

屋顶绿化生态系统箱的研制

任海, 简曙光, 张倩媚, 刘世忠, 申卫军

中国科学院华南植物园//广东省数字植物园重点实验室, 广东 广州 510650

摘要:调查发现广州市屋顶自然生长的维管植物有 49 科 109 属 128 种, 植物种类较多的科为菊科、禾本科、桑科、景天科、茜草科和鸭跖草科; 屋顶自然生长的植物种类数量与环境受污染程度成反比, 而与周围植物的多少成正比; 屋顶自然生长的植物由于长期适应屋顶的极端环境, 形成了一些独特的生态生物学特征。基于上述结果配置相应的植物组合, 设计适于屋顶绿化的生态系统箱、配制相应土壤并进行技术集成, 观测其生长和隔热效应。同时进行空白对照、黑网荫蓬对照、生态隔热层对照、普通土壤种植区对比试验, 发现生态隔热层和生态系统箱具有成本低、易维持、隔热好、景观美的效果。

关键词: 屋顶绿化; 生态系统箱; 生态隔热层; 热岛效应

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2007) 02-0480-06

随着城市化进程加快, 高层、高密度的建筑物不断地侵蚀着城市有限的绿化空间, 导致空气质量下降、噪音增加、温度升高和湿度下降等生态问题。特别是近年来城市热岛效应恶化了城市的人居环境, 影响了城市的可持续发展。扩大绿地的数量与质量是有效减轻城市热岛效应的方式之一。但是, 在寸土寸金的城市里, 绿化地的面积非常少, 很难找到合适的大面积土地作为绿化地。目前控制“热岛现象”最有效的途径就是立体绿化。立体绿化是指地面、墙体、屋顶绿化的总称。大量事实表明, 屋顶绿化对人口稠密、建筑物拥挤的城市闹市区更为适用。屋顶绿化是指在建筑物的顶面进行绿化, 它是现代化城市改善环境的最佳途径之一^[1-4]。

近代最早开展屋顶绿化的是一位美国风景建筑师, 他于 1959 年在加利福尼亚奥克兰市的一座六层楼的楼顶建造了世界上当时最大的“空中花园”(1.2 hm²), 被视为建筑与绿化艺术杂交的奇葩。此后, 一些发达国家如日本、德国等在新营造的建筑群中, 从设计楼房图纸时就考虑到了屋顶花园项目, 造园水平越来越高。我国有些大中城市如成都、广州、深圳等也开始了屋顶绿化行动。在屋顶绿化的研究和开发中, 国内外关注比较多的是: 屋顶的生境研究; 屋顶的供排水系统, 尤其是节水灌溉系统研究; 屋顶植物与景观多样性及其配置; 绿化基质和防渗漏技术开发; 园林与景观开发技术; 生态系统维护与集成技术等^{1, 3, 5]}。

本研究结合生态学原理考虑屋顶绿化系统的生境、植物种类、水分和营养循环等问题, 对广州市区自然生长的屋顶植物进行调查分析, 配置相应的植物组合, 设计适于屋顶绿化的生态系统箱、配

制相应土壤并进行技术集成, 观测其生长和隔热效应。以期从理论与实践上探讨屋顶绿化中存在的主要问题。

1 材料与方法

1.1 屋顶自然生长植物调查

在广州市市属 8 个区及郊区 (本次调查选择了番禺区) 选择有代表性的地点调查统计屋顶自然生长的植物种类, 每个区选择 2 个以上的地点进行调查统计, 选择调查的地点同时考虑环境的多样性, 包括市中心和市郊, 老城区和新城区, 污染轻微、中等和严重的一类区、二类区和三类区 (参照根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》制定的《环境空气质量标准》(GB 3095—1996), 将有关地区按功能划分为三种类型的区域), 及周围植物丰富、一般和很少的地点, 观察并记录所有自然生长于屋顶的植物种类、数量、生长状况及可见的生态生物学特性, 比较不同地点和环境的植物种类及数量差异^[6]。

1.2 屋顶绿化生态系统配置试验

2003 年 1 月起在中国科学院华南植物园研究生楼顶 (共三层, 周边为楼群) 设立试验点, 包括空白对照区、黑网荫棚对照区、生态隔热层对照区、普通土壤种植区、生态系统箱种植区等 5 个小区。每个小区的面积均为 440 cm×420 cm, 刚好为一个房间面积。试验至 2004 年 12 月结束。在普通土壤种植区和生态系统箱种植区设立灌溉系统, 但两年间只是每年最干旱的 11 月灌溉一次, 灌至内外层箱体间充满水分为止。

