2.46	1.11	1.26	0.02	0.17
B1	3.16	0.74	1.44	0.05	0.26

2.5 径流污染负荷控制效果

绿色屋面设施的污染负荷控制效果,需结合水质、水量控制效果综合评价.对每场发生出流的降雨,根据实测设施出流量(沥青屋面和对照设施的雨量径流系数,参照 GB50400—2006 取 0.9))与对应降雨事件污染物的平均质量浓度得到次降雨负荷,经求和得到各监测对象在研究期间污染物的质量负

荷(表 6)。绿色屋面设施具有滞留、削减水量的作用,在研究期间,C2,I1,B1 设施对降水量的平均削减率分别为 65.4%,68.8%,65.4%。C1 和 C2 设施水量削减率接近,C2 设施采用强化除 P 改良填料,水质优于 C1,故下文仅讨论 C2 设施的径流负荷控制效果。对比空白设施,C2,I1,B1 设施对 NH_4^+-N ,TN,TP,TSS,COD 负荷均有很好的削减作用,就 NH_4^+-N 而言甚至减少了雨水本身的负荷。相比沥青屋面,绿色屋面设施对营养物质质量负荷的削减效果更佳(NH_4^+-N 除外)。从质量负荷的角度出发,本文使用的 3 类粗放型绿色屋面设施均不是营养物质的污染源。

表 6 绿色屋面、沥青屋面、降雨及对照设施
主要污染物质量负荷

Tab.6 Pollution loads of green roofs, asphalt roofing, rain water and the reference

介质	质量负荷/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)				
	NH_4^+-N	TN	TP	TSS	COD
C2	0.38	0.61	0.12	2.64	22.50
I1	0.23	0.25	0.04	2.24	14.83
B1	0.16	0.30	0.07	2.60	14.48
A.R	0.30	3.23	0.51	62.53	39.77
R	0.99	1.15	0.06		
Ref	0.68	1.29	0.13	55.40	31.89

3 结论

(1)使用屋顶绿化复合介质的绿色屋面设施出流中,TP, NH_4^+-N 和 COD 的质量浓度高于对照屋面,平均质量浓度分别为 0.95,1.66,115 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;使用无机复合介质的设施出流水质良好,除 COD 外其他检测指标均符合地表水 IV 类水标准;使用废弃物利用介质的设施出流水质良好,无明显金属污染风险。

(2)以沥青屋面和对照屋面径流污染物的质量负荷为比较的基准,各绿色屋面设施都不是 TN,TP,TSS,COD 的污染源,各设施出水 NH_4^+-N 负荷甚至比降雨直接带来的负荷还要低。

(3)在着重控制出流污染负荷的介质组成设计条件下,各实验设施的植被保持存活并可维持较高的覆盖度。使用不同介质的设施植被层生长状况与设施出流营养物质浓度呈正相关性,使用屋顶绿化复合介质的设施出流中营养物质含量较高。介质中添加给水厂污泥能够有效抑制 P 的淋失现象,且不影响植物正常生长。

参考文献:

- [1] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(3): 217.
- [2] 魏艳, 赵慧恩. 我国屋顶绿化建设的发展研究——以德国、北京为例对比分析[J]. *林业科学*, 2007, 43(4): 95. WEI Yan, ZHAO Huien. Studies on the development of green roofs in China-contrast with Germany, Beijing [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 95.
- [3] Czerniel B J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351.
- [4] Dvorak, Bruce, Volder, *et al.* Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 197.
- [5] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 963.
- [6] Palla A, Gnecco I, Lanza L G. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1): 193.
- [7] Lin Y, L H. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(2): 345.
- [8] Alsop S, Ebbs S, Retzlaff W. The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates [J]. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(1): 91.
- [9] Nagase A, Nigel D. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 230.
- [10] Teemusk A, Mander U. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 271.
- [11] Morgan S, Celik S, Retzlaff W. Green roof storm-water runoff quantity and quality [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139(4): 471.
- [12] Molineux C J, Fentiman C H, Gange A C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1507.
- [13] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 369.
- [14] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2010(9): 1249. OUYANG Wei, WANG Wei, HAO Fanghua, *et al.* Pollution characterization of urban stormwater runoff on different underlying surface conditions [J]. *Chian Environmental*, 2010(9): 1249.
- [15] Vijayaraghavan K, Joshi U M, Balasubramanian R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 1337.

