

DOI: 10.5846/stxb201305301239

王晓磊,王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展. 生态学报 2014 34(8): 1910–1921.

Wang X L, Wang C. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter. Acta Ecologica Sinica 2014 34(8): 1910–1921.

城市森林调控空气颗粒物功能研究进展

王晓磊,王 成*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局城市森林研究中心, 国家林业局森林培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 受城市扩张、工业发展、汽车保有量增加的影响, 空气颗粒物目前已成为诸多城市空气的首要污染物。而城市森林作为城市生态建设中最大的唯一具有自净功能的生态系统, 不仅为城市高污染环境下的居民提供了相对洁净的休闲游憩空间, 还对净化空气颗粒物起重要作用。从城市森林调控空气颗粒物的机理、分析方法、植物个体、群落及不同类型城市森林调控空气颗粒物的功能差异及其时空变化规律等方面进行阐述。结果表明: 目前有关物理降尘的研究较多, 涉及化学除尘的研究尚缺; 应用重量法测定植物滞尘量的研究较多, 质量浓度法测定城市森林净化空气颗粒物功能的研究较少。在未来一段时间, 森林植被化学除尘的过程与机理, 城市森林调控空气颗粒物的多方面、系统性研究及相关研究成果的转化与实际应用将会是重要的研究方向。

关键词: 城市森林; 空气颗粒物; 调控功能

Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter

WANG Xiaolei, WANG Cheng

Research Institute of Forestry of CAF, Research Center of Urban Forest of the SFA, Key Laboratory of Forest Silviculture of the SFA, Beijing 100091, China

Abstract: By the impact of urban expansion, industrial development and increased car ownership, air particulate matters have been becoming the primary pollutant in many cities. As the largest and unique ecological system with a self-cleaning function in urban ecological construction, the urban forest not only provides a relatively clean recreation space for residents in the city under the polluted environment, but also plays an important role in purifying the pollution of air particulate matter. In this paper, the regulating function of urban forests was explicated from several aspects including regulation mechanism, analysis method, and functional variation and spatial-temporal variation pattern of different individuals and urban forest types in regulating the air particulate matter. Results indicated that: there have been relative more studies on regulation mechanism involving in physical dustfall while the study on chemical cleaning of dust is lack; Application of the weight method for determining of vegetation dust retention draws more attention while study on the concentration method application for purifying air particulate matter of the environment in urban forest is relatively less. In the near future, the processes and mechanism of chemical dust-removal by forests, and all-around regulating effects of urban forests should be systematically studied, and transformation and practical application of the research findings will be an important direction.

Key Words: Urban forest; air particulate matter; regulatory function

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201304301-05); 国家“十二五”科技支撑计划重大项目(2011BAD38B03)

收稿日期: 2013-05-30; 修订日期: 2014-01-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weh8361@163.com

<http://www.ecologica.cn>

随着城市化进程的快速推进、工业化的迅速发展和汽车保有量的持续增加,空气颗粒物(尤其 $PM_{2.5}$)已成为目前国内外许多城市空气的首要污染物,因其不仅本身是污染物,还是其他有毒有害污染物的载体而备受社会各界广泛关注。自20世纪中期起,美国和欧洲一些国家就对空气颗粒物开展了广泛的研究,我国于20世纪80年代陆续开始,目前研究内容主要集中在来源分析^[1-2]、成分解析^[3-4]、危害评价^[5-7]、变化规律^[8-9]等方面。随着人们保健意识的增强,空气质量得到前所未有的重视,城市森林调控空气颗粒物作用的研究也就得到了较快发展。城市森林作为城市生态建设中最大的唯一具有自净功能的生态系统,不仅为城市污染环境下的居民提供了相对洁净的休闲游憩空间,在净化空气颗粒物方面也发挥着独特的生态功能^[10-12]。因此,本文从城市森林调控空气颗粒物的机理、研究方法、不同城市森林调控空气颗粒物的功能差异、城市森林内空气颗粒物的时空变化四方面总结了城市森林调控空气颗粒物的研究现状,并对今后的研究方向进行了展望,以期在城市森林生态效益研究及城市森林布局优化提供参考。

1 城市森林调控空气颗粒物的机理

城市森林之所以被称为“天然的空气过滤器”,主要源于其能够净化空气中的各类污染物。在大气污染问题比较突出的城市化地区,了解城市森林调控空气颗粒物的内在机制,是科学培育调控 $PM_{2.5}$ 等空气颗粒物污染能力强的城市森林的基础。目前对于城市森林降尘机制机理方面的研究主要表现在物理降尘和化学除尘两个方面。

1.1 城市森林的物理降尘

气流是空气颗粒物的载体,城市森林物理降尘主要是通过改变气流运动速度、方向来降尘,并通过城市森林特殊的叶面结构及复杂的冠层结构来吸附、阻滞粉尘,目前的研究主要包括:

(1) 城市森林的动力阻塞机制

城市森林发挥障碍物的作用,通过改变气流的速度和方向,影响颗粒物的传播距离、传播方向和传播数量。当含尘气流流经树冠时,受其阻碍,林内风速降低,空气中携带的一部分粒径较大的颗粒物搬运能力下降,重力沉降加快,使空气中颗粒物浓度降

低、传播距离缩短^[13-16]。这种阻碍作用对TSP和 PM_{10} 的影响较为显著,对 $PM_{2.5}$ 没有明显影响^[14-16]。

(2) 城市森林的巨大滞尘空间

非生物如城市建筑等表面虽能承载一定数量的粉尘,但与植物滞尘相比,其粗糙程度低,面积单一,降尘量小且很容易被风吹起。而植物叶表面的微结构、单位地面积上巨大的叶面积和复层空间结构为空气颗粒物滞留或停着提供了有力条件和巨大空间,加之植物能扩大叶面积,并更新新叶,因此,非生物的滞尘效果远不能所及。这种滞留或停着作用一定程度上与叶表面积呈正相关关系^[17],并受冠层结构的影响^[18]。滞留或停着的颗粒物极不稳定,在风及小雨的影响下,会重新返回空气中或被雨水淋洗掉^[13]。

(3) 叶面的颗粒附着、粘附力

植物叶片的表面特性和本身的湿润性能够附着、粘附大量空气颗粒物^[12,19]。附着或粘附的空气颗粒物相对稳定,需依靠较大的雨量(一般认为15mm以上)和风力才能冲刷掉^[19-21]。甚至有学者发现深度清洗仍不能彻底清除叶片表面颗粒物^[21],深藏在叶表面密集脊状突起间沟槽内的颗粒物即使15mm的降雨也不易将其冲掉^[22]。

(4) 森林冠层有效减小地表扬尘扰动

在风力和冠层枝叶撞击等外力作用下,落在枝叶表面的颗粒物一部分会快速弹回空气中,地面粉尘也会因风的作用再次进入空气,引起二次扬尘^[23-26]。与无林地或地表裸露状况严重区域相比,布局合理的城市森林不仅通过其茂密的树冠及复层结构有效降低风速,对因风力而重返空气的粉尘起到再次截留的作用,其地表的枯枝落叶、草丛或地被等还能有效避免或减少二次扬尘的发生^[10-11,15]。