空白对照区: 为光裸屋顶, 进行屋顶和三楼室内的温度和湿度测定。

基金项目: 广东省科技攻关项目 (2002C32205; 2005B60301001)

作者简介: 任海 (1970 -), 男, 研究员, 博士, 主要从事恢复生态学和景观生态学研究。Tel: +86-20-37252916; E-mail: renhai@scib.ac.cn

收稿日期: 2007-01-15

黑网荫棚对照区：为光裸屋顶上 80 cm 处加盖透光率为 30%的黑尼龙网。进行屋顶与黑网间、三楼室内的温度和湿度测定。

生态隔热层对照区^[7]：在屋顶从下至上依次叠放泡沫塑料层（10 cm）、油毡层、鹅卵石层、苔藓层、鹅卵石层（其中苔藓层居于两鹅卵石层之间，鹅卵石层厚 3~10 cm、苔藓层厚 2~3 cm）。单位承重小于 6 kg/m²。进行屋顶与泡沫塑料层间、三楼室内的温度和湿度测定。

普通土壤种植区：在屋顶用红砖和水泥做成长方形种植池，中间分隔为 8 个小样方种植筛选的植物（表 1），泥土用普通红壤土（与下述生态系统箱

中的土取自同一种植地）。单位承重小于 10 kg/m²。进行种植池内温度和土壤水分、三楼室内的温度和湿度测定。

生态系统箱种植区：由自行设计的 32 个生态系统箱串连铺设于楼顶。每个生态系统箱均由无盖的内外层水箱相套体、复合土壤层、过滤与根际布水系统、支架和开放式集排供水系统五部分构成。内层水箱有边沿，套入到外层水箱中，在内、外层水箱间有支架。内层水箱底部开有孔。外层水箱四个侧面具有两个人水口和两个出水口，并且出水口稍高于入水口。过滤与根际布水系统由高密度海绵条和低密度海绵板组成。低密度海绵板平铺于内层水箱底部，高密度海绵条通过内层水箱底部的孔嵌入到低密度海绵中^[8]。复合土壤层平铺于低密度海绵板上，其基本组成泥炭土 45%、锯木屑 15%、椰糠 10%、珍珠岩 5%、陶粒 5%、红壤土 20%、少量复合肥及保水剂，其中陶粒铺于底层，其余材料混合均匀后铺于陶粒上方^[9]。在箱内种植适生植物（表 2）。单位承重小

表 1 不同环境调查到地点数和屋顶自然生长的植物种数

Table 1 Number of investigation sites in different environment and plant species recorded

