重庆市森林的滞尘效应及净化大气功能

唐 茜
(重庆人文科技学院, 重庆 401524)

摘 要:[目的] 研究和比较重庆市主要森林(阔叶混交林、针阔混交林、柏木林、针叶混交林和落叶松林)的滞尘效应和净化大气功能,为重庆市森林生态系统的保护和预警提供科学依据。[方法] 针对重庆市主要森林类型所提供的负离子、滞尘、吸收和转化的大气污染物,开展连续 3 a 的动态监测。[结果] 重庆市不同森林滞尘能力差异显著($p<0.05$),年平均滞尘量基本表现为:阔叶混交林>针阔混交林>柏木林>针叶混交林>落叶松林;叶面尘中滞留的颗粒物中大多数是 TSP(总悬浮微粒),同时不同林分对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均有一定量的吸收,降尘物中 $PM_{2.5}$,PM_{10} 和 TSP 相对含量均以阔叶混交林最高;不同林分降尘粒径主要分布在 2.5~100 μm,叶面降尘中颗粒物粒径集中分布在 100 μm 以下(占 99%以上);不同林分负氧离子和正氧离子数均表现为:阔叶混交林>落叶松林>针阔混交林>针叶混交林>柏木林。不同林分滞尘价值量、吸收 SO_2 价值量、吸收 HF 价值量和吸收 NO_x 价值量依次表现为:阔叶混交林>落叶松林>针阔混交林>针叶混交林>柏木林。[结论] 重庆市阔叶混交林粉尘污染状况较为严重,但同时阔叶混交林具有较高的净化大气功能。

关键词:重庆市;森林;滞尘效应;净化大气
文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2019)05-0301-07 **中图分类号**:Q948.11, S718.55

文献参数:唐茜. 重庆市森林的滞尘效应及净化大气功能[J]. 水土保持通报,2019,39(5):301-307. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.043; Tang Qian. Dust retention and air purification capacities of different forest types in Chongqing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):301-307.

Dust Retention and Air Purification Capacities of Different Forest Types in Chongqing City

Tang Qian
(*Chongqing College of Humanities, Science and Technology, Chongqing* 401524, *China*)

Abstract: [Objective] We studied the dust retention capacity and air purification abilities of different forests (mixed broad-leaved forest, mixed coniferous and broad-leaved forest, mixed cypress forest, mixed coniferous forest and deciduous pine forest) in Chongqing City, which provides scientific basis for the protection and early warning about destruction of forest ecosystems in Chongqing City. [Methods] Spatial and temporal monitoring were carried out on the main forest types, which indicated that the forests providing negative oxygen ions, dust retention, and absorption and transformation of air pollutants in Chongqing City. [Results] The dust retention capacity of these forests was significantly ($p<0.05$) more than non-forested areas, and the average dust catching quantity was in order of mixed broad-leaved forest > mixed coniferous and broad-leaved forest > mixed cypress forest > mixed coniferous forest > deciduous pine forest. The foliar dust retention of particles in most was total suspended particulate (TSP), while PM_{10} and $PM_{2.5}$ had a certain amount of adsorption. The dust relative content of $PM_{2.5}$, PM_{10} and TSP in mixed broad-leaved forest was the greatest. The dust particle size adsorbed by different green plants ranged from 2.5 to 100 μm, most concentrated under 100 μm (more than 99%). The number of negative oxygen ions and positive oxygen ions produced was highest in the mixed broad-leaved forest > deciduous pine forest >mixed coniferous and broad-leaved forest

收稿日期:2019-01-04 **修回日期**:2019-04-04
资助项目:重庆市高等教育学会高等教育科学研究项目"基于特色小镇建设促进高校双创人才培养研究"(CQGJ17129B2);重庆市教育委员会人文社会科学研究项目"基于文脉传承的重庆古村镇文化景观保护研究:以重庆北碚金刚碑古镇为例"(17SKG235)
第一作者:唐茜(1984—),女(汉族),重庆市开县人,硕士,讲师,主要从事植物生态学研究。E-mail:Tangqian_84@163.com。

> mixed coniferous forest > mixed cypress forest, and the value of dust retention, SO_2, HF and NO_x absorption was the greatest in the mixed broad-leaved forest > deciduous pine forest > mixed coniferous and broad-leaved forest > mixed coniferous forest > mixed cypress forest. [Conclusion] The dust pollution in the mixed broad-leaved forest in Chongqing City is serious, but at the same time, the mixed broad-leaved forest had a strong air purification capacity.

