

不同绿化屋面对雨水调蓄能力的影响

龚克娜, 王江海, 赵新华

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: [目的] 为了分析不同基质层厚度的绿化屋面对雨水的调蓄作用。[方法] 通过搭建绿化屋面装置, 采用人工降雨模拟器开展试验, 在不同基质层厚度和降雨条件下, 对绿化屋面的降雨—径流过程、持蓄雨水和减滞洪峰能力进行了研究。[结果] 基质层厚度在一定的范围内时, 绿化屋面出水的洪峰过程具有很高的相似性; 绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率呈指数函数的关系; 洪峰削减率与降雨强度无明显关系, 主要由基质层厚度决定。[结论] 绿化屋面能在一定程度上降低雨水的径流峰值, 减少总的径流量, 延缓产流时间, 且随着基质层厚度的增加, 绿化屋面对雨水的调蓄能力越好。

关键词: 绿化屋面; 基质层厚度; 降雨径流; 持蓄雨水; 减滞洪峰

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0356-05

中图分类号: X24

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.064

Effects of Different Green Roof on Rainwater Retention and Reduction Capacity

GONG Kena, WANG Jianghai, ZHAO Xinhua

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: [Objective] To analyze the capacity of green roofs with different substrate layer thickness to hold rainwater and reduce the runoff. [Methods] A series of green roof assemblies were constructed, and artificial rainfall experiments were carried out. Under the different condition of substrate layer thickness and simulated rainfall intensities, rainfall—runoff process and rainwater retention and reduction capacity were studied. [Results] There is a relationship between runoff processes of green roofs and different substrate layer thickness; The thickness of substrate layer of green roofs has exponent relation with rainwater retention rate; Rainwater reduction rate has no obvious relation to rainfall intensity, and it mainly depend on the substrate layer thickness. [Conclusion] Green roof can reasonably reduce the peak flow, total volume of runoff and delay the runoff generation, and the capacity increased with the increase of substrate layer thickness.

Keywords: green roof; substrate layer thickness; rain—runoff; rainwater retention; flood peak reduction

随着城市的迅速发展,人口的急剧增长,城市的不透水区域面积所占的比例越来越大,引发了洪涝灾难、水质污染、热岛效应等一系列的问题。在当前雨洪灾害愈演愈烈的情势下,国内外的众多研究表明,绿化屋面作为一种新型的绿化形式,能在一定程度上降低雨水的径流峰值,减少总的径流量,延缓产流时间,最终在较长的时间内通过蒸散发等方式缓慢释放绿化屋面基质层所持蓄的水分,使城市水文循环过程趋于自然化,有效降低城市洪水风险^[1]。

绿化屋面的概念最早于 19 世纪末在德国出现,

20 世纪 70 年代开始,逐渐被重视并大面积推广应用^[2]。Villarreal 等^[3], Bengtsson 等^[4-5], Carter 等^[6]研究了绿化屋面对雨水径流的影响,表明了绿化屋面可以降低洪涝灾害,且提出雨水滞蓄效果与基质层厚度、雨前干燥天数、降雨强度以及坡度等因素有关; Mentens 等^[7], Bliss 等^[8], Monterusso 等^[9], S. Morgan 等^[10]研究表明,绿化屋面能够有效减少降雨径流量和峰值流量,延迟产流时间。中国的绿化屋面在降雨径流水文水质方面的研究起步较晚,唐莉华等^[1]开展了绿化屋面的人工降雨径流观测试验,通过建立一

收稿日期:2013-12-06

修回日期:2014-01-13

资助项目:天津市科技创新专项资金“生态校园水资源综合利用成套技术示范工程”(08FDZDSF03200)

第一作者:龚克娜(1989—),女(汉族),湖南省娄底市人,硕士,研究方向为景观生态、水污染防治。E-mail:gongkena@126.com。

通信作者:赵新华(1952—),男(汉族),天津市人,博士,教授,博士生导师,主要从事环境工程系统优化与数学模拟研究。E-mail:zxh@tju.edu.cn。