1.2 城市森林的化学除尘

城市森林化学除尘主要是与森林植被生长代谢有关的除尘。目前这方面研究尚不深入,但一个不争的事实是:城市森林内空气洁净度高,空气颗粒物相对较少^[27-29]。森林的化学除尘可能包括如下几方面:

(1) 城市森林内空气负离子的中和作用

研究表明,城市森林环境中的空气负离子浓度远高于都市地带^[30-31],通常来说空气颗粒物特别是 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物都是带正电荷的微小粒子,那么森

林中的空气负离子对于这种细颗粒物的清除应该是有帮助的,目前仅有部分学者^[29,32]研究发现空气负离子与空气颗粒物呈负相关关系,但具体机理方面的研究还比较缺乏。

(2) 城市森林内温湿度的影响

植物通过荫蔽和蒸腾作用降低大气温度,增加空气湿度。温度降低能够降低化学反应活动,减少由此产生的二次污染物;湿度增加将增加细尘的重量和黏性,从而减少细颗粒物在空气中悬浮的时间,加快其沉降,这种方式调控空气颗粒物的作用有待于进一步研究。

(3) 城市森林内植物有机挥发物的作用

植物生长发育过程中能分泌出的萜烯类、醚、醛、酮等大量植物有机挥发物,具有杀菌、抑菌作用^[29,33-34],对有效减少空气中粉尘携带有害微生物的几率,减小空气颗粒物对人体的危害具有重要意义,但这些有机挥发物是否具有滞附粉尘的作用还尚待证明。

(4) 城市森林的“吸收消化”功能

植物通过气孔和皮孔与外界进行气体交换,这个过程中可将大气污染物吸收入体内,并在体内通过氧化还原过程进行降解,或通过根系排出体外,或积累贮藏于某一器官内,从而达到净化污染物的作用^[35]。植物对二氧化硫、氟化氢等气态污染物和铅、镉等重金属具有一定的吸收净化能力^[13,35-36],那么植物能否通过叶片角质层、表面细胞产生化学交换和化学吸附?是否能够将 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物吸附进体内,并通过植物体内的输导系统将其吸收、分解和代谢?这种作用是靠浓度扩散还是其它方式,这方面还没有细致的研究和证据。

2 城市森林调控空气颗粒物的主要分析方法

城市森林调控空气颗粒物的功能主要包括植物本身的滞尘和净化森林环境中的空气颗粒物两方面,与之对应,分析方法主要为重量法和质量浓度法。前者经过采样、清洗、过滤、烘干、称重等程序,运用差重法测定得到单位叶面积滞尘量(单位干生物量滞尘量),再通过单位滞尘量与单株、群落的叶片总叶面积(植株干生物量)等换算单株或群落的滞尘能力。后者主要是直接使用基于Bata射线法或微量振荡天平法测量原理的颗粒物监测仪监测城市森

林环境中不同粒径空气颗粒物的质量浓度;另一种是采用中流量或大流量采样器抽取一定体积的空气,使之通过已恒重的滤膜,使颗粒物滞留在滤膜上,根据采样前后滤膜重量之差及采样体积,来计算颗粒物的质量浓度。

重量法是最直接、技术最成熟的测定植物滞尘量的方法,主要用于滞尘总量估算^[18,37-38]、滞尘格局分析^[16,26]、植物和群落功能对比研究^[39-41]等。该方法通过清洗叶片能够相对准确的评估植株的滞尘量,但无法分析叶片对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_1 的吸滞量。目前,如何把植物吸滞的粉尘按照粒径等级区分开来是个难题,中国林业科学研究院研制了空气颗粒物气溶胶再发生器^[42],它将叶片阻滞的颗粒物重新吹起再分级监测,为测定 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 提供了新的方法,但问题的核心是这些不同粒径的粉尘是否还是在植物表面累积过程中原始的状态,是否发生了重组不再是原始状态的粒径比例?这些问题还有待于研究验证。质量浓度法操作简便,可实现自动、连续监测,并同步测定TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 的质量浓度,多应用于大气环境监测业务中^[43],对于了解空气颗粒物的扩散、传播等动态变化具有重要意义^[44-45]。近几年,随着人们对空气质量的日益重视,运用浓度法监测城市森林调控空气颗粒物的功能也逐渐成为空气颗粒物研究的一个重要方向^[27,46]。但由于刚刚起步,还需要深入细致系统研究,以便为居民适时适地游憩、出行等提供参考依据。

3 不同城市森林调控空气颗粒物功能差异

3.1 植物个体滞尘能力差异

受植物形体大小和枝叶自身特性的影响,植物个体间滞尘能力差异显著,这种差异既表现在单位滞尘量^[47],也表现在全株最大滞尘量方面^[48-50]。不同树种单位面积和单叶滞尘量最大的差异可达到近十倍和数十倍^[47],全株最大滞尘量相差几十倍以上^[48-49],甚至有学者发现不同树种单位滞尘量相差上万倍^[50]。叶片形态结构特征的不同是引起个体滞尘能力差异的主要原因,叶表面粗糙、多绒毛、具沟状组织和分泌液的树种单位叶面积吸附粉尘的能力强,而叶面光滑、细胞排列整齐的滞尘能力相对较弱^[20,38,48,51]。枝干叶的着生方式^[23]、叶表面形状^[20]、叶量^[41]、叶面倾角^[47]和叶面积^[17]等也会影

响植物个体的滞尘能力。另外,叶表面结构对所吸附空气颗粒物的粒径具有选择性,叶片蜡质层的厚度与 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 的空气颗粒物吸附量显著正相关,但与其他粒径颗粒物吸附量的相关性不显著^[52]。

不同生活型的城市森林滞尘能力有所差别。高大的乔木能够阻滞、过滤外界的降尘和飘尘,低矮的灌木、草本、地被等则能有效减少地面扬尘^[39]。从总的滞尘量来看,高大的乔木可以大大降低绿地及周围的风速,为有效截留并吸收粉尘提供了有利的条件^[41 53]。就针叶树和阔叶树而言,一般认为针叶树的滞尘能力大于阔叶树种。Beckett^[11]、Tallis^[54]等认为针叶植物由于其复杂的枝叶空间分布结构对小颗粒物的沉降能力显著高于阔叶树种,且阔叶树种由于非生长季树叶凋落,其降尘作用极大被削弱。就单位叶面积滞尘能力来说,多数学者发现灌木植物的滞尘量大于乔木植物,这可能主要是垂直高度不同,接受灰尘量不同的缘故^[39 49]。

