



# 呼和浩特市 13 种绿化植物 固碳释氧效率的比较研究

郝鑫杰, 李素英\*, 王继伟, 陈璇, 常英, 吴佳佳, 孙改清

(内蒙古工业大学 能动学院 环境科学与工程系, 呼和浩特 010051)

**摘要:**以呼和浩特市 13 种主要城市绿化植物为研究对象, 采用 LI-6400 光合仪对植物的光合生理生态指标进行测定, 对其固碳释氧效率进行量化研究, 以探讨植物光合作用固定二氧化碳和释放氧气的效率, 分析影响固碳释氧效率的因素, 明确各植物的固碳释氧效率, 为半干旱地区的城市绿化提供科学理论依据。结果显示: (1) 不同植物的日光合速率的变化趋势不同, 其中早熟禾、萱草、叉子圆柏、侧柏、云杉、圆柏、油松为单峰曲线, 芍药、连翘、紫丁香、国槐、垂柳、新疆杨为双峰型; 而在 6 月到 11 月中各植物的固碳量变化趋势表现基本相同, 固碳量的高值出现在 6 月前后和 9 月前后。 (2) 植物固碳量排序为: 连翘 > 国槐 > 新疆杨 > 紫丁香 > 油松 > 叉子圆柏 > 圆柏 > 芍药 > 萱草 > 垂柳 > 侧柏 > 云杉 > 早熟禾。 (3) 植物的固碳量与光合速率、蒸腾速率、空气温度、叶片温度之间均呈极显著相关关系。研究表明, 在半干旱地区的城市绿化植物配置时, 应优选固碳释氧相对较强的植物 (落叶乔木为国槐、常绿乔木为油松、灌木为连翘、草本为芍药), 而固碳释氧能力较弱的植物可作为长寿植物种和观赏植物种选种。

**关键词:** 绿化植物; 固碳释氧; 相关分析; 主成分分析; 呼和浩特

**中图分类号:** Q948.115

**文献标志码:** A

## 13 Species of Urban Greening Plants in Hohhot Based on the Efficiency of Carbon Fixation

HAO Xinjie, LI Suying\*, WANG Jiwei, CHEN Xuan,  
CHANG Ying, WU Jiajia, SUN Gaiqing

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** 13 species of urban greening plants in Hohhot were selected for study. The photosynthetic physiology and ecology indexes of plants were measured by using LI-6400 portable photosynthesis system and the carbon fixation capacity of the plants were quantitatively studied. The effects of plant photosynthesis on the carbon fixation were studied. The factors affecting the efficiency of carbon sequestration were analyzed. The order of carbon sequestration efficiency was determined. The result indicated that: (1) different plants had different trends in daily carbon fixation, *Poa pratensis*, *Hemerocallis fulva*, *Paeonia lactiflora* an single peak curve, and *Platycladus orientalis*, *Picea asperata*, *Sabina chinensis*, *Pinus tabuli-*

**收稿日期:** 2017-02-10; **修改稿收到日期:** 2017-05-03

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31060078); 内蒙古自然科学基金 (2016MS0307); 内蒙古自治区“大学生创新创业训练计划”项目 (201610128003)

**作者简介:** 郝鑫杰 (1995—), 女, 本科生, 主要从事环境科学方面的研究。E-mail: 153964846@qq.com

\* 通信作者: 李素英, 教授, 主要从事草地遥感方面的研究。E-mail: lisuying70@sina.com

*formis*, *Sabina vulgaris*, *Forsythia suspensa*, *Syringa oblata*, *Sophora japonica*, *Salix babylonica*, *Populus alba* var. *pyramidalis* had double-peak curve. From June to November, the trend of carbon sequestration of each plant was basically the same that the high value of carbon sequestration appeared around June, and before or after September. (2) Carbon sequestration of plants: *Forsythia suspensa* > *Sophora japonica* > *Populus alba* var. *pyramidalis* > *Syringa oblata* > *Pinus tabulaeformis* > *Sabina vulgaris* > *Sabina chinensis* > *Paeonia lactiflora* > *Hemerocallis fulva* > *Salix babylonica* > *Platycladus orientalis* > *Picea asperata* > *Poa pratensis*; (3) there was a significant correlation between carbon sequestration and photosynthetic rate, transpiration rate and air temperature. According to the main species of carbon dioxide fixation and oxygen release analysis showed that the plant configuration, carbon fixation and oxygen release of relatively strong plants as the preferred plant (the arbors optimum with *Sophora japonica*, evergreen arbors with *Pinus tabulaeformis*, the shrubs optimum with *Forsythia suspensa*, the herbaceous plants optimum with *Paeonia lactiflora*), while carbon fixation ability could be used as a long-lived species and ornamental species, which were suitable for selection for a large area of green. The purpose of this study was to provide reference for the selection of urban greening plants, to provide theoretical support for the construction of urban greening plant communities, and to provide scientific basis for the construction of urban ecological gardens.

**Key words:** greening shrub species; carbon fixation; correlation analysis; principal components analysis; Hohhot

全球各界努力减缓温室效应的影响<sup>[1-2]</sup>,而植物可以称得上最经济的绿色“吸碳器”<sup>[3]</sup>,且不同种植物、同种植物在全年中固碳释氧能力均不同<sup>[4-6]</sup>。城市绿化植物研究多侧重于落叶乔木和灌木植物的选择,研究内容主要集中在植物的光合速率日变化、生长季光合速率变化、光合作用与生物量的关系、叶面积指数等方面,研究区以南方亚热带季风气候地区为主。植物固碳研究采用逐步回归分析、灰色关联度、通径分析、聚类分析、绿量分析方法,分析植物固碳量的影响因素<sup>[7-14]</sup>,但少见半干旱区城市绿化植物固碳效率的系统性研究,而这关系到中国北方城市绿地植物的节能减排效果。

