

绿色屋顶径流水质监测研究进展

罗鸿兵^{1,2}, 刘瑞芬², 邓云², 张可¹, 刘晓玲³, 申琼¹, 黄波¹, 莫忧¹

(1. 四川农业大学城乡建设学院, 四川 都江堰 611830; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川水利职业技术学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 概述了国内外绿色屋顶径流水质监测发展状况, 并从绿色屋顶径流收集、降雨场次、监测指标、径流水质和污染物传输的影响因子等方面进行了归纳和总结。基于水量和水质管理, 从几何尺寸、土壤类型和厚度、植被和维护等方面阐述了绿色屋顶在城市排水系统中的作用和地位。揭示了绿色屋顶需要开展长期的监测和研究, 绿色屋顶径流水质监测逐渐向采样自动化和分析自动化方向发展。

关键词: 绿色屋顶; 径流; 水质监测

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2012)03-0012-06

Research Development in Water Quality Monitoring of Green Roof Runoff

LUO Hong-bing^{1,2}, LIU Rui-fen², DENG Yun², ZHANG Ke¹, LIU Xiao-ling³,
SHEN Qiong¹, HUANG Bo¹, MO You¹

(1. Rural and Urban Construction Institute, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountainous River Development and Protection, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. Sichuan Water Conservancy Professional Technological College, Dujiangyan, Sichuan 611830, China)

Abstract: Research development in runoff water quality monitoring of green roof was reviewed such as runoff water collected from green roof, number of rainfall, monitoring items, runoff water quality, impact factor of pollutant transmission, etc. Based on water quantity and water quality management, role of green roof in urban drainage system was described including shape and size of green roof, features and thickness of soils, protection and maintain of vegetation, etc. It needs a long-term monitoring and research to know function of green roof. Development direction would be sampling and analysis automation for runoff water quality monitoring of green roof.

Key words: Green roof; Runoff; Water quality monitoring

近年来, 屋面径流污染研究在国内外引起了广泛关注^[1-3]。很多国外学者研究发现, 屋面径流存在严重污染, 会给接纳水体和城市环境带来很大危害^[3-5], 需要进行控制。一是末端或中间控制^[6], 让屋面径流进入地表绿地等设施进行污染控制; 二是源头控制即绿色屋顶控制, 其中绿色屋顶净化屋面径流水质降解规律是近年来的研究热点之一。绿色屋顶水质状况由雨水背景值及水流在屋面运动过程中稀释、溶解的污染物情况共同决定, 差别是不同的绿色屋顶有不同的兴建和维护方式、数据测量周期, 以及雨水水质季节性特征。今阐述国内

外绿色屋顶径流水质监测的研究进展, 为改善城市环境提供参考。

1 绿色屋顶的结构与分类

绿色屋顶^[7]指质量较轻并在屋顶防水层和根

收稿日期: 2011-04-05; 修订日期: 2012-03-22

基金项目: 2010 年四川省教育厅青年基金(现代田园城市低碳屋顶营建与节能减排研究) 资助项目(10ZB046); 国际合作(四川大学-EPA-University of Virginia) “green roof”基金资助项目

作者简介: 罗鸿兵(1975—), 男, 四川资阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为非点源污染与控制、污染控制与资源化、节能减排、碳交易与碳计量、环境修复、流域治理、生态工程等。

系防护层上种有植被的屋顶,是在屋顶隔水层的上方铺一层土壤,然后部分或全部栽上植物,又以“生态屋顶”著称。绿色屋顶能够产生多种效益,包括缓冲暴雨、延长屋顶防水系统使用寿命、提升建筑美学、利用屋顶空间、提高隔热防热性能、减轻城市热岛效应、帮助减少噪声、为动植物提供栖息地、吸收二氧化碳、增加生物多样性等^[8-13]。最新研究表明,绿色屋顶的土壤和植被具有一定的碳汇能力,有利于大气中二氧化碳的减少^[14]。

依照介质厚度,绿色屋顶可以分为密集型绿色屋顶(intensive green roofs)和拓展型绿色屋顶(extensive green roofs)两类^[7]。在实际应用中还存在这两类屋顶的混合型。绿色屋顶的典型结构见图 1^[7]。