环境	调查地点数	植物种数
三类区：污染严重、周围植物少	5	21
二类区：污染中等、周围植物一般	17	73
一类区：污染轻微或无、周围植物丰富	4	111

表 2 生态系统箱种植区内栽培植物种类及生长情况

Table 2 Plant species and growth status on ecosystem box

种 类	总株数	存活株数	死亡株数	存活率%	存活植株的生长状况*
假连翘 <i>Duranta repen</i>	20	20	0	100	较好
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	100	100	0	100	较好
玉吊钟 <i>Kalanchoe fedtschenkoi</i> cv. 'Rosy Dawn'	20	20	0	100	较好
管叶伽蓝菜 <i>Kalanchoe tubiflora</i>	20	20	0	100	较好
山指甲 <i>Ligustrum sinense</i>	40	32	8	80	小部分枯死
红果仔 <i>Eugenia uniflora</i>	20	16	4	80	较好
六月雪 <i>Serrissa foetida</i>	50	32	18	64	大部分枯死
九里香 <i>Murraya paniculata</i>	40	24	16	60	大部分枯死
毛稔 <i>Melastoma sanguineum</i>	40	24	16	60	一般
大红花 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i> var. <i>rubro-plenus</i>	20	12	8	60	小部分枯死
野牡丹 <i>Melastoma candidum</i>	80	40	40	50	小部分枯死
薜荔 <i>Ficus pumila</i>	20	10	10	50	大部分枯死
钝叶草 <i>Stenotaphrum helferi</i>	100	50	50	50	大部分枯死
森特钝叶草 <i>Stenotaphrum secundatum</i>	100	50	50	50	大部分枯死
长寿花 <i>Kalanchoe blossfeldiana</i>	70	34	36	49	较好
桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	100	48	52	48	大部分枯死
黄花马缨丹 <i>Lantana lilacina</i>	40	16	24	40	大部分枯死
地稔 <i>Melastoma dodecandrum</i>	100	40	60	40	较好
紫花马缨丹 <i>Lantana montevidensis</i>	40	16	24	40	大部分枯死
短叶虎尾兰 <i>Sansevieria trifasciata</i> cv. 'Hahnii'	40	16	24	40	较好
小蚌花 <i>Rhoeo spathacea</i> 'Compacta'	50	20	30	40	较好
野花生 <i>Arachis pintoi</i>	60	20	40	33	小部分枯死
吊竹梅 <i>Zebrina pendula</i>	100	0	100	0	大部分枯死
紫竹梅 <i>Setcreasea pallida</i> cv. "Purple Heart"	50	0	50	0	枯死
假俭草 <i>Eremochloa ophiuroides</i>	100	0	100	0	枯死
田角皂 <i>Smithia sensitiva</i>	50	0	50	0	枯死
芦荟 <i>Aloe vera</i> var. <i>chinensis</i>	50	0	50	0	枯死
蔓九节 <i>Psychotria serpens</i>	20	0	20	0	枯死

*生长状况：分较好，小部分（枝叶）枯死、大部分（枝叶）枯死和枯死四级。

于 8 kg/m^2 。进行箱内土壤层温度和水分、三楼室内的温度和湿度测定。

在实验过程中,由广东职业技术交通学院设计开发了基于单片机控制的屋顶隔热层生态环境多路数据自动采集系统。该采集系统分为前向输入通道、控制主板和后向输出控制部分。其中前向输入通道包括环境温度传感器、空气湿度传感器和土壤含水率传感器、A/D转换器及按键设置三个部分。控制主板由 AT89C52 单片机、LCD 显示模块、数据存储电路、打印输出端口及声光预警电路等组成。后向输出控制模块包括微型打印机和与 PC 机的远程数据交换等两个部分^[10]。该系统测定量的波动由传统测量方法校正。

2 结果与分析

2.1 广州市屋顶自然生长植物情况

通过对广州市属 8 区及番禺区共 26 个地点的屋顶自然生长的植物调查统计,共记录热带亚热带维管植物 49 科 109 属 128 种,其中:蕨类植物 6 科 6 属 10 种,种子植物共 43 科 103 属 118 种(其中,双子叶植物共 39 科 80 属 95 种,单子叶植物共 4 科 23 属 23 种)。记录到植物种类较多的科为菊科(16 种)、禾本科(12 种)、桑科(8 种)、景天科(7 种)、茜草科(5 种)和鸭跖草科(5 种)。这些植物中,乡土植物和外来植物分别为 89 种和 39 种,木本、草本和藤本植物各有 15、94 和 19 种。

在所调查的 9 个区中,植物种类从多到少分别为:天河区(6 个点,87 种)、东山区(3 个点,51 种)、海珠区(4 个点,41 种)、白云区(1 个点,31 种)、黄埔区(1 个点,25 种)、越秀区(5 个点,24 种)、芳村区(3 个点,17 种)、荔湾区(2 个点,11 种)、番禺区(1 个点,8 种)。市属 8 区中天河区最多,荔湾区最少。

对受污染程度不同的环境屋顶自然生长的植物进行统计分析,结果如表 1 所示。从表中可以看出,调查到屋顶自然生长的植物种类数量与环境受污染程度成反比,而与周围植物的多少成正比。

通过调查发现,与地上自然生长的植物相比,屋顶自然生长的植物由于长期适应屋顶的极端环境,形成了一些独特的生态生物学特征,主要有:1)植株较矮小,叶片较短较窄,角质层较厚,有的肉质化,根系较发达,在缝隙中穿透能力强;2)通常耐干旱、耐贫瘠、耐热抗寒;3)生长时间较短(以种子存在的时间较长,出苗较晚,落叶较早)、开花结实时间较短(开花快、结实快,但时间较晚,持续时间短),繁殖能力强(可以种子或孢子进行有性繁殖,也可以通过营养体进行无性繁殖),结