呼和浩特地处半干旱区,城市绿化植物的选择关系到二氧化碳的固定效率,会影响区域温室气体的排放。本文以城市绿化占比率高的植物为研究对象,监测北方植物 2016 年 6 月到 11 月植物的光合效率、固碳释氧效率及其影响因素,主要目标为:分析绿化植物固碳释氧的变化规律;研究植物固碳释氧效率的影响因素;排列绿化植物的固碳释氧效率,以期筛选出高固碳释氧效率的绿化植物,为半干旱地区的城市绿化建设与改造提供科学合理的依据。

## 1 研究区概况

呼和浩特市地处 E110°46′~112°18′, N39°35′~41°23′。平均海拔 1 050 m,属温带大陆性季风气候,春季干旱多风,冬季寒冷干燥,其特点是光照充足,降水少,温差大。7 月、8 月最热,年平均气

温为 6.7℃,降水集中在夏季 7、8 月份,秋季降水多于春季,年降水量 395.4 mm 左右,年大风日最多达 52 d,无霜日达 150 d。土壤类型以潮土、栗钙土和灰褐土为主<sup>[4]</sup>。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验材料

通过查阅呼和浩特市常见的绿化植物种的相关资料<sup>[14-17]</sup>,并结合呼和浩特市主要街道常见绿化植物的实地调查和统计,筛选出 13 种植物为试验材料,其中:落叶乔木 3 种——新疆杨(变种)(*Populus alba* var. *pyramidalis*)、垂柳(*Salix babylonica*)、国槐(*Sophora japonica*),常绿乔木 4 种——油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、圆柏(*Sabina chinensis*),灌木 3 种——叉子圆柏(*Sabina vulgaris*)、紫丁香(*Syringa oblata*)、连翘(*Forsythia suspensa*),草本 3 种——早熟禾(*Poa pratensis*)、芍药(*Paeonia lactiflora*)、萱草(*Hemerocallis fulva*)。所选植株全部为生长健康,无明显病虫害,且生长环境基本一致的植物。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 植物光合生理生态指标的测定与计算** 实验于 2016 年 6 月到 11 月进行,选择晴朗无风或微风的天气,采用 Li-6400 便携式光合测定仪在自然条件下于每月中下旬测定 1 期,测定时间为 8:00~18:00,每隔 2 h 测量 1 次。本研究选择生长状况良

好的 2 株植物为待测植物,测量阳面大小相似、生长良好的叶片,每次每株取 3 片。为保证结果的准确性,每片叶子离体后尽量在 5 min 内完成测量<sup>[13,18]</sup>。LI-6400 便携式光合仪共可测得 52 种生理生态指标,本研究选取了通用的光合因子来研究植物净光合,主要包括净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、叶片温度( $T_l$ )、空气温度( $T_a$ )、大气湿度( $RH$ )共 7 项生理生态指标求取 13 种绿化植物的平均值,使用 SPSS19.0 和 EXCEL2010 进行数据分析。

每次测定 2 株植物的 6 片叶子,每片叶子选择光合速率值趋于稳定时的 4 个值,每个检测时段共获取 24 个瞬时光合速率值,求平均值,作为该种植物的光合值;分析一天中 6 个检测时段(8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00)的净光合速率及光合因子。本文取 6 月到 11 月同种植物的相同时间点的净光合速率平均值,分析绿化植物的净光合速率日变化,计算公式如下:

$$P_{n\text{平均}}=(P_{n1}+P_{n2}+P_{n3}+\dots P_{n24})/24$$

2.2.2 植物单位叶面积固碳释氧量的计算与分析

实验数据采用 Excel 和 SPSS19.0 软件处理,对每株植物所测量的平均值进行分析。植物当日测定的净同化量计算公式<sup>[7]</sup>为:

$$P=\sum_{i=1}^j[(P_{i+1}+P_i)+2\times(t_{i+1}-t_i)\times3\,600\div1\,000]$$

其中, $P$  为测定的日同化总量,单位为  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , $P_i$  指初测点的瞬时光合速率, $P_{i+1}$  为下一测点的瞬时光合速率,单位为  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_i$  为初测点时间, $t_{i+1}$  为下一测点时间,单位 h; $j$  为测定次数,3 600 指每小时为 3 600 s,1 000 指 1 mmol 为 1 000  $\mu\text{mol}$ 。

以白天进行光合作用所吸收的  $\text{CO}_2$  量为基础,植物每天的净固碳量还应该扣除其夜间暗呼吸所释放的  $\text{CO}_2$  量<sup>[19]</sup>。但是一般进行固碳释氧量的研究时不会测量植物夜间的暗呼吸速率,因此可以根据经验值将其设定为 20%。根据绿色植物的光合作用反应方程:



可将植物的日同化总量换算为日固碳量<sup>[8]</sup>,用测定的日同化总量换算为测定日固定  $\text{CO}_2$  量为:

$$W_{\text{CO}_2}=P(1-0.2)\times44/1\,000$$

式中:44 为  $\text{CO}_2$  的摩尔质量,单位  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $W_{\text{CO}_2}$  为单位面积的叶片固定  $\text{CO}_2$  的质量,单位为  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,根据光合作用的反应式可计算出该测

定日植物释放氧气的质量为:

$$W_{\text{O}_2}=P(1-0.2)\times32/1\,000$$

式中: $W_{\text{O}_2}$  为日释放  $\text{O}_2$  的量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 32 为  $\text{O}_2$  的摩尔质量。

