

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第12期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第33卷第12期 2013年6月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

森林低温霜冻灾害干扰研究综述..... 李秀芬,朱教君,王庆礼,等 (3563)

碱蓬属植物耐盐机理研究进展..... 张爱琴,庞秋颖,阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测..... 徐琳,陈效速,杜星 (3584)

长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化..... 胡启鹏,郭志华,孙玲玲,等 (3594)

油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析..... 李明,王树香,高宝嘉 (3602)

施氮对木荷3个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响..... 张蕊,王艺,金国庆,等 (3611)

围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响..... 王若梦,董宽虎,何念鹏,等 (3622)

干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应..... 段爱国,张建国,何彩云,等 (3630)

生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响..... 黄杰勋,莫建民,李非里,等 (3639)

3个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应..... 吴芹,张光灿,裴斌,等 (3648)

冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系..... 张永平,张英华,黄琴,等 (3657)

不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响.....

..... 彭斌,李潘林,周楠,等 (3668)

根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响..... 陶先萍,罗宏海,张亚黎,等 (3676)

光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响..... 王文林,王国祥,万寅婧,等 (3688)

植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定..... 徐亚军,赵龙飞,陈普,等 (3697)

不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择..... 肖云丽,印象初,刘同先 (3706)

性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响..... 曾宾宾,邵明勤,赖宏清,等 (3712)

种群、群落和生态系统

基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价..... 袁菲,张星耀,梁军 (3722)

洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价..... 李建军,刘帅,张会儒,等 (3732)

景观、区域和全球生态

川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应..... 徐宁,王晓春,张远东,等 (3742)

2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系.....

..... 穆少杰,李建龙,周伟,等 (3752)

地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响..... 侯明行,刘红玉,张华兵,等 (3765)

毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征..... 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等 (3774)

贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的5.5 kaB. P. 以来的气候变化..... 杜荣荣,陈敬安,曾艳,等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应.....	李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)
秦岭南北近地面水汽时空变化特征.....	蒋冲,王飞,喻小勇,等 (3805)
露天矿区景观生态风险空间分异.....	吴健生,乔娜,彭建,等 (3816)
基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较	孔艳,江洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析	潘丹,应瑞瑶 (3837)
舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估.....	宋科,赵晟,蔡慧文,等 (3846)
不同基因型玉米间混作优势带型配置.....	赵亚丽,康杰,刘天学,等 (3855)
气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响.....	陈伟,熊晶,陈懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益	张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)
------------------------------	----------------------

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205080672

张艳丽, 费世民, 李智勇, 孟长来, 徐嘉. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.

Zhang Y L, Fei S M, Li Z Y, Meng C L, Xu J. Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3878-3887.

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益

张艳丽¹, 费世民^{2,*}, 李智勇¹, 孟长来², 徐 嘉¹

(1. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 2. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要:以成都市沙河植物廊道广泛应用的 8 种绿化植物为材料, 利用 LI-6400XT 便携式光合测定系统进行了光合生理生态指标的测定, 并对其固碳释氧与降温增湿效应进行了量化研究。结果表明: 整个生长季节同类植物各季节的单位叶面积固碳释氧和降温增湿能力表现出夏季>秋季>春季。日固碳释氧能力由强到弱为桂花、垂柳、香樟、黄葛树、山杜英、银杏、天竺桂、水杉, 年固碳释氧能力由强到弱为垂柳、香樟、黄葛树、银杏、桂花、天竺桂、水杉、山杜英, 日降温增湿效果由强到弱为垂柳、山杜英、水杉、天竺桂、黄葛树、香樟、银杏、桂花。据估算, 整个沙河植物群落中乔木树种年总固碳量约为 5.87×10^4 t, 总释氧量约为 4.27×10^4 t。根据对主要树种固碳释氧和降温增湿能力的分析表明, 在树种配置时, 垂柳、桂花、山杜英、香樟为优选乔木树种, 而银杏的固碳释氧和降温增湿能力较弱, 可作为长寿树种和观赏树种适量引种, 不宜大面积绿化。

关键词:绿化树种; 固碳释氧; 降温增湿

Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu

ZHANG Yanli¹, FEI Shimin², LI Zhiyong¹, MENG Changlai², XU Jia¹

1 Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

Abstract: In this study, LI-6400XT portable photosynthesis test system was employed to observe physiological indicators of 8 widely used species of Sha river's plant corridor in Chengdu. Furthermore, the carbon sequestration, oxygen release capacity, cooling and humidification effects were also evaluated. Our results indicated: The capacity of carbon sequestration, oxygen release, cooling and humidification effect per unit of leaf area was in the order of summer > autumn > spring. The order of daily carbon sequestration and oxygen release capability per unit of leaf area from strong to weak was *O. fragrans*, *S. babylonica*, *C. camphora*, *F. virens*, *E. sylvestris*, *G. biloba*, *C. pedunculatum* and *M. glyptostrobooides*; and the order of annual carbon sequestration and oxygen release capability per unit of leaf area from strong to weak was *S. babylonica*, *C. camphora*, *F. virens*, *G. biloba*, *O. fragrans*, *C. pedunculatum*, *M. glyptostrobooides* and *E. sylvestris*. The capabilities of daily cooling and humidification effect per unit leaf area of the trees species from strong to weak was *S. babylonica*, *E. sylvestris*, *M. glyptostrobooides*, *C. pedunculatum*, *F. virens*, *C. camphora*, *G. biloba* and *O. fragrans*. It was estimated that the total amount of annual carbon sequestration of trees in Sha river was about 5.87×10^4 t and the oxygen release was about 4.27×10^4 t. Based on the above analysis of the main tree species, it was suggested that *S. babylonica*, *O. fragrans*, *E. sylvestris*, and *C. camphora* should be taken as the priority tree species. Due to the weak C sequestration oxygen release and cooling and humidification effect, *G. biloba* should not be virescenced in a large area, but could be used

基金项目: 国家“十一五”科技支撑专题“西南地区城市森林建设技术试验示范”(2006BAD03A1703)

收稿日期: 2012-05-03; 修订日期: 2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: smfei@163.com

as a longevous and ornamental tree species.