维入渗模型 HYDRUS-1 D,对绿化屋顶的雨水滞蓄效果进行了模拟计算;魏艳萍等^[11]通过对比普通屋面、重型与轻型屋顶绿化屋面降雨—径流过程,分析了不同绿化屋面对雨水径流的影响;孙挺等^[2]通过研究绿化屋面的雨水滞蓄能力,归纳出了绿化屋面的典型降雨产流模式。之前的研究主要是以普通的花园土为营养基质层,且基质层多为某一固定厚度,关于不同基质层厚度的绿化屋面对雨水调蓄作用的定量研究较少。本研究在天津市气候条件下,搭建不同厚度的绿化屋面小试装置以及采用不同的基质“保绿素”开展人工降雨试验,根据试验结果从降雨—径流过程、持蓄雨水和减滞洪峰等方面进行分析,并着重研究绿化屋面不同基质层厚度与雨水调蓄能力之间的关系。

1 试验装置与研究方法

绿化屋面按结构功能可分为 5 层,从上到下依次是植被层、基质层、过滤层、排水层及防水层。基质层起到固定植物、保水保肥的作用,并且要求透水性好、质量轻、具有一定的化学缓冲能力。过滤层的作用是防止基质层泥沙等被雨水冲走。排水层主要是收集并排出基质层中渗出的雨水。防水层用于防止水体侵蚀建筑屋面,抵抗植物根系的穿透能力^[12-13]。绿化屋面的结构示意图如图 1 所示。

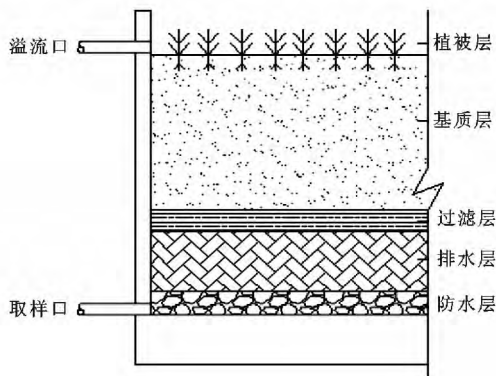


图 1 绿化屋面的结构示意图

本研究的试验地点选在天津大学土建馆屋顶,所用的绿化屋面试验装置尺寸为:长×宽=760 mm×530 mm,由于基质层高度不同,各个装置的高度也有所不同。装置置放坡度约为 4°,径流出水通过装置较低端的两个采样口采集,装置基质层上方 1 cm 处留有表层径流溢流口(图 1)。试验采用北方地区绿化常见的景天属植物佛甲草,该植物具有耐寒耐旱耐贫瘠及根系较浅容易成活等特点,在天津市的气候条

件下,蓄水量即可满足佛甲草的生长需求。在装置连续运行的 1 a 里,生长状况良好,覆盖率达 90% 以上。试验中所用的基质为“保绿素”白色无机填料,是基于无机材料、有机和无机肥料特制的无机营养基质,具有轻质和良好的排水保水等特性,适宜于植物的生长。试验设置了 5 个不同的试验组,分别对应不同的基质层厚度和排水板类型:5 cm(蓄排水板)、10 cm(蓄排水板)、20 cm(蓄排水板)、30 cm(蓄排水板)、10 cm(直排水板)。降雨试验于 2013 年 8—10 月进行,参照天津市 5 年一遇的降雨强度,采用人工降雨模拟器开展试验,分别模拟了 3 种不同类型的降雨。每次试验进行前,将绿化屋面试验装置晾晒 48 h 以上,使初始基质层湿度在 20%~25%,以保证每次试验的前提一致。模拟降雨过程中,从绿化屋面径流开始产生起,每隔 5~10 min 取样 1 次。

2 观测结果与分析

2.1 不同基质层厚度绿化屋面的降雨—径流过程

图 2 分别给出了 3 种不同降雨的降雨—径流过程。平均降雨量分别为 52.5, 48.75, 48.3 L, 降雨类型有所不同。1 号降雨为单峰, 2 号降雨为双峰, 3 号降雨为雨型呈锯齿形的波动峰。