本文分析了呼和浩特不同生活型绿化植物固碳量的生长季变化,计算公式如下:

$$P=\sum_{i=1}^j[(P_{i+1}+P_i)+2\times(t_{i+1}-t_i)\times3\,600\div1\,000]$$

$$W_{\text{CO}_2}=P(1-0.2)\times44/1\,000$$

本文计算了落叶乔木、常绿乔木、灌木、草本的固碳量,以分析植物类型间的固碳量差异,计算公式如下:

$$W_{\text{CO}_2}=P(1-0.2)\times44/1\,000$$

$$P=(P_1+P_2+P_3+\dots P_i)/i$$

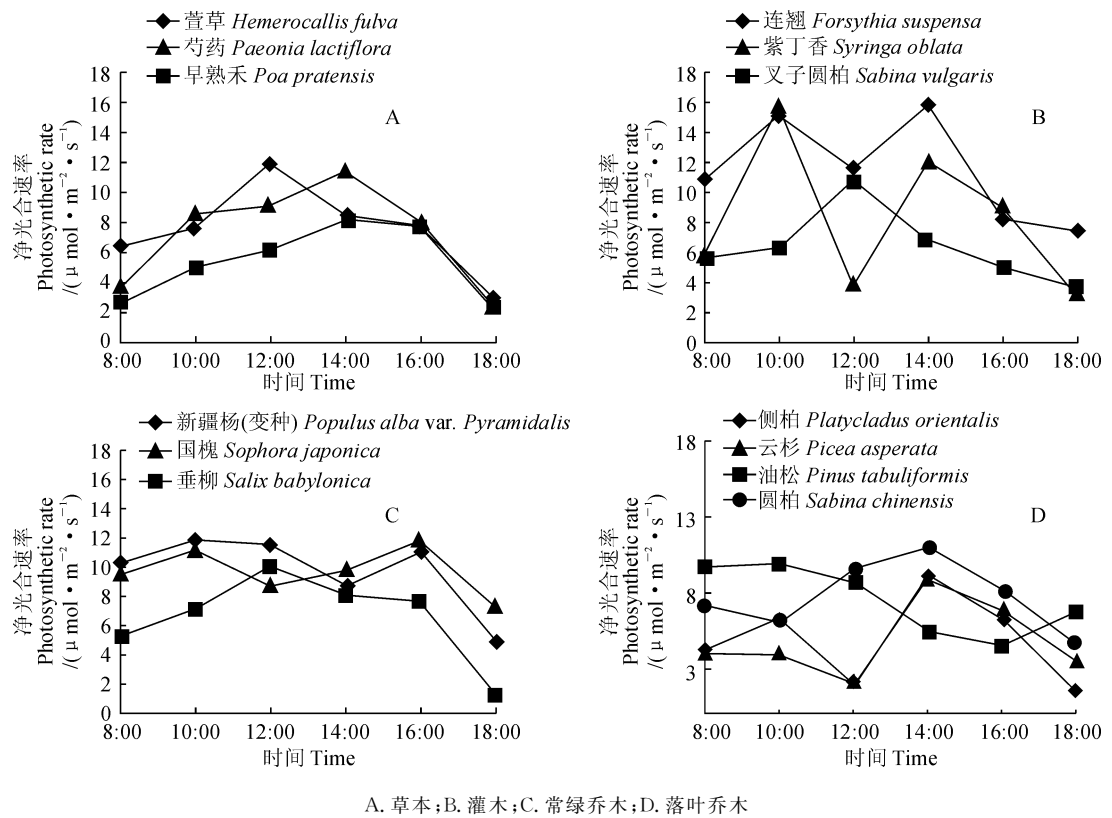
式中: $W_{\text{CO}_2}$  为每日固定  $\text{CO}_2$  的量 [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ], $P$  为植物类型的日同化总量, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $\dots$ 、 $P_i$  分别是同一植物类型的日同化总量。显然,同种植物之间的固碳量、释氧量具有线性相关关系,即释氧量的变化趋势以及排序,植物的释氧量与光合速率、蒸腾速率、空气温度、叶片温度之间的关系与固碳量是一致的。为避免赘述,本研究从固碳量出发,讨论各种植物固碳的变化趋势与影响因子。

3 结果与分析

3.1 固碳释氧分析

3.1.1 植物净光合速率的日变化 由图 1 可以看出,草本植物中早熟禾、萱草的日光合速率变化为单峰曲线,其中早熟禾的峰值出现在 14:00 左右,萱草的峰值则出现在 12:00 左右;芍药为双峰曲线,两峰值分别出现在 10:00 和 14:00(图 1,A);灌木中连翘、紫丁香的日光合速率变化曲线均为双峰曲线,第一个峰值出现在 10:00 左右,第二个峰值出现在 14:00 左右;叉子圆柏为单峰曲线,其峰值出现在 12:00(图 1,B);落叶乔木垂柳、新疆杨、国槐的日光合速率变化均为双峰曲线,第一个峰值出现在 10:00 左右,第二个峰值出现在 16:00 左右(图 1,C);常绿乔木侧柏、云杉、圆柏、油松的日光合速率变化均为单峰曲线,除油松峰值出现在 10:00 外,其余 3 种植物峰值均出现在 14:00(图 1,D)。

不同生活型植物的日净光合变化曲线差异较大,其中早熟禾、萱草、侧柏、云杉、圆柏、油松为单峰曲线,即光合速率随光照强度的增强而增大,随光照强度的减弱而减小。而芍药、国槐、垂柳、新疆杨的日变化曲线则呈现出双峰型,即光合作用随光照强度



A. 草本;B. 灌木;C. 常绿乔木;D. 落叶乔木

图 1 呼和浩特市 13 种绿化植物的日光合变化曲线

A. Herbs;B. Shrub;C. Evergreen trees;D. Deciduous trees

Fig. 1 Daylight photo curve of 13 greening plants in Hohhot City

表 1 呼和浩特市 13 种绿化植物的净同化量、固碳量比较

Table 1 Comparison of Net Assimilation and Carbon Fixation of 13 Greening Plants in Hohhot

