施春艳,熊洁,张瑶,等.5种室内观赏植物释放空气负离子能力及对空气颗粒物浓度的影响研究[J].江西农业大学学报,2025,47(6):1608-1619.
SHI C Y,XIONG J,ZHANG Y,et al.Negative Air Ion emitting capacity of five indoor ornamental plants and their effect on air particle concentration of airborne particulate matter[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(6):1608-1619.

5种室内观赏植物释放空气负离子能力及对空气颗粒物浓度的影响研究

施春艳[1],熊　洁[1],张　瑶[1],范冰君[2],张绿水[1,3*]

(1.江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045;2.南昌市林业局,江西 南昌 330038;3.江西农业大学 南昌市城乡园林景观研究重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】室内空气质量对人体健康的影响日益凸显,尤其是在现代城市环境中,空气污染和密闭空间的使用加剧了健康风险。空气负离子(negative air ion,NAI)作为一种天然空气净化因子,具有改善空气质量、增强人体免疫调节和缓解心理压力等多重效益。不同室内植物释放空气负离子和吸附空气颗粒物的能力,受其叶表面积、叶形态、自身生物学习性及环境因子的影响,呈现不同趋势及特征。因此,筛选具有高效负离子释放能力以及空气颗粒物净化能力的室内观赏植物,探究负离子浓度和不同气象因子的相关性,可为室内观赏植物的科学选择以及合理规划布局等提供参考,进而为人们提供更健康的室内呼吸环境。【方法】选取2024年4月和7月中的10 d阴雨天和10 d晴天进行试验,以5种室内常用观赏植物金边吊兰、绿萝、白掌、金钻蔓绿绒(大叶金钻)、芦荟为研究对象,分别测定在不同天气条件下5种植物所在室内环境的负离子浓度、$PM_{2.5}$浓度、PM_{10}浓度、温度、相对湿度等指标,对比评价5种植物不同天气释放负离子的能力以及减少空气颗粒物浓度的能力,分析不同植物释放空气负离子的影响因素。【结果】晴天空气负离子浓度大于阴雨天,$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度小于阴雨天。晴天5种室内观赏植物释放负离子浓度平均值由大到小排序为白掌、金边吊兰、绿萝、芦荟和金钻蔓绿绒;阴雨天5种室内观赏植物释放负离子浓度平均值由大到小排序为白掌、绿萝、金钻蔓绿绒、芦荟和金边吊兰。金钻蔓绿绒降低$PM_{2.5}$与PM_{10}浓度的能力最强,晴天白掌次之,阴雨天芦荟次之,绿萝表现最差。不同植物在不同时段对室内负离子浓度的提升和空气颗粒物浓度的降低效果不同。负离子浓度与温度具有显著正相关关系,与相对湿度具有显著负相关关系,其中金边吊兰与芦荟对温湿度响应更为显著。【结论】当以提高室内空气负离子浓度为目的时,优先推荐选用白掌作为室内观赏植物,其次晴天推荐选择金边吊兰、阴雨天推荐选择绿萝。当以净化室内空气颗粒物为目的时,优先推荐选用金钻蔓绿绒作为室内观赏植物,其次晴天推荐选用白掌、阴雨天推荐选用芦荟。同时,提高室内温度、降低相对湿度有利于室内观赏植物释放空气负离子。特别是使用金边吊兰和芦荟2种植物时,应加强对室内温湿度的调控,以提高其释放空气负离子的能力。

关键词:室内观赏植物;空气负离子;$PM_{2.5}$;空气颗粒物;室内环境
中图分类号:TU831　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)06-1608-12
CSTR:32399.14.aauj.2025139

收稿日期:2025-03-31　　**修回日期:**2025-05-03
基金项目:国家自然科学基金项目(33260418)
Project supported by the National Science Foundation of China(33260418)

作者简介:施春艳,硕士生,orcid.org/0009-0004-9403-9199,3238479532@qq.com;*通信作者:张绿水,教授,博士,主要从事园林生态和园林历史理论等研究,orcid.org/0000-0002-8786-0710,zhanglvshui@sina.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Negative Air Ion emitting capacity of five indoor ornamental plants and their effect on air particle concentration of airborne particulate matter

SHI Chunyan[1], XIONG Jie[1], ZHANG Yao[1], FAN Bingjun[2], ZHANG Lüshui[1,3*]

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Nanchang Forestry Bureau, Nanchang 330038, China; 3. Key Laboratory of Urban and Rural Landscape Research in Nanchang, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [**Objective**] The impact of indoor air quality on human health is becoming increasingly evident, especially in modern urban environments where health risks are exacerbated by air pollution and the use of confined spaces. Negative Air Ion (NAI), as a kind of natural air purification factor, has multiple benefits such as improving air quality, enhancing human immune regulation and relieving psychological stress. The release of NAI and adsorption of airborne particulate matter by different indoor plants are affected by their leaf surface area, leaf morphology, their own biological habits and environmental factors, showing different trends and characteristics. Therefore, screening indoor ornamental plants with efficient NAI releasing and particulate matter purifying abilities, and investigating the correlation between NAI concentration and different meteorological factors can provide reference for people to make scientific selection of indoor ornamental plants and rational planning and layout, thus providing a healthier indoor respiratory environment. [**Method**] In April and July 2024, 10 rainy days and 10 sunny days were selected for the experiment, and five commonly used indoor ornamental plants, namely, *Chlorophytum comosum* 'Variegatum', *Epipremnum aureum*, *Spathiphyllum kochii*, *Philodendron tabei* 'con-go' and *Aloe vera*, were used for the experiment, and the indoor anion concentration, $PM_{2.5}$ concentration, PM_{10} concentration, temperature and relative humidity were measured in different weather conditions and with different plants, respectively. The ability of the five plants to release negative ions in different weather conditions and reduce the concentration of airborne particles were evaluated comparatively, and the influencing factors of the release of negative ions by different plants were analyzed. [**Result**] NAI concentrations were higher on sunny days than on rainy days, $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations were lower than on rainy days. On sunny days, the average values of NAI released by five kinds of indoor ornamental plants were, in descending order, *Spathiphyllum kochii* > *Chlorophytum comosum* 'Variegatum' > *Epipremnum aureum* > *Aloe vera* > *Philodendron tabei* 'con-go'; on rainy and cloudy days, the average values of NAI released by five kinds of indoor ornamental plants were, in descending order, *Spathiphyllum kochii* >*Epipremnum aureum* > *Philodendron tabei* 'con-go' > *Aloe vera* > *Chlorophytum comosum* 'Variegatum'. The *Philodendrontabei* 'con-go' exhibits the strongest ability to reduce $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations, followed by the *Spathiphyllum kochii* on sunny days and the *Aloe vera* on rainy days, while the *Epipremnum aureum* shows the least effectiveness. Different plants exhibit varying effects on enhancing indoor NAI concentrations and reducing airborne particulate matter concentrations at different time periods. Studies have shown there is a significant positive correlation between the concentration of negative ions and temperature, while a significant negative correlation exists between the concentration of negative ions and relative humidity. Among the plants, the *Chlorophytum comosum* 'Variegatum' and *Aloe vera* demonstrate more pronounced responses to changes in temperature and humidity. [**Conclusion**] When the objective is to increase the concentration of NAI indoors, *Spathiphyllum kochii* is preferentially recommended as an indoor ornamental plant. Secondly, *Chlorophytum comosum* 'Variegatum' is recommended on sunny days, and *Epipremnum aureum* is recommended on rainy days. When the goal is to purify indoor airborne particulate matter, *Philodendron tabei* 'con-go' is preferentially recommended as an indoor ornamental plant. Secondly, *Spathiphyllum kochii* is recommended on sunny days,

