

基于随机森林算法的上海城市森林氧吧功能评估

Evaluation of Urban Forest Oxygen Function in Shanghai Based on Random Forest Algorithm

韩玉洁
HAN Yujie

(上海市林业总站, 上海 200072; 国家林业和草原局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240)
(Shanghai Forest Station, Shanghai, China, 200072; Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station, State Administration of Forest and Grassland, Shanghai, China, 200240)

文章编号: 1000-0283(2022)09-0137-07
DOI: 10. 12193 /j. laing. 2022. 09. 0137. 018
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-05-10
修回日期: 2022-07-14

摘 要

充分识别、科学评价城市森林氧吧资源, 是发挥城市森林保健功效的前提, 也是城市森林管理中亟待解决的问题。以上海城市公园中9个植物群落的长期监测数据为建模数据集, 建立群落内空气负离子与气象条件、林分因子等指标的随机森林模型; 在此基础上, 根据2019年2月至2020年1月上海城市森林生态国家站和上海市气候中心的长期定位监测数据、上海市森林资源年度监测数据, 评估上海市105处典型森林资源的负离子浓度, 数据涵盖上海全域内公园绿地、生态片林、现有及拟开放休闲林地、现有及规划中的郊野公园, 提出城市森林空气负(氧)离子评价等级标准。结果表明: 105个城市森林群落中, 全年空气负离子等级以Ⅱ级和Ⅲ级为主, Ⅳ级次之, Ⅰ级较少; 负离子浓度主要呈现夏秋高、冬春低的季节变化规律; 上海城市森林氧吧功能呈现空间分布不均的特征, 应在人口密度高的中心城区打造更多的森林氧吧以满足居民的康养需求。结果可为上海市合理利用森林氧吧资源打造居民休闲游憩空间提供科学依据。

关键词

城市森林; 空气负离子; 森林氧吧; 随机森林算法; 等级; 上海

Abstract

Identifying and evaluating this effect is one of the key problems to be solved in urban forest management. In this paper, based on the measured data of 9 long-term monitored plant communities in Shanghai's urban Park, a random forest model was established linking negative air ions and other indicators such as meteorological conditions and plant factors. Then, based on the long-term monitoring data of Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station and Shanghai Climate Center from February 2019 to January 2020 and the annual monitoring data of Shanghai forest resources, this paper evaluated the concentration of the negative ions of 105 typical forest resources in Shanghai, which covers Shanghai's urban parks, ecological forestry, country parks, and green leisure spaces. The results showed that in 105 urban forest communities, the annual air negative ion levels were mainly Ⅱ and Ⅲ. The concentration of negative ions is higher in summer and autumn than in winter and spring. By drawing an oxygen bar map, it is found that the spatial distribution of urban forest oxygen bars in Shanghai is uneven. More forest oxygen bars should be built in the central area of Shanghai with high population density to meet the residents' demand for health care. This study can provide a scientific basis for the rational use of forest oxygen bar resources in Shanghai to create recreational space for residents and provide a valuable reference for other urban forest management.

Keywords

urban forest; negative oxygen ion; forest oxygen bar; random forest algorithm; grade; Shanghai

韩玉洁
1977年生/女/广西都安县人/硕士/高级工程师/研究方向为森林生态学

基金项目:
上海市绿化和市容管理局科学技术攻关项目“上海森林氧吧的监测与研究”(编号: G171206)

现代工业文明给人类带来了丰富的物质产品,改善了人类的生活条件,但也导致了环境的污染与恶化,危害到人类的健康与生存。森林是陆地生态系统的主体,也是人类疗愈身心的康养胜地。英国林业研究院的报告^[1]称,保守估算,林中步行每年可以为国家卫生服务体系节省出1.85亿英镑的心理障碍支出。近年来,森林氧吧的功能越来越为人们所重视,已成为一种重要的旅游资源,其提供的负氧离子浓度水平及对大气污染物的净化作用已成为森林生态系统服务评价的重要指标^[2]。2013年国家林业局发布了《推进生态文明建设规划纲要(2013-2020)》,空气负离子含量被列为生态文明建设的重要指标之一,在医学健康、环境卫生、生态旅游等方面功能显著。2015年中国首批“中国森林氧吧”名单发布^[3],主要以空气负离子浓度、空气颗粒物含量、空气细菌含量等森林健康因子进行科学评价^[4]。森林氧吧能够产生空气负离子,释放氧气和植物精气,改善林内小气候,净化水质,减少噪声等,使得森林具备优越的生态环境,对人们起到缓解压力、提高机体免疫力、预防疾病和康复病体等作用^[5]。