3.2 城市森林群落调控空气颗粒物能力差异

在对单种植物滞尘能力研究的基础上,许多学者对居住区绿地、工业区绿地等各种功能区群落的滞尘效应进行了大量研究^[37 40 55]。不同类型城市森林调控空气颗粒物的能力差异显著,总体来讲,较高的森林比较矮植物和草地对颗粒物的沉降作用要强^[10 56-58],具乔、灌、草垂直复层结构、绿量高的城市森林滞尘最为理想,而结构单一、立体绿量少的单层结构滞尘效果相对较差^[12 41 59-61]。另外,同种结构城市森林对不同粒径空气颗粒物的调控作用也有区别。郭二果^[29]研究发现,与城区公园内相比,游憩林对TSP、PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁的日均减尘率分别为68.93%、78.12%、89.45%和90.71%。

需要指出的是,城市森林群落滞尘能力与其调控林内空气颗粒物的能力并不一直呈正相关,一般而言,城市森林种植密度、郁闭度和覆盖度越大,总的滞尘量越大,但若超过一定的阈值,群落滞尘量虽然还在增大,但此时林内空气中的颗粒物不容易扩散,可能就导致其浓度增高,也即此时城市森林的调控作用不明显甚至表现为负效应^[59 62-64]。因此,根据功能需求合理布局植物群落是城市森林建设中需要着重考虑的问题之一。

4 城市森林调控空气颗粒物的时空变化规律

城市森林调控空气颗粒物是一个复杂的动态过

程,受滞尘累积时间、昼夜、季节、植物所处环境、高度等诸多因素影响,呈现出一定规律。

4.1 城市森林叶片滞尘的时间变化

随时间推移,植物叶片的滞尘量不是无限增长,具有“饱和性”和“可塑性”^[21 65-66],并呈现一定日变化和季节变化。受植物叶面滞尘和粉尘脱落同时存在的影响,植物滞尘是一个复杂的动态过程,有学者认为1d内植物叶片累计滞尘量与时间不呈线性相关关系^[51 65],也有学者发现叶片的滞尘量随时间的推移整体呈增加趋势^[26]。城市森林的滞尘因季节不同而呈现一定规律,就植物本身而言,冬季植物叶量少,甚至落叶,加之生理活动基本停止,滞尘能力较弱,而夏季滞尘作用最强。但在未达到饱和之前,植物滞尘的季节变化主要受季节性气候条件、大气污染程度、所处地域及周围环境等因素影响,方颖^[50]研究南京市主要绿化树种净化TSP发现,大部分树种叶片滞尘量春季高、夏季降低、秋季增高、冬季达最高,吴晓娟等^[67]也发现类似趋势。还有学者研究北方常绿树种滞留污染物的质量浓度发现冬季滞尘量最大,秋季最小^[14 68]。

另外,植物生长的阶段影响其滞尘能力。董希文等^[69]研究发现,银中杨(*Populus alba*×*berolinensis*)大树和幼树的单位叶面积滞尘量存在差异,由于苗期叶片相对较大,叶表粗糙,特别是背面多毛,因此滞尘量较大;而大树的叶片小叶居多,且较光滑,单位滞尘量相对较少。

4.2 不同类型城市森林内空气颗粒物的时间变化

受天气条件、小气候因素、污染排放状况及森林生理功能等因素综合影响,城市森林环境中空气颗粒物浓度呈现明显时间变化。关于日变化规律,目前主要围绕城区绿地^[70-71]、城郊片林^[72-73]、道路景观林^[74]、森林公园^[75]等类型而展开,基本呈现“早晚高、白天低”的双峰格局,且夜间高于白天,但峰、谷出现的具体时间因地而异。城区绿地、城郊片林和道路林空气颗粒物浓度与人流、车流量显著正相关,早、晚上下班期出现高峰^[70-74];森林公园等旅游地则主要受用煤量、游客数量等因素影响,高峰出现在用餐前后^[75]。另外,不同粒径空气颗粒物浓度日变化规律不完全一致,不同天气条件对其影响也不同。细颗粒物白天高峰和夜间低谷出现时间提前,而白天低谷和夜间高峰却有所滞后。多云、雾霾天

和桑拿天使空气颗粒物浓度污染加重;雨、雪能够降低大气颗粒物浓度;风在雨后能使空气颗粒物在一定程度上扩散减少,而在天气干燥时刮风会增加城市森林内颗粒物的浓度,且多云会加重干燥天气刮风后大气颗粒物的污染程度^[29,72,76-77]。

城市森林净化空气颗粒物的季节变化规律与城市空气颗粒物背景浓度、植物生理活动密切相关,在城市大环境空气颗粒物浓度较低、植物生理活动最为旺盛的夏、秋季城市森林净化空气颗粒物的效果最为明显,而在城市环境背景浓度高、树木停止生理活动的冬季效果较差^[71]。受多种因素影响,不同粒径空气颗粒物季节变化规律并不一致。目前只有少数学者进行了这方面的初步分析。对北方城市森林而言,有学者等认为 4 种粒径颗粒物浓度均在秋季最低,但 TSP、PM₁₀ 浓度春季最高,PM_{2.5} 浓度夏季最高^[74];也有学者发现,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度冬季最高,夏季次之;PM₁₀ 浓度秋季最低,PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度春季最低,并认为北方地区春季沙尘天气对大粒径颗粒物浓度贡献较大,冬季燃煤、雾霾天和夏季“桑拿天”对细颗粒物的贡献最大^[78]。而对南方城市的研究表明,游憩林中 PM_{2.5} 浓度在春季最高,冬、秋季次之,夏季最低,这可能主要与南北方气候差异及春季北方沙尘中的细颗粒物长距离输送有关^[73]。

4.3 城市森林调控空气颗粒物空间范围

城市森林净化空气颗粒物的作用,在一定空间范围内比较显著,达到一定阈值后,将不再明显,也即会形成较稳定的“森林内环境”。因此,了解不同结构城市森林调控空气颗粒物的空间范围和空气颗粒物的扩散规律,对科学合理规划城市公园、街头绿地、游憩林及道路防护林具有重要意义。目前直接研究空气颗粒物的文献较少,但对城市交通污染物或空气颗粒物的主要组成成分——重金属的研究较为丰富,为今后研究城市森林调控空气颗粒物的作用奠定了基础。

4.3.1 道路林带宽度与结构

关于道路林带调控空气颗粒物的研究,目前多数通过采集叶面尘来探讨其滞尘作用,认为:公路两侧防护林树木叶片表面空气颗粒物数量随距公路距离的增加呈递减趋势^[79]。对道路空气中的颗粒物浓度的有限研究往往集中于城市不同等级道路间的

比较^[80],而对林带(尤其不同宽度林带)影响下的道路空气颗粒物空间分布的报道较少^[81]。目前,仅有部分学者对道路林带内的空气颗粒物的主要组成成分——重金属进行研究,试图得到最佳的道路防护林带宽度,但研究结果尚存争议。王成等^[82]试验表明:对于日均车流 6 万辆的公路而言,高速公路两侧 80m 范围是重金属污染最集中的扩散区域;而 40—60m 宽林带对降低日流量 5—8 万辆汽车的高速公路重金属污染防治效果较好。还有学者认为,为防止重金属污染,道路防护林应不小于 20m^[83],40m^[84]或 50m^[85]。但 Fowler 等^[57]以铅为示踪物研究污染严重的道路防护林发现:林内 100m 铅浓度高于 5m 处的浓度,且林缘土壤中的铅含量也较高。因此,道路林带净化空气颗粒物的作用还有待于深入系统研究。