实量较大;另外,不少屋顶植物还可以通过风力、动物或其它媒介将地面植物的种子或繁殖体传播到屋顶进行繁殖。

2.2 屋顶人工配置植物生长情况

根据上述调查结果,并以相应的生态生物学特征筛选,在屋顶试验区的普通土壤种植区、生态系统箱种植区进行植物配置,每个区都种植 28 种植物 1540 株(表 2)。

经过 2 年的观测发现,在普通土壤种植区内,2 年内原来种植的植物全部死亡,但从土壤种子库生长或自然传播进了 31 种未种植的植物,其中长势较好且个体较多的种类为假臭草、夜香牛、水蜈蚣、石芒草等 4 种(下页表 3)。

在生态系统箱内,2 年后存活 22 种植物 660 株。100%存活率的植物种类为假连翘、百喜草、玉吊钟和管叶伽蓝菜。存活植物中植株长势特别好的种类是地稔、红果仔、长寿花、短叶虎尾兰、小蚌花、玉吊钟和管叶伽蓝菜。而吊竹梅、紫竹梅、假俭草、田角皂、芦荟、蔓九节等 6 种全部死亡。仅个别箱内自然传播或从土壤种子库中长出了飞扬草、铺地蜈蚣、白花蛇舌草等个别植株。

可见,在广州市屋顶自然生长的植物种类种植在不同地方,其结局不同。从理论上讲,能直接在光屋顶上生长的植物应该能在普通土壤种植区内生存,但结果是全部死亡,这可能与这些植株来自苗圃而不是从屋顶自然生长起来有关,也可能与用普通土壤但未浇水有关。在生态系统箱内,因为有适当的土壤和水分而绝大多数可以生存,这说明这些植物有适生的土壤和水分环境(下页图 1)。那些在屋顶自然生长的植物群落(或植株),是在特殊的生境条件下形成的类似于自然植被演替的“偏途顶极”,它们的形成要经过生活史的整个环节才能形成,而不能从植株开始。此外,在普通土壤种植区和生态系统箱内从土壤种子库或自然传入的植物种类和数量也不相同,也与各自的土壤营养和水分不同有关^[11-12]。

2.3 屋顶各类生态系统的环境效应

同期进行的空白对照区、黑网荫棚对照区、生态隔热层对照区、普通土壤种植区、生态系统箱种植区等 5 个小区的屋顶与室内温湿度观测表明:各试验区楼顶与室内湿度基本相同,未达显著性差异。但温度差别明显(下页图 2)。热季的 4—10 月间,光裸屋顶的室内温度平均比后四个区分别高 1.1、0.8、1.2、1.4℃。最热的 7 月则分别高 1.4、1.5、1.5、1.6℃。这说明各类屋顶遮隔处理均可减轻夏季热能从屋顶传到室内的量。特别指出,植物处理还具有较好的景观效果。

表 3 在普通土壤种植区自然入侵的植物种类及生长状况

Table 3 Plant species and growth status on ordinary planting section on the roof

种名	生活型	株数	生长状况*
垂叶榕 (<i>Ficus benjamina</i>)	木本	1	较好
小叶海金沙 (<i>Lygodium scandens</i>)	草本	1	较好
假臭草 (<i>Eupatorium catarium</i>)	草本	常见	较好
夜香牛 (<i>Vernonia cinerea</i>)	草本	常见	较好
鸭跖草 (<i>Commelina communis</i>)	草本	偶见	较好
水蜈蚣 (<i>Kyllinga brevifolia</i>)	草本	常见	较好
石芒草 (<i>Arundinella nepalensis</i>)	草本	常见	较好
白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>)	草本	偶见	较好
铺地蜈蚣 (<i>Lycopodium cernuum</i>)	草本	1-2	一般
华南毛蕨 (<i>Cyclosorus parasiticus</i>)	草本	1	一般
酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>)	草本	偶见	枯死
红花酢浆草 (<i>Oxalis corymbosa</i>)	草本	偶见	枯死
番石榴 (<i>Psidium guajava</i>)	木本	1	一般
毛稔 (<i>Melastoma sanguineum</i>)	木本	偶见	一般
田基黄 (<i>Hypericum japonicum</i>)	草本	偶见	一般
叶下珠 (<i>Phyllanthus urinaria</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
飞扬草 (<i>Euphorbia hirta</i>)	草本	2-3	一般
三点金 (<i>Desmodium triflorum</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
猪屎豆 (<i>Crotalaria pallida</i>)	木本	偶见	较差, 部分枯死
耳草 (<i>Hedyotis auricularia</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
白花蛇舌草 (<i>Hedyotis diffusa</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
三叶鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>)	草本	偶见	枯死
旱莲草 (<i>Eclipta prostrata</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
加拿大蓬 (<i>Erigeron canadensis</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
野甘草 (<i>Scoparia dulcis</i>)	草本	常见	一般, 部分枯死
母草 (<i>Lindernia crustacea</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死
长蒴母草 (<i>Lindernia cordifolia</i>)	草本	偶见	一般
海芋 (<i>Alocasia macrorrhiza</i>)	草本	1	一般
碎米莎草 (<i>Cyperus iria</i>)	草本	偶见	一般
两耳草 (<i>Paspalum conjugatum</i>)	草本	常见	一般, 部分枯死
鼠尾草 (<i>Sporobus elongatus</i>)	草本	偶见	一般, 部分枯死

