

徐芮韵,龚道程,孟鑫鑫,等.海南热带雨林空气负离子的时空变化规律、影响因素及环境健康评估[J].中国环境科学,2025,45(2):657-670.

Xu R Y, Gong D C, Meng X X, et al. Spatio-temporal variations, influential factors and environmental health assessment of negative air ions (NAIs) in Hainan tropical rainforests [J]. China Environment Science, 2025,45(2):657-670.

海南热带雨林空气负离子的时空变化规律、影响因素及环境健康评估

徐芮韵¹,龚道程^{1,2*},孟鑫鑫³,林尤静³,李珠⁴,陈思君¹,陈曦¹,常清华¹,梁叶¹,王磊¹,刘世伟¹,马方园¹,李勤勤^{1,2},张成亮^{1,2},邓硕^{1,2},王好^{1,2},王伯光^{1,2} (1.暨南大学环境与气候学院,环境与气候研究院,广东广州 511443; 2.广东省南岭森林大气环境与碳中和野外科学观测研究站,广东广州 511443; 3.海南省生态环境监测中心,海口 571126; 4.五指山市生态环境监测站,海南五指山 572299)

摘要:为揭示海南热带雨林空气负离子(NAIs)的时空变化规律、影响因素及环境健康效应,选择典型旅游旺季(1月),利用移动式综合测量平台,在海南热带雨林国家公园五指山片区的11个不同海拔高度,开展4类典型林分(常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林、竹林)的现场加强观测,分析了NAIs的浓度水平、时空分布及与林分类型、气象因子、空气质量和挥发性有机物(VOCs)的关系,构建了基于森林康养指数(FHI)的热带雨林生态保健功能综合评价方法.结果表明:五指山地区NAIs的浓度高(3541±882)个/cm³,空气清新度达到世界卫生组织分级标准的Ⅵ级水平.NAIs浓度随着海拔的升高呈先增大后减少的趋势.针叶林的NAIs浓度最高,阔叶林次之,竹林最低.共检出66种VOCs,其中萜烯类化合物和含氧有机物占比最高(>80%).NAIs与相对湿度、细颗粒物、单萜烯呈显著正相关,与倍半萜烯、芳香烃呈显著负相关.下午的FHI普遍高于上午,大部分点位达到了“Ⅱ级”以上水平.

关键词:五指山; 热带雨林; 空气负离子; 植物挥发物; 森林康养

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0657-14

Spatio-temporal variations, influential factors and environmental health assessment of negative air ions (NAIs) in Hainan tropical rainforests. XU Rui-yun¹, GONG Dao-cheng^{1,2*}, MENG Xin-xin³, LIN You-jing³, LI Zhu⁴, CHEN Si-jun¹, CHEN Xi¹, CHANG Qing-hua¹, LIANG Ye¹, WANG Lei¹, LIU Shi-wei¹, MA Fang-yuan¹, LI Qin-qin^{1,2}, ZHANG Cheng-liang^{1,2}, DENG Shuo^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, WANG Bo-guang^{1,2} (1.College of Environment and Climate, Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2.Guangdong Provincial Observation and Research Station for Atmospheric Environment and Carbon Neutrality in Nanling Forests, Guangzhou 511443, China; 3.Hainan Ecological Environmental Monitoring Center, Haikou 571126, China; 4.Wuzhishan Ecological Environment Monitoring Station, Wuzhishan 572299, China). *China Environment Science*, 2025,45(2): 657-670

