

## 深圳特区城市植被的固碳释氧效应\*

吴 婕<sup>1</sup>, 李 楠<sup>2</sup>, 陈 智<sup>1</sup>, 余世孝<sup>1</sup>

(1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275;

2. 深圳市仙湖植物园, 广东 深圳 518004)

**摘 要:** 以深圳特区各种类型城市植被为研究对象, 通过大尺度的样方调查, 获得 6 种城市植被类型 (郊野林、休闲绿地、道路绿地、居住区绿地、单位附属绿地和生产绿地) 的植物组成比例, 以占据各城市植被类型 70% 以上的 63 种优势植物作为基底数据, 结合航片提取的各类型植被面积和 PnET 的气候模型, 基于主要园林植物的光合作用参数, 推算出特区各种类型城市植被月、年及单位面积固碳释氧量。结果表明, 深圳特区城市植被固碳释氧效应的强度按季节排序为春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季。特区 6 种类型城市植被类型中, 位于深圳特区外围的郊野林具有最大的年固碳释氧总量, 深圳的道路系统绿地有最大的单位面积固碳释氧量, 居住区和单位附属绿地的固碳释氧效应位居 6 种类型之末位。

**关键词:** 固碳; 释氧; 城市植被; 深圳特区

**中图分类号:** Q948.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0529-6579 (2010) 04-0086-07

## The Effect of CO<sub>2</sub> Sequestration and O<sub>2</sub> Release of Urban Vegetation in Shenzhen Special Zone

WU Jie<sup>1</sup>, LI Nan<sup>2</sup>, CHEN Zhi, YU Shixiao<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Fairylake Botanical Garden of Shenzhen, Shenzhen 518004, China)

**Abstract:** Based on the investigation of large scale sample plots in Shenzhen Special Zone, the plant combinations in 6 types of urban vegetation were analyzed. 63 dominant plants which contributed to over 70% of the vegetation coverage in each type were selected to estimate the amount of CO<sub>2</sub> sequestered and O<sub>2</sub> released by urban vegetation. With the photosynthetic parameters of parts plant species, coverage of each type of urban vegetation which were measured with the information extracted from the aerial photograph, as well as a suited climatic influence model from PnET. It is estimated that the amounts of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release of these plant species monthly and annually, as well as the amount of various urban vegetation in Shenzhen Special Zone. The results show that seasonal intensity of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release is Spring > Summer > Autumn > Winter. The natural park forest which mainly located in periphery areas of Shenzhen Special Zone have the greatest amounts of annual CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release. The roadside vegetation has the maximum capacity of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release in a unit of area. While residential and institutional vegetation have the minimum capacity of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release.

**Key words:** CO<sub>2</sub> sequestration; O<sub>2</sub> release; urban vegetation; Shenzhen special zone

\* 收稿日期: 2009-05-12

基金项目: 深圳市城市管理局资助项目

作者简介: 吴婕 (1983 年生), 女, 硕士生; 通讯联系人: 余世孝; E-mail: lssysx@mail.sysu.edu.cn

快速的城市化进程导致大气中  $\text{CO}_2$  急剧升高。据报道,从 1860 至 2000 年的 140 a 期间,  $\text{CO}_2$  在大气中的含量增长了 28%<sup>[1]</sup>, 导致全球范围内气候变暖、干旱、水灾等环境问题日趋严重。在城市较小尺度的环境中,  $\text{CO}_2$  对大气长波辐射的吸收导致城市区域性的气候变化。植被作为温室气体  $\text{CO}_2$  的汇, 通过光合作用所发挥的固碳释氧效应, 对于城市生态系统物质能量的循环以及生态环境的改善有重要的意义。

城市植被的固碳释氧效益, 是城市生态研究的热点之一。Nowak 等<sup>[2]</sup> 通过野外调查获取美国 10 个城市有关生物量、生长率、死亡率、枯落物比例等方面的植被覆盖数据, 分析了各大城市植被吸收  $\text{CO}_2$  的能力; 彭立华等<sup>[3]</sup> 利用 Citygreen 模型提供的植被固碳系数计算了南京绿地的固碳效益; MacFarlane<sup>[4]</sup> 估算了密歇根州城市森林的年生产力和城市森林废木的潜在经济效益; Robinson 等<sup>[5]</sup> 通过 BIOME - BGC 模型研究了植被碳通量和城市景观受人干扰程度的关系。

本研究从各类型城市植被的植物配置以及气候因子对光合作用的影响出发, 结合深圳特区的大范围的样方调查和城市植被优势植物光合作用参数的测定, 基于 PnET 的气候模型, 通过遥感和地理信息系统技术对特区城市植被的固碳释氧总量进行了推算, 分析了深圳城市植被的固碳释氧效应在时间以及空间上的特征, 为城市尺度的植被生态效应研究提供了一种新的途径。