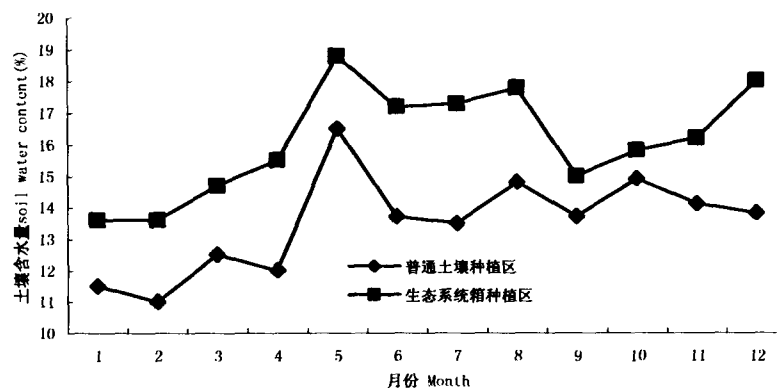


图 1 普通土壤种植区和生态系统箱种植区土壤含水量的比较

Fig. 1 The water content of soil of ordinary planting on the roof and ecosystem box

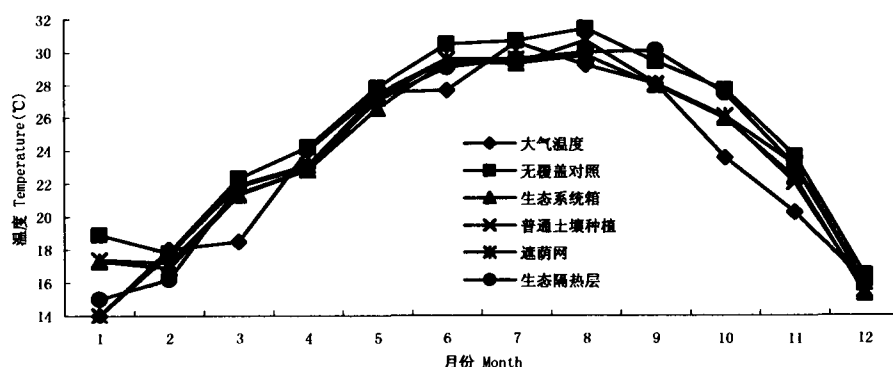


图2 不同处理的降温效应比较

Fig. 2 The heat insulation effects of different treatment

3 结论

调查发现广州市屋顶自然生长的维管植物 49 科 109 属 128 种, 植物种类较多的科为菊科、禾本科、桑科、景天科、茜草科和鸭跖草科。屋顶自然生长的植物较地上自然生长的植物矮小, 叶片较小, 根系较发达, 根冠比较大, 这是屋顶植物长期适应屋顶特殊环境的结果。

屋顶栽培试验表明, 特别适于华南屋顶生长的植物种类是地毡、红果子、长寿花、短叶虎尾兰、小蚌花、玉吊钟和管叶伽蓝菜等种类。

开发的屋顶绿化生态系统箱、植物配置、土壤配方等集成后, 可以系统地解决屋顶绿化中存在的主要技术难题, 可以大面积推广。

在屋顶建立黑网荫棚、生态隔热层、普通土壤种植区、生态系统箱种植区均可取得夏季降低室内温度的效果, 生态隔热层和生态系统箱具有成本低、易维持、隔热好、景观美的效果。

致谢: 华南植物园邢福武研究员帮助鉴定部分标本, 敖惠修、束文圣、李跃林、谢振华、王贵恩等同志参加试验和调查, 特此感谢!

