

北京市绿化隔离地区空气负离子供给能力及影响因素分析

刘晓娜, 张继平, 乔青*, 杨宁

北京市生态环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037

摘要: 为探析北京市绿化隔离地区(简称“绿隔地区”)空气负离子的供给时空规律及其影响因素, 基于植被生长季空气负离子监测数据定量评估了绿隔地区空气负离子供给能力, 并分析了气象因子、植物群落因子对其供给影响的差异性。结果表明: ①绿隔地区植被生长季空气负离子浓度呈先降后升再降的日变化特征, 在14:00左右达到峰值。2022年绿隔地区森林植物群落空气负离子供给量为 3.02×10^{21} 个, 供给能力为 0.51×10^{16} 个/ m^2 , 第二道绿化隔离地区(简称“二绿地区”)空气负离子供给能力和供给量均明显优于第一道绿化隔离地区(简称“一绿地区”), 主要与森林面积比例、植物群落因子差异有关。②空气负离子浓度主要受温度影响, 并与温度呈显著负相关, 二绿地区对温度响应更显著, 但相对湿度对其影响不显著。③空气负离子浓度受植物群落因子影响显著, 植被覆盖度、林分阶段、群落结构为主要影响因素, 并均与空气负离子浓度呈显著正相关。不同植物群落因子的空气负离子浓度差异明显, 在林分阶段上表现为近自然林>人工林, 在林分类型上表现为混交林>纯林, 在群落类型上表现为针阔混交林>阔叶林>针叶林, 在群落结构上表现为乔灌木>乔木>草本。研究显示, 乔灌木结构的针阔混交林的空气负离子供给能力最高, 而草本结构的针叶林供给能力最低, 未来应重点加强近自然林营建, 构建混交、复层、异龄、多功能森林群落, 其中, 一绿地区应重点进行林分类型和群落结构调整, 二绿地区应重点关注群落类型和群落结构优化以及植被覆盖度提升。

关键词: 空气负离子; 供给能力; 植物群落; 气象因子; 城市森林; 绿化隔离地区

中图分类号: X826

文章编号: 1001-6929(2024)10-2204-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.08.15

Service Capacity of Negative Air Ions and Their Influencing Factors in the Green Belt Areas of Beijing

LIU Xiaona, ZHANG Jiping, QIAO Qing*, YANG Ning

Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing 100037, China

Abstract: To explore the spatial and temporal dynamics of negative air ion provision and the influencing factors in the Green Belt Areas of Beijing, this study used *in-situ* monitoring records to quantitatively examine the provision capacity of negative air ions during the vegetation growing seasons. It also analyzed the effects of meteorological factors and vegetation communities. The results showed that: (1) During the growing season, the concentration of negative air ions generally displayed notable diurnal variations, peaking at around 14:00. In 2022, the total negative air ions provided by local forest plant communities in the Green Belt Areas reached 3.02×10^{21} ions, with supply capacity of 0.51×10^{16} ions/ m^2 . The second Green Belt areas significantly outperformed the first in both supply capacity and scale of negative air ions, primarily due to differences in forest area proportion and vegetation communities. (2) The concentration of negative air ions was mainly affected by temperature during the growing season, showing a significant negative correlation, particularly in the second Green Belt Areas, while the effect of relative humidity was insignificant. (3) Vegetation community factors had a significant impact on negative air ion concentration. Vegetation coverage, forest stand stage, and community structure were the main influencing factors, all showing significant positive correlations. The concentration levels of negative air ions varied significantly across different vegetation community factors, following this order: near-natural forest > artificial forest, mixed forest > pure forest, conifer-broadleaf forest > broadleaf forest > coniferous forest, and arbor with shrubs and herbage > arbor with shrubs > arbor > arbor with herbage. This study

收稿日期: 2024-05-20

修订日期: 2024-07-25

作者简介: 刘晓娜(1986-), 女, 山东临沂人, 副研究员, 博士, 主要从事生态系统服务和生态环境质量评价研究, xnliu1986@163.com

* 责任作者: 乔青(1978-), 女, 河南南召人, 副研究员, 博士, 主要从事区域生态学研究, qiaoqing@cee.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41901260, 42371320)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.41901260, 42371320)

revealed that conifer-broadleaf forest with shrubs and herbage provided the highest concentration of negative air ions, while coniferous forest with herbage provided the lowest. In the future, efforts should focus on strengthening the construction of near-natural forests and creating mixed, multi-layered, and multifunctional forest communities. In the first Green Belt Area, adjustments in stand types and community structure are essential, while in the second Green Belt Area, optimization of community type and structure, as well as improvements in vegetation coverage, should be prioritized.

Keywords: negative air ions; service capacity; vegetation community; meteorological factors; urban forests; the Green Belt Areas

空气负离子 (Negative air ions, NAI) 被称为“空气维生素和生长素”, 广泛分布于森林、河流、湿地等自然环境中, 具有明显的空间分布特征, 直接影响空气质量和人类健康, 是反映城市生态系统供给服务能力的重要指标^[1-6]。空气负离子浓度对生态环境变化反应非常敏感, 受地理空间位置、人类活动、自然环境、天气条件、植被覆盖等多方面的影响, 在不同条件下空气负离子浓度会有显著差异^[7-9]。不同生态系统类型空气负离子浓度差异明显, 同时具有明显的时空尺度差异, 空气负离子浓度变化与植被生长规律较为一致, 植被生长旺季的夏季空气负离子浓度最高^[10-12], 也是分析植物群落因子对空气负离子影响的理想时段^[13]。空气负离子浓度是评价植物群落改善空气质量的重要指标^[14], 世界卫生组织指出, 清新空气负离子含量不应低于 1 000~1 500 个/cm³, 部分专家认为空气负离子含量不应低于 600 个/cm³ 才能维持健康基本需求^[15-16], 目前中国气象、林业等部门已将空气负离子浓度作为监测空气质量的重要指标^[17]。

城市森林在维持城市生态平衡以及为城市居民提供生态系统服务方面发挥着至关重要的作用^[18], 而城市绿地植物是改善和提升城市生态环境质量的基本功能单位^[19-20], 因此空气负离子浓度成为城市绿地优质生态产品供给的重要指标^[21-22]。已有研究^[23-26]表明, 不同森林类型、植被配置模式、郁闭度、树种以及植物种类对环境内空气负离子浓度的影响差异显著。针对植物群落的城市绿地空气负离子生态环境效应研究逐渐增多, 已有研究主要集中在对空气负离子生物效应、环境效应以及空气负离子浓度变化及其影响等方面, 较少探讨空气负离子的生态系统服务价值和空间异质性^[6,9,24], 对植物群落调节城市森林空气负离子供给机理研究相对不足^[7]。

