

# 屋顶绿地碳固定潜力的研究<sup>\*</sup>

陈爱葵<sup>1</sup>, 陆 剑<sup>2</sup>, 袁剑刚<sup>3</sup>, 徐亚幸<sup>1</sup>, 杨中艺<sup>3</sup>

(1. 广东省第二师范学院应用生态学实验室, 广东 广州 510310;

2. 广东工业大学建筑与城市规划学院, 广东 广州 510090;

3. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 屋顶绿化因为能减轻城市内涝、热岛效应和空气污染等一系列城市化带来的负面影响, 在很多国家和地区已经得到推广和应用。通过野外调查对10个用草坪草建植的简单式屋顶绿地的碳固定潜力进行评价, 并探讨影响其碳固定能力的各种因子。同化箱试验的结果表明, 屋顶绿地在白天可以通过吸收和固定CO<sub>2</sub>, 降低其周围空气中的CO<sub>2</sub>含量。在多云清冷的上午, 由朝鲜结缕草或狗牙根为主建植而成的屋顶植被在1 h内吸收的CO<sub>2</sub>可达0.46 g·m<sup>-2</sup>, 在5 min内同化箱里CO<sub>2</sub>体积分数的降低幅度可达42% (162 × 10<sup>-6</sup>); 地上部分碳储量试验的结果表明, 以草坪草为主建成的屋顶绿地植被的地上部平均固定的有机碳为92.55 g/m<sup>2</sup>。故屋顶绿地是城市内小型碳库, 具有一定的固碳作用。同时, 基质厚度与草坪草地上部分的有机碳含量呈显著的正相关, 也说明基质厚度可能是影响屋顶绿地碳固定潜力的重要因素。

**关键词:** 屋顶绿地; 碳固定; 碳通量

中图分类号: Q945.11 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)01-0089-07

## Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs

CHEN Aikui<sup>1</sup>, LU Jian<sup>2</sup>, YUAN Jiangang<sup>3</sup>, XU Yaxing<sup>1</sup>, YANG Zhongyi<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Applied Ecology, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology,  
Guangzhou 510090, China;

3. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Green roofs, an increasingly visible component of urban environments, are becoming increasingly popular in many countries and have attracted much attention in China. The interest for green roofs has been related to their benefit as the crucial determinants of energy flux and of buildings' water retention, so as to reduce stormwater runoff volumes and peak flows, mitigate effect of urban heat island and also provide urban habitats to improve urban biodiversity. However, there is rare research focusing on its carbon sequestration potential and the mitigation of climate change. In present study, two experiments were conducted on 10 green roofs with the objective of evaluating carbon accumulation potential of green roofs and the factors that affect green roof carbon storage. In the chamber experiment, a green roof was able to absorb CO<sub>2</sub> as high as 0.46 g per m<sup>2</sup> in one hour, and CO<sub>2</sub> concentration declined as much as 162 × 10<sup>-6</sup> over 5 minutes. Mean decrease of CO<sub>2</sub> concentration and CO<sub>2</sub> exchange rate in the chamber over

\* 收稿日期: 2014-03-01

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2012010008213)

作者简介: 陈爱葵(1962年生), 女; 研究方向: 环境生物学、细胞生物学; 通讯作者: 杨中艺, 袁剑刚;

E-mail: adsyzy@mail.sysu.edu.cn; yuanjg@mail.sysu.edu.cn

the measurement period were  $77.8 \times 10^{-6}$  and  $-0.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively. However, there was a high degree of variability because the photosynthesis rate of green roof plant greatly is dependent on light intensity and temperature, which change from time to time. Decrease of  $\text{CO}_2$  concentrations ranged from  $23.50 \times 10^{-6}$  to  $162.00 \times 10^{-6}$ , and  $\text{CO}_2$  exchange rates ranged from  $-0.06$  to  $-0.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  in the chamber. In the aboveground harvest experiment, data of the carbon reserve investigations showed that these green roofs stored an average of  $92.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  in aboveground biomass with also a wide variability (from  $39.47$  to  $138.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), depended on the harvested biomass and carbon content of the biomass collected from the studied green roofs. In addition, it is notable that a significant correlation ( $R^2 = 0.93$ ) was observed between plant carbon content and substrate depth, while the correlations between substrate nutrient variables and carbon content was not statistically significant. Overall, the experimental results suggested that green roof can reduce the  $\text{CO}_2$  concentration in surrounding environment by absorbing  $\text{CO}_2$  in the daytime and act as a small carbon sink in urban area. It is likely that substrate depth may have big impacts on green roof carbon sequestration potential. Additional sophisticated research should be needed to evaluate the factors that contribute to the carbon sequestration potential of green roofs.