Keywords: Chongqing City; forest; dust retention capacity; purify air

环境污染是伴随人类工业化与城市化的不断发展而带来的必然结果,对生物有机体的生命活动造成了不同程度的影响与威胁,大气中的粉尘污染是环境污染的重要构成[1-2],目前中国多个城市均出现了不同程度的大气粉尘污染,灰霾天气在多个城市均出现,对人们的身体健康造成了很大威胁[3-5]。重庆市为典型的生态脆弱区,是长江上游重要的生态屏障,出现了严重的大气粉尘超标现象[5-6]。本文以重庆市为例,研究可吸入颗粒物中细颗粒不断增加的现象,研究重庆市不同森林类型的叶片滞尘量,为重庆市发挥森林的环境保护功效提供指导意见[7-8]。

森林是陆地生态系统的重要构成部分,对整个生态系统具有重要的影响作用,具有多种不同的树种[9],由于植被类型的差异,对生态环境发挥着不同程度的影响作用。森林中每时每刻均发生大量的物质循环与能量转换,具有大量的资源、生物与能源,能够有效贮碳并蓄水[10]。能够阻挡、过滤、吸附大气中的颗粒物与粉尘,具有显著的自净功能,能够有效净化空气、减少阳光辐射、调节气候、改善空气湿度。在目前环境污染治理中应当充分发挥森林的重要作用[11-12]。

长期以来,由于人们对森林资源的重要性认识不够,对森林资源采取了大量掠夺式的开采和粗放型的管理方式,导致了森林面积逐渐减少,森林质量随之下降,森林生态系统提供的各种服务功能减弱[13]。随着对环境资源可持续性发展机制研究的深入,人们逐渐意识到维持和保育生态系统的重要性,尤其是森林生态系统服务功能是实现社会经济可持续发展的基础之一[14-15]。在过去人们只注重了森林系统直接提供物质产品的功能,而忽视了其生态服务功能,对森林系统采取了掠夺和破坏性经营,从而导致森林生态系统的面积和质量严重下降,致使森林系统的生态服务功能严重削弱。

针对森林所提供的负离子、滞尘、吸收转化大气污染物功能,本研究选取重庆市歌乐山的主要森林类型(阔叶混交林、针阔混交林、柏木林、针叶混交林和落叶松林),开展连续 3 a 的动态监测,研究和比较了主要森林滞类型尘效应及净化大气功能,以期引起人们对歌乐山森林生态系统的保护和重视,同时也为重庆市森林生态系统预警提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然地理概况

重庆市为中亚热带温润季风气候区,具有超过 300 d 的无霜期,高于 18 ℃的年平均气温及 1 000 mm 年均降水量,虽然整体上降雨量较为充沛,但是降雨具有明显的季节差异。海拔高度从 73.1 m 至 2 796.8 m,差异较大。水土流失面积 4.35×10^4 km^2,占据总体面积的 52.8%,面临着较为严重的生态环境问题。

重庆市具有较为重要的生态位置,区域内具有三峡库区,为长江流域的重要地区,具有丰富的水资源,要求重庆市响应国家生态文明的建设需求,积极优化森林生态系统的建设,从生态功能、结构、空间分布格局、质量等层面进行优化。

重庆市具有常绿阔叶林、常绿阔叶灌丛、暖性针叶林、竹林等多种植被类型,森林资源极为丰富,排在全国前列。本次研究选取针阔混交林、针叶混交林、阔叶混交林、柏木林、落叶松林等森林类型,以 2015,2016 及 2017 年时间点进行研究。其基本特征如表 1 所示。

表 1 重庆市森林基本特征

森林类型	高度/m	冠幅/m	茎粗/cm	叶面积指数	比叶重/(g·cm^{-2})
阔叶混交林	16.5±2.3	7.9±0.6	15.3±2.1	9.8±0.9	23.5±2.6
针叶混交林	15.6±2.1	6.5±0.9	11.7±1.9	5.6±0.6	16.3±2.4
针阔混交林	15.3±1.5	8.2±1.1	12.6±2.3	8.6±1.2	21.7±1.8
落叶松林	11.3±1.3	4.1±1.6	10.5±1.5	6.1±0.8	15.2±1.3
柏木林	9.8±1.0	4.9±0.7	13.2±1.7	6.3±1.1	11.7±1.2

1.2　试验方法

1.2.1　叶片滞尘量测定　由于中国环境技术层面的研究起步较晚,因此针对植物叶片滞尘量的研究主要局限在一定的范围内,运用范围不够广泛。本文在研究中对其采用了“干洗法”称量方式研究。操作过程中为研究设置一个装有蒸馏水的锥形瓶,将成熟叶片封存于其中,将下叶片上的附着物浸泡在蒸馏水之中,为了保证叶片中的尘粒能够充分溶解于水中,要求借助于一定的物质不断搅拌,进行时长 2 h 的毛刷冲洗,使得叶子中的尘粒能够充分溶解在水中。之后借助于镊子夹出叶片,将浸泡液使用滤纸进行过滤,进行温度 60 ℃,时长 12 h 的烘干操作,在烘干前后分别进行 2 次称重,两次称重的差值即为降尘颗粒物重量。叶面积滞尘量测量过程中采用叶面积测定仪,以 W/A(g/m^2)表示[16]。