Abstract: To investigate the spatio-temporal variations, influential factors and environmental health effects of negative air ions (NAIs) in Hainan tropical rainforests, a mobile comprehensive measurement platform was utilized to carry out field observation during typical tourist season (January), four types of typical forest stands (evergreen broad-leaved, deciduous broad-leaved, coniferous and bamboo forests) at eleven different altitudes in the Wuzhishan area of the Hainan Tropical Rainforest National Park were measured. The concentrations, spatiotemporal variations of NAIs, and their relationships with forest types, meteorological factors, air quality, and volatile organic compounds (VOCs) were analyzed. A comprehensive evaluation method for the ecological health function of tropical rainforest based on the Forest Health Index (FHI) was established. The results showed that the NAI concentration in the Wuzhishan area was relatively high (3541±882)moles/cm³, reaching Level VI of the World Health Organization's air freshness classification standard. The NAI concentration was increased with altitude initially and then decreased. Coniferous forest was found to have the highest NAI concentration, followed by broad-leaved forest, with bamboo forest having the lowest. A total of 66VOCs were detected, with sesquiterpenes and oxygenated organic compounds accounting for over 80%. NAIs were shown significant positive correlations with relative humidity, fine particulate matter, and monoterpenes, and significant negative correlations with sesquiterpenes and aromatic hydrocarbons. The FHI in the afternoon was generally found to be higher than that in the morning, with most sampling sites reaching Level II or above.

Key words: Wuzhishan; tropical rainforest; negative air ions; plant volatiles; forest therapy

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42205105,42077190);海南省2023年度第十批生态环境项目(HNZL-CG2023-0815)

* 责任作者, 助理研究员, dcgong@jnu.edu.cn

空气负离子(NAIs)又称负氧离子,是指带负电荷的单个气体分子和轻离子团的总称.NAIs 主要来源于大气电离作用、植物光合作用以及雷纳德效应^[1-3].NAIs 被誉为“空气维生素和生长素”,可以去除尘埃、净化空气和杀灭病菌;高浓度的 NAIs 可以抑制病菌的繁殖,促进人体的新陈代谢、增强免疫力^[4].NAIs 作为评价森林生态环境质量的重要指标,在一定的条件下可以反映监测区域的生态质量^[5].近年来,随着我国城市化的加快以及人口老龄化和亚健康状态的普遍化,人们对健康绿色的生活方式更加向往,尤其在后疫情时代,人们敬畏自然、追求健康的意识不断提高,森林康养等绿色健康生活方式越来越受到人们的青睐^[6].NAIs 作为重要的森林环境健康因子之一,目前中国气象、林业等部门已将空气负离子浓度(NAIC)作为森林康养的关键指标^[7].

研究表明,森林环境中的 NAIC 显著高于城市、山野林地、平原等其他环境,森林中的 NAIC 约为城市地区的 5~10 倍,在有河流的森林环境中可达到上万个数量级^[8-9].近年来,在我国不同森林地区对 NAIs 的浓度变化、时空分布、影响因素等方面开展了大量研究^[10-13].但是,研究区域主要集中在亚热带以及温带地区^[2,14-16],对于热带雨林地区 NAIs 的研究较为缺乏^[17-19].

研究发现,不同森林类型、海拔高度、地理位置的 NAIC 变化趋势不同,与温度、相对湿度、风速等气象条件以及颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)、氮氧化物(NO_x)等空气质量的影响有关^[7,18-20].另外,NAIC 随着温度和湿度的季节性变化呈季节梯度分布,夏季 NAIC 最高,其次为春季和秋季,冬季最低^[10,21].以往研究主要对环境因子进行探究,对植物生理的研究较少.

森林环境会受到多种因素的影响,且各项生态保健指标的效果存在明显差异,由单一的生态保健指标所反映的森林生态保健效应往往比较片面,对多项保健指标进行综合评价可以更全面、客观地反映森林生态保健功能.目前常用的评价方法有主成分分析法、模糊评价法、层次评价法、灰关联法等^[22-23].目前,对森林的生态保健功能综合评价体系仍处于初步研究阶段,缺乏广泛应用的理论方法.