**Key words:** green roofs; carbon sequestration; canopy  $\text{CO}_2$  flux

大气中二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 和其它温室气体水平的升高被认为是全球气候变暖的重要原因。有研究报导地球表面的平均温度自 19 世纪以来已经升高了  $0.3 \sim 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  [1]。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2007 年的报告预测, 到 2100 年, 全球平均气温将上升  $1.8 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , 海平面升高  $18 \sim 59 \text{ cm}$ 。城市森林 (绿地) 在降低大气中温室气体水平方面起到了重要的作用。城市绿地的植物可以通过光合作用固定  $\text{CO}_2$ , 同时减少城市空调系统的能耗和  $\text{CO}_2$  的排放量, 从而有效地降低大气中  $\text{CO}_2$  和其它温室气体的水平 [2-3]。Nowak and Crane [1] 估计了全美国城市森林平均的碳固定量, 发现其碳固定的密度为  $25.1 \text{ t/hm}^2$ 。

屋顶绿地作为渐受关注的城市绿地类型之一, 在很多国家和地区受到重视。屋顶绿地可分为花园式 (型) 屋顶绿地 (intensive green roof) 和简单式 (型) 屋顶绿地 (extensive green roof) 两大类。花园式屋顶绿地通常采用很厚的植物生长基质和丰富的植物种类, 具有与地面花园一样的景观效果和生态功能, 并为人们提供活动空间。简单式 (型) 屋顶绿地, 相对花园式屋顶绿地来说通常采用较浅的植物生长基质、较少的植物种类和粗放的管养水平, 其建植的目的以提供实际的生态效益为主。该类屋顶绿地的构成较为简单, 自屋顶表面上通常包括阻根层、排水层、过滤层、植物生长基质层和低矮的植被层等, 因为其结构简单、造价较低、生态效益高且推广潜力大, 成为屋顶绿地研究的重点。目前对简单式屋顶绿化生态效益的研究集中于其对太阳辐射的吸收和雨水的保持从而有效地

减少热岛效应和城市内涝 [4], 以及提供生境、改善市区内物种多样性等方面 [5]。迄今为止对屋顶绿地的碳固定潜力及其对气候变化影响的研究仍较少。

光合作用把  $\text{CO}_2$  从大气转入植物体中储存, 植物体中的碳通过植物的凋落物和渗出物进入土壤中。Getter et al [6] 在美国密歇根州立大学的研究表明屋顶绿地是一类潜在的碳库, 在为期两年的试验中, 植物地上部分平均每平方米可固定  $168 \text{ g}$  碳, 根系和基质的平均固碳量分别  $160$  和  $300 \text{ g/m}^2$ , 他们估计底特律市可绿化的屋顶面积为  $219$  英亩 ( $1 \text{ 英亩} = 4\,046.856 \text{ m}^2$ ), 如果全部进行绿化则可从大气中吸收  $55\,000 \text{ t CO}_2$ 。另一个在香港开展的研究观测了屋顶绿地对其周边空气中  $\text{CO}_2$  浓度的影响, 结果表明在有阳光的白天, 屋顶植被固定的  $\text{CO}_2$  是其放出的 9 倍, 故屋顶绿地可使其周边空气中的  $\text{CO}_2$  浓度降低  $2\%$  [7]。

虽然屋顶绿地表现出一定的碳固定的潜力, 植物种类、基质厚度及配比和管理方式等因素均可能影响其净固定量。本研究的目的是通过野外调查评价现有屋顶绿地的碳固定潜力, 并对影响其碳固定能力的因子进行探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地的选择

因为本地区的简单式屋顶绿化选用的地被植物以草坪草为主, 所以本研究选择 10 个用草坪草建植的屋顶绿地作为调查和研究的对象, 其中有 9 个屋顶绿地的主要建群种为朝鲜结缕草 (*Zoysia*

tenuifolia), 只有 1 个以狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 为建群种。各绿地的浇水管理方法相近, 其概况如表 3-1 所示。