城市绿地空气负离子研究已成为城市生态环境质量关注的热点, 国外研究多关注空气负离子对空气质量的影响与评价, 国内研究更侧重空气负离子的生态环境因素分析^[6,27-29]。北京市作为首都和首个全域国家森林城市, 生态环境质量和城市生态品质一直备受关注。北京市绿化隔离地区是首都生态文明建设

的重要阵地, 是构建平原地区生态安全格局和实现城乡结合部减量提质增绿的关键区域, 也是城市居民优质生态环境质量需求区域。经过两轮平原造林绿化工程, 大尺度互联互通森林生态系统初见规模, 是城市绿地重要组成部分, 也是开展城市森林生态系统服务研究的典型区域^[30]。目前北京市绿化隔离地区空气负离子相关研究较少, 已有研究范围多为不同功能区、典型城市公园绿地等^[31-34], 对于空间异质性研究较为鲜见, 从植物群落微观尺度系统开展城市绿地空气负离子供给能力的研究尚不全面。基于此, 该研究基于植被生长季的空气负离子监测数据, 在分析空气负离子浓度日变化特征基础上, 评估北京市绿化隔离地区空气负离子供给服务能力, 剖析气象因子、植物群落因子对空气负离子供给影响的差异性, 以期为北京市绿化隔离地区城市绿地后期管理建设和健康森林经营提供决策参考, 同时也为城市生态环境质量评价以及城市居民生活质量提升提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

北京市地处华北平原向西北黄土高原、内蒙古高原的过渡地带, 西部和北部系太行山脉和燕山山脉, 山地面积约占市域面积的 2/3, 东南部为平原, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 降水季节分配极不均匀, 全年降水 80% 集中在夏季。《北京城市总体规划 (2016 年—2035 年)》明确提出现状城乡结合部主要是指四环至六环路范围规划集中建设区以外的地区, 即绿化隔离地区 (简称“绿隔地区”), 主要包括第一道绿化隔离地区 (简称“一绿地区”) 和第二道绿化隔离地区 (简称“二绿地区”), 土地面积约 1 220 km², 占北京市土地面积的 7.43% (见图 1), 是构建平原地区生态安全格局、遏制城市摊大饼式发展的重点地区, 也是实现城乡结合部减量提质增绿的关键区域。1958 年, 北京市绿化隔离地区建设的理念首次提出, 2000 年开始全面一绿地区建设, 2017 年启动建设二绿地区^[35]。一绿地区是实现中心城区空间格局的重要组成部分, 是服务保障中心城区生态安全格局的关键区, 涉及朝阳、海淀、丰台、石景山、大兴、昌平 6

个区,面积约为 310 km²,占绿隔地区的 25.41%,已建成城市公园 109 个,“城市公园环”基本闭合。二绿地区是服务保障首都核心功能、维护城市生态安全韧性、巩固平原区生态安全格局的大尺度绿色空间和战略空间,涉及朝阳、海淀、丰台、大兴、昌平、通州、顺义、门头沟、房山、石景山 10 个区,面积约为 910 km²,占绿隔地区的 74.59%,已建成郊野公园 44 个,郊野公园环的楔形绿带初见成效。

2012—2017 年和 2018—2022 年,北京市开展了两轮平原地区百万亩造林工程,森林覆盖率得到了显著提升,2022 年北京市和平原区森林覆盖率分别达 44.8% 和 31.4%,相较 2011 年分别提升了 7.2% 和 16.5%。绿隔地区作为北京市平原区造林绿化的主要区域(见图 2),2022 年绿色生态空间面积比例达 65.43%,植被覆盖度为 54.04%,其中林地面积比例达 43.99%,相较 2011 年提高了 20.64 个百分点,大尺度互联互通的森林生态系统初见规模,建设用地面积比例减少了 13.55%,减量增绿效果明显。朝阳区绿隔地区面积和林地面积均最大,其次是海淀区,顺义区林地面积比例最低,而石景山区和门头沟区虽绿隔面积均较小但林地面积比例相对最高(见图 3)。

1.2 数据来源

该研究中空气负离子浓度数据主要来源于 2022 年植被生长季(7 月 21 日—8 月 29 日)实地监测数据,采用能在特定相对湿度(0%~100%)和温度(-40~70 ℃)环境下作业的 EP050C 型大气负氧离子

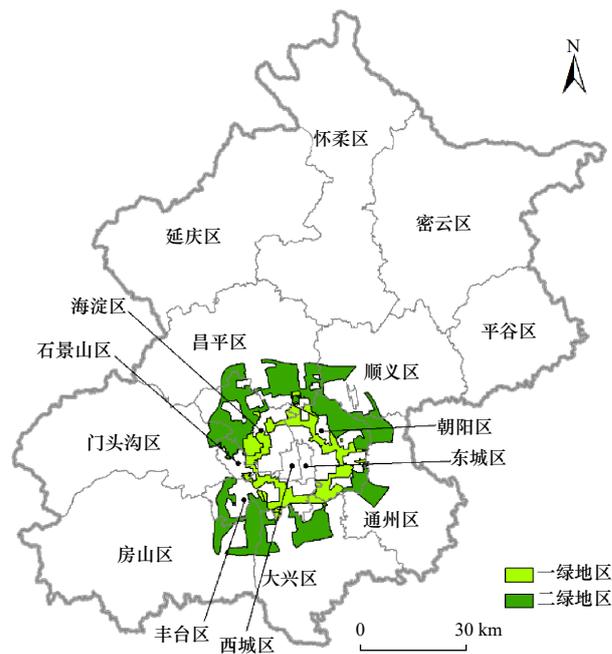


图 1 北京市绿隔地区空间分布

Fig.1 Location of the Green Belt Areas in Beijing

监测仪(北京依派伟业数码科技有限公司)对森林植物群落进行实地监测。EP050C 型大气负氧离子监测仪的空气负离子浓度测量范围为 $0\sim 9.99\times 10^4$ 个/cm³,测量分辨率为 1 个/cm³,最大允许误差为 $\pm 10\%$,监测仪同时配置温度与相对湿度的传感器。空气负离子浓度与气象因子关系密切,根据实际监测情况显示,监测时段内天气晴朗,空气质量较好,温度和相对湿度日变化幅度大体相当,气象状况基本相同,因此该