目前,对森林氧吧的研究主要集中在对城市环境中负氧离子浓度观测^[6-7]和时空变化规律^[8]、天然林环境中空气负离子的测定和分布规律^[9-12]、不同植物群落或林分类型的负离子效应评价^[13-15]及其影响因素研究^[16-23]等方面。城市森林可通过植物的生理作用释放负离子到大气环境中,是城市环境中空气负离子浓度较高的区域^[24],对居民身心健康起到重要作用。如何充分挖掘城市森林氧吧资源并发挥其保健功效,是城市森林管理中亟待解决的问题。随机森林(Random Forest, RF)算法由Leo Breiman和Outler Adele在2001年开发^[25],

是一种通过构建多棵决策树形成森林的分类和回归算法,能够克服协变量之间复杂的交互关系,具有预测精度高、稳健性强、不易过度拟合等优点。在空气质量预测^[26]、物种分布预测^[27]、林分蓄积生长量预测^[28]等预测性的生态模拟研究中有很好的应用,为挖掘具有大量相互作用的复杂生态数据提供了有效的科学方法。

文章以上海中山公园中9个植物群落的长期监测数据为建模数据集,建立群落内空气负离子与气象条件、林分因子等指标的RF模型;在此基础上,根据上海城市森林生态国家站和上海市气候中心的长期定位监测数据、上海市森林资源年度监测数据,评估上海市105处典型森林资源的负离子浓度,进行城市森林氧吧分级,绘制森林氧吧分布图,为上海市合理利用森林氧吧资源,打造居民休闲游憩空间提供科学依据,为其他城市森林管理提供有益借鉴。

1 研究区概况与数据来源

上海市地处东经120° 51'至122° 12',北纬30° 40'至31° 53',北界长江,东濒东海,南临杭州湾,西接江苏、浙江两省。上海属于中亚热带向北亚热带过渡区域,为北亚热带海洋性季风气候,四季分明,日照充足,雨量充沛。冬季受西伯利亚冷高压控制,盛行西北风,寒冷干燥;夏季在西太平洋副热带高压控制下,多东南风,暖热湿润;春秋是季风的转变期,多低温阴雨天气。

1.1 上海城市森林生态国家站监测数据

根据上海城市森林生态国家站三个观测点(分别位于长宁区中山公园、浦东新区金海湿地公园、崇明区种种生态片林)的监测数据,每30 s记录一次数据,包括负(氧)

离子、PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂、NO₂、NO_x、O₃、温度、相对湿度、气压、风向、风速、降雨量、总辐射、有效辐射、紫外辐射共17个指标。研究采用2019年2月至2020年1月的定位观测数据。

1.2 上海市气候中心监测数据

上海市气候中心提供两组数据:(1)其布设的7个监测点(分别位于崇明区东滩、宝山区顾村公园、奉贤区海湾森林公园、松江区佘山、嘉定区宏泰园、闵行区侨嘉葡萄园、青浦区寻梦园)的监测数据,包括负(氧)离子、气温、相对湿度等指标;(2)上海市各区的24节气日当天的气象数据,包括降水、温度、相对湿度、风速、总日照时数等指标,每10 s记录一次数据。为保证时间的一致性,采用的也是2019年2月到2020年1月的数据。

1.3 中山公园植物群落实测数据

中山公园位于上海市中心城区,园内植物茂盛,种类丰富,群落多样。研究按照随机分布原则,在园内设置了9个典型植物群落样地,监测时间为2017年4月到2018年3月。采用自主研发的便携式小型工作站,固定至距下垫面约1.5 m高度的平稳地面,搭载移动式负离子浓度监测仪,检测范围为0~30 000 N/cm³。每个月的上半月(1-15日)和下半月(16-30日)各进行一次野外观测实验,每30 s记录一次数据。每次观测时,每个样地连续观测3天共计72 h,并以上海城市森林生态国家站中山公园观测点数据为基准进行校对。每次实验前将仪器进行调零接地校准,每3 h进行一次设备检查及数据校验,以保证设备的稳定性和数据的准确性。

表1 中山公园植物群落样地信息
Tab. 1 Information of sample points in Zhongshan Park

样地 Sample plot	位置 Location	群落类型 Community type	植被类型 Vegetation type	群落结构 Community structure
A	公园门口	香樟 (<i>Cinnamomum camphora</i>) +冬青卫矛 (<i>Euonymus japonicus</i>)	常绿阔叶林	乔+草
B	大门旁密林	香樟+黄杨 (<i>Buxus sinic</i>)	常绿阔叶林	乔+灌+草
C	荷花池畔	冬青卫矛+杜鹃 (<i>Rhododendron simsii</i>)	灌丛	乔+灌
D	花架画廊旁	中山柏 (<i>Cupressus lusitanica</i>) +杨梅 (<i>Morella rubra</i>) +散尾葵+ (<i>Dypsis lutescens</i>)	常绿针阔混交林	乔+灌+草
E	小广场	杨梅+麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)	灌丛	乔+草
F	音乐广场	香樟+鸡爪槭 (<i>Acer palmatum</i>) +黄杨	常绿阔叶林	乔+灌+草
G	八角亭	杨梅+鸡爪槭+黄菖蒲 (<i>Iris pseudacorus</i>)	常绿阔叶林	乔+灌+草
H	水杉林	水杉 (<i>Metasequoia glyptostroboides</i>) +麦冬	落叶针叶林	乔+草
I	大草坪	沟叶结缕草 (<i>Zoysia matrella</i>)	地被	草 (空白对照)

