

苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2011, 31(23): 7287–7300.

Su Y X, Huang G Q, Chen X Z, Chen S S, Li Z S. Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7287–7300.

城市绿地的生态环境效应研究进展

苏泳娴^{1,2,3}, 黄光庆^{1,*}, 陈修治^{1,2,3}, 陈水森¹, 李智山^{1,2,3}

(1. 广州地理研究所, 广州 510070; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:工业化的快速发展和城市化进程的加剧,使得城市生态环境的破坏和污染愈来愈严重,加速了城市的“生态环境危机”。城市绿地能够通过植被的光合作用、吸收作用、隔离阻挡作用、蒸腾以及蒸散作用改善城市的生态环境。目前研究主要集中在降温、增湿、固碳释氧、降噪、抗污染、生物多样性保护等 6 个方面。关于城区绿地对 6 种生态环境要素的改善程度、影响范围、机理问题以及不同植被种类生态环境效应的差异情况等,国内外学者都进行了大量详细的研究。基于传统实地观测数据进行城市绿地的生态环境效应研究是目前主要使用的研究方法,部分学者开始使用遥感技术手段研究城区绿地的降温增湿效应。在总结和分析前人研究成果的基础上,从研究内容的不同着手,主要总结并系统评估了目前关于城市绿地 6 种生态环境效应的研究,为今后相关研究提供参考。

关键词:城市绿地; 生态环境效应; 降温; 增湿; 固碳释氧; 降低噪声; 抗污染; 保护生物多样性

Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces

SU Yongxian^{1,2,3}, HUANG Guangqing^{1,*}, CHEN Xiuzhi^{1,2,3}, CHEN Shuisen¹, LI Zhishan^{1,2,3}

1 Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In the 21st century, more and more people from rural areas and suburbs pour into cities. Urbanization had become an unstoppable tendency bringing a series of unfavorable consequences. Farmlands in the countries are shrinking. Rural lands, rivers and air conditions are polluted. Because of the rapid development of urban industries and the aggravation of urbanization, large numbers of natural surfaces in the city have been replaced by artificial surfaces. This had resulted in undesirable impacts on urban meteorological and ecological environment, which could have seriously polluted urban ecology and urban environments and accelerated the ecological crisis of urban spaces, and also brought lots of negative effect to the health of human beings. Studies had showed that urban green spaces could absorb carbon dioxide, release oxygen, lower the air temperature, increase air moisture, reduce dust concentration and noise level, while they could protect the biodiversity and reduce air pollution through the photosynthesis, absorption, buffer function, transpiration and evapotranspiration of vegetation. Urban green spaces were one of the best ways to improve the urban ecological environment. Many researchers have done numerous studies about the eco-environmental effects of urban green spaces, mainly in lowering the surface temperature, increasing the air humidity, carbon fixation and oxygen release, noise reduction, pollution filtering and biodiversity protection. The differences of the eco-environment effects of the urban green space were not only reflected on large spatial scales (such as different zones, countries and regions and so on), but also reflected on small spatial scales (such as different underlying surface and vegetation types and so on). What was more, these differences were still not only reflected on large temporal scales (such as different seasons or months), but also on

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771218); 广东省科技计划项目资助(2010B020315016, 2007B020500002-7, 2004B20701002)

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2011-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hgq@gdas.ac.cn

small temporal scales (such as different days , hours and minutes) . The main influencing factors of the eco-environment effects of the urban green space were summed up as following: the sun radiation quantity , green space size , the shape of green space (the length and width ratio , height , boundary curvature degree , perimeter area ratio , etc.) , the green space landscape structure , the internal composition of green space , vegetation indexes (Normalized difference vegetation index , Leaf area index , Vegetation fraction , Thermal vegetation index , etc) , biomass and some other ecological environment factors. Seen from the study methods , most researches about the eco-environment effects of urban green space at home or abroad mainly used two methods. One was based on the observation data. The other was the quantitative remote sensing technique , by which we could retrieve the land surface parameters simultaneously. Currently , most of the researches were based on traditional field observation method. That was because that the quantitative remote sensing technology was limited to a few parameters. In developed countries , the thermal infrared (TIR) remote sensing techniques had been used over urban areas and applied in urban climate and heat environmental studies for more than 30 years , mainly for analyzing land surface temperature (LST) distribution , difference and their relationship with urban development and surface energy fluxes. Recently , the rapidly expanding urban areas of the world aroused an environmental challenge for the 21st century that required both new analytic approaches and new data sources. Thus , remote sensing technology could provide a new study method for researchers in developing countries. With the development of the quantitative remote sensing technology , the remote sensing technology is sure to play a more and more important role in future micro-scale eco-environmental effect studies. Based on differences of existing research methods and contents , the study summarized and systematically evaluated the researches on 6 eco-environmental effects of urban green spaces. The current study difficulties , deficiencies and key directions were indicated for references to future allied researches.

Key Words: Urban green space (UGS); eco-environmental effect; lowering land surface temperature; increasing air humidity; carbon fixation and oxygen release; noise reduction; antipollution; protect biodiversity

城市是人口、政治、经济、文化、宗教等高度密集的载体,是人类活动与自然环境高度复合的独特生态系统。城市生态系统具有开放性、依赖性、脆弱性等特点,极易受到人类活动的干扰和破坏,引起城市生态系统的失衡,导致城市“生态环境危机”的出现^[1]。近年来,快速的城市化进程使得大量的人造建筑取代了自然地表,极大的改变了城市的生态环境,影响人类的身体健康和生活环境^[2-5]。绿地是植被生长、占据、覆盖的地表和空间^[6]。城市绿地是指用以栽植树木花草、布置配套设施,并由绿色植物所覆盖,且赋以一定功能与用途的场地。城市绿地可以通过植物的蒸腾、蒸散、吸收、吸附、反射等功能,降低温度,增加湿度,固碳释氧,抗污染(吸收粉尘、 Cl_2 、 SO_2 、 CO 等),降低噪音,保护生物多样性等。随着生态城市概念的提出、建设和发展,人们日益注意到城市绿地的生态意义(保护生物多样性)和环境价值(降温增湿、固碳释氧、抗污染、降噪)。目前研究城市绿地的生态环境效应已经成为景观生态学、城市园林生态学以及环境科学的热点。

国内外已有大量的学者进行了这方面的研究,研究范围较为广泛,内容颇有深度。国外学者的研究主要针对城市绿地的降温效应、固碳释氧、降低噪声、生物多样性效应等方面,关于绿地抗污染效应的研究非常少。国内学者蔺银鼎、李建龙、张琪如、李延明等对城市绿地的降温增湿、固碳释氧、降低噪声、抗污染、生物多样性效应等几方面都进行了比较详细的研究,成果显著。从研究方法上看,绝大部分研究都是基于传统实地观测方法进行的,一般是使用环境参数测量仪(如温湿度测量仪、 O_2 、 CO_2 、 SO_2 、 Cl_2 测量仪、噪声测量仪等),对多个采样点进行同步采样,进而研究绿地特征参数与绿地生态环境效应的关系,揭示不同采样点绿地类型的生态环境效应的差异。由于遥感技术在同一时间获取较大范围地表参数比传统的实地采样具有先天的优势,且近年来遥感反演地表参数的技术已经相对成熟^[7],为研究较大范围近地表参数分布规律提供了有利的技术支持,因此,定量遥感技术逐渐成为研究城市绿地生态环境效应的另一种新工具。该文总结了国内外现有城市绿地生态环境效应的研究,分析目前研究的重点和难点,为以后进一步研究提供参考依据。

1 降温效应

20 世纪 50 年代以来,全球气候逐渐变暖,城市温度持续增长,较半个世纪前增长了大约 0.5—5.5 °C^[8-13]。国外关于城市绿地降温的研究较早,早在 1971 年 Federer^[14]发现,城市植被可以通过光合作用、蒸腾作用以及蒸散作用降低温度、增加湿度,能有效的缓解城市“热岛效应”。Bernatzky^[15]研究表明,一块山毛榉木林能够蒸发掉其受辐射能量的 83.8%,一小块城市绿地的降温效果可以达到 3—3.5 °C,可见,蒸发是绿地系统降温的主要原因之一。Jauregui^[16]分别在干燥季节(4 月份)和潮湿季节(7 月份)对墨西哥的 Chapultepec 公园进行了研究,发现城市绿地的降温温差在干燥季节达到 4 °C,而在潮湿季节只有 1 °C,2 个月份比周边环境温度平均降低约 2—3 °C,可见,空气湿度也是影响绿地降温程度的因素之一。Taha 等^[17]考虑到白天和黑夜对城市绿地降温效应的影响,以及绿地内部和外部城市绿地降温效果的不同,对美国加利福尼亚州的城市绿地进行研究,发现,在绿地边缘内 5 m 范围内,白天温度比周边环境低 4.5 °C 左右,而夜间比周边环境仅低 1 °C;在绿地内部深处,白天温度比周边温度低约 6 °C 左右,夜间低约 3 °C。Ca^[18]等对日本东京城区某公园草地在中午时刻的降温效应进行了研究,结果显示比周边外围 1.2 m 处温度低约 2 °C,比闹市街区低达 15—19 °C,研究还发现 0.6 km²的公园绿地可降温 1.5 °C,绿地的降温效果和绿地的面积有着一定关系。Kawashima^[19]则对日本东京地区城区和市郊绿地进行了对比研究,结果显示,城区浓密植被覆盖绿地的降温效果要好于市郊浓密植被覆盖的绿地,而市郊稀疏植被覆盖绿地的降温效果要好于城区稀疏植被覆盖的绿地。国内学者蔺银鼎^[20]、李建龙^[21]、张琪如^[22]、李延明^[23]、史欣^[24]、杨志峰^[25]、赵深^[26]、刘新^[1]、冯义龙^[27]等分别对太原市、南京市、台北市、北京市、广州市、长沙市、合肥市、重庆市等绿地降温效应进行了类似的研究,在降温温差方面得到了比较相似的结果。基于以上研究发现,城市绿地的降温效应不仅在城区与市郊的大尺度空间上存在差异,而且在小尺度空间上(不同下垫面)也存在显著差异;不仅在大尺度时间(季节、月份)上存在差异,而且在小尺度时间(日、时、刻)上也存在较大差异。

