

徐鹏,邓超,林钊,等. 屋顶绿化二氧化碳减排效益的研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 6-9. Xu Peng, Deng Chao, Lin Zhao, et al. Capacity of green roof on CO<sub>2</sub> absorption[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(8): 6-9.

## 屋顶绿化二氧化碳减排效益的研究

徐鹏, 邓超, 林钊, 张超, 方元, 吴灵玲, 胡辉\*

(华中科技大学环境科学与工程学院 湖北 武汉 430074)

**摘要** 屋顶绿化不仅能够美化城市环境,而且对城市二氧化碳减排具有一定作用。文章利用自行设计的熏气装置对几种常见屋顶绿化植物进行 CO<sub>2</sub> 熏气实验,测定其对 CO<sub>2</sub> 的吸收速率和影响因素。实验结果表明,红叶石楠、红继木和石榴等绿化植物对 CO<sub>2</sub> 具有显著的吸收能力,其中红叶石楠的吸收速率最高,达 7.058 L/(m<sup>2</sup>·d)。绿化植物对 CO<sub>2</sub> 的吸收速率受屋面温度影响较大,温度超过 34℃ 时吸收速率快速减小。在实验观测基础上,结合武汉城市区域气候特征、建筑物荷载能力、屋顶绿化可用面积等信息,分析得到武汉市进行规模化屋顶绿化之后,每年可吸收转化 CO<sub>2</sub> 1.696×10<sup>6</sup> t,相当于一个 194 MW 火力发电厂一年的 CO<sub>2</sub> 排放量。屋顶绿化的发展前景较可观。

**关键词** 屋顶绿化; 熏气实验; 二氧化碳减排; 吸收速率

中图分类号: X797 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2012.08.002 文章编号: 1003-6504(2012)08-0006-04

### Capacity of Green Roof on CO<sub>2</sub> Absorption

XU Peng, DENG Chao, LIN Zhao, ZHANG Chao,

FANG Yuan, WU Ling-ling, HU Hui\*

(College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract**: Green roof not only can beautify the environment, but also has a certain effect on reduction of carbon dioxide emission in urban. CO<sub>2</sub> absorption rate of some common green roof plants and its influencing factors were studied by self-designed fumigation experimental device. Results showed that *Photinia fraseri*, red after-wood and pomegranate have a good ability to absorb CO<sub>2</sub>, among which *Photinia fraseri* has the best CO<sub>2</sub> absorption ability about 7.058 L/(m<sup>2</sup>·d). CO<sub>2</sub> absorption rate of green plants has more relationship with roof temperature, and the absorption rates decrease rapidly when temperature exceeds 34℃. Based on the experiment results, together with regional climate characteristics of Wuhan, load bearing capacity of the building and usable area for green roof, the capacity of green roof on CO<sub>2</sub> emission reduction was 1.696×10<sup>6</sup> t/a, which was equal to CO<sub>2</sub> emission from a thermal power plant with 194 MW in 1 year. Development prospects of capacity of green roof on CO<sub>2</sub> absorption were investigated as well.

**Key words**: green roof; fumigation experiment; carbon dioxide emission reduction; absorption rate

屋顶绿化是一种以屋顶、露台、阳台等建筑平台为依托,进行园林景观、施工和维护的空间绿化形式,有别于常见的露地绿化,土壤一般由人工合成,不与自然土壤相连,在植物选择、给排水设计、土壤合成等方面有较高的技术要求<sup>[1-2]</sup>。屋顶绿化不仅能净化空气,降低城市噪声,缓解城市热岛效益,而且可以增强城市的整体美感<sup>[3-4]</sup>。因此,屋顶绿化自 20 世纪 60 年代开始被西方发达国家研究及应用,已形成了成熟的技术和产业,近年在我国部分地区得以试用,但占

