

文章编号: 1000-5641(2021)02-0151-09

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

孙 文^{1,2}, 韩玉洁^{1,2}, 殷 杉^{2,3,4}

(1. 上海市林业总站, 上海 200072; 2. 国家林业与草原局 上海城市森林生态系统
国家定位观测研究站, 上海 200240; 3. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240;
4. 上海长三角生态环境变化与综合治理教育部野外科学观测研究站, 上海 200240)

摘要: 选取上海市中心城区中山公园中 9 个不同配置的植物群落, 通过 1 年内连续监测空气负离子浓度, 分析得到了各群落中负离子的变异格局, 并探索了不同群落结构、不同郁闭度、周边水体等因素对空气负离子浓度的影响. 结果表明: 中山公园不同群落类型负离子浓度大多在 200 ~ 700 个/cm³, 日变化呈单峰形, 1 年内在 7 月至 10 月间保持较高水平且波动程度较大; 群落结构与负离子浓度的关系大致为草 > 乔灌 ≈ 乔草 > 乔灌草, 群落结构越复杂, 负离子变异性越小; 负离子浓度变异系数与郁闭度间呈负相关关系, 即郁闭度越高, 群落中空气负离子浓度的变异系数越低, 在每日植物发生光合作用的 7:00 ~ 19:00, 植物郁闭度与负离子浓度变异系数的负相关性更为显著. 此外, 城市公园中常见的静态水体对负离子浓度的影响不显著. 可为城市公园中营造适宜健康的植物群落提供基础数据和科学依据.

关键词: 城市公园; 空气负离子; 植物群落; 变异格局

中图分类号: X835 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2021.02.015

Variation patterns and influencing factors of air anions in different plant communities of an urban park

SUN Wen^{1,2}, HAN Yujie^{1,2}, YIN Shan^{2,3,4}

(1. Shanghai Forest Station, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station, State Administration of Forest and Grassland, Shanghai 200240, China; 3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Yangtze River Delta Ecological and Environmental Change Research Station, Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this study, we evaluated the variation patterns of air anions in nine plant communities with different structures in Zhongshan Park of the central city of Shanghai; the air anion concentration was monitored continuously over the course of a year. In addition, we analyzed the influence of different factors—community structure, canopy density, and the level of surrounding water—on air anion concentration. The results showed that the air anion concentration within different community types was mostly between 200 cm³ and 700 cm³, and the daily variation showed a single peak. Air anion concentration remained at a high level but fluctuated significantly from July to October. The relationship between community structure and air anion concentration was roughly as

收稿日期: 2020-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (31971719); 上海市绿化和市容管理局项目 (G171206)

第一作者: 孙 文, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为生态监测与评价. E-mail: sunwen@linye.sh.cn

通信作者: 殷 杉, 男, 博士, 副教授, 研究方向为生物地球化学. E-mail: yinshan@sjtu.edu.cn

follows: herbage > arbor with shrubs \approx arbor with herbage > arbor with shrubs and herbage; in general, the more complex the community structure, the less the air anion variability. There was a negative correlation between the mean variation of the air anion concentration and the canopy density, implying that higher canopy density values were associated with lower mean variation of the air anion concentration throughout the community. This negative correlation became more significant in the daytime, between 7:00 to 19:00, when photosynthesis was ongoing. In addition, the impact of static water on the anion concentration was not found to be significant. The conclusion of this paper can provide basic data and a scientific basis for the construction of healthy plant communities in urban parks.

Keywords: urban park; air anion; plant community; spatial variation

0 引 言

城市中的森林和绿地在城市居民的日常生活中不仅是休闲和娱乐的场所,同时具有降尘灭菌、固碳释氧、缓解城市热岛效应和改善区域小气候等生态功能^[1]。特别是,森林和城市绿地区域是城市环境中空气负离子浓度较高的区域,通过植物的生理作用,释放空气负离子到大气环境中,包括光合作用、尖端放电等形式,这些空气负离子能够吸附污染物,改善空气质量,对居民健康起到重要作用^[2-4]。空气负离子是指带有负电荷的气体分子和轻离子团^[5]。与空气中的其他分子相比,如CO₂分子,氧分子具有更强的亲电性,同等条件下,氧分子将优先于空气中的其他分子获得电子,形成负氧离子^[6-7]。一般认为,自然形成和人为产生是负离子的两种来源^[8]。形成负离子的反应机制主要可以概括为电离作用、Lenard效应、植物的尖端放电和光电效应等机理^[9-12]。空气中的负离子被称为空气的“维生素和生长素”,在医学健康、环境卫生、工农业、生态旅游等方面都具有显著功能^[11]。空气负离子含量是我国生态文明建设的重要指标之一,国家林业局在2013年9月发布的《推进生态文明建设规划纲要(2013—2020年)》就将负离子列入其中^[13-14]。