1.4 上海市典型森林资源样地数据

基于上海市2019年度森林资源监测数据成果, 根据全市公园绿地、生态片林、现有及拟开放休闲林地、现有及规划中的郊野公园名录, 考虑到不同类型等级的公园、林带、生态片林、开放林地等, 以及林地群落结构、郁闭度、面积等生态因子, 筛选出105处典型的、居民可达性高的、四季景观较好且面积较大的森林资源样地。提取出105处森林资源样地的信息, 包括地名、位置(所处的区、镇、村)、植被类型、群落结构、树种结构、优势树种(组)、平均胸径、平均树高、郁闭度、密度等。根据105处森林资源样地所处区域, 分别将24节气当天的平均降水、温度、相对湿度、风速等数据与各样地相匹配, 作为各样地负离子浓度预测的基础数据信息。

2 研究方法

2.1 RF预测模型构建

2.1.1 模型数据选择

根据数据匹配原则, RF建模训练数据集从上海城市森林生态国家站中山公园观测点的原始数据集中提取负离子浓度、温度、湿度、降水、风速等指标, 同时在数据集中引入郁闭度因子。按照《空气负(氧)离子浓度观测技术规范》(LY/T 2586-2016)^[29], 对原始数据进行异常值(负值、明显偏大值)剔除, 考虑到模型预测的实际意义, 将原始数据中负离子浓度超过3 000的数据条进行删除。为了增强数据的离散性, 降低连续性数据对模型的控制力度较强的风险, 将得到的数据从中随机提取一半, 作为最终的建模数据集。

2.1.2 模型构建

利用R语言的randomForest包来实现RF回归模型。参数选择上, 通过绘制误差与tree关系图, 选择RF参数ntree=400; 使用枚举法, 根据拟合优度选择RF参数mtry=4。

将温度(X_1)、湿度(X_2)、降水(X_3)、风速(X_4)、郁闭度(X_5) 5个因子作为模型的自变量, 以负离子浓度(Y) 为因变量, 建立公式(1)。

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (1)$$

取建模数据集的80%作为模型训练集, 剩余20%作为预测集, 以评估模型准确度。最终构建的RF回归模型的拟合度为0.4783; 再对预测集进行精度校验后, 发现负离子浓度预测误差率在[-0.2, 0.2]内的占60%以上, 模型准确率较好。利用此模型, 输入105处森林资源对应因子数据集, 得到各样地四季的负离子浓度预测值(C_p)。本研究中四季的划分: 3-5月为春季。6-8月为夏季, 9-11月为秋季, 12-2月为冬季。

2.2 模型预测结果修正

由于在RF模型中, 并未充分考量林地类型对负离子浓度的影响, 因此需进行修正。修正包括两部分: 林地类型结构修正、林分密度修正。

2.2.1 林地类型修正

105处森林资源样地按林地类型可分成4类: 阔叶纯林、阔叶混交林、针叶纯林、针阔混交林。因而分别以中山公园监测样地A代表阔叶纯林、样地F代表阔叶混交林、样地H代表针叶纯林、样地D代表针阔混交林。分季节计算森林负离子浓度基准值, 即每一季节4个样地的负离子浓度的平均值(C_l); 计算每一季节各类型林地样地负离子浓度的平

均值 (C_k), 并定义补偿系数 (K_k), 公式 (2)。

$$K_k=(C_k-C_l)/C_l$$

(2)

2.2.2 林分密度修正

105处森林资源样地按林分密度可分成三个等级: $\geq 1\,000$ 株/hm²、500 ~ 1 000株/hm²以及 ≤ 500 株/hm²。分季节计算中山公园监测样地 (除空白对照样地) 的负离子浓度平均值 (C_2); 计算每一季节不同林分密度等级样地的负离子浓度平均值及总均值 (C_{2x}), 定义补偿系数 (K_{2x}), 公式 (3)。

$$K_{2x}=(C_{2x}-C_2)/C_2$$

(3)