Key Words: greening tree species; carbon sequestration and oxygen release; temperature drop and humidity increase

21 世纪城市应与大自然和谐共处,城市河流要更好的协调城市发展与环境的关系。河流廊道作为城市生态系统的重要组成部分,发挥着改善城市地域内生态环境的重要作用。植物通过光合作用发挥固碳释氧和降温增湿的功能,对改善城市空气质量,实现城市生态系统良性循环具有重要意义^[1-2]。因此,在进行河流植物廊道规划时,不仅要考虑植物的美学功能,更应注重其生态效益的发挥,但同样作为当地城市的主要植物,生态功能差别比较明显,且相同树种在不同地区所表现出的生态功能也大不相同^[3-5]。近年来,对城市河流植物廊道的研究主要集中在植物群落植物配置等方面,而在生态功能定量化的研究还很少。本文对成都市沙河植物廊道的主要绿化树种进行研究,以期对成都市河流廊道绿化树种的合理配置及环境效益的定量评价提供科学依据,为今后城市森林特别是沿河流人工植物群落的建设和改造提供参考。

1 研究方法

1.1 试验材料

在对成都市沙河植物廊道现有的植物种类和生长状况进行调查与分析的基础上,根据树种出现的频率及重要值等综合特征,选择水杉、天竺桂、香樟、垂柳、桂花、山杜英、银杏和黄葛树 8 种健康的成林植株作为试验材料(表 1)。

表 1 试验材料

Table 1 Experimental materials

种名 Species	科名 Family	属名 Genus	植物类型 Form
天竺桂 <i>Cinnamomum pedunculatum</i>	樟科	樟属	常绿乔木
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏科	银杏属	落叶乔木
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	杉科	水杉属	落叶乔木
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科	樟属	常绿乔木
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	杨柳科	柳属	落叶乔木
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科	木犀属	常绿乔木
黄葛树 <i>Ficus virens</i>	桑科	榕属	落叶乔木
山杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	杜英科	杜英属	常绿乔木

1.2 三维绿量的测定

根据实际情况,为计算方便将树体近似的看作立方体。测定乔木树种的冠幅和冠高,采用俞慧珍和叶年山^[6]的径-高树冠绿量方程(表 2)计算三维绿量。

为消除测量过程中偶然误差的影响,采取多次测量求平均值的方法,使测量结果尽可能的精确。以被测树为中心,在东南、西北方向上分别用测高仪测定株高 X_1, X_2 , 根据树高 $H = (X_1 + X_2) / 2$, 求出平均树高 H 。再用皮尺或用测高仪(适用于冠下高较高的树种)测出冠下高 H_1 , 根据冠高 $h = H - H_1$, 求出冠高。

在树冠边缘上任取一点,经树干横截面圆心取与之相对的另一端,测两点间的距离 D 。重复 3 次,分别测得 D_1, D_2, D_3 。根据 $D = (D_1 + D_2 + D_3) / 3$, 计算得到平均冠幅 D 。

1.3 树种叶面积的估算

本次研究采用以下树木叶面积回归模型估算不同树种的叶面积量^[7]:

$$Y = \exp(0.6031 + 0.2375H + 0.6906D - 0.0123S_1) + 0.1824$$

式中, Y 为叶面积总量; H 为树冠高度; D 为树冠直径; $S_1 = \pi D(H + D) / 2$

植物所覆盖的土地面积为植物树冠投影面积 $S_2(m^2)$: $S_2 = 1/4\pi D^2$ 。因此,单株叶面积指数的计算公式为: $I_{LA} = Y/S_2$

1.4 固碳释氧量的测定

根据植物光合作用原理,植物的固碳释氧、降温增湿效应的计算,依赖于对植物光合速率及蒸腾速率的测定。在树木生长季,从阔叶树种长出的叶达到仪器测量范围(盖满整个叶室)开始。在2009年具有代表性的4月、7月、10月各选1周,于晴朗、无风的天气情况下,在自然光照条件下,从8:00到18:00,每隔2h用LI-6400XT型光合仪进行观测。同一样地内选择健康植株3株,每株取3片叶,随机选取树木向阳面中部的叶片进行测定。待系统稳定后,每片叶取5个瞬时光合速率值。

用简单积分法求得植物叶片在1d内的净同化量。植物在测定当日的净同化量计算公式为^[8-11]:

$$p = \sum_{i=1}^j [(p_{i+1} + p_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600/1000]$$

式中, p 为测定日的同化总量 ($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); p_i 为初测点的瞬时光合作用速率; p_{i+1} 为下一测点的瞬时光合作用速率 ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); t_i 为初测点的瞬时时间(h); t_{i+1} 为下一测点的时间(h); j 为测试次数。3600指每小时3600s;1000指1mol为1000 μmol 。

用测定日的同化总量换算为测定日固定 CO_2 量为:

$$W_{CO_2} = p \cdot 44/1000$$

式中,44为二氧化碳的摩尔质量; W_{CO_2} 为单位面积的叶片固定 CO_2 的质量 ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)

