



森林植被对PM_{2.5}等颗粒物的 调控机制与评价

余新晓 伦小秀 张振明 等 著

PM_{2.5}

PM_{2.5}

PM_{2.5}



科学出版社

国家林业公益性行业科研专项(201304301)

城乡生态环境北京实验室

林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2017014207000043)

资助出版

森林植被对 PM_{2.5} 等颗粒物的 调控机制与评价

余新晓 伦小秀 张振明 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书通过将森林滞留 PM_{2.5} 等颗粒物的能力定量化,筛选出不同典型区域有效治理 PM_{2.5} 等颗粒物的适宜树种,找到研究森林阻滞不同来源 PM_{2.5} 等颗粒物的优化配置的理论与技术,为解决以灰霾污染为特征的复合型污染和大气颗粒物污染治理提供一种绿色手段,并为指导城市森林建设和景观绿化等提供理论参考。

本书介绍了森林植被对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控,包括沉降作用、阻滞作用、吸附作用。并且研究了北京市典型城市绿地及森林对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控效应和北京市 PM_{2.5} 浓度时空变化与植被覆盖格局的关系。

本书可供生态学、水土保持学、林学、环境科学、地球气象学等专业研究、管理人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

森林植被对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控机制与评价/余新晓等著. —北京:科学出版社, 2017.4

ISBN 978-7-03-052602-1

I. ①森… II. ①余… III. ①森林植被-影响-可吸入颗粒物-研究
IV. ①S718.54 ②X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 069714 号

责任编辑:朱 丽 李丽娇/责任校对:孙婷婷
责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2017 年 4 月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 374 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《森林植被对 PM2.5 等颗粒物的调控机制与评价》

主要参编人员（以姓氏汉语拼音为序）：

宝 乐	毕华兴	陈俊刚	陈丽华	樊登星
冯仲科	贾国栋	刘萌萌	刘旭辉	伦小秀
莫 莉	牛健植	齐 实	饶良懿	阮氏青草
史 宇	孙丰宾	王效科	信忠保	徐晓梧
余新晓	张红星	张学霞	张振明	

学 术 秘 书：陈俊刚

序

20 世纪 30 年代的发达国家先后出现了一系列的空气污染事件，如 1943 年美国洛杉矶光化学烟雾事件、1952 年伦敦烟雾事件等。改革开放以来，中国经济飞速发展，但快速发展的同时，环境污染问题也日益严重，近些年来频发的灰霾天气已经严重影响到人民的正常生产生活。这些严重的污染事件使得世界上包括中国在内的许多国家开展了大规模空气颗粒物研究，研究涵盖了空气颗粒物浓度的变化特征、污染源的排放特征、化学组成特征、来源解析、空气颗粒物对大气能见度的影响及空气颗粒物对人体健康的危害等诸多方面。

森林是陆地生态系统的主体，对生态环境的好坏具有重要的影响。森林利用其独特的器官和结构滞留颗粒物这一特点已引起了越来越多科学工作者的关注，并逐渐成为生态学和环境科学的研究热点。该系列著作是余新晓教授及其团队多年研究成果的集中总结，是在国家林业局林业公益性行业科研重大专项等项目的支撑下完成的。该著作的重大研究成果以首都圈森林生态系统定位观测研究站和环境监测站为主要研究平台，内容全面翔实，为国内首次对森林调控 PM_{2.5} 等颗粒物的过程机理进行了系统分析，填补了森林生态和环境领域研究的一些空白。

该系列著作利用野外观测和室内分析相结合的手段，阐述了空气颗粒物在森林内的时空变化规律；通过重量法测定叶片滞留颗粒物，浓度梯度法监测垂直梯度颗粒物浓度变化，得到不同树种的滞尘差异和 PM_{2.5} 等颗粒物在森林生态系统中的沉降速率和沉降通量，并将北京市不同区域、不同尺度城市绿地定量化，建立了通过气溶胶反演 PM_{2.5} 等颗粒物与植被覆盖的关系，这些为城市森林的合理配置、提高现有林木滞尘能力提供了理论支撑。