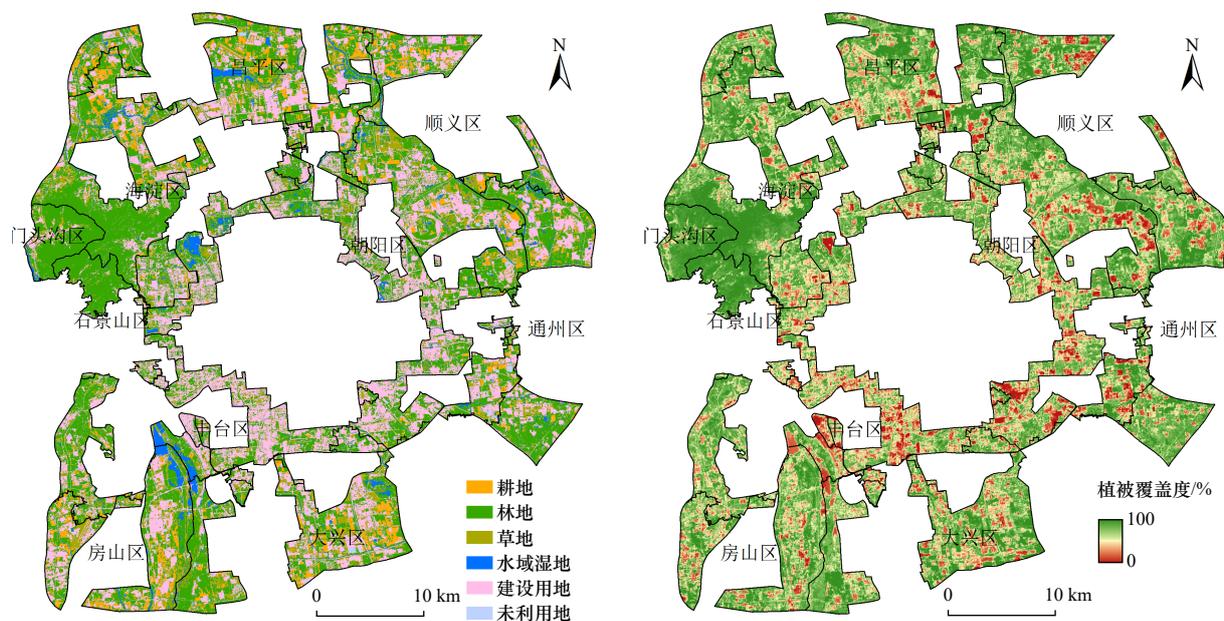


图 2 2022 年北京市绿隔地区土地利用类型和植被覆盖度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use type and vegetation coverage in the Green Belt Areas of Beijing in 2022

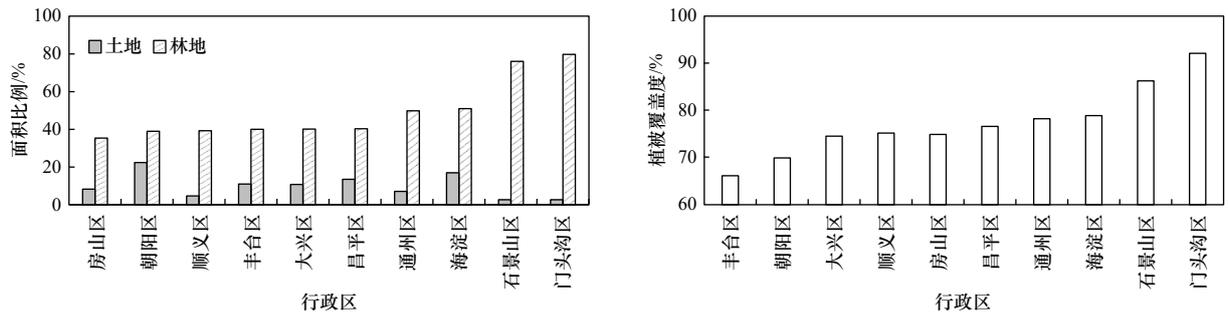


图 3 北京市绿隔地区不同行政区林地面积比例和植被覆盖度

Fig.3 The proportion of forest area and vegetation coverage in different administrative areas of the Green Belt Areas in Beijing

研究认为在监测时段内监测区域的空气负离子浓度外部气象环境同质。参照《森林资源资产价值评估技术规范》(DB11/T 659—2018)^[36]中释放负离子的计算参数为森林植被年生长日数,因此该研究选择植被生长季(夏季)来反映区域空气负离子供给水平。

监测点位分别位于绿隔地区所涉及的 10 个行政区的 22 个城市郊野公园(见图 4),一绿地区城市公园 10 个,二绿地区郊野公园 12 个;每个监测站点选择不同乔木植被类型的 3~7 个监测样地,每个监测样地监测 10~15 min(每分钟产生 1 条记录),获得空气负离子浓度、温度、相对湿度等动态监测信息,同时记录林分类型、群落类型、群落结构、树种类型、树高、胸径等植物群落因子信息。2022 年绿隔地区植被生长季共监测了 128 个点位,其中,一绿地区 59 个

点位,二绿地区 69 个点位,获得了 1 890 条有效记录。根据《空气负(氧)离子浓度观测技术规范》(LY/T 2586—2016)^[37]对实地监测数据的异常值进行处理,每个监测点位取监测时段内的算术平均值作为其实际浓度值。

为便于分析植物群落微观尺度因素对空气负离子浓度的影响,该研究将绿隔地区森林植物群落按照林分类型分为纯林、混交林 2 种类型,群落类型分为阔叶林、针叶林、针阔混交林 3 种类型,群落结构为乔木、乔草、乔灌、乔灌草 4 种模式。此外,由于绿隔地区城市公园和郊野公园建设时期不同,人工林生长处于不同发展阶段,对于百望山森林公园、西山国家森林公园等较早时期建设的公园已进入向近自然状态演化阶段,狼垡城市森林公园、温榆河公园等多处于人工林初级阶段。根据实地调查的主要乔木树种的树高和胸径,结合公园建设时间,该研究将林分发展阶段分为人工林和近自然林 2 种类型。