部分学者对不同时间、不同下垫面、不同气候条件下城市绿地的降温效应进行了深入的研究,并分析了降温效应与相关影响因子之间的关系。国外学者主要注重研究不同季节、气候条件下的城市绿地降温效应的差异。Hamada^[28]等对日本中部名古屋的城区绿地降温季节性变化进行了研究,结果表明,夏季城区绿地的降温效果比冬季城区绿地的降温明显,城区绿地与周围环境的最大温差发生在 7 月份,达到 1.9 °C 左右,最小温差发生在 3 月份,为 -0.3 °C,在每天 16:00—19:00 时间段以及晚上,降温效应与植被覆盖率有着更为明显的相关性。Alexandri^[29]等研究了不同气候条件下城市绿地降温效果的差异,发现干燥、高温的天气下城区绿地降温效果比较明显,潮湿低温的天气下绿地降温效果不明显,即太阳辐射和大气湿度是城区绿地降温的重要影响因素;绿地的几何形状、绿化量对绿地的降温效果也有很大影响,树木比较高大密集、绿化量比较大的绿地,其降温效果要明显于松散、绿化量小的绿地,而风速对于城区绿地的降温影响不明显。Chen 和 Wong^[30-31]研究发现叶面积指数(Leaf area index, LAI)、绿地面积和绿地降温效应有着显著的正相关关系,叶面积指数越大、绿地面积越大,其降温效果越好。Shashua-Bar^[32]、Whitford^[33]等研究认为,树木的几何形状、特征、阴影面积、绿地比例等也对城区绿地的降温效果产生较大的影响。国内学者则比较注重研究不同下垫面下城市绿地的降温效应差异。蔺银鼎、武小钢、郝兴宇、王娟、梁娟等^[20, 34-42]对太原市林地(杨树林)、复合绿地(或灌木林)、草地等 3 种植被类型的降温效应进行了十分详细的研究,结果表明,3 种绿地结构在降温方面的优劣程度顺序依次为林地、复合绿地(或灌木林)、草地;植被叶片的蒸腾作用是绿地产生降温等生态效应的机理原因,垂直结构、绿地面积、绿地绿量、形状指数等是影响绿地降温效应的主要因素。蔺银鼎、梁娟等^[20, 40]还发现生态场理论可以较好的描述城市不同空间结构绿地的生态效应及其差异,绿地面积、林分和生长量等绿地空间结构因子对绿地的生态场特征都有不同程度的影响。李建龙等^[21, 43]对比了南京市裸地、草地、水体、树荫的温度差异,发现空气温度在 4 种下垫面情况下,裸地>草地>水面>树荫,证明林荫对城区的降温效果最好,水体次之,草地最差。李延明等^[44-45]等国内许多其他学者也纷纷进行了类似的研究,得到了类似的结论^[1, 6, 24-27, 46-55]。基于以上研究结论,作者认为,不同时间、不同季节的差异对城区绿地降温效应的影响,可以

进一步总结为太阳辐照量(地表温度)、空气湿度等因素的差异对绿地降温效应的影响;不同下垫面、树木形状、绿化率、绿化量、垂直结构等对城区绿地降温效应的影响,可以归纳为绿地面积、绿地形状(长宽比、高度、边界曲度、周长面积比)、叶面积指数、生物量等绿地因子对绿地降温效应的影响。因此,可以认为,太阳辐照量、空气湿度、绿地面积、绿地形状、叶面积指数、生物量等是影响城区绿地降温效应的主要因素。

国内外学者对城区绿地的降温范围与相关影响因子也进行了类似的研究。Jauregui^[16]等早在1990年对墨西哥 Chapultepec 公园进行了研究,发现该公园对周边环境的降温效应可以延伸到边界外2 km,差不多等于该公园的宽度。Shashua-Bar^[56]等研究证明,宽度为60 m的城区绿地其降温影响范围可达到100 m左右。张琪如等^[22]对台北市61个公园进行了实地观测,发现面积较大的公园的降温效果比小面积的公园要明显,公园内部气温与周边采样点气温的温差与公园面积大小呈现非线性关系,影响范围接近于一个公园的宽度。Hamada等^[28]研究发现夜间公园的降温效应影响范围可以达到200 m,10月份起降温范围可以达到300 m左右,公园边界外500 m,公园的降温效应几乎消失殆尽。蔺银鼎等^[40]对小片区杨树林、灌木林和草坪的降温范围进行了研究,发现在14:00—15:30时间段,杨树林、灌木林和草坪的水平影响范围分别为14、12 m和8 m,垂直影响范围分别为7.5、3.5 m和2.5 m,可见绿地高度也是影响其降温范围的因素之一。总结可以发现,和绿地降温温差相似,太阳辐射量、空气湿度、绿地面积、绿地高度、生物量等,也是影响绿地降温范围的主要因素。目前大部分学者对于绿地降温距离的研究尚处于初级阶段,得出的结论仅仅是适应于单个研究区域,差异较大,绿地降温范围与相关影响因子的机理问题尚待进一步研究。

近年来,随着 Quickbird、Worldview 等高分辨率遥感影像技术的发展以及反演方法的不断成熟,定量遥感为研究中尺度、小范围地表温度分布规律提供了更加准确的遥感技术支持,基于定量遥感技术研究公园降温效应的研究将会越来越多。大量研究表明^[57-59],植被指数(归一化植被指数 NDVI, Normalized Differential Vegetation Index; 叶面积指数 LAI, Leaf Area Index; 植被覆盖度 VF, Vegetation Fraction; 热红外植被指数 TVX, Thermal-Vegetation Index)能有效的表征植被覆盖浓密程度,探索植被指数和近地表气温之间的关系是遥感研究公园降温效应的开始。Simon^[60]、Jeffrey^[61]、Goward^[62]、Weng^[63]和 Price^[64]等研究表明,近地表气温和 NDVI 指数、LAI、生物量、VF、TVX 呈明显负相关关系,浓密绿地的辐射地表温度比稀疏绿地低,稀疏绿地区辐射地表温度变化较大,浓密植被区域辐射地表温度变化较小,可见越是浓密植被覆盖的地区,其降温效果越稳定,而稀疏植被区域其降温效果受外界影响较大。Michael等^[65]使用 AVHRR 卫星遥感数据研究发现,绿地周边温度的变化与植被覆盖密度和时间有着很大的相关性,且表现出一定的滞后性。Cao等^[66]基于 ASTER 和 IKONOS 遥感数据对日本名古屋92个公园进行研究,结果表明城区绿地的降温效果与公园面积和季节有很大的关系,公园面积大小与公园降温效应存在着非线性正相关关系,绿地的降温强度主要取决于林地、灌木林以及绿地的形状。Cao等^[67]还基于公园植被形状指数(Park Vegetation and Shape Index, PVSII)研究发现,PVSII和公园的降温效应存在着显著的正线性相关关系,在春季 R^2 达到0.81,夏季达到0.78,秋季达到0.57,平方根误差分别为0.98、0.94、0.71℃。Imhoff等^[68]使用 Landsat TM 数据和 MODIS 影像,基于 NDVI 指数和 LST 之间的关系,对美国38个城区进行了研究,结果显示,夏季阔叶林和混交林比裸地平均低8℃左右,一般情况下,有植被覆盖地区比无植被覆盖地区在夏季低4.3℃,在冬季低3.0℃左右。Cheng等^[69]使用 SPOT 影像和 NOAA AVHRR 热红外影像研究发现,绿地内部水域附近的气温最低,比建筑区温度低3—4℃,其次是城区植被,比城市建筑区大约低0.8—2℃。

国内部分学者也开始使用定量遥感技术研究公园降温效应的研究。冯海霞^[70]、刘艳红^[71]、程好好^[72]等分别使用 TM 遥感影像研究了城区绿地的降温效应,结果显示,不同类型的绿地降温效果不同,森林对温度的调节作用明显大于其他植被类型,自然绿地的降温效果要明显好于人工绿地,同类型绿地在不同的季节降温作用也有明显差异,城区绿地的景观破碎化程度越严重、景观优势度越低和生物多样性越强,其降温效应越明显,城区绿地的结构、植被类型、景观格局、植被覆盖度、群落层片结构和生物量是影响绿地降温效应的显著因素。李延明等^[22]基于1987年至2001年北京城13 a的遥感卫星影像数据研究发现,绿化覆盖率与热岛强度