根据光合作用的反应方程 $CO_2 + 4H_2O \rightarrow CH_2O + 3H_2O + O_2$,可计算出该测定日植物释放 O_2 的量为:

$$W_{O_2} = p \cdot 32/1000$$

(1)某植物单位叶面积平均每天吸收 CO_2 和释放 O_2 量的计算公式:

$$W_{CO_2\text{平均}} = P_{\text{平均}} \times 44/1000$$

$$W_{O_2\text{平均}}(g) = P_{\text{平均}} \times 32/1000$$

$$P_{\text{平均}}(g) = (P_{\text{春}} + P_{\text{夏}} + P_{\text{秋}})/3$$

式中, $W_{CO_2\text{平均}}$ 为某植物单位叶面积平均每天释放 O_2 量(g); $W_{O_2\text{平均}}$ 为某植物单位叶面积平均每天吸收 CO_2 量; $P_{\text{平均}}$ 为平均单位面积的日同化量 ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。

(2)单株植物单位土地面积上的日固碳释氧量为:

$$Q_{CO_2} = I_{LA} \times W_{CO_2}$$

$$Q_{O_2} = I_{LA} \times W_{O_2}$$

式中, I_{LA} 为单株叶面积指数; Q_{CO_2} 为日固定 CO_2 的量 ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); Q_{O_2} 为日释放 O_2 的量 ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。

(3)植物年吸收 CO_2 和释放 O_2 总量的计算公式:

因为降雨量大于5mm/d时,植物光合作用积累量与呼吸作用消耗量大致相抵。据成都市30a的气象数据显示,成都市一年中平均降雨量超过5mm的天数为41.9d,无霜冻期287d,植物生长期252.6d。由3月16日—11月22日的生长期中平均有40d降雨量超过5mm,因此植物1a实际进行光合作用的天数为212.6d。

表2 三维绿量计算公式

Table 2 Formula of Tridimensional Green Biomass		
序号 Number	树冠形状 Crown shape	计算公式 Calculation formula
1	卵形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
2	圆锥形	$\frac{\pi x^2 y}{12}$
3	球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
4	半球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
5	球扇形	$\frac{\pi(2y^3 - y^2 \sqrt{4y^2 - x^2})}{3}$
6	球缺形	$\frac{\pi(3xy^2 - 2y^3)}{6}$
7	圆柱形	$\frac{\pi x^2 y}{4}$

x 为冠幅; y 为冠高

某植物年吸收 CO₂ 总量(g) = $W_{CO_2\text{平均}} \times \text{该植物叶片总面积数} \times 212.6$

某植物年释放 O₂ 总量(g) = $W_{O_2\text{平均}} \times \text{该植物叶片总面积数} \times 212.6$

1.5 降温增湿的测定

根据植物光合作用原理,蒸腾作用和光合作用的推动力都是太阳辐射能,水分的散失与 CO₂ 的吸收大体上经过相同的途径(方向相反)。液态的水经过植物的蒸腾作用,由叶片的气孔和角质层以气态形式散发到空气中,并从环境中吸收热量,降低周围环境中的温度,增加湿度,从而达到改善周围环境小气候条件的作用。具体测定同固碳释氧的测定。

(1) 某天某种植物单位叶面积降温增湿的量

设蒸腾总量为 E , 以下是蒸腾总量公式^[12-13]:

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 / 1000]$$

式中, E 为该植物在该测定日的蒸腾总量 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); e_i 为初测点的瞬时蒸腾作用速率 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); e_{i+1} 为下一测点的瞬时蒸腾作用速率 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); t_i 为初测点的测试时间 (h); t_{i+1} 为下一测点的时间 (h); j 为测试次数。3600 指每小时 3600s; 1000 指 1mol 为 1000 μmol 。

用测定日的蒸腾总量换算为测定日释放水的质量为:

$$W_{H_2O} (g) = E \times 18$$

式中, 18 为水的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

每平方米叶片在一天中因蒸腾作用散失水分而吸收的热量 Q 为:

$$Q = W \times L \times 4.18$$

式中, Q 为单位叶面积每日吸收的热量 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); W 为植物日蒸腾总量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); L 为蒸发耗热系数 ($L = 597 - 0.57 \times t$, t 为温度); $4.18 \text{J} = 1 \text{Cal}$ 。测定日的 t 值 4 月为 17.5 $^{\circ}\text{C}$, 7 月为 30.6 $^{\circ}\text{C}$, 10 月为 26.6 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 某种植物单位叶面积日平均降温增湿的量

$$W_{H_2O\text{平均}} = E \times 18$$

$$Q = W \times L \times 4.18$$

$$E_{\text{平均}} = (E_{\text{春}} + E_{\text{夏}} + E_{\text{秋}}) / 3$$

式中, $W_{H_2O\text{平均}}$ 为某植物单位叶面积平均每天释放 H₂O 量 (g); Q 为某植物单位叶面积平均每天吸收的热量 ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $E_{\text{平均}}$ 为单位面积的日平均蒸腾量 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

(3) 绿地蒸腾降温作用的计算

考虑到空气的湍流、对流和辐射作用,空气与叶面之间及空气微气团之间不断地进行热量扩散和交换,取底面积为 10 m²、厚度为 100 m 的空气柱作为计算单元。在此空气柱体中,因植物蒸腾消耗热量 (Q) 是取自于周围 1000 m³ 的空气柱体,故使气柱温度下降。气温下降值用下式表示:

$$\Delta T = Q / pc$$

式中, Q 为绿地植物蒸腾使其单位体积空气损失的热 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$); pc 为空气的容积热容量 ($1256 \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 叶面积指数分析