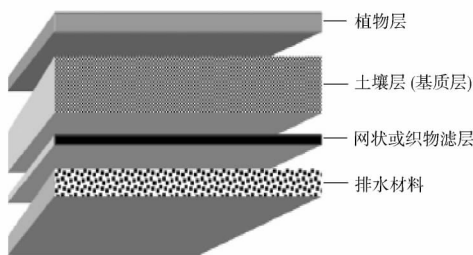


图 1 绿色屋顶的典型结构^[7]
Fig. 1 Typical structure of green roof^[7]

密集型绿色屋顶的土壤层较深,能够支撑大型植被,可以实施除草、施肥和浇灌。拓展型绿色屋顶的土壤层较薄,主要种植最终能够覆盖屋顶的小型植被,可以通过预制植被垫、芽种植、种子播种和自然形成的植物等不同方式建立,主要目的是维持用户的自由种植,但有时被推荐使用一些商业性的施肥剂。有较少的文献将第三类绿色屋顶定义为简单密集型(半密集型),含有草地和地表覆盖物,需要不断维护,包括割草、浇水和施肥。将土壤厚度作为绿色屋顶的分类依据受到了普遍认可^[10,14-18](见表 1),其中土壤厚度为 110 mm ~ 150 mm 的绿色屋顶被不同作者分别定义为密集型或拓展型绿色屋顶。

表 1 绿色屋顶土壤厚度 mm
Table 1 Thickness of green roof soils mm

密集型绿色屋顶	拓展型绿色屋顶	文献
150 ~ 1 200	50 ~ 150	[10]
> 500		[14]
150 ~ 350	30 ~ 140	[15]
> 100	< 100	[16]
> 300		[17]
> 100	20 ~ 100	[18]

2 绿色屋顶径流监测概述

绿色屋顶径流监测包括两个关键过程:一是对绿色屋顶径流的收集与采样;二是对降雨的监测。

2.1 绿色屋顶水样采集

屋顶径流污染物组成随时间而变化,需按一定的流量采集适当比例的混合水样^[19]。有两种获得与流量成比例混合样的方法^[20],均以采集整场降雨事件中一系列的瞬时水样为前提,不同的是二者的混合方式。一种是现场混合,根据采样时间点的流量计算,在采样点快速混合;另一种是实验室混合,考虑降雨事件的全程流量,等采样收集工作全部结束后,通过全局流量比例运算得到混合样。

屋顶径流水样采集可以分为在线自动采样和人工采样^[21-23]。径流水样自动采样器通常价格昂贵,一般通过 PVC 管采集绿色屋顶径流。自动采样器安放在 PVC 管之间,先通过采样过滤器,再经过深度/流量传感器自动采样,用连接线将自动采样器连接到人为可控自动采样控制终端,人工设置后自动采样。典型自动绿色屋顶水样采集装置见图 2^[21]。

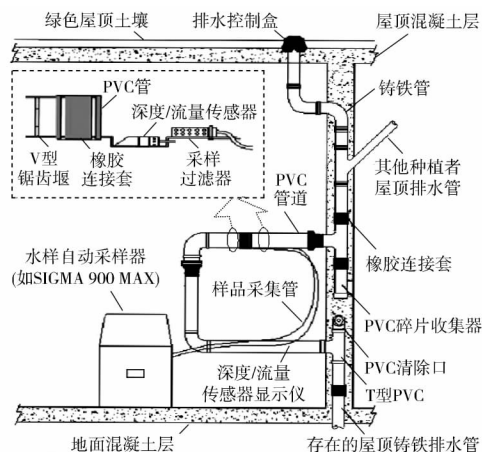


图 2 典型绿色屋顶径流自动采样装置^[21]

Fig. 2 Typical automatic sampling device of green roof runoff^[21]

目前国内研究者实验时基本采用人工采样,即采取每间隔一定时间取一个水样的方式,间隔时间固定或人为地根据降雨强度而变化,最后分析污染物的随时变化过程,或结合暴雨径流过程分析整场降雨事件中污染物的平均浓度 EMC (Event Mean Concentration)。人工采集的水样量多,分析费时,易受人为主观因素的影响。