总绿化面积的比例不高,规模上和技术上都有较大的发展空间<sup>[5]</sup>。

CO<sub>2</sub> 是典型的温室效应气体,对其减排已成为各国关注的热点。中国政府在 2009 年哥本哈根《联合国气候变化框架公约》大会上承诺,到 2020 年,单位 GDP 二氧化碳排放要在 2005 年基础上下降 40%~45%<sup>[6]</sup>。因此,迫切需要多渠道寻找具体可行的二氧化碳减排方法。对于化石燃料燃烧过程中产生的 CO<sub>2</sub>,目前正在进行包括地质封存、海洋封存和矿物化学吸收等捕集

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2011-11-02;修回 2012-02-21

基金项目 大学生创新基金(2011008) 华中科技大学“教学质量工程”第三批教学研究项目(46)

作者简介 徐鹏(1991-)男,本科,主要从事大气污染自净和 CO<sub>2</sub> 储存方向的研究 (手机)15271817617 (电子信箱)411254683@qq.com; \* 通讯作者,教授,博士,博士生导师 (电话)027-87542224 (电子信箱)hjqh08@sina.com。

技术的研究<sup>[7]</sup>,而对于已经存在于大气中的低浓度CO<sub>2</sub>的捕集,研究者寄希望于绿色植物的光合作用<sup>[8]</sup>。本论文基于绿色植物的光合作用,期望利用已有的屋顶绿化技术,在城市区域进行大规模屋顶绿化,以达到降低环境中CO<sub>2</sub>浓度的目的。为此,进行了包括红叶石楠、金叶女贞、红继木、石榴等绿色植物吸收CO<sub>2</sub>的实验研究,以期筛选出对CO<sub>2</sub>具有较显著吸收能力的屋顶绿化植物。在此基础上,对武汉城市区域进行屋顶绿化所能达到的二氧化碳减排效益进行了分析。

### 1 实验装置与实验方法

#### 1.1 实验装置

图 1 是参考文献[9]而自行设计的绿色植物吸收CO<sub>2</sub>的封闭式动态熏气实验装置,可以准确测定箱体内存待测气体的浓度,并具备开顶式熏气装置模拟自然环境的特点<sup>[10]</sup>。

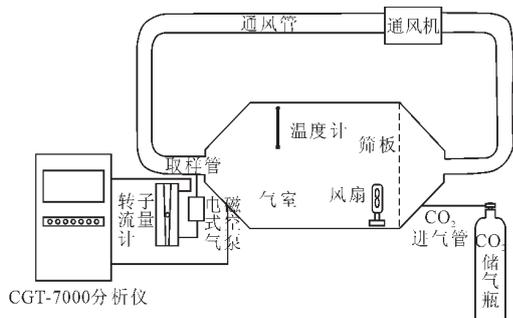


图1 封闭式动态熏气实验装置  
Fig.1 Experimental device of closed dynamic fumigation

熏气装置支撑部分为木质结构,由中部长方体气室(1.0 m×0.8 m×0.6 m)和两侧梯台(顶面 0.2 m×0.2 m,底面 0.8 m×0.6 m,高 0.4 m)组成,外侧安装有

机玻璃板。进气梯台和长方体之间用筛板隔开,进气处装有电扇,可以混匀进气,进气梯台侧面有混合气和CO<sub>2</sub>的进气口,排气梯台侧面有混和气排气口和取样口,气室上有气样回流口,气室内置有温度计,实时检测气室内温度。

通风管使用直径 0.1 m 的塑料管,中部配有 GD-100-4 型管道离心通风机,可在通风管内形成低速气流,使实验装置内部混合气自循环。CO<sub>2</sub>进气管、取样管和回送管用橡胶皮管,打开储气瓶的止气阀,CO<sub>2</sub>气体(工业级,CO<sub>2</sub>>98%,武汉钢铁(集团)公司制氧厂)通过进气管进入气室,与室内气体混合。