由表 3 可知,各树种三维绿量除山杜英、水杉差异不显著,其他差异较显著,而单株叶面积除香樟和黄葛树差异不显著,其他差异较显著。垂柳的三维绿量最高,为 42.86 m³,依次是香樟、黄葛树、银杏、桂花、天竺桂、水杉,山杜英的三维绿量最低,为 3.12 m³。单株叶面积,垂柳最高为 49.71 m²,其次是黄葛树、香樟、银杏、天竺桂、桂花、水杉,山杜英最低为 8.69 m²。表明植株三维绿量越大,其总叶面积就越大。叶面积大小对净化空气、防污滞尘、降低噪音等综合环境效应有很大影响,因此应当多选择单株叶面积较大的树种以增加对环境的贡献率。叶面积指数水杉最高,为 8.01,依次为银杏、山杜英、香樟、垂柳、天竺桂、黄葛树,桂花最低为

2.86。水杉的平均单位体积叶面积最高为 $4.62 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 依次是天竺桂、山杜英、桂花、银杏、黄葛树, 垂柳最低为 $1.16 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 这反映了水杉枝叶茂密, 树冠郁闭度较高; 垂柳枝叶相对分散, 导致其单位体积内的叶面积最低。单位体积叶面积取决于该植株单位体积的大小, 因此叶面积大, 其单位体积叶面积不一定大。

表3 单株三维绿量、叶面积、叶面积指数、单位体积叶面积

Table 3 Tridimensional green biomass, leaf area, leaf area index and leaf area per unit volume of each tree

树种 Species	天竺桂 <i>C. pedunculatum</i>	香樟 <i>C. camphora</i>	桂花 <i>O. fragrans</i>	山杜英 <i>E. sylvestris</i>	银杏 <i>G. biloba</i>	水杉 <i>M. glyptostroboides</i>	垂柳 <i>S. babylonica</i>	黄葛树 <i>F. virens</i>
枝下高/m	1.57	2.22	1.34	2.20	2.01	1.98	2.08	1.72
树高/m	4.62	6.50	3.72	4.66	7.39	7.19	6.46	5.03
冠高/m	3.06	4.28	2.38	2.46	5.39	5.20	4.39	3.31
冠幅/m	2.96	3.60	2.97	1.56	2.86	1.56	4.32	3.94
树冠形状	卵状圆锥形	卵形	卵形	卵球形	宽卵形	圆锥形	倒广卵形	卵形
三维绿量/ m^3	6.99fF	28.95bB	10.99eE	3.12gG	23.01dD	3.29gG	42.86aA	26.92cC
单株叶面积/ m^2	20.83dD	35.19bB	18.60eE	8.69gG	30.16cC	15.21fF	49.71aA	35.32bB
树冠投影面积/ m^2	6.86	10.15	6.93	1.90	6.41	1.90	14.66	12.19
叶面积指数	3.03dD	3.47cC	2.68eE	4.57bB	4.71bB	8.01aA	3.39cC	2.90dDE
单位体积叶面积/ (m^2/m^3)	2.98bB	1.22eD	1.69dC	2.79cB	1.31eD	4.62aA	1.16eD	1.31eD

数据用 LSD 法进行检验; 不同字母间表示差异显著, 小写字母表示显著, 大写字母表示极显著

2.2 固碳释氧能力分析

2.2.1 各季节日固碳释氧量分析

不同植物在同一季节的单位叶面积固碳释氧量有明显差异(表4)。在春季, 香樟具有较高的固碳释氧量, 从大到小的排列顺序是: 香樟>黄葛树>山杜英>天竺桂>桂花>垂柳>银杏>水杉。夏季, 垂柳具有较高的固碳释氧能力, 从大到小顺序有所变动, 排列顺序为: 垂柳>黄葛树>桂花>香樟>山杜英>银杏>水杉>天竺桂。秋季, 桂花的固碳释氧较强, 从大到小排列顺序为: 桂花>垂柳>香樟>山杜英>黄葛树>天竺桂>银杏>水杉, 落叶树种银杏、水杉、垂柳和黄葛树的光合速率下降很多, 这跟其生长周期有关。

单株植物单位土地面积上的日固碳释氧量: 春季, 香樟最高, 固碳释氧分别为 $29.07 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $21.14 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 水杉最低, 分别为 $10.83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $7.87 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 顺序为香樟>山杜英>黄葛树>银杏>天竺桂>垂柳>桂花>水杉。夏季, 水杉最高, 固碳释氧分别为 $100.52 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 和 $73.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 天竺桂最低分别为 $11.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $8.45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 顺序为水杉>山杜英>银杏>垂柳>香樟>黄葛树>桂花>天竺桂。秋季, 垂柳最高, 固碳释氧分别为 $46.52 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $33.83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 天竺桂最低, 分别为 $22.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $16.32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 顺序为: 垂柳>桂花>山杜英>水杉>香樟>银杏>黄葛树>天竺桂。

用日均净光合速率来分析 8 种植物日固碳释氧量的季节变化, 不同植物表现出不同的变化规律。3 个季节植物生长的固碳释氧量夏季最高(表4), 树种各季节的固碳释氧能力表现出夏季>秋季>春季。