呈现显著的负相关关系,当绿化覆盖率达到 30% 时,热岛强度出现比较明显的减弱;绿化覆盖率大于 50% ,对热岛的缓解现象极其明显,每公顷绿地平均每天从周围环境中吸收 8 MJ 的热量,相当于 890 台功率为 1000 W 空调的作用。应天玉等^[73]研究表明,当绿地面积小于 5 hm² 时,地表辐射温度主要受绿地覆盖率的影响,基本上不受绿地面积大小的影响;当绿地面积大于 5 hm² 时,地表辐射温度主要受绿地面积与绿地覆盖率的共同影响。贾刘强和邱建^[74] 基于 Landsat ETM+ 遥感数据研究了城区绿地的面积、周长和形状指数等与绿地降温范围和降温程度之间的关系,发现,绿地斑块对周边环境的降温范围及降温温差随着绿地面积、周长和形状指数的增大而增大,当绿地面积达到 1.5—1.68 hm² 时,其对周边环境的降温范围和降温程度随绿地斑块面积增大的速度迅速减小。苏泳娴等^[2] 基于 TM 遥感影像数据研究了广州市城区 17 个公园绿地对周边环境的降温效应,结果发现,公园周边与公园边界点的温差随着远离公园边界点距离的增加而增大,增长曲线是一条过原点的上升的三次多项式(R^2 均 0.84);公园绿地面积、水体面积以及长宽比等因子共同影响着公园对周边环境的降温效应:绿化率较高(>50%)、长宽比接近 1 的公园,平均降温影响范围和绿地面积的关系可以用一条上升的对数曲线拟合两者的关系;当绿地面积小于 4246.1 m²,公园的降温影响范围为 0 m,当公园绿地面积达到 540000 m²,公园的降温范围将不再随着公园绿地面积的增加而增加;绿化率较高(>50%)、且公园长宽比 ≥ 2 的公园,平均降温影响范围与公园绿地面积没有显著关系,且相比同等面积、长宽比较小的公园,具有较好的降温效果;水体面积比例较高的公园,降温效果一般高于水体面积比例较小的公园。

可见,基于定量遥感技术的城市绿地降温效应研究,研究结果是准确的、可靠的,而且遥感影像在同一时间内能够获取较大范围的地表温度数据,能够减少测量时间差异带来的误差,节省测量时间和人力资源。

2 增湿效应

国外学者 Bernatzky^[15] 早在 1985 年研究发现,城区绿地可以增加 5%—10% 的相对空气湿度。Huang 等^[75] 以及 Shashua-Bar 等^[32] 研究了不同地表类型空气湿度的差异,发现植被地表覆盖区空气湿度明显高于非植被覆盖地区。Sevgi^[76] 和 Suleyman 等^[77] 对 Erzurum 市城区和市郊的绿地进行了为期 10 个月的研究,结果显示干旱城区的相对湿度比城区绿地的相对湿度小 3.2%,比郊区绿地的相对湿度小 3.4%,对比表明,城区绿地的增湿效果较郊区绿地而言较差(小 0.2%)。李建龙等^[21] 对南宁市林荫、林隙、林缘、近旁草地等 4 种下垫面类型的增湿效应进行研究,发现湿度的分布规律呈现林荫、林隙、林缘和近旁草地依次降低的趋势,说明林荫的增湿保湿效果最好,草地最差。刘娇妹^[25] 等以不同覆盖率的乔-灌-草、乔-草复合型结构型绿地作为研究对象,以草坪作为对照,从水平和立体空间两个角度研究了绿地结构以及绿地覆盖率对绿地增湿效应的影响。结果表明,当覆盖率达到或高于 60% 时,复合型绿地才具有明显的增湿效果;乔-灌-草复合型绿地的增湿效应好于草坪,且其覆盖度越高,增湿空间越大,增湿效果越好。祝宁等^[78] 则将乔-灌-草型绿地与灌-草型绿地进行了对比研究,发现由于乔木的覆盖度较大,乔-灌-草型结构绿地的增湿效应大于灌-草型绿地,且两种复合型绿地对周围环境的增湿效应在水平方向上近似一个生态效应场^[6,79]。吴菲等^[4]、郑芷青等^[80]、马秀梅^[6]、王艳霞^[51]、唐罗忠^[81]、刘新^[1] 等人也得出了相同的研究结论。

部分学者对绿地增湿效应的原因进行了深入的研究。Sevgi^[82] 和 Suleyman 等^[83] 研究发现,绿地的增湿效应主要是源于植被冠层的作用。Insu 等^[84] 选择朝鲜城区特殊的鸟类绿地生境为研究对象,发现该绿地内部的相对空气湿度比绿地外部增加了 5%,绝对湿度增加了 0.2—1.5 g/cm²,风向和风速对于绿地增湿效应有着较大的影响。我国学者蔺银鼎等^[20,35-37,39-40,42] 对太原市城区林地(杨树林)、复合绿地(或灌木林)、草地等 3 种植被类型的增湿效应进行了十分详细的研究,结果表明,绿地垂直结构和绿地面积等因子对绿地边界增湿效应都有着不同程度的影响;和降温效应一样,在水平方向上,绿地增湿效应与绿地面积、绿量显著正相关,与绿地周长面积比值显著负相关;在垂直方向上,绿地增湿效应与绿量显著正相关;但是绿地的增湿效应与叶面积指数相关性不显著。蔺银鼎还认为,植物的叶面蒸腾也是绿地产生增湿效应的主要原因,绿地面积、林分和生长量等绿地空间结构因子都不同程度地影响着绿地的增湿生态场特征,利用生态场理论也能更好地描述城市不同空间结构绿地的增湿生态效应及其差异。赵深等^[26] 以长沙市城区绿地为研究对象,研究不同生长

发育植物、树冠郁闭度、植物覆盖率与城市绿地增湿效应的关系,结果发现,长势好的植物群落其增湿效应相对较好,郁闭度和绿地面积与绿地增湿效应呈显著正相关关系。

关于城市绿地增湿效应的研究,国外学者的研究工作主要集中在绿地内部结构与外部结构空气湿度的差异上,对比而言,国内的研究相对较深,范围也较广泛,不仅研究了不同单一下垫面情况下增湿效果的差异,也对比研究了复合型绿地的增湿效应,并初步分析了绿地增湿效应的相关影响因素:林地的增湿效应最好,灌木林次之,草地最差,复合林地比单一植被增湿效果较好;太阳辐射量、绿地面积、绿地形状、生物量以及绿地垂直结构等绿地特征参数是影响绿地增湿效应的主要因素。

3 固碳释氧效应

研究表明,城市绿地可以通过3种方式进行固碳释氧。第一种方式是通过植物的光合作用和生长机能来吸收和固定 CO_2 。McPherson^[85]对美国萨克拉门托市的城市绿地研究,发现绿地通过光合作用每年平均可固定 $1.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右的 CO_2 。Zhao等^[86]选择中国杭州市区绿地作为研究对象,结果显示绿地年平均吸收 CO_2 为 $1.66 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,可见城市绿地对 CO_2 的年平均吸收量,会因地因时产生稍微的变化。城市绿地第二种固碳释氧方式是通过树荫和蒸发作用,减少化石燃料的 CO_2 排放^[85]。第三种方式就是植被和土壤对 CO_2 的直接吸收作用^[87]。Nowak和Crane^[88]以及Pataki等^[89]对美国10个城市的绿地进行了研究,发现城市绿地可以通过增加绿荫改变温度和热量,进而促进土壤吸收 CO_2 ,每年平均吸收约 $2.9 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。Nowak^[90]等还发现城市绿地的组成和结构也是影响其固碳释氧效果的重要因素,而城区绿地的组成和结构受人为因素的决定性很大,因此,可以认为,城区绿地对 CO_2 的吸收效应还受到人类活动的影响。Escobedo^[91]等对比了不同城市环境和城市化类型下城市绿地的固碳释氧效应,发现城市环境和城市化类型也在一定程度上影响着绿地的固碳释氧效应。

我国学者关于城市绿地固碳释氧的研究比较细致,总结起来大概可以分为3类。第一类是对比分析不同绿地类型其固碳释氧效应的差异。李新宇等^[92]分别对森林、草地、农田等3种不同绿地类型的固碳能力进行了定量研究和对比分析,结果显示,约有50%的陆地碳汇贮存在森林生态系统中,草地碳贮量约占25%,农田固碳释氧量仅次于两者。李辉等^[93]比较分析了乔灌草型、灌草型和草坪型3种不同绿地结构类型对环境的 CO_2 调节作用,结果显示,乔灌草型绿地的固碳释氧能力要优于灌草型和草坪型。李敏^[49]研究发现,乔木林吸收 CO_2 的能力最强,其他绿地类型固碳释氧能力顺序依次为:乔灌林、灌木林、乔草林。赵明等^[94]对比研究了落叶灌木、落叶乔木、常绿乔木、常绿灌木4种林地的固碳释氧能力,结果表明,四种林地固碳释氧能力总体趋势为落叶灌木、落叶乔木、常绿乔木、常绿灌木依次递减。第二类是对比分析不同树种固碳释氧效应差异的研究。杨士弘^[95]选取广州市城区8个常见绿化树种测定其固碳释氧能力,从大到小顺序排列为木棉、白兰、石栗、大叶榕、细叶榕、阴香、红花羊蹄甲、红花夹竹桃。可见,树干越高大,叶片层次越多,固碳释氧能力就越强。孙世群等^[96]对杉木林、马尾松林、杨树林3种乔木林进行研究,得出3种乔木林的固碳释氧能力依次降低,且乔木林中,针叶林的固碳释氧能力较好,阔叶林次之,针阔混交林最差。刘海荣等^[97]对5种灌木林的单位叶面积平均固碳释氧能力进行了定量比较,排序为京山梅花、鸡树条荚蒾、风箱果、三裂绣线菊、东北山梅花等依次减小。第三类是进行城市绿地固碳释氧的生态效益研究。陈莉^[98]基于深圳市1990、1995、2000、2005年4a的遥感影像,使用CITYGREEN模型对其城市绿地的固碳释氧价值进行了评估,得出4a的绿地固碳释氧价值依次为446916万元、454994万元、447135万元、407771万元,可见城市绿地的固碳释氧价值非常高。部分学者也对不同季节以及不同年龄段绿地固碳释氧效应的差异进行了研究,发现:夏季>秋季>春季^[99];幼龄林>中龄林>近成熟林>成熟林>过成熟林^[96]。韩焕金^[100]、王丽勉^[101]、赵萱^[102]等学者也进行了类似的研究。