and *Aloe vera* is recommended on rainy days. Moreover, increasing the indoor temperature and reducing the relative humidity are conducive to the release of NAI by indoor ornamental plants. Especially when using the two plants, *Chlorophytum comosum* 'Variegatum' and *Aloe vera*, it is necessary to strengthen the regulation of indoor temperature and humidity to enhance their ability to release NAI.

Keywords: indoor ornamental plants; negative air ions; $PM_{2.5}$; airborne particulate matter; indoor environment

【研究意义】随着社会经济的快速发展和生活方式的改变，城市居民平均有超过80%的生活和工作时间处于室内或其他封闭环境中[1]。除城市化快速发展过程中产生的工业废气、机动车尾气等因素造成的空气污染外，室内人类活动与建材装修等产生的污染同样威胁室内空气质量，其中影响健康的细颗粒$PM_{2.5}$与可吸入颗粒物PM_{10}备受关注。空气颗粒物易吸附细菌、重金属离子及化学物质等有毒有害物质，会危害呼吸系统、心血管系统和免疫系统，引发咳嗽、增加心血管疾病风险，严重威胁人体健康。长期生活在高浓度$PM_{2.5}$的环境中，发生肺癌的风险可能会增加[2-3]。空气负离子被称为"空气维生素"，是一项衡量空气环境质量的重要指标。置身于空气负离子浓度高的环境开展活动，体内血氧浓度会提升，新陈代谢进程会加快，有利于实现身心的调养修复[4]。空气负离子具有弱电性，这一特性使其极易与空气中呈正电性的颗粒物相互吸附，在静电力的作用下空气颗粒物不断聚集，体积和质量增大，最后在重力作用下沉淀[5]，在空气净化、减少空气污染中发挥着重要作用[6-7]。目前已有试验和研究论证了空气负离子能有效抑制空气颗粒物和空气中细菌的浓度，提高室内空气环境质量[8]。而植物的尖端放电和光合作用形成的光电效应是地面空气负离子的主要来源之一[9-10]，所以除植物本身对$PM_{2.5}$和PM_{10}的吸附作用外[11]，植物产生的空气负离子也对空气颗粒物有净化作用。因此，筛选出释放空气负离子和减少空气颗粒物浓度能力强的植物对提高室内空气质量尤为重要。【前人研究进展】植物释放空气负离子可以提高空气环境质量[12]。日本学者构建的安倍空气质量评价指数将空气负离子作为指标，空气负离子浓度越高，空气越清洁，人体感觉越舒适；相反空气负离子含量越低，空气质量越差。经医学研究[13]证明，空气负离子浓度达到700 ions/cm^{3}以上时，有利于人体维持良好的健康状态，具有辅助养生保健作用；浓度达到10 000 ions/cm^{3}以上时，具有疗愈效果。且已有部分研究[14-15]表明空气负离子浓度与植物品种、温度、湿度、$PM_{2.5}$浓度具有相关性。在释放空气负离子的植物筛选方面，前人研究[16-17]表明墨兰、金边吊兰、金边虎尾兰释放负离子的浓度高于碰碰香、鹅掌柴等其他植物。在降低空气颗粒物浓度方面，植物主要通过滞留、附着和黏附3种方式降低空气颗粒物[11]，但不同吸附方式的作用机制存在差异[18-19]，常春藤、龙柏和雪松是绿化树种中减少空气颗粒物能力较强的树种[20-22]，且针叶树的吸附能力强于阔叶树种[23]。

【本研究切入点】目前有关室内观赏植物吸附空气颗粒物和释放空气负离子的研究鲜有报道，以提高室内空气质量为目的的室内观赏植物选择等相关研究有待加强。白掌、金钻蔓绿绒、绿萝、芦荟和金边吊兰是国内常见的室内观赏植物，兼顾美观、易养活等优点，是大众的普遍选择。但针对这5种植物在释放空气负离子和消减空气颗粒物能力方面的比较研究，至今尚无定论。如今，市场上空气质量检测仪器已颇为成熟，能够精准测定空气中的负离子浓度、空气颗粒物浓度以及温湿度等参数，并实现实时监测。【拟解决的关键问题】研究拟通过试验监测放置这5种室内观赏植物条件下的室内负离子浓度、$PM_{2.5}$浓度、PM_{10}浓度、温度、相对湿度，并对其浓度变化进行分析比对，筛选具有高效负离子释放能力的室内观赏植物及其影响因素，分析得出不同室内观赏植物对室内颗粒物的消减功效，为合理选用室内观赏植物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与试验材料

本研究测试地点位于江西省南昌市某大学校园办公区域内。江西省南昌市地处北纬28°10′~29°11′，年平均气温约为20 ℃，夏季年均气温为23~28.5 ℃，冬季则为6~13 ℃；冬冷夏热，相对湿度夏季大，冬季小；夏季主导风向为东南风，冬季偏北风。测试地点位于南北朝向的封闭式办公楼的4层某办公室，办公

室进深约6 m,跨度约7 m,容积约117.6 m^3。试验期间无人使用,保持自然采光和通风,无空调、空气净化器等设备运行,尽可能排除其他干扰因素。

结合室内观赏性和人们喜好,试验选取1种百合科、1种阿福花科和3种天南星科,共5种常见室内观赏植物为监测样本,如表1所示。按照植物叶面积测算方法,将叶片形状不规则的植物,转化为相应几何图形来测算,使得5种样本的叶面积尽可能相近,以此消除叶面积这一变量对试验结果的干扰。主要监测项目有负离子浓度、温度、相对湿度、PM_{10}和$PM_{2.5}$浓度。负离子浓度(ions/cm^3)、温度和相对湿度使用ONE-TEST-200xp-1负离子检测仪进行数据采集,该仪器的负离子测量范围为0~1 999×10^3 ions/cm^3,测量精度为1 ions/cm^3;温度测试范围-20~60 ℃,分辨率0.1;相对湿度测量范围0%~95%RH,分辨率0.1。PM_{10}和$PM_{2.5}$浓度(μg/m^3)使用ONETEST-100粉尘浓度仪进行数据采集。该仪器的浓度测量范围为0~1 000 μg/m^3,误差不大于±10%FS,分辨率0.1。测试时仪器与植物高度保持一致,且测试仪器距离样本10 cm。