参考文献:

- [1] 赵定国. 屋顶绿化美化与 21 世纪城市新景观[J]. 草原与草坪, 2001, 93(2): 20-21.
ZHAO Dingguo. The virescence and beautification of roof, new landscape of cities in the 21th century[J]. Grassland and Turf, 2001, 93(2): 20-21.
- [2] 徐世玲. 屋面绿化: 上海居住区环境绿化初探[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(1): 129-134.
XU Shiling. Roof greenery-discussion on greening of environment for Shanghai's residential areas[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30(1): 129-134.

- [3] KIKUO A. Gardens in the sky[J]. Pacific Friend, 2002, 30(6): 2-7.
- [4] WALTON A, CHENG A, YEUNG W. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-Part I: comparison with field data[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 3601-3613.
- [5] 黄金锦. 屋顶花园设计与营造[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 88-94.
HUANG Jinqi. Design and construction of roof garden[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1994: 88-94.
- [6] 简曙光, 谢振华, 敖惠修, 等. 广州市屋顶自然生长的植物[J]. 中国野生植物资源, 2004, 23(6): 35-37.
JIAN Shuguang, XIE Zhenhua, AO Huixiu, et al. The plant species naturally growing on the roof of buildings in Guangzhou city[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2004, 23(6): 35-37.
- [7] 任海, 彭少麟, 刘世忠, 等. 屋顶绿化长效轻型基质配方: 中国, CN03126785.8[P]. 2003.12.10
REN Hai, PENG Shaolin, LIU Shizhong, et al. The composition of long available and light soil for roof greening: Chinat, CN03126785.8[P]. 2003.12.10.
- [8] 束文圣, 杨兵, 任海, 等. 一种绿化生态箱: 中国, CN03126539.1[P]. 2003-10-22.
SHU Wensheng, YANG Bing, REN Hai, et al. Roof greening ecosystem box: China, CN03126539.1[P]. 2003-10-22.
- [9] 任海, 彭少麟, 李跃林, 等. 生态环保型屋顶隔热层: 中国, CN03114025.4[P]. 2003-09-24.
REN Hai, PENG Shaolin, LI Yuelin, et al. Ecological layer of separating heat: China, CN03114025.4[P]. 2003-09-24.
- [10] 王贵恩, 洪添胜, 陆永超, 等. 屋顶隔热层生态环境多路数据自动采集系统[J]. 华南农业大学学报, 2006, 27(2): 108-110.
WANG Guen, HONG Tiansheng, LU Yongchao, et al. Multi-channel acquisition system in ecological environment on the roof gardening[J]. Journal of South China Agricultural University, 2006, 27(2): 108-110.
- [11] PANAYIOTIS N, PANAYIOTA T, IOANNIS C. Soil amendments reduce roof garden weight and influence the growth rate of Lantana[J]. HortScience, 2003, 38: 618-622.
- [12] RAISCH W. Conditions for a functioning roof garden[J]. Rainwater International, 2001(1): 10-14.

Researching and developing ecosystem box of roof greenery

REN Hai, JIAN Shuguang, ZHANG Qianmei, LIU Shizhong, SHEN Weijun

South China Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences; Guangdong Key Laboratory of Digital Botanical Garden, Guangzhou 510650, China.

Abstract: An extensive investigation on the plant species naturally growing on the building roofs of Guangzhou city was conducted in 2003. We found 128 vascular plant species in total, which belong to 49 families and 108 genera. Those plant species has unique biological and ecological characteristics that are suitable roof habitats. 16 plant species were prior selected for roof gardening. Based on adaptive ability of these roof plants, we designed an ecosystem box of roof greenery, develop the roof soil and combined them together. Further to observe plant growth and heat insulation effects. Compared with control of barren roof, overshadow net, ecological heat insulation layer and ordinary planting on the roof, ecosystem box possessed low cost, easy maintenance, high heat insulation, and good landscape effects.

Key words: roof greenery; ecosystem box; ecological heat insulation layer; heat island effect