2.2.3 综合修正

将林地类型及林分密度补偿系数对应至105处森林资源样地, 相加即得各位点综合修正系数 (K)。在RF模型预测浓度值 (Cp) 上, 得最终负离子浓度预测值 Ca , 公式 (4)。

$$Ca=Cp*(1+K)$$

(4)

3 结果与分析

3.1 上海城市森林空气负离子浓度等级划分

根据上海城市森林生态国家站的负离子浓度监测数据, 中山公园的正常区间值为150 ~ 800个/cm³, 偶尔出现100 ~ 3 500个/cm³; 浦东金海湿地公园的正常区间值为350~1 200个/cm³, 偶尔出现200 ~ 2 100个/cm³; 崇明种种生态片

林的正常区间值为600 ~ 1 800个/cm³, 偶尔出现200 ~ 3 000个/cm³。根据RF模型对上海105处森林资源样地的预测结果, 负离子浓度在150 ~ 2 050个/cm³之间。基于《空气负(氧)离子浓度观测技术规范》(LY/T 2586-2016) 和《空气负(氧)离子浓度等级》(QX/T 380-2017)^[30]的分级标准, 将上海中山公园9个典型植物群落实测数据、上海城市森林生态国家站3个观测点和上海市气候中心7个监测点负离子数据进行叠加分析, 将上海城市森林空气负(氧)离子分为5个等级(表2)。

3.2 上海城市森林空气负离子浓度的季节变化

根据RF模型对上海105处典型森林资源样地的预测结果, 森林空气负离子等级以Ⅱ级和Ⅲ级为主, Ⅳ级次之, Ⅰ级较少。从105个样地森林空气负离子浓度来看, 春季达到Ⅰ级的有5个, 占比4.8%; 达到Ⅱ级的有56个, 占比53.3%; 达到Ⅲ级的有31个, 占比29.5%; 达到Ⅳ级的有13个, 占比12.4%; 没有Ⅴ级。夏季达到Ⅰ级的仅2个, 占比1.9%; 达到Ⅱ级的有44个, 占比41.9%; 达到Ⅲ级的有34个, 占比32.4%; 达到Ⅳ级的有19个, 占比18.1%; Ⅴ级为6个, 占比5.7%。秋季达到Ⅰ级的仅3个, 占比2.9%; 达到Ⅱ级的有35个, 占比33.3%; 达到Ⅲ级的有36个, 占比

34.3%; 达到Ⅳ级的有17个, 占比16.2%; Ⅴ级为14个, 占比13.3%。冬季达到Ⅰ级的仅15个, 占比14.3%; 达到Ⅱ级的有37个, 占比35.2%; 达到Ⅲ级的有44个, 占比41.9%; 达到Ⅳ级的有8个, 占比7.6%; Ⅴ级为1个, 占比0.9% (图1)。不同季节, 森林空气负离子变化较大, 且呈现夏秋高、冬春低的季节变化规律。

3.3 上海城市森林空气负离子浓度的空间差异

根据RF模型春夏秋冬4个季节的预测结果(图2), 森林空气负离子等级为Ⅰ级的森林资源样地, 在崇明区和闵行区出现的频率较高, 其次为浦东新区, 其余依次为金山区、松江区、嘉定区和青浦区。Ⅱ级样地出现的频率排序为: 中心城区>崇明区>浦东新区、青浦区>松江区>嘉定区>奉贤区>金山区>宝山区>闵行区。Ⅲ级样地出现的频率排序为: 中心城区>崇明区>浦东新区、青浦区>松江区>嘉定区>奉贤区>金山区>宝山区>闵行区。Ⅳ级样地出现的频率排序为: 中心城区>青浦区>浦东新区、松江区、金山区>崇明区、闵行区>奉贤区>宝山区>嘉定区。由此可见, 中心城区虽然很难达到Ⅰ级标准, 但是达到Ⅱ级标准的样地较多, 且15处样地的空气负离子等级都达到了Ⅳ级以上, 对于城市居民日常的休闲健身很重要。

3.4 上海城市森林氧吧资源空间分布特征

根据上海城市森林空气负(氧)离子等级标准, 对105处典型森林资源的RF模型预测结果进行等级划分, 按照春夏秋冬四季绘制上海市森林氧吧地图(图3)。从森林氧吧空间分布来看, 达到Ⅳ级以上的森林氧吧资源有100处, 其中浦东新区数量最多(18处), 其余依次为中心城区(15处)、青浦区(13

表2 上海城市森林空气负(氧)离子等级标准
Tab. 2 Shanghai urban forest air negative (oxygen) ion rating standard

等级 Grade	负(氧)离子浓度N/(个/cm ³) Negative (oxygen) ion concentration	舒适度 Comfort
Ⅰ级	N $\geq$ 1 200	极适宜
Ⅱ级	800 $\leq$ N<1 200	很适宜
Ⅲ级	500 $\leq$ N<800	适宜
Ⅳ级	300 $\leq$ N<500	较适宜
Ⅴ级	N<300	不太适宜