表1　5种监测样本

Tab.1　Five test samples

科名 Plant family name	品种名 Species name	拉丁学名 Latin name
百合科 Liliaceae	金边吊兰	*Chlorophytum comosum* 'Variegatum'
天南星科 Araceae	绿萝	*Epipremnum aureum*
天南星科 Araceae	白掌	*Spathiphyllum kochii*
天南星科 Araceae	金钻蔓绿绒	*Philodendron tabei* 'con-go'
阿福花科 Asphodelaceae	芦荟	*Aloe vera*

1.2　试验方法

选取办公室内呈菱形分布的4个监测点进行监测,参考人们白天正常待在室内的工作时间,每天09:00—18:00监测,间隔30 min读数1次,将4个监测点每小时读数的均值作为负离子及空气颗粒物的浓度均值。试验分2次进行,第一次试验监测5种植物分别释放的负氧离子浓度,并同步监测室内温度、相对湿度,监测时间为2024年4月2—6日的阴雨天和2024年7月2—6日的晴天。第二次试验监测5种植物环境下$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度,监测时间为2024年4月11—15日的阴雨天和2024年7月13—17日的晴天。为使试验效果更为显著,试验开始前燃烧蚊香15 min以增大$PM_{2.5}$与PM_{10}的浓度,之后放置植物。除放置不同植物外,室内环境条件一致。

1.3　统计分析

运用Excel2019软件和SPSS Statistics26对试验数据进行处理与分析。采用ANOVA单因素方差分析及多重比较,分析不同植物的空气负离子浓度、$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度均值差异,不同气象指标与空气负离子浓度之间的相关关系采用皮尔逊相关性分析。

2　结果与分析

2.1　晴天5种室内观赏植物释放空气负离子的浓度

植物释放空气负离子浓度受其生长特性的影响呈现不同趋势,因此不同植物释放空气负离子浓度可能会呈现不同结果。如表2所示,晴天5种监测样本释放空气负离子浓度均值变化差异明显(P<0.05),平均浓度值由大到小排序为白掌、金边吊兰、绿萝、芦荟和金钻蔓绿绒,分别为1 812,1 687,1 460,996,915 ions/cm^3。进行事后比较发现,白掌与金钻蔓绿绒、芦荟负离子均值存在显著性差异(P<0.05),金钻蔓绿绒、芦荟与金边吊兰负离子均值存在显著性差异(P<0.05),而绿萝与其他室内观赏植物的负离子均值不存在显著性差异。

由于试验从09:00开始放置植物,所以5种植物负离子平均浓度从09:00开始递增(图1a)。白掌、芦荟、绿萝皆在试验开始4 h后即13时达到峰值,之后白掌和芦荟呈波浪式变化,绿萝趋于稳定。金边吊兰和金钻蔓绿绒在观测时间段内负离子平均浓度整体呈递增趋势,在17:00出现最高值,分别达到1 687 ions/cm^3、915 ions/cm^3,且金边吊兰释放负离子平均浓度均高于金钻蔓绿绒,差值均在150 ions/cm^3以上,其中最大

差值出现在13:00,为1 443 ions/cm^3。白掌在10:00—13:00时的负离子平均浓度远高于其他植物,与其他植物的差值均在450 ions/cm^{3}以上,其中与金钻蔓绿绒的差值在该时段达到1 000 ions/cm^{3}以上。金边吊兰在15:00—17:00的负离子平均浓度高于其他植物,与其他植物的差值均在300 ions/cm^{3}以上,其中与芦荟的差值在该时段达到1 000 ions/cm^{3}以上。在观测时段内,白掌在09:00—11:00提升室内环境负离子浓度的效果最佳;绿萝、金边吊兰、芦荟在10:00—13:00提升室内环境负离子浓度的能力最强;金钻蔓绿绒在13:00—15:00提升室内环境负离子浓度的能力最强。试验结果表明,不同植物在不同时段对室内负离子浓度的提升效果有所差异。白掌在放置植物1 h内即可达到释放空气负离子的最佳速率,金钻蔓绿绒在放置植物4 h后释放速率达到最高,其他3种植物则在放置植物1 h后释放速率达到最高。总体而言,晴天白掌和金边吊兰在提升室内负离子浓度方面表现最佳。

表2 晴天5种室内观赏植物释放空气负离子浓度的特征值

Tab.2 Characteristic values of negative air ion concentration of five indoor ornamental plants on sunny days

植物名 Species name	负离子浓度/(ions·cm^{-3}) Negative air ion concentration			日平均气温/℃ Average daily temperature	相对湿度/% Relative humidity
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average		
白掌 *Spathiphyllum kochii*	2 734	435	1 812^{a}	33	60
绿萝 *Epipremnum aureum*	2 023	289	1 460^{ab}	32	67
金钻蔓绿绒 *Philodendron tabei* 'con-go'	2 248	214	915^{b}	32	72
金边吊兰 *Chlorophytum comosum* 'Variegatum'	2 581	375	1 687^{a}	32	69
芦荟 *Aloe vera*	1 466	266	996^{b}	32	70

字母a、b代表多重比较的显著性差异结果。

The letters a and b represent the results of significant differences from multiple comparisons.

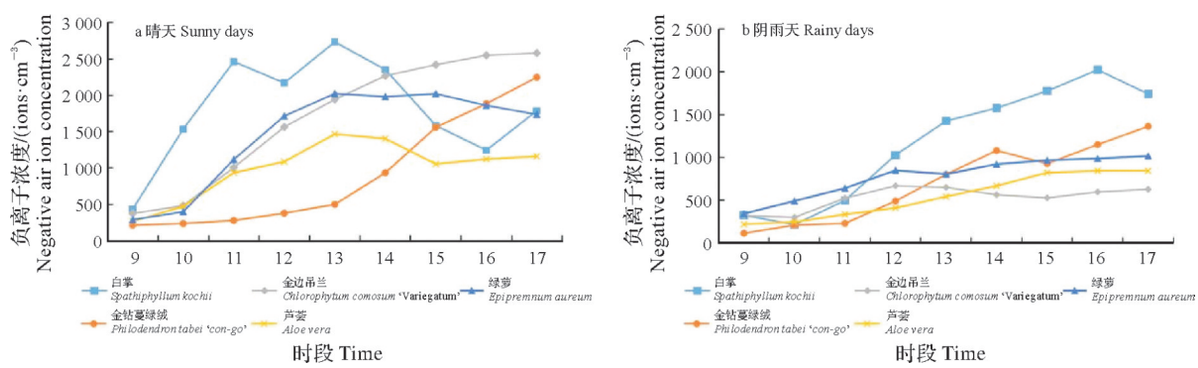


图1 晴天(a)和阴雨天(b)5种室内观赏植物释放空气负离子的浓度变化

Fig.1 Changes in negative ion concentrations of five indoor ornamental plants on sunny(a)and rainy(b)days