## 1 研究地区概况

深圳陆域位于  $113^{\circ}46' - 114^{\circ}37' \text{E}$ ,  $22^{\circ}27' - 22^{\circ}52' \text{N}$ , 研究区域为深圳经济特区内的南山、福田、罗湖和盐田四区, 总面积  $395.81 \text{ km}^2$ , 属亚热带海洋性气候, 四季温和, 雨量充沛, 太阳辐射量丰富, 年平均气温  $22.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量  $1924.7 \text{ mm}$ , 年平均降水日数为 146 d, 年日照时数平均为  $2060 \text{ h}$ , 年太阳辐射量为  $5225 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。该区域土壤类型主要包括赤红壤、山地红壤、山地黄壤、南亚热带水稻土、滨海盐渍沼泽土和滨海砂土, 以赤红壤分布最广。深圳的原生性森林已不复存在, 现存次生林以桉树 *Eucalyptus citriodora*、台湾相思 *Acacia confuse*、大叶相思 *Acacia auriculiformis* 等人工林和灌丛草坡为主。城市园林绿化植物种类丰富, 热带、亚热带特征显著。

## 2 研究方法

### 2.1 物种组成调查和城市植被信息的提取

本研究对深圳特区城市植被植物群落的调查进行于 2004 年 7 月至 2006 年 8 月。参照 CJJ/T85 - 2002 城市绿地分类标准, 将深圳城市植被划分为郊野林、休闲绿地、道路绿地、居住区绿地、单位附属绿地和生产绿地等 6 个类型 (表 1)。以各城市植被类型为基础, 采用样方法<sup>[6]</sup>, 调查了深圳特区 4 个行政区 (南山、福田、罗湖和盐田) 的山地、公园风景区、学校、居民小区、单位、道路以及立交桥绿化带的 531 个样方, 样方总面积  $504856 \text{ m}^2$ 。调查测定的主要指标包括样地植物种名、胸径、高度、冠高、冠幅等。参考 Owen 的方法<sup>[7]</sup>, 分别从 6 种城市植被的样方中提取盖度大于本类型城市植被面积 1% 的优势种, 共 63 个, 本研究以这 63 个优势种的组合比例代表各城市植被类型的物种结构。

表 1 深圳特区城市植被类型描述

Table 1 Descriptions of greenbelt types in Shenzhen Special Zone

| 类型名称   | 主要特征                     |
|--------|--------------------------|
| 郊野林    | 野外自然林地区和以自然植被为主的公园       |
| 休闲绿地   | 休闲公园、游乐场、广场等范围, 人工绿地群落为主 |
| 生产绿地   | 农田、果林和苗圃                 |
| 道路绿地   | 公路、铁路和河流沿线的绿地            |
| 居住区绿地  | 居民小区、别墅区和城中村范围内的绿地       |
| 单位附属绿地 | 公共事业单位、商业区和工业区范围内的绿地     |

为了实现大尺度范围植被固碳释氧总量的推算, 本研究借助遥感图像对城市植被信息进行了分类型的提取。研究采用数据为 2001 年 11 月深圳特区的彩色航空照片 ( $0.8 \text{ m}$  分辨率), 经过几何纠正等预处理后, 参考研究区域的数字地图, 结合地面调查的实际情况, 基于 ArcGIS9.0 和 Erdas8.7 软件平台, 对航片进行目视判读, 分别提取深圳特区的 6 种城市植被的信息, 并计算各种类型城市植被的面积。

### 2.2 光合作用参数的测定

于 2006 年 9 月 20 日到 12 月 2 日, 选取晴朗无风的天气, 在自然光照下, 采用美国 LI - COR 公司生产的 LI - 6400 红外气体分析仪, 从 8:00

至 18:00 每隔 2 h 对深圳主要园林植物 (包括乔木、灌木和草本植物) 进行了叶片净光合速率的测定, 并同时记录叶片的蒸腾速率。测定时每种植物选择生长状况相对一致的 3 个叶片, 每个叶片记录 3 次光合速率瞬时值  $P_n$  和蒸腾速率瞬时值  $T_r$ , 结果取平均值。计算净光合速率均值与蒸腾速率均值之比, 其结果为植物光合作用的水分利用效率 WUE (%)。

通过人工光源的调节, 测定主要园林植物在递变的光量子通量度下的净光合速率响应值, 采用 Prado - Moraes 模型拟合植物的光合-光响应曲线<sup>[8]</sup>:

$$P_n = P_1 [1 - e^{-P_2(P_4 - P_3)}] \quad (1)$$

式中  $P_n$  为净光合速率, 单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_1$  为饱和光强下净光合速率, 单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_2$  为经验常数, 初始值设为 0.000 01;  $P_3$  为光补偿点, 单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_4$  为光量子通量密度, 单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

