

文章编号: 1000-582X(2012)05-137-06

两种植被屋面降雨期间调峰控污效能分析

王书敏^{1,2}, 何强¹, 孙兴福¹, 王振涛¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆文理学院 化学与环境工程学院, 重庆 402168)

摘要: 为了解植被屋面的调峰控污效能, 重新定义了植被屋面运行效能的评估标准, 根据《屋顶绿化设计规范》构建了 2 个植被屋面(麦冬屋顶和接骨草屋顶), 并进行了测试研究。结果表明, 麦冬屋顶可延缓降雨产流 25~48 min, 消减降雨径流 40%~58%, 而接骨草屋顶则可延缓降雨产流 60~130 min, 消减降雨径流 54%~80%。除磷酸盐外, 2 个植被屋面对亚硝酸盐、氨氮、总磷、COD、总氮和硝酸盐的污染负荷的消减率可分别达到 95.1%~98.6%、87.2%~93%、72.4%~83%、76%~81.8%、68.7%~78.4% 和 40.9%~60.6%。其中植被屋面径流的 pH、COD、氨氮和总磷浓度均达到地表水环境质量 III 类标准; 同时, 在中和酸沉降方面, 2 个植被屋顶具有相似的效能, 可将降雨的 pH 从 5.8~6.0 升高到 7.0~7.6。种植植物对植被屋面的运行效能有重要影响, 对于麦冬和接骨草来说, 麦冬有较强的磷污染控制能力, 而接骨草对氮污染控制能力较好。

关键词: 植被屋顶; 效能; 污染负荷; 控制

中图分类号: X143

文献标志码: A

Analysis on the effect of runoff retention and pollution load control for two vegetation roofs during rainfall events

WANG Shu-min^{1,2}, HE Qiang¹, SUN Xing-fu¹, WANG Zhen-tao¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Chemistry and Environment Engineering, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402168, P. R. China)

Abstract: In order to understand the effect of runoff retention and pollution load control for vegetation roofs during rainfall events, the evaluation criterion of vegetation roof performance is redefined and two vegetation roofs are established artificially based on the code for the design of roof greening, which is investigated during rainfall events. Results show that ophiopogon japonicus roof can delay the production of runoff by 25 - 48 min compared to the rain occurring and retention runoff volume by 40% - 58%, while sambucus dhinensis roof can make the generation of runoff 60 - 130 min later than the rain beginning and runoff volume retention can be as high as 54% - 80%. In addition to $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, the reduction of pollution load of $\text{NO}_2^- \text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, COD, TN and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ by both vegetation roofs can reach 95.1% - 98.6%, 87.2% - 93%, 72.4% - 83%, 76% - 81.8%, 68.7% - 78.4% and 40.9% - 60.6% respectively. The level of pH, COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in vegetation roofs runoff can meet class III surface water standard. Meanwhile, both vegetation roofs have similar effect in neutralization acid deposition (i. e., from 5.8 - 6.0 (in rain

收稿日期: 2011-12-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07315-001); 重庆市课题(CSTC, 2010BB1351; KJ111204)

作者简介: 王书敏(1980-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要研究领域为城市非点源污染监控。

何强(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) hq0980@126.com。

water) to 7.0 – 7.6 (in eco-roof runoff water)). Plants grown on vegetation roofs can influence the performance of vegetation roofs. Based on the results, ophiopogon japonicus has an advantage of sambucus chinensis in controlling phosphorus pollution, while sambucus chinensis manifests better in reducing nitrogen load. Vegetation roofs are becoming an important urban landscape more and more, and study results in this paper provide references for the improvement of vegetation roofs construction and more reasonable evaluation of their running performance.