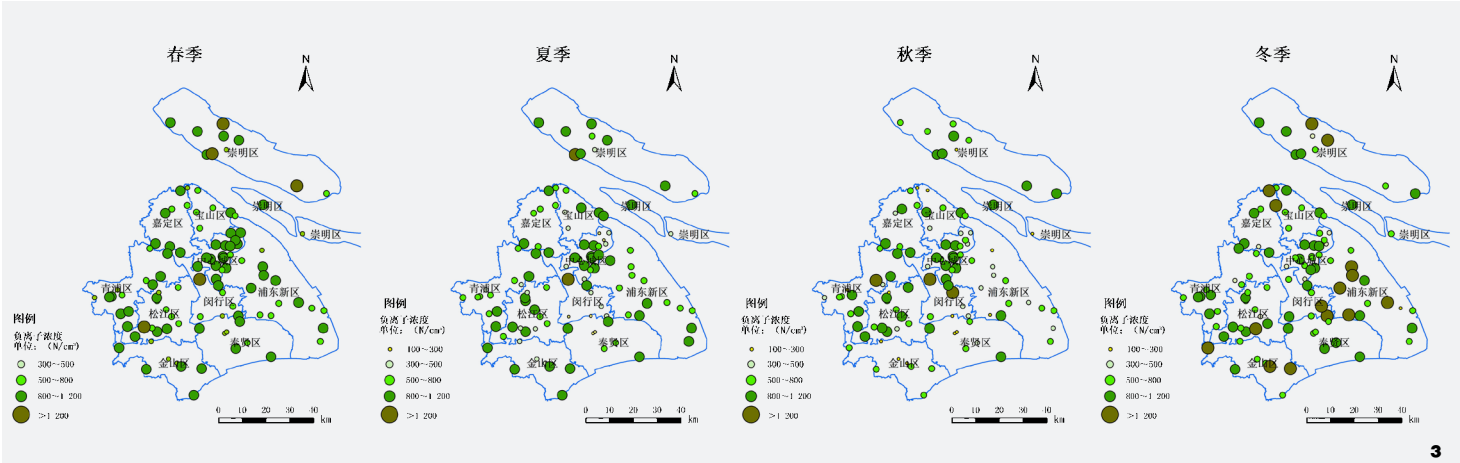
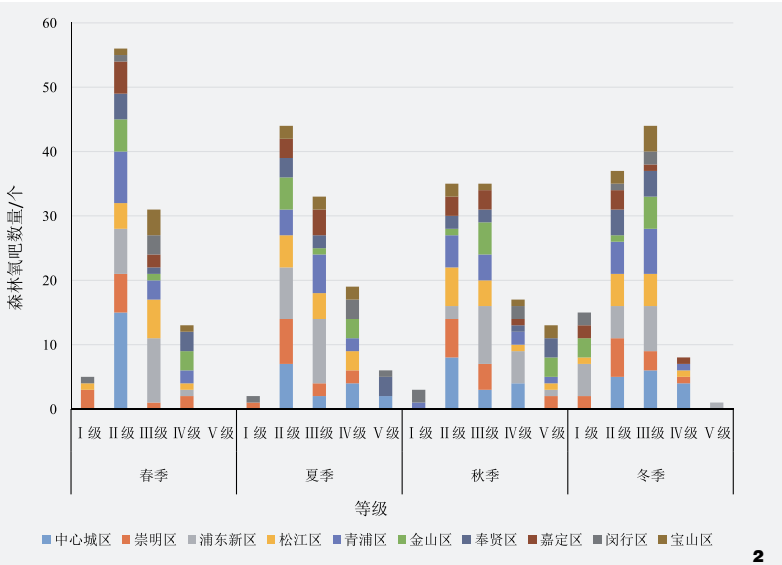
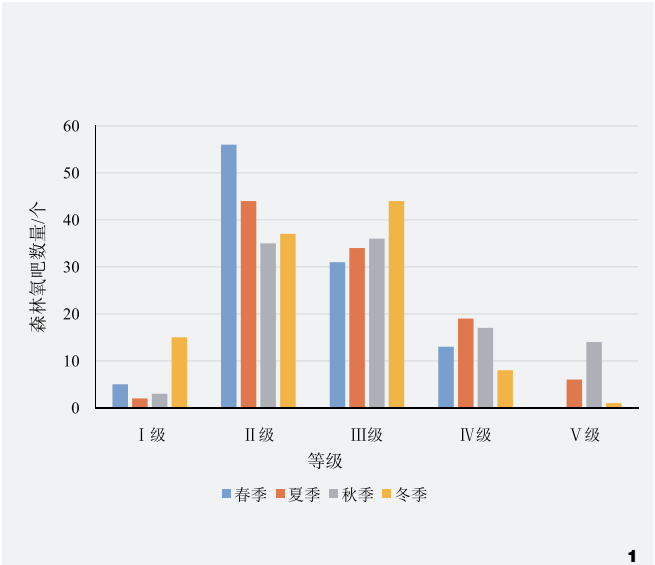


