

## 竹类植物的主要环境效应研究进展

郑 钧, 吴仁武, 史 琰, 杨 凡, 晏 海, 吴一波, 任伟涛, 包志毅

(浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 随着人居环境的恶化, 人类更加关注环境对自身身心健康的影响。竹类植物不仅能够保护、美化以及改善环境, 它的生态环境功能还能促进人类的生理与心理健康。针对目前环境科学研究中的一些热点问题, 从改善小气候环境、净化空气、释放空气负离子、固碳释氧等方面对近年来竹类植物的主要环境效应研究的进展进行了综述, 提出扩大竹类植物环境效应定量实验研究对象的范围; 改进竹类植物环境效应定量实验的研究方法; 建立竹类植物生态环境服务的评价体系等是将来的重点研究方向。参 56

**关键词:** 园林学; 竹类植物; 环境效应; 生态环境功能; 人居环境; 综述

**中图分类号:** S718.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2017)02-0374-07

## Research progress on environmental effects of bamboo: a review

ZHENG Jun, WU Renwu, SHI Yan, YANG Fan, YAN Hai, WU Yibo, REN Weitao, BAO Zhiyi

(School of Landscape Architecture, Zhejiang A & Forestry University, Lin'an 311300, Zhengjiang, China)

**Abstract:** With degradation of the living environment, urban and rural areas have had an irreversible tendency bringing a series of serious consequences. At the same time, the public has expressed a strong desire to improve their living environment. Bamboo not only protects and improves the environment, but also promotes the physical and mental health of mankind through its eco-environmental functions. Aiming at the hotspots in environmental science research, and from the viewpoint of improving the microclimatic environment, purifying the air, releasing negative air ions, and fixing carbon, this paper summarizes recent research progress concerning the environmental effects of bamboo. Future work in this field should focus on expanding the scope of bamboo, improving research methods for quantitative experimentation on environmental effects, and establishing an evaluation system for bamboo ecological and environmental services. [Ch, 56 ref.]

**Key words:** landscape architecture; bamboo; environmental effects; eco-environmental function; human settlement; review

过去 30 多年来中国城镇化的不断推进, 社会经济水平增长迅速, 人们物质生活水平不断提高, 但人类活动对自然生态系统产生了十分严重的破坏, “城市病”和“农村病”等问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。近几年“生态园林城市”以及“美丽乡村”建设的提出与实践强调了人与环境的和谐相处, 将城市与乡村的生态环境引向良性发展的趋势。中国把生态文明建设放在突出地位, 并纳入社会主义现代化建设总体布局, 表明了保护与改善环境的决心, 也标志着中国生态文明建设跨入新时代的新征程<sup>[3]</sup>。竹类植物是重要的森林资源, 在全世界约有 70 多属 1 200 余种, 主要分布在热带及亚热带地区。中国的竹类植物资源丰富, 分布广泛, 现有竹类植物 39 属 500 余种, 竹林面积为逾 500 万  $\text{hm}^2$ , 占到世界竹林总面积的 1/4<sup>[4]</sup>。因竹类植物具有生长快、产量高、适应性强等特点, 近年来被广泛的运用到城市和乡村绿地景观的营造中, 针对竹类植物生态环境功能的研究也逐渐引起国内外学者的重视。直至目前, 对竹类植物生

收稿日期: 2016-04-07; 修回日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270743, 31400607)

作者简介: 郑钧, 从事园林植物应用研究。E-mail: 284597854@qq.com。通信作者: 包志毅, 教授, 博士, 博士生导师, 从事植物景观规划和园林植物应用研究。E-mail: bao99928@188.com

态环境功能研究进展的阐述主要集中在涵养水源、保持水土、防风固沙以及保护生物多样性等生态功能方面<sup>[5-8]</sup>，针对竹类植物在目前环境科学研究中的热点领域，如城市小气候环境、大气污染、碳循环等方面的综述还涉及较少。针对这些问题，作者主要从改善小气候环境、净化空气、释放空气负离子和固碳释氧等方面对竹类植物的主要环境效应研究进行综述。