用拟合得出的  $P_2$  和  $P_3$  值计算各植物的半饱和和光强:

$$L_{\text{halfSat}} = P_3 - \ln(1 - 0.95 \times 0.5) / P_2 \quad (2)$$

利用 LI-2000 冠层分析仪测量得到各主要植物种的叶面积指数 LAI, 计算平均叶面积指数 LAI<sub>a</sub>。

本研究从以上测量获得的参数中选取最大净光合有效速率  $P_{\text{sn}_{\text{max}}}$  为基础数据进行植被固碳量的推算, 而平均半饱和光强  $L_{\text{halfSat}}$  和 LAI<sub>a</sub> 则用于植被光能利用率的计算, 各植物的平均水分利用效率 WUE 用于植被水分利用参数的计算。

### 2.3 植被固碳释氧量的时空推算

2.3.1 基于 PnET 模型的冠层固碳总量计算 本研究参考美国复杂系统研究中心 (Complex System Research Center) 开发的 PnET 冠层通量模型中的气候影响模型<sup>[9-10]</sup>, 基于植物的最大净光合有效

速率、光合作用半饱和和光强和深圳的多年平均各月气象数据, 模拟深圳主要植物冠层的固碳量月变化, 从而获得植物冠层全年固碳总量。

PnET 的气候影响模型:

$$P_{\text{sn}_c} = P_{\text{sn}_{\text{max}}} \cdot D_{\text{Temp}} \cdot D_{\text{Water}} \cdot D_{\text{VPD}} \cdot \text{LightEff} \quad (3)$$

式中  $P_{\text{sn}_c}$  为冠层实际净光合速率,  $P_{\text{sn}_{\text{max}}}$  为植物叶片最大净光合速率,  $D_{\text{Temp}}$  为温度影响模型,  $D_{\text{Water}}$  为水分影响模型,  $D_{\text{VPD}}$  为水蒸气气压差影响模型,  $\text{LightEff}$  为光能利用率模型。气候影响模型的计算需输入的气候因子及植物生理参数见表 2, 各模型运算结果均为取值为 0~1 之间的影响系数。

表 2 运行 PnET 气候影响模型所需参数

Table 2 Parameters required for the climate influence model PnET

| 参数名                  | 定义及单位   | 值                  |
|----------------------|---|--------------------|
| $T_a$                | 各月均温/°C   | *                  |
| $T_{\text{min}}$     | 植物光合作用最低温度/°C   | 10°                |
| $T_{\text{max}}$     | 植物光合作用最高温度/°C   | 40°                |
| $T_{\text{opt}}$     | 植物光合作用最适宜温度/°C  | 25°                |
| $P_{\text{rm}}$      | 各月降水量/mm  | *                  |
| WUE                  | 水分利用效率/%  | 0.389 <sup>a</sup> |
| Soilcap              | 土壤最大持水力/%   | 80 <sup>b</sup>    |
| Hum <sub>a</sub>     | 各月湿度均值/%  | *                  |
| $f$                  | 土壤水分释放参数  | 0.04 <sup>b</sup>  |
| Rad                  | 各月辐射量/(MJ·m <sup>-2</sup> )   | *                  |
| Radhour              | 各月日照时数/h  | *                  |
| RadPerc              | 日照百分比/%   | *                  |
| $K$                  | 冠层消光系数  | 0.5 <sup>c</sup>   |
| LAI <sub>a</sub>     | 平均叶面积指数/m <sup>2</sup>  | 2.66 <sup>a</sup>  |
| $L_{\text{halfSat}}$ | 平均半饱和光强/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 155 <sup>a</sup>   |

a: 采用本文 2.2 测定结果; b: 参考自 PnET 模型参数表<sup>[10]</sup>; c: 经验常数<sup>[11-12]</sup>; \* 气象数据, 来源于深圳气象局, 见表 3

表 3 PnET 模型中采用的深圳气象数据

Table 3 Meteorological data of Shenzhen used in model PnET

| 气象要素                     | 月份    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| 平均温度/°C                  | 14.9  | 15.5  | 18.7  | 22.5  | 25.7  | 27.8  | 28.6  | 28.2  | 27.2  | 24.7  | 20.4  | 16.4  |
| 降水量/mm                   | 29.8  | 44.1  | 67.5  | 173.6 | 238.5 | 296.4 | 339.3 | 368.0 | 238.2 | 99.4  | 37.4  | 34.2  |
| 相对湿度/%                   | 71.7  | 76.8  | 79.5  | 81.0  | 81.7  | 81.8  | 80.5  | 81.8  | 78.8  | 72.4  | 68.4  | 67.1  |
| 太阳辐射量/MJ·m <sup>-2</sup> | 344.8 | 298.8 | 351.8 | 398.8 | 488.7 | 479.2 | 569.0 | 520.8 | 504.7 | 493.0 | 404.2 | 371.3 |
| 日照时数/h                   | 155.5 | 105.2 | 108.8 | 124.7 | 168.7 | 174.6 | 231.4 | 204.1 | 191.8 | 214.5 | 194.2 | 186.7 |
| 日照百分比/%                  | 46    | 33    | 29    | 33    | 41    | 43    | 56    | 51    | 52    | 60    | 59    | 56    |