### 1.2 同化箱试验

用冠层同化箱 (CPY-4, 高 145 mm, 底面直径 146 mm) 连同 CO<sub>2</sub> 气体分析仪 (EGM-4) 对各样地朝鲜结缕草植被的 CO<sub>2</sub> 通量进行测定 (图 1)。将同化箱底部的钢环压入绿地表面使同化箱形成密闭的空间, 然后用 CO<sub>2</sub> 气体分析仪对箱内即时的 CO<sub>2</sub> 体积分数、CO<sub>2</sub> 交换速率 (同化速率) 和光合有效辐射 (PAR) 进行为期 5 min 连续的监测, 每分钟记录一次数据。为了保证测定时外部条件基本一致, 数据的收集于 2012 年 2 月 1 日至 2012 年 3 月 15 日之间分别选择天气条件相似的日期在 10:00-11:00 之间完成 (表 1)。视各屋顶绿

地的面积大小, 每个屋顶选取 4~6 个监测点。



图 1 冠层同化箱和 CO<sub>2</sub> 气体分析仪  
Fig. 1 Image of canopy assimilation chamber and environmental gas analyzer for CO<sub>2</sub>

表 1 调查屋顶绿地的概况

Table 1 Locations and descriptions of the tested green roofs

编号	每天浇水次数	施肥情况	调查日期	调查时的天气	用于绿地建植的主要植物种类
1	2	不施肥	2012-03-06	多云, 16~20 °C	朝鲜结缕草、假连翘、福建茶、红龙草
2	2	不施肥	2012-02-22	多云有小雨, 16~19 °C	朝鲜结缕草、虎尾兰、四季海棠、彩叶草
3	2	不施肥	2012-03-01	多云, 16~19 °C	朝鲜结缕草、红龙草、假连翘
4	2	不施肥	2012-02-09	多云, 15~17 °C	朝鲜结缕草、红龙草
5	2	不施肥	2012-03-13	多云有小雨, 12~15 °C	朝鲜结缕草、龙船花、光叶野牡丹、假连翘、红龙草、福建茶、马缨丹
6	2	不施肥	2012-02-17	多云, 12~16 °C	朝鲜结缕草
7	2	不施肥	2012-03-15	多云, 17~19 °C	朝鲜结缕草、沿阶草、假花生、红龙草、假连翘
8	2	不施肥	2012-02-21	多云, 17~19 °C	朝鲜结缕草、韭兰、胡椒木
9	2	不施肥	2012-02-06	多云, 17~19 °C	朝鲜结缕草、红龙草、花叶假连翘
10	2	不施肥	2012-02-16	多云, 16~19 °C	狗牙根、光叶野牡丹、红龙草、福建茶、假连翘

### 1.3 植物地上部碳储量试验

用同化箱测定后, 在同一样点用直径为 10 cm 的采样环对草坪草植被的地上部分进行采样。环内所有的植株地上部分均剪下并收集于纸质样袋中, 在 70 °C 的烘箱里烘 1 周至恒质量后用磨粉机磨碎, 过 60 目筛后存放于干燥器中。用 CHNS 元素分析仪 (The PerkinElmer 2400 Series) 对样品的有机碳含量进行测定。样品的有机碳积累量为样品干质量和样品有机碳含量的乘积。由于各屋顶绿地割草时间不同, 采样时各绿地草坪草植株的高度和植被厚度并不一致, 故在采样时也同时测量各样点植被的厚度, 样点的植被厚度为随机选取的 5 个植株株高的平均值。植被厚度直接影响到所采集样品的地上部生物量。

### 1.4 基质样品的采集和测定

在采集地上部分的同一地点采集土壤样品, 风干过筛后, 测定其各项理化性质: pH 值采用电位测定法测定<sup>[8]</sup>, 电导率用电导率仪测定<sup>[8]</sup>, 有机质采用热稀释 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 法测定<sup>[9]</sup>、全氮采用凯氏定氮法测定<sup>[9]</sup>、全磷采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消解, 钼锑抗比色法测定<sup>[9]</sup>、全钾采用氢氧化钠熔融法测定<sup>[9]</sup>。

