

文章编号:1001—7380(2024)03—0010—06

景观防护林带 PM_{2.5} 与环境因子的关系研究

邱苏梅^{1,2}, 李立文², 万欣^{1,3*}, 邢玮^{1,3}

(1. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 2. 扬州大学园艺园林学院, 江苏 扬州 225009;
3. 江苏扬州城市森林生态系统国家定位观测研究站, 江苏 扬州 225000)

摘要:以长江沿岸的典型景观防护林为研究对象,选取榔榆、乌桕、落羽杉和薄壳山核桃4种纯林类型的景观防护林,于2023年监测PM_{2.5}、风速、风向、光照度、空气湿度、空气温度、气压、土壤温度和土壤湿度的季度变化。发现乌桕防护林带PM_{2.5}质量浓度变化幅度较大,夏季明显低于冬季,而其他3个防护林带PM_{2.5}质量浓度季节变化幅度不大。通过相关性分析发现PM_{2.5}与多个环境因子有相关性,尤其是乌桕防护林带。为了探究各环境因子对PM_{2.5}的影响,该研究引入随机森林模型,结果表明在长江沿岸的典型景观防护林中空气湿度是影响PM_{2.5}质量浓度的主要环境因子。该研究结果为未来建构科学合理的防护林体系提供了理论依据。

关键词:防护林带;PM_{2.5};环境因子;随机森林模型;长江

中图分类号:S727.2;X513;X831

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.03.003

Relationship between PM_{2.5} and environmental factors in landscape shelterbelt

Qiu Sumei^{1,2}, Li Liwen², Wan Xin^{1,3*}, Xing Wei^{1,3}

(1. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China; 2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Jiangsu Yangzhou Urban Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Yangzhou 225000, China)

Abstract: In this paper, with the typical landscape protection forest along the Yangtze River as the research object, four pure forest types of landscape protection forest including *Ulmus parvifolia*, *Sapium sebiferum*, *Taxidium distichum* and *Carya illinoensis* were selected to monitor the season change of PM_{2.5}, wind speed, wind direction, light intensity, air humidity, air temperature, air pressure, soil temperature and soil humidity in 2023. We found that the variation range of PM_{2.5} concentration in *S. sebiferum* shelterbelts was large, which was significantly lower in summer than in winter while the seasonal variation range of PM_{2.5} concentration in the other three shelterbelts was not large. The correlation analysis found that PM_{2.5} was correlated with many environmental factors, especially in *S. sebiferum* shelterbelt. In order to explore the impact of various environmental factors on PM_{2.5}, the random forest model was applied in this study. The result showed that air humidity was the main environmental factor affecting PM_{2.5} concentration in typical landscape shelterbelts along the Yangtze River. The results could provide a theoretical basis for constructing a scientific and reasonable shelterbelt system in the future.

Key words: Shelterbelt; PM_{2.5}; Environmental factor; Random forest model; The Yangtze River

空气颗粒物是评价空气环境质量状况的重要标准,对人类健康有至关重要的影响。PM_{2.5}指环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒

物。有研究表明长期暴露于PM_{2.5}质量浓度超标的空气中,影响身体的多种健康指标,呼吸系统、肺和心脑血管等疾病的发病率大大提高^[1-2]。空气颗粒物浓

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-04-09

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目“江苏长江沿岸景观防护林构建与生态修复技术研究”(CX(19)1004);江苏省林业科技创新与推广项目“江苏高效农田防护林网构建模式研究”(LYKJ[2021]38)、“江苏省森林、湿地定位监测长期科研基地”(LYKJ[2020]21)

作者简介:邱苏梅(2003-),女,四川巴中人,大学本科在读。E-mail:qiusumei1211@163.com

* **通信作者:**万欣(1983-),女,山东济宁人,副研究员,博士。主要从事林业生态科学研究。E-mail:lkywanxin@163.com

度主要受气象因素、特殊天气条件、人为活动及其他污染物排放源的影响。例如,低温情况下空气颗粒物浓度大,这是因为近地表大气形成逆温层,使颗粒物难以扩散^[3-4]。此外,风速能够影响颗粒物粒径,气候干燥,风沙大,空气总悬浮颗粒物多^[5-6]。

