

DOI: 10.5846/stxb201902260364

余欣璐, 高吉喜, 张彪. 基于城市绿地滞尘模型的上海市绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 功能评估. 生态学报, 2020, 40(8): - .

She X L, Gao J X, Zhang B. $PM_{2.5}$ removal service of green spaces in Shanghai based on the dust retention simulation on urban vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

基于城市绿地滞尘模型的上海市绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 功能评估

余欣璐¹, 高吉喜², 张 彪^{3,*}

1 中国人民大学, 北京 100872

2 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:绿色空间对大气颗粒物有一定吸收滞留作用,是改善空气环境质量与维护城市生态安全的重要区域。该文基于高分 2 号卫星影像识别 2017 年上海市绿色空间,并利用城市绿地滞尘模型,结合上海市降水、风速等气象数据与空气质量监测数据,评估了绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 功能及其差异。结果表明:2017 年上海市绿色空间面积 3354 km²,可滞留 $PM_{2.5}$ 3533 t,约合单位面积滞留 $PM_{2.5}$ 10.5 kg hm⁻² a⁻¹。从绿色空间类型来看,林地滞留 $PM_{2.5}$ 能力最强,可达 20.2 kg hm⁻² a⁻¹,远高于草地 9.1 kg hm⁻² a⁻¹ 和农田 8.7 kg hm⁻² a⁻¹ 的滞留能力。从季节差异来看,绿色空间夏季滞留 $PM_{2.5}$ 能力最高,然后依次为秋季、春季和冬季。从植被分布格局来看,林草地和农田吸滞 $PM_{2.5}$ 的能力随植被盖度的增加而提高。在区域差异上,崇明区绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 能力最高,其余地区呈现出中心城区低、周边高的趋势。为此建议上海市重点优化中心城区的绿色空间格局,增植立体绿化与高滞尘能力树种。

关键词:绿色空间; $PM_{2.5}$; 滞尘功能; 模拟; 上海

$PM_{2.5}$ removal service of green spaces in Shanghai based on the dust retention simulation on urban vegetation

SHE Xinlu¹, GAO Jixi², ZHANG Biao^{3,*}

1 Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Urban green spaces can intercept particulate matters in the air, and are often served as ecological and economical measures for the urban environment promotion and the ecological security maintenance. However, many studies at present pay more attention to the air purification at the plant scale, and few studies analyze the regional differences on the dust retention function of urban green spaces. Based on the regional dust retention model and combined with the meteorological and particulate characteristics of Shanghai, this paper assessed the $PM_{2.5}$ retention service of green spaces in 2017. The results show that there are 3354 km² green spaces in Shanghai. They could remove 3533 tons of $PM_{2.5}$, with the average retention capacity of 10.5 kg hm⁻² a⁻¹. In Shanghai, the forestland can provide the strongest retention capacity of 20.2 kg hm⁻² a⁻¹. The retention capacity of the grassland and the farmland are both lower with 9.1 kg hm⁻² a⁻¹ and 8.7 kg hm⁻² a⁻¹, respectively. The urban green space in summer shows the strongest dust retention capacity, and descends successively in

基金项目:上海城市生态功能特征指标监测与效益评估技术研究(上海市环保科研项目)

收稿日期:2019-02-26; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbiao@igsnrr.ac.cn

autumn, spring and winter. The retention ability of the woodland, the grassland, and the farmland increases with the increase of the vegetation coverage. In addition, the green spaces in Chongming district present the highest retention capacity of dust $PM_{2.5}$ in 2017, and those in other regions emerge the low value in the central urban and the high value in surrounding areas. Therefore, Shanghai should implement the pattern optimization of the green space structure and the green corridor in the urban area. Besides, Shanghai should increase more vertical greening and plant more trees with higher retention capacity in order to promote the $PM_{2.5}$ removal service.

Key Words: green space; $PM_{2.5}$; dust detention; simulation; Shanghai

近年来随着城市化进程加快,城市空气污染已成为严重环境问题。其中 $PM_{2.5}$ 因其粒径小、质量小、滞留时间长,是雾霾天气形成的最主要因素,也与呼吸道和免疫系统疾病有着直接联系^[1]。比如, Franklin 等^[2]发现,大气中 $PM_{2.5}$ 含量每升高 $10 \mu g/m^3$,全因死亡率、呼吸道疾病死亡率和中风死亡率分别提高 1.21%、1.78% 和 1.03%。因此,减少与控制空气中 $PM_{2.5}$ 浓度已成为城市生态环境质量提升的关键。植物叶片多绒毛、黏性汁液、粗糙突起等结构特征促使其能吸附空气中悬浮颗粒物,而植物群落能降低植被附近风速、增加空气湿度,进一步增强植被对颗粒物的滞留作用,因此城市绿地对大气颗粒物有一定的吸滞功能^[3-7]。在植物叶片或植株尺度上,邱媛等^[8]采用生物量估算和实测相结合的方法,测算了广东省惠州市 4 种主要绿化乔木的滞尘量;Hwang 等^[9]通过气室实验对比,得出了针叶树拦截 $PM_{2.5}$ 的能力远大于阔叶树的结论;Popek 等^[10]发现,不同树种对大气颗粒物的吸附能力相差 10—20 倍;谢滨泽等^[4]、杨佳和王会霞^[7]均探究了白蜡、大叶黄杨、榆树、悬铃木等常见树种的滞尘能力与其叶面微形态结构的关系;赵松婷等^[11]采用采样电镜分析,研究了北京市 29 种园林植物滞留空气污染物的能力;Xu 等^[12]采用清洗称重法确定了 17 种北京城市绿化树木的颗粒物滞留能力。另外,在城市或区域尺度构建模型评估绿地滞留颗粒物功能的研究也日益增多。比如, Tallis 等^[13]基于 UFORE 模型估算伦敦城市树冠层每年可移除 852—2121 t 的 PM_{10} ;Nowak 等^[14]构建城市树木滞尘模型测算发现美国 10 个城市的树木移除 $PM_{2.5}$ 量在 4.7—64.5 t 之间;Selmi 等^[15]则利用 i-Tree Eco 模型量化测算法国斯特拉斯堡(Strasbourg)城市树木年可削减 12 t 的 $PM_{2.5-10}$ 和 5 t 的 $PM_{2.5}$;基于 Nowak 等^[14]的城市树木滞尘模型,刘文平与宇振荣^[16]构建了城市绿地滞尘模型,并应用于北京市海淀区绿色空间的 $PM_{2.5}$ 滞尘服务模拟。