图1 105处典型森林资源样地空气负离子浓度的季节变化
Fig. 1 Seasonal variation of air negative ions in 105 typical forest resource plots

图3 上海市四季森林氧吧分布图
Fig. 3 Map of four seasons forest oxygen bar in Shanghai

图2 105处典型森林资源空气负离子空间分布格局
Fig. 2 Spatial distribution pattern of air negative ions in 105 typical forest resource plots

处)、松江区(11处)、崇明区(9处)、金山区(9处)、奉贤区(8处)、嘉定区(7处)、宝山区(6处)、闵行区最少(4处)。从各区的人口数量来看, 仅从现有的公园绿地、生态片林、开放休闲林地、郊野公园角度打造森林氧吧, 还不足以满足居民的需求, 需要根据各区的人口密度和森林氧吧分布情况, 充分利用现有的森林资源适当加以开发, 尤其是闵行区和中心城区需要打造更多的森林氧吧

以满足居民的康养需求。

3.5 不同森林群落空气负离子浓度季节变化

将105处森林资源样地归类为10种森林群落类型, 根据RF模型预测结果发现: 春季, 各森林群落类型的负离子浓度在620 ~ 970个/cm³之间, 浓度较高的为常绿落叶针阔混交林、常绿阔叶混交林、常绿落叶阔叶混交林, 较低的为常绿针叶林,

表现为混交林>纯林; 夏季, 各森林群落类型的负离子浓度在430 ~ 940个/cm³之间, 浓度较高的为常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶混交林、落叶阔叶混交林, 较低的分林分为常绿针叶林、常绿落叶针阔混交林, 表现为以阔叶树种为主的混交林大于带有针叶树种的林分; 秋季, 各森林群落类型的负离子浓度在420 ~ 1 090个/cm³之间, 浓度较高的为常绿针叶林、常绿落叶针叶混交林、落叶针叶

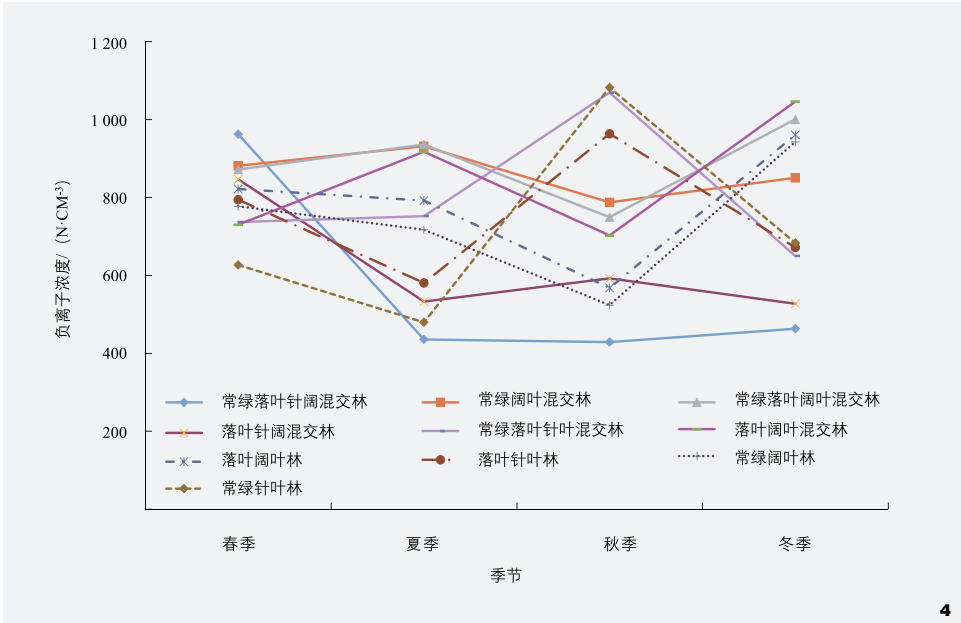


图4 不同森林群落空气负离子浓度季节变化
Fig. 4 Seasonal Variation of air negative ions in different forest communities