根据冠层实际净光合速率和日夜时长，计算植物冠层年固碳 (CO<sub>2</sub>) 总量：

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{sn_{ci}} \cdot (DL_i - 0.1NL_i) \quad (4)$$

式中  $P_y$  为植物冠层年吸收 CO<sub>2</sub> 总量 (g)。n 为月份，取值 1~12。 $P_{sn_{ci}}$  为植物冠层第  $i$  月固碳总量 (g·s<sup>-1</sup>)， $DL_i$  为第  $i$  月日长 (s)， $NL_i$  为第  $i$  月夜长 (s)，0.1 表示夜间呼吸作用所释放 CO<sub>2</sub> 为日间同化作用吸收之 CO<sub>2</sub> 的 0.1 倍<sup>[9,13]</sup>。

2.3.2 植被固碳释氧量的空间推算 根据物种组成调查结果，深圳城市植被共有 63 个优势物种，其冠层覆盖度占特区城市植被面积的 75.7%。本研究测定了其中 38 种植物的光合速率。在植物个体净光合速率向植被总固碳释氧量的推算过程中，农田的最大净光合速率值参考水稻光合速率相关文献，取 25 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup><sup>[14]</sup>，其它未测定植物按 38 种已测植物的均值 8.31 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 替代。

基于植物种个体的净光合有效速率推出各类型城市植被的固碳量：

$$P_i = \sum_{i=1}^n P_{yi} \times LAI_i \times S_i \quad (5)$$

式中  $P_i$  为样地植被的年固碳总量，单位为克 (g)。n 为植物种的数目。 $P_{yi}$  为第  $i$  个种的年固碳总量，

单位为克 (g)，按 2.3.1 所述之方法求得。 $LAI_i$  为第  $i$  个种的单位叶面积指数，单位为平方米 (m<sup>2</sup>)。 $S_i$  为第  $i$  个种于该样地的总盖度，由植株冠幅求得，单位为平方米 (m<sup>2</sup>)。

从样地的年固碳总量推算深圳特区各城市植被类型的年固碳总量：

$$G_h = (P_i \times S_h / S_s) / 10^6 \quad (6)$$

式中  $G_h$  为深圳特区某种类型城市植被的年固碳总量，单位为吨 (t)。 $P_i$  为样地的年固碳总量，单位为克 (g)。 $S_h$  为深圳特区该城市植被类型的面积， $S_s$  是样地面积。

深圳各类型城市植被的年释氧总量按光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 和释放 O<sub>2</sub> 1:1 的摩尔比计算。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 优势植物及其固碳释氧效应

表 4 列出了深圳特区 63 种优势植物盖度占特区城市植被的比例、叶面积指数和植物年吸收 CO<sub>2</sub> 量及释放 O<sub>2</sub> 量。其中，农田固碳释氧量由文献参考值计算而得，其它未测植物由 38 种已测植物的平均净光合速率计算而得，由均值推出的结果为单位叶面积年吸收 CO<sub>2</sub> 810.69 g，释放 O<sub>2</sub> 589.60 g。

表 4 深圳特区优势植物固碳释氧效应

Table 4 The amount of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release of dominant plant species in Shenzhen Special Zone