Key words: eco-roof; effect; pollution load; control

快速城市化造成了城市不透水面积的迅速增加,由此引起的城市水生生态系统恶化已引起广泛关注^[1-2]。为改善城市水环境质量,需要提高城市区域透水地面的比重。然而,高昂的土地价格使得在城市区域构建绿地成本过高,因此,占城市不透水面积 40%~50%的城市硬屋面成了增加城市绿地的经济选择^[3]。

国内的很多城市(北京、上海等)正积极推广植被屋顶,但构建植被屋顶的目的往往偏重其景观价值^[4-5],而忽略了植被屋顶控制城市硬屋面产污负荷的功能。城市不透水屋面的暴雨径流污染是城市面源污染的重要来源,植被屋顶常被假设为降低城市屋面产污负荷的有效手段^[4],然而,植被屋顶设计标准并未涉及产流水质问题,植被屋顶是否有助于降低城市不透水屋面的产污负荷也很少给予关注。一些学者认为如果雨水水质优于植被屋顶出水,则植被屋顶为污染物释放源,但这种判断方式没有考虑植被屋顶对径流的消减,也未涉及城市不透水屋面的产污背景^[5]。因此,在植被屋顶加速建设之际,综合考虑屋顶径流的水文特性和水质特性,寻求合理的评价模式,及时明确城市不透水屋面生态化改造的产污响应很有必要。

1 材料与方法

1.1 植被屋顶构建

2 块植被屋顶均建于 2009 年 5 月,位于重庆大学给排水实验楼顶部,构建方法参考了《屋顶绿化设计规范》(DB440300/T 37—2009),构建面积均为 4 m² (2 m×2 m),由下往上有以下几层组成:石子排水层(100 mm),砂滤层(100 mm),土工布层以及砂土层(100 mm)。重点考察按照目前的方法设计的植被屋顶的运行效能。对照屋顶为 18 m² 的混凝土屋面。植被屋顶的植被一块为人工种植的麦冬,自植被屋顶建成起长势良好;另一块最初铺设人工草皮,由于 2009 年夏季的高温干旱,逐渐枯萎,后为自然生长的接骨草代替。每一个屋顶均通过 U-PVC 管与采样容器相连,使降雨产流全部收集在容器中。

每场降雨之前,屋面径流采样容器均用自来水和蒸馏水冲洗干净,并盖好盖子。雨水采集容器为浸泡在盐酸溶液中的大烧杯,使用之前用自来水和蒸馏水冲洗干净,并倒置于桌面干燥。

1.2 分析方法

在 2010 年 4 月到 2010 年 6 月期间,监测了 4 场暴雨,降雨雨情见表 1,降雨量的测试由安装在楼顶的自动雨量计监测(3554WD, USA)。屋顶径流量的历时变化测试由安装在 U-PVC 管道上的饮用水表(LYH-8, 宁波)监测,并人工读数。所有水样的测试指标包括 pH、COD、TP、PO₄³⁻-P、TN、NO₃⁻-N、NH₃-N、NO₂⁻-N 和电导率。pH 和电导率分别用 pH 计(HQ11, HACH, USA)和电导率仪(FE30K, China)测试,其余指标的测试方法均按照《水和废水监测分析方法(第四版)》的要求执行^[6]。

表 1 4 场降雨雨情

日期	降雨量 /mm	平均雨强 /(mm·h ⁻¹)	前期 干旱 时间/d	气温 /°C	降雨持 续时间 /min
2010-04-20	12.1	8.07	4	13~18	100
2010-05-05	9.8	3.92	1	21~31	150
2010-06-19	26.4	3.77	6	23~28	420
2010-06-23	17.7	4.16	3	22~29	255

1.3 污染负荷消减率计算方法

传统的判断植被屋顶的构建是否有利于改善城市水环境质量的依据是降雨和植被屋顶径流之间的水质水量关系^[5,7],忽略了城市不透水屋面径流,因此,量化城市硬屋面生态化改造前后的产污负荷更有意义。基于这种思路,提出污染负荷消减率的计算方法,见下式。