通常绿色屋顶的水质采样步骤如下:①根据水质检测指标,确定所需要的最终混合水样体积;②确定每个瞬时水样的时间间隔,EPA 规定^[20]人工采集与流量成比例混合样最少必须采集 9 个瞬时水样(如果降雨时间够长),并且每个水样之间的时间间隔必须达到 15 min,1 h 至少采集 3 个瞬时水样;③确定每个瞬时水样的体积(定值),一般取 1 L 样品就可分析多项指标;④估计或测量每个采样点之间的过流量;⑤采样完成后,比较得出两个采样点之间的最大过流量;⑥通过每个采样点之间的过流量与最大过流量的比值,确定该水样(1 L)在混合时应取的体积。

2.2 降雨场次

要保证每场降雨事件至少采集 3 个水样,则降雨时间必须持续 1 h^[20]。对于长时间降雨事件,可

取 3 h 作为采样时间,以保证 9 个瞬时水样的获取。目前我国气象站均记录日降雨量,而每天可能包含多次降雨事件,因而以天来划分降雨场次不够精确。可以将单次降雨定义为与前后降雨场次的间隔时间 ≥ 6 h^[24],同时根据实际观测,单次降雨量 < 2 mm 的降雨并不能形成有效径流。因此,定义有效降雨事件为“降雨持续时间在 1 h 以上(包括 1 h) 降雨量 ≥ 2 mm,与前后两次降雨事件间隔 6 h 或更长”的降雨。

2.3 绿色屋顶水样监测指标

城市降雨径流最常见的污染物是重金属、石油烃、杀虫剂、悬浮物、营养物质和致病微生物,而绿色屋顶经常重点关注的水质参数是氮、磷及重金属。因此,绿色屋顶径流水质测定参数通常为重金属、TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP、PO₄³⁻-P、TSS、pH 值、TOC、COD、BOD₅、VOC 等。

3 国外绿色屋顶水质监测进展

国外绿色屋顶水质监测结果见表 2。由表 2 可见,不同研究条件下得出的绿色屋顶径流水质差异较大。

表 2 国外绿色屋顶水质监测结果^[21 25-29]
Table 2 Water quality monitoring results of foreign green roof^[21 25-29]

测试对象	SS	pH 值 ^①	BOD ₅	COD	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₃ -N	凯氏氮	TP	PO ₄ ³⁻ -P
绿色屋顶 ^②									0.46~4.39	
绿色屋顶					0.8~6.8				0.6~1.5	
雨水					0.6~1.3	0.09~0.18	<0.015~0.22		0.012~0.019	0.003~0.004
雨水径流	7.85~8.26		2.0~5.3	21~37	1.2~2.1	0.42~0.8	0.12~0.33		0.026~0.09	0.006~0.066
雪融径流					0.2~1.1	<0.03~0.33	0.17~0.35		0.034~0.056	0.011~0.028
雨水均值					2.65	1.03	1.08		0.04	0.02
拓展型屋顶					2.31	0.07	0.08		0.31	0.27
密集型屋顶					0.59	0.11	0.15		0.01	—
密集型屋顶					—				2~3	
拓展型屋顶	10~33							3.9~20	2.7~5.0	

①pH 值无量纲;②单位为 μg/L。

2004 年,美国北卡罗来纳州的两个绿色屋顶在 9 个月的测量期间,并未发现水质改善现象^[30]。美国波特兰市某公寓绿色屋顶的水质监测结果表明^[31],氮的浓度在两年内随时间而降低,且低浓度发生在少雨的夏季,观测到的高浓度铜极有可能是受屋顶材料的影响。宾州州立大学绿色屋顶项目

开展了较为全面的水质监测^[32],21 次降雨事件的采样结果说明,绿色屋顶水样颜色发黄,pH 值和可溶性盐浓度偏高,营养物质(磷和钾)浓度和硬度(钙和镁)相同或更高。2006 年,在瑞典开展的 4 个绿色屋顶的检测结果表明^[33],绿色屋顶并未对水质起改善作用,其原因一是在研究期间所研究区域的雨水没有太大污染;二是秋季绿色屋顶对雨