2.2.2 年固碳释氧能力分析

由表5可知, 不同树种间的年固碳释氧效应差异明显。其中, 平均单位面积的日同化量, 桂花最高, 为 $287.40 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 在固碳释氧能力上也高于其他树种, 平均日固碳量为 $12.65 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 释氧量为 $9.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 其次为垂柳, 平均日固碳量为 $12.65 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 释氧量为 $9.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 水杉最低, 平均日固碳量为 $6.46 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 释氧量为 $4.70 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。单位叶面积平均每天固碳释氧顺序为: 桂花>垂柳>香樟>黄葛树>山杜英>银杏>天竺桂>水杉。植物年固碳释氧总量垂柳最高, 分别为 131.30 kg 和 95.49 kg ; 水杉最低, 分别为 20.89 kg 和 15.19 kg 。年固碳释氧顺序为: 垂柳>香樟>黄葛树>银杏>桂花>天竺桂>水杉>山杜英。计算结果表明, 所测试树种白天固定 CO_2 的质量平均为 $10.10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 释放 O_2 的质量平均为 $7.43 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。年固定 CO_2 的质量平均为 60.19 kg 株^{-1} , 释放 O_2 的质量平均为 43.77 kg/株 。

表 4 树种各季节日固碳释氧能力

Table 4 Daily carbon sequestration and oxygen release capabilities of trees in different seasons

树种 Species	季节 Seasons	日同化总量 Total assimilation amount per day (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	单位面积固碳释氧量 The amount of carbon sequestration and oxygen release per unit area		单株植物单位土地 面积上的日固碳释氧量 The amount of carbon sequestration and oxygen release per unit land area	
			W _{CO₂}	W _{O₂}	W _{CO₂}	W _{O₂}
			/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
天竺桂	春季	101.23	4.45	3.24	13.52	9.83
	夏季	264.10	11.62	8.45	35.26	25.64
	秋季	168.09	7.40	5.38	22.44	16.32
香樟	春季	190.61	8.39	6.10	29.07	21.14
	夏季	382.46	16.83	12.24	58.34	42.43
	秋季	256.38	11.28	8.20	39.10	28.44
桂花	春季	95.82	4.22	3.07	11.31	8.22
	夏季	387.50	17.05	12.40	45.73	33.26
	秋季	378.86	16.67	12.12	44.71	32.52
山杜英	春季	102.41	4.51	3.28	20.59	14.98
	夏季	365.04	16.06	11.68	73.40	53.38
	秋季	218.81	9.63	7.00	44.00	32.00
银杏	春季	66.87	2.94	2.14	13.85	10.07
	夏季	346.00	15.22	11.07	71.66	52.12
	秋季	150.03	6.60	4.80	31.07	22.60
水杉	春季	30.73	1.35	0.98	10.83	7.87
	夏季	285.34	12.55	9.13	100.52	73.11
	秋季	124.35	5.47	3.98	43.81	31.86
垂柳	春季	83.42	3.67	2.67	12.45	9.05
	夏季	451.87	19.88	14.46	67.42	49.03
	秋季	311.83	13.72	9.98	46.52	33.83
黄葛树	春季	133.09	5.86	4.26	16.97	12.34
	夏季	396.68	17.45	12.69	50.57	36.78
	秋季	215.57	9.49	6.90	27.48	19.99

表 5 树种年固碳释氧能力

Table 5 Annual carbon sequestration and oxygen release capabilities of trees

树种 Species	平均单位面积的 日同化量 P _{平均} Daily assimilation amount of average unit area /(mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	植物单位叶面积 平均每天吸收 CO ₂ 量 W _{cCO₂} 平均	植物单位叶面积 平均每天释放 O ₂ 量 W _{O₂} 平均	单株叶面积 Leaf area per tree /m ²	植物年吸收 CO ₂ 总量 Annual absorption amount of CO ₂ /(kg/株)	植物年释放 O ₂ 总量 Annual release amount of O ₂ /(kg/株)
		Daily absorption amount of CO ₂ per unit leaf area /(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	Daily release amount of O ₂ per unit leaf area /(g·m ⁻² ·d ⁻¹)			
		7.82gF	5.69fF			
天竺桂	177.80gG	7.82gF	5.69fF	20.83	34.64fF	25.19fF
香樟	276.48cC	12.17cB	8.85bB	35.19	91.02bB	66.20bB
桂花	287.40aA	12.65aA	9.20aA	18.60	50.01eE	36.37eE
山杜英	228.75eE	10.07eD	7.32dD	8.69	18.61hH	13.53hH
银杏	187.63fF	8.26fE	6.00eE	30.16	52.94dD	38.50dD
水杉	146.80hH	6.46hG	4.70gG	15.21	20.89gG	15.19gG
垂柳	282.37bB	12.42bA	9.04aAB	49.71	131.30 aA	95.49aA
黄葛树	248.45dD	10.93dC	7.95cC	35.32	82.10cC	59.71cC
平均值	229.46	10.10	7.34	26.71	60.19	43.77

数据用 LSD 法进行检验; 不同字母间表示差异显著,小写字母表示显著,大写字母表示极显著

2.3 降温增湿能力分析

2.3.1 各季节日降温增湿能力分析

本文通过测定各树种在春、夏、秋三季的蒸腾速率日变化来估算单位叶面积降温增湿能力,结果表明,在同一季节不同植物有明显差异,而同一植物在不同季节也有明显变化。

从表 6 可以看出,春季,银杏蒸腾吸热量最高,为 $2007.16 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量为 $817.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温度数能达到 $0.13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最弱的是桂花,蒸腾吸热量仅有 $605.31 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量仅有 $246.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温效果只有 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从大到小排列顺序为:银杏>垂柳>水杉>山杜英>香樟>黄葛树>天竺桂>桂花。夏季,水杉的蒸腾吸热量最高,为 $8931.20 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量为 $3686.69 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温度数能达到 $0.59 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最弱的是桂花,蒸腾吸热量仅有 $4922.41 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量仅有 $2031.91 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温效果只有 $0.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从大到小排列顺序为:水杉>山杜英>天竺桂>垂柳>黄葛树>香樟>桂花>银杏。秋季,垂柳蒸腾吸热量最高,为 $3870.85 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量为 $1882.82 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温度数能达到 $0.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最弱的是银杏,蒸腾吸热量仅有 $988.96 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,日释水总量仅有 $985.41 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,降温效果只有 $0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从大到小排列顺序为:垂柳>山杜英>水杉>香樟>黄葛树>天竺桂>桂花>银杏。