物种 Species	日同化总量 Total assimilation per day /(mmol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	单位面积固碳释氧量 The amount of carbon sequestration and oxygen release per unit area/(g·mol <sup>-1</sup> ·d)	
		Wco2	WO <sub>2</sub>
早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	518.061a	18.235 76a	16.577 96a
云杉 <i>Picea asperata</i>	570.650ab	20.086 87ab	18.260 79ab
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	904.692abc	31.845 17abc	28.950 15abc
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	1 012.381abcd	35.635 83abcd	32.396 21abcd
萱草 <i>Hemerocallis fulva</i>	787.607abcd	27.723 78abcd	25.203 44abcd
新疆杨 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	1294.641cd	45.571 37cd	41.428 52cd
芍药 <i>Paeonia lactiflora</i>	874.689abcd	30.789 07abcd	27.990 06abcd
叉子圆柏 <i>Sabina vulgaris</i>	963.156abcd	33.903 08abcd	30.820 98abcd
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	1 338.132d	47.102 24d	42.820 22d
国槐 <i>Sophora japonica</i>	1 303.293cd	45.875 91cd	41.705 38cd
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	1 016.422bcd	35.778 05bcd	32.525 5bcd
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	768.868ab	27.064 14ab	24.603 76ab
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	629.635ab	22.163 16ab	20.148 32ab

注:数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different normal letters after the date indicate significant difference at 0.05 level

的增强出现了先增加,再减小,之后增加的过程,植物的净光合速率出现谷值的原因是由于强光、高温和气孔导度等因素导致植物出现“午休”现象<sup>[8]</sup>。不同植物日光合速率的峰型不同,这与植物种类和生长状况有关。

**3.1.2 绿化植物的单位叶面积固碳释氧量** 本文量化研究了呼和浩特不同类型绿化植物的净同化量、固碳量、释氧量。由表 1 可以看出不同植物的净同化量、固碳量、释氧量差异较大,其中,连翘最高。其单位叶面积固碳量和释氧量分别为 47.102 24 和 42.820 22  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;早熟禾最低,其单位叶面积固碳量和释氧量分别为 18.235 76 和 16.577 962  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;2 种植物相差2.58倍。

**3.1.3 生长季植物固碳量的变化** 本文分析了呼和浩特绿化植物生长季的固碳量变化。由图 2 可以看出,草本植物中,早熟禾、萱草有 3 个峰值分别在 6 月 25 日、9 月 2 日、10 月 23 日;芍药呈单峰型,峰值出现在 6 月 25 日。灌木植物中,叉子圆柏有 3 个峰值分别在 6 月 25 日、9 月 2 日、10 月 23 日;连翘呈单峰型,峰值出现在 9 月 2 日;紫丁香呈单峰型,峰值出现在 7 月 20 日。常绿乔木中,云杉、侧柏有

3 个峰值分别在 6 月 25 日、9 月 2 日、11 月 12 日;油松、圆柏呈双峰型,第一个峰值出现在 6 月 25 日前后,第二个峰值在 9 月 2 日前后,且第二峰值大于第一峰值,这很可能是由于外界环境发生改变,使光合作用能顺利进行所致,温度从 7 月份的高温状态转到正常温度,叶片光合作用器官发育完善能充分接受阳光导致<sup>[20-22]</sup>。落叶乔木中,新疆杨、国槐、垂柳呈双峰型,第一个峰值出现在 6 月 25 日前后,第二个峰值在 9 月 24 日前后。从绿化植物生长季的固碳变化来看,同一生活型的植物变化趋势相似,均在夏季和秋季达到固碳量的峰值,这说明大多数植物在夏季和秋季光合作用强,进而固碳效率高。

**3.1.4 植物生活型的固碳效率** 本文分析落叶乔木、常绿乔木、灌木、草本的固碳量,以检测植物类型间的固碳量差异。由图 3 可知,不同生活型的植物均在 6 月 25 日,9 月 2 日达到固碳量的峰值,说明 6 月和 9 月两时期植物吸收  $\text{CO}_2$  的效率最高。计算植物生活型的固碳效率,结果显示出植物固碳效率大小依次为落叶乔木( $118.511\ 4\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )>灌木( $116.783\ 4\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )>常绿乔木( $109.731\ 4\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )>草本( $76.748\ 6\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