水的滞留时间相对较短,限制了其对水质产生影响。2009 年,在德国柏林开展的两个拓展型绿色屋顶(种植介质厚度分别为 5 cm 和 12 cm) 研究指出,绿色屋顶对控制污染物有益^[34]。其中一处绿色屋顶(位于柏林技术大学)对重金属和磷都有很好的拦截能力,分别拦截了雨水来流中 94.7% 的铅、87.6% 的镉、80.2% 的硝酸盐和 67.5% 的磷酸盐,且污染物截流能力随时间延长而增加,在建造的第一年和第四年分别拦截了 26.1% 和 79.9% 的磷。而第二个实验在考察不同种植介质的污染释放情况时,发现绿色屋顶径流的电导率和浊度都比降雨和控制屋顶高,表明其无机化合物和污染物浓度高,然而随着时间推移(6 个月后),该两项指标均有大幅下降。总氮也有相同趋势,下降程度随种

植介质而有所不同,但磷酸盐浓度不随时间而发生变化。此外,研究还发现,绿色屋顶能有效地中和柏林酸雨。

4 国内绿色屋顶水质监测进展

目前国内只有极少数单位(如四川大学)开展了绿色屋顶研究^[35]。以成都某绿色屋顶(高度约 15 m,屋面面积 10 m × 27 m)为例,监测时间为 2009 年 3 月—5 月,采样方法为混合人工采样,获取流量成比例混合样,检测污染物 EMC 值,监测数据见表 3。由表 3 可见,该绿色屋顶水质普遍呈碱性,对酸雨有一定程度的缓解作用;TSS、COD、NH₃-N、TN、TP 的污染负荷减少量分别为 72.1 kg、172.8 kg、4.2 kg、21.8 kg、0.3 kg,去污能力可观^[36]。

表 3 成都某拓展型绿色屋顶径流水质监测数据^[35]

Table 3 Runoff water quality monitoring data of a chengdu expand green roof^[35]

水质监测参数	pH 值 ^①	TSS	COD	BOD ₅	TOC	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP
实测平均值	7.62	11.50	44.97	4.72	16.90	0.62	1.57	0.13	22.99	0.16

①pH 值无量纲。

根据国内已出台的各城市绿色屋顶发展规划,目前我国主要着眼于提高建筑的节能效益,缓解城市热岛效应,净化城市大气,增加绿地率,以及改善城市第五立面景观^[35-37]。绿色屋顶如果能正确建设,其重要功效之一就是可以很好地拦截城市暴雨,并限制肥料在径流中的释放^[38],然而此信息未在我国引起足够的重视和利用。

5 影响绿色屋顶径流水质的因子

绿色屋顶径流水质研究的关键问题是如何增加或减少城市径流污染负荷的贡献程度。文献所报道的不同绿色屋顶的水质主要取决于其建筑和维护,而且通常是短期的少量降雨事件研究而非长期研究,因而水质的季节变化可能很大。可能影响绿色屋顶水质的因素包括^[7]:使用材料的类型(种植基质成分、排水系统材料或承重屋面材料、雨水管材料);土壤厚度;排水类型;维护(化学药剂的使用);植被类型;降雨过程;风向;当地污染源;污染物的物理化学属性。

5.1 pH 值

绿色屋顶具有降低自然降雨酸度的重要功能,如通过减缓雨水(pH 值 5~6)酸度,使 pH 值升高

(7~8),以影响径流水质^[24,26,28]。

5.2 初期冲刷

初期冲刷指干燥天气后从不透水地表初期产生的径流,比后期径流通常含有更多的污染物。初期冲刷具有典型的更差水质,因而不希望发生与种植的绿色屋顶本身相关的污染源初期效应。但是,一些径流初期样品成分(TP、NH₃-N、NO₃⁻-N、Zn 和 Cu)比更高降雨深度的样品具有更高浓度,被认为是偶然出现的初期效应,而 K 和溶解性有机碳没有表现出初期效应^[34]。随后的研究发现,P、S、COD、pH 值和浊度都没有初期效应的迹象^[28]。