实验使用 ACO-006 型电磁式空气泵抽取气体样品,并用 LZB-4 型转子流量计调节取样速度,用 CGT-7000 型 CO-CO<sub>2</sub> 非分散红外分析仪(日本 SHIMADZU)检测 CO<sub>2</sub> 浓度,精度 0.01 mL/L,测量范围为 0~100 vol%,气样检测之后通过回流管返回到气室。

#### 1.2 实验方法

实验在屋顶上进行,保证植物能充分接受光照,并使实验的光热条件符合屋顶绿化植物的生长环境。每次实验前打开气室门并开启鼓风机,将前次实验残余气体排出并换入新鲜空气。熏气实验前进行空腔实验,直接向气室内通入适量 CO<sub>2</sub>,运行装置 24 h 后,检测气室内 CO<sub>2</sub> 浓度。

选择武汉地区常见屋顶绿化植物进行熏气实验<sup>[11]</sup>,将植物置于气室内,适时补充 CO<sub>2</sub> 气体,使其室内 CO<sub>2</sub> 浓度维持在 0.5%(过高浓度 CO<sub>2</sub> 会抑制植物呼吸作用),之后 24 h 每隔 0.5 h 测定一次气室内的 CO<sub>2</sub> 浓度,并记录下气室内的温度、植物的生长状况和植株的叶片面积。实验使用植物如表 1。

表 1 实验植物的种类及其特性  
Table 1 The species and characteristics of experimental plants

植物名称	分类	普通栽种		形态	生长抗性				花期/月	观赏性	
		株高/m	最高/m		耐旱性	耐阴性	抗寒性	抗风性		花色	叶
红叶石楠	蔷薇科石楠属小乔木	2~8	15	常绿阔叶	优	优	优	优	4~5	白色	幼叶红色
金叶女贞	木犀科女贞属小灌木	1~3	5	常绿阔叶	优	差	良	优	7~8	白色	金黄色
红继木	金缕梅科继木属乔木	0.3~3	10	常绿阔叶	优	良	优	优	3~4	淡紫红色	紫红色
石榴	石榴科石榴属小乔木	1~4	7	常绿阔叶	优	良	良	优	5~10	多朱红色	绿色
栀子花	茜草科栀子属灌木	1~2	4	常绿阔叶	优	良	良	优	5~8	白色	深绿色
朱槿	锦葵科木槿属大灌木	1~3	6	常绿阔叶	良	优	差	良	全年	多种色	绿色
米兰	楝科米兰属小乔木	0.3~3	8	常绿阔叶	优	良	差	优	7~8	金黄色	绿色
含笑	木兰科含笑属小乔木	1~6	12	常绿阔叶	良	优	差	优	4~6	淡黄色	绿色

### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 熏气实验装置内部场模拟

为了说明用取样分析方法检测气室内 CO<sub>2</sub> 浓度的可行性,在无电扇情况下,使用 Fluent 软件对气室内气体流速场和 CO<sub>2</sub> 浓度场进行静态模拟。模拟结果

如图 2 和图 3。

结果显示,气室中部气体流速较高,CO<sub>2</sub> 浓度分布比较均匀,但靠近气室壁处气体流速低或停滞,使得 CO<sub>2</sub> 浓度有明显差异,如图 3 中的深蓝色区域和橘黄色区域。针对这种情况,在气室底部安装电扇,增强气室内气体的环流,使得气室内 CO<sub>2</sub> 均匀分布,抽取