从图 2 可看出,当降雨强度为单峰时(1 号降雨),基质层厚度为 5 和 10 cm 的绿化屋面对应的径流强度也为单峰,降雨强度为双峰时(2 号降雨),对应的径流强度也为双峰,当降雨强度为波动峰时(3 号降雨),对应的径流强度也具有一定的波动性。基质层厚度为 20 和 30 cm 的绿化屋面在 3 种不同雨型的降雨条件下,径流强度均没有明显的峰值,径流过程曲线比较平稳。

从 3 种不同降雨的降雨—径流过程可看出,4 种不同基质层厚度的绿化屋面的径流过程线都在一定程度上滞后于降雨过程线,即延迟了产流时间,且基质层厚度越大,滞后的时间越长,约为 10~20 min。从降雨强度来看,基质层为 5 和 10 cm 的绿化屋面径流曲线与降雨过程线类似,但变化幅度要低于降雨过程线,峰值流量明显减少,消除了降雨过程中的某些峰值。当基质层厚度大于 20 cm 时,径流量大大减少,产流保持相对稳定。

2.2 不同基质层厚度绿化屋面径流过程的相似性分析

研究表明,不同基质层厚度的绿化屋面对应的径流过程之间存在一定的关系,通过计算相关系数,可以反映其相似性。利用 Microsoft Excel 计算各径流过程之间的相关系数如表 1 所示。

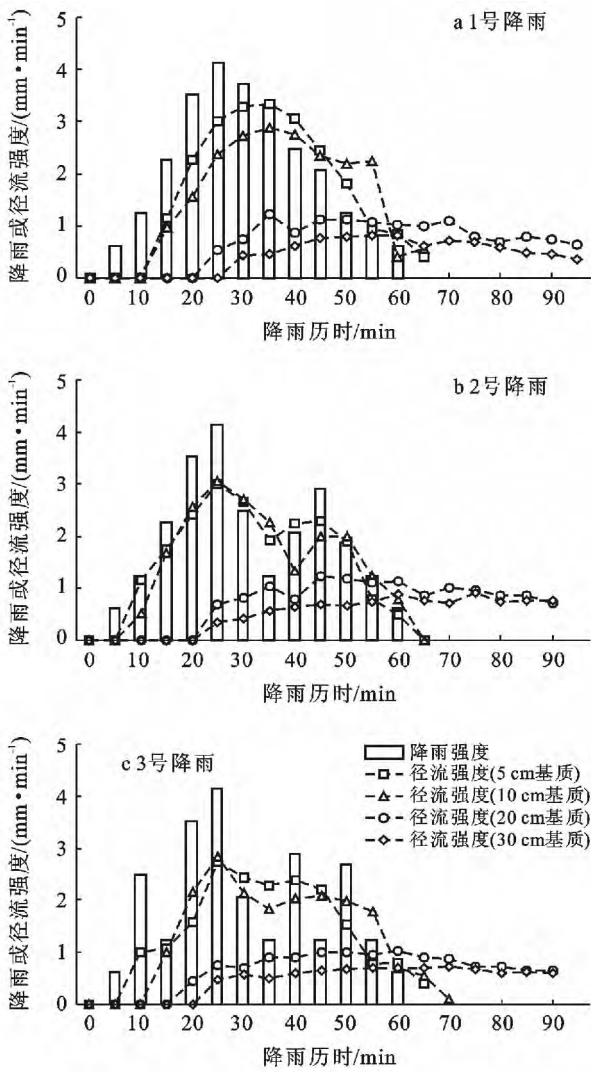


图 2 3 种不同降雨的降雨—径流过程

表 1 3 种降雨条件下不同基质层厚度绿化屋面对应的径流过程之间的相关系数

土层/cm	1 号降雨	2 号降雨	3 号降雨
5—10	0.842	0.861	0.732
5—20	0.430	0.236	0.515
5—30	0.465	-0.066	0.210
10—20	0.499	0.325	0.246
10—30	0.606	0.068	-0.153
20—30	0.766	0.744	0.851