大气负离子由许多自然和人为的原因产生,并且不同的环境场所下,负离子浓度差异很大^[15]。不同的气象条件,如天气、土壤、污染物水平,不同的时间、地点和高度都有着很大差异^[16-18]。研究发现,空气中的负离子浓度具有较明显的地域变化,也呈现出一定的规律性^[19-21]。在城市大功能区中,王洪俊等^[22]研究城市不同功能区之间的显著差异,结果显示城市绿地中空气负离子水平为最高,城市街道最低;城市不同功能区中空气清洁度差异显著,城市绿地中空气质量最佳的城市绿地可提高空气中的负离子浓度,改善环境空气质量。潘剑彬等^[23]通过对北京奥林匹克森林公园内的典型群落环境的空气负离子浓度进行监测,发现空气负离子在复杂植物群落中的浓度要高于简单植物群落,产生的效果在高于单层群落的结构中更为显著。周德平等^[24]在闫山国家级森林公园中研究发现,不同植被类型的负离子平均含量为阔叶林最高,其次是混交林,随后针叶林高于草地,而山石含量最低;而在不同季节下的不同植被环境中负离子含量又不尽相同,春季灌杂树丛浓度明显高于其他植被,夏、秋两季阔叶林释放负离子的能力最强,草地在夏季强于山石,在秋季却达到最低。周斌等^[25]在研究中发现,空气负离子浓度会受到林分种类和结构的影响;同时,在一定程度上,结构林成分也决定着空气负离子的浓度水平,如空气负离子在乔灌混交林中的浓度要高于灌木林,而在乔木林中的浓度最低。空气负离子浓度与垂直距离的对数在可接受的误差范围之内呈线性关系,外国学者Kondrashova^[26]和Richardson^[27]都通过对空气负离子浓度的观测和大量的数据统计得到了这一结论。陈京京等^[28]通过对北京北四环路道路边不同距离范围内空气负离子浓度监测,发现离道路最近的位置负离子含量最低,空气负离子浓度随距道路中心的距离增大而增大,在街边花园处达到最高值,该结果在一定程度上亦反映了城市中植物数量与道路距离的分布关系。

1 研究区域概况

本研究选取上海中心城区的中山公园作为试验地点. 上海市作为中国的特大型城市, 是快速城市化发展的代表, 位于 121.29°E, 31.14°N, 处长江三角洲前缘, 东濒东海, 南临杭州湾, 西接江苏、浙江两省, 北界长江入海口, 总面积 6340.5 km², 常住人口 2400 万. 中山公园坐落于上海市中心长宁区, 是上海市典型城市公园的代表. 占地总面积达 21.42 hm², 其中森林面积 11.86 hm², 水体面积 1.22 hm², 草坪面积 3.69 hm². 园内有成林分布的香樟、水杉、雪松等, 树木达 260 多个品种, 共计 30000 多株. 经过多年的培育和养护, 植物长势健康, 在公园内形成了不同的植物群落, 为本研究提供了良好的试验样地.

2 研究方法

2.1 负离子观测和植物群落的选择

本研究选择在中山公园内设置 9 个群落样地 A—I, 分布位置如图 1 所示, 其基本信息如表 1 所示. 样地的选择按照随机均匀分布的原则, 同时依据样地所代表的不同植物群落结构 (主要考虑群落优势种是乔木还是草本、乔木下层是否有灌木以及郁闭度大小等群落因素) 和环境特征 (主要考虑样地附近是否有水体) 的典型性进行微调, 使样地具有代表性, 同时在园内均匀分布, 样地面积设置为 10 m × 10 m. 本研究在每个自然月的上半月 (1—5 日) 和下半月 (16—20 日), 选择晴朗微风的天气情况, 对 9 个群落样地使用便携式负离子浓度监测仪连续观测 24 h, 共计 3 d, 负离子浓度检测范围为 0 ~ 30000 N/cm³, 每 30 s 记录一次负离子浓度数据, 同时记录实时温度 (± 0.1 °C)、相对湿度 (± 2%), 并以图 1 中中山公园生态监测站数据为基准进行校对. 同时, 为了有效探究负离子浓度与植物群落郁闭度的关系, 在每个自然月实验中采用“样线法”分别测量 9 个样地当月的群落郁闭度值. 在矩形样地中, 按两条对角线布设样线, 采用公式计算: 郁闭度 = 对角线上树冠冠幅总长 / 二对角线总长.