## 1 改善小气候环境功能

热岛效应作为一个显著的城市气候问题一直备受关注。已有的研究证实绿色植被能够通过遮光、蒸散作用降低空气温度，增加空气湿度，从而缓解热岛效应，改善城市小气候环境<sup>[9-10]</sup>。对于园林植物降温增湿效应的测定主要有 2 种方法。一是选取健康植株的叶片进行蒸腾速率值的测定，并利用公式计算树种的日降温增湿量；二是使用温湿度计等仪器，直接测定植物群落的空气温度和相对湿度<sup>[11-12]</sup>。

竹类植物群落具有较强的降温增湿能力：夏季时毛竹 *Phyllostachys edulis* 林比桂花 *Osmanthus fragrans* 林气温平均低 0.54 °C，相对湿度低 4.6%<sup>[13]</sup>；短穗竹 *Brachystachyum densiflorum* 和黄甜竹 *Acidosasa edulis* 在夏季的平均日降温可达 3.14 °C 和 2.91 °C，平均日增湿可达 3.50% 和 3.34%<sup>[14]</sup>；夏季清晨和夜间等低温时段，雷竹 *Phyllostachys vilascens* 林的降温效果相较于杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、无患子 *Sapindus mukorossi*-国槐 *Sophora japonica* 混交林、乐昌含笑 *Michelia chapensis*-桂花混交林和银杏 *Ginkgo biloba*-红枫 *Acer palmatum* 混交林最为显著，而增湿效果差异较小<sup>[15]</sup>。也有研究结果表明：复层植物群落、乔木-草地型植物群落、棕榈科 *Palmae* 植物群落的降温增湿能力均强于丛生竹林植物群落<sup>[16]</sup>。

不同季节、不同竹类植物种类对于局部小气候的改善作用存在差异。从不同季节而言，竹类植物在 9 月的降温增湿效应要好于 3-4 月<sup>[17]</sup>。从不同种类而言，竹类植物降温增湿能力与其单叶面积呈正相关，降温增湿效果较好的竹种有金镶玉竹 *Phyllostachys aureosulcata* ‘Spectabilis’，凤尾竹 *Bambusa multiplex* ‘Fernleaf’，宜兴苦竹 *Pleioblastus yixingensis*，麻竹 *Dendrocalamus latiflorus* 和绿竹 *Bambusa oldhami* 等<sup>[17-18]</sup>。对于竹类植物改善小气候环境的研究还处于起步阶段，研究的竹子种类不够丰富，降温增湿效应影响因子的研究还不够深入。

## 2 净化空气功能

### 2.1 杀菌功能

空气中散布着大量空气微生物，主要由 1 200 余种细菌和放线菌，以及 40 000 余种真菌组成，其中存在着各种有害的致病菌，严重威胁着人类身体健康<sup>[19]</sup>。植物能够通过释放挥发性有机复合物 (VOCs)，如萜烯类、醚、醛、酮等物质，起到抑菌、杀菌的作用<sup>[20-21]</sup>。植物杀菌能力的测定主要通过水插枝法、琼脂平板扩散法、钢环法和管碟法测定其挥发物的杀菌作用<sup>[22]</sup>。

常杰等<sup>[23]</sup>对野外森林挥发性有机复合物的研究发现：毛竹林 VOCs 排放强度远高于马尾松 *Pinus massoniana* 林、杉木林和常绿阔叶林；张莉等<sup>[24]</sup>发现，毛竹林释放的 VOCs 中异戊二烯的排放量较大，且集中在夏季，说明毛竹林具有较强的杀菌潜力。周单红<sup>[22]</sup>比较了 4 种园林植物对空气微生物的影响，结果显示：竹林对空气细菌的抑菌率最高，杨梅 *Myrica rubra* 林与桂花林次之，樟树 *Cinnamomum camphora* 林最低，且它们都在夏季达到峰值，但 4 种林地对真菌和放线菌均起到了促进作用。

### 2.2 滞尘功能

空气颗粒物因不仅本身具有污染性，更是其他污染物的载体而成为国内外诸多城市空气的首要污染物<sup>[25]</sup>。植物能够通过停着、附着以及黏附 3 种方式净化空气中的粉尘污染<sup>[26]</sup>。植物滞尘能力的测定方法主要有 2 种，一种是使用粉尘仪对环境可吸入颗粒物比例进行测定<sup>[27]</sup>；另一种是通过差重法对一段时间内植物叶片单位面积的滞尘量进行测定<sup>[28]</sup>。