的气样具有较好的代表性。

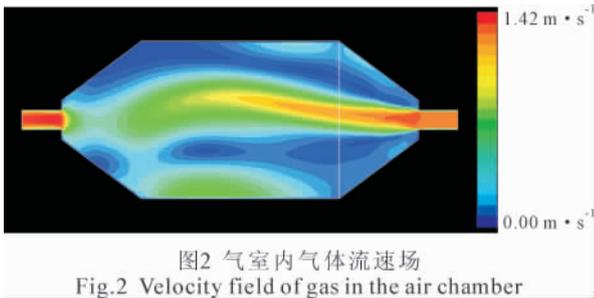


图2 气室内气体流速场  
Fig.2 Velocity field of gas in the air chamber

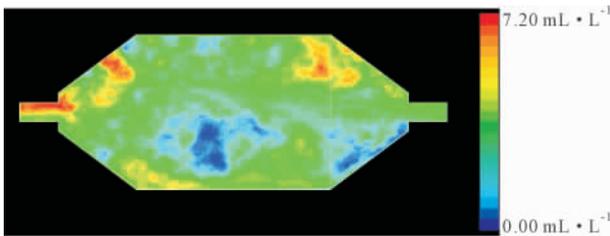


图3 气室内CO₂浓度场  
Fig.3 Concentration field of CO₂ in the air chamber

## 2.2 不同植物对 CO₂ 的吸收速率及影响因素的实验研究

空腔实验结果显示, 24 h 后气室内 CO₂ 浓度变化不足 0.5%, 气室密闭性达到实验要求。以红叶石楠为例, 累加上补气造成的浓度提高, 气室内 CO₂ 浓度和植株对 CO₂ 吸收速率的变化如图 4 和图 5。

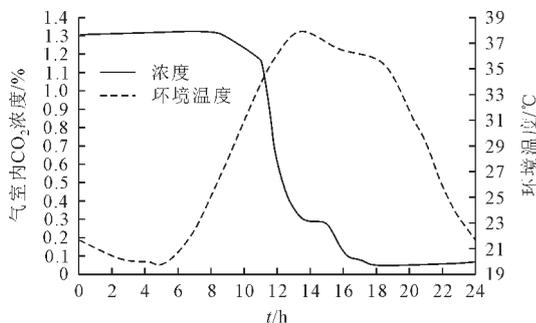


图4 气室内CO₂浓度的变化  
Fig.4 Change of CO₂ concentration in the air chamber

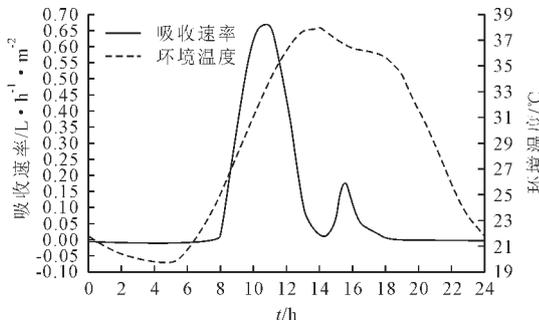


图5 植株对CO₂吸收速率的变化  
Fig.5 Change in absorption rate of plants on CO₂

结果显示, 环境温度对植物 CO₂ 的吸收速率有较大的影响, 适合温度下, 植物光合速率随着光照强度的提高而迅速增长, 而当温度超过一定上限(约为

34 °C), 会严重制约植物光合速率, 植物呼吸速率相对于光合速率很小。

植物呼吸速率主要受温度、CO₂ 和 O₂ 的浓度、水分、病原菌、机械损伤等因素影响, 全年时间内温度变化是影响呼吸速率的主要因素; 土壤微生物呼吸速率约为 0.13 mg/(m³·min), 相对植物呼吸速率很小, 可忽略不计。呼吸速率随着温度升高而增长, 应用 Arrhenius 方程式分析有如下关系<sup>[12]</sup>:

$$R_{O_2} = R_{O_2}^* \exp\left(\frac{-Ea_{O_2}^*}{RT}\right)$$

根据生物反应动力学, 对同株植物呼吸指数  $R_{O_2}^*$  和呼吸速率活化能  $Ea_{O_2}^*$  为定值, 根据植株晚间呼吸速率随温度的变化关系, 得到红叶石楠呼吸指数  $R_{O_2}^*$  为 17 595 L/(m²·d); 根据全天温度变化, 得到植物日平均呼吸速率为 0.273 L/(m²·d), 日平均光合速率为 7.058 L/(m²·d)。其余实验植株的检测结果如表 2。