图 1 中山公园内样地分布图

Fig. 1 Distribution of sample points in Zhongshan Park

2.2 数据处理与分析

本研究数据采集时间为 2017 年 4 月—2018 年 3 月共 1 年 12 个月的数据, 将得到的数据用 R 语言 (V3.3.2 版) 剔除缺失和异常值, 过程如下.

- (1) 手动筛选, 筛除因机器存储中断、故障引起的异常数据;
- (2) 将每个数值与其前后数值进行对比, 若该值小于等于前后值的 3 倍或 1/3, 则舍弃之, 记录为 NA;
- (3) 将连续 6 个或以上的相同数据值判定为异常值, 记录为 NA;
- (4) 对小于等于 10 的数值进行插值计算, 以其前后各 1 min 的数据 (即前后 2 个数据) 取均值并取整, 作为该时刻插值后数值;
- (5) 赋值后再筛选, 将仍小于等于 10 的数值记录为 NA, 输出所有有效数据.

筛选后的数据以小时为单位进行均值处理, 小时均值的计算方法为: 对有效数据超过 1/3 h(即 40 条数据) 的时间的有效数据进行均值计算, 取整作为该小时的负离子浓度小时均值. 将所得数据进行筛选, 在排除异常值、缺失值后整合到一起, 通过 Excel、SPSS 和 R studio 软件进行分析.

表 1 中山公园内样地基本信息

Tab. 1 Information on sample points in Zhongshan Park

样地	群落名称	主要植物	植被类型	群落结构	附近水体
A	公园大门	香樟 + 冬青卫矛(<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl. + <i>Euonymus japonicus</i> Thunb.)	常绿阔叶林	乔 + 草	无
B	大门旁密林	香樟 + 黄杨(<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl. + <i>Buxus sinica</i> (Rehd. et Wils.) Cheng)	常绿阔叶林	乔 + 灌 + 草	无
C	荷花池	冬青卫矛 + 杜鹃(<i>Euonymus japonicus</i> Thunb. + <i>Rhododendron simsii</i> Planch.)	灌丛	乔 + 灌	距离静态水体池塘 5 m, 水面面积约 600 m ²
D	乔灌草	中山柏 + 杨梅 + 散尾葵(<i>Cupressus lusitanica</i> 'cultivar' Zhongshanbai + <i>Myrica rubra</i> (Lour.) S. et Zucc. + <i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H. Wendl.)	常绿针阔混交林	乔 + 灌 + 草	无
E	小广场	杨梅 + 麦冬(<i>Myrica rubra</i> (Lour.) S. et Zucc. + <i>Ophiopogon japonicus</i> (Linn. f.) Ker-Gawl.)	灌丛	乔 + 草	距离静态水体鸳鸯湖 8 m, 水面面积约 500 m ²
F	音乐广场	香樟 + 鸡爪槭 + 黄杨(<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl. + <i>Acer palmatum</i> Thunb. + <i>Buxus sinica</i> (Rehd. et Wils.) Cheng)	常绿阔叶林	稀乔 + 灌 + 草	无
G	八角亭	杨梅 + 鸡爪槭 + 黄菖蒲(<i>Myrica rubra</i> (Lour.) S. et Zucc. + <i>Acer palmatum</i> Thunb. + <i>Iris pseudacorus</i> L.)	常绿阔叶林	乔 + 灌 + 草	无
H	水杉林	水杉 + 麦冬(<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & W. C. Cheng + <i>Ophiopogon japonicus</i> (Linn. f.) Ker-Gawl.)	落叶针叶林	乔 + 草	距离静态水体 15 m, 水面面积约 70 m ²
I	大草坪	沟叶结缕草(<i>Zoysia matrella</i> (L.) Merr.)	地被	草(空白对照)	无

注: 每样地所属群落范围为 10 m × 10 m 的样方, 面积为 100 m².

3 结果与分析

3.1 各植物群落内负离子浓度日变化

通过计算 9 个样地从 2017 年 4 月到 2018 年 3 月所有数据中每小时的均值, 得到不同空间下负离子浓度在一天 24 h 内的差异变化, 如图 2 所示.