相关研究表明，竹林能够减少空气中 50% 左右的尘土，其滞尘能力平均为 4.0~8.0 g·m<sup>-2</sup><sup>[29]</sup>。不同竹种的滞尘量差异显著，灌木状株型的竹种滞尘能力明显强于乔木状株型的竹种；并且不同竹种在不同高度的滞尘效应也有较大差异，黄金间碧玉竹 *Bambusa vulgaris* ‘Vittata’ 在离地面 200 cm 处滞尘效果最好，而阔叶箬竹 *Indocalamus latifolius* 在离地 50~150 cm 处滞尘能力最强<sup>[28]</sup>。还有研究发现，单株竹类植物的滞尘能力与其叶面积指数呈显著正相关，生物量和冠层结构等是影响竹类植物群落滞尘效应的重

要因素<sup>[17]</sup>。

### 2.3 吸收有害气体功能

无机化学污染物是当今城市空气污染中分布广泛且危害较大的主要污染物,植物可以通过叶片以及枝条吸收有害气体,经氧化还原反应降解,再积累于体内或排出体外<sup>[30]</sup>。近年来国内外学者主要针对二氧化硫(SO<sub>2</sub>),氟化氢(HF)和氯气(Cl<sub>2</sub>)3种污染性气体进行研究<sup>[31]</sup>。研究表明:竹类植物对于空气中的硫元素与氯元素具有较强的吸收作用,对于二氧化硫与氯气的浓度变化具有指示作用,并且可以作为硫污染区与氯污染区的绿化植物。例如,凤凰竹 *Bambusa floribunda*, 凤尾竹, 淡竹 *Phyllostachys glauca* 等对二氧化硫抗性较强,观音竹 *Bambusa multiplex* var. *riviereorum*, 花眉竹 *Bambusa longispiculata* 和霞山泥竹 *Bambusa xiashanensis* 具有较强的吸收二氧化硫能力,佛肚竹(*Bambusa ventricosa* 和歪脚龙竹 *Dendrocalamus sinicus* 能够有效吸收氯化物来净化空气<sup>[5, 17, 32-33]</sup>。

## 3 释放空气负离子功能

空气负离子是空气中的各种分子在特殊情况下获得电子而带电所形成的,主要为氧气分子获得电子后形成的负离子又称为负氧离子<sup>[34]</sup>。某些植物因为叶片呈针状,曲率半径小,在大气电场所产生的电势差等作用下,使空气发生电离,增加空气负离子的浓度<sup>[35]</sup>。空气负离子浓度的测定主要采用空气负离子浓度测定仪,在研究对象内选取多个测试点进行多次测定。竹类植物具有较强的释放空气负离子功能,竹林中的空气负离子浓度是同一景区内水泥广场的3倍<sup>[36]</sup>;曾曙才等<sup>[37]</sup>对广州主要公园绿地中典型绿地进行了测定,结果显示:空气负离子浓度大小顺序为竹林>小叶竹柏林>花卉区>隆缘桉林>苗圃、草地>住宅区。不同竹种在不同季节的空气负离子浓度日变化规律差异显著,箬竹属 *Bambusa* 竹种春季表现为双峰型,而夏季和秋季以U型为主;刚竹属 *Phyllostachys* 竹种春季和秋季以单峰型为主,夏季则表现为U型<sup>[38]</sup>。这种差异可能与竹类植物本身特性有关,因此,未来应积极开展叶面积指数、冠层结构等内在因素对竹类植物释放空气负离子功能的定量研究。外在环境因素对于竹类植物释放空气负离子功能也有显著影响,毛竹林秋季空气负离子浓度与温度、风速呈正相关,与相对湿度呈显著负相关<sup>[39]</sup>。