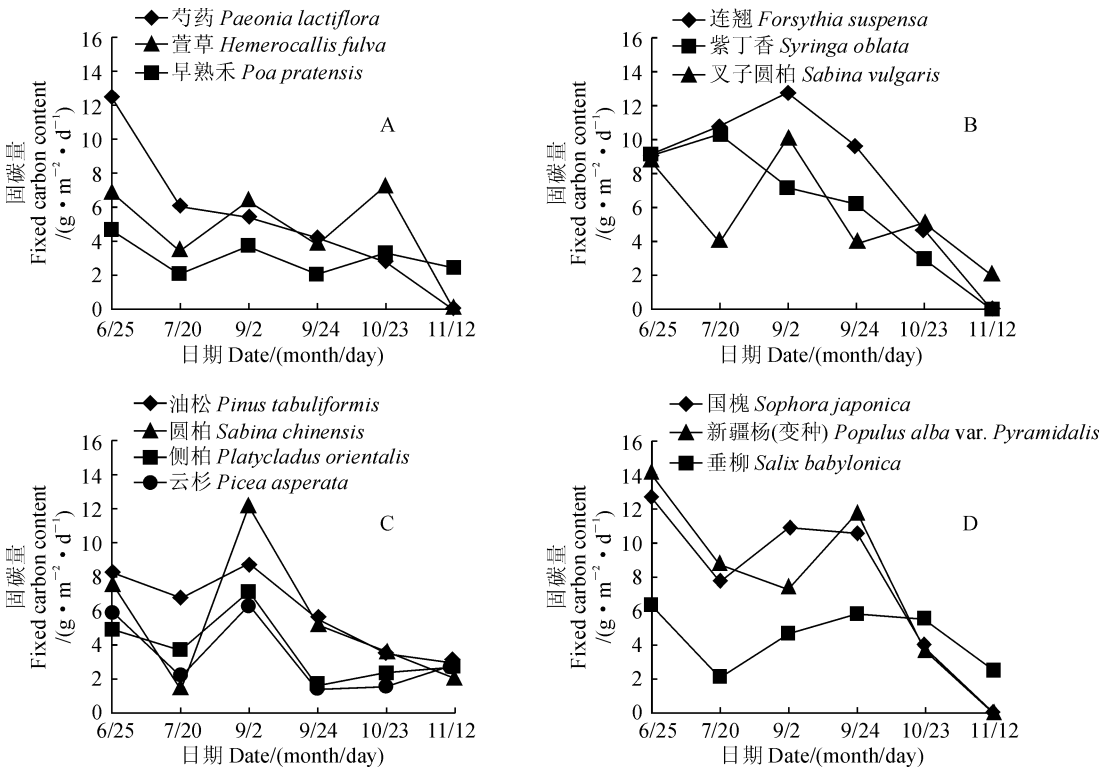


图 2 呼和浩特市 13 种植物固碳量的生长季变化曲线

A. Herbs; B. Shrub; C. Evergreen trees; D. Deciduous trees

Fig. 2 Growth curve of carbon fixation of 13 species in Hohhot

**3.2 植物固碳影响因子的 Pearson 相关分析** 植物的光合作用为内部的、外界多种因素共同作用的结果<sup>[23-24]</sup>。碳在植物中的累计作用并不是线性的,植物固碳效率受到多种因素的影响<sup>[27]</sup>。植物固碳效率不仅受自然环境的影响同时也受植物自身的生理特性限制。外部环境与自身生理特性共同制约植物固碳效率和储碳量变化<sup>[28-29]</sup>。

本研究选取净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、叶片温度( $T_l$ )、等生理因子,空气温度( $T_a$ )、大气相对湿度( $RH$ )等外界因子,利用 SPSS19.0 软件对所测得 13 种绿化植物个体的 7 种光合指标与固碳量,进行 Pearson 相关性分析。植物固碳效率与内外影响因素的相关性分析结果表明,这些因素对于植物固碳效率的大小有着极显著的影响。由表 2 可看出影响固碳量的因素的相关系数差异较大,植物固碳量与净光合速率( $r=0.783^{**}$ ,  $P<0.01$ )、空气温度( $r=0.491^{**}$ ,  $P<0.01$ )、叶片温度( $r=0.499^{**}$ ,  $P<0.01$ )、蒸腾速率( $r=0.394^{**}$ ,  $P<0.01$ )呈现极显著的正相关;

空气温度、叶片温度通过影响光合作用的生化反应和饱和水汽压<sup>[30-31]</sup>,从而影响蒸腾作用、叶片失水、气孔开闭,使得  $\text{CO}_2$  和水汽的进出、光合磷酸化酶活性、RuBp 羧化酶活性、RuBp 的再生发生变化<sup>[31]</sup>,这些由于温度导致的一系列变化影响了光合反应进而影响植物的固碳量。蒸腾效率影响植物固碳量的机理为:植物的蒸腾作用是通过气孔完成的,光合有效辐射增大引起气孔变大,导致蒸腾速率增加,固碳量也随之逐渐增大<sup>[32]</sup>。

3.3 植物固碳量的主成分分析

本研究采用主成分分析法对 13 种植物进行综合评价,主成分分析时把原来的 7 个单项指标转换为 3 个新的综合指标(表 3),这 3 个综合指标反映了 7 个指标的信息,3 个综合指标的累积贡献效率达到了 90.11%,这表示可以较准确全面反映 7 个指标的信息量。由 3 个主成分因子旋转后的载荷矩阵(表 3),其中第一主成分(PC1)方差贡献率达到 42.286%(即 0.422 86,作为第一主成分因子  $F_1$  的系数),主要与叶片温度、空气温度、净光合速率有关,这 3 个元素与第一主成分有较强的相关性,说明它们在第一主成分中有较强的共变关系,这组元素主要与外界空气温度密切相关;第二主成分(PC2)的方差贡献率达到 30.453%(即 0.304 53,作为第二主成分因子  $F_2$  的系数),其主要与大气相对湿度有关,这主要与空气中水分的含量密切相关;第三主成分(PC3)的方差贡献率达到 17.371%(即 0.173 71,作为第三主成分因子  $F_3$  的系数),主要与气孔导度,胞间  $\text{CO}_2$  浓度,蒸腾速率有关,这一组元素主要与植物自身的生理特性有关。以上分析表明空气温度,大气中水分含量,植物自身生理特性可以作为固碳量的鉴定指标。根据主成分数学模型原理,综合因子  $F$  得分可表达为:

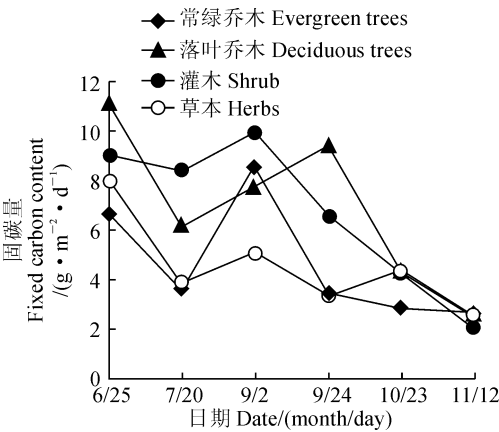


图 3 不同生活型植物的固碳量变化曲线  
Fig. 3 The curves of carbon fixation of lifeform

表 2 呼和浩特市 13 种植物固碳量的主要影响因子间的相关分析  
Table 2 Correlative analysis of main influencing factors of 13 species of carbon fixation in Hohhot