1.2.2　叶面尘粒径测定　将样品置于 65 ℃烘箱中烘干至恒重,称取 2 g 样品过 40 目筛,1.0 g 溶解于 300 ml 蒸馏水,并使其充分扩散和溶解,粒度分析仪进行粒径分析,PM_{10},$PM_{2.5}$和悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)浓度测定用微电脑激光粉尘仪[17]。

1.2.3　负离子数目　负离子和林分平均高采用重庆生态观测网络长期观测的数据。负离子费用(K 负离子)根据台州科利达电子有限公司生产的适用范围 30 m^2(房间高 3 m),功率为 6 W,负离子浓度 1.00×10^6 个/cm^3,使用寿命为 10 a。

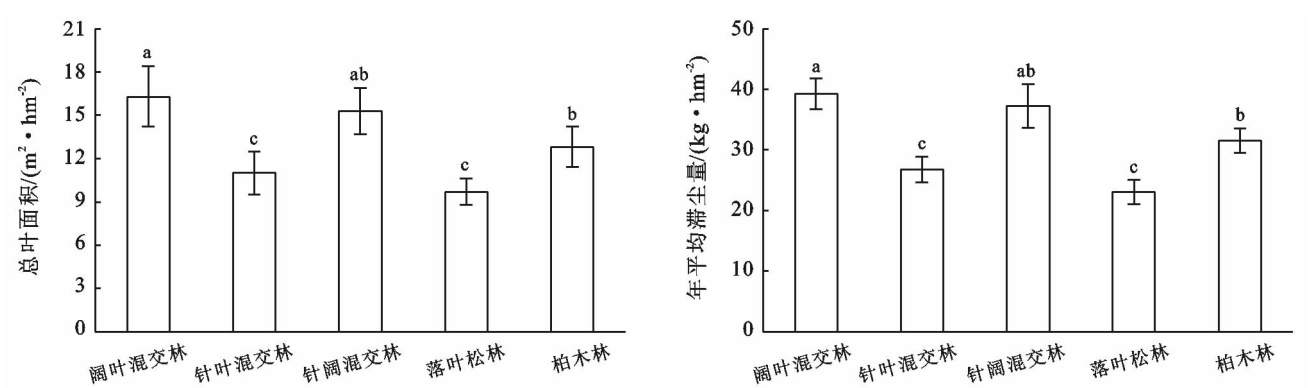
1.3　数据处理

统计分析:Microsoft Excel 2007 进行数据的统计和整理,Spss 18.0 进行方差分析和统计学检验,LSD 多重比较(显著水平设置 $p<0.05$),单因素方差分析(one-way ANOVA)比较其差异显著性。

2　结果与分析

2.1　重庆市森林滞尘能力比较

本研究分别对重庆市森林滞尘全年滞尘量进行测定,比较不同植物滞尘能力大小。由图 1 可知,不同林分滞尘能力存在显著的差异($p<0.05$),植物总叶面积依次表现为:阔叶混交林>针阔混交林>柏木林>针叶混交林>落叶松林,其中阔叶混交林和针阔混交林差异不显著($p>0.05$),针叶混交林和落叶松林差异不显著($p>0.05$);年平均滞尘量依次表现为:阔叶混交林>针阔混交林>柏木林>针叶混交林>落叶松林,其中阔叶混交林和针阔混交林差异不显著($p>0.05$),针叶混交林和落叶松林差异不显著($p>0.05$)。



注:相同小写字母表示在 0.05 水平差异不显著,下同。

图 1　重庆市森林滞尘滞尘能力比较

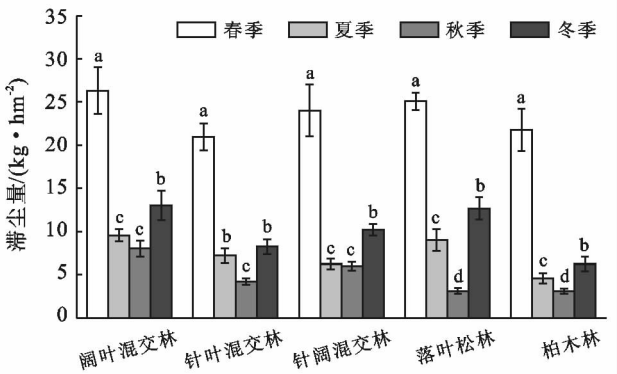
2.2　重庆市森林滞尘能力季节变化

对重庆市森林进行季节(春、夏、秋、冬)滞尘量连续的测定,结果如图 2 所示。不同季节滞尘量方差分析表明,季节变化对植物滞尘能力的大小影响显著($p<0.05$),由图 2 可知,重庆市森林滞尘滞尘量基本表现为:春季>冬季>夏季>秋季,并且春季显著高于冬季、夏季和秋季($p<0.05$),而夏季和秋季差异不显著($p>0.05$)。同一季节基本表现为:阔叶混交林>针阔混交林>柏木林>针叶混交林>落叶松林;阔叶混交林滞尘量变化范围在 8.03～26.32 kg/hm^2 之间,针叶混交林滞尘量变化范围在 4.23～20.98 kg/hm^2 之间,针阔混交林滞尘量变化范围在 6.01～24.02 kg/hm^2 之间,落叶松林滞尘量变化范围在 3.12～25.08 kg/hm^2 之间,柏木林滞尘量变化范围在 2.47～21.78 kg/hm^2 之间。