上海是我国长三角的特大城市和全国经济最发达地区,近 40 年来经历了快速城市化过程,大气颗粒物污染问题突出^[17]。积极发挥上海城市绿地的滞尘功能具有重要的现实意义。江畅等^[18]测定发现,上海市典型绿化植物(香樟、二球悬铃木、龙柏和水杉)均对扬尘中 Fe^+ 有明显吸附作用,且龙柏和悬铃木在滞尘过程中对特定离子出现专属吸附特性。贺坤等^[19]分析了上海市 8 种攀缘植物的滞尘效应,发现其滞尘能力与叶面特征有关,叶片滞尘量与周边环境关系密切。不过,上海市域绿色植被滞尘功能的时空差异评估研究不足,制约着城市生态空间规划与建设管理成效。随着上海生态文明建设与全球城市建设目标的确立,完善城乡生态网络空间体系、提升城市生态安全与服务功能成为上海生态化转型的重点举措^[20]。为此,该文采用城市绿地滞尘模型,评估分析上海市绿色空间对 $PM_{2.5}$ 的滞留功能及其时空差异,为上海市生态空间优化与国土空间治理提供参考依据。

1 研究区概况

上海市地处长江三角洲东南缘($30^{\circ}40'—31^{\circ}53' N$, $120^{\circ}51'—122^{\circ}12' E$)、长江和钱塘江入海汇合处。全境除西南部有少数剥蚀残丘外,均为坦荡低平的长江三角洲平原,平均海拔 4 m 左右。上海市属于亚热带季风气候,2017 年平均气温 $17.7^{\circ}C$,日照时间 1809.2 h,降水量达 1388.8 mm,降雨日达 124 d。2017 年上海市行政区总面积 $6340.50 km^2$,分为浦东新区、黄浦区、徐汇区等 16 区(图 1),年末常住人口 2419.70 万人,人口密

度达到 $3816 \text{ 人}/\text{km}^2$,其中黄浦区、虹口区、杨浦区、普陀区等人口密度均超 $2 \text{ 万人}/\text{km}^2$ [21]。

上海市地跨北亚热带和中亚热带,植被以常绿阔叶林与常绿落叶阔叶混交林为主。近年来,上海城市绿化建设加速,2017 年森林覆盖率达到 16.2%,建成区绿化覆盖率达到 38.8%,人均公园绿地面积达到 $8 \text{ m}^2/\text{人}$ [22]。

2017 年上海市环境空气质量指数(AQI)优良天数为 275 d,全年 90 个污染日中,首要污染物为细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的有 23 d。2017 年上海市环境空气中细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)浓度为 $39 \text{ mg}/\text{m}^3$,超出国家环境空气质量二级标准 $4 \text{ mg}/\text{m}^3$,较基准年 2013 年下降了 37.1% [23]。

2 研究方法

2.1 绿色空间识别

城市绿色空间是以土壤为基质、以植被为主体、以人类干扰为特征、且与微生物和动物群落协同共生的人工生态系统 [24]。本文将上海市绿色空间界定为林地、草地和农田组成的绿色开敞空间,由中国资源卫星应用中心陆地观测卫星数据平台的高分辨率遥感影像解译获得,涉及高分 2 号卫星影像数据 38、39 景。首先利用 ENVI 软件完成正射校正、辐射定标、图像融合和大气校正等处理过程,生成配准后高分影像(2 m 分辨率);然后以上海市行政边界为范围,采用人工目视解译的方法,将土地覆被类型分为农田、林地、草地、湿地与建设区,完成分幅矢量化的单元网格解译,最终生成上海市土地覆被解译数据成果(图 2)。