5.3 磷

降水中通常含有少量磷,通过集中施肥(堆肥或额外的人工肥料)完成的绿色屋顶和正在不断施肥的绿色屋顶已经普遍被认为是一种磷源^[24-26,28,33]。有研究发现,几乎所有被释放的磷都是磷酸盐形式,也有研究发现了没有磷释放的绿色屋顶^[27,33]。还有研究发现,绿色屋顶径流中总磷浓度明显高于磷酸盐浓度,磷酸盐污染负荷的减少取决于绿色屋顶的径流减少量^[26]。磷酸盐负荷减少量可随时间而增加^[15]。Aa 的磷酸盐污染年负荷减少程度分别为 26%、61%、64% 和 80%,应归

功于绿色屋顶的种植。因此,绿色屋顶的磷泄漏与屋顶年限和日常肥料相关联。

5.4 氮

一些研究显示,绿色屋顶径流中不同氮形态的浓度低于雨水浓度,而其他研究发现了实质性的绿色屋顶的氮释放。绿色屋顶径流中氮浓度与土壤类型、绿色屋顶年限和维护(肥料施用)相关联。以瑞典南部的拓展型绿色屋顶为例,雨水总氮浓度与种植的绿色屋顶径流总氮浓度非常接近,有机氮被假定为可能由种植的绿色屋顶释放出来^[33]。绿色屋顶水质中的硝酸盐负荷减少依赖于径流减少量^[34]。对于大雨事件,雨水和绿色屋顶径流中的总氮浓度有相同趋势,即绿色屋顶不会促使总氮浓度上升^[26]。但是,日本用轻型无机土壤建造的密集型绿色屋顶径流中的总氮浓度有实质性的降低^[27]。绿色屋顶径流实质性释放总氮被发现。不同排水系统与土壤系统的硝酸盐浓度也有所不同(0.3 mg/L~1.8 mg/L),最薄的土壤显示了最高的硝酸盐释放。硝酸盐释放依赖于植物类型和种植区域的设施,最小释放在本土景天属植物的种植区域,最大释放在景天属植物的种子种植区^[28]。

5.5 重金属

现有资料表明,拓展型绿色屋顶没有实质性释放重金属。通常薄土壤的拓展型绿色屋顶对径流水质没有影响,其径流中的重金属浓度常低于城市硬质地表径流浓度^[25]。绿色屋顶径流重金属(Pb、Zn、Cu、Cd)的滞留取决于屋顶径流的减少能力。在夏季,种有草皮的半密集型绿色屋顶能够滞留 99% 的 Pb、Zn、Cu 和 98% 的 Cd,种有草皮的拓展型绿色屋顶能够滞留 97% 的 Cu、96% 的 Zn、92% 的 Cd 和 99% 的 Pb;在冬季,种有草皮的半密集型绿色屋顶能够滞留 68% 的 Cu、92% 的 Zn、88% 的 Cd 和 94% 的 Pb,种有草皮的拓展型绿色屋顶能够滞留 44% 的 Cu、72% 的 Zn、62% 的 Cd 和 91% 的 Pb^[39]。

5.6 肥料、径流污染与种植发展的关系

施肥是完成绿色屋顶植被覆盖的普遍做法。绿色屋顶释放的营养物质与其建筑和维护所使用的肥料直接关联,施用的传统化肥比控制性释放肥料会促使径流产生更高的营养物质浓度^[38]。总径流磷酸盐和 K 在不同种植系统之间不存在显著差异,在未种植区域与根芽种植系统之间也没有任何差别。与种植的根本系统区域和未种植基质相比,被

植被覆盖区域的硝酸盐释放和总氮释放均得以减少。施肥后不同时间段的第一次(第 140 天)采样径流中的磷浓度明显高于第二次(第 314 天),不同的种植系统具有不同的磷释放,最高的磷释放在景天属种子种植系统^[33]。拓展型绿色屋顶的植物生长与基质中有机质浓度直接相关,非多汁本土植物需要更深厚的基质、高浓度有机质或者补充灌溉^[40]。

6 展望

国外屋顶绿化渐臻成熟,径流水质监测已逐渐向自动化方向发展。目前,美国弗吉尼亚大学正在研制绿色屋顶的专业软件,从绿色屋顶构造、基质及材料选择、排水系统、植物种植和养护、径流水文、水质等方面入手,并整合 GIS、GPS 等技术。平均每平方米屋顶可以吸收 375 g 碳,绿色屋顶吸收大气中的二氧化碳及产生的效益已经受到关注并成为热点^[14]。