### 1.5 统计分析

使用 SPSS 13.0 软件进行方差分析, 评价不同屋顶绿地碳固定量的差异显著性, 并以地上部分样品的碳含量为因变量、基质的理化参数为自变量进行线性回归分析, 评价基质特性对植株地上部分碳含量及碳固定潜力的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 同化箱试验

同化箱试验的结果如表 2 所示, 10 个屋顶绿地上设置的同化箱中录得的平均  $\text{CO}_2$  体积分数降幅、下降比例和  $\text{CO}_2$  交换速率分别为  $77.8 \times 10^{-6}$ 、18.1% 和  $-0.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。但各指标内数值的差异较大,  $\text{CO}_2$  体积分数降幅在  $23.50 \times 10^{-6}$  和

$162.00 \times 10^{-6}$  之间, 下降比例在 5.9% ~ 42%,  $\text{CO}_2$  交换速率在  $-0.06 \sim -0.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  之间。因为都选择了多云天气进行测定, 光合有效辐射值均较低 ( $170 \sim 751 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。各绿地因割草时间不一致其植被厚度也不同, 在 2.1 ~ 3.5 cm 之间。由此可见, 在气温较低的多云的上午, 屋顶朝鲜草植被对的  $\text{CO}_2$  吸收速率大于释放速率, 所以有效降低了绿地周边的  $\text{CO}_2$  浓度。

表 2 同化箱试验中各屋顶植被的碳通量参数<sup>1)</sup>

Table 2 Canopy  $\text{CO}_2$  flux of green roof vegetation in the chamber experiment

屋顶	$\varphi(\text{CO}_2)$ 的降幅/ $10^{-6}$	$\varphi(\text{CO}_2)$ 下降比例/%	$\text{CO}_2$ 交换率/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	光合有效辐射变化范围/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	植被厚度/cm
1	132.0 ± 32.1	32.9 ± 7.6	-0.43 ± 0.08	342 ~ 708	3.5
2	24.5 ± 11.4	6.1 ± 2.8	-0.08 ± 0.04	348 ~ 595	3.5
3	162.0 ± 27.2	42.0 ± 6.6	-0.46 ± 0.05	292 ~ 465	2.5
4	27.2 ± 3.8	7.2 ± 0.9	-0.12 ± 0.03	287 ~ 452	3
5	115.5 ± 17.1	28.1 ± 4.2	-0.32 ± 0.06	190 ~ 304	2.1
6	141.2 ± 29.4	36.8 ± 7.3	-0.43 ± 0.09	170 ~ 498	3.5
7	69.0 ± 14.4	17.1 ± 3.4	-0.25 ± 0.06	217 ~ 437	2.5
8	23.5 ± 14.2	5.9 ± 3.6	-0.06 ± 0.05	188 ~ 281	2.5
9	30.6 ± 12.3	7.8 ± 3.1	-0.09 ± 0.03	218 ~ 751	2.5
10	45.3 ± 13.9	9.2 ± 2.8	-0.12 ± 0.02	170 ~ 380	3.5
mean	77.1	18.1	-0.24		

1) 数据采集时间为 5 min

### 2.2 植物地上部碳储量试验

所研究的 10 个屋顶绿地地上部生物量中平均固定的有机碳总量为  $92.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 但 10 个屋顶植被的固碳量差异较大, 介于  $39.47 \sim 138.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (图 4), 整体差异显著 ( $P < 0.05$ )。植被单位面积的固碳量主要取决于生物量干质量和其有机碳含量, 因为各绿地的割草时间和频度不同, 采样时各绿地的植被厚度差异较大, 获取样品的生物量干质量也因而出现较大的差异 ( $0.93 \sim 3.16 \text{ g}$ , 图 2), 各样品的有机碳含量则介于 31.27% ~ 37.83% (图 3)。

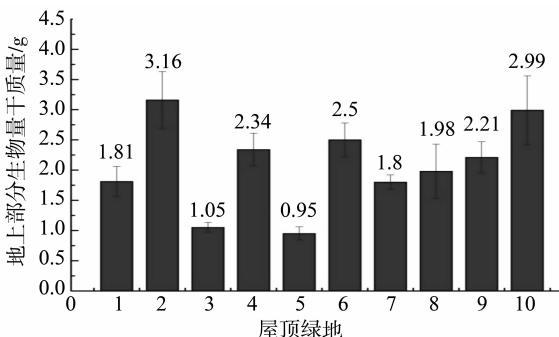


图 2 各屋顶绿地上部生物量样品的干质量  
Fig. 2 Plant biomass (dry weight) of aboveground samples on the tested green roof