由表 1 可以看出,在 3 种不同的降雨条件下,基质层厚度为 5 和 10 cm 的绿化屋面对应的径流过程之间相关系数都较大(>0.7),基质层厚度为 20 和 30 cm 的绿化屋面对应的径流过程之间相关系数也较大(>0.7),而其它基质层厚度对应的径流过程之间的相关系数较小(<0.5),说明当绿化屋面的基质层厚度在一定的范围内(5 cm<h<10 cm 或 20 cm<h<30 cm)时,绿化屋面出水的洪峰过程具有很高的

相关系数,洪峰峰形基本相似;当基质层高度在 5 cm <h<10 cm 之间时,峰形与降雨过程的峰形相似;当基质层高度在 20 cm<h<30 cm 之间时,峰形非常平缓,无明显峰值。分析洪峰过程的相似性有助于帮助人们根据基质层厚度预测已建或未建绿化屋面的洪峰过程,从而根据洪峰过程评价其对市政管道的冲击作用,制定更好的防洪措施。

2.3 绿化屋面对雨水的调蓄能力

绿化屋面对雨水的调蓄能力主要是通过种植植被层对雨水的截留、利用和基质层的入渗蓄滞等作用实现,通常表现为持蓄雨水能力和减滞洪峰的能力。

2.3.1 持蓄雨水能力 持蓄雨水能力一般通过降雨持蓄率进行评价^[2]:

$$\omega = \frac{P-R}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中:P——降雨量(L); R——径流量(L); ω——降雨持蓄率(%)。

表 2 列出了 3 场降雨条件下,不同基质层厚度和排水板类型的绿化屋面对应的雨水持蓄效果。

表 2 绿化屋面持蓄雨水能力的观测结果

平均降雨量/L	日期	基质层厚度/cm	排水板类型	径流量/L	降雨持蓄率/%
52.5	20130816	5	蓄排水板	45.45	13.43
	20130819	10	蓄排水板	42.38	19.28
	20130820	20	蓄排水板	27.10	48.38
	20130821	30	蓄排水板	17.40	66.86
	20130827	10	直排水板	43.19	17.74
48.75	20130903	5	蓄排水板	41.45	14.97
	20130910	10	蓄排水板	40.50	16.92
	20130911	20	蓄排水板	35.89	26.38
	20130918	30	蓄排水板	25.89	46.89
	20130922	10	直排水板	40.95	16.01
48.3	20130929	5	蓄排水板	38.70	19.88
	20131002	10	蓄排水板	38.65	19.98
	20131005	20	蓄排水板	24.45	49.38
	20131006	30	蓄排水板	20.15	58.28
	20131013	10	直排水板	38.67	19.93

从表 2 看出,绿化屋面对雨水具有一定的持蓄作用,不同基质层厚度的绿化屋面持蓄雨水的能力不同,随着基质层厚度的增加,降雨持蓄率也相应增加,大约在 10%~70%。排水板类型对雨水的持蓄效果也有一定的影响,当基质层厚度相同时(10 cm),使用蓄排水板的绿化屋面比使用直排水板的绿化屋面雨水持蓄效果更好,说明蓄排水板有一定的雨水持蓄作用。但基质层厚度为 10 cm,使用直排水板的绿化屋面比基质层厚度为 5 cm,使用蓄排水板的绿化屋面

雨水持蓄效果更好,综合来说相对排水板类型,基质层厚度是影响雨水持蓄效果的主要因素。

拟合绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率的关系曲线如图 3 所示。拟合结果见表 3。

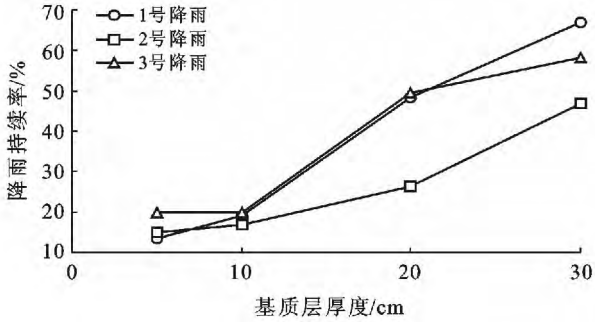


图 3 绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率关系的拟合曲线

表 3 绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率关系的拟合结果

项目	1号降雨	2号降雨	3号降雨
拟合公式	$y=10.223 e^{0.0668x}$	$y=11.16 e^{0.0462x}$	$y=14.679 e^{0.0493x}$
经验系数 a	10.223 0	11.160 0	14.679 0
经验系数 b	0.066 8	0.046 2	0.049 3
拟合度 R^2	0.960 0	0.984 3	0.900 5