我国在森林对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控研究中起步较晚，但近些年来，通过我国科学家的不懈努力及他们在国际交流合作中的不断学习和吸取经验，已经在这方面取得了重要进展。余新晓教授该系列著作的出版，毫无疑问会大大提高人们

对于森林在防霾治污领域重要性的认识。为此，特向目前在林业和环境领域研究森林调控颗粒物的科研人员、研究生、实验技术人员及生态环境建设工作者推荐这套目前国内最系统、最全面的专业参考书。

李文华
2016 年 10 月

前 言

近年来,随着我国社会经济和城市化进程的快速发展,环境污染问题愈发严重,以灰霾污染为特征的复合型污染日益凸显,治理大气颗粒物污染已迫在眉睫。以PM_{2.5}为代表的颗粒物污染物尤其吸引大众关注,其主要成分有灰尘、铵盐、硝酸盐、硫酸盐、重金属、微量元素、多环芳烃、水分及夹杂在其中的病菌等。PM_{2.5}可以进入支气管等下呼吸系统,并可进入血液输往全身,对人体健康造成严重危害。

现阶段对于PM_{2.5}等颗粒物的研究可分为几个方面:①PM_{2.5}等颗粒物本身的研究,包括分布特征、组成、来源等;②PM_{2.5}等颗粒物监测方法与仪器的研究;③PM_{2.5}等颗粒物危害的研究;④森林植被对PM_{2.5}等颗粒物的作用研究。其中,前三类研究较为深入,第四类研究则处于起步阶段。森林植被对于颗粒物污染物的调控作用已经引起了越来越多的关注。森林可以通过覆盖地表减少颗粒物的来源,通过叶面吸附直接捕获颗粒物,通过改善微气象条件促进颗粒物沉降等不同途径,发挥降低颗粒物的独特滞尘功能,进而使空气中悬浮颗粒浓度减小。森林是由单个植物个体组成的群体,由于植物叶片独特的表面结构和润湿性,叶片可以截取和固定大气颗粒物,因此森林对削减PM_{2.5}等颗粒物起着重要作用。森林调控大气颗粒物是一个复杂的过程,大气颗粒物在通过森林下垫面的过程中,由于森林复杂的枝叶结构改变了大气颗粒物最初的空气动力运动方式,因此,大气颗粒物经过布朗扩散、拦截、惯性碰撞和重力沉降等运动方式,最终被森林滞留或重新“逃逸”到大气中。由于受技术条件、科学认识等因素限制,以往研究只是针对森林对大气颗粒物某一运动过程。本书在前人研究的基础上系统研究了森林调控PM_{2.5}等颗粒物机制的四种作用:阻滞、吸附、沉降和吸入。其中,吸入作用由植物自身生理特征决定,所占比例很小,故调控作用方式主要为吸附、沉降、阻滞三种。在此基础上,量化了从叶片到单株等不同尺度森林调控PM_{2.5}等颗粒物的滞尘量。在空间尺度上,利用气溶胶光学厚度反演PM_{2.5}等大气颗粒物浓度,预测过去和将来一段时间大气颗粒物的时空变化规律,并建立大气颗粒物与植被覆盖的关系。