污染负荷消减率 =

$$\frac{\text{不透水屋面产污负荷} - \text{生态屋面产污负荷}}{\text{不透水屋面产污负荷}}, \quad (1)$$

式中:污染负荷消减率,%;不透水屋面产污负荷,mg/m²;生态屋面产污负荷,mg/m²。

2 结果与讨论

2.1 植被屋顶水文特性

在2010年4月到5月期间监测了植被屋顶在2场暴雨中的产流情况,如图1、2所示,场次降雨中以降雨开始时刻记为零时刻。

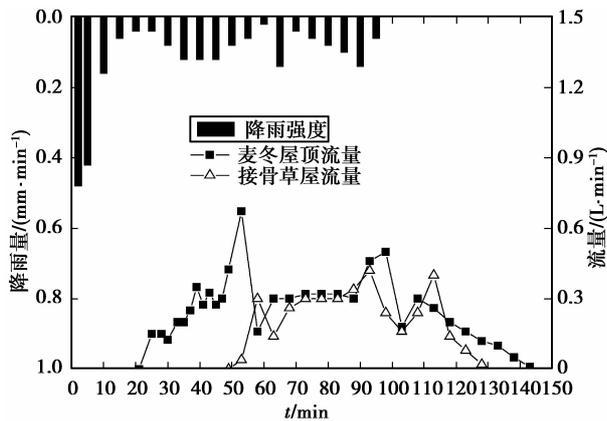


图1 生态屋面径流曲线(2010-04-20)

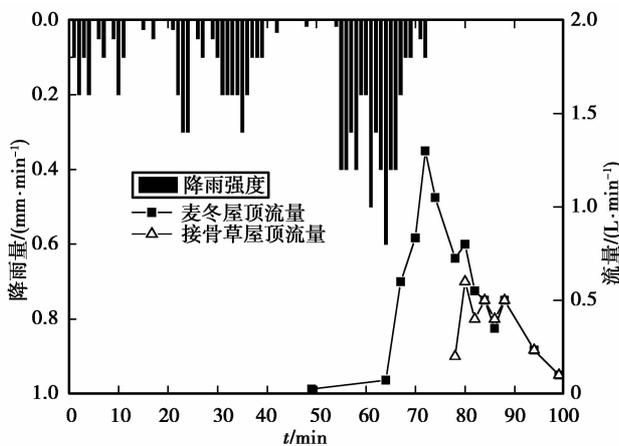


图2 生态屋面径流曲线(2010-05-05)

2场暴雨事件中,麦冬屋顶产流时间分别比降雨时间滞后26、40 min,径流结束时间比降雨结束时间分别延后48、25 min,径流截留量分别达到4.3、4.7 mm(径流截留率40%和49%)。而接骨草屋顶产流时间要分别滞后60、130 min,径流结束时间分别延后32、25 min,径流截留量分别达到7.5、7.9 mm(径流截留率62%和80%)。2场降雨过程中(2010-04-20和2010-05-05),接骨草屋面的产流时间均滞后于麦冬屋面,而径流结束时间则超前于麦冬屋面,径流截留率也是接骨草屋面高于麦冬屋面,说明接骨草对径流的截留效果更好。2010-04-20降雨的前期干旱期(4 d)大于2010-05-05降雨的前期干旱期(1 d),然而,2个植被屋面各自的产流时间均是2010-05-05/的产流开始时间滞后于降雨开始的时间较长,且径流截留率高,说明相对于前期干旱期来说,气温差异对于径流控制效果具有更高的敏感性。植被屋面的构建可有效分散降雨径流,延缓径流峰值的产生时间,减少径流量,这对日趋严峻的城市防洪问题有重要意义。2个植被屋顶在两场暴雨中的表现差异也说明了植被屋顶产流特性的复杂性,种植植物、降雨强度、降雨雨型分布、土壤含水率等因素都会影响径流曲线。因此,植被屋顶的径流特性,尤其是径流消减率的精确值,很难在不同研究之间比较^[7]。Villarreal等^[8]发现,在干旱条件下,需要6~12 mm的降雨量才能使植被屋顶产流;而Hiltner等^[9]发现介质厚度10 cm的模块化植被屋顶可以完全截留2 cm的降雨,降雨量在5~7.93 cm时,径流时间可达到12 h,这与本研究发现的平均截留量4.5、7.7 mm不同。Berndtsson^[7]总结了不同研究条件下的研究结果(表2),发现平均径流消减率的范围从45%到78%之间不等,而径流消减率的波动范围则可以小至5%,也可以大至100%。本次试验中,2个植被屋顶的径流消减率在此波动范围内。

表2 绿色屋顶对降雨径流的消减率^[7]