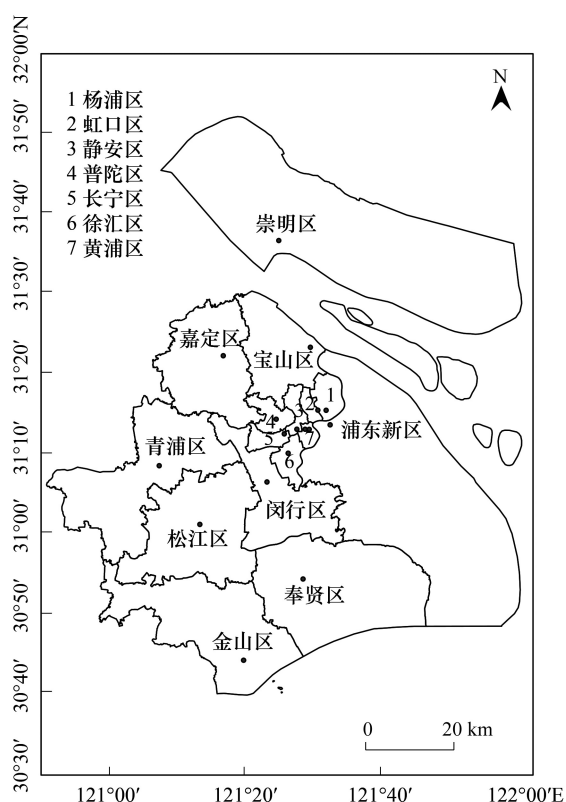


图 1 上海市行政区划图

Fig.1 Zones maps in Shanghai

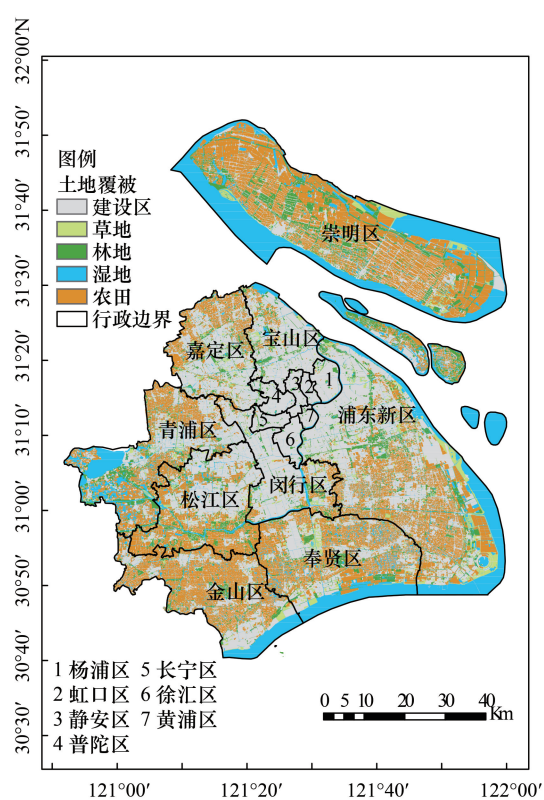


图 2 2017 年上海市土地覆被及绿色空间分布图

Fig.2 Land covers and urban green spaces of Shanghai in 2017

2.2 绿地滞尘模型

绿色植被吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 的功能受多种因素影响。Nowak 等 [14] 在测算美国 10 个案例城市的树木移除 $\text{PM}_{2.5}$ 功能时,提出了一个由污染物浓度和污染物沉降速率共同表征的植被滞尘模型,分别通过计算案例城

市的总叶面积、叶表面 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降速率与再悬浮率,并结合大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度确定林木移除 $\text{PM}_{2.5}$ 量。考虑到颗粒物沉降到叶表面的速率与风速、滞尘返还率密切相关,刘文平等^[16]构建了由污染物浓度、叶面积、叶表面污染物沉降速率与返还率以及滞尘时间共同影响的城市绿地滞尘模型,有助于定量评估城市绿地滞尘功能的时空差异。该文重点关注上海市域绿色植被滞尘功能的时空差异,因此应用该绿地滞尘模型,结合上海市降水、风速等气象数据与空气质量监测数据,估算分析绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 的数量及其差异,计算公式为:

$$Y_{PM} = V \times d \times LAI \times c \times (1 - r) \times T$$

式中, Y_{PM} 为单位面积绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 量 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$), V 为 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降到叶表面的速率 (m/h), d 为 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); LAI 为绿色空间的叶面积指数; c 为绿色空间的植被覆盖度 (%); r 为植被滞尘时向空气中的返还率 (%); T 为滞尘时间 (h)。

2.3 模型参数计算

城市绿地滞尘模型包含空气污染物浓度、污染物沉降速率、滞尘返还率、叶面积指数、植被覆盖度等参数。本研究中各参数的计算与获取途径如下: (1) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从上海市生态环境局获得,为上海市不同监测站点的空气颗粒物监测数据,并统计得到宝山区、崇明区、奉贤区等 16 区的月均浓度; (2) 植被叶表面 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降速率 V 参考自章旭毅等^[25]对上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的干沉降速率测定结果,植被滞尘返还率 r 取自 Nowak 等^[14]不同风速下的返还率表,其中,上海市日均风速由国家气象科学数据共享服务网获得; (3) 叶面积指数 LAI 采用赵燕佩等^[26]建立的上海市生态用地植被覆盖度与 LAI 的回归关系模型计算,绿色空间植被覆盖度由归一化植被指数 (NDVI) 反演得到^[27],其中,上海市春夏秋冬四季 NDVI 分别由 2017 年 4 月 2 日、8 月 24 日、11 月 4 日和 2 月 13 日的遥感影像反演得到; (4) 由于降雨事件对植被滞尘过程有明显影响,该研究以日降雨量 15 mm 作为判断滞尘周期的依据^[28],即日降雨达到或超过 15 mm 时,则计上一次滞尘过程结束,且降雨后第二天重新开始滞尘。此外,植被滞尘存在最大限度,即达到最大限度后滞尘量不再增加^[29-32],该文假设在没有降雨事件发生时,取上述研究的平均值 21 d 作为滞尘饱和时间 T 。