## 4 固碳功能

大气中二氧化碳浓度的急剧上升导致了温室效益等一系列环境问题。森林系统能够通过植物群落生物积累过程,将大气中碳固定于植物体和土壤中<sup>[40]</sup>。竹类植物主要通过直接与间接2种形式固碳,直接固碳是指竹类植物通过光合作用,在竹体内、林下土壤和林下凋落物积累碳元素;间接固碳是指通过工业加工使竹木被砍伐后依然保持了一定存量的碳物质<sup>[41]</sup>。目前,竹体内固碳能力主要通过生物量测算法以及绿量法进行测定<sup>[17]</sup>。经初步估算,目前中国竹林生态系统的碳储量是整个森林生态系统的4%~5%。在全球森林面积不断下降,而竹林面积却以3%的速度增长的背景下,竹林将是一个重要的并且不断增大的碳汇<sup>[42]</sup>。陈先刚等<sup>[43]</sup>对中国过去50a竹林碳储量的估算结果也证明,中国竹林碳储量呈增加趋势,越到后期增长越快,并且碳储量将持续增加。

竹林植被层储藏着大量的碳素。从不同植物固碳能力来说,竹类植物具有较大的优势。浙江临安毛竹林乔木层碳素年固定量为5.097 t·hm<sup>-2</sup><sup>[44]</sup>,四川南部毛竹林年固碳量为9.43 t·hm<sup>-2</sup><sup>[45]</sup>,均高于速生阶段杉木林(3.489 t·hm<sup>-2</sup>),幼龄阶段红松 *Pinus koraiensis* 林(1.300 t·hm<sup>-2</sup>),蒙古栎 *Quercus mongolica* 林(1.050 t·hm<sup>-2</sup>)和山杨 *Populus davidiana* 林(2.290 t·hm<sup>-2</sup>)等<sup>[46-47]</sup>。对不同竹类植物的固碳释氧效应分析发现:其吸收二氧化碳和释放氧气量与叶面积指数和绿量呈正相关,与净光合速率呈正比<sup>[30]</sup>。苦竹 *Pleuroblastus amarus* 平均氧气释放量达到35 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,远高于其他竹种,其他释氧能力较强的竹种还有阔叶箬竹、黄槽竹 *Phyllostachys aureosulcata* 和佛肚竹等<sup>[17, 30]</sup>。不同竹类植物的不同器官碳素密度不同,但波动幅度不大。毛竹不同器官波动量为0.468 3~0.521 0 g·g<sup>-1</sup>,苦竹为0.348 5~0.518 6 g·g<sup>-1</sup>,慈竹 *Bambusa emeiensis* 介于0.460 0~0.510 5 g·g<sup>-1</sup>,一般均表现为竹秆与竹根的碳素密度高于竹枝与竹叶<sup>[44, 48-49]</sup>。竹林土壤是竹林生态系统中最大的碳库<sup>[4]</sup>。研究发现:大多数竹林中,土壤层的碳储量是地上植被层的2倍,占竹林生态系统碳储量的2/3<sup>[50]</sup>。目前,竹类植物固碳释氧效应较集中在野外竹林的研究上,对于城市绿地中竹类植物固碳释氧效应的研究开展较少,而城市绿地与人类的身心健康息息相关,因此针

对不同竹种在城市绿地中所发挥的固碳释氧功能将是未来的研究重点。

## 5 展望

中国作为世界范围内竹类植物分布的重点区域,有大量国内学者开展了竹类植物的相关研究。总体来说,虽然对于竹类植物改善小气候环境、净化空气、释放空气负离子和固碳释氧等环境效应都进行了定量研究,但仅在固碳效应方面开展的较为深入,其他效应的研究还在起步阶段。通过对主要环境效应的综述发现,竹类植物相较于其他植物具有很强的固碳能力;也具有一定的改善小气候环境和释放空气负离子功能;在净化空气包括杀菌、滞尘以及吸收有害气体等方面存在很强的潜力,但目前对于这方面的研究较少。