影响因子 Influencing factors	固碳量 Carbon Fixation /(g · mol <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup> )	净光合速率 Photosynthetic rate /(μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	气孔导度 Conductance to H <sub>2</sub> O /(mol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration /(μmol · m <sup>-2</sup> )	蒸腾速率 Transpiration rate /(mmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	空气温度 Temperature in sample cell/℃	叶片温度 Temperature of leaf thermocouple/℃	大气相对湿度 Relative air humidity/%
固碳量 Carbon Fixation/(g · mol <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup> )	1							
净光合速率 Photosynthetic rate/(μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	0.783 <sup>**</sup>	1						
气孔导度 Conductance to H <sub>2</sub> O/(mol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	0.241 <sup>*</sup>	0.302 <sup>*</sup>	1					
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/(μmol · m <sup>-2</sup> )	0.210	0.480 <sup>**</sup>	0.338 <sup>**</sup>	1				
蒸腾速率 Transpiration rate/(mmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	0.394 <sup>**</sup>	0.641 <sup>**</sup>	0.613 <sup>**</sup>	0.601 <sup>**</sup>	1			
空气温度 Temperature in sample cell/℃	0.491 <sup>**</sup>	0.578 <sup>**</sup>	0.197	0.035	0.477 <sup>**</sup>	1		
叶片温度 Temperature of leaf thermocouple/℃	0.499 <sup>**</sup>	0.587 <sup>**</sup>	0.181	0.034	0.474 <sup>**</sup>	0.998 <sup>**</sup>	1	
相对湿度 Relative humidit/%	-0.062	-0.248 <sup>*</sup>	0.326 <sup>**</sup>	-0.361 <sup>**</sup>	-0.363 <sup>**</sup>	-0.024	-0.013	1

注: \* 和 \*\* 分别表示显著相关和极显著相关  
Note: \* and \*\* indicate significant correlation and extremely significant correlation, respectively

表 3 旋转后三种主成分的旋转矩阵

Table 3 Rotated component matrix of three principal components

影响因子 Influencing factor	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
叶片温度 Temperature of leaf thermocouple/℃	0.982	0.114	0.071
空气温度 Temperature in sample cell/℃	0.979	0.113	0.079
净光合速率 Photosynthetic rate/(μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.676	−0.22	0.521
大气相对湿度 Relative humidity/%	−0.123	0.961	−0.126
气孔导度 Conductance to H <sub>2</sub> O/(mol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.073	0.493	0.806
蒸腾速率 Transpiration rate/(mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.448	−0.214	0.806
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/(μmol·m <sup>-2</sup> )	−0.021	−0.343	0.797

表 4 呼和浩特市 13 种植物主成分因子得分表

Table 4 Score of principal component factors

物种 Species	F1	F2	F3	综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	1.988	2.63	2.186	2.021 289 6	1
国槐 <i>Sophora japonica</i> .	1.163	2.306	0.148	1.219 741 4	2
新疆杨 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	1.580	1.440	−0.451	1.028 298 8	3
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	1.137	1.305	−0.266	0.831 996 6	4
油松 <i>Pinus tabuli formis</i>	1.286	1.253	−0.728	0.798 913 2	5
叉子圆柏 <i>Sabina vulgaris</i>	0.676	0.153	1.393	0.574 424 5	6
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	−0.922	−0.739	1.396	−0.372 425	7
芍药 <i>Paeonia lactiflora</i>	−0.816	0.217	−1.007	−0.453 897	8
萱草 <i>Hemerocallis fulva</i>	−0.467	−1.168	0.527	−0.461 621	9
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	−0.737	−1.323	0.576	−0.614484	10
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	−0.936	−2.288	−1.703	−1.388 39	11
云杉 <i>Picea asperata</i>	−2.383	−1.25	−0.687	−1.507 677	12
早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	−1.567	−2.536	−1.384	−1.675 324	13

$F=0.422\ 86\times F_1+0.304\ 53\times F_2+0.173\ 71\times F_3$

计算综合得分并排序,主成分综合得分越大植物固碳效率越强,排序结果如表 4。植物固碳效率的高低在一定程度上可为城市绿化植物种的选择提供一定科学依据<sup>[20]</sup>。

4 讨 论

固碳释氧是植物的一个重要生态功能。本研究以半干旱区呼和浩特市常见的 13 种绿化植物为研究对象,测定从 2016 年 6 月到 11 月的植物光合生理生态指标,分析研究净光合速率和固碳释氧量的变化、各因子与植物固碳量的关系。从 6 月到 11 月,13 种植物固碳量的季节动态相同,出现两个固碳峰值,固碳量的高值出现在 6 月前后和 9 月前后。

这与薛雪等人的研究稍有区别,与刘嘉君等人的研究基本一致(8 月>7 月>6 月>9 月>5 月>10 月),由于影响固碳效率的植物自身因素主要有植物种类、株龄、叶位等;而具体植物种类的固碳释氧效率差异较大<sup>[19]</sup>。

在呼和浩特地区,植物固碳释氧效率大小依次为落叶乔木>灌木>常绿乔木>草本,这与刘雪莲等的研究结果稍有区别,本研究选择在夏,秋季测定植物的光合速率,因为在夏、秋季植物生长旺盛,有利于估算出植物一年中日固碳释氧量的峰值<sup>[33]</sup>。植物固碳影响因子的 Pearson 相关系数分析结果显示出,固碳量与净光合速率、空气温度、叶片温度、蒸腾速率极显著相关,这与王冉等的研究结论一致<sup>[34]</sup>,即与净光合速率、空气温度、蒸腾速率极显著相关。因为蒸腾作用是植物体内水分以气体状态向