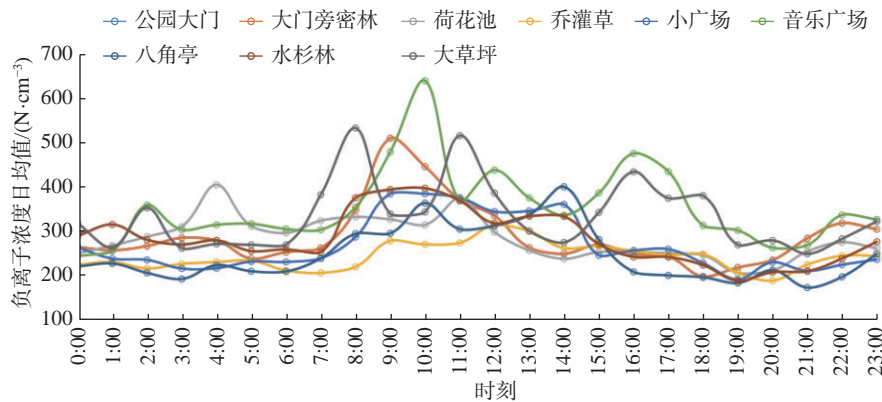


图 2 9 个样地负离子浓度均值日变化图

Fig. 2 Daily variation of the average NAIC at nine sample points

如图 2 所示, 取小时均值在对数坐标轴中作图对比, 9 个样地在一天 24 h 内均值变化趋势相近. 一天中折线走势大多呈单峰形, 即从早晨开始上升, 10: 00 ~ 12: 00 维持较高浓度, 到 15:00 下降.

16:00 左右各样地间走势呈现出较大的差异. 整体来看, 9 个样地乔灌草日均值连线最低, 音乐广场最高且波动最为显著, 各样地夜间负离子浓度均较低.

3.2 各植物群落内负离子浓度月变化

以中山公园 9 个样地实验数据为基础, 通过计算 9 个样地每次实验的负离子浓度均值, 得到不同空间下负离子浓度在不同月份的差异变化, 如图 3 所示.

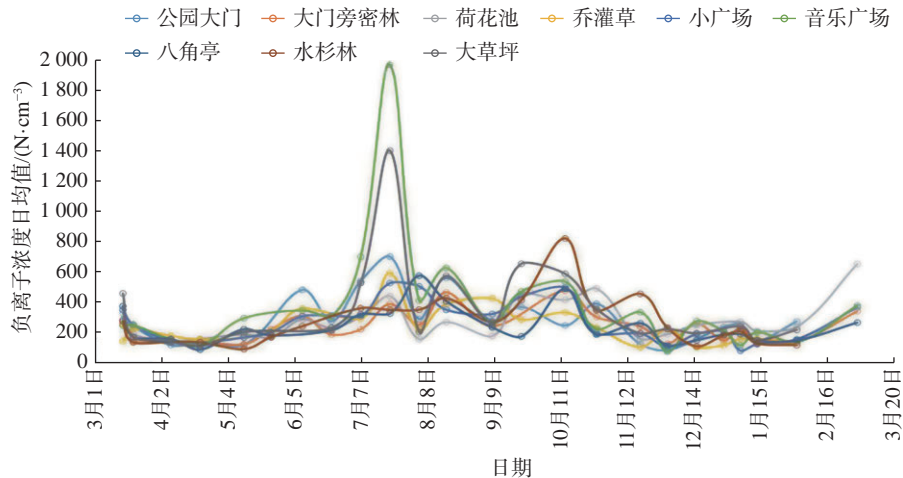


图 3 9 个样地负离子浓度均值月变化图

Fig. 3 Monthly variation of the average NAIC at nine sample points

如图 3 所示, 除音乐广场和大草坪两点的负离子浓度在夏季波动较大外, 其余 7 个样地的负离子浓度全年均在 $100 \sim 600 \text{ N/cm}^3$ 间保持平稳波动. 9 个样地的负离子浓度在 7—10 月保持较高水平且波动程度较大, 这可能是因为夏、秋季雨热充足植物枝繁叶茂, 光电效应等都有助于负离子的产生, 且夏季天气变幻无常, 风雨雷电等都会导致负离子的陡增. 整体来看, 春、冬两季的负离子浓度较低, 波动较小, 夏、秋两季浓度较高, 波动也较大.

3.3 不同群落结构下负离子空间分布

根据 9 个样地不同的植物群落结构, 将其分为 4 组: 乔灌草 (B / D / G)、乔灌 (C / F)、乔草 (A / H / E)、草 (I), 分别代表不同的群落层次. 将全年的数值统计分析, 作其日均值柱形图, 如图 4 所示.

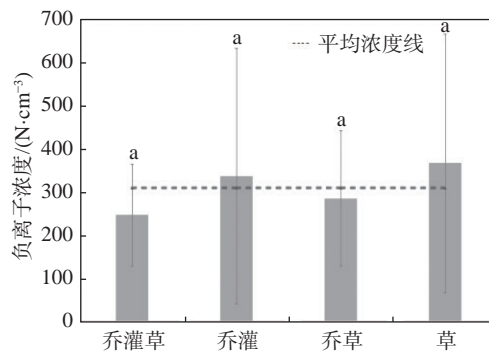


图 4 不同群落结构负离子浓度日均值

Fig. 4 The daily mean of NAIC in different community structures

如图 4 所示, 4 种群落结构的负离子平均浓度为 308.25 N/cm^3 , 草结构的负离子浓度日均值最高达到 366.22 N/cm^3 , 其次为乔灌和乔草, 乔灌草最低仅为 246.07 N/cm^3 . 由于草和乔灌结构的标准偏

差线极大,对4组数据进行方差分析,得到 $p = 0.036 (< 0.05)$,表明不同群落结构对负离子浓度没有显著影响.为了进一步查看群落结构对负离子浓度的作用,对4组数据分析不同群落结构组负离子浓度小时均值日变化,结果见图5.