我国屋顶绿化方兴未艾。目前国内相关政策不完善、目标不清晰都缘于本国的绿色屋顶研究力度不够,基础数据严重缺乏。尤其是我国的绿色屋顶技术发展尚处于起步阶段,取得绿色屋顶各种效益的量化数据显得尤为迫切和必要。成都屋顶绿化在国内开展最早,普及率、重视程度及技术水平均在全国处于领先地位。我国其他大城市也在大力发展绿色屋顶,如杭州将打造“六位一体”的低碳城市建设计划,其中包含了“绿屋顶”计划,拟提高城市立体空间的绿色浓度,降低城市热岛效应^[37]。

7 结语

绿色屋顶径流水质与使用材料类型、土壤厚度、排水类型、维护(化学药剂的使用)、植被类型、降雨过程、当地污染源、污染物的物理化学属性密切相关,其中营养物质含量主要受土壤材料(如堆肥)和增加肥料的影响。绿色屋顶径流水样采集是监测过程中最重要的一个环节,采样时间、径流量分析和样品混合等过程都将对监测结果产生影响。径流水样采集、径流量测定、雨量测试、水样分析等都极为耗时,限制了绿色屋顶径流监测的发展,虽然自动在线监测能够使分析过程简单化,但建造和运行成本较高。绿色屋顶早期少量的研究实例和近期研究均揭示,绿色屋顶需要开展长期监测。

[参考文献]