针对竹类植物环境效应研究存在的不足以及竹类植物生态景观发展的趋势,将来竹类植物环境效应的研究重点应从以下几个方面展开:①扩大竹类植物环境效应定量实验研究对象的范围。目前,因竹类植物环境效应定量实验的研究对象范围较小,涉及竹种较少,使得对于竹类植物生态环境功能的认知不够全面。随着对竹类植物生态环境功能重要性的逐步认识,扩大实验对象的范围,测定更多竹种的环境效应指标将是未来竹类植物环境效应的重点研究内容。②改进竹类植物环境效应定量实验的研究方法。通过对已有的竹类植物生态环境功能的测定研究发现,在实验环境、测定方法等不统一的情况下,同种植物发挥的环境效应以及其影响因素差异显著<sup>[51]</sup>,因此,如何对竹类植物环境效应各项指标进行科学、准确的测定是一个迫切的问题,并且,目前的实验模式较为传统、固定,缺乏创新,难以将实验结果与人类健康形成直接关系,因此加强与多学科的耦合运用必将成为未来实验研究的主要趋势。例如,在设计实验时,可以通过主观评价法:包括语义分析法(SD法)、心境状态量表(POMS)以及状态特质焦虑问卷(STAI)等<sup>[52-53]</sup>,以及客观评价法,利用电子仪器观测被试者生理指标的变化,主要包括脑电波、心率、呼吸速率、血压、肌电值、皮肤温度等<sup>[54-55]</sup>,对人体心理以及生理变化进行测定分析,从而促进人类对竹类植物生态环境功能重要性的认知,为竹类植物的生态环境应用提供理论支持。③建立竹类植物生态环境服务的评价体系。目前,对于植被生态服务量化评价方法十分多样<sup>[56]</sup>,因此,通过实验数据建立模型,科学准确地反应竹类植物环境效应,并形成生态环境服务评价体系,将更有效地为优势竹类植物群落筛选提供支持,提高其生态景观效益,并且丰富城市以及乡村绿地生态服务及应用理论。

## 6 参考文献

- [1] ZHOU Sha, HUANG Yuefei, YU Bofu, *et al.* Effects of human activities on the eco-environment in the middle Heihe River Basin based on an extended environmental Kuznets curve model [J]. *Ecol Eng*, 2015, **76**: 14 – 26.
- [2] KONG Fanhua, YIN Haiwei, NAKAGOSHI N, *et al.* Simulating urban growth processes incorporating a potential model with spatial metrics [J]. *Ecol Indic*, 2012, **20**(20): 82 – 91.
- [3] 陆地. 快速城镇化背景下武汉东湖风景名胜区生态文明构建策略[J]. *中国园林*, 2015, **31**(10): 66 – 70.  
LU Di. Ecological civilization construction strategy of East Lake famous scenic site of Wuhan under the background of rapid urbanization [J]. *Chin Landscape Archit*, 2015, **31**(10): 66 – 70.
- [4] 费世民. 竹林生态研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [5] 蒲晓蓉, 陈其兵. 浅析竹类植物的城市生态环境效应[J]. *竹子研究汇刊*, 2006, **25**(3): 59 – 62.  
PU Xiaorong, CHEN Qibing. Analyses on ecological environmental functions of bamboo in the urban [J]. *J Bamboo Res*, 2006, **25**(3): 59 – 62.
- [6] 王玲, 赵丽娅. 竹类植物的生态功能[J]. *资源开发与市场*, 2011, **27**(4): 342 – 343.  
WANG Ling, ZHAO Liya. Ecological function of bamboo plants [J]. *Resour Develop Mark*, 2011, **27**(4): 342 – 343.
- [7] 李智勇, 校建民, 张新萍, 等. 竹林生态环境效益评估探讨[J]. *世界竹藤通讯*, 2005, **3**(4): 15 – 17.  
LI Zhiyong, XIAO Jianmin, ZHANG Xinping, *et al.* Evaluation on eco-environmental benefit of bamboo forest [J]. *World Bamboo Rat*, 2005, **3**(4): 15 – 17.
- [8] 陈双林, 萧江华, 薛建辉. 竹林水文生态效应研究综述[J]. *林业科学研究*, 2004, **17**(3): 399 – 404.  
CHEN Shuanglin, XIAO Jianghua, XUE Jianhui. A review on hydrological effects of bamboo stand [J]. *For Res*, 2004, **17**(3): 399 – 404.