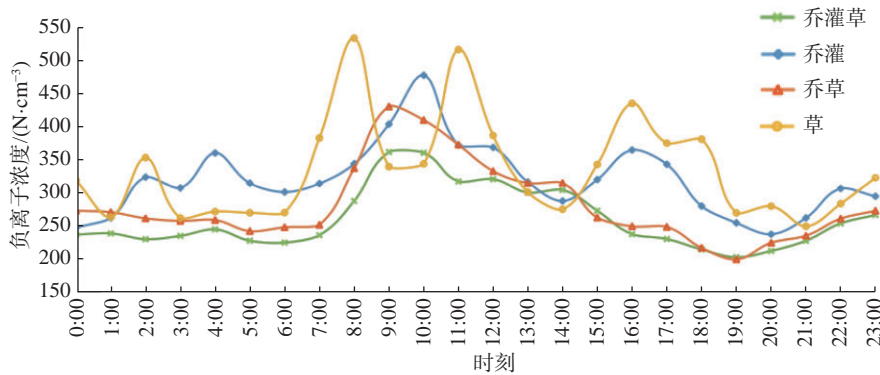


图5 不同群落结构组负离子浓度小时均值日变化

Fig. 5 The mean daily variation of NAIC in different community structures

如图5所示,除去草结构外,不同群落结构下负离子浓度的日变化趋势相同,呈现近单峰形,从凌晨3:00开始逐渐上升,中午12:00左右达到峰值后开始降低,在19:00左右达到谷值.综合来看,4种群落结构的负离子浓度在一天中的夜间保持较平稳状态,白天呈规律性波动,这可能与植物的光合作用相关.

综上所述,群落结构与负离子浓度的关系大致为草 > 乔灌 ≈ 乔草 > 乔灌草.虽然植物群落结构对负离子浓度的影响并不显著,但是会造成负离子变异性的差异.乔灌与乔草结构对负离子浓度的影响无显著差异,主要可能源于空气离子存在的寿命短,并且可迁移的距离有限.植物主要通过叶片尖端放电效应产生空气负离子,所以乔灌结构对1.5 m高度上的负离子浓度影响不比乔草明显.群落结构不同,群落内部的植物光合作用强度和空气流通性也不一样,通过测量遮挡冠层下的群落负离子浓度,发现其负离子浓度降低,这可能与植物光合作用强度降低有关.草结构层次单一,负离子受环境变化及人为干扰影响大,且空气流通性高,故负离子变异性较大且全天呈不规则波动.

3.4 不同群落郁闭度下负离子空间分布

为进一步探讨负离子浓度与植物群落郁闭度的关系,将9个样地测量的郁闭度与全年负离子浓度日均值做统一线性回归(见图6(a)),由图6(a)可以看到 r^2 为 0.0058,负离子浓度和郁闭度之间并无显著相关关系.将郁闭度与全年负离子浓度均值的变异系数做进一步的线性拟合(见图6(b)),由图6(b)可知 r^2 为 0.0341,拟合程度相对更好,可见负离子浓度变异系数与郁闭度之间呈负相关关系,即郁闭度越高,群落结构越稳定,负离子浓度的变异系数越低.为进一步探究植物生长季的变异系数与郁闭度的关系,挑选出白昼具有光合效用的7:00~19:00负离子浓度均值与郁闭度做进一步的拟合(见图6(c)),当将负离子浓度的筛选范围固定在全年7:00~19:00时,由图6(c)可以看到 r^2 为 0.0829,可见负离子浓度的变异系数在植物具有光合作用的白天时段与郁闭度之间呈现更明显的负相关关系.

综上所述,植物群落的郁闭度与负离子浓度无显著的相关性,但与负离子浓度的变异系数呈现负相关关系,即低郁闭度条件下,负离子浓度的变异性增强,在高郁闭度的植物群落内,负离子因叶片遮挡,消散流通受到抑制,表现出负离子浓度的稳定性高,变异性小的特性.且在植物快速生长的5—10月和具有光合效应的白天,植物与负离子浓度的变异系数相关性更为显著.