- [1] GROMAIR M M C. Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. *Wat Sci Tech* ,1999 ,39(2) : 1 - 8.
- [2] 车武. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. *给水排水* , 2003 29(10) : 38 - 42.
- [3] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. *中国给水排水* 2001 ,17(6) : 57 - 61.
- [4] ZILLICH G. Requirements for rainwater treatment in Lower Saxony (in German) [J]. *Berichte der Abwass Ertechnischen Vereinigung* ,1991 41: 609 - 613.
- [5] LESCHOBBER R ,PEMAK K D ,ZIMMERMANN U. Investigation of the behaviour of inorganic and organic substances during infiltration of rain runoff (in German) [J]. *Stadtentwasse Rung und Gewässerschutz* ,1991 4: 169 - 188.
- [6] 欧岚, 车武, 汪慧贞. 城市屋面雨水绿地水平流渗透净化研究[J]. *城市环境与城市生态* 2001 ,14(6) : 24 - 27.
- [7] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering* 2010 36: 351 - 360.
- [8] SAILOR D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. *Energy and Buildings* 2008 40: 1466 - 1478.
- [9] KOSAREO L ,RIES R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs [J]. *Build. Environ.* ,2007 42: 2606 - 2613.
- [10] TAKEBAYASHI H ,MORIYAMA M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. *Build. Environ.* 2007 42: 2971 - 2979.
- [11] CLARK C ,ADRIAENS P ,TALBOT F B. Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits [J]. *Environ. Sci. Technol.* 2008 42: 2155 - 2161.
- [12] GETTER K L ,ROWE D B. The role of extensive green roofs in sustainable development [J]. *Hort Science* 2006 41(5) : 1276 - 1285.
- [13] YANG J ,YU Q ,GONG P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago [J]. *Atmos. Environ.* ,2008 42: 7266 - 7273.
- [14] GETTER K L ,ROWE D B ,ROBERTSON G P et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs [J]. *Environ. Sci. Technol.* 2009 43: 7564 - 7570.
- [15] MENTENS J ,RAES D ,HERMY M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanised 21st century [J]. *Landscape Urban Plan* 2006 77: 217 - 226.
- [16] WONG N ,MENTENS H ,TAN P Y et al. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate [J]. *Build Environ.* 2007 42: 25 - 54.
- [17] BENGTTSSON L ,GRAHN L ,OLSSON J. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden [J]. *Nordic Hydrol.* 2005 36(3) : 259 - 268.
- [18] GRAHAM P ,KIM M. Evaluating the stormwater management benefits of green roofs through water balance modeling [C]. Washington D. C. : Green Roofs for Healthy Cities Conference , 2005.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社 2002.
- [20] US EPA , Office of Water (EN - 336) . EPA 833 - 8 - 92 - 001 , NPDES storm water sampling guidance document [S]. Washington D. C. : US EPA ,1992.
- [21] STANFORD R ,ASLA ,SMITH R. Field monitoring of a green roof [C]. Nanchang: The 6th International Conference on Urban Watershed Management 2009: 452.
- [22] 彭强辉, 陈明强, 蔡强, 等. 水质生物毒性在线监测技术研究进展 [J]. *环境监测管理与技术* 2009 21(4) : 12 - 16.
- [23] 孙南. 水质自动监测系统运行过程中的质量保证和质量控制 [J]. *环境监测管理与技术* 2009 21(1) : 62 - 64.
- [24] BLISS D J. Stormwater runoff mitigation and water quality improvements through the use of a green roof in Pittsburgh , PA [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh 2004.
- [25] MONTERUSSO M A ,ROWE D B ,RUGH C L et al. Runoff water quantity and quality from green roof systems [J]. *Acta Hort* , 2004(639) : 369 - 376.
- [26] MORAN A ,HUNT B ,SMITH J. Hydrological and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh , North Carolina [C]. Washington D. C. : Green Roofs for Healthy Cities Conference 2005.
- [27] TEEMUSK A ,MANDER Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events [J]. *Ecological Engineering* 2007 30: 271 - 277.
- [28] CZEMIEL B J ,BENGTTSSON L ,JINNO K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecol. Eng.* , 2009 30: 271 - 277.
- [29] BLISS D J ,NEUFELD R D ,RIES R J. Storm water runoff mitigation using a green roof [J]. *Environ. Eng. Sci.* ,2009 26(2) : 407 - 417.
- [30] MORAN A ,HUNT B ,JENNINGS G. A north carolina field study to evaluate green roof runoff quantity , runoff quality , and plant growth [C]. Green Roofs for Sustainable Communities Conference 2004.
- [31] TIM K P E. Flow monitoring of three ecoroofs in Portland , Oregon [C]. Proceedings of the 2008 International Low Impact Development Conference 2008.
- [32] BERGHAGE R ,JARRETT A ,BEATTIE D. Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain [R]. USA: Pennsylvania State University ,North Carolina State University 2007.
- [33] CZEMIEL B T ,EMILSSON ,BENGTTSSON L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality [J]. *Sci. Total Environ.* 2006(355) : 48 - 63.
- [34] KÖHLER M ,SCHMIDT M ,GRIMME F W et al. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics-far beyond the aesthetics [J]. *Environ. Manage. Health* 2002 ,13(4) : 382 - 391.

(下转第55页)

尖毛蕨和臭椿的氮、硫质量分数最高;蕨和芒草的氮、硫最低;不同植物间的氮、硫质量分数差异达到3.5倍和2.5倍。不同类型植物的氮、硫质量分数存在差异,氮质量分数中:藤本>草本>灌木>乔木,硫质量分数中:藤本>草本>乔木>灌木;落叶植物的氮、硫质量分数>常绿植物的氮、硫质量分数。

(3) 不同采样点植物的氮、硫质量分数存在差异,植物的氮、硫质量分数高低均表现为玻璃厂>火电厂>水泥厂。

[参考文献]

- [1] 范修远,陈玉成.重庆主城区主要行道树植物氮硫水平的初步研究[J].资源与人居环境,2007,4(6):74-75.
- [2] 向敏,韩永翔,邓祖琴.2007年我国城市大气污染时空分布特征[J].环境监测管理与技术,2009,21(3):33-36.
- [3] 郑淑颖.二氧化硫污染对植物影响的研究进展[J].生态学,2000,19(1):59-64.
- [4] 易秀,冯武焕,张小迪.某火力发电厂周围小麦受SO₂污染调查[J].环境监测管理与技术,2005,17(6):18-21.
- [5] 李海亮,赵庆芳,王秀春,等.兰州市大气污染对绿化植物生理特性的影响[J].西北师范大学学报(自然科学版),2005,41(1):55-57.
- [6] 栗德永,王开曦.大气污染对植物叶片硫、氯、氟含量的影响[J].环境科学,1982,3(5):50-54.
- [7] 江静蓉,徐亦钢,石磊,等.城市植物叶片含硫量与大气SO₂污染关系及其在污染状况评价中的应用[J].环境科学,1992,13(1):71-73.
- [8] 马开升.大气氟化物对大蒜、玉米污染危害的研究[J].环境监测管理与技术,1997,9(5):21-23.
- [9] 叶旭红,周侣艳,苏冷,等.杭州市区大气中含硫污染物污染及防治对策[J].环境监测管理与技术,2000,12(增刊):