用日蒸腾量来分析 8 种植物降温增湿的季节变化,不同植物表现出不同的变化规律。通过对 3 个季节植物生长的降温增湿量,树种夏季的降温增湿量最高(表 6),树种各季节的降温增湿能力表现出夏季>秋季>春季。

表 6 树种各季节日降温增湿能力

Table 6 Daily heat absorbing and water releasing capabilities of trees in every seasons

树种 Species	季节 Seasons	日蒸腾总量 Total transpiration amount per day $\text{}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	释水量 The amount of released water $\text{}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	吸热量 The amount of absorbed heat $\text{}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	降温度数 The degree of temperature drop $\text{}/^{\circ}\text{C}$
天竺桂	春季	14.59	262.66	644.52	0.04
	夏季	194.24	3496.39	8470.19	0.56
	秋季	39.02	702.29	1443.82	0.10
香樟	春季	21.00	378.03	927.60	0.06
	夏季	150.31	2705.51	6554.24	0.43
	秋季	44.72	804.94	1654.86	0.11
桂花	春季	13.70	246.68	605.31	0.04
	夏季	112.88	2031.91	4922.41	0.33
	秋季	34.14	614.60	1263.54	0.08
山杜英	春季	27.37	492.63	1208.79	0.08
	夏季	194.87	3507.62	8497.40	0.56
	秋季	69.54	1251.67	2573.29	0.17
银杏	春季	45.44	817.99	2007.16	0.13
	夏季	99.45	1790.10	4336.61	0.29
	秋季	26.72	481.04	988.96	0.07
水杉	春季	28.14	506.53	1242.92	0.08
	夏季	204.82	3686.69	8931.20	0.59
	秋季	56.39	1015.09	2086.91	0.14
垂柳	春季	38.56	694.03	1702.98	0.11
	夏季	194.22	3495.96	8469.15	0.56
	秋季	104.60	1882.82	3870.85	0.26
黄葛树	春季	18.43	331.71	813.94	0.05
	夏季	186.18	3351.24	8118.55	0.54
	秋季	41.70	750.54	1543.01	0.10

2.3.2 单位叶面积日平均降温增湿能力分析

整株植物的日蒸腾释水量取决于其单位叶面积日蒸腾量,因此植物的生态效益与物种的生态学特征紧密相关。由表 7 可以看出,不同树种间的单位叶面积日平均蒸腾量、平均日释水量和日平均蒸腾吸热量差异明显,均为垂柳最高,分别为 $112.46 \text{ mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $2024.27 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $4931.38 \text{ kJ}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,最低为桂花,分别为 $53.58 \text{ mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $964.40 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $2349.40 \text{ kJ}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从高到低的顺序为垂柳>山杜英>水杉>天竺桂>黄葛树>香樟>银杏>桂花。降温增湿能力,垂柳最强。所以垂柳能发挥较好的生态功能适宜大面积绿化。

植物由于蒸腾作用使其周围空气降温程度因植物蒸腾作用强弱而不同,蒸腾最强的垂柳可使其周围 1000 m^3 空气降温 $0.33 \text{ }^\circ\text{C}$;水杉和山杜英可使周围 1000 m^3 空气降温 $0.28 \text{ }^\circ\text{C}$;蒸腾最弱的桂花可使周围 1000 m^3 空气降温 $0.16 \text{ }^\circ\text{C}$,银杏的降温值与其相近为 $0.17 \text{ }^\circ\text{C}$ 。顺序从高到底依次为垂柳、山杜英、水杉、天竺桂、黄葛树、香樟、银杏、桂花。这个降温值,是在充分考虑了大气的对流、湍流、辐射产生的热量交换的基础上做出的。所测试树种白天释放的 H_2O 质量平均为 $1470.78 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,吸收热量平均 $3426.60 \text{ kJ}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。相当于每公顷森林叶面积上每天蒸腾 14.71 t 的 H_2O ,消耗 3426.60 kJ 的热能。

表 7 树种单位叶面积日平均降温增湿能力

Table 7 Daily average heat absorbing and water releasing capabilities of per unit leaf area of trees

树种 Species	日平均蒸腾量 Daily average amount of transpiration $/(\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	日平均释水量 Daily average amount of released water $/(\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	日平均蒸腾吸热量 Daily average amount of absorbed heat $/(\text{kJ}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	日平均降温度数 Daily average degree of temperature drop $/^\circ\text{C}$
天竺桂	82.62dD	1487.11dD	3622.81cC	0.24aA
香樟	72.01fF	1296.16fF	3157.62eE	0.21aA
桂花	53.58hH	964.40hH	2349.40hH	0.16aA
山杜英	97.26bB	1750.64bB	3013.47fF	0.28aA
银杏	57.21gG	1029.71gG	2508.51gG	0.17aA
水杉	96.45cC	1736.10cC	4229.38bB	0.28aA
垂柳	112.46aA	2024.27aA	4931.38aA	0.33aA
黄葛树	82.10eE	1477.83eE	3600.19dD	0.24aA
平均值	81.71	1470.78	3426.60	0.24