2.3　重庆市森林滞尘叶面降尘粒径

由图 3 可知,重庆市森林滞尘降尘粒径主要分布在 2.5～100 μm 之间,叶面降尘中颗粒物粒径集中分布在 100 μm 以下(占 99%以上),说明了降尘物主要为在大气中经一定距离漂移的 TSP。一般认为,PM_{10}(<10 μm)是危害人类健康的最主要颗粒物,而$PM_{2.5}$(<2.5 μm)则是能直接进入人体肺部导致肺泡发炎的颗粒物。由图 3 可知,重庆市森林滞尘降尘物

中 $PM_{2.5}$，PM_{10} 和 TSP 相对含量均以阔叶混交林最高，植物降尘物中 $PM_{2.5}$ 含量范围在 0.54～1.25 μm 之间，依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞落叶松林＞针叶混交林＞柏木林，阔叶混交林和针阔混交林差异不显著（$p>0.05$），针叶混交林和柏木林差异不显著（$p>0.05$）；重庆市森林滞尘降尘物 PM_{10} 范围在 035.1～52.6 μm 之间，依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞落叶松林＞针叶混交林＞柏木林，阔叶混交林最高（$p<0.05$），针叶混交林和柏木林差异不显著（$p>0.05$）；TSP 范围在 62.1～73.2 μm 之间，依次表现为：阔叶混交林＞落叶松林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林，其中阔叶混交林、落叶松林、针阔混交林差异不显著（$p>0.05$），显著高于针叶混交林和柏木林（$p<0.05$）；粒径范围在 3.2～10.3 μm 之间，依次表现为：阔叶混交林＞落叶松林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林，其中阔叶混交林、落叶松林、针阔混交林差异不显著（$p>0.05$），显著高于针叶混交林和柏木林（$p<0.05$）。