道路林带净化空气颗粒物的作用受林带结构,如疏透度、高度、宽度、密度、郁闭度等协同影响^[12,63,81,86]。对城市道路交通污染物来说,其扩散速率很大程度上受到气流铅直湍流强度的影响。行道树冠幅小、株间距大、密度小,街谷内有较大的风速梯度,有利于机械湍流的增强,扩散效果好。但在植株间距较密、枝杈搭接时,树冠会在道路上方形成顶盖效应,在吸收污染物的同时也会降低风速,减小街区内部气流的垂直涡动,减弱林带内外气流的垂直交换,阻碍污染物向上层大气扩散,导致道路两侧污染物浓度升高^[46,62-63,85,87-89]。殷彬等^[63]还发现 TSP 的净化百分率与郁闭度呈正相关,与疏透度呈负相关关系;郁闭度的最佳范围为 0.70—0.85,疏透度的最佳范围为 0.25—0.33。

4.3.2 片林面积与结构

关于城市片林调控空气颗粒物空间范围方面的研究目前较少,多数学者认为林内空气颗粒物浓度低于林缘,随着距污染源距离的增加其浓度逐渐递减。Cavanagh 等^[27]观测新西兰冬季常绿阔叶林内 PM₁₀ 的污染状况发现,冬季林内 PM₁₀ 浓度由林缘向林内呈现衰减趋势,从外部的 31.5 μg/m³ 降低到了林内 50m 处的 22.4 μg/m³。张晶^[90]观测不同公园竹林内的空气颗粒物发现,林内浓度均小于林缘,且林分密度大林内的浓度大于密度较小竹林,但具体影响范围和最佳密度不得而知。任启文等^[15]研究城市片林空气细菌含量表明,能起到较好抑菌作

用的林地宽度要大于 30m,也即在城市绿化建设中,如果从降低空气细菌含量方面考虑,建设绿地面积 $>900\text{m}^2$ 才能形成“森林内环境”,为居民提供良好的游憩地,该研究结果对城市片林调控空气颗粒物的作用具有重要借鉴意义。

片林的结构明显影响污染物的浓度和扩散。从城市片林滞尘能力来讲,绿量越多,郁闭度、盖度越大,对降尘截滞作用越明显^[12,54];但从城市片林中的空气颗粒物浓度角度来讲,它与绿量、郁闭度、覆盖率等结构指标未必呈正相关关系。刘立民等^[91]认为地域相对绿量与大气污染物浓度之间存在绿化效益最佳阈值区。在绿量增加初期,污染物浓度下降较快,当绿量达到一定值后,污染物浓度下降开始明显减缓;当绿量继续增加,达到一个较高的量值时,污染物浓度下降变得不明显。还有学者发现,郁闭度过大、地被物覆盖度太高会导致林内颗粒物浓度长时间居高不下^[29]。

5 研究展望

随着城市化的快速发展,包括颗粒物在内的大气污染问题将会日益突出,如何通过建设城市森林来缓解大气污染,为居民提供清新的空气、提供健康的游憩场所是未来城市发展面临的重要课题。总的来看,城市森林与空气颗粒物之间关系的研究有如下趋势:

(1) 城市森林调控空气颗粒物的机理

城市森林的物理降尘功能目前已经广为接受,研究也已经逐步由宏观转向微观,结合叶表面微观结构分析植物的滞尘能力,已成为目前研究植物滞尘机理的一个重要途径。那么,除了物理降尘外,森林调控空气颗粒物的生理过程和生态响应机制怎样,森林植被在生长代谢过程中是否产生化学除尘、如何进行化学除尘、化学除尘的粒径在什么范围、化学除尘的能效有多少等问题还有待于在细胞、组织、器官和个体水平上深入研究和探讨。另外,加强城市森林内空气颗粒物的组成成分研究以及与城市森林固碳释氧、降温增湿、杀菌抑菌等生态功能相结合研究,对揭示城市森林调控空气颗粒物的机理具有重要意义。

(2) 城市森林调控空气颗粒物的研究方法

重量法和质量浓度法是目前研究城市森林调控

空气颗粒物作用的两种基本方法,随着研究趋向微观,利用重量法研究较微观尺度的颗粒物时,传统的方法可能就不再适用,分析其重量时可能需要高端的采样器和较高灵敏度的粒径分析仪。质量浓度法测定方面,目前主要使用便携式仪器,将仪器置放于一定的城市森林环境中监测某一天或几天的相对瞬间值,加强城市森林中空气颗粒物的长期定位观测将是今后研究的重点之一。

(3) 城市森林群落结构与调控空气颗粒物功能的关系

一般而言,大粒径颗粒物主要靠重力或惯性作用沉降,而细颗粒物呈悬浮状,主要通过布朗运动扩散,受气流影响大于重力等其他外力的影响。而陆地表面的覆盖状况间接影响大气环流和气候,进而影响了空气颗粒物的扩散。不同结构、不同类型、不同尺度城市森林调控空气颗粒物的功能具体有多大,扩散通量、干湿沉降有多少,城市森林如何影响空气颗粒物扩散、沉降和循环等这方面的研究尚属空白,因此,有待于加强试验模拟与实地结合的定量研究,以分析城市森林调控空气颗粒物的作用,揭示林内空气颗粒物的扩散规律、循环过程,获取最佳、最科学的群落指标和植物配置,为治理城市空气颗粒物污染和合理经营与营造城市森林提供科学依据。

(4) 城市森林调控空气颗粒物的“汇”与“源”关系与技术

目前对森林滞尘方面的研究主要注重其“汇”的作用,即树木枝叶截留、吸附粉尘,但对林地的“尘汇”功能研究却很少。城市森林“尘汇”的核心是要靠林地的吸纳能力,无论是空气中降落的还是雨水从枝叶冲刷下来的,把“尘”留在林地里是最主要的。因此,绿地地表的结构性特性非常重要。美欧国家对有机覆盖物(Mulch)的研究与应用历史悠久而且技术成熟,城市绿地中Mulch使用极为普遍^[92],有效增加了城市森林的滞尘能力,减少了二次扬尘现象。在中国,由于城市绿地管理大多采用了农业上的“松土除草、焚烧落叶”等传统的园艺技术,地表覆盖相对较少,土壤裸露,极易引起二次扬尘,甚至反复扬尘,加大了城市空气颗粒物的污染,从这一角度来看,在林地结构不合理尤其地表经营管理不当时,城市绿地反而是一个巨大的“尘源”。因此,加强裸露

地面的有机覆盖无疑是消减城市空气颗粒物“源”的重要措施之一。通过研究不同地表覆盖方式降减、吸收城市空气颗粒物的作用,筛选优良的地表覆盖方式,应用 Mulch 覆盖技术,对缓解城市空气颗粒物污染具有重要意义。