1.3 研究方法

为体现绿隔地区森林植物群落空气负离子供给对人类福祉的贡献,该研究在参考《森林资源资产价值评估技术规范》(DB11/T 659—2018)^[36]的基础上,将森林植物群落产生的空气负离子浓度减去对人类有益的空气负离子最低浓度(600 个/cm³)^[15]来表征绿隔地区森林植物群落空气负离子的供给服务能力^[38],计算公式:

$$G_a = 1.314 \times 10^5 \times 10^{10} \times (Q_a - 600) \times A \times H / L \quad (1)$$

式中: G_a 为植被生长季森林植物群落空气负离子数量, 个/a; Q_a 为实测空气负离子浓度, 个/cm³; A 为森林面积, hm²; H 为实测树木平均高度, m; L 为空气负离子寿命, min, 取值为 1 min; 1.314×10^5 为夏季分钟数。

采用 SPSS Statistics 22.0 软件的 Pearson 相关性

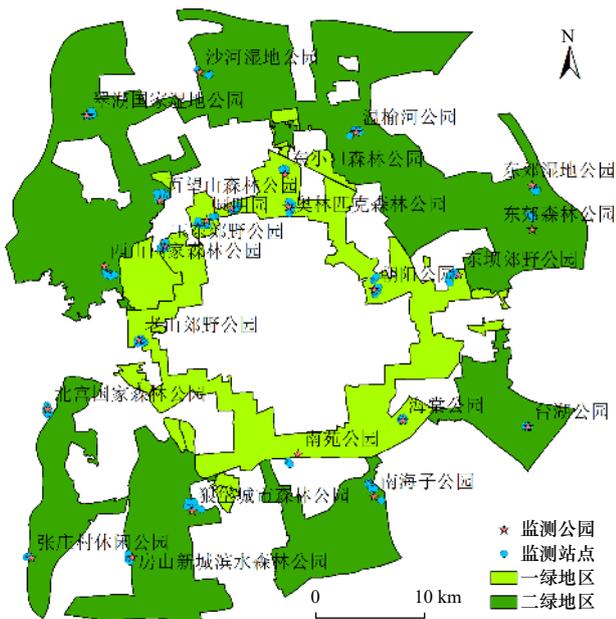


图 4 北京市绿隔地区空气负离子监测点位分布

Fig.4 Stations distribution for monitoring air negative ions in the Green Belt Areas of Beijing

分析探讨绿隔地区空气负离子浓度与温度、相对湿度等气象因子,以及与植被覆盖度、林分阶段、林分类型、群落结构、群落类型等植物群落因子的相关关系。

2 结果与讨论

2.1 空气负离子供给能力分析

根据实测结果得出,绿隔地区植被生长季空气负离子浓度具有明显的日变化特征,整体呈先降后升再降的变化特征,在 14:00 左右达到峰值,之后缓慢降低(见图 5)。对比发现,不同地理位置空气负离子浓度日变化略有差异,二绿地区的温榆河公园和西山国家森林公园空气负离子浓度的日变化相似,均为先升后降略升再降的变化特征,而一绿地区的奥林匹克森林公园与绿隔地区整体变化较为一致,表现为先降后升再降的变化特征。

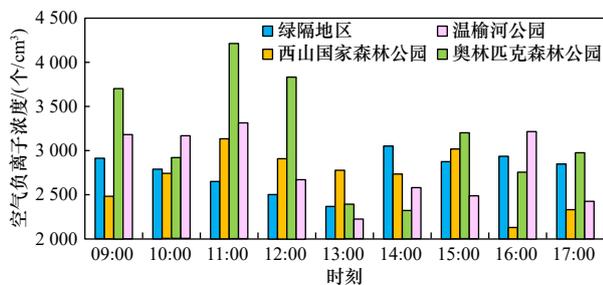


图 5 北京市绿隔地区空气负离子浓度日变化情况

Fig.5 Diurnal variations in the concentration of negative air ions in the Green Belt Areas of Beijing

采用 ArcGIS 中的 Kriging 空间插值方法进行模拟,获得绿隔地区 2022 年森林植物群落空气负离子供给能力空间分布(见图 6)。2022 年绿隔地区森林植物群落空气负离子供给量为 3.02×10^{21} 个,供给能力为 0.51×10^{16} 个/m²,空气负离子浓度平均值为 2858 个/cm³,远超过世界卫生组织规定的清新空气中空气负离子浓度应大于 1500 个/cm³,达到国际清新空气标准;西山片区森林空气负离子供给能力最高,其次是北部地区,东南部区域最低。由图 7 可见,不同空间位置影响空气负离子的供给能力,二绿地区空气负离子供给能力和供给量均明显高于一绿地区,这与朱舒欣等^[9]研究结果相似,表现为远郊城市森林>近郊城市森林>城区城市森林的特征,城市森林面积越大为人类提供的空气负离子供给服务越大^[38]。海淀区森林空气负离子供给量最高,顺义区供给量最低,二者空气负离子供给能力大体相当,主要是由于森林面积比例差异所致;石景山区森林空气负离子供给能力最强但供给量较低,大兴区空气负离子供给能力最弱。基于各区林地保护利用规划和实地调查结果分析,由

于林分发展阶段不同,空气负离子供给空间异质性主要考虑受树龄、郁闭度等植物群落因子影响^[17]。未来有必要基于不同季节固定点位连续监测数据来反演绿隔地区生态系统空气负离子供给能力,从而更全面地开展绿隔地区生态系统空气负离子供给空间差异性分析。

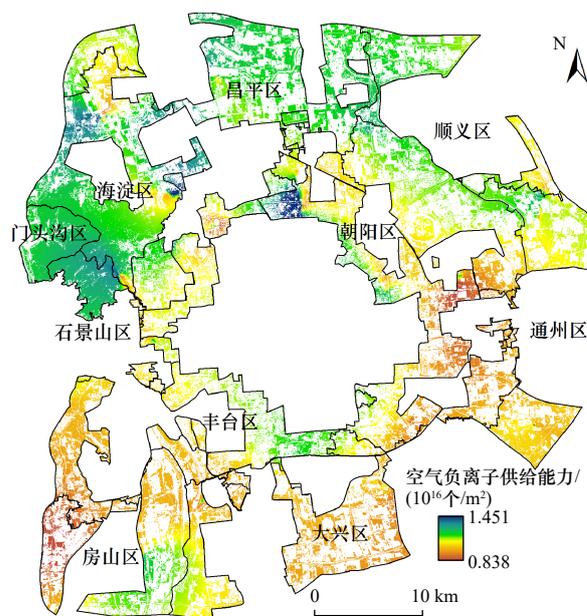


图 6 北京市绿隔地区森林植物群落空气负离子供给能力空间分布

Fig.6 Spatial patterns of negative air ions provision capacity of forest plant communities in the Green Belt Areas of Beijing