防护林是为了保持水土、防风固沙、涵养水源、调节气候、减少污染所经营的天然林和人工林,是以防御自然灾害、维护基础设施、保护生产、改善环境和维持生态平衡等为主要目的的森林群落^[7]。越来越多的研究证明防护林在减少空气颗粒物方面发挥着重要作用。Zhang 等发现“三北”防护林工程对我国北方大气污染物二氧化硫、氮氧化物和 PM2.5 具有一定的吸附和清除作用^[8]。然而不同植物截留和吸附颗粒物的能力有差异,这与植物叶表面微观结构有关。李晓璐等发现,叶表面存在皱褶、密集深沟槽、蜡质和突起等结构的乔木,有利于颗粒物的滞留^[9]。此外,孙应都等认为气孔密度和大小与颗粒物滞留能力有关^[10]。可以看见,大量的研究聚焦于植物叶表面微观结构对于 PM2.5 滞留能力,而关于环境因子对 PM2.5 的影响研究却很少。为了探讨 4 个防护林带 PM2.5 与各个环境因子之间的关系,引入了相关性和随机森林模型进行分析。

随机森林是一种最早于 2001 年由 Breiman 提出的分类模型,由若干决策树构成,较好地解决了单科决策树在数据复杂的情况下训练得到的分类规则容易出现“过拟合”使样本分类精度下降的缺点^[11]。随机森林方法在进行分类评估特征重要性时有重要作用,这是因为随机森林模型在构建过程中得到多棵决策树,每棵决策树对结果的影响被控制在一定范围内,最终的分类结果由所有决策树分类结果投票确定,这种分类方式可以在统计意义上保证模型的准确性,因此在分类研究中用途广泛。本研究利用随机森林分析每个防护林带环境因子对 PM2.5 的重要性程度。

随着人们对资源环境的日益关注,防护林在改善生态环境方面的效益越来越受到人们的重视,本文以长江沿岸景观防护林为研究对象,选取榔榆、乌桕、落羽杉、薄壳山核桃 4 种林分的防护林,对其 PM2.5、风速、风向、光照度、空气湿度、空气温度、气压、土壤温度和土壤湿度进行实地监测分析,旨在探究不同景观防护林带 PM2.5、风速、风向、光照度、空气湿度、空气温度、气压、土壤温度和土壤湿度季节变化以及各环境因子之间的相互作用,通过

随机森林分析影响 PM2.5 质量浓度的环境因子,对比分析选择最优防护林带模式,为以后景观防护林结构和功能的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地点位于江苏省泰州市天星洲,属亚热带季风气候区,年平均最高气温 22℃,年平均最低气温 12℃,年平均风速 12.5 km/h,年总降水量 624 mm。分别设置了监测点 4 个,监测点 1—4 分别种植了榔榆、乌桕、落羽杉、薄壳山核桃,4 个林分均为纯林,面积为 20 hm²左右。

1.2 观测方法和数据收集

在 4 个监测点分别安装了自动观测设备,从 2023 年 1 月—12 月,对 PM2.5、风速、风向、光照强度、空气湿度、空气温度、气压、土壤温度和土壤湿度进行持续监测和数据收集。所有数据收集的频率为每小时 1 次,自动存储在服务器上。为了确保仪器正常运行,每月进行维护和校准 2 次。维护包括更换过滤器和干燥剂等,校准包括仪器参数设置、运行空白测量、标准气体制备、运行标准气体测量、校准仪器和验证校准结果等。

1.3 数据过滤

使用 R 语言对收集到的数据进行初步筛选,排除时间序列不连续和由于设备存储中断、故障等引起的异常数据,另外把连续 6 个及以上的数值确定为异常值,然后把每个值分别与前后 2 个值进行比较,当小于等于 1/3 时舍弃该值。计算小于 10 的差值,取前后平均值,四舍五入记录插值,赋值后再次进行过滤(过滤因子时,只过滤前两部分,剔除离群值),舍弃仍小于 10 的值,最后输出所有有效数据。绘制 4 个防护林带各环境因子季节变化的柱状图,为了探讨各环境因子之间的相关性,对 9 个因子的相关系数进行矩阵分析。本研究对春、夏、秋、冬季环境因子进行了监测,为深入了解环境因子对 PM2.5 的影响,通过 Pearson 相关性结果,对各季节的相关因子进行线性回归,绘制相关性分析图。