参考文献	屋面构造形式	平均降雨径流消减率/%	降雨径流消减率范围/%
[10]	土层厚度 30 mm	46.0	—
[11]	排水层 1.5 cm,土工布 0.75 cm,土层 2.5 cm	82.8	—
[12]	排水层 1.2 cm,聚丙烯透水层 0.75 cm,土层 8.9 cm	45.0	19~98

2.2 屋顶径流的产污负荷研究

在 2010-06-19 和 2010-06-23 监测的 2 场暴雨中,分别测试了 3 种屋面径流的体积和各污染物浓度,并计算了 2 场降雨 3 种屋面的平均径流消

减率和污染负荷消减率,结果见表 3。由表 3 可知,混凝土屋面对降雨径流的平均消减率仅 9.25%,而植被屋顶对降雨径流的平均消减率达 54%~58%,城市硬屋面生态化改造后径流消减效果明显。

表 3 2 场降雨的平均污染负荷消减率

污染指标	水样	径流体积/mm	平均径流 消减率/%	平均浓度 /(mg·L ⁻¹)	污染负荷 /(mg·m ⁻²)	污染负荷 消减率/%
TN	降雨	44.1	—	1.70±0.23	75.00	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	2.39±0.25	42.00	68.7
	接骨草屋顶	20.4	54.00	1.40±0.09	29.00	78.4
	混凝土屋顶	39.9	9.25	3.35±0.09	134.00	—
NO ₃ ⁻ -N	降雨	44.1	—	0.18±0.05	7.94	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	1.46±0.51	25.70	40.9
	接骨草屋顶	20.4	54.00	0.84±0.33	17.14	60.6
	混凝土屋顶	39.9	9.25	1.09±0.21	43.49	—
NO ₂ ⁻ -N	降雨	44.1	—	0.020	0.88	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	0.002	0.04	98.6
	接骨草屋顶	20.4	54.00	0.007	0.14	95.1
	混凝土屋顶	39.9	9.25	0.071	2.83	—
NH ₃ -N	降雨	44.1	—	1.48±0.09	65.27	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	0.07±0.06	1.23	93.0
	接骨草屋顶	20.4	54.00	0.11±0.04	2.24	87.2
	混凝土屋顶	39.9	9.25	0.44±0.17	17.56	—
TP	降雨	44.1	—	0.04±0.02	1.76	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	0.05±0.006	0.88	83.0
	接骨草屋顶	20.4	54.00	0.07±0.002	1.43	72.4
	混凝土屋顶	39.9	9.25	0.13±0.04	5.19	—
PO ₄ ³⁻ -P	降雨	44.1	—	0.03±0.016	1.32	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	0.02±0.003	0.35	56.3
	接骨草屋顶	20.4	54.00	0.06±0.019	1.22	—52.5
	混凝土屋顶	39.9	9.25	0.02±0.01	0.80	—
COD	降雨	44.1	—	11	485.00	—
	麦冬屋顶	17.6	58.00	14±1	246.00	81.8
	接骨草屋顶	20.4	54.00	16±2	326.00	76.0
	混凝土屋顶	39.9	9.25	34±4	1357.00	—

2.2.1 氮

混凝土屋面径流的总氮平均浓度达 3.3 mg/L,远高于雨水(1.7 mg/L)和 2 个生态屋面(1.4~2.4 mg/L)的总氮浓度,但都超出了地表水Ⅲ类水质标

准(1.0 mg/L)。由于 2 个生态屋面所处的环境背景相同,因此,总氮浓度的不同取决于生态屋面的植物种类,相对于麦冬来说,接骨草具有更好的氮控制

能力。综合考虑 3 种屋面的径流量和总氮浓度,混凝土屋面的总氮产污负荷高达 134 mg/m^2 ,而麦冬屋顶和接骨草屋面的总氮污染负荷仅为 $42, 29 \text{ mg/m}^2$,对混凝土屋面的总氮污染负荷消减率达 68.7% 和 78.4% (见表 3)。