外散失的过程,蒸腾作用的强弱是反映植物水分代谢的一个重要生理指标<sup>[35-36]</sup>。

13 种常用绿化植物单位叶面积固碳释氧量的主成分分析法表明,从 6 月到 11 月植物总固碳量的大小顺序为:连翘>国槐>新疆杨>紫丁香>油松>叉子圆柏>圆柏>芍药>萱草>垂柳>侧柏>云杉>早熟禾。与刘嘉君等的研究结论有所不同<sup>[19]</sup>,这是由于所选用的植物种类不同,不同植物种类的叶绿素含量、叶子含水量、矿质营养不同,对外界温度要求也不同<sup>[24]</sup>。

呼和浩特市城市绿地的配置不注重植物的季相景观,景观的营造也仅仅停留在对少数几种常绿树

种的应用上,树种少,配置方式单一,植物配置过程中缺乏层次感、色彩感和时序感<sup>[37-38]</sup>,应加强植物的合理配置,注重不同植物的观赏特性<sup>[39]</sup>。同时在树种配置时,乔木优选国槐、油松,灌木优选连翘,草本植物优选芍药,其他植物作为观赏性植物适当种植,优化乔、灌、草的复合结构比例,选择乡土树种进行补植,构建生物多样性高的复层群落结构,从而提高整个植被系统的固碳释氧能力<sup>[40]</sup>。就植物的固碳释氧能力而言,呼和浩特市在进行城市绿化规划时应常绿落叶树种并重,并通过科学地配置来实现生态功能和景观效果的统一和最大化。

参考文献:

[1] 陈慧颖,张景慧,黄永梅,等. 内蒙古大针茅草原常见植物在不同土地利用方式下的固碳相关属性[J]. 植物生态学报,2014, **38**(8):821-832.  
CHEN H Y, ZHANG J H, HUANG Y M. Traits related to carbon sequestration of common plant species in a *Stipa grandis* steppe in NeiMongol under different land-uses[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(8): 821-832.

[2] TUBA Z, KALIGARI Ć M. Grassland ecology in changing climate and land use[J]. *Community Ecology*, 2008, **9**(Suppl 1):3-12.

[3] 孙振帮,屈海燕. 基于生态效益的沈阳市常用绿化树种种植模式研究[J]. 安徽农业科学,2016, (7):190-193.  
SUNZB, QUHY. Study on Planting patterns of common greening tree species in Shenyang based on ecological benefit[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, (7):190-193.

[4] 王晓华,包玉荣. 呼和浩特市建成区园林绿化植物调查与分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010, **31**(1):99-106.  
WANG X H, BAO Y R. Hohhot Built-up area Survey and analysis of landscape plants[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science Edition), 2010, **31**(1):99-106.

[5] 段 伟. 低温下的植物光抑制机理[J]. 西北植物学报,2003, **23**(6):1 017-1 023.  
DUAN W. Photoinhibition mechanisms of plant under low temperature [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(6):1 017-1 023.

[6] 姚侠妹,偶 春,黄成林,等. 引种地被石竹光合特征与生理生态因子的关系[J]. 西北植物学报,2012, **32**(8):1 639-1 647.  
YAO X M, OU C, HUANG C L. Relationship between photosynthesis and physio-ecological factors of *Dianthus plumarius* introduced[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(8):1 639-1 647.

[7] 赵 萱,李海梅. 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究[J]. 江西农业学报,2009, **21**(1):44-47.  
ZHAO X, LI H M. Study on carbon-fixing, oxygen-releasing, temperature-reducing and humidity-increasing effects of 11 ground cover plants[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, **21**(1):44-47.

[8] 于雅鑫,胡希军,金晓玲. 12 种木兰科乔木固碳释氧和降温增湿能力研究[J]. 广东农业科学,2013, **40**(6):47-50.  
YU Y X, HU X J, JIN X L. Carbon fixation and oxygen release, cooling and humidification of 12 Magnoliaceae species [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, **40**(6):47-50.

[9] 弥宏卓. 九峰山林场乔木林固碳释氧效益分析[J]. 内蒙古林业调查设计,2016, **39**(2):122-124.

[10] 邵永昌,庄家尧,王柏昌,等. 上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究[J]. 安徽农业大学学报,2016, **43**(1):94-101.  
SHAO Y C, ZHUANG J Y, WANG B C. Photosynthetic characteristics and carbon sequestration and oxygen release capacity of the main urban landscape tree species during summer in Shanghai[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, **43**(1):94-101.

[11] 熊向艳,韩永伟,高馨婷,等. 北京市城乡结合部 17 种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J]. 环境工程技术学报,2014, **4**(3):248-255.  
XIONG X Y, HAN Y W, GAO X T. Analysis of carbon fixation and oxygen release capabilities of 17 afforestation plants in rural-urban fringe in Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, **4**(3):248-255.

[12] 史红文,秦 泉,廖建雄,等. 武汉市 10 种优秀园林植物固碳释氧能力研究[J]. 中南林业科技大学学报,2011, **31**(9):87-90.  
SHI H W, QIN Q, LIAO J X. Study on carbon fixation and oxygen release capabilities of 10 dominant garden plants in Wuhan City[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, **31**(9):87-90.

[13] 张艳丽,费世民,李智勇,等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报,2013, **33**(12):3 878-3 887.  
ZHANG Y L, FEI S M, LI Z Y. Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(12):3 878-3 887.

[14] 赵文瑞,刘 鑫,张金池,等. 南京城郊典型树种光合蒸腾、固碳释氧及降温增湿能力[J]. 林业科学,2016, **52**(9):31-38.  
ZHAO W R, LIU X, ZHANG J C. Photosynthesis transpiration, the carbon fixation and oxygen release, and the cooling and humidificand capacity of typical tree species in Nanjing



suburban[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(9):31-38.

[15] 张剑峰. 呼和浩特市建成区道路绿地树种现状分析及评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.

[16] 陈云飞. 呼和浩特市城市主干道植物景观的调查与研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.