2.2 阴雨天5种室内观赏植物释放空气负离子的浓度

如表3所示,阴雨天5种监测样本释放空气负离子浓度均值变化差异明显(P<0.05),平均值由大到小排序为白掌、绿萝、金钻蔓绿绒、芦荟和金边吊兰,分别为1 179 ions/cm^3、780 ions/cm^3、708 ions/cm^3、548 ions/cm^{3}和532 ions/cm^3。事后多重比较发现,白掌与绿萝、金钻蔓绿绒、金边吊兰、芦荟负离子均值均存在显著性差异(P<0.05),其他4种室内观赏植物负离子均值不存在显著性差异。

如图1b所示,在观测时间段09:00—18:00,白掌、金钻蔓绿绒和芦荟3种植物负离子平均浓度变化总体呈现增长趋势,最高值分别出现在16时、17时和15时。金边吊兰和绿萝负离子平均浓度变化相对平稳,最高值分别出现在12时和17时,且绿萝的负离子平均浓度在观测全时段内高于金边吊兰,差值为20~440 ions/cm^3。白掌在12:00—17:00负离子平均浓度明显高于其他4种植物,差值为170~1 430 ions/cm^3,其中在16:00与负离子平均浓度较高的金钻蔓绿绒差值达到874 ions/cm^3,与金边吊兰的平均浓度差值达到1 427 ions/cm^3。白掌和金钻蔓绿绒在11:00—13:00段对于提升室内环境负离子浓度的能力最强;金边吊兰、绿萝在10:00—12:00对于提升室内环境负离子浓度的能力最强;芦荟在12:00—15:00对于

提升室内环境负离子浓度的能力最强。试验结果表明,金边吊兰和绿萝在植物放置1 h后达到释放空气负离子的最佳速率,白掌和金钻蔓绿绒在植物放置2 h后达到最佳速率,芦荟则在植物放置3 h后达到最佳速率。不同植物在同一环境中发挥释放负离子的最佳效率的时间不同。总体而言,阴雨天白掌和绿萝在提升室内负离子浓度方面表现最佳。

表3　阴雨天5种室内观赏植物释放空气负离子浓度的特征值

Tab.3　Characteristic values of negative air ion concentrations of five indoor ornamental plants on rainy days

植物名 Species name	负离子浓度/(ions·cm^{-3}) Negative air ion concentration			日平均气温/℃ Average daily temperature	相对湿度/% Relative humidity
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average		
白掌 *Spathiphyllum kochii*	2 024	215	1179^{a}	32	72
绿萝 *Epipremnum aureum*	1 018	344	780^{b}	27	72
金钻蔓绿绒 *Philodendron tabei* ‘con-go’	1 364	115	708^{b}	32	71
金边吊兰 *Chlorophytum comosum* ‘Variegatum’	669	300	532^{b}	27	77
芦荟 *Aloe vera*	846	220	548^{b}	32	74

字母a、b代表多重比较的显著性差异结果。

The letters a and b represent the results of significant differences from multiple comparisons.

2.3　晴天5种室内观赏植物消减$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度

对晴天5种检测样本的$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度均值进行ANOVA单因素方差分析,结果显示不满足方差齐性检验。利用韦尔奇检验和塔姆黑尼检验进行差异显著性分析和多重比较(表4)。由表4可知,晴天5种监测样本所测定的$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度均值变化差异明显(P<0.05)。事后多重比较发现,金边吊兰与白掌、金钻蔓绿绒$PM_{2.5}$浓度均值存在显著性差异(P<0.05),金钻蔓绿绒与金边吊兰PM_{10}浓度均值存在极显著性差异(P<0.01),金边吊兰与芦荟PM_{10}浓度存在显著性差异(P<0.05)。

表4　晴天5种室内观赏植物$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度的特征值

Tab.4　Characteristic values of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations of five indoor ornamental plants on sunny days

植物名 Species name	$PM_{2.5}$浓度/(μg·m^{-3}) $PM_{2.5}$ concentration			PM_{10}浓度/(μg·m^{-3}) PM_{10} concentration		
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
白掌 *Spathiphyllum kochii*	39.7	27.0	32.7^{b}	45.6	29.6	35.4^{b}
绿萝 *Epipremnum aureum*	38.3	31.4	34.5^{ab}	45.8	35.6	41.3^{ab}
金钻蔓绿绒 *Philodendron tabei* ‘con-go’	54.6	17.3	32.8^{b}	64.8	18.7	36.8^{b}
金边吊兰 *Chlorophytum comosum* ‘Variegatum’	46.5	34.3	38.5^{a}	56.0	39.4	45.9^{a}
芦荟 *Aloe vera*	37.8	31.8	34.9^{ab}	42.8	34.0	39.8^{b}

字母a、b代表多重比较的显著性差异结果。

The letters a and b represent the results of significant differences from multiple comparisons.

如图2a所示,在09:00熄灭蚊香后,晴天5种植物环境下$PM_{2.5}$平均浓度在1 h内皆有明显下降,之后金钻蔓绿绒和白掌呈稳步下降趋势,绿萝、芦荟和金边吊兰呈较为平稳的波浪式。白掌、金钻蔓绿绒、金边吊兰$PM_{2.5}$平均浓度在09:00为最高值,分别为39.7 μg/m^3、54.6 μg/m^3、46.5 μg/m^3;白掌$PM_{2.5}$平均浓度最低值出现在16:00,为27.0 μg/m^3;金钻蔓绿绒和金边吊兰最低值出现在17:00,分别为17.3 μg/m^3、34.3 μg/m^3。绿萝$PM_{2.5}$平均浓度最高值出现在14:00,达到38.3 μg/m^3;最低值出现在10:00,为31.4 μg/m^3。芦荟$PM_{2.5}$平均浓度最高值出现在09:00,达到37.8 μg/m^3,最低值出现在10:00,为31.8 μg/m^3。绿萝和芦荟消减$PM_{2.5}$浓度的能力较差。晴天不同植物环境下,$PM_{2.5}$平均浓度最高值与最低值的差值比较结果为金钻蔓绿绒(37.3 μg/m^3)、白掌(12.7 μg/m^3)、金边吊兰(12.2 μg/m^3)、绿萝(6.9 μg/m^3)和芦荟(6.0 μg/m^3)。