本研究中模型检验主要采用上海市徐汇区和闵行区 10 个样点植被滞尘能力实测值^[33]。首先基于采样点位置确定各样地混合像元组分类型,然后根据样点植被滞尘能力与上海市降尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 比例^[34]测算出滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 能力,并基于土地覆被解译数据利用面积比例加权计算出各样地栅格的 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留能力,最后与模拟估算的各样点 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留能力进行对比验证,线性回归结果达到 0.75,满足本文分析要求。

3 结果分析

评估结果表明,2017 年上海市绿色空间面积 3354 km^2 ,可滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 总量约为 3533 t,约合单位面积绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 10.5 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

3.1 不同类型滞尘差异

2017 年上海市绿色空间面积约为 3354 km^2 ,包括 720 km^2 林地、337 km^2 草地与 2297 km^2 农田。可见,上海市绿色空间组成以农田为主,其面积约占绿色空间总面积的 68%。受绿色空间面积的影响,上海市农田植被可滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 约 1888.42 t/年,占到绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 总量的 53.45%;林地植被年滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 约 1370.80 t,草地植被可滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 约 273.68 t/年,分别占到绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 总量的 38.80% 和 7.75%。不过,单位面积绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均值为 10.5 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,且不同类型绿色空间差异较大(表 1)。其中,林地植被滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 能力最高,年滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 均值为 20.24 kg/hm^2 ,而草地和农田植被滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 能力分别达到 9.11 kg/hm^2 和 8.68 kg/hm^2 ,均不及林地植被滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 能力的一半(图 3),这主要与绿色空间的植被组成特征有关。

3.2 不同季节滞尘差异

城市绿地吸滞大气颗粒物的作用主要依赖于植物叶片,上海市植被以常绿阔叶林与常绿落叶阔叶混交林为主,因此上海市绿色空间基本全年发挥滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 功能。评估结果表明,绿色空间日滞尘量受季节影响显著 ($P < 0.05$)。2017 年 6—9 月上海市绿色空间滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 作用明显,10—12 月、4—6 月以及 1—2 月绿色空间滞

留 PM_{2.5}的功能较低,而2—4月滞留 PM_{2.5}能力最低(图4),原因是此阶段有效降雨事件(日降雨≥15 mm)较少,已达滞尘限度的植被叶片不能重新开始滞尘。可见,2017年上海市绿色空间滞留 PM_{2.5}能力存在明显季节差异(表2)。夏季绿色空间对 PM_{2.5}的滞留能力最高,为27.25 t/d;春季和秋季绿色空间滞留 PM_{2.5}能力分别为11.70 t/d和11.09 t/d,冬季季末与早春阶段绿色空间的滞尘能力最弱,约为2 t/d。根据上海市环境状况公报数据,2017年上海市 PM_{2.5}年均浓度为39 mg/m³,其中,10月份平均浓度最低(24 mg/m³),12月份平均浓度最高(54 mg/m³),因此,上海市绿色空间滞留 PM_{2.5}的功能供给与滞尘功能需求存在一定程度的错位,这与植被生长周期与污染物排放时间有一定关系。

表1 不同类型绿色空间滞留 PM_{2.5}能力的统计检验
Table 1 Variance test of PM_{2.5} absorption capacity of different green space types

绿色空间类型 Green space type	样本数 Sample size/个	平均值 Mean/ (kg/hm ²)	最小值 Minimum/ (kg/hm ²)	最大值 Maximum/ (kg/hm ²)	变异系数 Variable coefficient
林地 Forest	30104	20.24	0.01	71.81	0.16
草地 Grassland	13499	9.11	0.01	24.49	0.24
农田 Farmland	98498	8.68	0.01	26.63	0.25