本书通过把森林滞留PM_{2.5}等颗粒物的能力定量化,筛选出不同典型区域有效治理PM_{2.5}等颗粒物的适宜树种,研建森林阻滞不同来源PM_{2.5}等颗粒

物的优化配置的理论与技术,为解决以灰霾污染为特征的复合型污染和治理大气颗粒物污染提供一种绿色手段,并为指导城市森林建设和景观绿化等提供理论参考。

余新晓

2016年10月

目 录

序

前言

第 1 章 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的调控	1
1.1 引言	1
1.2 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的调控过程	3
1.2.1 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的影响过程概念模型	5
1.2.2 森林植被调控空气颗粒物扩散综合平衡方程模型	7
1.2.3 影响森林植被调控颗粒物的因素	12
1.3 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的调控机理	19
1.3.1 森林植被对大气颗粒物的沉降机制	19
1.3.2 森林植被对大气颗粒物的阻滞机制	26
1.3.3 森林植被对大气颗粒物的吸附机制	27
1.4 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物调控的主要作用方式	30
1.4.1 沉降作用的测定方法	30
1.4.2 阻滞作用的测定方法	34
1.4.3 吸附作用的测定方法	36
1.4.4 三种作用方式对比	40
1.5 森林植被对大气颗粒物沉降、阻滞和吸附作用的关系	40
第 2 章 森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的沉降作用	44
2.1 不同地区森林植被对 PM _{2.5} 的干沉降速率和沉降量的影响	44
2.1.1 不同地区森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率和沉降量日变化	44
2.1.2 不同地区森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率和沉降季节变化	46
2.1.3 不同地区森林植被 PM _{2.5} 沉降速率和沉降通量年变化	48
2.2 不同类型森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率	50
2.2.1 不同类型森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率日变化	50
2.2.2 不同类型森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率季节变化	52
2.2.3 不同类型森林植被 PM _{2.5} 的干沉降速率年变化	53
2.3 森林植被对 EC 干沉降速率的影响	54
2.3.1 不同地区森林植被对 EC 干沉降速率的影响	54

2.3.2	不同类型森林植被对 EC 干沉降速率的影响	57
2.4	森林植被对 OC 干沉降速率的影响	60
2.4.1	不同地区森林植被对 OC 干沉降速率的影响	60
2.4.2	不同类型森林植被对 OC 干沉降速率的影响	62
第 3 章	森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的阻滞作用	67
3.1	带状人工林内的空气颗粒物浓度变化特征	67
3.1.1	带状人工林内空气颗粒物浓度的年变化特征	67
3.1.2	带状人工林内空气颗粒物浓度的季节分布特征	69
3.1.3	带状人工林内空气颗粒物浓度分布的日变化特征	74
3.1.4	典型天气下的带状人工林内空气颗粒物浓度的日变化特征	81
3.2	带状人工林对空气颗粒物的阻滞功能	87
3.2.1	带状人工林对空气颗粒物阻滞功能的年变化特征	87
3.2.2	带状人工林对空气颗粒物阻滞功能的季节变化特征	89
3.2.3	带状人工林对空气颗粒物阻滞效率的日变化特征	92
3.3	片状人工林内空气颗粒物浓度的变化特征	98
3.3.1	片状人工林内空气颗粒物浓度的年变化特征	98
3.3.2	片状人工林内空气颗粒物浓度的季节特征	100
3.3.3	片状人工林内外空气颗粒物浓度的日变化特征	107
3.3.4	典型天气下的片状人工林内空气颗粒物的日变化特征	115
3.4	片状人工林对空气颗粒物的阻滞功能	120
3.4.1	片状人工林对空气颗粒物阻滞功能的年变化特征	120
3.4.2	片状人工林对空气颗粒物阻滞功能的季节变化特征	122
3.4.3	片状人工林对空气颗粒物阻滞效率的日变化特征	127
3.5	人工林结构与阻滞功能模型	132
3.5.1	带状人工林结构与阻滞功能模型	133
3.5.2	带状人工林结构与阻滞功能耦合模型	143
3.5.3	片状人工林结构与阻滞功能模型	143
3.5.4	片状人工林结构与阻滞功能耦合模型	154
3.6	以阻滞空气颗粒物为目的的适宜人工林结构	155
3.6.1	适宜的带状人工林结构	155
3.6.2	适宜的片状人工林结构	159
第 4 章	森林植被对 PM _{2.5} 等颗粒物的吸附功能	165
4.1	乔木叶片对不同粒径颗粒物的吸附分析	166
4.1.1	叶表面吸附颗粒物的水溶性组分分析	166