从拟合结果可知,绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率呈指数函数的关系,拟合度 R^2 均大于 0.9,可用经验公式(2)表示为:

$$y = ae^{bx} \quad (2)$$

式中: y ——降雨持蓄率(%); x ——基质层厚度(cm); a, b ——经验系数。

从表 3 可看出,经验系数 a, b 均为正值,当基质层厚度 x 一定时, a, b 越大,降雨持蓄率越大, a, b 受雨前干燥天数、降雨强度、植被类型以及土壤导水及持水特性等因素的影响。

2.3.2 减滞洪峰能力 绿化屋面减滞洪峰的能力用洪峰削减率和洪峰滞后时间两个指标进行评价^[2]:

$$\eta = \frac{P_m - R_m}{p_m} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta t = t_R - t_P \quad (4)$$

式中: P_m ——最大降雨强度(mm/min); R_m ——绿化屋面产流最大流量(mm/min); η ——洪峰削减率(%); t_R ——绿化屋面产流流量峰值时刻(min); t_P ——降雨峰值流量时刻(min); Δt ——洪峰滞后时间(min)。

表 4 给出了 3 种降雨条件下,不同基质层厚度绿化屋面对应的洪峰削减率以及洪峰延滞时间的计算结果。

表 4 绿化屋面减滞洪峰能力试验结果

降雨类型	基质层厚度/cm	洪峰流量/(mm·min ⁻¹)	洪峰削减率	洪峰延滞时间/min
1号降雨	5	3.35	19.08	11
	10	2.89	30.19	12
	20	1.22	70.53	11
2号降雨	30	0.82	80.19	28
	5	3.05	26.33	3
	10	3.00	27.54	3
3号降雨	20	1.23	70.29	23
	30	0.87	78.99	37
	5	2.83	31.64	0
3号降雨	10	2.73	34.06	1
	20	0.99	76.09	24
	30	0.70	83.09	32

研究表明,绿化屋面对洪峰具有一定的削减和延滞作用。基质层厚度越大,减滞洪峰的能力越强。基质层厚度为 5—10 cm 时,洪峰的延滞时间较短,当基质层厚度大于 20 cm 时,对洪峰的延滞时间较长,基本在 20 min 以上。基质层厚度与洪峰削减率的关系见图 4。

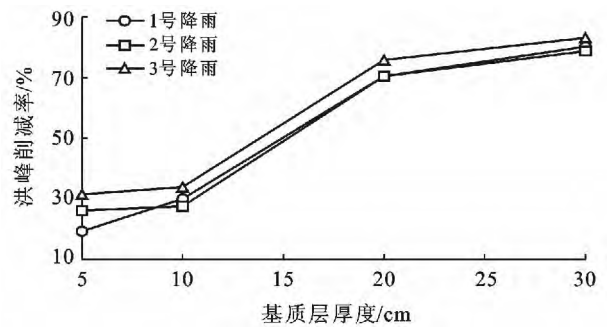


图 4 绿化屋面基质层厚度与洪峰削减率的关系

从图 4 可以看出,当基质层高度一定时,绿化屋面对不同降雨的洪峰削减率相差不大,对于单一的一场降雨,基质层厚度增大,绿化屋面对降雨的洪峰削减率升高,基质层厚度为 5,10,20 和 30 cm 的绿化屋面对应的洪峰削减率平均值分别为: 25.68%, 30.60%, 72.30% 和 80.76%。分析可知,绿化屋面对降雨的洪峰削减率与降雨强度特征无明显关系,主要由基质层厚度决定。

基质层厚度增加时,10 和 20 cm 对应的洪峰削减率差值最大,达到了 41.70%,平均增加 1 cm 厚度,可以提高 4.170% 的洪峰削减率;而 20—30 cm 之间,平均增加 1 cm 厚度,洪峰削减率只提高了 0.846%,5—10 cm 之间,平均增加 1 cm 厚度,仅可以提高 0.492% 的洪峰削减率。由此可知,当绿化屋