1.4 数据处理

PM2.5 受多种环境因子影响,结合 Pearson 相关分析结果,对 4 个防护林带的 9 个环境因子相关系数进行矩阵分析,探究 4 个不同防护林带各因子之间的相关性。运用随机森林模型分析防护林带各因子对 PM2.5 质量浓度的重要性。随机森林模型在筛选复杂

多变因素的干扰时具有准确的预测能力,并且在统计意义上保证模型的准确性。以 PM2.5 质量浓度为因变量,空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、光照度、土壤温度、土壤湿度 7 个环境因素为自变量进行 RF 回归。

2 结果与分析

2.1 不同防护林带环境因子的季节变化

依照气象划分方法划分季节,3—5 月定为春季,6—8 月定为夏季,9—11 月定为秋季,12 月—翌年 2 月定为冬季。研究表明,乌桕防护林带 PM2.5 质量浓度季节变化比较显著,质量浓度由高到低分别为:冬季>春季>秋季>夏季。榔榆、落羽杉和薄壳山核桃 3 个防护林带 PM2.5 质量浓度季节变化幅度不大。这 3 个防护林带夏季和秋季 PM2.5 质量浓度几乎一致,但是乌桕防护林带夏季和秋季 PM2.5 质量浓度小,明显低于榔榆、落羽杉和薄壳山核桃这 3 个防护林(如图 1a)。春季和冬季风速明显高于夏季和秋季,而且在春季、夏季和冬季,榔榆防护林的风速都低于其他 3 个防护林(如图 1b)。从风向来看,榔榆和薄壳山核桃的变化规律一致,都呈现先升高再降低的趋势,秋季达到最大值,而乌桕和落羽杉防护林的风向季节变化幅度不大(如图 1c)。在光照度、空气湿度和空气温度中,4 个防护林带呈现出一致变化规律。从春季到夏季光照度上升,然后从夏季到秋季再到冬季光照度不断下降(如图 1d)。空气湿度季节变化的趋势在 4 个防护林带都呈现先升高后降低的趋势,且最高值都出现在夏季,最低值都出现在春季(如图 1e)。4 个防护林带空气温度都为夏季>秋季>春季>冬季,而且夏季与冬季变化很大(如图 1f)。由图 2g 可知,4 个防护林带气压季节变化幅度不大,几乎一样。榔榆和乌桕防护林带土壤湿度、土壤温度的季节变化幅度都不大。落羽杉在土壤湿度和土壤温度上的季节变化较为显著,土壤湿度由高到低为夏季>秋季>冬季>春季,但是夏季与春季的变化很小,土壤温度由高到低为夏季>秋季>春季>冬季,而且土壤温度夏季远远高于冬季。薄壳山核桃防护林带的土壤温度和土壤湿度在春季、夏季和冬季的变化幅度都不大,从秋季到冬季,薄壳山核桃防护林带的土壤湿度升高,土壤温度降低(如图 1h,1i)。