综上所述,国外学者比较注重城市绿地固碳释氧机理的研究,国内学者则偏重于不同绿地类型固碳释氧能力的差异研究,若能综合国内外学者各自的优点,对不同绿地类型固碳释氧能力差异进行机理分析和价值估算,将会是城区绿地固碳释氧效应研究的一个新突破点。

4 降噪效应

根据美国住房和城市发展部 1973 年调查报告^[103] 城市绿地的降噪作用差异很大,不同树种、不同树高、不同叶片浓度的绿地,降噪作用均不同。Huddart^[104] 则研究认为绿地作为隔音廊道,可降低噪声 5—10 dB 不等。Bernatzky^[15] 1982 年研究发现针叶林和具有较大叶片的阔叶林,最大可降低 12 dB 的噪声。Broban^[105] 研究结果显示,为了达到 10 dB 的降噪效果,绿地结构必须十分浓密,而且宽度至少要达到 100 m。赵明^[94]、黄慧^[106]、张明丽^[107] 和施燕娥^[108] 等对比分析了不同绿地组合类型降噪效果的差异,发现“乔木+灌木+草坪”等绿地生物多样性丰富、林下层次多的紧密型结构型城市绿地,其降噪效果要优于林下植被稀疏的绿地结构。郑思俊等^[109] 对噪声的频率进行了研究,认为绿地树枝和叶片对于 31.5—100 Hz 的低频段噪音降噪效果不明显,对于 125—600 Hz 降噪效果总体明显提高,对于大于 600 Hz、尤其是大于 1000 Hz 的噪音具有显著的隔音效果,可达到 4—6 dB。张周强^[110]、吴志萍^[111]、陈秀龙^[112]、王娟^[113] 等进行了类似的研究。

部分学者对绿地降噪原因进行了深入的探讨。Robinette^[114] 多项研究结果和美国运输部(USDOT) 2001 年调查报告^[115] 均显示,绿地结构(浓密程度)和高度是绿地降噪的重要影响因素:当绿地面密度达到 20 kg/m² 时,可降低噪音 5dB 左右,在此基础上绿地高度每增加 1 m,将增加 1.5dB 的降噪效果;一般情况下,自然界中的单通道绿地降噪廊道降噪上限为 20dB 左右,双通道绿地降噪廊道降噪上限可达到 25dB 左右;降噪绿地廊道的长度一般要大于或者等于其远离噪声源距离的 8 倍左右。张庆费^[116] 对上海 30 m 宽的 19 种绿地群落降噪程度和 8 个结构因子进行了分析,结果表明,不同绿地结果的降噪程度在 3.8dB 到 13.2dB 之间不等,叶面积指数、绿地平均枝下高、绿地平均高度、盖度和平均冠幅等是影响绿地降噪效果的重要影响因素,结构因子对降噪效果的累积贡献率达 65.47%。李寒娥等^[117] 研究结果显示,绿地很大程度上是通过噪声在树枝和叶片之间来回反射实现降噪的,小部分噪声也可通过叶片气孔的吸收被消除。

可见,城市绿地的降噪效果一般在 5—15dB 之间,绿地植被组合类型、结构因子、高度、紧密度、宽度、噪音频率等是决定城市绿地降噪程度的主要影响因子。虽然许多研究显示,城市绿地对于环境降噪具有重要意义,但是 Watts 等^[118] 研究表明,除非城区绿地的浓密度和宽度达到一定的程度,否则其降噪效果并不明显,且一般情况下,绿地的降噪程度与人工建筑相比效果较差。

5 抗污染效应

关于城区绿地抗污染效应的研究主要集中在降尘和吸收有毒性气体两方面。

早在 1970 年 Hader^[119] 调查显示,城区绿地内部的尘埃颗粒物明显低于外部区域,且绿地下风面的尘埃颗粒物明显小于绿地上风面的尘埃颗粒浓度。Bernatzky^[15] 1982 年研究发现公园绿地可以降低空气中 80% 的尘埃颗粒物,主干道两边的绿化带降尘效果可以达到 70%,在冬季植被落叶之后,城区绿地的降尘效果依然可达到 60%。Givoni^[103] 发现城区绿地的降尘方式有两种,一种是通过植被枝叶直接吸收空气中的尘埃颗粒,第二种方式是通过绿地之间空地的空气流通降尘;通过对比分析发现,绿地的降尘效果与单位面积上叶片的浓密度有关,总体趋势呈现树林、灌木林、草地降尘效果逐渐减小的趋势。我国学者柴一新等^[120] 使用电镜发现,叶片表皮结构可以影响植被的降尘效果,具有沟状组织、密集纤毛的树种降尘能力强,叶片表皮具有瘤状或疣状突起的树种滞尘能力相对较差。柴一新^[120]、方颖^[121]、栗志峰^[122]、纪惠芳^[123]、刘霞^[124]、李延明^[44] 等分别对哈尔滨市、南京市、新疆石河子市、保定市、青岛市、北京市城区不同植被类型的降尘效果进行了对比研究,发现不同树种、不同地点、不同季节,绿地的降尘效果也各不相同。不同树种降尘能力的差异基本上呈现乔木林>灌木林>草地的趋势,其中常绿阔叶林降尘能力大于落叶阔叶林,但方颖^[121] 则研究认识灌木林降尘作用最大,乔木林次之,草地最差。研究结果的差异,可能是由于研究者采样高度的不同或者研究区域空气尘埃悬浮物大小、分布高度的不同造成的;同一树种不同地点降尘能力的差异,则主要是由于树木所在地理位置空气尘埃颗粒物含量的差异造成的;大部分绿化树种滞尘量的季节性差异呈现冬季最高,夏季最低,春秋两季稍高,主要是受空气中悬浮颗粒物含量季节变化的规律影响。

学者^[125-133] 对于城市绿地吸收有毒性气体的研究主要集中在二氧化硫(SO₂)、氟化物(HF)、氯气(Cl₂)等

3 种污染性气体上。研究认为^[131],各种景观格局下,城市绿地斑块面积越大、破碎度指数越低,其吸收有毒性气体的能力越大。张清敏等^[125]研究发现 1 hm²的森林每年可吸收 74 tSO₂。管东生^[126]、罗红艳^[127]等则发现树木吸收、积累 SO₂的能力从大到小依次为:乔木林、灌木林、针叶林,城区乔木硫储量占城区绿地总硫储量的 85%,乔木各器官硫储量大小依次为树干材、树叶、树根、树枝、树干皮。李雷鹏^[128]总结认为植被主要通过两种方式净化 SO₂:一个是通过植被表面的固体污染物吸附 SO₂气体,一个是通过植物体表面吸收 SO₂进入体内转化储存或者排放到体外。张德强等^[129]研究了佛山市区 32 种绿化植物对空气中 SO₂、HF 的吸收作用,发现大部分植被对于空气中 HF 的净化能力远远强于对 SO₂的净化作用。在含 HF 量较大的空气中生长的植物,植被本身含 HF 量可大于本底值(10—30 mg/kg)的数倍至数十倍^[128]。通过叶片气孔吸收是植被净化 HF 的主要方式,植被将 HF 吸入机体后,在细胞中将 HF 与 Ca 合成为 CaF₂在体内积累。植物净化 HF 能力还与叶片形态解剖学特性有关^[130]。研究表明,大麻黄、大叶女贞、樟叶槭、细叶榕、红柳、木槿、合欢、橡树、槐树等都具有较强的净化大气 Cl₂的能力^[128]。由于 Cl₂进入植被体内后,会导致植物细胞液 pH 值降低,破坏叶片叶绿素成分,抑制植物生长,所以,植被吸收、净化 Cl₂是以破坏自我机体为代价的。

由此可见,绿地构成、植被类型、叶片的浓密度、叶片结构等是影响城区绿地降尘作用的主要因素;而影响绿地有毒气体净化能力的主要因素是植被类型、绿地破碎化程度等。

6 生物多样性保护效应

研究表明,城市绿地(尤其是城市公园)是城市景观生物多样性的热点区^[132],城区绿地相对于其他城市土地类型有着较高的生物种群^[133-134]。关于城市绿地生物多样性保护的研究主要包括两个方面:城区绿地动物多样性保护和城区绿地植物多样性保护。