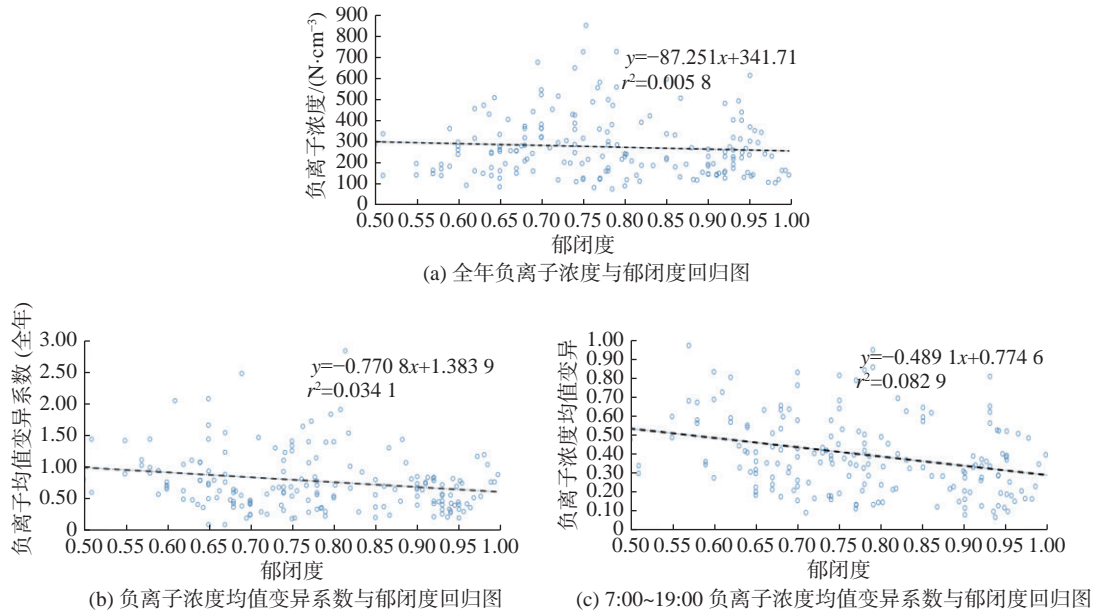


图 6 负离子浓度与郁闭度回归图

Fig. 6 Regression diagram of annual NAIC and canopy density

3.5 不同水系下负离子浓度的变化

根据现有的研究, 群落中的动态水体, 如瀑布等对负离子的产生有积极影响^[29-31]. 中山公园的水系皆以静态水为主, 如静态溪水、池塘、人工湖等. 为进一步研究静态水体对负离子浓度是否有影响, 选取群落结构相似的荷花池 C 点 (静态池塘)、小广场 E 点 (无水) 为群落 i 型; 选取水杉林 H 点 (静态溪水) 和公园大门 A 点 (无水) 为群落 ii 型, 对两个组别分别进行比较分析. 将各样地负离子浓度分类取小时均值作日变化, 如图 7 所示.

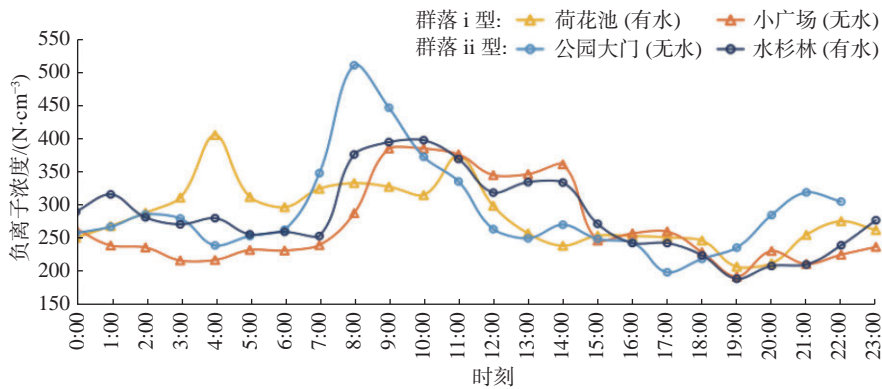


图 7 不同水系组合中负离子浓度日变化图

Fig. 7 Daily mean of the mean peak NAIC in different water systems

图 7 中 4 组样地的日变化趋势相近, 除荷花池的负离子浓度在 4:00 出现了一个陡增点外, 其余都从 0:00 到 10:00 逐步上升达到一个峰值, 之后出现下降趋势, 在傍晚 19:00 左右有小幅回升趋势. 将各样地的负离子浓度分类取日均值作出柱形图, 如图 8 所示.