- [9] CHAN Y S. Mitigating surface urban heat island by a tree protection policy: a case study of The Woodland, Texas, USA [J]. *Urban For Urban Green*, 2013, **12**(4): 474 – 480.
- [10] GEORGI J N, DIMITRIOU D. The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece [J]. *Build Environ*, 2015, **45**(6): 1401 – 1414.
- [11] 谭庆, 童俊, 戢小梅, 等. 武汉 31 种野生地被植物的固碳释氧和降温增湿研究[J]. *中国园林*, 2010, **26**(8): 93 – 95.  
TAN Qing, TONG Jun, JI Xiaomei, *et al.* Researches on capability of carbon fixation & oxygen production, and temperature decrease & humidity increase in 31 wild groundcover plants in Wuhan [J]. *Chin Landscape Archit*, 2010, **26**(8): 93 – 95.
- [12] 刘娇妹, 李树华, 杨志峰. 北京公园绿地夏季温湿效应[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(11): 1972 – 1978.  
LIU Jiaomei, LI Shuhua, YANG Zhifeng. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27**(11): 1972 – 1978.
- [13] 鲍淳松, 楼建华, 曾新宇, 等. 杭州城市园林绿化对小气候的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2001, **27**(4): 415 – 418.  
BAO Chunsong, LOU Jianhua, ZENG Xinyu, *et al.* Effect of landscaping and greening on microclimate in Hangzhou City [J]. *J Zhejiang Univ Agric Life Sci*, 2001, **27**(4): 415 – 418.
- [14] 吴莹. 5 种中国特有观赏竹生态效应及园林应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.  
WU Ying. *Study on the Eco-efficiency and Landscape Application of 5 Species of Chinese Special Ornamental Bamboos* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [15] 余树全, 冯洁. 夏季不同绿地类型温湿度及空气负离子浓度变化特征研究[J]. *东北农业大学学报*, 2013, **44**(5): 66 – 74.  
YU Shuquan, FENG Jie. Study on the variation traits of different types of greenbelt humiture and air ions concentration in summer [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2013, **44**(5): 66 – 74.
- [16] ZHANG Zhe, LÜ Yingmin, PAN Huitang. Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks [J]. *Urban For Urban Green*, 2013, **12**(3): 323 – 329.
- [17] 蒲晓蓉. 8 种观赏竹在城市园林中的生态效应研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.  
PU Xiaorong. *Studies on Ecological Function of Eight Ornamental Bamboos in Urban* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007.
- [18] 张颖. 观赏竹净化环境功能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.  
ZHANG Ying. *Research on the function of Ornamental Bamboos in Purifying Environment* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [19] 宋凌浩, 宋伟民, 施玮, 等. 上海市大气微生物污染对儿童呼吸系统健康影响的研究[J]. *环境与健康杂志*, 2000, **17**(3): 135 – 138.  
SONG Linghao, SONG Weimin, SHI Wei, *et al.* Health effects of atmospheric microbiological pollution on respiratory system among children in Shanghai [J]. *J Environ Health*, 2000, **17**(3): 135 – 138.
- [20] 谢慧玲, 李树人, 袁秀云, 等. 植物挥发性分泌物对空气微生物杀灭作用的研究[J]. *河南农业大学学报*, 1999, **33**(2): 127 – 133.  
XIE Huiling, LI Shuren, YUAN Xiuyun, *et al.* Study on the disinfection of plant volatile secretion to the microorganism content in the air [J]. *Acta Agric Univ Henan*, 1999, **33**(2): 127 – 133.
- [21] DUDAREVA N, NEGRE F. Practical applications of research into the regulation of plant volatile emission [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2005, **8**(1): 113 – 118.
- [22] 周单红. 4 种园林植物对空气微生物的影响[D]. 临安: 浙江农林大学, 2009.  
ZHOU Danhong. *Effects of Four Garden Plants on Airborne Microbes* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2009.
- [23] 常杰, 任远, 史琰, 等. 亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单: 以台州地区为例[J]. *生态学报*, 2012, **32**(2): 641 – 649.  
CHANG Jie, REN Yuan, SHI Yan, *et al.* An inventory of BVOC emission for a subtropical urban-rural complex: Greater Taizhou Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(2): 641 – 649.
- [24] 张莉, 白艳莹, 王效科, 等. 浙江省毛竹异戊二烯排放规律及其影响[J]. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1339 – 1344.