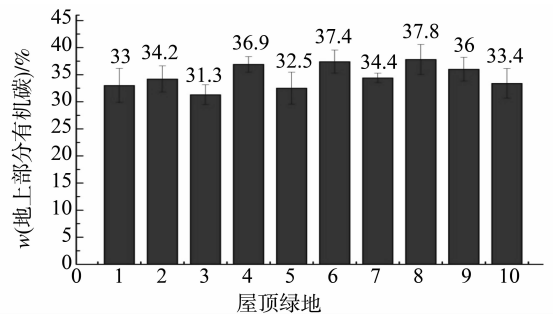


图 3 各屋顶绿地上部生物量样品的有机碳含量  
Fig. 3 Organic carbon content of aboveground samples on the tested green roof

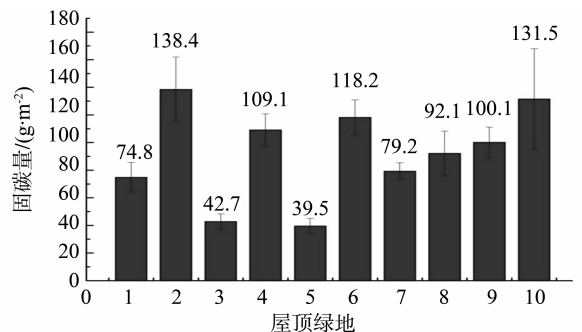


图 4 各屋顶绿地的单位面积有机碳固定量  
Fig. 4 Plant aboveground organic carbon on the tested green roof

各屋顶绿地的基质的理化性质如表 3 所示,所调查 10 个绿地的基质 pH 值在 5.69 ~ 8.21,电导率在 42.4 ~ 186.9  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,基质厚度在 6.15 ~ 7.25 cm。参照土壤养分分级的标准<sup>[10]</sup>,基质全氮含量除了 1、2 号绿地达到丰富水平外,其余均处于缺乏水平;全磷含量除了 2 号绿地为中等水平外,其余均处于缺乏或甚缺乏水平;全钾含量均处于缺乏水平;2 号绿地的有机质含量达到甚丰富水平,1 号达到丰富水平,3、4、6、8 和 10 号处于中等水平,5、7 和 9 号处于缺乏水平。

表 3 各屋顶绿地基质的理化性质

Table 3 Physical and Chemical Properties of Substrate

屋顶 绿地	pH 值	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	w(有机质)/ %	w(全氮)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	w(全磷)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	w(全钾)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	基质厚度/ cm
1	6.53 ± 0.01	68.0 ± 1.6	4.29 ± 0.07	1294.1 ± 29.3	598.8 ± 8.6	7 950.8 ± 145.3	6.5
2	8.21 ± 0.06	186.9 ± 21.1	7.56 ± 0.05	3130.6 ± 53.2	873.3 ± 19.7	8 575.4 ± 383.5	6.5
3	6.48 ± 0.00	50.2 ± 4.4	1.91 ± 0.09	765.2 ± 32.2	266.3 ± 80.3	6 391.7 ± 286.6	6.15
4	6.49 ± 0.03	42.4 ± 2.5	2.00 ± 0.14	524.3 ± 15.6	404.3 ± 133.6	9 218.0 ± 220.4	7
5	6.44 ± 0.01	46.4 ± 2.5	0.85 ± 0.06	323.5 ± 20.6	80.5 ± 16.5	7 904.7 ± 424.0	6.25
6	7.12 ± 0.32	94.8 ± 23.9	1.51 ± 0.04	642.1 ± 5.1	589.9 ± 41.4	6 233.8 ± 94.3	7.25
7	6.63 ± 0.01	73.5 ± 0.8	0.85 ± 0.04	614.6 ± 16.0	166.4 ± 89.1	7 737.6 ± 487.1	6.5
8	6.66 ± 0.01	31.0 ± 2.3	1.58 ± 0.27	604.3 ± 10.2	229.7 ± 5.3	8 125.9 ± 213.2	7.25
9	5.69 ± 0.01	69.7 ± 3.0	1.24 ± 0.06	611.3 ± 47.4	173.5 ± 16.7	7 130.2 ± 434.6	6.75
10	6.86 ± 0.01	61.1 ± 14.1	1.79 ± 0.06	765.5 ± 35.8	166.5 ± 3.1	6 780.3 ± 90.0	6.5