麦冬屋顶和接骨草屋顶的硝酸盐平均浓度分别达到了 $1.46, 0.84 \text{ mg/L}$,高于降雨水样的硝酸盐平均浓度(0.18 mg/L),混凝土屋面的硝酸盐浓度也达到了 1.09 mg/L ,介于麦冬屋顶和接骨草屋顶之间。植被屋顶构建介质溶解性营养盐的释放是造成其出水中硝酸盐浓度升高的主要原因,从本研究结果看,恰当植物的选择是控制植被屋顶出水硝酸盐浓度的重要手段,接骨草比麦冬有更好的硝酸盐控制能力。由于植被屋顶对径流的高截留率,麦冬屋顶和接骨草屋顶对混凝土屋顶硝酸盐污染负荷的消减率可分别达到 40.9% 和 60.6% 。

雨水中的氨氮平均浓度高达 1.48 mg/L ,超出地表水环境质量 IV 类标准,而混凝土屋顶径流的氨氮平均浓度为 0.44 mg/L ,小于地表水环境质量 III 类标准。Berndtsson 等^[5]监测了瑞典和日本地区的雨水水质,氨氮平均浓度为 1.1 mg/L ,比本研究结果稍小,这与监测地点的环境背景有关。2 个植被屋顶径流的氨氮平均浓度($0.07 \sim 0.1 \text{ mg/L}$)显著小于雨水中的氨氮浓度,Dietz 等^[13]也发现了植被屋顶强大的氨氮去除能力,Berndtsson 等^[5]把这种现象归于无机氮向有机氮的转化。由于植被屋顶植物吸收、微生物转化等因素的影响,植被屋顶出水的亚硝酸盐浓度仅有 $0.002 \sim 0.007 \text{ mg/L}$,而雨水和混凝土屋面径流中的亚硝酸盐平均浓度则分别为 $0.02, 0.07 \text{ mg/L}$ 。植被屋顶对混凝土屋面氨氮和亚硝酸盐的产污负荷的消减率可分别达到 $87.2\% \sim 93\%$ 和 $95.1\% \sim 98.6\%$ 。

2.2.2 磷

由于大气沉降、降雨冲刷等因素的影响,混凝土屋面径流的总磷平均浓度为 0.13 mg/L ,高于雨水中的总磷平均浓度(0.04 mg/L),但仍达到了地表水环境质量 III 类标准(0.2 mg/L)。麦冬屋顶出水总磷平均浓度为 0.05 mg/L ,稍低于接骨草屋顶(0.07 mg/L),相对于雨水来说,植被屋顶介质中有磷释放出来。由于混凝土屋面径流截留量低,总磷产污负荷达 5.19 mg/m^2 ,而生态屋面仅有 $0.88 \sim 1.43 \text{ mg/m}^2$,生态屋面对混凝土屋面总磷污染负荷的消减率高达 $72.4\% \sim 83\%$,麦冬控制总磷的能力要好于接骨草。

接骨草屋顶出水的磷酸根平均浓度(0.06 mg/L)

是麦冬屋顶和混凝土屋顶径流浓度的 3 倍,溶解性磷酸盐占接骨草屋顶径流中总磷浓度的 86% ,而麦冬屋面的溶解性磷酸盐仅占总磷浓度的 40% 。一些研究发现植被屋顶径流中的总磷大多数为磷酸盐^[14],而也有学者发现溶解性磷酸盐比总磷浓度小得多^[15],研究结果存在差异的原因可能是由于影响植被屋顶径流水质的因素众多的原因。与其他污染指标的产污负荷规律相反,接骨草屋面磷酸盐产污负荷达到了 1.22 mg/m^2 ,高于混凝土屋面的产污负荷(0.80 mg/m^2),而麦冬屋面仍然表现出了良好的磷酸盐控制能力,其对磷酸盐污染负荷的消减率达到了 56.3% ,种植植物的选择对生态屋面的运行效能影响显著。

2.2.3 有机物

本研究中,用 COD 浓度代表水样中的有机物浓度,研究表明,植被屋顶 COD 浓度接近($14 \sim 16 \text{ mg/L}$),达到地表水环境质量 III 类标准(20 mg/L)。然而,混凝土屋面径流的 COD 浓度达 34 mg/L ,COD 污染负荷达 1357 mg/m^2 ,而生态屋面的 COD 产污负荷仅 $246 \sim 326 \text{ mg/m}^2$,消减率达 $76\% \sim 81.8\%$ 。