[17] 王晓华, 包玉荣. 呼和浩特市建成区园林绿化植物调查与分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, **31**(1):99-106.  
WANG X H, BAO Y R. Hohhot Built-up area survey and analysis of landscape plants[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science), 2010, **31**(1):99-106.

[18] 韩焕金. 哈尔滨市主要植物生理生态功能研究[J]. 江苏林业科技, 2005, **32**(4):5-10.  
HAN H J. Study on the eco-physiological functions of main plant species in Harbin City[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2005, **32**(4):5-10

[19] 刘嘉君, 王志刚, 阎爱华, 等. 12 种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(9):2.  
LIU J J, WANG Z G, YAN A H. Photosynthetic characteristics and functions of carbon fixation and oxygen release of twelve species of colorful plants[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, **39**(9):2.

[20] 张启翔. 2007 年中国园艺学会观赏园艺专业委员会论文集[C]. 北京: 中国林业出版社, 2007

[21] 刘雪莲, 何云玲, 张淑洁, 等. 昆明市常见绿化植物冬季固碳释氧能力研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(8):1 327-1 335.  
LIU X L, HE Y L, ZHANG S J. Study on carbon fixation and oxygen release capabilities of 18 afforestation plants in Kunming City[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, **25**(8):1 327-1 335.

[22] 韩焕金. 城市绿化植物的固碳释氧效应[J]. 东北林业大学学报, 2005, **33**(5):68-70.  
HAN H J. Effect of carbon fixation and oxygen release about urban greening plants[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, **33**(5):68-70.

[23] 郭 杨, 卓丽环. 哈尔滨居住区常用的 12 种园林植物固碳释氧能力研究[J]. 安徽农业科学, 2014, (17):5 533-5 536.  
GUO Y, ZHUO L H. Analysis of carbon fixation and oxygen release capacity of 12 commonly used plants for the residential community of Harbia[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.* 2014, (17):5 533-5 536.

[24] 邱国雄. 影响光合作用的因素[J]. 湖南林业科技, 1979, (6):21-24.

[25] 刘福娟. 光合作用的影响因素分析[J]. 农机化研究, 2004, (4):237-237.

[26] 苏军德, 勾晓华, 曹宗英, 等. 祁连圆柏光合作用日变化特征及其与生理生态因子的关系[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(5):1 011-1 017.  
SU J D, GOU X H, CAO Z Y. Diurnal course of photosynthesis and Relationship with the Eco-physiological Factors of Qilian Juniper[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(5):1 011-1 017.

[27] 鲁 敏, 秦碧莲, 牛朝阳, 等. 城市植物与绿地固碳释氧能力研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015, (4):363-369.  
LUM, QINBL, NIUCY. Research progress of the ability of carbon sequestration and oXygen release of urban plant and green space[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2015, (4):363-369.

[28] 刘光立, 陈其兵. 成都市四种垂直绿化植物生态学效应研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, **25**(3):259-262.  
ZHANGGL, CHENQB. Study on the Ecological Benefits of Four Kinds of Vertical Plant in Chengdu[J]. *Journal of China West Normal University* (Natural Science), 2004, **25**(3):259-262.

[29] 赵 莹, 李海梅. 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究[J]. 江西农业学报, 2009, **21**(1):44-47.  
ZHAOX, LIHM. Study on Carbon-fixing, Oxygen-releasing, Temperature-reducing and Humidity-increasing Effects of 11 Ground Cover Plants[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, **21**(1):44-47.

[30] 张红旗, 王立新, 贾宝全. 西北干旱区生态用地概念及其功能分类研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12**(2):5-8.  
ZHANGHQ, WANG LX, JIAJB. A conception of ecological land use and its function classification in arid area in North-west China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, **12**(2):5-8.

[31] 栾 勇, 陈绍辉, 尹忠东, 等. 珠海市城市生态环境质量评价及问题分析[J]. 水土保持研究, 2008, **15**(1):7-10.  
LUAN Y, CHEN S H, YIN Z D, et al. The Analysis of the Zhuhai City Ecosystem Environment Quality Evaluation and Problem[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, **15**(1):7-10.

[32] 贵立德. 兰州市城镇化水平与其生态用地的供求关系[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(4):298-302.

[33] GUILD. Relationship Between Urbanization level and ecological land demand and supply in Lanzhou City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(4):298-302.

[34] 鲁 敏, 王 菲, 李东和, 等. 基于“绿当量”的济南绿地生态补偿建设方案[J]. 山东建筑大学学报, 2013, **28**(2):95-100.  
LU M, WANG F, LI D H, et al. Research on ecological compenstion ability of urban green space in Jinan based on the green equivalent[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2013, **28**(2):95-100.

[35] 王 冉, 李素英, 任丽娟, 等. 锡林浩特草原区 27 种植物净光合速率影响因素的多因子分析[J]. 干旱区研究, 2015, **32**(2):272-278  
WANG R, LI S Y, REN L J, et al. Multifactor analyses of impacting net photosynthetic rate for 27 species in the Xillinhote Steppe[J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(2):272-278.

[36] 李育花, 任坚毅, 林 玥, 等. 独叶草的光合生理生态特性[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(7):1 038-1 042.  
LI Y H, REN J Y, LI N Y, et al. Photosynthetic physiology characteristics of *Kingdonia uniflora* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(7):1 038-1 042.

[37] 周 慧. 关于现代住宅小区园林景观设计的探究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016, **10**(28):1 792.

[38] 王智慧. 呼和浩特市彩叶植物种类及园林应用研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2016, **39**(5):49-52.

[39] 江 畅. 低碳理念在城市园林植物景观设计中的应用探讨[J]. 中国林业产业, 2016, (9):72.

[40] 王 立, 王海洋, 常 欣. 常见园林树种固碳释氧能力浅析[J]. 南方农业, 2012, **6**(5):54-56.

(编辑: 潘新社)