2.2 空气负离子浓度与气象因子相关性分析

空气负离子浓度与气象因子关系密切^[33],主要受到温度和相对湿度的影响,但受同一因素影响机制因季节而异^[14,39]。绿隔地区植被生长季空气负离子浓度主要受温度影响,且与温度呈显著负相关($P < 0.01$)(见图 8 和表 1),但与相对湿度关系不显著。由此可见,植被生长季温度越低,空气负离子浓度越高,清新的空气往往伴随着舒适的温度,温度越高越不利于空气负离子浓度的提升,而相对湿度在植被生长季并不是主要影响因素,这与植物生长规律和北京地区相关研究结论^[31,33-34]相一致。从不同地区来看,二绿地区温度对空气负离子浓度的影响更大,相关系数绝对值明显高于一绿地区,表明近郊森林更具有降温及健康增益的效果。不同季节条件下空气负离子浓度与气象因子相关性不同^[33],未来有必要基于固定监测点位年度连续监测数据,并考虑监测天气状况、风速等其他气象因子,进一步分析不同时段绿隔地区

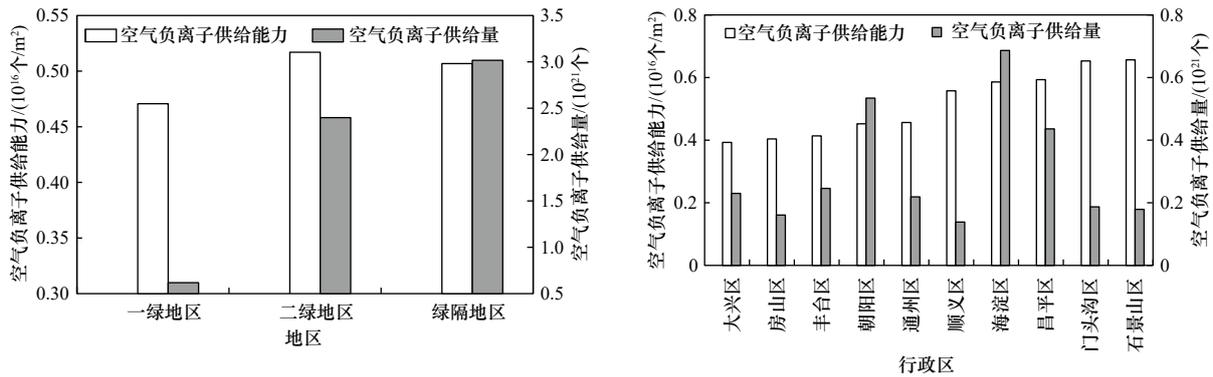


图 7 北京市绿隔地区森林植物群落空气负离子供给能力对比

Fig.7 Comparison of negative air ions provision capacity of forest plant communities in the Green Belt Areas of Beijing

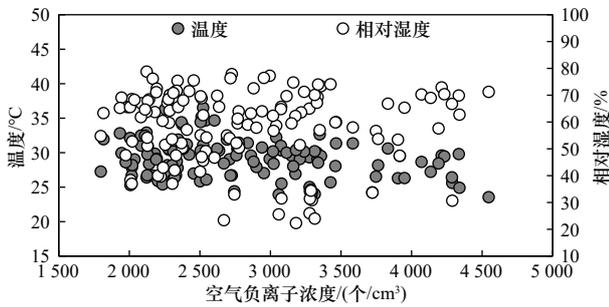


图 8 北京市绿隔地区空气负离子浓度与气象因子关系

Fig.8 Correlation between concentration of negative air ions and meteorological factors in the Green Belt Areas of Beijing

空气负离子浓度与气象因子的相关关系。

2.3 空气负离子浓度与植物群落因子相关性分析

调查发现,绿隔地区森林主要处于人工林阶段,近自然林相对较少,林分类型主要为混交林,群落类型主要为阔叶林,而群落结构主要为乔草配置,乔灌、乔灌草结构较少。一绿地区植被覆盖度远低于二绿地区,森林植物群落特征与绿隔地区相似,但普遍存在林分郁闭度高、通风透光性差、林木残冠或偏冠等问题;二绿地区林分类型中混交林与纯林比重大体相当,尽管具有较高的近自然林比重和植被覆盖度,但也主要呈现出植物群落层次单一、部分新植林郁闭度高等问题。

绿隔地区空气负离子浓度受植物群落因子影响显著,不同植物群落因子与空气负离子浓度关系差异明显。植被覆盖度、林分阶段、群落结构是影响空气负离子供给的主要因素,并均与空气负离子浓度呈显著正相关(见图 9 和表 2)。

从植被覆盖度来看,不同地区森林面积和植被覆盖度差异较大,空气负离子浓度与植被覆盖度呈显著正相关($P<0.01$),在二绿地区二者表现出更高的正相关性,主要因为二绿地区具有更高的林地面积比例和

表 1 北京市绿隔地区空气负离子浓度与温度和相对湿度的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of concentration of negative air ions and temperature and relative humidity in the Green Belt Areas of Beijing

地区	参数	空气负离子浓度	温度	相对湿度
绿隔地区	空气负离子浓度	1	-0.260**	-0.004
	温度	-0.260**	1	0.221**
	相对湿度	-0.004	0.221**	1
一绿地区	空气负离子浓度	1	-0.083*	-0.058
	温度	-0.083*	1	0.519**
	相对湿度	-0.058	0.519**	1
二绿地区	空气负离子浓度	1	-0.517**	0.013
	温度	-0.517**	1	-0.074
	相对湿度	0.013	-0.074	1

注:**表示在 $P<0.01$ 上显著;*表示在 $P<0.05$ 上显著。下同。

植被覆盖度,表明植被覆盖度越高则空气负离子浓度越高,而已有研究^[40-41]也指出,植被覆盖度越高和树种越丰富则空气负离子浓度越高。

从林分阶段来看,不同地区均表现为近自然林空气负离子浓度远高于人工林的特征,表明随着林分发展阶段的深入,群落结构趋于复杂,空气负离子供给能力不断增强^[42],这与彭琳玉等^[21]得出的原始阔叶林的空气负离子供给能力明显高于人工林的结论相似。不同区域近自然林与人工林差异度不同,二者相差度呈一绿地区>绿隔地区>二绿地区的特征。林分阶段与空气负离子浓度呈显著正相关($P<0.01$),且二绿地区二者的相关性最高,主要由于二绿地区具有更高的近自然林和植被立体配置。