注：不同小写字母表示不同季节间差异显著（$p<0.05$）。

图 2 重庆市森林滞尘滞尘能力季节变化

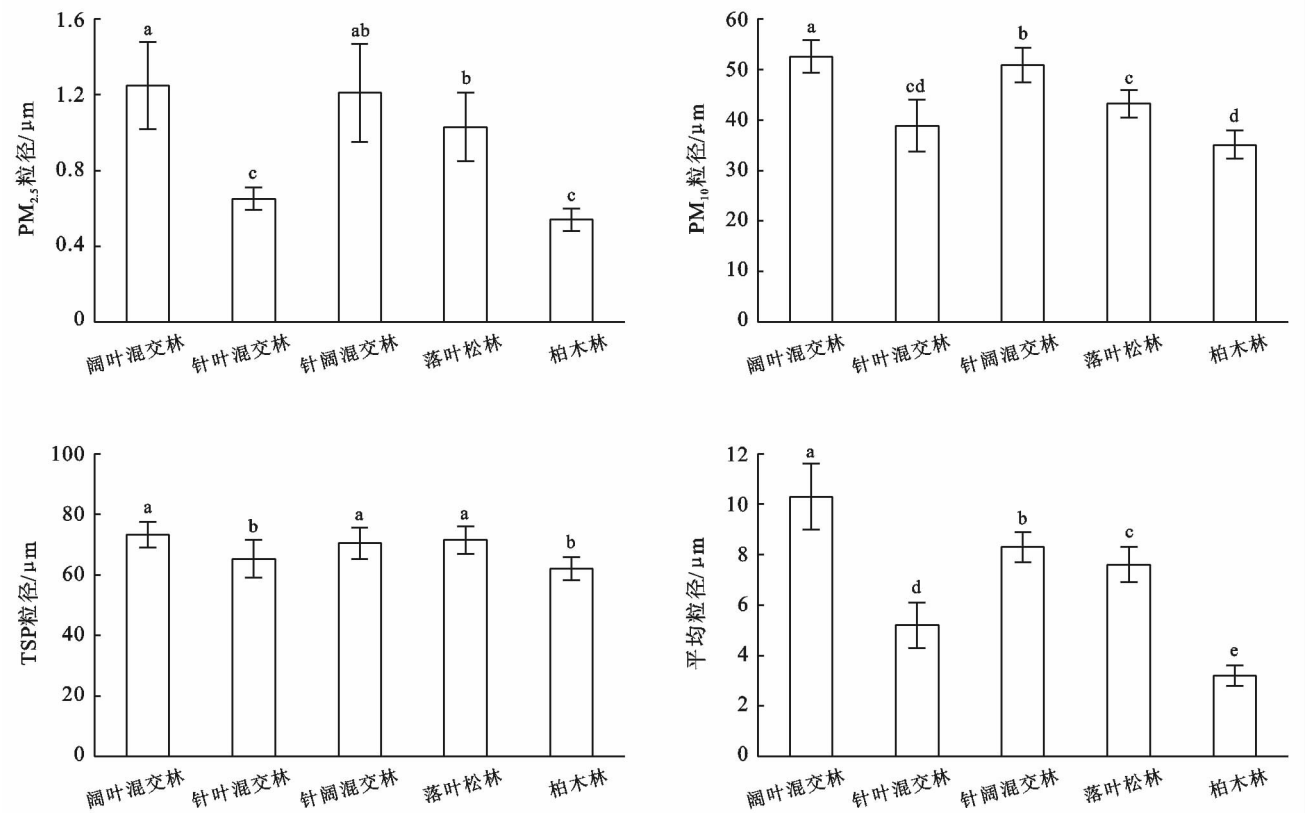


图 3 重庆市森林滞尘叶面降尘的粒径分布

2.4 重庆市森林滞尘提供负氧离子功能物质量评估

根据对不同区域森林负氧离子现场长期监测结果，重庆市不同林分类型负氧离子数详见图 4。各林分类型负氧离子数介于 1 653～2 380 个/cm^3 之间，依次表现为：阔叶混交林＞落叶松林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林，其中阔叶混交林和针阔混交林差异不显著（$p>0.05$），针叶混交林和落叶松林差异不显著（$p>0.05$）；各林分类型正氧离子数介于 1 298～1 862 个/cm^3 之间，依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞落叶松林＞针叶混交林＞柏木林，阔叶混交林显著高于其他林分（$p<0.05$），针叶混交林和柏木林差异不显著（$p>0.05$）。

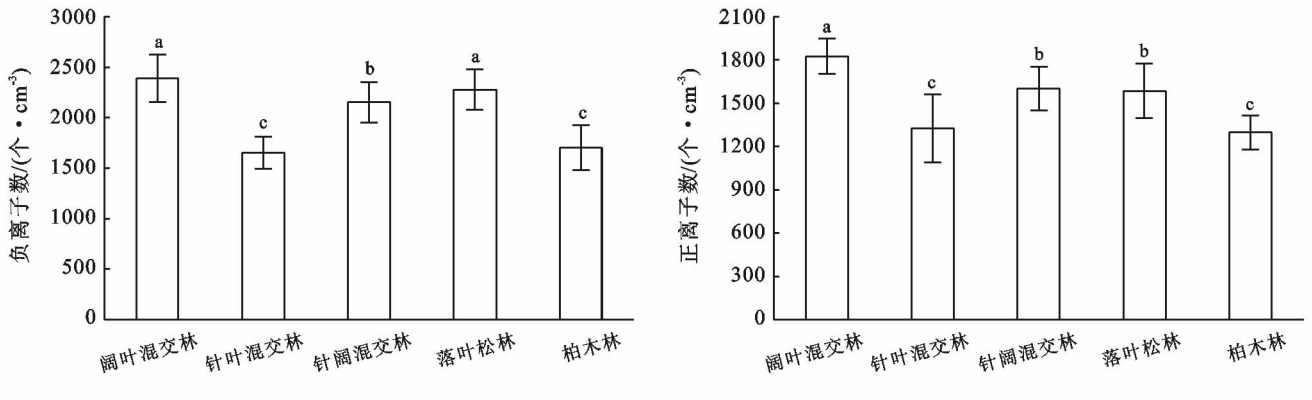


图 4　重庆市森林滞尘提供负氧离子功能物质量

2.5　重庆市森林滞尘净化大气环境功能物质量

如图 5 所示,不同林分提供负离子数目为 $5.80\times10^{23}\sim1.16\times10^{24}$ 个/cm^3 之间,依次表现为:阔叶混交林>落叶松林>针阔混交林>针叶混交林>柏木林,其中阔叶混交林和针阔混交林差异不显著($p>0.05$),针叶混交林和柏木林差异不显著($p>0.05$);吸收 SO_2 变化范围在 8.09～16.32 g/m^3 之间,依次表现为:阔叶混交林>针阔混交林>落叶松林>针叶混交林>柏木林,其中落叶松林和针阔混交林差异不显著($p>0.05$),其他林分差异显著($p<0.05$);吸收 HF 变化范围在 0.37～1.26 g/m^3 之间,依次表现为:阔叶混交林>针叶混交林>针阔混交林>落叶松林>柏木林,针叶混交林和针阔混交林差异不显著($p>0.05$),其他林分差异显著($p<0.05$);吸收 NO_x 变化范围在 0.21～0.85 g/m^3 之间,依次表现为:阔叶混交林>针阔混交林>落叶松林>针叶混交林>柏木林,针阔混交林和落叶松林差异不显著($p>0.05$),其他林分差异显著($p<0.05$)。