37-38.

- [10] 梅卓华,方东,宋永忠,等.南京市植物叶片氮、硫、铅含量与大气污染评价[J].污染防治技术,2005,18(4):40-41.
- [11] 杨成,袁伟,王娅,等.大气污染影响下凯里地区植物过氧化氢酶活性和游离脯氨酸含量的变化[J].安徽农业科学杂志,2008,36(25):10773-10774.
- [12] 陶玲,任珺,杜忠,等.兰州市大气污染对植物中游离脯氨酸含量的影响[J].环境化学,2008,27(4):499-502.
- [13] 杜忠,陶玲,任珺.兰州市大气污染对绿化树种叶绿素含量的影响[J].环境监测管理与技术,2009,21(5):17-21.
- [14] 吴如雄.凯里两万多亩马尾松突然枯黄[EB/OL]. [2004-06-19]http://www.gz.xinhuanet.com/zfpd/2004-06/19/content_2332368.htm.
- [15] 吴建之,葛滢,王晓月.过硫酸钾氧化吸光度法测定植物总氮[J].理化检验(化学分册),2000,36(4):166-167.
- [16] 余叔文,王明霞,颜丽英.大气污染生物监测方法[M].广州:中山大学出版社,1993:9-12.
- [17] 黄银晓,林舜华,蒋高明,等.海河流域植物土壤中氮碳的含量特征[J].生态学报,1994,14(3):225-234.
- [18] 侯学煜.中国植被地理及优势植物化学成分[M].北京:科学出版社,1982:260-267,358-369.
- [19] 林舜华,黄银晓,蒋高明,等.海河流域植物硫素含量特征的研究[J].生态学报,1994,14(3):235-242.
- [20] 蒙格尔K,克尔贝尔E.A.植物营养原理[M].北京:农业出版社,1987:381-399.
- [21] 杨成,刘丛强,宋照亮,等.贵州喀斯特山区植物和土壤的C、N、S分布特征研究[J].北京林业大学学报,2008,30(1):45-51.
- [22] 洪渊,黄俊华,张冬鹏.深圳市园林植物叶片含硫量的特点[J].生态科学,2007,26(2):122-125.
- [23] 刘艳菊,丁辉,王辉.首钢邻山和植物园植物叶片含硫量的对比[J].中国环境科学,2001,21(6):498-502.

本栏目责任编辑 薛光璞 李文峻

(上接第17页)

- [35] 刘瑞芬.绿色屋顶降雨径流控制及节能效果研究[D].成都:四川大学,2010.
- [36] KÖHLER M, SCHMIDT M. Study of extensive 'green roofs' in Berlin[R/OL]. http://www.roofmeadow.com/technical/publications/SWQuality_Berlin_MSchmidt.pdf.
- [37] 杭州市委政研室.杭州积极推进“六位一体”低碳城市建设[EB/OL]. [2010-05-18]http://zjnews.zjol.com.cn/05zjnews/system/2010/05/18/016618247.shtml.
- [38] EMILSSON T U, CZEMIEL B, MATTSON J, et al. Effect of u-

sing conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems[J]. Ecol. Eng., 2007, 29: 260-271.

- [39] STEUSLOFF S. Input and output of airborne aggressive substances on green roofs in Karlsruhe[M]. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany: Urban Ecology, 1998.
- [40] ROWE D B, MONTERUSSO M A, RUGH C L. Assessment of heat-expanded slate and fertility requirements in green roof substrates[J]. Hort Technology, 2006, 16(3):471-477.

本栏目责任编辑 姚朝英