2.2.4 pH 和电导率

雨水 pH 显偏酸性($5.8 \sim 6.0$),而生态屋面出水的 pH 可升高到 $7.0 \sim 7.6$,表明生态屋面有良好的中和能力^[16],这对于减轻自然水体酸化、减缓建筑物侵蚀以及钝化有毒物质有重要意义。溶液中的电导率水平反映了溶解性离子浓度的大小,由于生态屋面构建介质中某些溶解性物质的释放,导致其出水的电导率升高到 $424 \sim 457 \mu\text{s/cm}$,约是雨水电导率水平的 $10 \sim 11$ 倍。

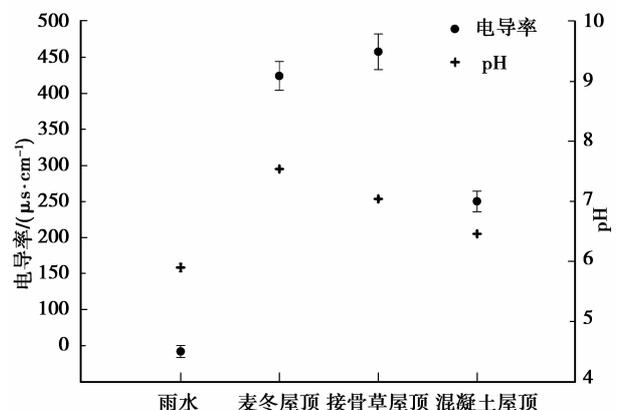


图 3 各水样的电导率和 pH

3 结 语

1)城市不透水屋面的生态化改造是分散降雨径流、延缓径流峰值的产生时间,以及减少径流产量的有效手段。麦冬屋顶可延缓降雨产流 25~48 min,消减降雨径流 40%~58%,而接骨草屋顶则可延缓降雨产流 60~130 min,消减降雨径流 54%~80%。

2)根据重新定义的植被屋顶运行效能的判别标准,除磷酸盐外,2个植被屋顶对亚硝酸盐、氨氮、总磷、COD、总氮和硝酸盐的污染负荷的消减率可分别达到 95.1%~98.6%,87.2%~93%,72.4%~83%,76%~81.8%,68.7%~78.4%和 40.9%~60.6%。其中植被屋顶径流的 pH、COD、氨氮和总磷浓度均达到地表水环境质量Ⅲ类标准。

3)种植植物种类对植被屋顶的运行效能影响显著,对与麦冬和接骨草来说,麦冬有较强的磷污染控制能力,而接骨草对氮污染控制能力较好。由于影响植被屋顶效能的因素很多,不同环境条件下植被屋顶的表现性能仍需深入研究。

参考文献:

- [1] WANG L Z, LYONS J, KANEHL P. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales[J]. *Environmental Management*, 2001, 28(2): 255-266.
- [2] MILTNER R J, WHITE D, YODER C. The biotic integrity of streams in urban and suburbanizing landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(1): 87-100.
- [3] 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): 217-226.
- [4] CARTER T, JACKSON C R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1/2): 84-94.
- [5] BERNDTSSON J C, BENGTTSSON L, JINNO K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 369-380.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 中国环境科学出版社. 北京:2002.
- [7] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.
- [8] VILLARREAL E L, BENGTTSSON L. Response of a Sedum green-roof to individual rain events [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(1): 1-7.
- [9] HILTEN R N, LAWRENCE T M, TOLLNER E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(3/4): 288-293.
- [10] BENGTTSSON L, GRAHN L, OLSSON J. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden[J]. *Nordic Hydrology*, 2005, 36(3): 259-268.
- [11] VANWOERT N D, ROWE D B, ANDRESEN J A, et al. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [12] DENARDO J C, JARRETT A R, MANBECK H B, et al. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(4): 1491-1496.
- [13] DIETZ M E, CLAUSEN J C. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2005, 167(1/4): 123-138.
- [14] BERNDTSSON J C, EMILSSON T, BENGTTSSON L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff quality[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 355(1/3): 48-63.
- [15] TEEMUSK A, MANDER ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a green roof: the effects of short-term events [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3):271-277.

(编辑 郑 洁)