- ZHANG Li, BAI Yanying, WANG Xiaoke, *et al.* Isoprene emission of bamboo and its implication to ozone level in region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(8): 1339 – 1344.
- [25] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, **34**(8): 1910 – 1921.  
WANG Xiaolei, WANG Cheng. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(8): 1910 – 1921.
- [26] 张灵芝, 秦华. 城市园林绿地滞尘研究进展及发展方向[J]. 中国园林, 2015, **31**(1): 64 – 68.  
ZHANG Lingyi, QIN Hua. Research on progress of dust-retention for urban green space [J]. *Chin Landscape Archit*, 2015, **31**(1): 64 – 68.
- [27] 郭含文, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 城市不同绿地 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日变化规律[J]. 中国水土保持科学, 2013, **11**(4): 99 – 103.  
GUO Hanwen, DING Guodong, ZHAO Yuanyuan, *et al.* Diurnal variations in the mass concentration of suspended particulate matter 2.5 (PM<sub>2.5</sub>) of different urban green space [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2015, **31**(1): 64 – 68.
- [28] 洪茜, 倪乐, 张迎辉, 等. 凤尾竹等 18 种观赏竹滞尘能力的研究[J]. 福建林业, 2013, **29**(1): 25 – 29.  
HONG Xi, NI Le, ZHANG Yinghui, *et al.* A study on dust retention capacity of 18 bamboos including *Bambusa multiplex* ‘Fernleaf’ etc. [J]. *Fujian For*, 2013, **29**(1): 25 – 29.
- [29] 周芳纯. 竹林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [30] 洪茜. 18 种观赏竹净化环境功能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.  
HONG Xi. *Study on the Function of 18 Ornamental Bamboos in Purifying Environment* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [31] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 城市绿地的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, **31**(23): 7287 – 7300.  
SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, *et al.* Research progress in the eco-environment effects of urban green spaces [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(23): 7287 – 7300.
- [32] 张颖, 蒋建立, 何天友, 等. 3 个竹种硫含量季节变化[J]. 福建林业科技, 2013, **40**(2): 60 – 63.  
ZHANG Ying, JIANG Jianli, HE Tianyou, *et al.* Study on the contents of sulfur of 3 bamboos [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2013, **40**(2): 60 – 63.
- [33] 张颖, 何天友, 陈凌艳, 等. 麻竹等 4 种竹子 Cl 含量对比[J]. 亚热带农业研究, 2012, **8**(2): 102 – 104.  
ZHANG Ying, HE Tianyou, CHEN Lingyan, *et al.* Comparison of chlorine in 4 bamboo species [J]. *Subtrop Agric Res*, 2012, **8**(2): 102 – 104.
- [34] 李印颖. 植物与空气负离子关系的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.  
LI Yinying. *Study of Relation of Plants and Air Negative Ions* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.
- [35] 吴楚材, 黄绳纪. 桃源洞国家森林公园的空气负离子含量及评价[J]. 中南林学院学报, 1995, **15**(1): 9 – 12.  
WU Chucai, HUANG Shengji. Determination of the anion content in the air in Taoyuandong National Forest Park and evaluation of the air quality [J]. *J Cent-South For Coll*, 1995, **15**(1): 9 – 12.
- [36] 胡卫华. 竹林生态环境资源分析及旅游开发探讨[J]. 竹子研究汇刊, 2010, **29**(4): 58 – 62.  
HU Weihua. Bamboo forest eco-environmental resources and its tourism development [J]. *J Bamboo Res*, 2010, **29**(4): 58 – 62.
- [37] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光. 广州绿地空气负离子水平及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(7): 1049 – 1053.  
ZENG Shucai, SU Zhiyao, CHEN Beiguang. Air negative ion concentrations and their affecting factors in greenbelts of Guangzhou [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26**(7): 1049 – 1053.
- [38] 张晔. 黄金间碧竹等 18 种观赏竹的空气负离子浓度和光合特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.  
ZHANG Ye. *Study on Negative Air Ion Concentration and Photosynthetic Characteristics of 18 Species of Ornamental Bamboos Such as Bambusa vulgaris* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [39] 张晶. 无锡惠山地区秋季毛竹游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.  
ZHANG Jing. *Ecological Health Effects of Moso Bamboo Recreation Forest in Huishan Area of Wuxi in the Fall* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.
- [40] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, **20**(5): 733 – 739.  
LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 733 – 739.