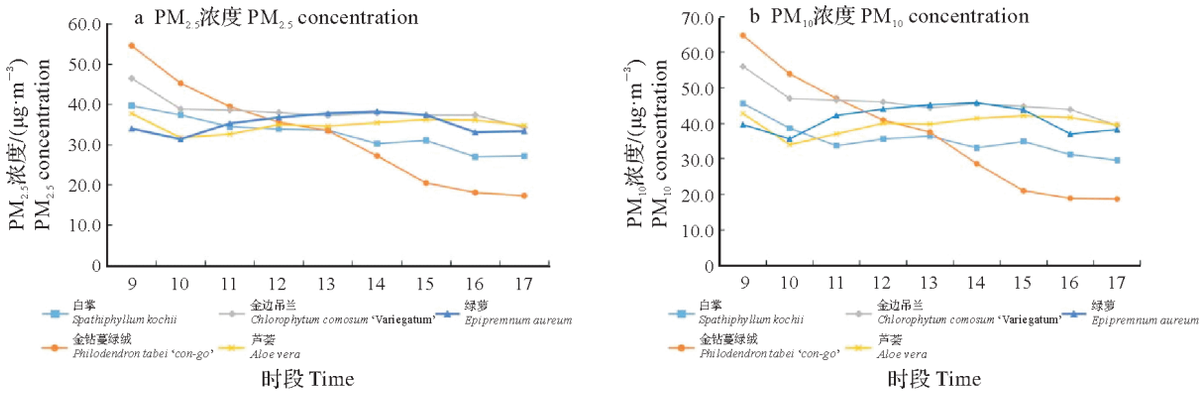


图2 晴天5种室内观赏植物消减$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度变化

Fig.2 Changes in $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations of five indoor ornamental plants on sunny days

在晴天观测时间段内，5种植物环境下PM_{10}平均浓度变化趋势与$PM_{2.5}$平均浓度大体一致（图2b）。白掌、金钻蔓绿绒和金边吊兰PM_{10}平均浓度最低值均出现在17:00，分别为29.6 μg/m3、18.7 μg/m³、39.4 μg/m³；芦荟和绿萝PM_{10}平均浓度最低值出现在10:00，分别为34.0 μg/m³、35.6 μg/m³。晴天不同植物环境下，PM_{10}平均浓度最高值与最低值差值比较结果为金钻蔓绿绒（46.1 μg/m³）、白掌（26.0 μg/m³）、金边吊兰（16.6 μg/m³）、绿萝（10.2 μg/m³）和芦荟（8.8 μg/m³）。试验结果表明，晴天金钻蔓绿绒消减室内环境$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度的能力最强，绿萝和芦荟在消减$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度能力方面没有显著性差异。

2.4 阴雨天5种室内观赏植物消减$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度

如表5所示，阴雨天5种监测样本所测定的$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度均值变化差异明显（P<0.05）。事后多重比较发现，金边吊兰与绿萝、芦荟$PM_{2.5}$浓度均值存在显著性差异（P<0.05），与白掌、金钻蔓绿绒存在极显著性差异（P<0.01）；白掌与绿萝、芦荟$PM_{2.5}$浓度均值存在显著性差异（P<0.05）；金边吊兰与白掌、金钻蔓绿绒PM_{10}浓度均值存在极显著性差异（P<0.01），金边吊兰与芦荟存在显著性差异（P<0.05），绿萝与白掌PM_{10}浓度均值存在极显著性差异（P<0.01）。

表5 阴雨天5种室内观赏植物$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度的特征值

Tab.5 Characteristic values of $PM_{2.5}$、PM_{10} concentrations of five indoor ornamental plants on rainy days

植物名 Species name	$PM_{2.5}$浓度/(μg·m⁻³) $PM_{2.5}$ concentration			PM_{10}浓度/(μg·m⁻³) PM_{10} concentration		
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
白掌 *Spathiphyllum kochii*	55.0	42.5	46.3^{c}	70.5	52.0	58.2^{c}
绿萝 *Epipremnum aureum*	61.2	48.2	53.1^{b}	73.3	59.3	66.4^{ab}
金钻蔓绿绒 *Philodendron tabei* 'con-go'	64.0	43.0	49.0^{bc}	74.5	52.0	60.3^{bc}
金边吊兰 *Chlorophytum comosum* 'Variegatum'	68.8	53.1	59.0^{a}	77.0	65.6	70.5^{a}
芦荟 *Aloe vera*	65.1	45.9	52.8^{b}	75.8	55.3	63.5^{bc}

字母a、b、c代表多重比较的显著性差异结果。

The letters a, b and c represent the results of significant differences from multiple comparisons.

如图3a所示，在09:00熄灭蚊香后，阴雨天观测时间段内5种植物环境下$PM_{2.5}$平均浓度除金边吊兰外整体均呈现下降趋势，金边吊兰呈波浪式变化。白掌、芦荟、绿萝和金钻蔓绿绒在09:00的$PM_{2.5}$平均浓度分别为55.0 μg/m³、65.1 μg/m³、61.2 μg/m³、64.0 μg/m³；白掌、绿萝和金钻蔓绿绒的$PM_{2.5}$平均浓度最低值均出现在17:00，分别为42.5 μg/m³、48.2 μg/m³、43.0 μg/m³，芦荟最低值出现在15:00为45.9 μg/m³，金边吊兰最高值出现在09:00，达到68.8 μg/m³；最低值出现在17:00，为53.1 μg/m³。阴雨天不同植物$PM_{2.5}$平均浓度最高值与最低值的差值比较结果为金钻蔓绿绒（21.0 μg/m³）、芦荟（19.4 μg/m³）、金边吊兰（15.7 μg/m³）、绿萝（13.0 μg/m³）和白掌（12.5 μg/m³）。

在阴雨天观测时间段内,金边吊兰、金钻蔓绿绒和白掌的PM_{10}平均浓度呈波浪式变化,在09:00分别达到77.0 μg/m³、74.5 μg/m³、70.5 μg/m³,最低值出现在17:00分别为65.6 μg/m³、52.0 μg/m³、52.0 μg/m³。绿萝和芦荟的PM_{10}平均浓度整体呈现下降趋势,在09:00最高值分别为73.3 μg/m³、75.8 μg/m³,绿萝最低值出现在17:00,为59.3 μg/m³,芦荟最低值出现在15:00,为55.3 μg/m³。阴雨天5种植物PM_{10}平均浓度最高值与最低值的差值比较结果为:金钻蔓绿绒(22.5 μg/m³)>芦荟(20.5 μg/m³)>白掌(18.5 μg/m³)>绿萝(14.0 μg/m³)>金边吊兰(11.4 μg/m³)。在阴雨天金钻蔓绿绒消减室内环境$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度的能力最强,芦荟次之,白掌、绿萝和金边吊兰消减$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度的能力较差。