从林分类型来看,绿隔地区和二绿地区的混交林空气负离子浓度均高于纯林,二绿地区纯林和混交林差异更为明显,而一绿地区则为纯林高于混交林。林分类型与空气负离子浓度呈正的弱相关性,表明混交

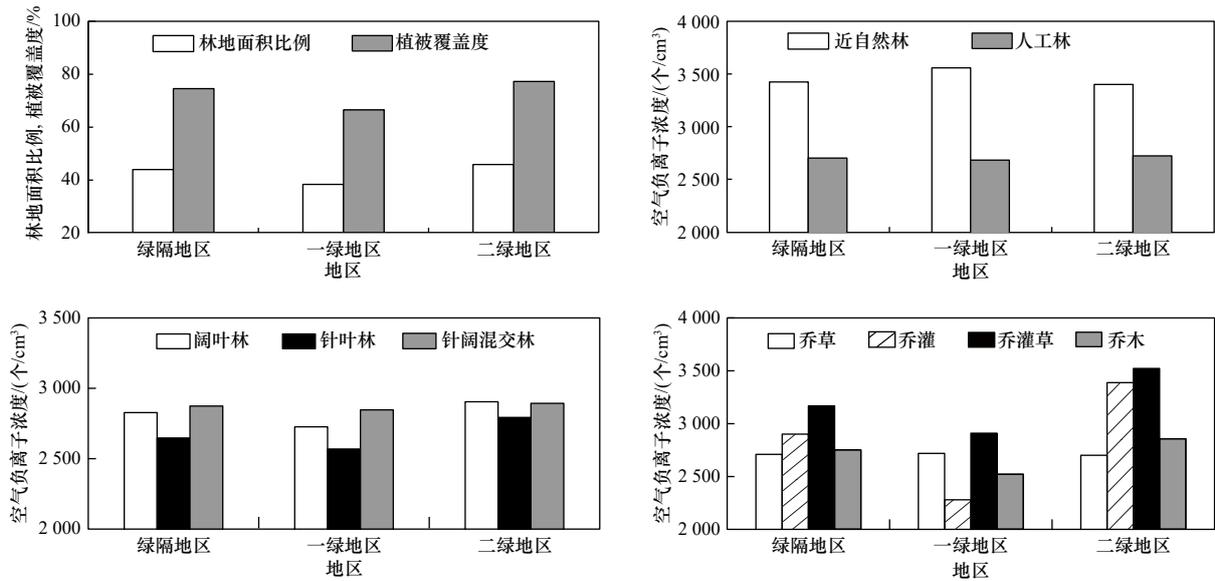


图9 北京市绿隔地区空气负离子浓度与植物群落因子关系

Fig.9 Correlation between concentration of negative air ions and vegetation community factors in different areas in the Green Belt Areas of Beijing

表2 北京市绿隔地区空气负离子浓度与植物群落因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of concentration of negative air ions and vegetation community factors in the Green Belt Areas of Beijing

地区	相关系数	空气负离子浓度	植被覆盖度	林分阶段	林分类型	群落类型	群落结构
绿隔地区	空气负离子浓度	1	0.239**	0.394**	0.022	0.021	0.248**
	植被覆盖度	0.239**	1	0.267**	-0.033	-0.058	0.227**
	林分阶段	0.394**	0.267**	1	0.225*	0.266**	0.594**
	林分类型	0.022	-0.033	0.225*	1	0.416**	0.328**
	群落类型	0.021	-0.058	0.266**	0.416**	1	0.188*
	群落结构	0.248**	0.227*	0.594**	0.328**	0.188*	1
	一绿地区	空气负离子浓度	1	0.191*	0.282*	0.019	0.059
植被覆盖度		0.191*	1	0.046	-0.105	-0.189	0.002
林分阶段		0.282*	0.046	1	0.178	0.324*	0.252*
林分类型		0.119	-0.105	0.178	1	0.266*	0.306*
群落类型		0.059	-0.189	0.324*	0.266*	1	0.072*
群落结构		0.126**	0.002	0.252*	0.306*	0.072*	1
二绿地区		空气负离子浓度	1	0.263*	0.454**	0.079	-0.012
	植被覆盖度	0.263*	1	0.366**	0.052	0.060	0.454**
	林分阶段	0.454**	0.366**	1	0.298*	0.271*	0.816**
	林分类型	0.079	0.052	0.298*	1	0.534**	0.342**
	群落类型	-0.012	0.060	0.271*	0.534**	1	0.274*
	群落结构	0.365**	0.454**	0.816**	0.342**	0.274*	1

林比纯林空气负离子供给能力更强。

从群落类型来看,绿隔地区植物群落类型多样性越高则空气负离子浓度越高,绿隔地区和一绿地区表现为针阔混交林>阔叶林>针叶林,但二绿地区表现为阔叶林>针阔混交林>针叶林,这冯鹏飞等^[7,43]对北京城市绿地的研究结论一致。

从群落结构来看,不同地区植物群落结构类型空

气负离子浓度差异明显,绿隔地区和二绿地区均表现为乔灌草>乔灌>乔木>乔草,而一绿地区则表现为乔灌>乔灌草>乔草>乔木。不同区域植物群落结构与空气负离子浓度均呈显著正相关(P 均小于0.01),二绿地区表现为更高的正相关性。相关研究^[25-26,40]表明,植物群落结构越复杂其提供的空气负离子浓度越高。

由表 2 可见,不同地区林分阶段是影响空气负离子浓度差异的最大因素,一绿地区中植被覆盖度影响高于群落结构,二绿地区和绿隔地区则为群落结构影响高于植被覆盖度。绿隔地区乔灌木结构的针阔混交林空气负离子供给能力最高,而乔草结构的针叶林是空气负离子供给最低的配置模式。植物群落结构是影响空气负离子含量的关键因素^[42],表现为复层>双层>单层的特征^[43]。综上,为提升绿隔地区空气负离子供给能力,未来应重点加强近自然林营建,构建混交、复层、异龄、多功能森林群落,其中一绿地区应重点进行林分类型和群落结构调整,二绿地区重点关注群落类型和群落结构优化以及植被覆盖度提升。