(5) 主要空气颗粒物污染源周边防护林的设置

基于空气颗粒物扩散的规律,通过合理营建城市森林能够使其向对人体有益的方向发展,因此,在摸清树种、群落滞尘规律、城市森林内空气颗粒物的扩散规律及其调控范围的前提下,可以根据功能需要来选择适宜树种、最佳配置方式和适宜宽度营建污染防护林。对于空气污染物有时需要促进污染物扩散,有时需要阻挡污染物扩散,还有时需要放进来再吸收,要根据防护目标合理配置,最大限度发挥城市森林减少颗粒物污染的生态服务功能。

(6) 基于健康空气环境的各类风景游憩林营造与管护

随着人们保健意识的增强和森林旅游的快速发展,如何营造和管护游憩林已经成为城市林业工作者面临的主要问题之一。因此,结合已有研究成果,在营造各类风景游憩林时,不仅要考虑选择调控空气颗粒物能力强的树种和群落,还要综合考虑合理的种植密度、郁闭结构和配置方式,同时要对林分进行适当的疏伐和整枝,加强林下改造,拓展林下空间,以达到消减空气颗粒物的最佳效果,为居民提供比较洁净的游憩空间。

(7) 城市森林调控空气颗粒物功能的科学评价

城市森林调控空气颗粒物的功能既包括其枝叶吸滞粉尘的功能,又包括通过降低林内空气中的颗粒物,调节空气质量的功能。目前应用重量法分析城市森林滞尘量的研究已颇为系统丰富,研究方法也较为成熟,但鉴于植物滞尘是一个反复的过程,在总的滞尘量估算时应当考虑到不同植物的滞尘周期,否则其滞尘功能将被大大低估。价值核算方面,与城市森林滞尘的生态价值相比,城市森林通过降尘净化空气减少粉尘对人体危害,降低疾病的发生率及人体死亡率产生的经济价值要远远大于其本身的生态价值,因此,在价值核算中经济价值不容忽视。

在城市森林研究中,研究城市森林调控空气颗粒物的功能并不是研究的最终目的,其关键在于如

何用研究成果来指导实践并应用到实际建设当中,促进城市森林的健康发展和城市环境的最终改善。基于目前城市森林调控空气颗粒物的研究成果还没有得到广泛的应用,亟需进一步加强研究成果与具体实践的结合,通过建立示范区带动科研成果的转化与应用。

References:

- [1] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, Vowles P D. Characterisation of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(22): 3773–3785.
- [2] Yang F M, He K B, Ma Y L, Chen X, Cadle S H, Chan T, Mulawa P A. Characteristics and sources of trace elements in ambient PM_{2.5} in Beijing. *Environmental Science*, 2003, 24(6): 33–37.
- [3] Li L, Wang W, Feng J L, Zhang D P, Li H J, Gu Z P, Wang B J, Sheng G Y, Fu J M. Composition, source, mass closure of PM_{2.5} aerosols for four forests in eastern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 405–412.
- [4] Song S J, Wu Y, Jiang J K, Yang L, Hao J M. Characteristics of elements in size-resolved fine particles in a typical road traffic environment in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1): 66–73.
- [5] Yang M S, Jiang Z M, Mei X Y, Cai J, Wang J, Zhang S J. Effect of the dust-pollution oil some physiologic indexes and growth of *Platycladus orientalis* in Huangdi Tomb. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994, 12(4): 99–104.
- [6] Strand L B, Barnett A G, Tong S. Maternal exposure to ambient temperature and the risks of preterm birth and stillbirth in Brisbane, Australia. *American Journal of Epidemiology*, 2012, 175(2): 99–107.
- [7] Arden Pope III C, Burnett R T, Thun M J, Calle E E, Krewski D, Ito K, Thurston G D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *The Journal of the American Medical Association*, 2002, 287(9): 1132–1141.
- [8] An J L, Zhang R J, Han Z W. Seasonal changes of total suspended particles in the air of 15 big cities in Northern parts of China. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 25–29.
- [9] Cusack M, Alastuey A, Perez N, Pey J, Querol X. Trends of particulate matter (PM_{2.5}) and chemical composition at a regional background site in the western Mediterranean over the last nine years (2002–2010). *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2012, 12(22): 10995–11033.
- [10] Fowler D, Cape J N, Unsworth M H, Mayer H, Crowther J M,