林，较低的为落叶阔叶林、常绿阔叶林和常绿落叶针阔混交林，负离子浓度在各森林群落之间的差异较为明显，表现为以针叶树种为主的森林群落类型优势明显，尤其是常绿针叶林负离子浓度最高；冬季，各森林群落类型的负离子浓度在520 ~ 1050 个/cm³之间，浓度较高的森林群落类型为落叶阔叶混交林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林，较低的为常绿落叶针叶混交林、落叶针阔混交林和常绿落叶针阔混交林，表现为带有阔叶成分的林分大于带有针叶成分的林分（图4）。影响森林群落空气负离子浓度变化的因子较为复杂，与温度、湿度、优势树种组结构、郁闭度、林龄、生长势、空间结构、景观格局都有一定的关系。

4 结论与建议

4.1 结论

与自然森林生态系统相比，受空气污染、

人口密度等因素影响，城市森林生态系统的空气负离子含量相对较低，当空气污染严重时，空气负离子会很快与灰尘、烟雾结合沉降^[31-32]；在人口比较密集的区域，空气负离子的寿命也很短，仅存活几秒钟^[33]。对上海市森林生态国家站中山公园观测点的空气负离子与9种气象因子及6种大气污染物的相关性分析、多元线性回归分析表明，空气负离子对湿度最敏感，其次是辐射和温度，最后是PM_{2.5}^[34]。本文以上海中山公园中9个植物群落的长期监测数据为建模数据集，建立群落内空气负离子与气象条件、林分因子等指标的RF模型；在此基础上，根据上海城市森林生态国家站和上海市气候中心的长期定位监测数据、上海市森林资源年度监测数据，评估了涵盖了上海全域内公园绿地、生态片林、现有及拟开放休闲林地、现有及规划中的郊野公园的105处典型森林资源的负离子浓度，并提出了城市森林空气负（氧）离子等级标准：I级>

1 200 个/cm³，800 个/cm³ ≤ II级 < 1 200 个/cm³，500 个/cm³ ≤ III级 < 800 个/cm³，300 个/cm³ ≤ IV级 < 500 个/cm³，V级 < 300 个/cm³。研究结果表明：105个城市森林群落中，全年空气负离子等级以II级和III级为主，IV级次之，I级较少；负离子浓度主要呈现夏秋高、冬春低的季节变化规律；上海城市森林氧吧呈现空间分布不均的特征，浦东新区数量最多，其余依次为中心城区>青浦区>松江区>崇明区>金山区>奉贤区>嘉定区>宝山区，闵行区最少；从森林群落类型来看，春季负离子浓度表现为混交林>纯林，夏季负离子浓度表现为以阔叶树种为主的混交林大于带有针叶树种的林分，秋季负离子浓度表现为常绿针叶林负离子浓度最高，冬季负离子浓度表现为带有阔叶成分的林分大于带有针叶成分的林分。

4.2 建议

上海地处长三角都市圈的中心地区，是中国大陆地区城市化水平最高（89.3%）和人口密度最大（3 923人/km²）的超大城市，居民游憩空间缺乏，对城市森林生态系统服务需求强烈，森林氧吧的服务压力也相应较大，建议：（1）中心城区是高度城市化的特殊生态系统，人口密度也最高（23 092人/km²），公园绿地作为唯一有绿色生命的基础设施，不仅是居民休闲游憩和运动健身的重要场所，还可以结合森林氧吧的营造来为公众健康做好服务，可通过现有公园绿地的升级改造使其达到城市森林氧吧的等级标准，从而更好地满足居民的森林康养需求。（2）不同森林群落类型在不同季节的空气负离子浓度差异较大，上海市正在推进开放休闲林地建设，可以结合林相改造，通过森林群落结构调整和林分郁闭度调控等措施，提升森林环

境中的负离子浓度,更好地发挥其森林氧吧功能。(3)全市森林氧吧资源空间分布不均,可以综合考虑各行政区域人口密度、森林资源现状与居民出游便利程度等因素,因地制宜,均衡布局,提升各区森林氧吧的服务能力,为保障公众健康助力。