3 结论

a) 北京市绿隔地区植被生长季空气负离子浓度具有明显的日变化特征,整体呈先降后升再降的变化特征,在 14:00 左右达到峰值,之后趋于缓慢降低。2022 年绿隔地区森林植物群落空气负离子供给量为 3.02×10^{21} 个,供给能力为 0.51×10^{16} 个/m²,空气负离子浓度均值为 2 858 个/cm³,达到国际清新空气标准。西山片区森林空气负离子供给能力最高,东南部区域最低;二绿地区空气负离子供给能力和供给量均明显优于一绿地区;海淀区森林空气负离子供给量最高,顺义区供给量最低,石景山供给能力最强,大兴区供给能力最弱,主要与森林面积比例、植物群落因子差异有关。

b) 北京市绿隔地区植被生长季空气负离子浓度主要受温度影响,二者呈显著负相关,与相对湿度呈不显著负相关,二绿地区对温度响应更显著。绿隔地区森林主要为人工林和混交林,群落类型主要为阔叶林,群落结构主要为乔草配置。空气负离子浓度受植物群落因子影响显著,植被覆盖度、林分阶段、群落结构为主要影响因子,并均与空气负离子浓度呈显著正相关,其中,林分阶段为最大影响因素,其次为群落结构。乔灌木结构的针阔混交林空气负离子供给能力最高,而乔草结构的针叶林供给能力最低。

c) 北京市绿隔地区不同植物群落因子的空气负离子浓度差异明显:林分阶段上,不同地区均表现为近自然林>人工林的特征;林分类型上,绿隔地区和二绿地区均表现为混交林>纯林,一绿地区为纯林>混交林;群落类型上,绿隔地区和一绿地区均表现为针阔混交林>阔叶林>针叶林,二绿地区为阔叶林>针阔混交林>针叶林;群落结构上,绿隔地区和二绿地区均表现为乔灌木>乔草>乔木>乔草,而一绿地区为乔草>乔灌木>乔木。未来应重点加强近自然

林营建,构建混交、复层、异龄、多功能森林群落,其中,一绿地区应重点进行林分类型和群落结构调整,二绿地区重点关注群落类型和群落结构优化以及植被覆盖度提升。

参考文献 (References):

- [1] KOSENKO E A,KAMINSKY Y G,STAVROVSKAYA I G,et al. The stimulatory effect of negative air ions and hydrogen peroxide on the activity of superoxide dismutase[J].FEBS Letters,1997, 410(2/3):309-312.
- [2] 钟林生,吴楚材,肖笃宁.森林旅游资源评价中的空气负离子研究 [J].生态学杂志,1998,17(6):56-60.
ZHONG L S,WU C C,XIAO D N.Aerocation researches in evaluation of forest recreation resources[J].Chinese Journal of Ecology,1998,17(6):56-60.
- [3] 韦朝领,王敬涛,蒋跃林,等.合肥市不同生态功能区空气负离子浓度分布特征及其与气象因子的关系 [J].应用生态学报,2006, 17(11):2158-2162.
WEI C L,WANG J T,JIANG Y L,et al.Air negative charge ion concentration and its relationships with meteorological factors in different ecological functional zones of Hefei City[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(11):2158-2162.
- [4] JIANG S Y,MA A L,RAMACHANDRAN S.Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement[J]. International Journal of Molecular Sciences,2018,19(10):2966.
- [5] HAO P W,SHI C Q,ZHAO Y N,et al.Temporal variation characteristics of negative air ion concentration and air quality evaluation in Songshan National Nature Reserve,Beijing[J]. Journal of Resources and Ecology,2023,14(6):1156-1163.
- [6] 肖华斌,何心雨,王玥,等.城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展:基于生态系统服务供需匹配视角 [J].生态学报,2021, 41(12):5045-5053.
XIAO H B,HE X Y,WANG Y,et al.Research progress on the correlation between urban green space and residents' physical and mental well-being from a perspective of matching ecosystem services supply and demand[J].Acta Ecologica Sinica,2021, 41(12):5045-5053.
- [7] 冯鹏飞,于新文,张旭.北京地区不同植被类型空气负离子浓度及其影响因素分析 [J].生态环境学报,2015,24(5):818-824.
FENG P F,YU X W,ZHANG X.Variations in negative air ion concentrations associated with different vegetation types and influencing factors in Beijing[J].Ecology and Environmental Sciences,2015,24(5):818-824.
- [8] LI A B,LI Q L,ZHOU B Z,et al.Temporal dynamics of negative air ion concentration and its relationship with environmental factors:results from long-term on-site monitoring[J].Science of the Total Environment,2022,832:155057.
- [9] 朱舒欣,何茜,苏艳,等.不同地理空间城市森林空气负离子浓度及其影响因素研究 [J].北京林业大学学报,2023,45(11):66-77.
ZHU S X,HE Q,SU Y,et al.Negative air ion concentration and its influencing factors of urban forest in different geographical spaces