- Jarvis P G , Gardiner B , Shuttleworth W J. Deposition of atmospheric pollutants on forests. Philosophical Transactions of the Royal Society of London , 1989 , 324 (1223) : 247-265.
- [11] Beckett K P , Freer-smith P H , Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. Environmental Pollution , 1998 , 99(3) : 347-360.
- [12] Su Z F , Liu Y , Peng Q F. Study on dust detention of the different greenland. Arid Environment Monitoring , 2002 , 16 (3) : 162-163.
- [13] Sehmel G A. Particle and gas dry deposition: a review. Atmospheric Environment , 1980 , 14(9) : 983-1011.
- [14] Chen W , He X Y , Zhang Y , Sun Y , Wang W F , Ning Z H. Dust absorption effect of urban conifers in Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology , 2003 , 14(12) : 2113-2116.
- [15] Ren Q W , Wang C , Qie G F , Yang Y. Airborne particulates in urban greenland and its relationship with airborne microbes. Urban Environment & Urban Ecology , 2006 , 19(5) : 22-25.
- [16] Cai Y H. Study on dust-retention effect and photosynthetic characteristics of urban keynote tree. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University , 2010.
- [17] Liu Y , Su Z F , Wang Y F. Study on dustproof function of suitable afforestation sampling in Shihezi. Arid Environmental Monitoring , 2002 , 16 (2) : 98-99 , 125.
- [18] Prusty B A K , Mishra P C , Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur , Orissa , India. Ecotoxicology and Environmental Safety , 2005 , 60(2) : 228-235.
- [19] Freer-Smith P H , Beckett K P , Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria* , *Acer campestre* , *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupre' , *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse , fine and ultra-fine particles in the urban environment. Environmental Pollution , 2005 , 133(1) : 157-167.
- [20] Chai Y X , Zhu N , Han H J. Dust removal of urban tree species in Harbin. Chinese Journal of Applied Ecology , 2002 , 13 (9) : 1121-1126.
- [21] Wang Z H , Li J L. Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus Japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city. Ecology and Environment , 2006 , 15 (2) : 327-330.
- [22] Wang L , Ha S , Liu L Y , Gao S Y. Effects of weather condition in spring on particulates density on conifers leaves in Beijing. Chinese Journal of Ecology , 2006 , 25(8) : 998-1002.
- [23] Pullman M R. Conifer PM_{2.5} deposition and re-suspension in wind and rain events[D]. America: Cornell University , 2009.
- [24] Gregory P H. The microbiology of the atmosphere. London: Leonard Hill. New York: Interscience Publishers , 1961.
- [25] Wu Y L , Davidson C I , Lindberg S E , Russell A G. Resuspension of particulate chemical species at forested sites. Environmental Science & Technology , 1992 , 26 (12) : 2428-2435.
- [26] Zhang J , Wu X Y. Detaining dust law of landscape greening plants leaves in urban area of Fuxin. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science , 2011 , 30(6) : 905-908.
- [27] Cavanagh J A E , Zawar-Reza P , Gaines Wilson J. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanized native forest patch. Urban Forestry & Urban Greening , 2009 , 8(1) : 21-30.
- [28] Li X G. Observations and assessments of mitigation effects of the urban forests on atmospheric pollutants [D]. Changsha: Central South Forestry University , 2005.
- [29] Guo E G. Ecological health effects of typical recreation forests in West Mountain of Beijing [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry , 2008.
- [30] Wei C L , Wang J T , Jiang Y L , Zhang Q G. Air negative charge ion concentration and its relationships with meteorological factors in different ecological functional zones of Hefei City. Chinese Journal of Applied Ecology , 2006 , 17(11) : 2158-2162.
- [31] Liang S , Tong Q X , Chi M J. Effect of the urban vegetation on aero-anion. Subtropical Plant Science , 2010 , 39(4) : 46-50.
- [32] Chen J Y , Song Y C , Tao K H , Ni J. Study on the air anion of the urban greenery patches in Shanghai. Ecology and Environment , 2006 , 15(5) : 1024-1028.
- [33] Wu Z W , Wu C C , Shi Q. The research on essential oils from *Quercus dentata* Thunb. Journal of Central South Forestry University , 1999 , 19(4) : 38-40.
- [34] Zheng Y. Antibiotic functions and volatile organic compounds from *Pinus tabulaeformis* var. *mukdensis* Uyeki and *Betula platyphlla* SUK [D]. Harbin: Northeast Forestry University , 2008.
- [35] Huang H Y , Zhang Y B , Zhang C X. Absorption and purification to gaseous pollutants by woody plant. Acta Ecologica Sinica , 1981 , 1(4) : 335-343.
- [36] Raskin I , Smith R D , Salt D E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. Current Opinion in Biotechnology , 1997 , 8(2) : 221-226.
- [37] Zhang X X , Gu R Z , Chen Z X , Li Y M , Han L L , Li H. Dust removal by green area s in the residential quarters of Beijing. Journal of Beijing Forestry University , 1997 , 19(4) : 12-17.
- [38] Li H M , Liu X. Relationships between leaf epidermal morphology and dust-retaining capability of main garden trees in Chengyang district of Qingdao City. Chinese Journal of Ecology , 2008 , 27 (10) : 1659-1662.
- [39] Su J X , Jin S J , Yan J G , Zhang Q D , Gao R R , Lu Y M. Study on the dust catching property of the campus plants in Shanxi Normal University. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition , 2002 , 20(2) : 86-88.
- [40] Chen F , Zhou Z X , Guo E X , Ye Z Q. Dust retention effect of ornamental green land in urban industrial area: a case study in Wuhan Iron and Steel Company workshop area. Chinese Journal of

- Ecology, 2006, 25(1): 34–38.
- [41] Zheng S W, Xing G M, Li J, Li J S. Effect of dust catching capacity virescence tree species in the North of China. Journal of Shanxi Agriculture University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 383–387.
- [42] <http://www.caf.ac.cn/news/xwzx/201305/2013-05-27-9-34.html>.
- [43] Kowalchuk G A, Naoumenko Z S, Derikx Piet J L, Felske A, Stephen J R, Arkhipchenko I A. Molecular analysis of ammonia-oxidizing bacteria of the β subdivision of the class *Proteobacteria* in compost and composted materials. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(1): 396–403.
- [44] Pan J G, Cao J J, Mai C A, Li S C. Spatial-temporal variations of atmospheric PM_{10} over Zhuhai. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(5): 6–10.
- [45] Gao W K, Tang G Q, Yao Q, Liu Z R, Wang H, Wang Y S. Vertical distribution of air pollutants during serious air pollution event in Tianjin. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(7): 731–738.
- [46] Sun Z W. Influence of spatial structure of urban roadside trees on vehicular pollutant diffusion in Fuzhou City[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [47] Yu X R. The characteristic of foliar dust of main afforestation tree species in Nanjing and association with leaf's surface micro-structure[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [48] Wang H X, Shi H, Li Y Y. Relationship between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 21(12): 3077–3082.
- [49] Popek R, Gawrońska H, Wrochna M, Gawroński SW, Saebø A. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes— a 3-year study. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 245–256.
- [50] Fang Y, Zhang J C, Wang Y H. Dustfall adsorbing capacity of major species of greening trees in Nanjing and its law. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(2): 36–40.
- [51] Gao J H, Wang D M, Zhao L, Wang D D. Airborne dust detainment by different plant leaves: taking Beijing as an example. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 94–99.
- [52] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, Saebø A, Gawroński S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037–1046.
- [53] Souch C A, Souch C. The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana. Journal of Arboriculture, 1993, 19(5): 303–312.
- [54] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 129–138.
- [55] Zhou Z X, Shao T Y, Wang P C, Gao C, Xu Y R, Guo E X, Xu L H, Ye Z Q, Peng X M, Yu C J. The spatial structures and the dust retention effects of greenland types in the workshop district of Wuhan Iron and Steel Company. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2036–2040.
- [56] Lovett G M. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. Ecological Applications, 1994, 4(4): 629–650.
- [57] Fowler D, Skiba U, Nemitz E, Choubedar F, Branford D, Donovan R, Rowland P. Measuring aerosol and heavy metal deposition on urban woodland and grass using inventories of ^{210}Pb and metal concentrations in soil. Water, Air, & Soil Pollution, 2004, 4(2/3): 483–499.
- [58] Bunzl K, Schimmack W, Kreutzer K, Schierl R. Interception and retention of Chernobyl-derived ^{134}Cs and ^{137}Cs and ^{100}Ru in a spruce stand. The Science of the Total Environment, 1989, 78: 77–87.
- [59] Sun S P, Gu R Z, Zhang J. Inhalable particulate matter (PM_{10}) related to different green cover percentage and greenbelt types in Beijing. Chinese Landscape Architecture, 2004(3): 77–79.
- [60] Baker W L. A review of models of landscape change. Landscape Ecology, 1989, 2(2): 111–133.
- [61] Liu X Q, Tang W P, Zhou Z X, Hu X Y, Shao T Y, Yang T M. Environmental effects of different greenbelt types in Yichang. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32(5): 53–54, 83.
- [62] Wu Z P, Wang C, Hou X J, Yang W W. Variation of air $PM_{2.5}$ concentration in six urban greenlands. Journal of Anhui Agriculture University, 2008, 35(4): 494–498.
- [63] Yin B, Cai J P, Chen L P, Shen Z M, Zou X D, Wu D, Wang W H. Effects of vegetation status in urban green spaces on particles removal in a canyon street atmosphere. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4590–4595.
- [64] Shen J F, Su K J, Feng J J. Study on anti-pollution patterns of road green. Urban Environment & Urban Ecology, 2001, 14(6): 52–53.
- [65] Zhu T Y. Ability of the most virescence plants' dust blocking and construction of flower boarders' of Yuhuatai area in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [66] Schabel H G. Urban forestry in Germany. Arbor, 1980, 6(11): 281–286.
- [67] Wu X J, Sun G N. Variation of atmosphere purification by vegetation among different time in a year in urban area of Xi'an. Journal of Chinese Urban Forestry, 2006, 4(6): 31–33.
- [68] Prajapati S K, Tripathi B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. Journal of Environmental Quality,