4.1.2	叶表面吸附不同粒径颗粒物的季节变化	168
4.1.3	蜡质层吸附不同粒径颗粒物的季节变化	173
4.1.4	乔木叶片对不同粒径颗粒物的吸附情况综合分析	177
4.2	灌木叶片对不同粒径颗粒物的吸附分析	179
4.2.1	叶表面吸附颗粒物的水溶性组分分析	179
4.2.2	叶表面吸附不同粒径颗粒物的季节变化	179
4.2.3	蜡质层吸附不同粒径颗粒物的季节变化	181
4.2.4	灌木叶片对不同粒径颗粒物的吸附情况综合分析	182
4.3	草本和藤本植物叶片对不同粒径颗粒物的吸附分析	182
4.3.1	叶表面吸附颗粒物的水溶性组分分析	182
4.3.2	叶表面吸附不同粒径颗粒物的季节变化	183
4.3.3	蜡质层吸附不同粒径颗粒物的季节变化	184
4.3.4	草本和藤本植物叶片对不同粒径颗粒物的吸附情况综合分析	186
4.4	植物叶片吸附颗粒物能力与叶面微结构的关系	186
4.4.1	植物叶片上表面微结构特征与不同粒径颗粒物	188
4.4.2	植物叶片下表面微结构特征与不同粒径颗粒物	193
4.5	树皮和树枝对不同粒径颗粒物的吸附分析	197
4.5.1	树皮吸附不同粒径颗粒物的季节变化	198
4.5.2	多年生树枝吸附不同粒径颗粒物的季节变化	199
4.5.3	一年生树枝吸附不同粒径颗粒物的季节变化	201
4.5.4	与叶片对不同粒径颗粒物的吸附比较	203
4.6	单株植物对不同粒径颗粒物的吸附分析	204
4.6.1	单株植物对颗粒物吸附量的整体情况	204
4.6.2	单株植物对 PM _{2.5} 的吸附量分析	206
4.6.3	单株植物对 PM ₁₀ 的吸附量分析	208
4.6.4	单株植物对 TSP 的吸附量分析	209
第 5 章	北京市典型城市绿地及森林对 PM _{2.5} 等颗粒物的调控效应	211
5.1	北京市典型森林公园对 PM _{2.5} 等颗粒物的阻滞效应	211
5.1.1	北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 日阻滞量的估算	215
5.1.2	北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 季节、年阻滞量的估算	215
5.2	北京市不同区县森林及城市绿地对 PM _{2.5} 等颗粒物的吸附效应	216
5.3	北京市不同环路区域森林及城市绿地对 PM _{2.5} 颗粒物的阻滞效应	218
5.3.1	北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 日阻滞量的估算	218
5.3.2	北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 季节阻滞量的估算	218