- [41] 谢瑞麟. 四川“蜀南竹海”绵竹林生态系统碳储量及其空间分布的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.  
XIE Ruilin. *Carbon Storage and Its Spatial Distribution in Mianzhu Stands in the Bamboo Sea of Southern Sichuan* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [42] 李正才, 傅懋毅, 徐德应. 竹林生态系统与大气二氧化碳减量[J]. 竹子研究汇刊, 2003, **22**(4): 1 – 6.  
LI Zhengcai, FU Maoyi, XU Deying. Bamboo ecosystem and carbon dioxide sequestration [J]. *J Bamboo Res*, 2003, **22**(4): 1 – 6.
- [43] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.  
CHEN Xiangang, ZHANG Yiping, ZHANG Xiaoquan, *et al.* Carbon stock changes in bamboo stands in China over the last 50 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.
- [44] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, **40**(6): 20 – 24.  
ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachy pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(6): 20 – 24.
- [45] 张蕊, 申贵仓, 张旭东, 等. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测[J]. 生态学报, 2014, **34**(13): 3592 – 3601.  
ZHANG Rui, SHEN Guicang, ZHANG Xudong, *et al.* Carbon stock and sequestration of a *Phyllostachys edulis* forest in Changning, Sichuan province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(13): 3592 – 3601.
- [46] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. 林业科学, 2002, **38**(3): 14 – 19.  
FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(3): 14 – 19.
- [47] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(2): 140 – 158.  
HU Haiqing, LUO Bizhen, WEI Shujing, *et al.* Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39**(2): 140 – 158.
- [48] 李江, 黄从德, 张国庆. 川西退耕还林地苦竹林碳密度、碳贮量及其空间分布[J]. 浙江林业科技, 2006, **26**(4): 1 – 5.  
LI Jiang, HUANG Congde, ZHANG Guoqing. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Pleioblastus amarus* forest returned from farmland [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2006, **26**(4): 1 – 5.
- [49] 王勇军, 黄从德, 王宪帅, 等. 慈竹林生态系统碳储量及其空间分配特征[J]. 福建林业科技, 2009, **36**(2): 6 – 9, 87.  
WANG Yongjun, HUANG Congde, WANG Xianshuai, *et al.* Carbon stock and spatial distribution characteristics of *Neosinocalamus affinis* forest ecosystem [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2009, **36**(2): 6 – 9, 87.
- [50] SONG Xinzhang, ZHOU Guomo, JIANG Hong, *et al.* Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges [J]. *Environ Rev*, 2011, **19**(1): 418 – 428.
- [51] TZOULAS K, KORPELA K, VENN S, *et al.* Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review [J]. *Landscape Urban Plan*, 2007, **81**(3): 167 – 178.
- [52] ÖZBILEN A, KALIN A. The semantic value of plants in the perception of space [J]. *Build Environ*, 2001, **36**(2): 257 – 279.
- [53] 张哲, 潘会堂. 园林植物景观评价研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(6): 962 – 967.  
ZHANG Zhe, PAN Huitang. Research on the evaluation of garden plant landscapes [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(6): 962 – 967.
- [54] CHANG C Y. Psychophysiological responses to different landscape settings and a comparison of cultural differences [J]. *Acta Hort*, 2004, **639**: 57 – 65.
- [55] VERLARDE M D, FRY G, TVEIT M. Health effects of viewing landscapes: landscape types in environmental psychology [J]. *Urban For Urban Green*, 2007, **6**(4): 199 – 212.
- [56] 毛齐正, 罗上华, 马克明, 等. 城市绿地生态评价研究进展[J]. 生态学报, 2012, **32**(17): 5589 – 5600.  
MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, *et al.* Research advance in ecological assessment of urban greenspace [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(17): 5589 – 5600.