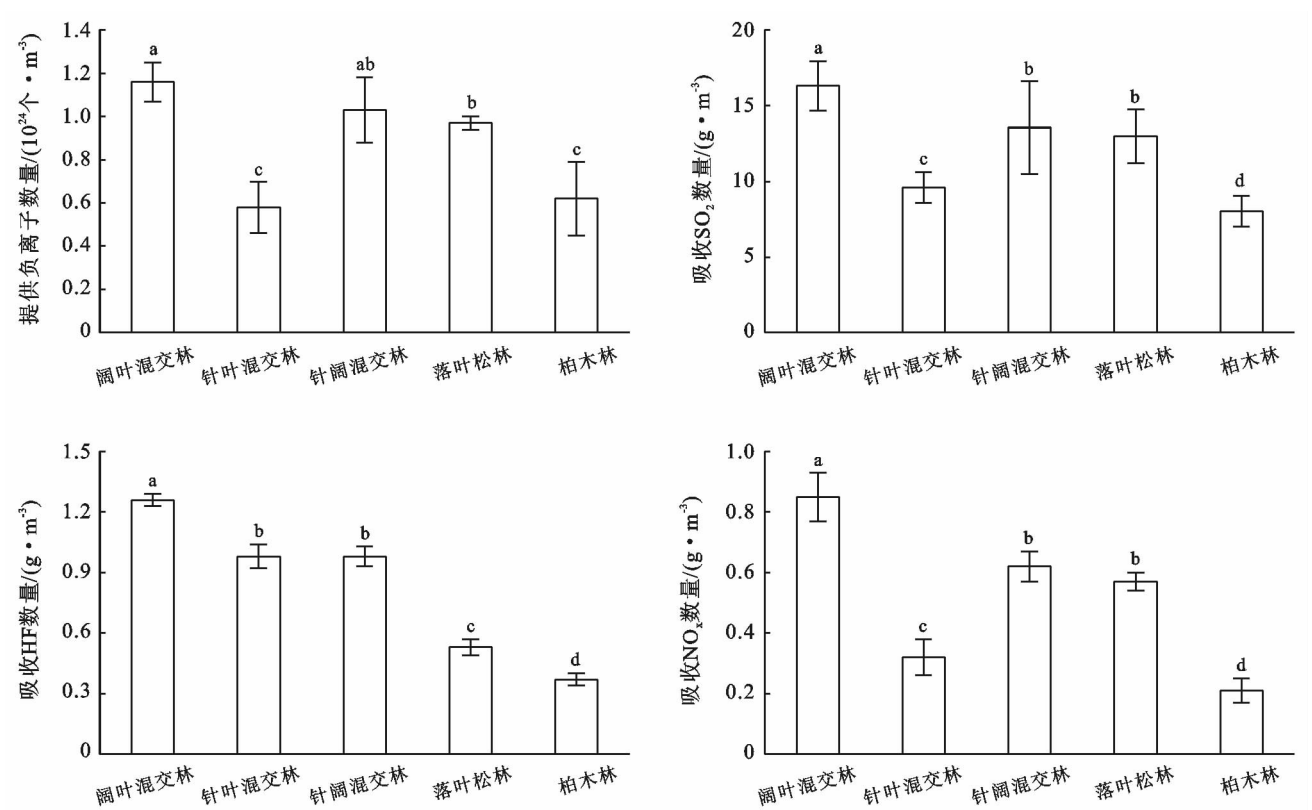


图 5　重庆市森林滞尘净化大气环境功能物质量

2.6　重庆市森林净化大气环境功能价值量评估

根据物质量评估结果计算,将重庆市不同林分类型的物质量转化为价值量(如图 6 所示)。不同林分滞尘价值量变化范围在 $3.24\times10^5\sim6.53\times10^5$ 元/a

之间，依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞落叶松林＞针叶混交林＞柏木林；吸收 SO_2 价值量变化范围在 3.90×10^4～1.35×10^5 元/a 之间，依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞落叶松林＞针叶混交林＞柏木林；吸收 HF 价值量变化范围在 4.30×10^4～9.20×10^4 元/a 之间，依次表现为：落叶松林＞阔叶混交林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林；吸收 NO_x 价值量变化范围在 1.50×10^4～4.20×10^4 元/a 之间，依次表现为：落叶松林＞阔叶混交林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林。