表 2 部分屋顶绿化植物的 CO₂ 吸附速率  
Table 2 The absorption rate of some common green roof plants on CO₂

植物	单株叶片面积/m²	日平均光合速率/L·m²·d⁻¹	日平均呼吸速率/L·m²·d⁻¹	日平均吸收速率/L·m²·d⁻¹
红叶石楠	1.1	7.330	0.273	7.058
小叶女贞	0.27	1.733	0.578	1.156
红继木	0.33	6.718	0.736	5.981
石榴	0.3	6.550	0.280	6.270
栀子花	0.19	3.189	0.916	2.274
扶桑	0.12	5.550	2.200	3.350
米兰	0.03	7.920	6.800	1.120
含笑	0.23	1.948	0.591	1.357

从表 2 可知, 红叶石楠、红继木和石榴对 CO₂ 的吸收速率较高, 且在屋面环境中生长状况良好, 适合用于城市屋顶绿化。

## 2.3 武汉城市区域屋顶绿化对 CO₂ 减排的效益分析

武汉地区属亚热带季风性湿润气候区, 光能资源丰富, 年日照总时数达 2 000 h, 热量资源丰富, 气温年较差大, 适合绿色植物对 CO₂ 的吸收封存。根据光合作用所需可见光波段的有效辐射能( $Q_p$ )与绿化植物光合速率( $P_r$ )间的关系式:

$$P_r = k \times Q_p$$

式中:  $Q_p$  取武汉地区九月平均值,  $P_r$  取实验植物光合速率的平均值, 得到光和速率方程  $k$  值为  $7.676 \times 10^{-7}$  L/J。根据全年武汉地区光和有效辐射月平均值的变化, 得到屋顶绿化植物年平均光合速率为  $4.587 \times 10^{-3}$  m³/(m²·d)。其中, 光合有效辐射月平均值通过武汉地区 1971–2000 年间太阳直接辐射的统计资料计算得到, 如表 3。

表 3 武汉地区光合有效辐射月平均值  
Table 3 The average photo-synthetically active radiation by month in Wuhan ( $\times 10^5 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
光合有效辐射	35	39	50	64.1	75.3	78.3	89	88	66.7	53.4	41.8	36.6

环境温度( $T$ )取武汉地区九月份平均值 根据全年武汉地区月平均温度的变化,用 Arrhenius 方程式计算出实验植物年平均呼吸速率,城市屋顶绿化呼吸速率  $R_{O_2}$  为各种植物呼吸速率的加权平均值,取实验植物呼吸速率的平均值替代,得到屋顶绿化植物年平均呼吸速率为  $1.452 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。武汉地区全年月平均温度如表 4。

表 4 武汉地区月平均温度  
Table 4 The average temperature by month in Wuhan

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T/^\circ\text{C}$	3.5	5.6	10	16.7	21.6	25.3	28.5	23.8	17.5	11.3	5.9	6

武汉城市区域现有建筑面积( $S$ )达 2.5 亿  $\text{m}^2$ 。根据我国建筑设计规范,不上人屋面活荷载规定值为  $50 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,无特殊要求上人屋面活荷载规定值为  $200 \text{ kg}/\text{m}^2$  20 世纪 80 年代以后建设的城市建筑均依据这一规范设计施工,其中活荷载屋面建筑占总建筑面积的比例( $\eta$ )为 75%。使用新型材料和技术,上人屋面都可以进行屋顶绿化。叶面积指数 LAI 取城市屋顶绿化的平均值 4.0。按照公式:

$$m_{\text{CO}_2} = (P_r - R_{O_2}) \times S \times \text{LAI} \times \eta \times \rho_{\text{CO}_2}$$

计算得到武汉城市区域进行规模化屋顶绿化之后,每年吸收转化的  $\text{CO}_2$  质量为  $1.696 \times 10^6 \text{ t}$ ,相当于一个 194 MW 火力发电厂一年的  $\text{CO}_2$  排放量。因此,屋顶绿化对城市区域的二氧化碳减排具有重要意义。