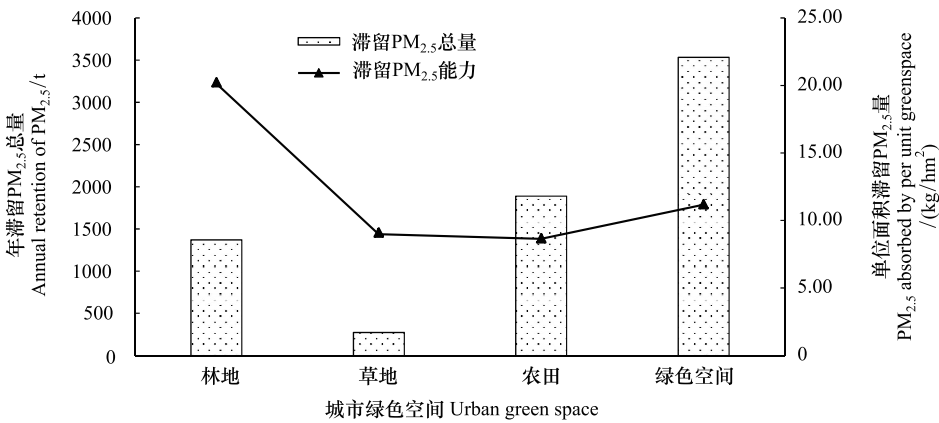


图3 不同类别城市绿色空间滞留 PM_{2.5}功能

Fig.3 PM_{2.5} retention function of different types of urban green space

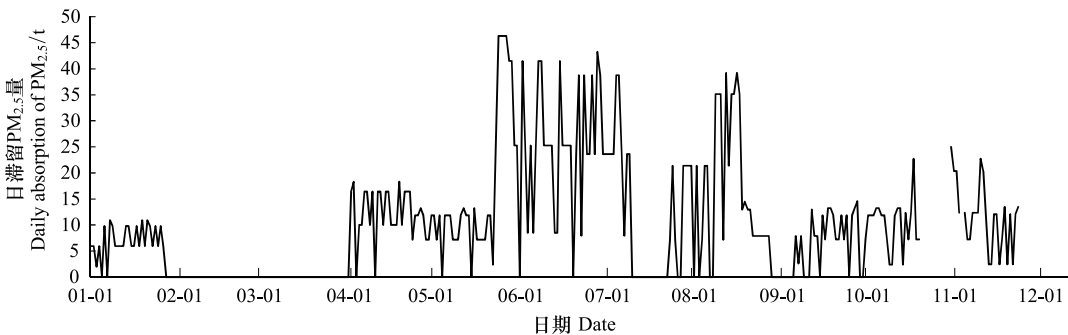


图4 上海市绿色空间 2017 年单日滞留 PM_{2.5}量

Fig.4 The daily amount of PM_{2.5} removal provided by Shanghai's green spaces in 2017

表 2 不同季节绿色空间滞留 PM_{2.5}能力的统计检验

Table 2 Variance test of PM_{2.5} absorption capacity of green space in different seasons

季节 Season	样本数 Sample size/个	平均值 Mean/ (t/d)	最小值 Minimum/ (t/d)	最大值 Maximum/ (t/d)	变异系数 Variable coefficient
春季 Spring	50	11.70	2.40	18.35	0.16
夏季 Summer	70	27.25	7.20	46.30	0.12
秋季 Fall	63	11.09	2.40	25.00	0.20
冬季 Winter	39	7.78	1.99	13.48	0.24

3.3 不同植被盖度的差异

植被覆盖状况对城市绿色空间滞留 PM_{2.5}的功能有明显影响。总体来看,上海市林地、草地和农田吸收 PM_{2.5}的能力均随植被盖度增加而增大,但增加幅度存在明显差异(图 5)。林地植被盖度在 0.6—0.8 之间时,单位面积滞留 PM_{2.5}的能力为 22.87 kg/hm²,约为植被盖度 0.4—0.6 时吸收能力(13.94 kg/hm²)的两倍。高植被覆盖(>0.8)绿色空间年均滞留 16.37 kg/hm²的 PM_{2.5},中度植被覆盖的绿色空间单位面积可滞留 7.43 kg 的 PM_{2.5},而低植被覆盖的区域仅能滞留 4.33 kg/hm²(表 3)。从滞留总量来看,高植被盖度的绿色空间滞留 1567 t PM_{2.5},其次为较高植被盖度的绿色空间,年滞留 PM_{2.5} 1253 t,低覆盖和较低覆盖的绿色空间分别滞留 62 t 和 190 t PM_{2.5},因此,上海市植被盖度 0.6 以上的绿色空间可提供 80%的 PM_{2.5}吸收量。

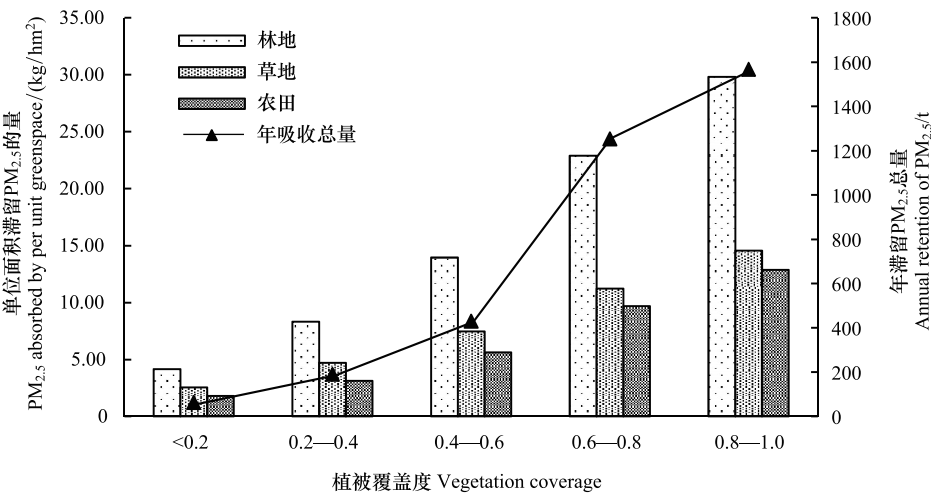


图 5 不同植被盖度城市绿色空间滞留 PM_{2.5}功能

Fig.5 PM_{2.5} retention function of urban green space with different vegetation coverage

表 3 不同植被盖度的绿色空间滞留 PM_{2.5}能力的统计检验

Table 3 variance test of PM_{2.5} absorption capacity of greenbelt with different vegetation coverage

植被覆盖度 Vegetation coverage	样本数 Sample size/个	平均值 Mean/ (kg/hm ²)	最小值 Minimum/ (kg/hm ²)	最大值 Maximum/ (kg/hm ²)	变异系数 Variable coefficient
<0.2(低覆盖 Lowest)	11475	2.42	0.01	27.29	0.69
0.2—0.4(较低覆盖 Low)	19666	4.33	0.43	29.97	0.40
0.4—0.6(中覆盖 Middle)	25308	7.43	1.60	37.04	0.27
0.6—0.8(较高覆盖 High)	43144	13.00	3.59	71.81	0.20
>0.8(高覆盖 Highest)	42508	16.37	6.29	68.37	0.17