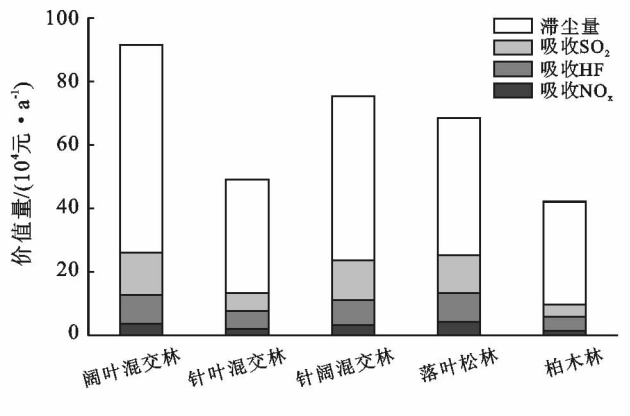


图 6 重庆市森林净化大气环境功能价值量评估

3 讨 论

作为空气质量监测的重要手段之一，森林的叶片滞尘量可在一定程度上反映微环境中空气颗粒物含量。近年来关于植物滞尘效应的研究报道较多[18-19]，植物叶片滞尘过程是一个复杂的动态过程，叶片滞尘与粉尘脱落同时进行，此过程中，植物叶片滞尘作用始终处于主导地位，说明了植物滞尘能力的绝对性[20]。就本研究中不同林分平均滞尘量而言，年平均滞尘量依次表现为：阔叶混交林＞针阔混交林＞柏木林＞针叶混交林＞落叶松林，其中阔叶混交林和针阔混交林差异不显著（$p>0.05$），针叶混交林和落叶松林差异不显著（$p>0.05$）。主要是由于，阔叶混交林叶和针阔混交林的叶面积较大，单位面积能够滞留的粉尘较多，同时还能够进行很好的光合作用，进而滞尘能力也较为突出，而针叶林叶面积较小，能够滞留粉尘量也相对较少。此外，不同林分滞尘量基本表现为：春季＞冬季＞夏季＞秋季，相同季节基本表现为阔叶混交林＞针阔混交林＞柏木林＞针叶混交林＞落叶松林，主要是由于秋季空气干燥，悬浮颗粒较多和大气湿度较小，而春季，雨水充沛，空气湿度大，不利于叶片对粉尘的滞留，加之风力等外界因素的干扰，从而影响了植物的滞尘量[14-15]，大气颗粒物通过干、湿沉降到植物的叶表面，而地面扬尘等尘源物质也将积累和形成[16-17]。由此表明阔叶混交林是滞尘能力优良的城市树种，因受植物单叶面积大小、叶片组织结构以及树冠密集度、整株叶量多少等因子制约，各滞尘量指标间不尽一致。同时，植物滞尘作用与人类活动及植物本身属性有关，此外，还与植物的株型、叶片特性、分枝方式有关[21-22]。

本研究虽然分析了滞尘的试验数据，但对影响植物叶片滞尘效应的因素，尚未建立全面的数学模拟模型，在未来的研究工作中，需要将更多可能的影响因素进行综合分析研究。叶片表面细微结构对颗粒物产生的吸附作用在大多数树种中均存在，由于细微结构的差异性，不同细微结构对颗粒物的支持固定作用效果也不同。本研究中阔叶混交林滞尘量最大，粒径偏小，一定程度上反映了阔叶混交林粉尘污染状况较为严重，并且阔叶混交林 $MP_{2.5}$ 与 MP_{10} 的比例较高，不同林分滞尘量与叶面尘可吸入颗粒物百分比变化不一致，可能是因为各样点大气环境中颗粒物组分不同。污染物为可吸入颗粒物，不同林分叶片所吸收的灰尘中，$PM_{1.0}$ 均占了一定比例，说明不同林分均能够滞留可吸入颗粒物，改善环境质量[23-24]。本研究中，不同林分提供负离子数目、吸收 SO_2 价值量、吸收 HF 价值量和吸收 NO_x 价值量依次表现为：阔叶混交林＞落叶松林＞针阔混交林＞针叶混交林＞柏木林，一定程度上反映了阔叶混交林粉尘污染状况较为严重，同时阔叶混交林具有较高的净化大气价值[25-27]。

本次研究连续 3 a 对重庆市森林生态系统净化大气功能等效益进行了评估，综合来看，在重庆市未来的林业生态建设中，应考虑阔叶混交林为主导的森林生态系统，因地制宜选育和营造适当树种，在林业可持续发展的同时，兼顾生态系统服务功能的提高。当前，由于技术手段的限制，获取森林生态系统各服务功能实时更新数据比较困难。在今后的工作中，还需要进一步结合国家退耕还林导向，加强各个森林生态系统功能的时间动态变化规律，以及生态过程、结构和功能之间相互作用的研究。

4 结 论

森林生态系统为人类提供了大量的木质林产品和非木质林产品，并且具有净化大气环境、涵养水源、保持水土、固碳释氧等多种功能，对维持生物多样性、保护生态环境、减免自然灾害和调节自然生态平衡等具有重要作用。本研究开展了连续 3 a 的动态监测，研究和比较重庆市主要森林滞尘效应及净化大气功