### 3 结语

通过对常见屋顶绿化植物吸收  $\text{CO}_2$  速率的实验研究,计算和分析武汉城市区域进行屋顶绿化所能达到的二氧化碳减排效益,得到以下结论:

(1) 红叶石楠、红继木和石榴等植物对  $\text{CO}_2$  具有显著的吸收能力,适合用于屋顶绿化;吸收  $\text{CO}_2$  的速率受温度影响很大,因此,进行屋顶绿化时要选择具有高比热容的合成土壤,并进行通风设计。

(2) 武汉地区进行规模化屋顶绿化后,每年二氧化碳减排量可达到  $1.696 \times 10^6 \text{ t}$ ,采用屋顶绿化实现城市区域二氧化碳减排的技术具体可行。

2010 年武汉市建立国家碳交易中心,并筹建武汉地区自愿性碳减排联盟,2011 年屋顶绿化被纳入武汉市建筑节能规范和“两型”社会试点。同时,人工轻质培养土、轻质薄层排水板等新技术不断出现,优质佛

甲草开始市场化供应。屋顶绿化在武汉地区的推广环境越来越好,具有很好的发展前景。

### 【参考文献】

- [1] 单晓玲,许君,冯再新. 屋顶花园的设计与施工初探[J]. 浙江林学院学报,1999,16(4):401-405.  
Shan Xiao-ling, Xu Jun, Feng Zai-xin. Preliminary study on the design and construction of roof garden[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1999, 16(4):401-405.(in Chinese)
- [2] 刘磊. 屋顶花园在环境设计中的应用[J]. 青岛远洋船员学院学报,2005(4):69-71.  
Liu Lei. The applications of roof garden in the environment design[J]. Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College 2005(4):69-71.(in Chinese)
- [3] 许萍,车伍与,李俊奇. 屋顶绿化改善城市环境效果分析[J]. 环境保护,2004(7):41-44.  
Xu Ping, Che Wu-yu, Li Jun-qi. Analysis on improvement of urban environment made by green roof[J]. Environmental Protection, 2004(7):41-44.(in Chinese)
- [4] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(31):7266-7273.
- [5] 肖远志,李卫东,王双伍,等. 城市屋顶绿化植物选择研究[J]. 湖南农业科学,2010(9):113-116.  
Xiao Yuan-zhi, Li Wei-dong, Wang Shuang-wu, et al. Study on choosing green roof plants in urban[J]. Hunan Agricultural Science, 2010(9):113-116.(in Chinese)
- [6] 李红强,王礼茂. 中国低碳能源发展潜力及对国家减排贡献的初步研究[J]. 第四纪研究,2010,30(3):473-479.
- [7] Metz B. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage -America Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. 2005.
- [8] Li Jian-feng, Wai Onyx W H, Li Y S, et al, Effect of green roof on ambient  $\text{CO}_2$  concentration[J]. Building and Environment 2010, 45(12):2644-2651.
- [9] 上海植物生理研究所环境保护组. 植物试验用的人工熏气室[J]. 环境科学,1978(1):44-46.  
Environment Protection Group of the Shanghai Institute of Plant Physiology. Artificial fumigation chamber for plant experiment[J]. Environmental Science, 1978(1):44-46.(in Chinese)
- [10] 曾广权,夏冰,李玲,等. ML-1 型开顶式熏气室的构造与性能[J]. 环境科学,1985(4):6-10.73.  
Zeng Guang-quan, Xia Bing, Li Ling, et al, The construction and performance of ML-1 type open-top fumigation chamber [J]. Environmental Science, 1985 (4):6-10.73.(in Chinese)
- [11] 姚军,潘利. 武汉市屋顶绿化植物应用调查研究[J]. 中国建筑防水,2010(7):27-30.
- [12] 卢立新. 果蔬气调保鲜包装数学模型[J]. 机电信息,2005(6):25-27.