| 种名                                       | 各物种盖度占城市植被比例/% | 叶面积指数/m <sup>2</sup> | 单位叶面积年吸收 CO <sub>2</sub> 量/g | 单位叶面积年释放 O <sub>2</sub> 量/g |
|--|----------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1. 马占相思 <i>Acacia mangium</i>            | 3.49           | 1.82                 | 656.55                       | 477.49                      |
| 2. 大叶相思 <i>Acacia auriculaeformis</i>    | 1.60           | 1.40                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 3. 台湾相思 <i>Acacia confusa</i>            | 4.25           | 1.52                 | 754.11                       | 548.44                      |
| 4. 降真香 <i>Acronychia pedunculata</i>     | 1.89           | 3.70                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 5. 水团花 <i>Adina rubella</i>              | 1.43           | 3.38                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 6. 银柴 <i>Aporosa dioica</i>              | 2.61           | 1.84                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 7. 假槟榔 <i>Archontophoenix alexandrae</i> | 0.11           | 1.13                 | 314.13                       | 228.46                      |
| 8. 波罗蜜 <i>Artocarpus heterophyllus</i>   | 0.72           | 2.72                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 9. 地毯草 <i>Axonopus affinis</i>           | 0.30           | 2.58                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 10. 羊蹄甲 <i>Bauhinia blakeana</i>         | 0.04           | 3.06                 | 1 046.78                     | 761.29                      |
| 11. 秋枫 <i>Bischofia javanica</i>         | 0.12           | 2.45                 | 630.21                       | 458.34                      |
| 12. 木棉 <i>Bombax malabaricum</i>         | 0.19           | 0.92                 | 1 121.90                     | 815.93                      |
| 13. 簕杜鹃 <i>Bougainvillea spectabilis</i> | 0.37           | 4.72                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 14. 红千层 <i>Callistemon rigidus</i>       | 0.19           | 1.82                 | 687.77                       | 500.20                      |
| 15. 油茶 <i>Camellia oleifera Abel</i>     | 0.89           | 4.47                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 16. 美人蕉 <i>Canna generalis</i>           | 0.27           | 2.05                 | 1 128.73                     | 820.89                      |
| 17. 福建茶 <i>Carmona microphylla</i>       | 0.10           | 5.69                 | 678.02                       | 493.10                      |
| 18. 短穗鱼尾葵 <i>Caryota mitis</i>           | 0.03           | 4.86                 | 810.69                       | 589.60                      |
| 19. 蕺菜 <i>Castanopsis fissa</i>          | 1.54           | 0.13                 | 810.69                       | 589.60                      |

(续表4)

| 种名  | 各物种盖度占<br>城市植被比例/% | 叶面积<br>指数/m <sup>2</sup> | 单位叶面积年<br>吸收 CO <sub>2</sub> 量/g | 单位叶面积年<br>释放 O <sub>2</sub> 量/g |
|---|--------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 20. 散尾葵 <i>Chrysalidocarpus lutescens</i>                   | 0.14               | 1.27                     | 529.73                           | 385.26                          |
| 21. 麻楝 <i>Chukrasia tabularis</i>                           | 0.35               | 1.99                     | 387.30                           | 281.67                          |
| 22. 阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>                          | 0.16               | 4.00                     | 539.49                           | 392.35                          |
| 23. 樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>                           | 1.12               | 3.26                     | 977.52                           | 710.92                          |
| 24. 柑橘 <i>Citrus reticulata</i> Banco                       | 1.35               | 2.80                     | 390.23                           | 283.80                          |
| 25. 椰子 <i>Cocos nucifera</i>                                | 0.19               | 0.49                     | 345.35                           | 251.16                          |
| 26. 黄牛木 <i>Cratoxylum cochinchinenses</i>                   | 2.57               | 1.51                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 27. 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>                       | 0.67               | 4.27                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 28. 凤凰木 <i>Delonix regia</i>                                | 1.45               | 1.85                     | 1 144.34                         | 832.24                          |
| 29. 人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>                    | 0.09               | 2.08                     | 595.09                           | 432.80                          |
| 30. 假连翘 <i>Duranta repens</i>                               | 0.59               | 3.24                     | 423.39                           | 307.92                          |
| 31. 桉树 <i>Eucalyptus citriodora</i>                         | 2.27               | 0.83                     | 1 729.67                         | 1 257.95                        |
| 32. 三叉苦 <i>Evodia lepta</i>                                 | 0.91               | 4.09                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 33. 红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>                   | 0.09               | 7.40                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 34. 高山榕 <i>Ficus altissima</i>                              | 0.17               | 2.25                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 35. 垂叶榕 <i>Ficus benjamina</i>                              | 0.14               | 1.34                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 36. 榕树 <i>Ficus microcarpa</i>                              | 1.00               | 2.67                     | 1 079.95                         | 785.42                          |
| 37. 金叶榕 <i>Ficus microcarpa</i> f. cv. <i>Golden Leaves</i> | 0.14               | 3.41                     | 908.25                           | 660.55                          |
| 38. 大叶榕 <i>Ficus virens</i> var. <i>sublanceolata</i>       | 0.41               | 2.56                     | 436.08                           | 317.15                          |
| 39. 扶桑 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>                        | 0.04               | 4.99                     | 1 077.02                         | 783.29                          |
| 40. 蜘蛛兰 <i>Hymenocallis littoralis</i>                      | 0.14               | 3.76                     | 958.98                           | 697.44                          |
| 41. 龙船花 <i>Ixora chinensis</i>                              | 0.04               | 1.52                     | 959.95                           | 698.15                          |
| 42. 非洲桃花心木 <i>Khaya senegalensis</i>                        | 0.26               | 2.26                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 43. 大花紫薇 <i>Lagerstroemia speciosa</i>                      | 0.10               | 3.49                     | 451.69                           | 328.50                          |
| 44. 马缨丹 <i>Lantana camara</i> cv. <i>Flava</i>              | 0.07               | 3.27                     | 1 144.34                         | 832.24                          |
| 45. 荔枝 <i>Litchi chinensis</i>                              | 13.62              | 2.13                     | 571.68                           | 415.77                          |
| 46. 豺皮樟 <i>Litsea rotundifolia</i>                          | 3.77               | 5.59                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 47. 蒲葵 <i>Livistona chinensis</i>                           | 0.14               | 2.89                     | 660.46                           | 480.33                          |
| 48. 梅叶冬青 <i>Ilex asprella</i>                               | 2.69               | 2.22                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 49. 芒果 <i>Mangifera indica</i>                              | 0.47               | 2.93                     | 703.38                           | 511.55                          |
| 50. 白兰 <i>Michelia alba</i>                                 | 0.25               | 3.30                     | 1 089.70                         | 792.51                          |
| 51. 夹竹桃 <i>Neroum oleander</i>                              | 0.10               | 1.12                     | 811.67                           | 590.30                          |
| 52. 海枣 <i>Phoenix dactylifera</i>                           | 0.05               | 1.09                     | 850.69                           | 618.68                          |
| 53. 九节 <i>Psychotria rubra</i>                              | 2.34               | 3.28                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 54. 大王椰 <i>Ravenea rivularis</i>                            | 0.65               | 1.54                     | 574.61                           | 417.90                          |
| 55. 桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>                        | 0.66               | 1.25                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 56. 山乌柏 <i>Sapium discolor</i>                              | 1.22               | 2.46                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 57. 鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>                        | 2.32               | 1.91                     | 810.69                           | 589.60                          |
| 58. 木荷 <i>Schima superba</i>                                | 3.02               | 0.85                     | 856.55                           | 622.94                          |
| 59. 金山葵 <i>Syagrus romanzoffiana</i>                        | 0.12               | 2.97                     | 699.48                           | 508.71                          |
| 60. 白蝴蝶 <i>Syngonium podophyllum</i> cv. <i>Albovirens</i>  | 0.30               | 3.11                     | 343.40                           | 249.74                          |
| 61. 海南蒲桃 <i>Syzygium cumini</i>                             | 0.08               | 3.18                     | 1 070.19                         | 778.32                          |
| 62. 蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>                            | 0.16               | 2.89                     | 485.83                           | 353.33                          |
| 63. 台湾草 <i>Zoysia tenuifolia</i>                            | 4.27               | 2.28                     | 2 221.36                         | 1 615.53                        |
| 农田  | 4.95               | 2.45                     | 2 438.91                         | 1 773.75                        |
| 其它  | 24.26              | 2.66                     | 810.69                           | 589.60                          |