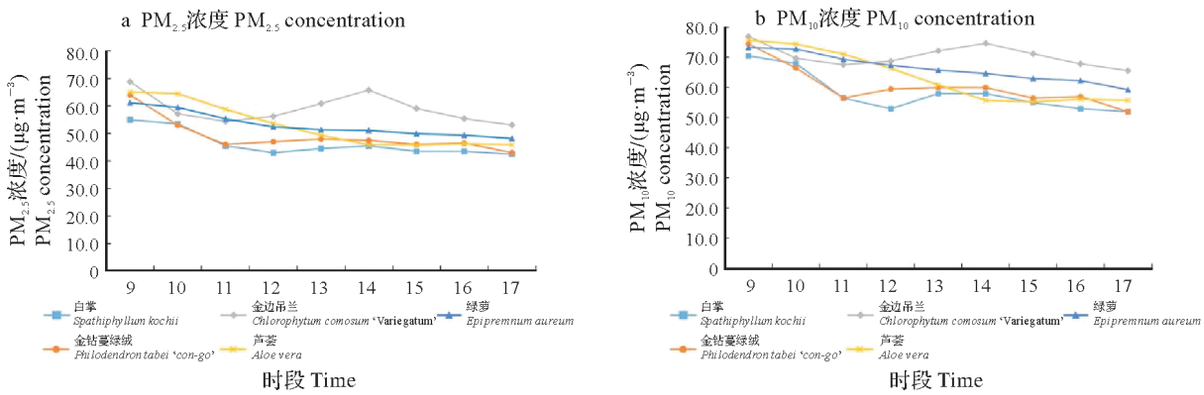


图3　阴雨天5种室内观赏植物消减$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度变化

Fig.3　Changes in $PM_{2.5}$ and PM_{10} Concentrations of five indoor ornamental plants on rainy days

2.5　5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与温湿度的相关性

相关研究表明,室内环境中的空气负离子浓度与温度、相对湿度相互影响[24-26]。本研究将第一次实验5种室内观赏植物共10 d的监测数据进行平均,得到每种植物一天9个时段的平均值,每种植物晴天和阴雨天共有18组数据,总计90组数据。分析表明,5种室内观赏植物在晴天和阴雨天负离子均值有显著性差异(P<0.05)。通过以上数据,对室内观赏植物释放空气负离子浓度与温度、相对湿度进行相关性分析,分析结果如表6所示。在本试验的测试环境中,5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与相对湿度皆呈显著负相关,与温度呈显著正相关。即室内环境温度越高,5种室内观赏植物释放空气负离子的浓度越高;室内相对湿度越高,5种室内观赏植物释放空气负离子的浓度越低。其中金边吊兰与芦荟对温湿度响应较其他3种植物更显著。这说明金边吊兰与芦荟对环境温湿度要求更高。

表6　5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与气温、相对湿度的相关性

Tab.6　Correlation of negative air ion concentration with temperature and relative humidity in five indoor ornamental Plants

植物名 Species name	气温 Temperature	相对湿度 Relative humidity
绿萝 *Epipremnum aureum*	0.545**	−0.311*
金边吊兰 *Chlorophytum comosum* 'Variegatum'	0.763**	−0.758**
芦荟 *Aloe vera*	0.721**	−0.771**
白掌 *Spathiphyllum kochii*	0.542**	−0.472*
金钻蔓绿绒 *Philodendron tabei* 'con-go'	0.437*	−0.577**

*为在0.05水平(双侧)上显著相关;**为在0.01水平(双侧)上显著相关。

*indicates significant correlation at the 0.05 level(two-tailed); ** indicates significant correlation at the 0.01 level(two-tailed).

3　讨　论

3.1　天气对室内观赏植物释放空气负离子的影响

整体而言,晴天室内观赏植物释放的空气负离子浓度明显高于阴雨天,这与王薇等[27]的研究一致。植物光合作用形成的光电效应能够促进空气电离产生更多负离子,晴天的光合作用强于阴雨天。而在

晴天，芦荟、白掌在达到峰值后，13:00—14:00空气负离子浓度有降低趋势，这是因为早晨至中午，植物光合作用逐渐增强；而午后受气温升高和湿度降低等综合影响，对温湿度敏感的植物会出现较强烈的光合“午休”现象，导致负离子浓度降低[28]。同理，金边吊兰的负离子浓度在不同天气情况下差距较大，在晴天效果更佳，这可能是由于金边吊兰对不同天气更为敏感，影响空气负离子的释放；金钻蔓绿绒的负离子浓度在不同天气情况下浓度差距较小，即其对天气变化的接受程度更高。此外，有研究[29]表明负离子浓度有明显的季节变动特征，夏季最高，春秋次之，冬季最低。夏季气温偏高，会加快分子或原子的热运动速度，使其相互碰撞的几率大幅提升，氧分子的电离作用得以增强。与此同时，夏季植物生长进入活跃期，光合作用旺盛，代谢活动更为频繁。本试验在一定程度上证实了夏季植物释放空气负离子浓度高于春季的结论。

3.2 天气对室内观赏植物消减 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响

在放置5种室内观赏植物的环境中，晴天室内的 $PM_{2.5}$ 和PM10浓度均低于阴雨天，这表明阴雨天5种室内观赏植物消减 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的能力比晴天差。晴天室温相对较高，有利于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的扩散；同时晴天植物生理活动较为旺盛，对悬浮在大气中的颗粒物吸滞能力更强[30]。且6—7月南昌市高温多雨，雨水对颗粒物有明显的冲刷作用，加上高温利于颗粒物扩散，使得自然环境中颗粒物浓度相对较低，进而导致晴天室内空气颗粒物浓度较低。研究[31]表明，自然条件下 $PM_{2.5}$ 呈现双峰双谷型，峰值在早上和夜晚，谷值在凌晨和中午前后。本试验仍大体遵循此规律，在早晨人为提高颗粒物浓度，从上午开始，植物通过释放负离子、进行呼吸作用或蒸腾作用，能够在一定程度上增加空气颗粒物的黏性，从而增加颗粒物的质量[32]，使其沉降，在午时左右气温达到最高、空气湿度最低，扩散稀释能力加强，相对频繁的空气流动使 $PM_{2.5}$ 浓度降到最低。同样，不同植物在不同天气下的生理活动变化程度不一，这也导致不同植物在晴天和阴雨天消减 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度存在差异。在降低 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的生理机制方面，芦荟在阴雨天表现更好，而金钻蔓绿绒晴天表现更好。

3.3 室内观赏植物释放空气负离子与温度、相对湿度的相关性

气象因素是影响空气负离子浓度的主要因素。本试验中，5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与温度和相对湿度皆有相关性，与相对湿度存在显著负相关关系，与温度存在显著正相关关系。这一结论与王薇等[33]、Yan等[34]学者的研究结论一致。另外，包红光等[35]的研究指出，相对湿度是影响空气负离子浓度的最关键因素，空气中含有的水分通过勒纳德效应产生空气负离子，减少空气中的正离子。所以湿度越高，空气负离子浓度就越高[36]。但潘剑彬等[37]、曹建新等[38]研究发现负离子浓度与相对湿度呈正相关，刘晓娜等[39]研究发现负离子浓度与温度呈负相关，说明负离子浓度的变化是一个复杂的过程，受到多种因素的综合影响。目前空气负离子浓度和温湿度关系的研究结论难以统一，这也可能是研究地点、研究方法和试验环境难以统一导致的，因此空气负离子浓度和气象因子间的内在规律研究仍有待进一步加强。此外，侯秀娟等[15]、陶雪莹等[29]研究发现空气负离子与 $PM_{2.5}$ 二者浓度之间呈显著负相关，但本试验主要探究室内观赏植物释放空气负离子和消减空气颗粒物的能力，受试验变量和实验条件的限制，未深入研究二者之间的关系。