由图 8 可以看到, 在两类群落类型中 4 个样地间两两差距都较小, 对 i、ii 两组分别进行显著性检验, 两者没有显著性差别. 且两组群落类型中方差相近, 用 4 组数据进行方差分析, 结果显示在有水和

无水的条件下,空气负离子浓度并无明显差异($p < 0.05$),即静态水对植物群落附近的负离子浓度影响较弱,只有高速流动的水体,如瀑布、暴雨等才能使得水分子裂解产生大量负离子。

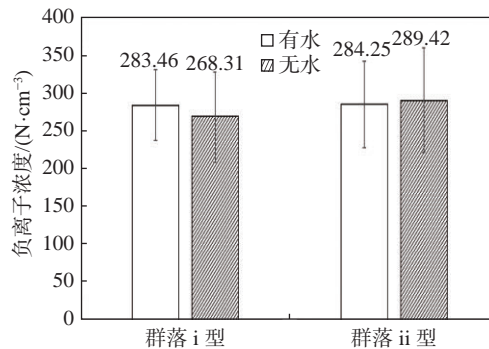


图 8 不同水系组合中负离子浓度日均值图

Fig. 8 Daily mean of the mean NAIC in different water systems

4 结论与讨论

4.1 城市公园植物群落内空气负离子变异格局

城市公园不同植物群落内空气负离子浓度的日变化走势大多呈单峰形,即从早晨开始上升,10:00 ~ 12:00 维持较高的浓度,到 15:00 下降.丛菁等^[32]在大连的研究与本研究结果类似,负离子浓度一天内只出现一个波峰,高峰值在上午,低谷值在下午.卓凌等^[5]在北京西山国家森林公园发现负离子浓度高峰值出现在清晨的 5:00 ~ 6:00,低峰值出现在中午的 12:00 ~ 13:00,1 天内只出现 1 个波峰.在月变化上,城市公园植物群落内负离子浓度在 7—10 月保持较高水平且波动程度较大,姚成胜^[33]在长沙岳麓山进行的空气负离子浓度研究也发现,夏、秋季的负离子浓度明显高于春、冬季节.彭灿等^[14]研究结果表明,植物群落负离子浓度在四季中由高到低依次排列为秋季、夏季、冬季、春季.研究结果说明,植物群落负离子浓度的季节变化也会随环境的不同而存在一些差异.

4.2 城市公园植物群落内负离子浓度的影响因素

4.2.1 不同群落结构的影响

不同群落结构样地间的负离子日均变化趋势存在显著性差异,群落结构越复杂,负离子变异性越小.群落结构与负离子浓度的关系大致为草 > 乔灌 ≈ 乔草 > 乔灌草,除草坪采样点由于受光合作用和人为活动干扰巨大以外,本研究结果与吴志萍等^[34]对清华大学 6 种城市绿地空气负离子浓度研究结果类似.

4.2.2 不同群落郁闭度的影响

负离子浓度和郁闭度之间并无显著相关关系,这与朱春阳等^[35]在北京城市带状绿地的研究结果类似.负离子浓度变异系数与郁闭度之间呈负相关关系,即郁闭度越高,群落结构越稳定,负离子浓度的变异系数越低.在植物快速生长的 5—10 月及具有光合效应的 7:00 ~ 19:00 间,植物郁闭度与负离子浓度变异系数的负相关性更为显著.

4.2.3 有无水系的影响

在有水和无水的条件下,空气负离子浓度并无明显差异,静态水体对负离子浓度的变异性影响效果不显著.王薇等^[36]研究也表明,动态水对负离子浓度的影响远远大于静态水,流速流动量较小的溪流对于负离子浓度影响范围很小.

综上所述,负离子的空间变化规律与各个季节群落中优势树种的郁闭度及植物生长态势等息息相关.植物的群落结构及郁闭度对于负离子浓度有着更为显著的影响,并且能直接通过影响负离子的