- [16] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. Richtlinie für die planung, ausführung und pflege von dachbegrünungen guidelines for planning execution and upkeep of Green roof sites) [D]. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. 2002.
- [17] Babatunde A O, Zhao Y Q. Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus adsorption from aqueous solution using waste alum sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1): 746.
- [18] 陈昱霖, 李田, 顾俊青. 粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35, 4157.
CHEN Yulin, LI Tian, GU Junqing. Influence of the substrate composition in the extensive green roof on the effluent quality [J]. *Environmental Science*, 2014, 35, 4157.
- [19] 廖日红, 战楠, 申颖洁, 等. 活性炭吸附受污染河水中有有机物的三维荧光分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(1): 92.
LIAO Rihong, ZHAN Nan, SHEN Yingjie, *et al.* Analysis of excitation-emission matrix fluorescence spectra of organic matters adsorbed by activated carbon in polluted river water [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1): 92.
- [20] 郑美芳, 邓云, 刘瑞芬, 等. 绿色屋顶屋面径流量水质影响实验研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2013, 47(10): 1846.
ZHENG Meifang, DENG Yun, LIU Ruifen *et al.* Influence of two green roofs on runoff quantity and quality[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(10): 1846.
- [21] Seidl M, Gromaire M, Saad M, *et al.* Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 195.
- [22] Bliss D J, Neufeld R D, Ries R J. Storm water runoff mitigation using a green roof[J]. *Environmental Engineering Science*, 2008, 26(2): 723525012.
- [23] 田鹏, 杨志峰, 李迎霞. 公路地表灰尘及径流中颗粒物附着重金属对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(6): 14.
TIAN Peng, YANG Zhifeng, LI Yingxia. Comparative study on heavy metals distribution on particles in road sediments and storm water runoff [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(6): 14.
- [24] 张科峰, 李贺, 傅大放, 等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 724.
ZHANG Kefeng, LI He, FU Dafang *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in runoff from three different types of roofs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4): 724.
- [25] O'Neill, Davis S W. Water treatment residual as a bioretention amendment for phosphorus. II: long-term column studies[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(3): 328.



(上接第 1721 页)

- [13] 尹海龙, 邱敏燕, 徐祖信. 一种基于微生物指示菌的雨水管网混接识别新方法[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(16): 39.
YIN Hailong, QIU Minyan, XU Zuxin. Investigation of inappropriate non-stormwater entries into storm drainage system based on microbial indicator [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(16): 39.
- [14] 孟莹莹, 李田, 王溯. 上海市分流制小区雨水管道混接污染源分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(6): 12.
MENG Yingying, LI Tian, WANG Su. Study on sources of illicit discharge to separate stormwater systems in residential districts in Shanghai[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(6): 12.
- [15] 孟莹莹, 冯沧, 李田, 等. 不同混接程度分流制雨水系统早流量及污染负荷来源研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3527.
MENG Yingying, FENG Cang, LI Tian, *et al.* Identifying dry-weather flow and pollution load sources of separate storm sewer systems with different degrees of illicit discharge[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12): 3527.
- [16] 吉庆丰. 蒙特卡罗方法及其在水力学中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
JI Qingfeng. Monte Carlo method and its application in hydraulics[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004.
- [17] 朱本仁. 蒙特卡罗方法引论[M]. 济南: 山东大学出版社, 1987.
ZHU Benren. An introduction to the Monte Carlo method[M]. Jinan: Shandong University Press, 1987.
- [18] Massoudieh A, Kayhanian M. Bayesian chemical mass balance method for surface water contaminant source apportionment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139: 250.
- [19] Xu Z X, Yin H L, Li H Z. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using a water balance approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 381.
- [20] 程云. 电子类工业企业水质特征因子分析与雨污混接诊断识别研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
CHENG Yun. Study on tracer parameters to identify electronic industry wastewater illicit discharge into storm drains [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.