3.4 不同区域滞尘差异

2017 年崇明区的绿色空间滞尘总量 1283.31 t, 占到上海市绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 总量的 37.23%, 是上海市绿色空间滞尘功能的最大供给区域。原因主要是该地区农田面积大, 绿色植被密集, 人工建设表面少。浦东新区、青浦区、金山区和松江区的绿色空间分别提供了 13.68%、10.54%、9.83% 和 9.25% 的 $PM_{2.5}$ 滞留量, 是上海市绿色空间滞尘功能的重要供给区域。奉贤区、嘉定区、闵行区和宝山区的绿色空间可分别滞留 291.13 t、191.55 t、95.57 t 和 70.20 t 的 $PM_{2.5}$, 其贡献率均占到市域绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 总量的 2%—8%, 是上海市绿色空间滞尘功能的次要供给区域。而虹口区、黄浦区、静安区、普陀区、杨浦区和长宁区均供给不足 1% 的滞留 $PM_{2.5}$ 总量, 为绿色空间滞尘功能的较低供给区域(图 6)。从单位面积绿地滞留 $PM_{2.5}$ 的能力来看, 长宁区最高, 绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 可达 17.55 kg/hm^2 , 其次为杨浦区、普陀区、青浦区、崇明区, 其绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 能力均大于 12.00 kg/hm^2 , 而静安区、徐汇区、浦东新区等地绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 能力较低, 均小于 10.00 kg/hm^2 (表 4)。因此, 2017 年上海市绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 功能总体呈现为中心城区低、周边高的态势(图 7), 这主要与上海市绿色空间的区域分布特征有关。

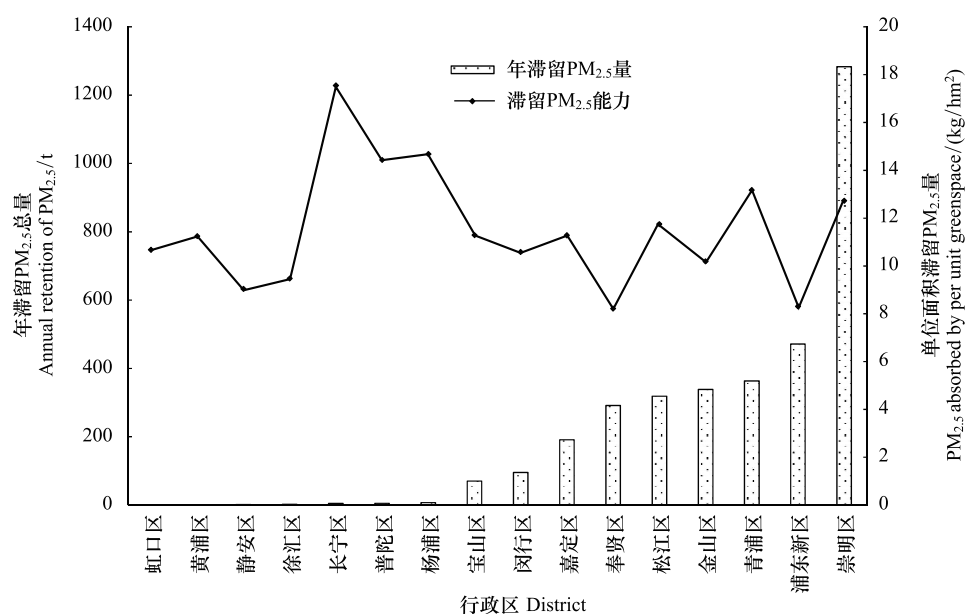


图 6 2017 年上海市各区绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 功能

Fig.6 The $PM_{2.5}$ removal provided by every regional green spaces of Shanghai in 2017

表 4 不同区县绿色空间滞留 $PM_{2.5}$ 能力的统计检验

Table 4 Variance test of $PM_{2.5}$ absorption capacity of greenbelt in different districts and counties

行政区划 District	样本数 Sample size/个	平均值 Mean/ (kg/hm^2)	最小值 Minimum/ (kg/hm^2)	最大值 Maximum/ (kg/hm^2)	变异系数 Variable coefficient
杨浦区	198	14.68	0.02	36.64	0.21
虹口区	25	10.68	0.96	26.46	0.27
静安区	66	9.04	1.61	32.54	0.29
普陀区	165	14.43	0.63	36.71	0.21
长宁区	119	17.55	0.36	40.30	0.18
徐汇区	110	9.48	0.13	38.24	0.32
黄浦区	33	11.25	0.91	36.12	0.27
闵行区	3833	10.58	0.01	63.28	0.28
宝山区	2759	11.29	0.02	41.27	0.26

续表

行政区划 District	样本数 Sample size/个	平均值 Mean/ (kg/hm ²)	最小值 Minimum/ (kg/hm ²)	最大值 Maximum/ (kg/hm ²)	变异系数 Variable coefficient
嘉定区	7816	11.28	0.01	48.41	0.25
浦东新区	25379	8.31	0.01	54.64	0.31
金山区	15176	10.19	0.01	43.54	0.25
松江区	12236	11.75	0.01	66.24	0.24
青浦区	12994	13.17	0.01	71.81	0.24
奉贤区	15835	8.22	0.01	59.82	0.32
崇明区	45349	12.73	0.01	53.06	0.21