从表中可以看出，城市生产绿地在发挥其作为初级生产者功用的同时，还具备强大气候环境调节功能。深圳人工草坪的优势种台湾草拥有仅次于农田的固碳释氧效应，这与该物种的速生性以及人工草坪经受频繁修剪的人为干扰有关。

38种直接测定的优势物种中，年固碳释氧量较大（年吸收CO<sub>2</sub>大于均值810.69g，释放O<sub>2</sub>大于均值589.60g）的植物包括：羊蹄甲、木棉、樟树、凤凰木、桉树、榕树、白兰、木荷、海南蒲桃等乔木；美人蕉、扶桑、蜘蛛兰、龙船花、马缨丹、夹竹桃、海枣等灌木以及台湾草。

### 3.2 城市植被固碳释氧效应

深圳特区优势植物固碳释氧量的时空推算结果显示，城市植被年吸收CO<sub>2</sub>量为4.78×10<sup>5</sup>t，年释放O<sub>2</sub>量为3.47×10<sup>5</sup>t。各月固碳释氧量变化见图1。

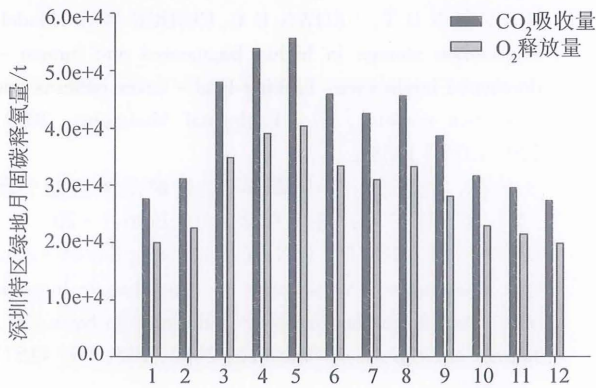


图1 深圳特区城市植被各月固碳释氧量

Fig.1 The amount of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release from urban vegetation monthly in Shenzhen Special Zone