变异性从而改变其空间分布格局。

本文首次将群落结构和郁闭度与负离子浓度及其变异系数进行相关性分析,为负离子时空变异格局提出了较为科学可靠的解释,研究结果可为居民自主选择休闲健身时间和场所提供参考,同时为城市森林氧吧构建和城市森林经营提供数据支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 熊丽君,韩少华,唐浩,等.空气负离子研究进展及影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2011,21(3):184-187.
- [2] LIN H F, LIN J M. Generation and determination of negative air ions [J]. Journal of Analysis & Testing, 2017, 1(1): 1-6.
- [3] 张双全,谭益民,吴章文.空气负离子浓度与空气温湿度的关系研究[J].中南林业科技大学学报,2011,31(4):114-118.
- [4] JIANG S, MA A, 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] 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.
- [6] 黄春松,黄翔,吴志湘.空气负离子产生的机理研究[C]//北京纺织工程学会.第五届功能性纺织品及纳米技术研讨会论文集.北京:中国纺织科学研究院,2005:373-379.
- [7] ZHAO Y, SHI C, XU D, et al. Variations in negative air ion concentrations associated with different vegetation types and influencing factors in Chongli District [J]. Forest Research, 2018, 31(3): 127-135.
- [8] LIU J T. Determination of ASA hydrolysis [J]. Journal of Analysis & Testing, 2017, 1(1): 6.
- [9] 潘剑彬,董丽.城市绿地空气负离子评价方法——以北京奥林匹克森林公园为例[J].生态学杂志,2010,29(9):1881-1886.
- [10] 曾曙才,苏志尧,陈北光.我国森林空气负离子研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(5):107-111.
- [11] JOVANIĆ B R, JOVANIĆ S B. The effect of high concentration of negative ions in the air on the chlorophyll content in plant leaves [J]. Water Air & Soil Pollution, 2001, 129(1/4): 259-265.
- [12] WANG Y, NI Z, 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): 1-11.
- [13] 李杨.负氧离子、PM_{2.5}分布格局——以西安市林区及城区比较为例[J].科技创新与应用,2016,22:178.
- [14] 彭灿,陈曼倩,向苗,等.衡阳市负氧离子浓度变化与气象要素相关分析[J].低碳世界,2016,24:274-275.
- [15] LING X, JAYARATNE R, MORAWSKA L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(18): 2186-2193.
- [16] 王薇,余庄,郑非艺.不同环境场所夏季空气负离子浓度分布特征及其与环境因子的关系[J].城市环境与城市生态,2012(2):38-40.
- [17] 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.
- [18] YAN X, WANG H, HOU Z, et al. Spatial analysis of the ecological effects of negative air ions in urban vegetated areas: A case study in Maiji, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 636-645.
- [19] LEE K N, SEO Y T, KIM Y K, et al. Detecting ions in air using a nanofield-effect transistor (nanoFET) [J]. Microelectronic Engineering, 2016, 158: 75-79.
- [20] 李琳,杜倩,刘铁男,等.空气负离子研究进展[J].现代化农业,2017(12):30-31.
- [21] AMIT K T, BIKESH K N, ANUSHREE M, et al. The effect of negative air ion exposure on Escherichia coli and Pseudomonas fluorescens [J]. Environmental Letters, 2008, 43(7): 694-699.
- [22] 王洪俊,王力,孟庆繁.城市不同功能区对空气负离子水平的影响[J].中国城市林业,2004,2(2):49-52.
- [23] 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.
- [24] 周德平,佟维华,温日红,等.闾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.
- [25] 周斌,余树全,张超,等.不同树种林分对空气负离子浓度的影响[J].浙江农林大学学报,2011,28(2):200-206.
- [26] KONDRASHOV M N, GRIGORENKO E V, TIKHONOV A V, et al. The primary physico-chemical mechanism for the beneficial biological/medical effects of negative air ions [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(1): 230-237.
- [27] RICHARDSON G, HARWOOD D J, EICK S A, et al. Reduction of fine airborne particulates (PM_{2.5}) in a small city centre office, by altering electrostatic forces [J]. Science of the Total Environment, 2001, 269(1): 145-155.
- [28] 陈京京,李方正.城市绿化带和负氧离子含量的关系探究[J].科协论坛,2011(4):128-129.
- [29] 刘云国,吕健,张合平,等.大型人造园林中的空气负离子分布规律[J].中南林业科技大学学报,2003,23(1):90-93.
- [30] WU R, ZHENG J, SUN Y, et al. Research on generation of negative air ions by plants and stomatal characteristics under pulsed electrical field stimulation [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2017, 19(5): 1235-1245.
- [31] 章志攀,俞益武,孟明浩,等.旅游环境中空气负离子的研究进展[J].浙江林学院学报,2006(1):103-108.
- [32] 丛菁,孙立娟.大连市负氧离子浓度分布及影响因素研究[C]//中国气象学会.第27届中国气象学会年会论文集.北京:气象出版社,2010:155-162.
- [33] 姚成胜.岳麓山空气负离子分布规律及开发利用研究[D].长沙:湖南师范大学,2005.
- [34] 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.
- [35] 朱春阳,李树华,李晓艳.城市带状绿地郁闭度对空气负离子浓度、含菌量的影响[J].中国园林,2012,28(9):72-77.
- [36] 王薇,余庄,郑非艺.不同环境场所夏季空气负离子浓度分布特征及其与环境因子的关系[J].城市环境与城市生态,2012,25(2):38-40.

(责任编辑:张晶)