能。结果显示,不同林分滞尘能力差异显著($p<0.05$),年平均滞尘量基本表现为:阔叶混交林>针阔混交林>柏木林>针叶混交林>落叶松林;而叶面尘中滞留的颗粒物中大多数是 TSP(悬浮颗粒物),同时不同林分对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均有一定量的吸收,降尘物中 $PM_{2.5}$,PM_{10} 和 TSP 相对含量均以阔叶混交林最高;不同林分降尘粒径主要分布在 2.5～100 μm,叶面降尘中颗粒物粒径集中分布在 100 μm 以下(占 99%以上),降尘物主要为在大气中经一定距离漂移的 TSP;不同林分负氧离子和正氧离子数、提供负离子数目、吸收 SO_2 价值量、吸收 HF 价值量和吸收 NO_x 价值量均表现为:阔叶混交林>落叶松林>针阔混交林>针叶混交林>柏木林,由此表明阔叶混交林具有较高的进化大气功能。

此外,森林生态系统是一个动态系统,其功能价值也具有动态性,由于技术手段的限制,获取森林生态系统实时更新数据比较困难。本次研究只针对 2015—2017 年重庆市森林生态系统净化大气功能效益价值进行评估,部分生态服务功能由于受计量方法和手段以及研究数据难以获得等因素影响,内容还不够全面。在今后的工作中,我们需要不断的探索和提高森林生态服务功能的评估方法,更需要进一步加强其功能的时间动态变化规律,以及森林生态过程、生态系统结构和森林生态系统服务功能效益之间的相互关系。

[参 考 文 献]

[1] 徐惠,翟钧,刘振全,等. 兰州市大气环境污染现状及治理对策研究[J]. 环境保护科学,2003,29(5):4-5.

[2] 任阵海,万本太,苏福庆,等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究,2004,17(1):1-6.

[3] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报,2015,35(11):3452-3462.

[4] 郑健. 2001—2011 年乌鲁木齐市大气环境质量模糊数学综合评价[J]. 环境污染与防治,2014,36(1):28-34.

[5] 陈天增,葛艳丽,刘永春,等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响[J]. 环境科学,2018,39(2):478-492.

[6] 张宏莉,仇雁翎,葛元新,等. 中国大气环境中溴代阻燃剂污染特征研究进展[J]. 环境科学与技术,2016,39(3):192-199.

[7] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学,2015,36(4):1154-1163.

[8] 薛文博,吴舜泽,杨金田,等. 城市环境总体规划中大气环境红线内涵及划定技术[J]. 环境与可持续发展,2014,39(1):14-16.

[9] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2014,34(1):216-223.

[10] 程中倩,袁红姗,吴水荣,等. 树种选择与配置对森林生态系统服务的影响[J]. 世界林业研究,2017,30(1):31-36.

[11] 刘世荣,代力民,温远光,等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营:现状、挑战与展望[J]. 生态学报,2015,35(1):1-9.

[12] 王兵. 生态连清理论在森林生态系统服务功能评估中的实践[J]. 中国水土保持科学,2016,14(1):1-11.

[13] 刘焱序,徐光,姜洪源,等. 东北林区生态系统服务与健康协同分析[J]. 地理科学进展,2015,34(6):761-771.

[14] 杨帆,黄麟,邵全琴,等. 2010 年贵州省南部森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2015,33(3):5-11.

[15] 李国伟,赵伟,魏亚伟,等. 天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报,2015,35(4):984-992.

[16] 范舒欣,晏海,齐石茗月,等. 北京市 26 种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力[J]. 植物生态学报,2015,39(7):736-745.

[17] 杨佳,王会霞,谢滨泽,等. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释[J]. 环境科学研究,2015,28(3):384-392.

[18] 廖莉团,苏欣,李小龙,等. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述[J]. 森林工程,2014,30(2):21-24.

[19] 魏疆,陈学刚,任泉,等. 乌鲁木齐市能源结构调整对冬季大气污染物浓度的影响[J]. 干旱区研究,2015,32(1):155-160.

[20] 杨婷. 大气环境监测质量控制的有效方法探讨[J]. 资源节约与环保,2014(8):82.

[21] 王会霞,石辉,王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化[J]. 生态学报,2015,35(6):1696-1705.

[22] 陈俊刚,余新晓,毕华兴,等. 典型森林树种对大气颗粒物湿沉降的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(4):312-317.

[23] 刘辰明,张志强,陈立欣,等. 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响[J]. 生态学报,2018,38(7):2353-2361.

[24] 凯丽比努尔·努尔麦麦提,玉米提·哈力克,阿丽亚·拜都热拉,等. 阿克苏市街道绿地主要树种滞尘特征及价值估算[J]. 林业科学,2017,53(1):101-107.

[25] 徐晓梧,余新晓,宝乐,等. 模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响[J]. 生态学报,2017,37(20):6785-6791.

[26] 裘璐函,何婉璎,刘美华,等. 杭州市 6 种常见绿化树种滞尘能力及光合特性[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(1):81-87.

[27] 迈迪娜·吐尔逊,玉米提·哈力克,祖皮艳木·买买提,等. 阿克苏市城郊林 10 种果树叶面形态与滞尘量的关系[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):279-283.