5.3.3 北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 年阻滞量的估算	219
5.4 典型人工造林工程(平原百万亩造林)对 PM _{2.5} 颗粒物的阻滞效应	219
5.4.1 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 日、季节阻滞量的估算	219
5.4.2 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 年度阻滞量的估算	220
5.5 北京市典型森林公园对 PM _{2.5} 颗粒物的沉降效应	220
5.5.1 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 日沉降量的估算	221
5.5.2 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 季节沉降量的估算	221
5.5.3 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 年度沉降量的估算	222
5.6 北京市不同区县森林及城市绿地对 PM _{2.5} 颗粒物的沉降效应	223
5.6.1 北京市不同行政区森林植被对 PM _{2.5} 日沉降量的估算	223
5.6.2 北京市不同行政区森林植被对 PM _{2.5} 年沉降量的估算	224
5.7 北京市不同环路区域森林及城市绿地对 PM _{2.5} 颗粒物的沉降效应	224
5.7.1 北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 日沉降量的估算	224
5.7.2 北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 季节沉降量的估算	225
5.7.3 北京市不同环路绿地对 PM _{2.5} 年度沉降量的估算	226
5.8 典型人工造林工程(平原百万亩造林)对 PM _{2.5} 颗粒物的沉降效应	226
5.8.1 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 日滞留量的估算	226
5.8.2 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 季节沉降量的估算	226
5.8.3 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 年度沉降量的估算	227
5.9 北京市典型森林公园对 PM _{2.5} 颗粒物的吸附效应	228
5.9.1 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 日吸附量的估算	228
5.9.2 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 季节吸附量的估算	228
5.9.3 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 年度吸附量的估算	229
5.10 北京市不同区县森林及城市绿地对 PM _{2.5} 颗粒物的吸附效应	229
5.10.1 北京市不同行政区森林植被对 PM _{2.5} 日吸附量的估算	229
5.10.2 北京市不同行政区森林植被对 PM _{2.5} 季节吸附量的估算	230
5.10.3 北京市不同行政区森林植被对 PM _{2.5} 年度吸附量的估算	231
5.11 典型人工造林工程(平原百万亩造林)对 PM _{2.5} 颗粒物的吸附效应	231
5.11.1 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 日吸附量的估算	231
5.11.2 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 季节吸附量的估算	232
5.11.3 北京市平原造林工程对 PM _{2.5} 年度吸附量的估算	232
5.12 北京市典型森林及绿地滞尘总量估算	233
5.12.1 北京市城市公园绿地对 PM _{2.5} 滞尘总量的估算	233
5.12.2 北京市不同区县森林及城市绿地对 PM _{2.5} 滞尘总量的估算	233

5.12.3 北京市不同环路区域森林及城市绿地对 PM _{2.5} 滞尘总量的估算	234
5.12.4 典型人造林工程对 PM _{2.5} 滞尘总量的估算	235
第 6 章 北京市 PM_{2.5} 浓度时空变化与植被覆盖格局的关系	236
6.1 北京市 PM _{2.5} 浓度时空变化特征	236
6.1.1 PM _{2.5} 浓度时间变化特征	236
6.1.2 PM _{2.5} 浓度空间变化特征	238
6.2 PM _{2.5} 浓度与气象因素的关系	241
6.2.1 气象因素时间变化特征	241
6.2.2 不同季节大气颗粒物浓度与气象因素的关系	242
6.3 PM _{2.5} 浓度与土地利用类型的关系	245
6.3.1 土地利用时空变化特征	246
6.3.2 PM _{2.5} 浓度的空间分布	248
6.3.3 与土地利用类型的关系	254
6.3.4 基于 LUCC 的 PM _{2.5} 浓度与林地覆盖率的关联分析	260
参考文献	269