数据用 LSD 法进行检验;不同字母间表示差异显著,小写字母表示显著,大写字母表示极显著

3 结论与讨论

不同树种各季节固碳释氧能力有一定的差异,同一树种在不同的生长季节也有差异。所测树种固碳释氧能力表现为夏季>秋季>春季,这与陆贵巧^[14]在大连和李永杰^[15]在北京的研究结果相一致。而史晓丽^[16]研究北京的行道树认为树种在不同季节固碳释氧量的总体变化趋势表现为夏季>春季>秋季。在夏季,垂柳具有较高的日固碳释氧能力,其次是香樟和银杏,这与王丽勉^[5]在上海地区的研究结果一致。绿色植物的固碳释氧效应源于植物叶片的光合作用,是通过叶片表面与周围环境产生交流与相互作用完成的。单株叶面积和叶面积指数反应树木叶片的疏密程度,叶面积指数越大,说明单位土地上的叶面积越多,叶片的层叠程度越大,对光能可形成多层利用,减少了光能的浪费^[9]。因此,对于整株植物的固碳释氧量不仅取决于白天的净光合速率和其夜间呼吸,还取决于该树种叶面积指数。同时人工修剪量、凋落物量和动物取食量的大小也是影响因素^[17]。绿量研究、简易测定及环境效益之间的量化关系可为城市河流廊道的规划提供一定的理论依据^[18]。因此,在评价绿地固碳释氧效应时,不能仅以植物的光合作用能力为评价指标,还应将植物绿量纳入综合考虑。研究表明,三维绿量与生态效益的高低总体来说成正比例关系,即三维绿量越大,生态效益相对越好,这与陈芳^[19]提出的绿量是反映及衡量绿色环境生态功效的结论是一致的。垂柳的年固碳释氧能力居所测树种之首,虽然其单位叶面积日固碳释氧量不高,但其叶面积指数远高于其他树种,使得单株固碳释氧能力得到较大的提高,因此是植物配置中比较优秀的乔木树种。香樟的年固碳释氧能力也较强,因此,樟柳配

置模式在改善空气质量方面具有较好的效果,是兼具生态效益和景观效果的绿化配置模式。桂花四季常青,枝叶繁茂,树龄长久,秋季开花,芳香四溢,其单位叶面积固碳释氧量居乔木之首,又因其强耐烟尘,抗污染及抗有毒气体能力,且适应粗放管理,具有较强的综合生态效应,应在城市绿地中大力推广。

植物的另一功能是降温增湿,植物一方面阻挡阳光,减少到达地面的辐射热量;另一方面通过蒸腾作用吸收周围环境中的热量降低空气温度,同时向环境中释放水分增加空气湿度,从而调节小气候^[20]。因此,植物对城市热岛效应可以起到缓解作用,实现城市生态系统的良性循环。整个生长季节同一树种各季节的降温增湿能力表现出夏季>秋季>春季。而汪成忠^[21]的研究则与本文的结果不一致,桂花的降温增湿能力表现为夏季>春季>秋季,这可能与所处的地理位置,生态环境有一定的关系。研究区乔木树种单位叶面积日平均蒸腾量、平均日释水量和日平均蒸腾吸热量,从高到低的顺序为:垂柳>山杜英>水杉>天竺桂>黄葛树>香樟>银杏>桂花。由于垂柳年固碳释氧和年降温增湿能力优于其他树种,能发挥较好的生态功能,所以垂柳可在河流群落树种的选择中作为优选树种。

根据树种的固碳释氧和降温增湿能力,在树种选择时乔木树种优选垂柳、桂花、山杜英、香樟,而银杏的固碳释氧和降温增湿能力较弱,可作为长寿树种和观赏树种适量引种,不宜大面积绿化。沙河绿化树种中有高大乔木 12.2×10^4 株,如果按所测树种每株年固碳释氧量的平均值计算,沙河植物群落年总固碳量约为 5.87×10^4 t,总释氧量约为 4.27×10^4 t。因此,就研究区乔木树种而言,固碳释氧和蒸腾吸热量相当可观。

本文只针对乔木树种进行了实地测定,虽然灌木和草本植物在固碳释氧和降温增湿上不如乔木,但植物群落除了具有良好的生态效益外,还应兼顾景观多样性。因此,在河流廊道建设中,应以乔木为主,辅以灌木和花草组成乔灌花草多复层结构,并配以比例,使具有不同生态特性的植物各得其所,各尽所能,充分利用阳光、水分、土地空间,构建和谐有序的群落,增强规模效应,这样才能提高单位绿地上的三维绿量,进而提高绿地生态效益。在本次测定中,有些乔木树体高大,所以未能进行活体数据的采集,对测量结果会有一定的影响。

References:

- [1] Liu J J, Wang Z G, Yan A H, Bi Y G. Photosynthetic Characteristics and Functions of Carbon Fixation and Oxygen Release of Twelve Species of Colorful Plants. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(9): 24-25.
- [2] Wu X. Research on Forest Solid Carbon Benefit in Xiaolongshan Forest Region. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 39(9): 24-25.
- [3] Chen S P, Zhuang Q Q, Guo T J, Dai X Z, Wang Y. Study on Carbon Fixation, Oxygen Release, Humidity Increase and Temperature Reduction of Landscape Trees in Changchun City. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(4): 750-756.
- [4] Zhao X, Li H M. Study on Carbon-fixing, Oxygen-releasing, Temperature-reducing and Humidity-increasing Effects of 11 Ground Cover Plants. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(1): 44-47.
- [5] Wang L M, Hu Y H, Qin J, Gao K, Huang J. Carbon Fixation and Oxygen Production of 151 Plants in Shanghai. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(3): 399-401.
- [6] Yu H Z, Ye N S. Report of the study on city greening aviation remote sensing investigation and evaluation in Jiangsu Province. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, 1993, 9(2): 23-34.
- [7] McPherson E G, Nowak D J, Rowan A R. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago urban forest climate project. United States Department of Agriculture Forest Service General technical report, 1994, 83-94.
- [8] Han H J. Effect of Carbon Fixation and Oxygen Release about Urban Greening Plants. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 3(5): 68-70.
- [9] Han H J. Study on the eco-physiological functions of main plant species in Harbin City. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2005, 32(4): 5-10.
- [10] Yang S H. A study on the effect of decreasing temperature and increasing humidity of urban afforestation trees. *Geographical Research*, 1994, 12(4): 74-79.
- [11] Yang S H. Primary study on effect of C-O balance of afforestation trees in cities. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1996, 9(1): 37-39.
- [12] Lu G Q, Xie B Y, Gu J C, Zhang S C, Bai S J. The analysis of reducing temperature and increasing humidity of familiar afforestation tree species in Dalian city. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(2): 65-67.
- [13] Tong X, Li X. Effects of release of oxygen and carbon sequestration and temperature lowering and humidity increasing by 5 afforestation tree species