- [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(11): 66-77.
- [10] 邵海荣, 贺庆棠, 阎海平等. 北京地区空气负离子浓度时空变化特征的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 35-39.
SHAO H R, HE Q T, YAN H P, et al. Spatio-temporal changes of negative air ion concentrations in Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(3): 35-39.
- [11] 胡宏友, 肖亮嫦, 张万旗等. 厦门城市公园景观格局与植物群落结构的相关性 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2229-2234.
HU H Y, XIAO L C, ZHANG W Q, et al. Correlations between landscape pattern and plant community structure in Xiamen urban parks [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2229-2234.
- [12] 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.
- [13] LI A B, LI Q L, YANG Y H, et al. Stand structure and environment jointly determine negative air ion concentrations in forests: Evidence from concurrent on-site monitoring in four typical subtropical forests during the growing season [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 220: 105684.
- [14] WANG H, WANG B, NIU X, et al. Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at different spatio-temporal scales [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01008.
- [15] 宗美娟, 王仁卿, 赵坤. 大气环境中的负离子与人类健康 [J]. *山东林业科技*, 2004, 34(2): 32-34.
ZONG M J, WANG R Q, ZHAO K. Aero-anion and human health [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2004, 34(2): 32-34.
- [16] 林金明, 宋冠群, 赵利霞等. 环境、健康与负氧离子 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [17] 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.
ZHU C Y, CHEN Y R, GUO H J, et al. Relationship between spatial and temporal distribution of plant communities and negative air ions in urban forest park: a case study of Ma'anshan forest park [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2021, 37(5): 109-114.
- [18] JAMEAN E S, ABAS A. Valuation of visitor perception of urban forest ecosystem services in Kuala Lumpur [J]. *Land*, 2023, 12(3): 572.
- [19] WILLIS K J, PETROKOFISKY G. The natural capital of city trees [J]. *Science*, 2017, 356(6336): 374-376.
- [20] 李少宁, 于迪, 时聪等. 北京不同类型城市森林中 PM_{2.5} 与 O₃ 的关联性分析 [J]. *环境科学研究*, 2024, 37(3): 536-544.
LI S N, YU D, SHI C, et al. Correlation analysis of PM_{2.5} and O₃ in different types of urban forests in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(3): 536-544.
- [21] 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.
PENG L Y, XU F Y, WANG L F, et al. Temporal and spatial variations of negative oxygen ion concentration and its influencing factors in Jiulian Mountain national forest park [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 233-239.
- [22] BAI B X, CHEN D H, XU T T. Analysis on the change of air anion concentration in different vegetation areas in central and northern Henan [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2014, 25: 1629-1637.
- [23] 吴楚材, 郑群明, 钟林生. 森林游憩区空气负离子水平的研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 75-81.
WU C C, ZHENG Q M, ZHONG L S. A study of the aero-anion concentration in forest recreation area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 75-81.
- [24] WANG Y F, NI Z B, WU D, et al. Factors influencing the concentration of negative air ions during the year in forests and urban green spaces of the Dapeng Peninsula in Shenzhen, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(6): 2537-2547.
- [25] 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.
SUN W, HAN Y J, YIN S. Variation patterns and influencing factors of air anions in different plant communities of an urban park [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021(2): 151-159.
- [26] NIU X, LI Y, LI M N, et al. Understanding vegetation structures in green spaces to regulate atmospheric particulate matter and negative air ions [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13(9): 101534.
- [27] 王薇, 余庄. 中国城市环境中空气负离子研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 705-711.
WANG W, YU Z. Research progress on negative air ions in urban environment in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 705-711.
- [28] SHI G Y, ZHOU Y, SANG Y Q, et al. Modeling the response of negative air ions to environmental factors using multiple linear regression and random forest [J]. *Ecological Informatics*, 2021, 66: 101464.
- [29] 高雅, 郭昌胜, 徐建. 基于文献计量学的环境健康效益评估研究热点及趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(9): 1813-1823.
GAO Y, GUO C S, XU J. Research focus and trend analysis of health benefit evaluation based on bibliometrics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(9): 1813-1823.
- [30] 王博娅. 生态系统服务导向下北京市中心城区绿色空间的现状及优化研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [31] 袁相洋, 孙迎雪, 田媛等. 北京市不同功能区空气负氧离子及影响因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(6): 97-102.
YUAN X Y, SUN Y X, TIAN Y, et al. Experimental research of air negative oxygen ion and their affecting factors in different ecological functional areas of Beijing [J]. *Environmental Science & Technology (China)*, 2014, 37(6): 97-102.
- [32] 潘剑彬, 李树华. 北京城市公园绿地负氧离子效益空间格局特征研究 [J]. *中国园林*, 2015, 31(6): 100-104.
PAN J B, LI S H. Study on the spatial pattern of negative aeroion

- benefits on Beijing Parks[J].*Chinese Landscape Architecture*, 2015,31(6):100-104.
- [33] 李少宁,李媛,鲁绍伟,等.北京西山国家森林公园中空气负离子浓度与气象因子的相关性研究[J].*生态环境学报*,2021,30(3):541-547.
- LI S N,LI A,LU S W,et al.Correlation between air anion concentration and meteorological factors in Beijing Xishan national forest park[J].*Ecology and Environmental Sciences*,2021,30(3):541-547.
- [34] 时聪,鲁绍伟,赵娜,等.北京城市森林空气负离子浓度对温度的响应[J].*生态学杂志*,2023,42(6):1365-1372.
- SHI C,LU S W,ZHAO N,et al.Responses of negative air ion concentration to temperature in urban forests of Beijing[J].*Chinese Journal of Ecology*,2023,42(6):1365-1372.
- [35] 杨慧.北京市绿化隔离地区的形成及相关政策综述[J].*城乡建设*,2020(18):54-57.
- [36] 北京市园林绿化局.森林资源资产价值评估技术规范:DB11/T 659—2018[S].北京:北京市质量技术监督局,2018.
- [37] 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:中国标准出版社,2016.
- [38] 杨春艳,马雯思,张林波,等.厦门市陆地生态系统空气负离子服务能力评估[J].*环境科学研究*,2019,32(12):2015-2021.
- YANG C Y,MA W S,ZHANG L B,et al.Service capacity of negative air ions in the terrestrial ecosystem of Xiamen City[J].*Research of Environmental Sciences*,2019,32(12):2015-2021.
- [39] LUO L H,SUN W,HAN Y J,et al.Importance evaluation based on random forest algorithms:insights into the relationship between negative air ions variability and environmental factors in urban green spaces[J].*Atmosphere*,2020,11(7):706.
- [40] 高得平,卞莹莹,樊敏,等.银川市居民区不同植被配置模式绿地对秋冬季小气候的影响[J].*农业科学研究*,2022,43(1):31-38.
- GAO D P,BIAN Y Y,FAN M,et al.Effects of green spaces with different vegetation allocation patterns in Yinchuan residential areas on autumn and winter microclimate[J].*Journal of Agricultural Sciences*,2022,43(1):31-38.
- [41] SANTOS Da CRUZ D,COSTA B C,SUZUKI P M,et al.Wind effect on microclimate and thermal comfort index in open-air public spaces in the Brazilian rainforest cities[J].*International Journal for Innovation Education and Research*,2020,8(1):196-204.
- [42] 邓成,张守攻,陆元昌.森林改善空气环境质量功能监测与评价研究[J].*生态环境学报*,2015,24(1):84-89.
- DENG C,ZHANG S G,LU Y C.Research on the monitoring and evaluation of forest function in air environmental quality improvement[J].*Ecology and Environmental Sciences*,2015,24(1):84-89.
- [43] 潘剑彬,李佳妮,李树华,等.城市绿地植物群落与空气负离子空间分异特征相关关系研究:以北京奥林匹克森林公园为例[J].*中国园林*,2022,38(6):57-62.
- PAN J B,LI J N,LI S H,et al.Study on the relationship between plant community and spatial differentiation of negative air ions in urban green space:a case study of Beijing Olympic forest park[J].*Chinese Landscape Architecture*,2022,38(6):57-62.

(责任编辑:刘 方)