第 1 章 森林植被对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控

1.1 引言

空气颗粒物 (atmospheric particulate matter) 是大气中存在的各种固态和液态颗粒状物质的总称, 也称为大气气溶胶 (atmospheric aerosols) (Hinds, 1999)。根据粒径大小空气颗粒物可分为总悬浮颗粒物 TSP (total suspended particulate, 空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$)、可吸入颗粒物 PM₁₀ (inhalable particles, 空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$)、细颗粒物 PM_{2.5} (fine particulate matter, 空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$)和超细颗粒物 PM₁ (ultrafine particles, 空气动力学当量直径 $\leq 1\mu\text{m}$)。空气颗粒物污染是中国各大城市的主要污染问题之一, 空气颗粒物会对植被的生长造成伤害, 对人体、动物等健康具有很大的危害作用。吸附在植被器官上的空气颗粒物会引起机械性烧伤、降低植被叶片的光合作用效率, 严重影响植被生长; 研究发现 PM₁₀ 对人体有毒害作用, 会对呼吸系统造成炎症和氧化损伤, 会对心血管系统造成影响, 导致人体的机体生理功能、免疫功能逐渐下降直至死亡等一系列急慢性危害 (Seaton et al., 1999)。PM_{2.5} 中富集有害物质比 PM₁₀ 更多, 且在空气中存留的时间长于 PM₁₀, 人体呼吸系统对 PM_{2.5} 的吸收率也相对较高, 因此, 对人体健康的影响也更严重。世界卫生组织曾经声明, 在心血管和呼吸系统疾病死亡终点的队列研究中存在有力证据证明细颗粒物比其他粒径更大的颗粒物有更严重的危害 (WHO, 2003)。颗粒物中的有机碳、元素碳、硝酸盐含量与血管死亡和呼吸死亡呈正相关关系, 因此来自化石燃料燃烧的 PM_{2.5} 及其所含各成分对健康具有相当大的影响, 其中细颗粒物中的硝酸盐含量与总死亡和心血管死亡有较为密切的相关性 (Cao et al., 2012)。PM_{2.5} 等颗粒物已经成为国际社会和人民群众关注的焦点, 有效调控和消除颗粒物是现阶段急需解决的重大问题。目前许多国家都制定了颗粒物的大气环境质量标准, 以保护动植物和人体健康。美国环境保护署于 1995 年设置的环境空气质量标准已经明确规定了 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度标准 (Kleiner, 1997)。2012 年 2 月, 我国国务院同意发布新修订的《环境空气质量标准》, 增加了 PM_{2.5} 监测指标, 并于 2016 年全面实施。目前, 北京市已全面系统地开展了 PM_{2.5} 常规监测, 全市建立了 35 个 PM_{2.5} 监测站, 并在北京市环保监测中心网站上实时发布 PM_{2.5} 研究性监测的小时浓度数据。

森林可通过覆盖地表减少颗粒物的来源、通过叶面吸附直接捕获颗粒物、通

过改善微气象条件促进颗粒物沉降等不同途径,发挥降低颗粒物的独特滞尘功能,使空气中悬浮颗粒浓度减小。植物叶片独特的表面结构和润湿性,使得叶片通过截取和固定大气颗粒物的方式成为颗粒物的主要载体。森林是由单个植物个体组成的群体,因此森林是削减城市大气颗粒物的重要措施。

森林对削减大气颗粒物、改善空气质量具有明显作用。北京市城区树木一年能够消除空气中 772t 的 PM10 (Yang et al., 2005)。Nowak (1994) 通过研究美国芝加哥城市植被的滞尘效应,发现当植被覆盖率达到 11% 时,PM10 滞留量为 234t/a,空气质量平均每小时提高 0.4%。墨西哥中部地区城市森林每年减少大气中 PM10 的量超过 100t,相当于研究区年度人为排放的 2% (Baumgardner et al., 2012)。美国萨克拉门托市城市森林对 PM10 的日清除率达 2.7t,占人为排放的 1%~2% (Scott et al., 1998)。而在全美国,城市乔灌木每年消除 215kt PM10 (Nowak et al., 2006)。英国植物每年阻滞吸附 385 695~596 916t PM10,减少死亡人数 5~7 人,减少呼吸系统疾病入院病例 4~6 例 (Powe and Willis, 2004)。唐明 (2011) 以北京市城区为研究区域,分析了可吸入颗粒物与土地覆盖的关系,结果显示植被覆盖率和绿地百分比与可吸入颗粒物浓度呈负相关关系,海淀区和石景山区植被覆盖率最大,颗粒物浓度也最小。McDonald 和 Bealey (2007) 模拟了英国西米德兰兹郡和格拉斯哥郡空气中 PM10 与植被覆盖率的关系,模拟结果表明,当植被覆盖率由 3.7% 提高到 16.5% 时,PM10 的浓度将下降 10%,每年消除 10t 大气中的 PM10,当植被覆盖率达到理论最大值 54% 时,PM10 浓度下降 26%,每年消除 PM10 的质量达 200t。以色列类似研究发现,当植被覆盖增加 19%~25%,PM10 浓度在有可比性的城市地区之间都减少了 5%~20% (Freiman et al., 2006)。当森林植被覆盖率增加时,对颗粒物的阻滞吸附能力也增强。