注:文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] Transport for London (TfL). Walking Action Plan Making London the World's Most Walkable City[EB/OL]. (2018-06-01)[2022-04-15]. <https://content.tfl.gov.uk/mts-walking-action-plan.pdf>
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.森林生态系统服务功能评估规范GB/T 38582-2020[S].北京:中国质检出版社,2020.
- [3] 佚名.2015首批“中国森林氧吧”名单[J].森林与人类,2015(09):1.
- [4] 佚名.2017中国森林氧吧年度报告[J].森林与人类,2017(12):30-47.
- [5] 牛香,等.2020.森林氧吧监测与生态康养研究——以黑河五大连池风景区为例[M].北京:中国林业出版社,2020.
- [6] 李高飞,李巧云,颜立红,等.城市森林空气负氧离子浓度变化规律研究[J].湖南林业科技,2019,46(2):52-56.
- [7] 张志永,叶兵,杨军,等.杭州市城市森林生态保健功能动态变化监测[J].西北林学院学报,2014,30(5):31-36.
- [8] 罗丰,卢紫君,潘倩虹,等.广州下半年空气负离子分布的时空特征[J].林业与环境科学,2009,25(5):35-40.
- [9] 朱宾宾,孙双红,王立军,等.呼伦贝尔沙地樟子松林负氧离子浓度及其影响因子分析[J].西北林学院学报,2021,36(4):55-59.
- [10] 邓成,张守攻,陆元昌.森林改善空气质量功能监测与评价研究[J].生态环境学报,2015,24(1):84-89.
- [11] 卓凌,廖成章,黄桂林,等.北京西山空气负(氧)离子浓度日变化研究[J].林业资源管理,2016(2):110-115.
- [12] 周德平,佟维华,温日红,等.闽山国家级森林公园负氧离子观测及其空气质量分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):181-187.
- [13] 朱春阳,陈奕汝,郭慧娟,等.城市森林公园植物群落与空气负离子空间分布的关系——以武汉马鞍山森林公园为例[J].中国园林,2021,37(5):109-114.
- [14] 冯燕珠,陈旭,高欢欢,等.公园不同植物配置群落空气负离子变化特征[J].福建农业学报,2019,34(1):95-103.
- [15] 李坤,李传荣,许景伟,等.3种典型道路景观林对诸城市夏季小气候条件的影响[J].生态环境学,2018,27(6):1060-1066.
- [16] 孙文,韩玉洁,殷杉.城市公园不同植物群落内空气负离子变异格局及影响因素[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021(2):151-159.
- [17] 刘新,吴林豪,张浩,等.城市绿地植物群落空气负离子浓度及影响要素研究[J].复旦学报(自然科学版),2011(2):206-212.
- [18] 李媛,鲁绍伟,李少宁,等.北京城市森林空气负离子与臭氧特征及相互作用[J].西南林业大学学报,2021,41(3):53-61.
- [19] 陶雪莹,张伟宁,鲁绍伟,等.北京城市森林空气负离子与PM_{2.5}颗粒物交互效应研究[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1184-1194.
- [20] 关蓓蓓,郑思俊,崔心红,等.城市人工林空气负离子变化特征及其主要影响因子[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(1):53-61.
- [21] 朱舒欣,崔杰,刘超雨,等.石门国家森林公园负氧离子浓度等级评价及其与环境因素的相关性分析[J].林业环境与科学,2019,35(5):14-22.
- [22] 马荣,王志高,黄玉洁,等.午潮山国家森林公园秋季空气负离子浓度及影响因素[J].森林与环境学报,2021,41(1):26-34.
- [23] 彭琳玉,许方岳,王立夫,等.九连山国家森林公园负氧离子浓度时空变化及影响要素研究[J].西北林学院学报,2020,35(5):233-239.
- [24] LIN H F, LIN J M. Generation and Determination of Negative Air Ions[J]. Journal of Analysis & Testing, 2017, 1(1): 6.
- [25] 张雷,王琳琳,张旭东,等.随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例[J].生态学报,2014,34(03):650-659.
- [26] 徐艳平,陈义安.基于随机森林回归和气象参数的城市空气质量预测模型——以重庆市为例[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(06):118-124.
- [27] ZHANG L, LIU S R, SUN P S, et al. Partitioning and Mapping the Sources of Variations in the Ensemble Forecasting of Species Distribution Under Climate Change: A Case Study of Pinus tabulaeformis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5749-5761.
- [28] 卢婧,冯仲科.运用随机森林模型对北京市林分蓄积生长量的预测[J].东北林业大学学报,2020,48(05):7-11.
- [29] 国家林业局.空气负(氧)离子浓度观测技术规范(LY/T 2586-2016)[S].北京:中国标准质检出版社,2016.
- [30] 中国气象局.空气负(氧)离子浓度等级(QX/T 380-2017)[S].北京:中国标准质检出版社,2017.
- [31] 李少宁,李媛,赵旭,等.北京西山国家森林公园空气负离子与大气污染物关系研究[J].西南农业学报,2021,34(10):2269-2273.
- [32] 熊丽君,王卿,龚静香,等.城市2种用地空气负离子与污染因子的关联性[J].环境科学与技术,2019,42(S1):163-172.
- [33] 马芙蓉,张一舟.昆明市城区不同区域环境空气负氧离子浓度变化特征分析[J].林业调查规划,2019,44(03):30-34.
- [34] MIAO S, ZHANG X Y, HAN Y J, et al. Random Forest Algorithm for the Relationship between Negative Air Ions and Environmental Factors in an Urban Park[J]. Atmosphere, 2018, 9(12): 463.