面的基质层厚度在 5—10 cm 之间时,绿化屋面的洪峰削减率增长非常缓慢;当绿化屋面的基质层厚度在 10—20 cm 时,绿化屋面的洪峰削减率在 30.60%~72.30%之间,而且洪峰削减率随基质层厚度的增加,提高幅度很大;当绿化屋面的基质层厚度大于 20 cm 时,洪峰削减率随基质层厚度的增加,提高幅度明显变小,说明当绿化屋面的基质层厚度增加到一定程度时,再继续增加厚度,对洪峰的削减作用不大。根据试验结果,在考虑屋顶建筑结构承重能力的前提下,可以为搭建绿化屋面提前选择相对安全且高效的基质层厚度。

3 结论

(1) 绿化屋面具有明显的雨水调蓄能力,且基质层厚度越大,对雨水的调蓄效果越好。通过种植植被层对雨水的截留和利用、基质层的入渗蓄滞等作用可延迟下垫面的产流时间、减少总的径流量,能有效削减洪峰流量和延滞洪峰到来的时间,有效降低城市洪水风险。

(2) 基质层厚度在一定的范围内 ($5\text{ cm} < h < 10\text{ cm}$ 或 $20\text{ cm} < h < 30\text{ cm}$) 时,绿化屋面出水的洪峰过程具有很高的相似性,有助于帮助人们根据基质层厚度预测已建或未建绿化屋面的洪峰过程,制定更好的防洪措施。

(3) 绿化屋面基质层厚度与降雨持蓄率呈指数函数的关系。可用经验公式 $y = ae^{bx}$ 表示。降雨持蓄率除了与基质层厚度有关,同时也受雨前干燥天数、降雨强度、植被类型以及土壤导水及持水特性等因素的影响。

(4) 洪峰削减率与降雨强度特征无明显关系,主要由基质层厚度决定,且洪峰削减率与基质层厚度是非线性的关系,当绿化屋面的基质层厚度在 10—20 cm 之间时洪峰削减率增长最快。根据试验结果,在考虑屋顶建筑结构承重能力的前提下,可以为搭建绿化屋面提前选择相对安全且高效的基质层厚度。

[参 考 文 献]

- [1] 唐莉华,倪广恒,刘茂峰,等. 绿化屋顶的产流规律及雨水滞蓄效果模拟研究[J]. 水文, 2012, 31(4): 18-22.
- [2] 孙挺,倪广恒,唐莉华,等. 绿化屋顶雨水滞蓄能力试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 44-48.
- [3] Villarreal E L, Bengtsson L. Response of a Sedum green-roof to individual rain events[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(1): 1-7.
- [4] Bengtsson L, Grahn L, Olsson J. Hydrological function of a thin extensive green roof in Southern Sweden[J]. Nordic Hydrology, 2005, 36(3): 259-268.
- [5] Bengtsson L. Peak flows from thin sedum-moss roof [J]. Nordic Hydrology, 2005, 36(3): 269-280.
- [6] Carter T L, Rasmussen T C. Hydrologic behavior of vegetated roofs [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1261-1274.
- [7] 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.
- [8] Bliss D J, Neufeld R D, Ries R J. Storm water runoff mitigation using a green roof[J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(2): 407-418.
- [9] Monterusso M A, Rowe D B, Rugh C L, et al. Runoff water quantity and quality from green roof systems[C]// XXVI International Horticultural Congress: Expanding Roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality, 2004: 369-376.
- [10] Morgan S, Celik S, Retzlaff W. Green roof storm-water runoff quantity and quality[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 139(4): 471-478.
- [11] 魏艳萍,文仕知,谭一凡,等. 重型与轻型屋顶绿化对屋面径流的影响[J]. 河北林业科技, 2011(3): 1-2.
- [12] 李帅杰,程晓陶. 福建福州市屋顶绿化及雨水收集对雨洪的调节作用[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(2): 16-20.
- [13] Czemieli Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 351-360.