如何在城市中有限的空间内使植物发挥更大的生态功能已经得到了越来越多的关注。北京市经过十三个阶段大气污染控制措施的实施,大气环境质量逐年得到改善。2012 年,北京市环境空气中二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂) 和可吸入颗粒物 (PM10) 年平均浓度值分别为 0.028mg/m³、0.052mg/m³ 和 0.109mg/m³,二氧化硫和二氧化氮年平均浓度达到国家空气质量二级标准,可吸入颗粒物年平均浓度值超过国家二级标准 9%。此外,随着对控制粗颗粒物有效性的不断提高,细粒子 (PM2.5) 在颗粒物中所占的比例日趋上升,而且细粒子中含有高浓度的有机物、硫酸盐和硝酸盐等二次成分,对人体健康构成很大威胁。北京市发布的空气治理八项措施中,其中一项就是发展城市绿化工作,充分发挥植被对空气质量的调节作用。

国家林业局经过充分调研,在 2013 年启动了林业行业性公益项目——森林对 PM2.5 等颗粒物的调控作用研究。依托国家林业局森林生态系统定位观测研究站网 (CFERN),选择若干具有良好森林研究积累和特色的核心站或重点站,在北

京、广州等大城市展开，统筹城市城区和郊区，以阻滞吸收 PM2.5 等颗粒物为目标，分析植被阻滞吸收 PM2.5 等颗粒物的生态机制；提出代表区域调控 PM2.5 等颗粒物的适宜树种；在生态系统尺度上定量分析和评价森林阻滞吸收 PM2.5 等颗粒物的功能，确定森林对 PM2.5 等颗粒物影响的时空分布特征，最终完成森林对 PM2.5 调控技术的集成模式研究。

1.2 森林植被对 PM2.5 等颗粒物的调控过程

植被对大气颗粒物的清除过程可以分为以下三个阶段：①颗粒物通过湍流扩散等空气动力作用传输到树木附近，这一过程受到风速的影响很大。②颗粒物在准流层的传输过程，这一过程通过布朗运动、截留、碰撞、沉降等因素随机收集于树叶表面、树干、枝条等部位，部分大气颗粒物被滞留在植物体表面，其中大部分通过气孔吸收、雨水冲刷进入土壤，在一定气象条件下部分颗粒物会再排放与再悬浮，某些树叶表面特性（如黏液等）会将部分颗粒物滞留在树叶表面。该过程受到很多因素的影响，包括大气中污染物的浓度水平、边界层湍流传输的强度、污染物的物理化学特征、植物对污染物的吸收和捕捉能力等。③部分超细颗粒物通过气孔吸收等渠道进入植物体内。这部分吸收效果取决于植物叶表气孔部分的表面阻抗。