Cornelis 和 Hermý^[135]通过对比 15 个城区公园的动物多样性发现,城区公园分别可包含本地区 50% 的哺乳鸟类、40% 的蝴蝶物种、60% 的两栖动物物种。可见,城区绿地在城市动物多样性保护方面起着不同寻常的作用。MoÈrtberga^[136]等研究发现,绿地斑块面积和斑块形状是影响动物种群的主要影响因素,其中,大叶片阔叶林比例较大的、成熟落叶林比例较大的或者绿地面积较大的城区绿地相对具有较高的动物多样性。Haruka^[137]研究认为,灌木林的比例同样是影响城区绿地动物多样性最重要的因素,灌木林比例越大,动物种群越多。Fahrig^[137]、Sandström^[139]以及 Alexis^[140]等则研究认为,保持城区绿地的自然结构组成和网络互通功能,是保护城区动物多样性最有效的手段。

在美国,城区树种约占全国总树种的 25%^[141]。欧洲学者研究表明,全欧洲的城区绿地比周边地区均具有更高的植物多样性^[142]。我国学者王良桂等^[143]研究发现,城区绿地的植物多样性比周边地区一般较高,但是城区绿地的组成很大一部分都是外来树种。曹立颜等^[144]同样认为引进物种是城区绿地系统的重要组成部分,且主要集中在豆科、禾本科、菊科等少数集中科类上,乔木林的生物多样性水平最高,灌木林次之,草本植物最低。钟惠红等^[145]则发现,不同行政区划城区绿地的植物物种多样性差异很大,且不同功能的城区绿地,其植物多样性的差别也十分显著,一般而言,公共绿地的生物多样性高于其它城区绿地类型。

综上发现,国外学者侧重于城区绿地动物多样性的研究,城区绿地组成、结构、连通性等是影响城区绿地动物多样性的主要影响因素;国内学者则侧重于植物多样性的研究,外来物种成为城区绿地植物多样性最重要的组成类型。总体而言,关于城区绿地生物多样性的研究尚处于初级阶段,部分学者^[146-147]认为,由于人类活动和城市化的影响,城区绿地逐渐成为生物多样性的“死区”。因此,如何进行科学的城市绿地规划和设计将成为城区生物多样性保护的的决定性影响因素。

7 结论

从研究内容上来看,关于城市绿地生态环境效应的研究,主要集中在降温、增湿、固碳释氧、降噪、抗污染、保护生物多样性等 6 个方面。城市绿地的生态环境效应不仅在大尺度空间上(不同经纬度、地区)存在差异,在小尺度空间上(不同下垫面、不同植被种类)也存在显著不同,不仅在大尺度时间(不同季节、月份)上存在迥异,在小尺度时间(不同日、时、刻)上也存在明显差别。除了太阳辐照量之外,影响城区绿地生态效应的绿

地特征因素,主要可以总结为以下几个方面:绿地面积、绿地形状(长宽比、高度、边界曲度、周长面积比等)、绿地景观结构、绿地内部组成、植被指数(*NDVI*、*LAI*、*VF*、*TVX*等)、生物量等景观生态因子。从研究方法上看,目前国内外关于城区绿地的生态环境效应研究主要使用两种方法:基于实测数据的实地采样方法和基于遥感技术的定量遥感反演方法。其中,绝大部分研究都是基于传统实地观测方法进行的,基于定量遥感技术的城区绿地生态环境效应研究主要集中在绿地的降温效应上,主要是由于目前情况下定量遥感反演其他生态环境因子的技术尚不成熟。随着定量遥感技术的发展,在未来中小尺度的城区生态环境效应研究中,定量遥感技术将会扮演着越来越重要的角色。

References:

- [1] Liu X. Studies on Area Climate Effect of Greenbelt System and Landscape Ecology Construction of Urban of Hefei [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2004.
- [2] Su Y X, Huang G Q, Chen X Z, Chen S S. The cooling effect of Guangzhou City parks to surrounding environments. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 4905-4918.
- [3] Li F J, Ma A Q, Ding Y D, Yang J J, Jiao J C, Liu L J. Research on urban heat island effect based on landsat data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(4): 553-558.
- [4] Wu F, Li S H, Liu J M. The effects of greening, none greening square and lawn on temperature, humidity and human comfort. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2964-2971.
- [5] Zhou H F. Discussion in synthetic index of climatic change influence on human health. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(1): 121-126.
- [6] Ma X M, Li J Y. Influences of different green lands on urban microclimate. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2007, 22(2): 210-226.
- [7] Qin Z H, Zhang M H, Arnon K, Pedro B. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM 6 data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.
- [8] Oke T R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen, 1987.
- [9] Givoni B. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [10] Bottyon Z, Unger J. The role of land-use parameters in the development of urban heat island in Szeged, Hungary//Fourth Symposium on the Urban Environment. Norfolk, 2001.
- [11] Santamouris M. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. London: James and James, 2001: 1-120.
- [12] Wienert U, Kuttler W. Statistical analysis of the dependence of urban heat island intensity on latitude//Fourth Symposium on Urban Environment. Norfolk, 2001.
- [13] McPherson E G. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes//Platt R H, Rowntree R A, Muick P C, eds. *The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*. Amherst: The University of Massachusetts Press, 1994: 151-171.
- [14] Federer C A. Effects of trees in modifying urban microclimates//Proceedings of the Symposium on Trees and Forests in an Urbanizing Environment. Co-operative Extension Service, Amherst: University of Massachusetts, 1971.
- [15] Bernatzky A. The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy and Buildings*, 1982, 5(1): 1-10.
- [16] Jauregui E. Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and Buildings*, 1990-1991, 15(3/4): 457-463.
- [17] Taha H, Akbari H, Rosenfeld A. Heat island and oasis effects of vegetative canopies: micro-meteorological field-measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, 44(2): 123-138.
- [18] Ca V T, Asadea T, Abu E M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and Buildings*, 1998, 29(1): 83-92.
- [19] Kawashima S. Effect of vegetation on surface temperature in urban and suburban areas in winter. *Energy and Buildings*, 1990-1991, 15(3/4): 465-469.
- [20] Lin Y D, Han X M, Wu X G, Hao X Y, Wang J, Liang F, Liang J, Wang Z H. Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3339-3346.
- [21] Huang L M, Huang Y Y, Li H, Li J L. Spatiotemporal dynamic analysis of microclimatic factors in different types of urban greening areas during hot weather. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2007, 20(1): 29-34.
- [22] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386-395.
- [23] Li Y M, Guo J, Feng J Y. Urban green space and its effect on urban heat island effect. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2004, 17(1): 1-4.
- [24] Shi X, Wu T G, Xu D P, Liu Y T, Su J, Xiao Y H. Micro-climate in forest park of Maofeng mountains in Guangzhou. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2005, 3(3): 46-48.
- [25] Liu J M, Li S H, Yang Z F. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 1972-1978.
- [26] Zhao S, Liu K W, Bi Y X. Reduction of different green lands on heat island effect in Changsha City. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2007, 19(9): 50-52.
- [27] Feng Y L, Ma Y, Xian X D. Correlation between land surface temperature and sum of basal area in the main urban area of Chongqing. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 34(5): 177-179.
- [28] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*,

- 2010, 9(1): 15-24.
- [29] Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 2008, 43(3): 480-493.
- [30] Wong N H, Yu C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 2005, 29(3): 547-558.
- [31] Yu C, Wong N H. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2): 105-120.
- [32] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, 2004, 39(9): 1087-1099.
- [33] Whitford V, Ennos A R, Handley J F. "City form and natural process"-indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 57(2): 91-103.
- [34] Lin Y D. Study on the ecological effect of urban greens. *Chinese Landscape Architecture*, 2003, 19(11): 36-38.
- [35] Lin Y D, Wu X G, Hao X Y. The response of boundary ecological effect to the structure of urban green space. *Chinese Landscape Architecture*, 2006, 22(9): 73-76.
- [36] Wang J. Analysis on the Effect of Different Structural Urban Green to Comfort Degree. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2005.
- [37] Wang J, Lin Y D, Liu Q L. Role of green land in urban on the reduction of heat island effect. *Grassland and Turf*, 2006, (6): 56-59.
- [38] Hao X Y, Lin Y D, Wu X G, Wang J, Liang F, Liang J. Vertical thermal characteristics analysis between different urban green land. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 685-692.
- [39] Lin Y D, Liang F. Spatial and temporal distribution of microclimate effects of the urban shrub community. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3): 313-317.
- [40] Liang J, Lin Y D. Temporal and spatial patterns of peripheral environment influenced by urban forest. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 379-385.
- [41] Lin Y D, Wu X G, Hao X Y, Wang J, Liang F, Liang J, Wang Z H. Spatial and temporal changing patterns of temperature affected by typical urban plant community. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 952-956.
- [42] Wu X G, Lin Y D, Yan H B, Hao X Y. Correlation between ecological effect and structure characteristics of urban green areas. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1469-1473.
- [43] Huang L M, Li J L, Zhao D H, Zhu J Y. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7-17.
- [44] Li Y M, Xu J, Zhang J H, Gu R Z, Zhu H. The effect of urban green space on urban heat island effect. *Beijing Landscape Architecture*, 2002, (4): 12-16.
- [45] Li Y M, Zhang J H, Gu R Z. Research on the relationship between urban greening and the effect of urban heat island. *Chinese Landscape Architecture*, 2004, 20(1): 72-75.
- [46] Guo W, Shentu Y J, Deng W, Pan X J. Research advances on the effect of the urban green areas to microclimate. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2520-2524.
- [47] Wang X X, Hu Y M, Liu X, Gao F F, Zhu Q J. Microclimatic modification of urban grassland in Beijing. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, 25(3): 23-27.
- [48] Cao Y J, Shen J S. The greening of Xingang garden and its effect on urban heat island effect. *Forestry of China*, 2004, (21): 40-40.
- [49] Li M. Study on Structure and Ecological Function of Urban Green Space System in Harbin. Harbin: Northeast Forestry University, 2002.
- [50] Ni L, Shen S Y, Huang P S. Research on city gardening to reduce the urban heat island effect of Changsha city. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27(2): 36-43.
- [51] Wang Y X, Dong J W, Wang Y Z, Wang N S. Relationship between city green land and urban heat island effect. *Subtropical Plant Science*, 2005, 34(4): 55-59.
- [52] Wu P F, Wang M J, Zhang X X. Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(5): 54-60.
- [53] Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Tarver G Jr, Wang X K, Miao H. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [54] Yang S H. A study on the effect of decreasing temperature and increasing humidity of urban afforestation trees. *Geographical Research*, 1994, 13(4): 74-80.
- [55] Zhou H M, Ding J C, Xu Y M, Huang J X, Yang W Y, Fang Y. The monitoring and evaluation of relation between heat island effect and greenbelt distribution in Shanghai urban area. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2002, 18(2): 83-88.
- [56] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 2000, 31(3): 221-235.
- [57] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [58] Lambin F F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land use and land cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(3): 463-487.
- [59] Sobrino J A, Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 353-366.
- [60] Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, Fensholt R, Eklundh L. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 262-274.
- [61] Wilson J S, Clay M, Martin E, Stuckey D, Vedder-Risch K. Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 303-321.
- [62] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: an exploration with the simplified biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 225-242.