- in Shenyang City. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2010, (3):14-16.
- [14] Lu G Q, Yin Z F, Gu J C, Meng D X, Wu H X, Li Y J. A Research on the Function of Fixing Carbon and Releasing Oxygen of Afforestation Trees Along the Main Road in Dalian City. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006, 29(6):49-51.
- [15] Li Y J. Study on the Ecological Benefit of Beijing City about Common Greenery Tree[D]. Agricultural University of Hebei, 2007.
- [16] Shi X L. Preliminary Study on Fixing Carbon Dioxide Releasing and Retention of Dust of Street trees in Beijing [D]. Beijing Forestry University, 2010.
- [17] Zhao P. Ecophysiological characteristics of constructive plants in vegetation restoration[D]. Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [18] Wang H. Urban ecological garden and green space system planning. Beijing: China forestry Publishing House, 2003.
- [19] Chen F. Evaluation on the Ecosystem Services of Urban Green-land in Industrial Aress[D]. Huzhong Agricultural University, 2007.
- [20] Ding Z C, Huang L B. Analysis of environmental impacts of the air of Changshu Yushan Forest. Journal of Chinese Urbanforestry, 2006, 4(3):31-32.
- [21] Wang C Z. A Comparative study on the Ecological Function of Eight Kinds of Ornamental Woody Plants in Shanghai [D]. Northeast Forestry University, 2009.

参考文献:

- [1] 刘嘉君, 王志刚, 阎爱华, 毕拥国. 12 种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能. 东北林业大学学报, 2011, 39(9):24-25.
- [2] 吴霞. 小陇山林区森林固碳效益的研究. 西北林学院学报, 2005, 23(5):164-267.
- [3] 陈少鹏, 庄倩倩, 郭太君, 代新竹, 王莹. 长春市园林树木固碳释氧与增湿降温效应研究. 湖北农业科学, 2012, 51(4):750-756.
- [4] 赵莹, 李海梅. 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究. 江西农业学报, 2009, 21(1):44-47.
- [5] 王丽勉, 胡永红, 秦俊, 高凯, 黄娟. 上海地区 151 种绿化植物固碳释氧能力的研究. 华中农业大学学报, 2007, 26(3):399-401.
- [6] 俞慧珍, 叶年山. 江苏省城市绿化航空遥感调查评价研究报告. 中国园林, 1993, 9(2):23-34.
- [8] 韩焕金. 城市森林植物的固碳释氧效应. 东北林业大学学报, 2005, 3(5):68-70.
- [9] 韩焕金. 哈尔滨市主要植物生理生态功能研究. 江苏林业科技, 2005, 32(4):5-10.
- [10] 杨士弘. 城市绿化树木的降温增湿效应研究. 地理研究, 1994, 12(4):74-79.
- [11] 杨士弘. 城市绿化树木碳氧平衡效应研究. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1):37-39.
- [12] 陆贵巧, 谢宝元, 谷建才, 张锁成, 白顺江. 大连市常见绿化树种蒸腾降温的效应分析. 河北农业大学学报, 2006, 29(2):65-67.
- [13] 佟潇, 李雪. 沈阳市 5 种绿化树种固碳释氧与降温增湿效应研究. 辽宁林业科技, 2010, (3):14-16.
- [14] 陆贵巧, 尹兆芳, 谷建才, 孟东霞, 武会欣, 李永杰. 大连市主要行道绿化树种固碳释氧功能研究. 河北农业大学学报, 2006, 29(6):49-51.
- [15] 李永杰. 北京市常见绿化树种生态效益研究[D]. 河北农业大学, 2007.
- [16] 史晓丽. 北京市行道树固碳释氧滞尘效益的初步研究[D]. 北京林业大学, 2010.
- [17] 赵平. 植被恢复建群植物的生理生态特性研究[D]. 中国科学院, 2001.
- [18] 王浩. 城市生态园林与绿地系统规划. 北京:中国林业出版社, 2003.
- [19] 陈芳. 城市工业区绿地生态服务功能的计量评价[D]. 华中农业大学, 2007.
- [20] 丁振才, 黄利斌. 常熟虞山森林空气环境效应测定分析. 中国城市林业, 2006, 4(3):31-32.
- [21] 汪成忠. 上海八种园林树木生态功能比较研究[D]. 东北林业大学, 2009.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P. DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第12期 (2013年6月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主编 王如松
主管 中国科学技术协会
主办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085

出版 科学出版社
地址:北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印刷 北京北林印刷厂
发行 科学出版社
地址:东黄城根北街16号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@espg.net

订购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第8013号
许可证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@espg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元