4 结 论

本研究通过对比在不同天气情况下5种室内观赏植物释放空气负离子、消减 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的变化规律，得出植物在优化室内环境空气质量方面有显著效果。不同品种的植物在不同天气情况下释放的空气负离子浓度存在差异性，晴天5种室内观赏植物释放空气负离子浓度的平均值由大到小排序为白掌、金边吊兰、绿萝、芦荟和金钻蔓绿绒；而在阴雨天由大到小排序为：白掌、绿萝、金钻蔓绿绒、芦荟和金边吊兰。白掌与金钻蔓绿绒、芦荟负离子均值存在显著性差异，相较于其他4种植物释放空气负离子的能力更强，且白掌在晴天放入试验空间后可以立即发挥最佳效用，产生较多的空气负离子，其他植物有一定的延时性。因此，当以提高室内空气负离子浓度为目的时，优先推荐选用白掌作为室内观赏植物，其次晴天推荐选择金边吊兰、阴雨天其他4种植物不存在显著差异，根据浓度均值比较推荐选择绿萝。

晴天5种室内观赏植物消减 $PM_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度的能力由大到小为金钻蔓绿绒、白掌、金边吊兰、绿萝和芦荟。阴雨天消减 $PM_{2.5}$ 浓度的能力由大到小依次为金钻蔓绿绒、芦荟、金边吊兰、绿萝和白掌；消

减PM_{10}浓度的能力由大到小依次为金钻蔓绿绒、芦荟、白掌、绿萝和金边吊兰。金钻蔓绿绒与金边吊兰在晴天和雨天$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度均值均存在显著性差异,金钻蔓绿绒消减$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度最强;晴天白掌与金边吊兰$PM_{2.5}$均值存在显著性差异,阴雨天芦荟与金边吊兰$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度均值均存在显著性差异,与白掌$PM_{2.5}$浓度均值存在显著性差异。因此,当以净化室内空气颗粒物为目的时,优先推荐选用金钻蔓绿绒作为室内观赏植物,其次晴天推荐选用白掌、阴雨天推荐选用芦荟。

将5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与温度和相对湿度进行相关性分析,研究发现5种室内观赏植物释放空气负离子浓度与温度呈显著正相关、与相对湿度呈显著负相关。因此,提高室内温度、降低相对湿度有利于室内观赏植物释放空气负离子。特别是选用金边吊兰和芦荟2种植物时,应加强对室内温湿度的调控,以提高其释放空气负离子的能力。以上结论可为室内观赏植物的选择与空间布置提供科学依据。本研究也存在诸多不足,如植物净化空气污染物的指标只涉及颗粒物,后续研究应该考虑加入挥发性有机物、硫化物和甲醛等其他空气污染物指标。

致谢:江西省社会科学基金项目(22YS08)和江西省高校人文社会科学项目(YS22127)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] ZHOU Z, LIU Y, YUAN J, et al.Indoor $PM_{2.5}$ concentrations in residential buildings during a severely polluted winter: a case study in Tianjin, China[J].Renewable & sustainable energy reviews, 2016, 64: 372-381.

[2] 宋英石,李锋,徐新雨,等.城市空气颗粒物的来源、影响和控制研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(增刊2):214-221.
SONG Y S, LI F, XU X Y, et al.Research progress on source, impact and control measurements of particulate matter in the urban air[J].Environmental science & technology, 2013, 36(Sup2): 214-221.

[3] 白羽,倪洋,曾强.基于队列研究的空气污染中$PM_{2.5}$与肺癌关联性的Meta分析[J].公共卫生与预防医学,2020,31(4):5-8.
BAI Y, NI Y, ZENG Q, et al.A meta-analysis on association between $PM_{2.5}$ exposure and lung cancer based on cohort studies[J].Journal of public health and preventive medicine, 2020, 31(4): 5-8.

[4] 董文雯.环境空气中总悬浮颗粒物对人体身心健康的影响研究[J].环境科学与管理,2022,47(3):93-97.
DONG W W.Influence of total suspended particulate matter in ambient air on human health[J].Environmental science and management, 2022, 47(3): 93-97.

[5] ALARIFI A, ALSALMAN A M, ALSALEH M, et al.Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J].Sensors, 2016, 16(5): 1-36.

[6] LEE S G, HYUN J, LEE S H, et al.One-pass antibacterial efficacy of bipolar air ions against aerosolized *Staphylococcus epidermidis* in a duct flow[J].Journal of aerosol science, 2014, 69(3): 71-81.

[7] HYUN J, LEE S G, HWANG J.Application of corona discharge-generated air ions for filtration of aerosolized virus and inactivation of filtered virus[J].Journal of aerosol science, 2017, 107(Complete): 31-40.

[8] WOLKOFF P, NIELSEN G D.Non-cancer effects of formaldehyde and relevance for setting an indoor air guideline[J].Environment international, 2010, 36(7): 788-799.

[9] GUO H, CHEN J, WANG L, et al.A highly efficient triboelectric negative air ion generator[J].Nature sustainability, 2021(4): 147-153.

[10] 黄向华,王健,曾宏达,等.城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述[J].应用生态学报,2013,24(6):1761-1768.
HUANG X H, WANG J, ZENG H D, et al.Spatiotemporal distribution of negative air ion concentration in urban area and related affecting factors: A review[J].Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(6): 1761-1768.

[11] 陈小平,焦奕雯,裴婷婷,等.园林植物吸附细颗粒物($PM_{2.5}$)效应研究进展[J].生态学杂志,2014,33(9):2558-2566.
CHEN X P, JIAO Y W, PEI T T, et al.The effect of adsorbing fine particulate matter($PM_{2.5}$)by garden plants: a review[J].Chinese journal of ecology, 2014, 33(9): 2558-2566.

[12] 王薇,余庄,冀凤全.基于空气负离子浓度的城市环境空气清洁度评价[J].生态环境学报,2013,22(2):298-303.
WANG W, YU Z, JI F Q.Evaluation of air cleanness degree of the urban environment based on negative air ion concentration

[J].Ecology and environmental sciences,2013,22(2):298-303.

[13] 张建国,徐文俊,崔会平,等.柑橘纯林空气负离子水平的研究[J].西北林学院学报,2012,27(3):31-34+136.
ZHANG J G,XU W J,CUI H P,et al.Aero-anion levels in citrus plantations[J].Journal of northwest forestry university,2012,27(3):31-34+136.

[14] 崔虎亮,王嘉锡.不同植物群落的空气负离子浓度分布特征及其差异分析[J].科学技术与工程,2024,24(15):6199-6206.
CUI H L,WANG J X.Analyze of negative air ions distribution characteristics in different plant communities[J].Science technology and engineering,2024,24(15):6199-6206.

[15] 侯秀娟,闫晓云,王波,等.夏季干旱半干旱城市公园绿地空气负离子与空气颗粒物变化特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(4):212-220.
HOU X J,YAN X Y,WANG B,et al.Variation characteristics of the air anion and air particulate matter in arid and semi-arid urban park green spaces during summer[J].Journal of Nanjing forestry university(Natural sciences edition),2022,46(4):212-220.