- [63] Weng Q H , Lu D S , Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* , 2004 , 89(4) : 467-483.
- [64] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 1990 , 28(5) : 940-948.
- [65] Cosh M H , Stedinger J R , Ou S C , Liou K N , Brutsaert W. Evolution of the variability of surface temperature and vegetation density in the great plains. *Advances in Water Resources* , 2007 , 30(5) : 1094-1104.
- [66] Cao L Y , Zhang Y , Cai L Y , Yu B , Yuan M L. Study on the urban greenbelt plant diversity in Baoding. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research* , 2009 , 24(1) : 95-99.
- [67] Cao X , Onishi A , Chen J , Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning* , 2010 , 96(4) : 224-231.
- [68] Imhoff M L , Zhang P , Wolfe R E , Bounou L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment* , 2010 , 114(3) : 504-513.
- [69] Cheng K S , Su Y F , Kuo F T , Hung W C , Chiang J L. Assessing the effect of landcover changes on air temperature using remote sensing images — a pilot study in northern Taiwan. *Landscape and Urban Planning* , 2008 , 85(2) : 85-96.
- [70] Feng H X , Zhu A M , He B , Liu H H. Forest regulating temperature study based on remote sensing technology. *Scientia Geographica Sinica* , 2009 , 25(5) : 760-765.
- [71] Liu Y H , Guo J P. The research of NDVI-based urban green space landscape pattern and thermal environment. *Progress in Geography* , 2009 , 28(5) : 798-804.
- [72] Cheng H H , Zeng H , Wang Z S , Jian X. Relationships between the types , pattern characteristics of urban green space and land surface temperature: a case study in Shenzhen special economic zone. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* , 2009 , 45(3) : 194-501.
- [73] Ying T Y , Li M Z , Fan W Y , Zhang X Y. Analysis of urban forests and Heat Island Effect based on GIS. *Journal of Northeast Forest University* , 2010 , 38(8) : 63-67.
- [74] Jia L Q , Qiu J. Study of urban green patch's thermal environment effect with remote sensing: a case study of Chengdu city. *Chinese Landscape Architecture* , 2009 , 25(12) : 97-101.
- [75] Huang H , Ooka R , Kato S. Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer. *Atmospheric Environment* , 2005 , 39(34) : 6362-6375.
- [76] Sevgi Y , Suleyman T , Akif Irmak M , Hasan Y. Determination of climatic differences in three different land uses in the city of Erzurum , Turkey. *Building and Environment* , 2007 , 42: 1604-1612.
- [77] Yilmaz S , Toy S , Irmak M A , Yilmaz H. Determination of bioclimatic comfort in three different land uses in the city of Erzurum , Turkey. *Building and Environment* , 2007 , 42(4) : 1604-1612.
- [78] Zhu N , Li M , Chai Y X. Spatial Analysis of integrated ecological effects of urban greenland. *Journal of Chinese Urban Forestry* , 2004 , 2(1) : 26-28.
- [79] Cai C J , Peng Z H , Wang C. The ecological benefit of urban forest and trees and its value. *World Forestry Research* , 2004 , 17(3) : 17-20.
- [80] Zheng Z Q , Cai Y J , Chen C Y. Comparison research on temperature and humidity effect of different greenbelt in Guangzhou City. *Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition)* , 2006 , 5(1) : 37-41.
- [81] Tang L Z , Li Z Q , Yan C F , Sun C H , Xu X , Xiang H R. Mitigative effects of different vegetations on heat island effect in Nanjing. *Ecology and Environmental Sciences* , 2009 , 18(1) : 23-28.
- [82] Yilmaz S , Toy S , Irmak M A , Yilmaz H. Determination of climatic differences in three different land uses in the city of Erzurum , Turkey. *Building and Environment* , 2007 , 42(4) : 1604-1612.
- [83] Toy S , Yilmaz S , Yilmaz H. Determination of bioclimatic comfort in three different land uses in the city of Erzurum , Turkey. *Building and Environment* , 2007 , 42(3) : 1315-1318.
- [84] Koh I , Kim S , Lee D. Effects of *bibosoo* plantation on wind speed , humidity , and evaporation in a traditional agricultural landscape of Korea: field measurements and modeling. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2010 , 135(4) : 294-303.
- [85] McPherson E G. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* , 1998 , 24(4) : 213-215.
- [86] Zhao M , Escobedo F , Staudhammer C. Spatial patterns of a subtropical , coastal urban forest: implications for land tenure , hurricanes , and invasives. *Urban Forestry and Urban Greening* , 2010 , 9(3) : 205-214.
- [87] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management* , 2002 , 64(2) : 115-126.
- [88] Nowak D J , Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* , 2002 , 116(3) : 381-389.
- [89] Pataki , D E , Alig R J , Fung A S , Golubiewski N E , Kennedy C A , McPherson E G , Nowak D J , Pouyat R V , Lankao P R. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology* , 2006 , 12(11) : 2092-2102.
- [90] Nowak D J , Crane D E , Stevens J C , Ibarra M. Brooklyn's Urban Forest. Gen Tech Rep NE-290. Newtown Square: US Department of Agriculture , Forest Service , Northeastern Research Station , 2002.
- [91] Escobedo F , Varela S , Zhao M , Wagner J E , Zipperer W. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. *Environmental Science and Policy* , 2010 , 13(5) : 362-372.
- [92] Li X Y , Tang H P. Carbon sequestration: manners suitable for carbon trade in China and function of terrestrial vegetation. *Journal of Plant Ecology* , 2006 , 30(2) : 200-209.
- [93] Li H , Zhao W Z , Gu R Z , Li Y M , Chen Z X , Zhang X X. Effects of three different green-lands in plantation structure on the O₂-emitting , CO₂-fixing , heat-absorbing and temperature-decreasing in residential quarters. *Chinese Journal of Environmental Science* , 1999 , 20(6) : 41-44.
- [94] Zhao M , Sun G P , He X D , Meng J S , Qiu Y F , Yang S X. Studying on environmental effect of urban forest along the grand canal in Yangzhou. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)* , 2009 , 27(2) : 167-176.
- [95] Yang S H. Primary study on effect of c-o balance of a forestall tress in cities. *Urban Environment and Urban Ecology* , 1996 , 9(1) : 37-39.