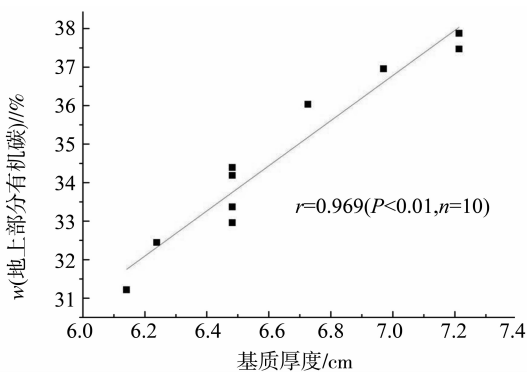


图 5 样品有机碳含量与基质厚度的相关性

Fig. 5 Correlation between substrate depth and carbon content in plant sample

### 3 讨论

同化箱碳通量的数据表明,在清冷多云的上午,简单式屋顶绿地的植被对  $\text{CO}_2$  的吸收速率高于释放速率,在 5 min 的观测时间内同化箱内的  $\text{CO}_2$  体积分数的最大降幅可多达 42%。可见虽然在光照强度和温度均较低条件下,屋顶绿地仍可以有效

因为各供试绿地不同的割草时间和频度直接影响了所采集样品的生物量和测得的地上部固碳量,所以本研究把重点放在探讨基质特性对植物样品有机碳含量以及植被碳固定潜力的影响上。基质 pH 值、电导率、有机质、全氮、全磷、全钾和厚度(表 3)与植被地上部分含碳量的线性回归分析显示,只有基质厚度与植被地上部分有机碳含量呈显著相关( $r^2=0.93$ ,图 5)。可见相对其它理化性质来说,基质厚度可能是影响屋顶绿地植被地上部分有机碳含量和植被的碳固定潜力的重要因素。

降低其周边大气中  $\text{CO}_2$  的体积分数。Li et al<sup>[7]</sup> 在香港的研究得出了类似的结果,在晴天风力为 2 级的天气条件下,16:00 前屋顶绿地周边大气中的  $\text{CO}_2$  质量浓度要比未绿化的屋顶周边的质量浓度低 12.9  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;而屋顶绿地白天吸收的  $\text{CO}_2$  要比晚上释放的要大得多。试验中植被层  $\text{CO}_2$  通量参数的变异较大,可能是因为植物的同化作用受到了测定时光强和温度的影响,而这两个影响因素在野外是随时在变化的。

在植物地上部固碳量试验中,所调查的屋顶绿地地上部平均固定的有机碳量为 92.55  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,植物通过光合作用将有机碳固定于植株的组织内同时也通过植株的凋落物和根系的分泌物转入基质内。可见屋顶植被可作为市区的碳库发挥一定的固碳作用,但理论上当屋顶绿地植被新陈代谢达到平衡后,这种固碳作用将依赖于通过刈割所去除的植物生物量的处置方式,例如,当植物体被转化成生物质燃料替代化石能源时,其固碳作用就是有效的。在野外调查所获取的数据中,各屋顶植被的有机碳固定量有较大的差异,可能是因为许多因素影响了屋顶植

被碳固定能力,这些因素包括:

1)植物的选择:植物的选择往往会影响植株地上部固碳量,因为不同的植物种的净初级生产力及生物量在植株中的分配存在着较大的差别<sup>[11]</sup>。不同类型的植物的植株生物量和碳含量均有较大的差异,其建成的植被的固碳量也会有所差别。例如,维管植物植株组织的含碳量在45%~50%之间<sup>[12-14]</sup>,而肉质植物组织的含碳量则略低<sup>[15]</sup>。本研究中所调查的屋顶植被中朝鲜结缕草的地上部分平均有机碳含量为34.68%。而Getter et al<sup>[6]</sup>对景天植物建成的屋顶植被的碳固定潜力进行研究的结果显示,几种景天植物在种植2年后(未进行过刈割)地上部的平均含碳量为42.1%,平均固碳量为168 g·m<sup>-2</sup>。可见不同植物种的含碳量和固碳量均有差别。由于屋顶绿化建植时要考虑到屋顶的承重限值,设计时常避免使用植株生物量过大的植物种,对于屋顶植被的固碳能力来说,植株含碳量高的植物种往往更有优势。