2.2 防护林带环境因子的相关性

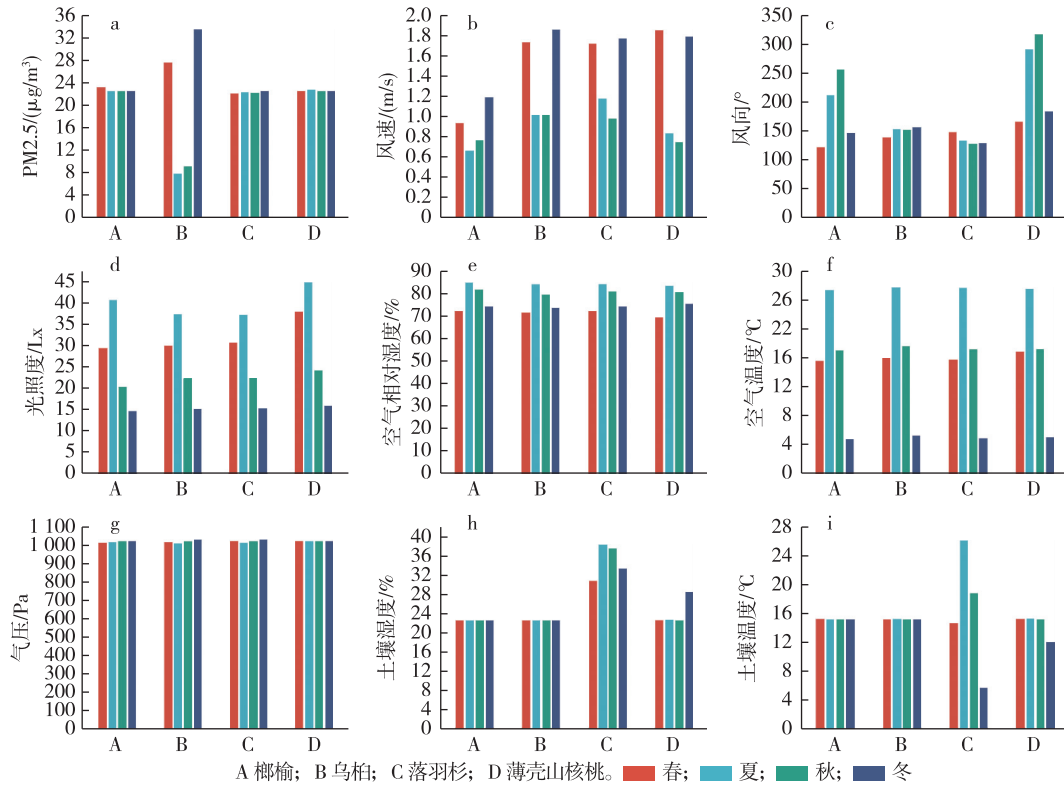
防护林带各环境因子相关性分析结果表明,榔

榆防护林带的 PM2.5 质量浓度与风速、光照度、土壤温度呈显著正相关;PM2.5 质量浓度与空气温度、气压、风向、土壤湿度、空气湿度呈显著负相关。空气温度与光照度呈极显著正相关,而与风速呈极显著负相关(如图 2a)。落羽杉防护林带 PM2.5 质量浓度与空气湿度、气压、风速、土壤湿度呈显著正相关,与空气温度、风向、光照度、土壤温度呈显著负相关。空气温度与光照度、土壤温度呈极显著正相关,而与气压呈极显著负相关。空气湿度与风速呈极显著负相关(如图 2c)。在薄壳山核桃防护林带,PM2.5 质量浓度与各环境因子存在相关性,其中,PM2.5 质量浓度与空气温度、空气湿度、气压、光照度和土壤温度呈显著正相关,而与风向、风速和土壤湿度呈显著负相关。另外,值得关注的是,光照度与空气温度呈极显著正相关,风速和风向、土壤湿度和土壤温度都呈极显著负相关(如图 2d)。乌桕防护林带的 PM2.5 质量浓度与各环境因子的相关性大于以上 3 个防护林带。乌桕防护林带 PM2.5 质量浓度与气压、土壤湿度呈显著正相关,与风速呈显著正相关;PM2.5 质量浓度与风向、光照度、土壤空气温度、空气湿度呈显著负相关。此外,发现空气温度与气压呈极显著负相关,与光照度呈极显著正相关,而气压与光照度呈极显著负相关,空气湿度与风速呈极显著负相关(如图 2b)。