4 讨论与结论

4.1 讨论

城市绿色空间对大气颗粒物有一定程度的吸收滞留作用,规划建设绿色空间并积极发挥其滞尘功能也是降低空气污染、改善环境质量的绿色生态措施。该文基于区域绿地滞尘模型,并结合上海市绿地、气象与空气环境特征,评估分析了 2017 年上海市绿色空间滞留 PM_{2.5} 的功能及差异。该研究发现,上海市单位面积林地可滞留 PM_{2.5} 20.2 kg/hm², 稍低于肖玉等^[35] 基于 NDVI 与干沉降模型测算的北京城市绿地可削减 PM_{2.5} 22.71 kg/hm²—33.36 kg/hm² 的结果,原因在于上海市环境空气中颗粒物浓度背景值远低于京津冀地区。此外,该研究发现上海市绿色空间夏季滞留 PM_{2.5} 的能力最大,秋季、春季和冬季滞留 PM_{2.5} 能力依次降低,这与刘文平等^[16] 在北京市海淀区的研究结果相似。

由于城市内部污染物排放与绿色植被分布格局的不同,定量揭示城市绿色空间滞留 PM_{2.5} 的区域差异有助于针对性指导城市绿地规划设计。该研究证实,上海市绿色空间滞留 PM_{2.5} 功能总体呈现为中心城区低、周边高的态势,而上海市人口空间分布格局正好相反,为此,重点优化中心城区的绿地结构与格局、提升与利用绿色空间的滞尘功能具有重要的现实意义。不过,近 40 年的快速城市化过程,使得上海市中心城区已无大面积建设绿地的潜力,而大部分桥柱攀缘植物的滞尘功能明显,且秋季高于春季^[19],因此,大量增加立体绿化有助于解决上海市春秋季节绿色空间滞尘功能不足的问题。同时,上海市空气颗粒物排放来源复杂,应注重利用绿化植被本身的滞尘特性针对性净化滞留大气颗粒物,比如在金属冶炼工业密集分布区可多种植龙柏作为滞尘植物,在化工业聚集区种植悬铃木作滞尘植物,在建筑工地等扬尘产生源则可将各种树种组合种植以形成群落丰富的绿色空间^[18]。

不过该研究也存在一些不足。首先不同绿色空间类型以及不同树种的颗粒物沉降速率差别很大,虽然该研究采用上海市日均风速和他人研究实测数据^[25],但是高度复杂外界环境因素变化可能造成沉降速率差异进而产生较大误差。其次,该文重点关注了上海市农田、林地与草地植被滞留 PM_{2.5} 的功能,事实上城市湿地

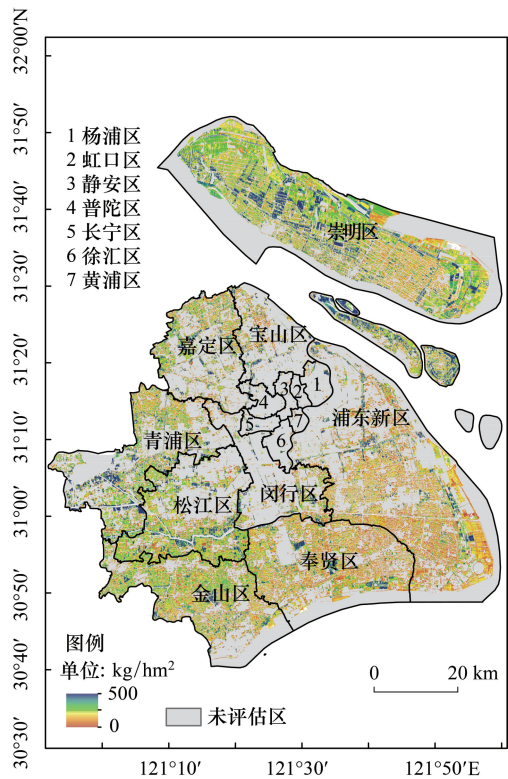


图 7 2017 年上海市绿色空间滞留 PM_{2.5} 能力分布

Fig. 7 The spatial distribution of PM_{2.5} removal capacity by Shanghai's green spaces in 2017

也具有削减大气细颗粒物 PM_{2.5}的作用^[36]。此外,该研究中的绿色空间叶面积指数(LAI)是基于上海地区模型模拟的结果^[26],与上海市绿色空间 LAI 真实值存在一定误差。以上不足均需要未来开展更多的实证研究加以验证与完善。不过,城市绿色空间滞尘功能研究尚处于初步阶段,该研究有助于揭示超大城市绿色空间滞尘功能的时空差异,可为上海市生态空间优化与国土空间治理提供参考依据。

4.2 结论

该研究评估发现,2017 年上海市绿色空间面积 3354 km²,可滞留 PM_{2.5}约 3500 t,合计单位面积可滞留 PM_{2.5}10.5 kg hm⁻² a⁻¹。其中,林地滞留 PM_{2.5}能力最强,远高于草地和农田。不过,夏季绿色空间的滞留 PM_{2.5}功能最为有效,然后依次为秋季、春季和冬季。林地草地和农田吸收 PM_{2.5}的能力随植被盖度增加而明显提高。除崇明岛外,上海市绿色空间吸滞 PM_{2.5}功能呈现出中心低、周边高的区域差异。为此,建议上海市重点优化中心城区的绿地结构与格局,增加立体绿化与栽植高滞尘树种,提升与利用绿色空间的滞尘功能。