- [96] Sun S Q, Wang S H, Chen Y Q, Zou T. The research on carbon fixation of highwood in Anhui. urban environment and urban ecology. Environmental Science and Management, 2008, 33(7): 144-147.
- [97] Liu H R, Song L, Xian J P. Comparison of carbon fixation and oxygen release capabilities of five shrub species. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(2): 204-207.
- [98] Chen L, Li P W, Li G C, Su D, Yuan X Z. Application of CITYGREEN model in air purification, carbon fixation and oxygen release by greenbelt system of Shenzhen City. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 272-282.
- [99] Lu G Q, Yin Z F, Gu J C, Meng D X, Wu H X, Li Y J. Application of CITYGREEN model in air purification, carbon fixation and oxygen release by greenbelt system of Shenzhen City. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 272-282.
- [100] Han H J. Effect of carbon fixation and oxygen release about urban greening plants. Journal of Northeast Forestry University, 2005, 33(5): 68-70.
- [101] Wang L M, Hu Y H, Qin J, Gao K, Huang J. Carbon fixation and fxygen production of 151 plants in Shanghai. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(3): 399-401.
- [102] 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.
- [103] Givoni B. Impact of planted areas on urban environmental quality: a review. Atmospheric Environment, 1991, 25B(3): 289-299.
- [104] Huddart L. The Use of Vegetation for Traffic Noises Greening. Transport and Road Research Laboratory Research Report, Crowthorne, 1990: 238-238.
- [105] Broban H W. Stadebauliche Grundlagen des Schallschutzes. Deut Bauzeit 5, 1967.
- [106] Huang H, Shu Z. The effects study of traffic noise declining by green lands in Harbin city. Environmental Science and Management, 2009, 34(3): 39-71.
- [107] Zhang M L, Hu Y H, Qin J. Analysis on noise reduction effect of urban plant community. Journal of Plant Resources and Environment, 2006, 15(2): 25-28.
- [108] Shi Y E, Wang Y F, Lu X L. Study of the effect of weakening noise in afforestation of the city. Journal of Bingtuan Education Institute, 2004, 14(1): 40-41.
- [109] Zheng S J, Xia L, Zhang Q F. Study on the noise-reduction effects of urban green spaces. Shanghai Construction Science and Technology, 2006, (4): 33-34.
- [110] Zhang Z Q, Zheng Y, Du Y C, Sun L J. Measurement and analysis of influence of tree belt to traffic noise. Urban Environment and Urban Ecology, 2007, 20(6): 17-19.
- [111] Wu Z P, Wang C. Urban green space and human health. World Forestry Research, 2007, 20(2): 32-37.
- [112] Chen X L, Li X J, Chen Q B. Noise abatement effects of street green area and belts in Haikou. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2007, 13(1): 43-46.
- [113] Wang J, Li Y D. The ecology effects of urban green spaces. Grassland and Turf, 2004, (4): 24-27.
- [114] Robinette G O. Plants, People, and Environmental Auality: A Study of Plants and Their Environmental Functions. Washington DC: US Department of the Interior, 1972.
- [115] USDT. Keeping the noise down — highway traffic noise barriers. Publication No FHWA-EP-01-004. Washington DC: Federal Highway Administration, 2001.
- [116] Zhang Q G, Zheng S J, Xia L, Wu H P, Zhang M L, Li M S. Noise-reduction function and its affecting factors of urban plant communities in Shanghai. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2295-2300.
- [117] Li H E, Wang Z Y, Tan J D, Hu Q C, Kuang J Z, Huang Z X, Dong Z C. Preliminary study of the environmental effect of urban green area system in Foshan. Journal of Foshan University(Natural Science Edition), 2006, 24(2): 58-63.
- [118] Watts G, Chinn L, Godfrey N. The effects of vegetation on the perception of traffic noise. Appl Acoust, 1999, 56(1): 39-56.
- [119] Hader F. The climatic influence of green areas, their properties as air filters and noise abatement agents. Vienna: Climatology and Building Conf, CIB, 1970.
- [120] Cai Y X, Zhu N, Han H J. Dust removal effect of urban tree species in Harbin. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [121] Fang Y, Zhang J C, Wang Y H. Dust fall absorbing capacity of major species of greening trees in Nanjing and its law. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(2): 36-40.
- [122] Su Z F, Liu Y, Peng Q F. Study on dust detention functions of the different greenland. Arid Environmental Monitoring, 2002, 16(3): 162-163.
- [123] Ji G F, Zhang L J, Yan H X, Huang D Z, Su Q Y, Huang Q X, Liu L. Study on dust catching property of major green tree species in Northern China. Journal of Anhui Agricultural Science, 2008, 36(25): 10869-10871.
- [124] Liu X, Li H M, Li X, Wang F B. Study on dust retention effect of the main greening species in Chengyang district of Qingdao. Northern Horticulture, 2008, (4): 167-169.
- [125] Zhang Q M, Hu G C. Review of the soil ecosystem purification of strengthening. Advance in Environmental Science, 1999, 7(1): 18-25.
- [126] Guan D S, Liu Q H, Mo D L. The role of Guangzhou urban vegetation in removing atmospheric sulfur. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1999, 38(2): 109-113.
- [127] Luo H Y, Li J Y, Liu Z. Effect of purifying SO₂ in atmosphere by greening tree species. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(1): 45-50.
- [128] Li L P. Approach on the effect of green plants on improving the quality of environment. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(3): 63-64.
- [129] Zhang D Q, Zhu G W, Yu Q F, Liu S Z, Lu Y D, Hu X C, Xue K N, Kong G H. Decontamination ability of garden plants to absorb sulfur Dioxide and Fluoride. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11(4): 336-340.
- [130] Lu M, Cheng Z W, Li Y J. The absorption ability of different tree species on Chlorine and Fluoride pollutants in the atmosphere. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2005, 20(3): 39-40.

- [131] Shao T Y, Zhou Z X, Wang P C, Tang W P, Liu X Q, Hu X Y. Relationship between urban green land landscape patterns and air pollution in the central district of Yichang city. *Chinese Journal of applied Ecology*, 2004, 15(4): 691-696.
- [132] Fernández-Juricic E, Jokimäki J. A habitat island approach to conserving birds in urban landscapes: case studies from southern and northern Europe. *Biodiversity Conservation*, 2001, 10(12): 2023-2043.
- [133] Emlen J T. An urban bird community in Tucson, Arizona: derivation, structure, regulation. *The Condor*, 1974, 76(2): 184-197.
- [134] Rebele F. Urban ecology and special features of urban ecosystems. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1994, 4(6): 173-187.
- [135] Cornelis J, Hermy M. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(4): 385-401.
- [136] Mörtberg U, Wallentinus H G. Red-listed forest bird species in an urban environment — assessment of green space corridors. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50(4): 251-226.
- [137] Imai H, Nakashizuka T. Environmental factors affecting the composition and diversity of avian community in mid-to late breeding season in urban parks and green spaces. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(3): 183-194.
- [138] Fahrig L. Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold: a synthesis. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 346-353.
- [139] Sandströma U G, Angelstam P, Mikusiński G. Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1-2): 39-53.
- [140] Alexis A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2006, 5(4): 195-201.
- [141] Dwyer J F, Nowak D J, Noble M H, Sisinni S M. Connecting People with Ecosystems in the 21st Century: An Assessment of Our Nation's Urban Forests. General Technical Report, PNW-GTR-490. Portland: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2000: 483-483.
- [142] Araújo M B. The coincidence of people and biodiversity in Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12(1): 5-12.
- [143] Wang L G, Sun S J, Geng Y M. Discussion on the plant-diversity conservation and development strategy of urban green space system — taking Yancheng planning area as an example. *Chinese Landscape Architecture*, 2009, 25(6): 95-99.
- [144] Cao L Y, Zhang Y, Gai L Y, Yu B, Yuan M L. Study on the urban greenbelt plant diversity in Baoding. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2009, 24(1): 95-99.
- [145] Zhong H H, Li H B, Zhou J P, Yu F Y. Study on plant species diversity on green space in Foshan urban district. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 2006, 24(3): 64-68.
- [146] Niemelä J. Ecology and urban planning. *Biodiversity and Conservation*, 1999, 8(1): 119-131.
- [147] Yokohari M, Takeuchi K, Watanabe T, Yokota S. Beyond greenbelts and zoning: a new planning concept for the environment of Asian mega-cities. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 47(3/4): 159-171.

参考文献:

- [1] 刘新. 合肥市城区绿地系统小气候效应及景观生态建设研究. 合肥: 安徽农业大学, 2004.
- [2] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. *生态学报*, 2010, 30(18): 4905-4918.
- [3] 李福建, 马安青, 丁原东, 杨俊杰, 焦俊超, 刘乐军. 基于 Landsat 数据的城市热岛效应研究. *遥感技术与应用*, 2009, 24(4): 553-558.
- [4] 王菲, 李树华, 刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温湿度及人体舒适度. *生态学报*, 2007, 27(7): 2964-2971.
- [5] 周后福. 气候变化对人体健康影响的综合指标探讨. *气候与环境研究*, 1999, 4(1): 121-126.
- [6] 马秀梅, 李吉跃. 不同绿地类型对城市小气候的影响. *河北林果研究*, 2007, 22(2): 210-226.
- [20] 蔺银鼎, 韩学孟, 武小刚, 郝兴宇, 王娟, 梁锋, 梁娟, 王志红. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3339-3346.
- [21] 黄良美, 黄玉源, 黎桦, 李建龙. 城市不同绿地生境小气候的时空变异规律分析. *城市环境与城市生态*, 2007, 20(1): 29-34.
- [23] 李延明, 郭佳, 冯久莹. 城市绿色空间及对城市热岛效应的影响. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(1): 1-4.
- [24] 史欣, 吴统贵, 徐大平, 刘燕堂, 粟娟, 肖以华. 广州帽峰山森林公园的“冷岛”效应分析. *中国城市林业*, 2005, 3(3): 46-48.
- [25] 刘娇妹, 李树华, 杨志峰. 北京公园绿地夏季温湿效应. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1972-1978.
- [26] 赵深, 刘克旺, 毕丽霞. 长沙不同绿地对缓解热岛效应的作用. *江西农业学报*, 2007, 19(9): 50-52.
- [27] 冯义龙, 马跃, 先旭东. 重庆主城核心区地表温度与绿地乔木基干横断面积和相关性研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 34(5): 177-179.
- [34] 蔺银鼎. 城市绿地生态效应研究. *中国园林*, 2003, 19(11): 36-38.
- [35] 蔺银鼎, 武小刚, 郝兴宇. 城市绿地边界温湿度效应对绿地结构的响应. *中国园林*, 2006, 22(9): 73-76.
- [36] 王娟. 城市不同结构的绿地对舒适度的影响分析. 晋中: 山西农业大学, 2005.
- [37] 王娟, 蔺银鼎, 刘清丽. 城市绿地在减弱热岛效应中的作用. *草原与草坪*, 2006, (6): 56-59.
- [38] 郝兴宇, 蔺银鼎, 武小钢, 王娟, 梁峰, 梁娟. 城市不同绿地垂直热力效应比较. *生态学报*, 2007, 27(2): 685-692.
- [39] 蔺银鼎, 梁锋. 城市灌木群落小气候效应的时空分布. *中国农学通报*, 2007, 23(3): 313-317.
- [40] 梁娟, 蔺银鼎. 城市森林对周边小气候时空格局的影响. *中国农学通报*, 2007, 23(7): 379-385.
- [41] 蔺银鼎, 武小钢, 郝兴宇, 王娟, 梁峰, 梁娟, 王志红. 城市典型植物群落温度效应的时空格局. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 952-956.
- [42] 武小钢, 蔺银鼎, 闫海冰, 郝兴宇. 城市绿地降温增湿效应与其结构特征相关性研究. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1469-1473.
- [44] 李延明, 徐佳, 张济和, 古润泽, 朱虹. 城市绿化对北京城市热岛效应的缓解作用. *北京园林*, 2002, (4): 12-16.
- [45] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. *中国园林*, 2004, 20(1): 72-75.
- [46] 郭伟, 申屠雅瑾, 邓巍, 潘星极. 城市绿地对小气候影响的研究进展. *生态环境*, 2008, 17(6): 2520-2524.
- [47] 王修信, 胡玉梅, 刘馨, 高凤飞, 朱启疆. 城市草地的小气候调节作用初步研究. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(3): 23-27.
- [48] 曹跃进, 沈巨生. 新钢园林绿化对缓解热岛效应的作用. *中国林业*, 2004, (21): 40-40.
- [49] 李敏. 城市绿地系统结构与功能的研究——以哈尔滨市为例. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.
- [50] 倪黎, 沈守云, 黄培森. 园林绿化对降低城市热岛效应的作用. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(2): 36-43.

- [51] 王艳霞,董建文,王衍桢,吴南生. 城市绿地与城市热岛效应关系探讨. 亚热带植物科学, 2005, 34(4): 55-59.
- [52] 武鹏飞,王茂军,张学霞. 北京市植被绿度与城市热岛效应关系研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 54-60.
- [53] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,张兆明, Tarver G Jr, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [54] 杨士弘. 城市绿化树木的降温增湿效应研究. 地理研究, 1994, 13(4): 74-80.
- [55] 周红妹,丁金才,徐一鸣,黄家鑫,杨文悦,方岩. 城市热岛效应与绿地分布的关系监测和评估. 上海农业学报, 2002, 18(2): 83-88.
- [70] 冯海霞,朱爱民,何必,刘含海. 基于遥感反演的山东省森林资源调节温度服务的研究. 地理科学, 2009, 25(5): 760-765.
- [71] 刘艳红,郭晋平. 基于植被指数的太原市绿地景观格局及其热环境效应. 地理科学进展, 2009, 28(5): 798-804.
- [72] 程好好,曾辉,汪自书,简霞. 城市绿地类型及格局特征与地表温度的关系——以深圳特区为例. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(3): 194-501.
- [73] 应天玉,李明泽,范文义,张新源. 基于GIS技术的城市森林与热岛效应的分析. 东北林业大学学报, 2010, 38(8): 63-67.
- [74] 贾刘强,邱建. 基于遥感的城市绿地斑块热环境效应研究——以成都市为例. 中国园林, 2009, 25(12): 97-101.
- [78] 祝宁,李敏,柴一新. 城市绿地综合生态效应场. 中国城市林业, 2004, 2(1): 26-28.
- [79] 蔡春菊,彭振华,王成. 城市森林生态效益及其价值研究综述. 世界林业研究, 2004, 17(3): 17-20.
- [80] 郑芷青,蔡莹洁,陈城英. 广州不同园林绿地温湿效应的比较研究. 广州大学学报(自然科学版), 2006, 5(1): 37-41.
- [81] 唐罗忠,李职奇,严春风,孙储华,徐新,相恒让. 不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用. 生态环境学报, 2009, 18(1): 23-28.
- [92] 李新宇,唐海萍. 陆地植被的固碳功能与适用于碳贸易的生物固碳方式. 植物生态学报, 2006, 30(2): 200-209.
- [93] 李辉,赵卫智,古润泽,李延明,陈自新,张新猷. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用. 环境科学, 1999, 20: 41-44.
- [94] 赵明,孙桂平,何小弟,孟家松,仇玉峰,杨水霞. 城市绿地群落环境效应研究——以扬州古运河风光带生态林为例. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(2): 167-176.
- [95] 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.
- [96] 孙世群,王书航,陈月庆,邹婷. 安徽省乔木林固碳能力研究. 环境科学与管理, 2008, 33(7): 144-147.
- [97] 刘海荣,宋力,鲜靖苹. 5种常用灌木固碳释氧能力的比较研究. 安徽农业大学学报, 2009, 36(2): 204-207.
- [98] 陈莉,李佩武,李贵才,苏笛,袁雪竹. 应用 CITYGREEN 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益. 生态学报, 2009, 29(1): 272-282.
- [99] 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.
- [100] 韩焕金. 城市绿化植物的固碳释氧效应. 东北林业大学学报, 2005, 33(5): 68-70.
- [101] 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.
- [102] 赵萱,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.
- [116] 张庆费,郑思俊,夏樯,吴海萍,张明丽,李明胜. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2295-2300.
- [106] 黄慧,舒展. 哈尔滨市绿地对交通噪声衰减效果研究. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 39-71.
- [107] 张明丽,胡永红,秦俊. 城市植物群落的减噪效果分析. 植物资源与环境学报, 2006, 15(2): 25-28.
- [108] 施燕娥,王雅芳,陆旭蕾. 城市绿化降噪初探. 兵团教育学院学报, 2004, 14(1): 40-41.
- [109] 郑思俊,夏樯,张庆费. 城市绿地群落降噪效应研究. 上海建设科技, 2006, (4): 33-34.
- [110] 张周强,郑远,杜豫川,孙立军. 绿化带对道路交通噪声的影响实测与分析. 城市环境与城市生态, 2007, 20(6): 17-19.
- [111] 吴志萍,王成. 城市绿地与人体健康. 世界林业研究, 2007, 20(2): 32-37.
- [112] 陈秀龙,李希娟,陈秋波. 海口市街道绿化类型减噪效应的测定与分析. 华南热带农业大学学报, 2007, 13(1): 43-46.
- [113] 王娟,蔺银鼎. 城市绿地生态效应. 草原与草坪, 2004, (4): 24-27.
- [117] 李寒娥,王志云,谭家得,胡美聪,邝健智,黄志雄,董志成. 佛山城市绿地系统环境效益的研究. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2006, 24(2): 58-63.
- [120] 柴一新,祝宁,韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [121] 方颖,张金池,王玉华. 南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 36-40.
- [122] 栗志峰,刘艳,彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究. 干旱环境监测, 2002, 16(3): 162-163.
- [123] 纪惠芳,张立娟,阎海霞,黄大庄,苏筱雨,黄秋娴,刘丽. 几种我国北方绿化树种滞尘能力的研究. 安徽农业科学, 2008, 36(25): 10869-10871.
- [124] 刘霞,李海梅,李想,王福斌. 青岛市城阳区主要绿化树种滞尘能力研究. 北方园艺, 2008, (4): 167-169.
- [125] 张清敏,胡国臣. 强化土壤生态系统净化机能的研究进展. 环境科学进展, 1999, 7(1): 18-25.
- [126] 管东生,刘秋海,莫大伦. 广州城市建成区绿地对大气二氧化硫的净化作用. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(2): 109-113.
- [127] 罗红艳,李吉跃,刘增. 绿化树种对大气SO₂的净化作用. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 45-50.
- [128] 李雷鹏. 绿色植物在改善环境方面的效应初探. 东北林业大学学报, 2002, 30(3): 63-64.
- [129] 张德强,褚国伟,余清发,刘世忠,陆耀东,胡美聪,薛克娜,孔国辉. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 336-340.
- [130] 鲁敏,程正渭,李英杰. 绿化树种对大气氯、氟污染物的吸滞能力. 山东建筑工程学院学报, 2005, 20(3): 39-40.
- [131] 邵天一,周志翔,王鹏程,唐万鹏,刘学全,胡兴宜. 宜昌城区绿地景观格局与大气污染的关系. 应用生态学报, 2004, 15(4): 691-696.
- [143] 王良桂,孙守家,耿一鸣. 城市绿地内植物多样性保护与发展——以盐城城市规划区为例. 中国园林, 2009, 25(6): 95-99.
- [144] 曹立颜,张宇,盖力岩,于泊,原民龙. 保定市城市绿地植物多样性研究. 河北林果研究, 2009, 24(1): 95-99.
- [145] 钟惠红,李洪斌,周贱平,余凤英. 佛山市区城市绿地植物物种多样性研究. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2006, 24(3): 64-68.