2.3 随机森林模型分析

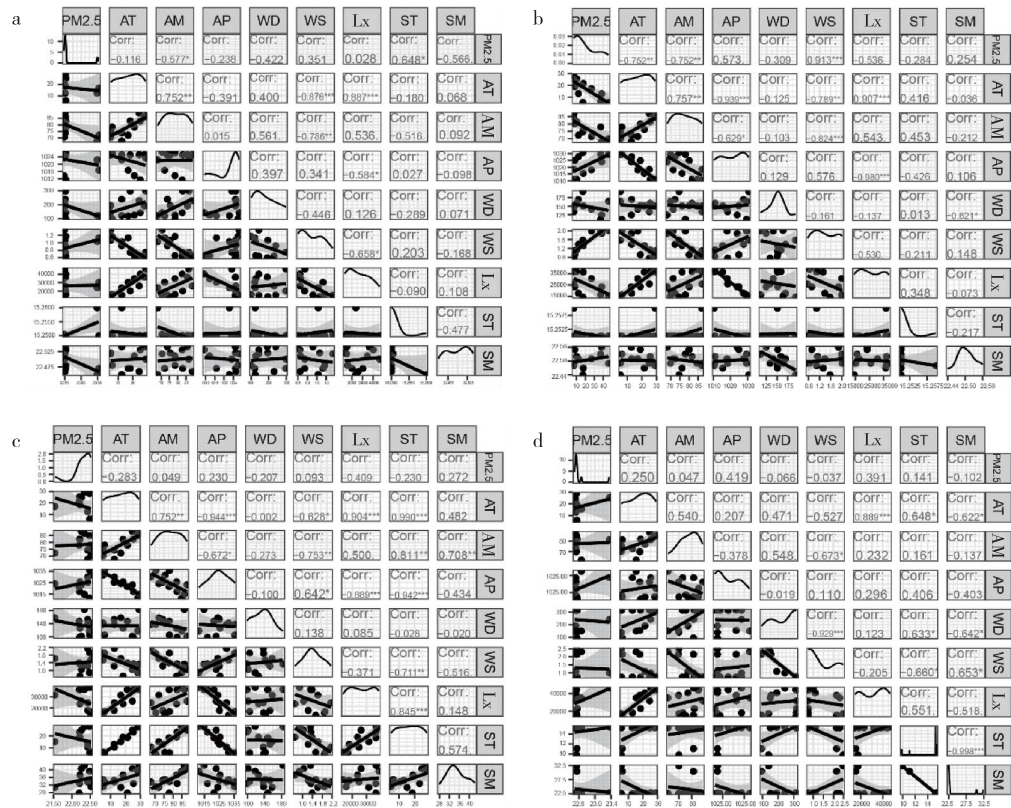
为了探究其他 7 个环境因素对 PM2.5 质量浓度影响的重要性,以 PM2.5 质量浓度为因变量,空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、光照度、土壤温度、土壤湿度 7 个环境因素为自变量进行 RF 回归,选择参数 $ntree = 500$ (RF 模型中的树数), $mtry = 2$ (RF 模型中每次分割时尝试的变量数)。

使用基于平均值的方法对预测结果进行综合评估。其中,总解释量占 12.35%,榔榆防护林带解释量占 20.27%,乌桕防护林带占 47.42%,落羽杉防护林带占 4.85%,薄壳山核桃防护林带解释量占 -0.86%。在已确定参数 ($mtry = 2$, $ntree = 500$) 的基础上,建立随机森林模型。由图 3 可知,4 种防护林带所示的变量重要性存在差异。榔榆防护林带空气温度、风速的重要性高,乌桕防护林带空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、光照度的重要性高,落羽杉防护林带风向的重要性高,薄壳山核桃防护林带空气湿度的重要性高(如图 3)。



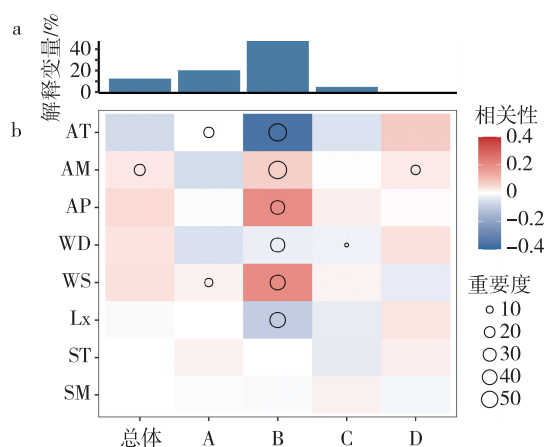
a: PM2.5; b: 风速; c: 风向; d: 光照度; e: 空气相对湿度; f: 空气温度; g: 气压; h: 土壤湿度; i: 土壤温度

图1 防护林带不同环境因子的季节变化



AT: 空气温度; AM: 空气湿度; AP: 气压; WD: 风向; WS: 风速; Lx: 光照度; ST: 土壤温度; SM: 土壤湿度; a: 榔榆; b: 乌桕; c: 落羽杉; d: 薄壳山核桃

图2 防护林带各环境因子之间相关性分析



a:环境因素的解析分析;b:每个环境因素对 PM2.5 的重要性得分和相关性。AT:空气温度;AM:空气湿度;AP:气压;WD:风向;WS:风速;Lx:光照度;ST:土壤温度;SM:土壤湿度。A:榔梅;B:乌桕;C:落羽杉;D:薄壳山核桃