- 2008, 37(3): 865-870.
- [69] Dong X W, Cui Q, Wang L M, Yan D L. Study on classification of dust blocking effect of branches of landscaping tree species. *Protection Forest Science and Technology*, 2005, 1(1): 28-29, 88.
- [70] Wu Z P, Wang C, Xu J N, Hu L X. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer. *Journal of Tsinghua University: Science & Technology*, 2007, 47(12): 2153-2157.
- [71] Zhao Y, Wei T T, Zhao N, Guo A F. Research on characteristics of PM₁₀ pollution and effects of purification PM₁₀ pollution in various afforestation modles-case studies in Henan Agricultural University. *Henan Science*, 2008, 26(2): 226-229.
- [72] Guo E G, Wang C, Qie G F, Fang C, Sun Z W, Zhou Z H. Diurnal variations of airborne particulate matters in different seasons in typical recreation forests in West Mountain of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [73] Gu L, Wang C, Wang X L, Wang Y Y, Wang Q. Dynamic changes of PM_{2.5} in three recreation forests during the recreation time in Hui Mountain of Wuxi. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2485-2493.
- [74] Yu L P. Effects of urban road greening on the distribution of air particulate matter and carbon monoxide [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [75] Shi Q, He Q T, Wu Z W. Variations of air pollutant concentrations and their evaluation in Zhangjiajie National Forest Park, China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 24(4): 20-24.
- [76] Guo E G, Wang C, Qie G F, Cai Y. Influence of typical weather conditions on the airborne particulate matter in urban forests in northern China. *China Environmental Science*, 2013, 33(7): 1185-1198.
- [77] Pan B F, Zhao Y L, Li J J, Wang R B. Analysis of the scavenging efficiency on PM_{2.5} concentration of some kinds of meteorological factors. *Environmental Science and Technology*, 2012, 25(6): 41-44.
- [78] Guo E G, Wang C, Qie G F, Fang C, Sun Z W, Zhou Z H. Seasonal variations of airborne particulate matter in typical recreation forests in the West Mountain of Beijing. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(10): 55-57.
- [79] Liu Q, Liu Y Q, Lai F Y. A study on urban road greening relating to its dust removal. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31(6): 1063-1068.
- [80] Pan C Z, Chen G C, Yang Q L, Wang D Y, Zhao Q, Zhou X J, Zhang Y. Study on the concentration distribution of PM₁₀/PM_{2.5} related to traffic-busy road in Chongqing downtown area. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 2004, 26(5): 567-579.
- [81] Qi F Y, Guo H F, Zhao Y, Zhu Y F. The effect of greenbelt in road on atmospheric particles concentration. *Henan Science*, 2009, 27(6): 734-736.
- [82] Wang C, Qie G F, Yang Y, Ren Q W. Effects of highway forest belts on heavy metals pollution from tail gas of vehicles. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(3): 1-7.
- [83] Yang Y R, Yin Y L, Xu H B. Effects of forest belts with different widths on heavy metal content in rice leaf and brown rice in crop field on both sides of national road. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2012, 21(2): 84-88.
- [84] Ruan H H, Jiang Z L. Pb concentration and distribution in main tree species on both sides of highway in shrubs of Nanjing city. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3): 362-364.
- [85] Li Y Z, Ma J H. Heavy metals pollution in roadsides soils and protective effect of plant barriers along expressway. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 105-109.
- [86] Lin Y D, Wu X G, Hao X Y, Han C. Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6561-6567.
- [87] Rotach M W. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(13): 1473-1486.
- [88] Gromke C, Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon-experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(16): 3287-3302.
- [89] Gromke C, Ruck B. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emission in street canyons. *Boundary-layer Meteorology*, 2009, 131(1): 19-34.
- [90] Zhang J. Ecological health effects of *Phyllostachys heterocycla* recreation forests in Hui Mountain of Wuxi[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.
- [91] Liu L M, Liu M. Vegetation quantity-a new concept of urban greening assessment. *Chinese Landscape Architecture*, 2000(5): 32-34.
- [92] Wang C, Qie G F, Peng Z H. Application value of organic ground surface mulch in urban forestry construction. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2213-2217.

参考文献:

- [2] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 陈旭, Cadle S H, Chan T, Mulawa P A. 北京大气 PM_{2.5} 中微量元素的浓度变化特征与来源. *环境科学*, 2003, 24(6): 33-37.
- [4] 宋少洁, 吴烨, 蒋靖坤, 杨柳, 郝吉明. 北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 66-73.
- [5] 杨茂生, 姜在民, 梅秀英, 蔡靖, 王军, 张树杰. 粉尘污染对黄帝陵侧柏一些生理指标及生长的影响. *干旱地区农业研究*, 1994, 12(4): 99-104.
- [8] 安俊岭, 张仁健, 韩志伟. 北方 15 个大型城市总悬浮颗粒物