2)植被管理方法:浇水、施肥和刈割等管理方法对植物在屋顶上的生长情况影响很大,随之也会影响屋顶植被碳固定的能力<sup>[16]</sup>。因为在很多生态系统中水分和氮常是限制初级生产量的主要因子,所以施肥和浇水往往能提高植株的生物量<sup>[17]</sup>。修剪措施虽然减少了草坪植物的生物量,造成了营养物质的损失,但也刺激了草坪植物的生长,促进其匍匐枝和枝条密度的提高,进而提高了草坪植物的叶面积指数,从而增强其光合固碳能力<sup>[18]</sup>。本研究调查的10个屋顶绿地的浇水和施肥方式均较一致(表1),但剪草的次数和时间均不相同,直接影响了所能收集到的地上部分样品的生物量,故各个屋顶植被地上部分固定的有机碳总量测定值有较大的差异。

3)基质的特性:在各基质特性参数与植物有机碳含量的线性回归分析中,只有基质厚度与样品的有机碳含量呈显著的正相关,说明相对于其它理化性质来说,基质厚度对植物地上部分有机碳含量的影响更大。相对于精细型的屋顶绿地等其他绿地类型来说,简单型的屋顶绿化选用的都是非常耐贫瘠的植物种;而为了避免对接触屋顶绿地的地表水造成污染,屋顶绿化所采用的基质的氮、磷、有机质等养分含量一般都要求保持在较低的水平<sup>[19]</sup>,所以一般基质养分通常不是影响植被发展的限制性因子。许多研究表明屋顶绿地系统中最重要限制性因子是水分因子<sup>[20]</sup>,基质的厚度已被证实对屋顶绿地系中水分的有效性和可用性有显著的影响,进而也显

著地影响了植物的生长和地上部分的含碳量<sup>[21-22]</sup>。另外有研究指出基质的组分构成也会影响屋顶绿地植物的生长和生物量积累进而影响地上部分固定的总碳量<sup>[23-24]</sup>。

## 4 结 论

1)简单式屋顶绿地在白天可以通过吸收和固定CO<sub>2</sub>,降低其周围空气中的CO<sub>2</sub>体积分数。在多云清冷的上午,由朝鲜结缕草建植而成的屋顶植被在1 h内吸收的CO<sub>2</sub>可达0.46 g/m<sup>2</sup>,在5 min内同化箱里CO<sub>2</sub>体积分数的降低幅度可达42%(162 × 10<sup>-6</sup>)。

2)以朝鲜结缕草、狗牙根等草坪草为主建成的屋顶绿地植被的地上部平均固定的有机碳为92.55 g/m<sup>2</sup>。故屋顶绿地是城市内小型碳库,具有一定的固碳作用。

3)在屋顶绿地基质理化性质参数中仅基质厚度与植物地上部分的有机碳含量呈显著的正相关,说明基质厚度可能是影响屋顶绿地碳固定潜力的重要因素。

致谢:加利福尼亚大学伯克莱分校的杨君芷在文章的撰写过程中给予了很大的帮助,特此致谢。

### 参考文献:

- [1] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 381 - 389.
- [2] NOWAK D J, CIVEROLO K L, RAO S T, et al. A modeling study of the impact of urban trees on ozone [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 1601 - 1613.
- [3] SAILOR D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40: 1466 - 1478.
- [4] JUSTYNA C B. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36:351 - 360.
- [5] FERNANDEZ-CANERO R, GONZALEZ-REDONDO P. Green roofs as a habitat for birds: A review [J]. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2010, 9: 2041 - 52.
- [6] GETTER K L, ROWE D B, ROBERTSON G P, et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43: 7564 - 7570.
- [7] LI J F, WAI O W, LI Y S, et al. Effect of green roof on ambient CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 2644 - 2651.

- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1994.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 陆欣. 土壤肥料学 [M]. 北京:中国农业出版社, 2001.
- [11] NAEEM S, HAKANSSON K, LAWTON J H, et al. Biodiversity and plant productivity in a model assemblage of plant species [J]. *Oikos*, 1996, 76: 259 - 264.
- [12] OVINGTON J D. The volatile matter, organic carbon and nitrogen contents of tree species grown in close stands [J]. *New Phytologist*, 1957, 56: 1 - 11.
- [13] PETTERSEN R C. The Chemical composition of wood. The chemistry of solid wood [M]// ROWELL R M, ed. *Advances in chemistry; Series 207*. Washington D C: American Chemical Society,1984.
- [14] SCHLESINGER W H. Biogeochemistry: An analysis of global change [M]. San Diego, CA: Academic Press, 1997.
- [15] LINDSAY E A, FRENCH K. *Chrysanthemoides monilifera* ssp. *rotundata* invasion alters decomposition rates in coastal areas of south-eastern [J]. *Australia Forest Ecology and Management*, 2004, 198: 387 - 399.
- [16] ROWE D B. Green roofs as a means of pollution abatement [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 159: 2100 - 2110.
- [17] VITOUSEK P M, HOWARTH R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87 - 115.
- [18] 高伟平,熊雪,周禾. 草坪生态系统中碳汇与碳源的研究进展 [J]. *草业科学*,2012, 29: 717 - 723.
- [19] FLL. Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing,2008 [C]// *Landscape, research, development and construction society. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Bonn*;2008.
- [20] DUNNETT N P, KINGSBURY N. Planting green roofs and living walls [M]. Portland, USA: Timber Press, 2004.
- [21] DURHMAN A K, ROWE D B, RUGH C L. Effect of substrate depth on initial coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa [J]. *Hort Science*, 2007, 42: 588 - 595.
- [22] GETTER K L, ROWE D B. Media depth influences sedum green roof establishment [J]. *Urban Ecosystem*, 2008, 11: 361 - 372.
- [23] HUNT W F, HATHAWAY A M, SMITH J T, et al. Choosing the right green roof media for water quality [C]// *Greening Rooftops for Sustainable Communities; Proceedings of the 4th North American Green Roof Conference*. Boston, USA: 2006.
- [24] ROWE D B, MONTERUSSO M A, RUGH C L. Assessment of heatexpanded slate and fertility requirements in green roof substrates [J]. *Hort Technology*, 2006, 16: 471 - 477.

(上接第 88 页)

- [6] ZHAO Y, LI S Q, LI H J, et al. Lanotane triterpenoids from the fungus *Ceriporia lacerate* associated with *Acanthaster planci* [J]. *Chemistry of Natural Compounds*, 2013, 49 (4): 653 - 656.
- [7] IWEN P C, HINRICHS S H, RUPP M E. Utilization of the internal transcribed spacer regions as molecular targets to detect and identify human fungal pathogens [J]. *Medical Mycology*, 2002, 40 (1): 87 - 109.
- [8] 赵国柱,张天宇,张猛. 核糖体基因簇在真菌系统学研究中的意义 [J]. *生命的化学*, 2002, 22 (1): 13 - 15.
- [9] CARMELA B, TERESA F E, AMPARO Q, et al. An analysis of inter- and intraspecific genetic variabilities in the *Kluyveromyces marxianus* group of yeast species for the reconsideration of the *K. lactis* taxon [J]. *Yeast*, 2002, 19 (3): 257 - 268.
- [10] HENG M H, SALLEH B, ZAKARIA L. Molecular identification of *Fusarium* species in *Gibberella fujikuroi* Species Complex from rice, sugarcane and maize from *Peninsular Malaysia* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12 (10): 6722 - 6732.
- [11] 马晓伟,邢春杰,于金凤,等. 水稻恶苗病菌 (*Fusarium fujikuroi*)  $\beta$ -微管蛋白基因克隆及与多菌灵抗药性关系 [J]. *微生物学报*, 2012, 52 (5): 581 - 587.
- [12] GEISER D M, JIMENEZ-GASCO M D, KANG S C, et al. FUSARIUM-ID v. 1. 0: a DNA sequence database for identifying *Fusarium* [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2004, 110 (5): 473 - 479.