图1显示，深圳城市植被的固碳释氧量冬季1、2月较低，进入春季开始显著增长，5月达到最高，占全年固碳释氧量的11.7%，夏季6-8月回落并上下浮动，9月进入秋冬季节后持续下降，12月达到最低值，仅占全年5.7%。结果显示深圳特区城市植被固碳释氧效应的强度按季节排序为：春季>夏季>秋季>冬季。

深圳城市植被固碳释氧量的季节变化受当地太阳辐射量、气温、降水、湿度以及日夜时长等因素的综合影响。春夏季较秋冬季节有更高的太阳辐射量以及日照时数，这是春夏季节的植被固碳释氧量高于秋冬季的主要原因。深圳的夏季温度偏高，因此平均水汽压差值最高，已有的研究表明当水汽压差值偏高时，植物的气孔导度会大幅下降，从而限

制了光合以及蒸腾作用，因此认为高温对气孔导度的影响，是夏季固碳释氧效应低于春季的主要原因。

表4列出了深圳特区各类型城市植被的面积以及年吸收CO<sub>2</sub>与释放O<sub>2</sub>的推算结果，可见郊野林具有最大的固碳释氧能力，其年固碳释氧量占特区总量的57.9%，其次是生产绿地，占22.5%，对于城市中心的各类型绿地，休闲绿地和道路绿地较高，分别为8.7%和8.5%，居住区绿地和单位附属绿地较低，分别为1.4%和1.1%。总体平均而言，城市植被年均单位面积日吸收CO<sub>2</sub>量为2.57kg·m<sup>-2</sup>，年均释放O<sub>2</sub>为1.87kg·m<sup>-2</sup>。各类型城市植被单位面积年固碳释氧量由大到小为：道路绿地>休闲绿地>郊野林>生产绿地>居住区绿地>单位附属绿地（图2）。

表5 深圳特区城市植被年固碳释氧量

Table 5 The amount of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release of urban vegetation in Shenzhen Special Zone

| 城市植被类型 | 面积 /km <sup>2</sup> | 年均吸收 CO <sub>2</sub> 量/10 <sup>3</sup> t | 年均释放 O <sub>2</sub> 量/10 <sup>3</sup> t |
|--------|---------------------|--|---|
| 郊野林    | 98.60               | 276.34                                   | 200.94                                  |
| 休闲绿地   | 13.96               | 41.36                                    | 30.08                                   |
| 道路绿地   | 11.85               | 40.44                                    | 29.41                                   |
| 居住区绿地  | 5.73                | 6.65                                     | 4.83                                    |
| 单位附属绿地 | 8.49                | 5.20                                     | 3.78                                    |
| 生产绿地   | 47.14               | 107.55                                   | 78.22                                   |
| 总体     | 185.77              | 477.53                                   | 347.30                                  |

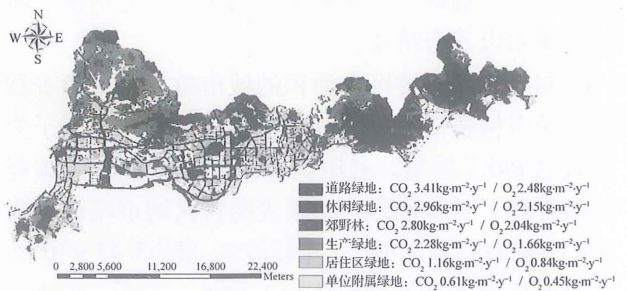


图2 深圳特区各类型城市植被单位面积固碳释氧量

Fig.2 The unit area amount of CO<sub>2</sub> sequestration and O<sub>2</sub> release of various urban vegetation in Shenzhen Special Zone

本研究对植被固碳释氧量的推算，建立在大面积样方调查和多种植物光合速率的测定之上，并结合了多种影响植物光合作用的气候因子，一定程度上提高了以典型植被类型和典型天气代表全局的常规方法进行估算的精度。推算结果从各类型城市植被物种丰富度和配置结构的优劣角度反映了植被的