- 的季节变化. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 25-29.
- [12] 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, 6(3): 162-163.
- [14] 陈玮, 何兴元, 张粤, 孙雨, 王文菲, 宁祝华. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2113-2116.
- [15] 任启文, 王成, 郝光发, 杨颖. 城市绿地空气颗粒物及其与空气微生物的关系. 城市环境与城市生态, 2006, 19(5): 22-25.
- [16] 蔡燕徽. 城市基调树种滞尘效应及其光合特性研究. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [17] 刘艳, 栗志峰, 王雅芳. 石河子市绿化适生树种的防尘作用研究. 干旱环境监测, 2002, 16(2): 98-99, 125.
- [20] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应—以哈尔滨为例. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [21] 王赞红, 李纪林. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态. 生态环境, 2006, 15(2): 327-330.
- [22] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 高尚玉. 北京市春季天气状况对针叶树叶面颗粒物附着密度的影响. 生态学杂志, 2006, 25(8): 998-1002.
- [26] 张景, 吴祥云. 阜新城区园林绿化植物叶片滞尘规律. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(6): 905-908.
- [28] 李晓阁. 城市森林净化大其功能分析及评价[D]. 长沙: 中南林学院, 2005.
- [29] 郭二果. 北京西山典型游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [30] 韦朝领, 王敬涛, 蒋跃林, 张庆国. 合肥市不同生态功能区空气负离子浓度分布特征及其与气象因子的关系. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2158-2162.
- [31] 梁诗, 童庆宣, 迟敏杰. 城市植被对空气负离子的影响. 亚热带植物科学, 2010, 39(4): 46-50.
- [32] 陈佳瀛, 宋永昌, 陶康华, 倪军. 上海城市绿地空气负离子研究. 生态环境, 2006, 15(5): 1024-1028.
- [33] 吴章文, 吴楚材, 石强. 榭树精气的研究. 中南林学院学报, 1999, 19(4): 38-40.
- [34] 郑义. 黑皮油松、白桦挥发物及其抑菌作用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [35] 黄会一, 张友标, 张春兴. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究. 生态学报, 1981, 1(4): 335-343.
- [37] 张新献, 古润泽, 陈自新, 李延明, 韩丽莉, 李辉. 北京城市居住区绿地的滞尘效益. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 12-17.
- [38] 李海梅, 刘霞. 青岛城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1659-1662.
- [39] 苏俊霞, 靳绍军, 闫金广, 张钦弟, 高瑞如, 卢英梅. 山西师范大学校园主要绿化植物滞尘能力的研究. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 20(2): 86-88.
- [40] 陈芳, 周志翔, 郭尔祥, 叶贞清. 城市工业园区园林绿地滞尘效应的研究—以武汉钢铁公司厂区绿地为例. 生态学杂志, 2006, 25(1): 34-38.
- [41] 郑少文, 邢国明, 李军, 李锦生. 北方常见绿化树种的滞尘效应. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 383-387.
- [42] 森环环保所. 量化分析树木吸附 PM_{2.5} 作用科学难题取得关键性技术突破. (2013-05-27) [2013-05-30] <http://www.caf.ac.cn/news/xwzx/201305/2013-05-27-9-34.html>.
- [44] 潘建国, 曹军骥, 麦潮安, 李顺诚. 珠海空气中可吸入颗粒物 (PM₁₀) 的时空变化特征. 环境科学研究, 2003, 16(5): 6-10.
- [45] 高文康, 唐贵谦, 姚青, 刘子锐, 王辉, 王跃思. 天津重污染期间大气污染物浓度垂直分布特征. 环境科学研究, 2012, 25(7): 731-738.
- [46] 孙志伟. 福州行道树空间结构对交通污染物扩散的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [47] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其叶面结构的关系[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [48] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响. 应用生态学报, 2012, 21(12): 3077-3082.
- [50] 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.
- [51] 高金晖, 王冬梅, 赵亮, 王多栋. 植物叶片滞尘规律研究—以北京市为例. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 94-99.
- [55] 周志翔, 邵天一, 王鹏程, 高翅, 徐永荣, 郭尔祥, 徐隆辉, 叶贞清, 彭行梅, 于春杰. 武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应. 生态学报, 2002, 22(12): 2036-2040.
- [59] 孙淑萍, 古润泽, 张晶. 北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物 (PM₁₀). 中国园林, 2004(3): 77-79.
- [61] 刘学全, 唐万鹏, 周志翔, 胡兴宜, 邵天一, 杨庭明. 宜昌市城区不同绿地类型环境效应. 东北林业大学学报, 2004, 32(5): 53-54, 83.
- [62] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 杨伟伟. 6种城市绿地空气 PM_{2.5} 浓度变化规律的研究. 安徽农业大学学报, 2008, 35(4): 494-498.
- [63] 殷彬, 蔡静萍, 陈丽萍, 申哲民, 邹晓东, 吴旦, 王文华. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益. 生态学报, 2007, 27(11): 4590-4595.
- [64] 沈家芬, 苏开君, 冯建军. 道路绿化种植抗污染植物模式研究. 城市环境与城市生态, 2001, 14(6): 52-53.
- [65] 朱天燕. 南京雨花台区主要绿化树种滞尘能力与绿地花境建设[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [67] 吴晓娟, 孙根年. 西安城区植被净化大气污染物的时间变化. 中国城市林业, 2006, 4(6): 31-33.
- [69] 董希文, 崔强, 王丽敏, 闫敦梁. 园林绿化树种枝叶滞尘效果分类研究. 防护林科技, 2005, 1(1): 28-29, 88.
- [70] 吴志萍, 王成, 许积年, 胡立香. 六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(12):

- 2153-2157.
- [71] 赵勇,魏婷婷,赵宁 郭爱芳. 空气 PM_{10} 污染特征及绿化结构净化效应研究—以河南农业大学为例. 河南科学, 2008, 26(2): 226-229.
- [72] 郭二果,王成,郗光发,房城,孙志伟,周志海. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化. 生态学报, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [73] 古琳,王成,王晓磊,王艳英,王茜. 无锡惠山游憩时段三种游憩林内 $PM_{2.5}$ 变化规律. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2485-2493.
- [74] 于丽群. 城市道路绿化配置对空气颗粒物和 CO 扩散的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [75] 石强,贺庆棠,吴章文. 张家界国家森林公园大气污染物浓度变化及其评价. 北京林业大学学报, 2004, 24(4): 20-24.
- [76] 郭二果,王成,郗光发,蔡煜. 北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1185-1198.
- [77] 潘本峰,赵熠琳,李建军,王瑞斌. 气象因素对大气中 $PM_{2.5}$ 的去除效应分析. 环境科技, 2012, 25(6): 41-44.
- [78] 郭二果,王成,郗光发,房城,孙志伟,周志海. 北京西山典型游憩林空气悬浮颗粒物季节变化规律. 东北林业大学学报, 2010, 38(10): 55-57.
- [79] 刘青,刘苑秋,赖发英. 基于滞尘作用的城市道路绿化研究. 江西农业大学学报, 2009, 31(6): 1063-1068.
- [80] 潘纯珍,陈刚才,杨清玲,王定勇,赵琦,周贤杰,张勇. 重庆市地区道路 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 浓度分布特征研究. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(5): 567-579.
- [81] 齐飞艳,郭会锋,赵勇,朱颜锋. 道路绿化林对空气颗粒物浓度的影响. 河南科学, 2009, 27(6): 734-736.
- [82] 王成,郗光发,杨颖,任启文. 高速路林带对车辆尾气重金属污染的屏障作用. 林业科学, 2007, 43(3): 1-7.
- [83] 杨奕如,殷云龙,徐和宝. 不同宽度林带对国道两侧农田水稻叶片和糙米中重金属含量的影响. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2): 84-88.
- [84] 阮宏华,姜志林. 城郊公路两侧主要森林类型铅含量及分布规律. 应用生态学报, 1999, 10(3): 362-364.
- [85] 李仰征,马建华. 高速公路旁土壤重金属污染及不同林带防护效应比较. 水土保持学报, 2011, 25(1): 105-109.
- [86] 简银鼎,武小刚,郝兴宇,韩翀. 城市机动车道颗粒污染物扩散对绿化隔离带空间结构的响应. 生态学报, 2011, 31(21): 6561-6567.
- [90] 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.
- [91] 刘立民,刘明. 绿量—城市绿化评估的新概念. 中国园林, 2000(5): 32-34.
- [92] 王成,郗光发,彭镇华. 有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2213-2217.