图 3 随机森林解释变量。

3 讨论

颗粒物极大影响人类的健康,成为国内外环境卫生的研究热点^[12]。2006 年,WHO 推荐用 PM2.5 作为空气颗粒物浓度的指标。长期以来,国外大量的流行病学研究发现,即使是在低于各国的大气质量标准的浓度下,大气 PM2.5 质量浓度上升与易感人群死亡数存在密切关联^[13]。虽然污染源排放是影响 PM2.5 质量浓度的主导因素,但是环境因子的影响也不容忽视。

为了更全面准确地确定影响 PM2.5 质量浓度变化的重要环境因子,本文利用随机森林模型中的 IncMSE 模型对模型结果进行研究。根据分析得到空气湿度是典型因子,与 PM2.5 质量浓度呈正相关关系。这与大多数的研究结果一致^[14]。空气湿度大的情况下,PM2.5 附着在水上成核、凝聚,PM2.5 的吸湿增加和积累^[15-17],并且在不发生沉降的情况下,PM2.5 悬浮在低空不易扩散,质量浓度升高^[18]。普遍研究发现夏季 PM2.5 质量浓度低于冬季,原因之一便是夏季天气炎热,空气干燥,空气湿度含量低。空气湿度对 PM2.5 质量浓度的影响有机制 2 种,一是空气湿度大在太阳辐射和温度升高的条件下会促进 PM2.5 的二次形成使其质量浓度升高^[19-20];二是空气湿度大的条件下会促进气—颗粒分配,增加吸湿组分比例,尤其是硝酸铵,进一步增加 PM2.5 的质量浓度^[21]。

榔榆、落羽杉和薄壳山核桃 3 个防护林带 PM2.5 质量浓度季节变化幅度不大,而乌桕防护林带 PM2.5 质量浓度季节变化幅度大,夏季质量浓度远低于冬季。对于乌桕防护林带影响 PM2.5 质量浓度变化的环境因子,空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、光照度重要性都高。其中,PM2.5 质量浓度与空气温度呈显著负相关。这主要归功于随着空气温度升高,对流层大气垂直运动越强烈,加速 PM2.5 的扩散,质量浓度降低^[22];而气温越低,对流运动越弱,增加 PM2.5 的积累^[23-24],而且在夜晚多形成逆温,阻碍 PM2.5 扩散,质量浓度升高^[25],这也是 PM2.5 浓度夏季低于冬季的原因之一。PM2.5 质量浓度与气压、风速呈显著正相关。气压对 PM2.5 污染的影响呈正向效应,是因为随着气压升高,大气边界层高度相对变低,气流运动缓慢,阻碍 PM2.5 扩散。风速对 PM2.5 质量浓度的影响主要通过影响扩散来实现^[26],风速大,加速 PM2.5 扩散从而使 PM2.5 质量浓度降低,而风速小时,扩散能力差,这导致 PM2.5 堆积从而质量浓度升高。

此外,虽然风向、光照度与 PM2.5 质量浓度的相关性不如空气温度、气压、风速显著,但是重要性高。Davies 等指出短时间内大尺度环流形势对污染过程起到决定性作用^[27]。风向是影响空气质量的关键因子,当风经过,可以加速局部空气流动,降低 PM2.5 质量浓度。光照度与 PM2.5 质量浓度呈负相关,在阴天和有雾天气空气污染会加重,这可能与细颗粒物阻止了湿沉降的发生有关^[28]。

4 结论

乌桕防护林带夏季和秋季 PM2.5 质量浓度含量远远低于榔榆、落羽杉和薄壳山核桃 3 个防护林带。根据随机森林模型分析,整体上得到空气湿度是影响 PM2.5 质量浓度的重要环境因子,与 PM2.5 质量浓度呈正相关关系。然而表现在各防护林带有差异,乌桕防护林带空气温度、空气湿度、气压、风向、风速、光照度重要性较高,榔榆防护林带空气温度和风速重要性较高,落羽杉防护林带内风向重要性较高,薄壳山核桃防护林带空气湿度重要性较高。

参考文献:

[1] 杨复沫,马永亮,贺克斌.细微大气颗粒物 PM2.5 及其研究概

- 况[J].世界环境,2000(4):32-34.
- [2] PANYACOSIT L. A review of particulate matter and health; focus on developing countries[R]. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2000.
- [3] FENG J, CHAN C K, FANG M, et al. Characteristics of organic matter in PM_{2.5} in Shanghai[J]. Chemosphere, 2006, 64(8): 1393-1400.
- [4] 车瑞俊,刘大锰,袁杨森.北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5): 556-563.
- [5] MALEK E, DAVIS T, MARTIN R S, et al. Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA[J]. Atmospheric Research, 2006, 79(2): 108-122.
- [6] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed[J]. Global Change Biology, 2000, 6(8): 995-1003.
- [7] ZHU J, SONG L. A review of ecological mechanisms for management practices of protective forests[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(2): 435-448.
- [8] ZHANG P, WANG N, YANG L, et al. Evaluation and sensitivity analysis of the ecosystem service functions of haze absorption by green space based on its quality in China [J]. Nature Conservation, 2020, 40: 93-141.
- [9] 李晓璐,叶锦东,章 剑,等.乔木滞留大气颗粒物能力及其与叶表面微结构关系[J].中国城市林业,2022,20(3): 22-28,120.
- [10] 孙应都,陈奇伯,李艳梅,等.昆明市6个绿化树种叶表微结构与滞尘能力的关系研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2019,39(3):78-85.
- [11] JAMIL A, BAYRAM B. The delineation of tea gardens from high resolution digital orthoimages using mean-shift and supervised machine learning methods [J]. Geocarto International, 2021, 36(7): 758-772.
- [12] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environmental pollution, 1998, 99(3): 347-360.
- [13] 赵 珂,曹军骥,文湘闽.西安市大气 PM_{2.5} 污染与城区居民死亡率的关系[J].预防医学情报杂志,2011,27(4):257-262.
- [14] LI X, MA Y, WANG Y, et al. Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China [J]. Atmospheric Research, 2017,90: 185-193.
- [15] WANG J, OGAWA S. Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(8): 9089-9101.
- [16] CHENG L X, FAN M, CHEN L F, et al. Effects on the haze pollution from autumn crop residue burning over the Jing-Jin-Ji Region [J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 2801-2812.
- [17] LIAO T, WANG S, AI J, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. Science of the Total Environment, 2017, 584(585): 1056-1065.
- [18] 贾雨龙.北京市四种道路防护林内 PM_{2.5} 浓度变化规律研究 [D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [19] ZHOU B, SHEN H, HUANG Y, et al. Daily variations of size-segregated ambient particulate matter in Beijing [J]. Environmental Pollution, 2015, 197: 36-42.
- [20] HAN B, ZHANG R, YANG W, et al. Heavy haze episodes in Beijing during January 2013: Inorganic ion chemistry and source analysis using highly time-resolved measurements from an urban site[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544: 319-329.
- [21] HU S, ZHAO G, TAN T, et al. Current challenges of improving visibility due to increasing nitrate fraction in PM_{2.5} during the haze days in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 290: 118032.
- [22] YANG Y, LIAO H, LOU S. Increase in winter haze over eastern China in recent decades: Roles of variations in meteorological parameters and anthropogenic emissions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(21): 13050-13065.
- [23] LI J, CHEN H, LI Z, et al. Low-level temperature inversions and their effect on aerosol condensation nuclei concentrations under different large-scale synoptic circulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32: 898-908.
- [24] LI L, HUANG C, HUANG H Y, et al. An integrated process rate analysis of a regional fine particulate matter episode over Yangtze River Delta in 2010 [J]. Atmospheric Environment, 2014, 91: 60-70.
- [25] NIEDŹWIEDŹ T, ŁUPIKASZA E B, MAŁARZEWSKI Ł, et al. Surface-based nocturnal air temperature inversions in southern Poland and their influence on PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Upper Silesia [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 146(3): 897-919.
- [26] LUO Y, LIU S, CHE L, et al. Analysis of temporal spatial distribution characteristics of PM_{2.5} pollution and the influential meteorological factors using Big Data in Harbin, China [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2021, 71(8): 964-973.
- [27] DAVIES P E, HARRIS J H, HILLMAN T J, et al. The sustainable rivers audit: assessing river ecosystem health in the Murray-Darling Basin, Australia [J]. Marine and Freshwater Research, 2010, 61(7): 764-777.
- [28] ECK T F, HOLBEN B N, KIM J, et al. Influence of cloud, fog, and high relative humidity during pollution transport events in South Korea: Aerosol properties and PM_{2.5} variability [J]. Atmospheric Environment, 2020, 232: 117530.