参考文献(References):

- [1] Brunekreef B, Holgate S T. Air pollution and health. *The Lancet*, 2002, 360(9341): 1233-1242.
- [2] Franklin M, Zeka A, Schwartz J. Association between PM_{2.5} and all-cause and specific-cause mortality in 27 US communities. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2007, 17(3): 279-287.
- [3] 吕铃钥,李洪远,杨佳楠.植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(2): 524-533.
- [4] 谢滨泽,王会霞,杨佳,王彦辉,石辉.北京常见阔叶绿化植物滞留 PM_{2.5}能力与叶面微结构的关系. *西北植物学报*, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [5] 张志丹,席本野,曹治国,贾黎明.植物叶片吸滞 PM_{2.5}等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2238-2242.
- [6] 王兵,张维康,牛香,王晓燕.北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究. *环境科学*, 2015, 36(2): 408-414.
- [7] 杨佳,王会霞,谢滨泽,石辉,王彦辉.北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 384-392.
- [8] 邱媛,管东生,宋巍巍,Peart M R.惠州城市植被的滞尘效应. *生态学报*, 2008, 28(6): 2455-2462.
- [9] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [10] Popek R, Gawrońska H, Wrochna M, Gawroński S W, Sæbø 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.
- [11] 赵松婷,李新宇,李延明.北京市 29 种园林植物滞留大气细颗粒物能力研究. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1004-1012.
- [12] Xu Y S, Xu W, Mo L, Heal M R, Xu X W, Yu X X. Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12545-12556.
- [13] 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.
- [14] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395-402.
- [15] Selmi W, Weber C, Rivière E, Blond N, Mehdi L, Nowak D. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 17: 192-201.
- [16] 刘文平,宇振荣.北京海淀区绿色空间 PM_{2.5}滞尘服务模拟. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2580-2586.
- [17] 王敏,王卿,苏敬华,黄宇驰,白杨,吴健,阮俊杰,王贺亚,姚佳,邵蕾.上海生态环境容量、发展趋势与生态城市建设. *科学发展*, 2017(02): 104-112.
- [18] 江畅,殷杉,陶士康,朱鹏华,刘春江.上海典型植物叶表滞尘离子组成及差异分析. *环境科学与技术*, 2018, 41(4): 85-90.
- [19] 贺坤,曾阳青,迟娇娇,李向茂,王延洋.上海市高架桥柱攀缘植物滞尘效应研究. *江苏农业科学*, 2018, 46(9): 273-277.
- [20] 王祥荣,谢玉静,蔡元镔,钱敏蕾,李响,徐艺扬.特大型城市上海生态化转型发展的路径与重点举措. *上海城市规划*, 2015, (3): 76-81.
- [21] 国家统计局. 2018 年中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [22] 上海市统计局. 2018 年上海统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [23] 上海市生态环境局. 2017 上海市环境状况公报. 上海: 上海市生态环境局, 2017. <http://sthj.sh.gov.cn/fa/cms/upload/uploadFiles/2018->

06-04/file3194.pdf. 2018-8-20.

- [24] 张彪. 北京市绿色空间及其生态系统服务. 北京: 中国环境出版社, 2016, 2-4.
- [25] 章旭毅, 殷杉, 江畅, 熊峰, 朱鹏华, 周丕生. 上海常见绿化树种叶片上 $PM_{2.5}$ 干沉降速率及影响因素. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2016, (6): 27-37.
- [26] 赵燕佩, 熊丽君, 王敏, 石登荣, 邱是涵. 上海市生态用地属性与空气负离子浓度的关联性. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 322-328.
- [27] 孙鹏森, 刘世荣, 刘京涛, 李崇巍, 林勇, 江洪. 利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据估算叶面积指数(LAI)——以岷江上游为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [28] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 陕西省关中地区主要造林树种大气颗粒物滞纳特征. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1516-1522.
- [29] 王赞红, 李纪标. 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.
- [30] 张家洋, 周君丽, 任敏, 胡海波. 20 种城市道路绿化树木的滞尘能力比较. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(5): 113-120.
- [31] 王蓉丽. 城市常见园林植被滞尘效果差异性研究. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11799-11800, 11874-11874.
- [32] 刘颖, 李朝炜, 邢文岳, 朱昀, 魏景芳. 城市交通道路绿化植物滞尘效应研究. 北方园艺, 2015, (3): 77-81.
- [33] 李莹. 城市植物叶面滞尘光谱特征及估算模型研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [34] 周敏, 陈长虹, 乔利平, 楼晨荣, 王红丽, 黄海英, 王倩, 陈明华, 陈宜然, 李莉, 黄成, 邹兰军, 牟莹莹, 张钢锋. 2013 年 1 月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3118-3126.
- [35] 肖玉, 王硕, 李娜, 谢高地, 鲁春霞, 张彪, 张昌顺. 北京城市绿地对大气 $PM_{2.5}$ 的削减作用. 资源科学, 2015, 37(6): 1149-1155.
- [36] 康晓明, 崔丽娟, 赵欣胜, 李伟, 张曼胤, 魏圆云, 雷茵茹, 马牧源. 北京市湿地削减大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 功能. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2807-2813.