生态效益。

位于城市边缘地带的郊野林受人为干扰较小,是现存或潜在乡土物种的分布地,其物种丰富度远远超过了城区各种绿地,这是其固碳释氧总量占特区城市植被比例最大的原因。生产绿地作为第一性生产者的功能使其具有仅次于郊野林的固碳释氧潜力,其一般分布于建成区和郊野林的过渡区域(图2),较高的生态效益加强了其城乡缓冲区功能。深圳特区道路绿地和休闲绿地具有较高的单位面积固碳释氧量,得益于深圳特区主干道乔灌木复层立体结构的搭建以及各大主题公园的营建,这两种类型绿地的分布贯穿城市(图2),其吸收CO<sub>2</sub>和释放O<sub>2</sub>的平衡作用能得到较大程度的发挥。根据样方调查结果,深圳单位附属绿地和居民小区存在植物种植密度偏低、复层结构不明显等问题,造成这两种类型绿地的单位面积以及总固碳释氧量方面位居6种末位。单位附属绿地和居民小区位于城市核心区,植被平衡温室气体浓度以及调节区域气候的作用重要,加强这两种类型绿地的绿化程度,选择固碳释氧能力较高的植物种对绿地结构进行立体的合理配置,是改善人居环境的有效途径。

## 4 结 论

对深圳特区主要园林植物固碳释氧效应的测定结果显示:单位面积固碳释氧效应较好的热带亚热带园林物种包括羊蹄甲、木棉、樟树、凤凰木、桉树、榕树、白兰、木荷、海南蒲桃等乔木;美人蕉、扶桑、蜘蛛兰、龙船花、马缨丹、夹竹桃、海枣等灌木以及台湾草。

利用对深圳特区大面积的城市植被样方调查和航片城市植被信息的提取,结合以深圳气候因子为参数的PnET模型,对深圳特区城市植被的固碳释氧量进行了时空推算,结果表明特区城市植被年吸收CO<sub>2</sub>量为4.78×10<sup>5</sup>t,年释放O<sub>2</sub>量为3.47×10<sup>5</sup>t,年均单位面积吸收CO<sub>2</sub>量为2.57kg·m<sup>-2</sup>,年均释放O<sub>2</sub>量为1.87kg·m<sup>-2</sup>。深圳特区城市植被固碳释氧效应的强度按季节排序为春季>夏季>秋季>冬季,而6种绿地类型中,位于特区外围的郊野绿地具有最大的年固碳释氧总量,占特区城市植被总固碳释氧量的57.9%,是特区最大的CO<sub>2</sub>汇。深圳的道路系统绿地则有最大的年均单位面积固碳释氧量,年均吸收CO<sub>2</sub>达3.41kg·m<sup>-2</sup>,年均释放O<sub>2</sub>达2.48kg·m<sup>-2</sup>,对深圳市区的生态环境起到良好的平衡作用。而居住区和单位附属绿地由于植物种植密度较低,复层结构不明显等原因,单位面积以

及总的固碳释氧量均较低,在城市生态环境的改善过程中,应以生态效益较强的园林物种加强这两个区域的绿化建设。

## 参考文献:

- [1] WATSON R T, VERARDO D J. Land - use Change and Forestry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA [J]. Environmental Pollution, 2002, 116:381 - 389.
- [3] 彭立华,陈爽,刘云霞,等. Citygreen 模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用[J]. 应用生态学报,2007, 18(6): 1293 - 1298.
- [4] MACFARLANE D W. Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration and sustainable forest management in the USA[J]. Biomass And Bioenergy, 2009, 33: 628 - 634.
- [5] ROBINSON D T, BROWN D G, CURRIE W S. Modeling carbon storage in highly fragmented and human - dominated landscapes: Linking land - cover patterns and ecosystem models [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 1325 - 1338.
- [6] 王伯荪,余世孝,彭少麟,等. 植物群落学实验手册[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1996:1 - 20.
- [7] OWEN S M, HEWITT C N. Extrapolating branch enclosure measurements to estimates of regional scale biogenic VOC fluxes in the northwestern Mediterranean basin [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105, D9: 11573 - 11584.
- [8] PRADO C A, MORAES J V. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of cerrado vegetation under field conditions [J]. Photosynthetica, 1997, 33(1): 103 - 112.
- [9] ABER J D, FEDERER C A. A generalized, lumped - parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems [J]. Oecologia, 1992, 92: 463 - 474.
- [10] ABER J D, OLLINGER S V, FEDERER C A, et al. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States [J]. Climate Research, 1995, 5: 207 - 222.
- [11] WELLES J M, COHEN S. Canopy Structure Measurement by Gap Fraction Analysis Using Commercial Instrumentation [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(302): 1334 - 1342.
- [12] 陈润政,黄上志,宋松泉,等. 植物生理学[M]. 广州: 中山大学出版社, 1998: 65 - 77.
- [13] YU H, BEE L O. Diurnal Photosynthesis and carbon economy of *Acacia mangium* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(5): 624 - 630.
- [14] 刘彦卓,黄农荣,陈钊明,等. 高产水稻光合速率的变化[J]. 热带亚热带植物学报, 1999(增刊II): 49 - 53.