[16] 王薇,刘仍辉,甘伟喆.5种室内观赏植物的空气负离子浓度研究[J].建筑科学,2018,34(2):21-25.
WANG W,LIU R H,GAN W Z.Study on negative air ions concentration in 5 kinds of indoor ornamental plants[J].Building science,2018,34(2):21-25.

[17] 徐文俊,翁永发,廖荣俊,等.办公场所5种典型绿化植物的负氧离子及空气质量差异变化[J].天津农业科学,2016,22(1):140-144.
XU W J,WENG Y F,LIAO R J,et al.Differences of negative oxygen ion and air quality of five typical greening plants in office space[J].Tianjin agricultural sciences,2016,22(1):140-144.

[18] 柴一新,祝宁,韩焕金.城市绿化树种的滞尘效应:以哈尔滨市为例[J].应用生态学报,2002(9):1121-1126.
CHAI Y X,ZHU N,HAN H J.Dust removal effect of urban tree species in Harbin[J].Chinese journal of applied ecology,2002(9):1121-1126.

[19] TIWARY A,SINNETT D,PEACHEY C,et al.An integrated tool to assess the role of new planting in PM_{10} capture and human health benefits:a case study in London[J].Environment pollution,2009,157:2645-2653.

[20] POPEK R,GAWRONSKA H,WROCHNA M,et al.Particulate matter on foliage of 13 woody species:deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes a 3-year study[J].International journal of phytoremediation,2013,15:245-256.

[21] XU Y S,XU W,LI M,et al.Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing,China[J].Environmental science and pollution research international,2018,25(13):12545-12556.

[22] 贺丹,李朝梅,华超,等.郑州市10种园林植物叶片滞尘与富集重金属的能力[J].西北林学院学报,2023,38(1):230-237.
HE D,LI Z M,HUA C,et al.Abilities of dust retention and heavy metal enrichment of 10 garden plants in Zhengzhou[J].Journal of northwest forestry university,2023,38(1):230-237.

[23] HWANG H,YOOK S,AHN K H.Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particles by tree leaves[J].Atmospheric environment,2011,45:6987-6994.

[24] 吴志萍,王成,许积年,等.六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物[J].清华大学学报(自然科学版),2007(12):2153-2157.
WU Z P,WANG C,XU J N,et al.Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer[J].Journal of Tsinghua university(science and technology),2007(12):2153-2157.

[25] 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 in-fluencing factors in Beijing[J].Ecology and environmental sciences,2015,24(5):818-824.

[26] WU C,LEE G,YANG S,et al.Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air[J].Science of the total environment,2006,370(1):245-253.

[27] 王薇,陈明,夏斯涵.高密度城市住区绿地空气负离子浓度分布特征及其与微气候关系[J].生态环境学报,2020,29(7):1367-1376.
WANG W,CHEN M,XIA S H.Research on distribution characteristics of negative air ions concentration in high-density ur-

ban residential green space and its relationship with microclimate[J].Ecology and environmental sciences,2020,29(7):1367-1376.

[28] 潘瑞炽.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2004.
PAN R Z.Plant physiology[M].Beijing:Higher Education Press,2004.

[29] 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.
TAO S Y,ZHANG W N,LU S W,et al.Interaction between air negative ions and $PM_{2.5}$ particles in urban forest of Beijing[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(6):1184-1194.

[30] 鲁绍伟,蒋燕,陈波,等.北京城市植被区$PM_{2.5}$浓度时空变化及影响因素分析[J].环境科学与技术,2017,40(1):180-187.
LU S W,JIANG Y,CHEN B,et al.Analysis on spatial-temporal variation and influential factors of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing's urban forest[J].Environmental science & technology,2017,40(1):180-187.

[31] 王成,郭二果,郄光发.北京西山典型城市森林内$PM_{2.5}$动态变化规律[J].生态学报,2014,34(19):5650-5658.
WANG C,GUO E G,QIE G F.Variations of $PM_{2.5}$ in typical recreation forests in the west mountain of Beijing,China[J].Acta ecologica Sinica,2014,34(19):5650-5658.

[32] 王晓磊,王成.城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J].生态学报,2014,34(8):1910-1921.
WANG X L,WANG C.Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter[J].Acta ecologica Sinica,2014,34(8):1910-1921.

[33] 王薇,夏斯涵.基于控制实测的绿植负离子和$PM_{2.5}$浓度分布特征及其与温湿度关系研究[J].建筑节能(中英文),2021,49(10):103-108.
WANG W,XIA S H.Distribution characteristics of negative air ion and $PM_{2.5}$ concentration in green plants and their relationship with temperature and relative humidity based on control measurement[J].Building energy efficiency,2021,49(10):103-108.

[34] YAN X J,WANG H R,HOU Z Y,et al.Spatial analysis of the ecological effectsof negative air ions in urban vegetated areas:a case study in Maiji,China[J].Urban forestry & urban greening,2015,14(3):636-645.

[35] 包红光,闫晓云,王波,等.干旱半干旱地区城市公园绿地空气负离子浓度特征及影响因素[J].东北林业大学学报,2024,52(5):82-88.
BAO H G,YAN X Y,WANG B,et al.The characteristics and influencing factors of air negative ion concentration in urban park green spaces in arid and semi-arid regions[J].Journal of northeast forestry university,2024,52(5):82-88.

[36] 单晟烨,李佳珊,张冬有.哈尔滨城市公园湿地环境空气负离子浓度及其生态价值估算[J].湿地科学,2015,13(4):478-482.
SHAN S Y,LI J S,ZHANG D Y.Concentrations of negative air ion and their ecological values of wetland environment in city parks in Harbin City[J].Wetland science,2015,13(4):478-482.

[37] 潘剑彬,董丽,廖圣晓,等.北京奥林匹克森林公园空气负离子浓度及其影响因素[J].北京林业大学学报,2011,33(2):59-64.
PAN J B,DONG L,LIAO S X,et al.Negative air ion concentration and affecting factors in Beijing Olympic Forest Park[J].Journal of Beijing forestry university,2011,33(2):59-64.

[38] 曹建新,张宝贵,张友杰.海滨、森林环境中空气负离子分布特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2017,26(8):1375-1383.
CAO J X,ZHANG B G,ZHANG Y J.Characteristics of air anion distribution in beach and forest environment and the correlation between air anion and the environmental factors[J].Ecology and environmental sciences,2017,26(8):1375-1383.

[39] 刘晓娜,张继平,乔青,等.北京市绿化隔离地区森林生态系统空气负离子供给能力及影响因素分析[J/OL].环境科学研究,1-15.https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.08.15.
LIU X N,ZHANG J P,QIAO Q,et al.Service capacity of negative air ions of forest ecosystem and its influencing factors in the green belt areas of Beijing[J/OL].Research of environmental sciences,1-15.https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.08.15.

(责任编辑:刘玉香)