颗粒物的粒径不同，植被对其清除的机制也有差异，如图 1-1 所示（Erisman and Draaijers, 1995）。

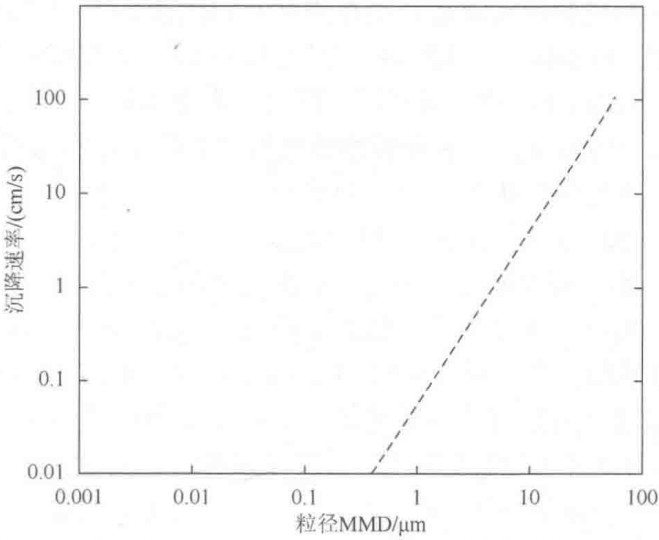


图 1-1 按树林树冠层颗粒物干沉降速率与颗粒物质量中值直径（MMD）的相关图

对于 MMDs 在 0.1~1.0 μm 的颗粒物而言,颗粒物的清除过程主要是通过从自由大气层到下垫面的湍流过程,这一过程的沉降强度取决于风速和下垫面的粗糙度。MMDs 小于 0.1 μm 的颗粒物,主要靠布朗扩散清除,效率与颗粒物的大小成反比;对于 MMDs 在 1~10 μm 的颗粒物,清除效率随着粒径的增大而迅速升高。这一部分的清除机制主要是拦截和碰撞。而对于 MMDs 大于 10 μm 的颗粒物,重力沉降是主要的清除机制。

Milton 等 (2004) 对树冠拦截作用的信息进行整合分析,指出叶面积指数 LAI 对拦截沉降颗粒物的影响,通过对落叶类植物和针叶类植物在不同树冠高度的颗粒物沉积量上的比较结果可以看出,针叶类植物比落叶类植物得到的沉积量大,原因在于针叶类植物的叶面积指数 LAI 约为落叶类的两倍。Molina-Aiz 等 (2006) 利用风洞实验得出 4 种不同作物在低风速下压降与风速和叶面密度之间的关系,并得出相关的阻力系数 CD ($CD=0.15\sim0.35$),同时指出在较高风速 ($u>2.5\text{m/s}$) 下,阻力系数会受到叶片尺寸及叶片形状的影响。Guan 等 (2003) 从宏观角度研究防风林的阻力系数与光学孔隙率和空气动力学孔隙率之间的关系,指出模型随着孔隙率的增加,阻力系数减小,并得出阻力系数与孔隙率之间的关系式。该关系式的提出为后续防风林的研究奠定了基础。

目前针对树和树叶阻力特性的研究有许多。Lee (2000) 利用 CFD 软件,通过 $k-\varepsilon$ 湍流模型获取树冠风速与压力之间的关系。Gross (1987) 通过简化三维树冠模型,利用 CFD 技术研究单棵树周围流场的变化,结合气象条件 (风速、温度等) 对不同树冠特性 (树干长度、树冠直径、树冠高度和孔隙率) 进行模拟,同时结合风洞实验进行对比,由单棵树周围的流场得到风速对动量和能量之间转换的作用。Endalew 等 (2009) 的模型较 Gross 的模型更为精细,将树枝等结构可视化,利用 CFD 技术对树冠周围的流场模拟进行深入的分析,通过理论模拟和实际实验的对比分析为颗粒物的捕集效率研究起到重要作用。Okajima 等 (2012) 通过建立树叶模型,利用边界层理论研究了树叶表面的强迫对流特性。Duman 等 (2014) 利用拉格朗日随机分布模型说明了大气边界层内树的风力衰减和湍流扩散。Baldocchi (2010) 指出树叶的边界层厚度会对阻力、质量和动量传递产生影响,较厚的树叶边界层会延缓动量和能量等的传递,且叶片尺寸大小会对叶片阻力产生很大影响。Cescatti 和 Marolla (2004) 利用现场测量的方法研究树冠阻力系数与湍流强度的关系。在流场中影响树叶阻力特性的因素很多,Molina-Aiz 等 (2006) 提出压力降是植物叶片密度、叶片尺寸及有效阻挡面积的函数。Raupach 和 Thom (1981) 认为风洞实验中单片树叶会随着叶位角 (叶子平面与水平方向之间的夹角) 和湍流强度及大小发生变化。Lake (1977) 指出叶位角会影响叶子的截留机制。Petroff 等 (2008, 2009) 主要从理论上分