为此,本文以海南五指山热带雨林为研究区域,选取典型旅游旺季(1 月)为研究时段,利用移动式综

合测量平台,在 11 个不同海拔高度的 4 类典型林分开展现场测量,分析了 NAIs 的浓度、时空变化及与林分类型、气象因子、空气质量和挥发性有机物(VOCs)的关系,构建了基于森林康养指数的热带雨林生态保健功能综合评价方法.本研究可为海南热带雨林地区的森林康养深度开发和“全健康”战略推进提供一定的数据支撑.

1 研究区概况

五指山市位于海南岛中南部(18°38'~19°02' N,109°19'~109°44' E),地处海南热带雨林国家公园核心区域,属热带海洋性季风气候,海拔 165~1867m,年平均温度 23.4℃,年平均降水量 1865.2mm,具有四季不分明、夏无酷暑、冬无严寒、气候温和的气候特点.五指山市森林覆盖率达 90%,主要植被类型为热带低地雨林、热带山地雨林、热带亚高山矮林、热带山顶灌丛、枫香林^[24].为了对五指山热带雨林地区的森林康养效果进行探究,因此选择 1 月旅游旺季作为观测的主要时段.

2 研究方法

2.1 观测点位

考虑五指山市的地形特点、植被类型、植被覆盖度及距离人类活动区域的远近等因素,在不同海拔高度(325~840m.a.s.l.)的 11 个典型点位(市区、郊区、原始森林,图 1),针对四种典型林分(常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林、竹林),开展现场加强观测,林分基本情况如表 1 所示.研究区内常见的树种有海南桫欏、枫香树、三桠苦、秋枫、樟树、糖胶树、榄仁、凤凰木等.

2.2 数据采集

利用移动式综合测量平台,在 2024 年 1 月 17~31 日的日间(08:00~17:00),在 11 个点位依次开展 NAIs、气象因子、空气质量及 VOCs 的现场监测.采用 EP050B 型便携式大气负离子监测仪(北京依派伟业数码科技有限公司),利用吸入式电容收集法对 NAIs 的浓度进行在线测量,进气口离地 1.5m,检测范围为 0~9.99×10⁴ 个/cm³,时间分辨率为 1min.采用 IES-200 型空气质量监测仪对同期的 PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀ 进行实时监测,时间分辨率为 1min.采用 Haloiot HWS600 一体式传感器(海量智能科技)测量

的环境因子,参考陆鼎煌^[27]提出的“综合舒适度指数”进行评价,计算公式如下:

$$S = 0.6 \times |t - 24| + 0.07 \times |RH - 70| + 0.5 \times |v - 2| \quad (1)$$

式中: S 代表气候舒适度指数; t 代表气温, $^{\circ}\text{C}$;RH代表空气相对湿度,%; v 代表风速,m/s.

2.4.3 森林康养指数 本研究采用极差标准化法,先将原始数据映射在 $[0,1]$ 之间,对于 NAIC、VOCs 采用 $X_{ij}' = (X_{ij} - \text{Min}X_{ij}) / (\text{Max}X_{ij} - \text{Min}X_{ij})$ 处理,对于气候舒适度、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 采用 $X_{ij}' = (\text{Max}X_{ij} - X_{ij}) / (\text{Max}X_{ij} - \text{Min}X_{ij})$ 处理.将各保健指标通过 SPSS 统计软件确定主成分和权重,从而提取出对分析结果起决定作用的主要因子.每个主成分的得分值按以下公式进行计算:

$$F_i = \sum \beta_{ij} X_{ij} \quad (i=1,2, \dots; j=1,2,3,4,5,6) \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 个主成分得分值; β_{ij} 为特征向量, $\beta_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\lambda}$, a_{ij} 表示因子载荷矩阵中第 i 列第 j 行的元素, λ 表示该元素相对应的特征根; X_j 为第 j 个指标的极差标准化值.

根据确定的主成分的贡献率和累计贡献率进行加权,计算得到森林康养指数(FHI):

$$\text{FHI} = \sum W_i F_i \quad (i=1,2, \dots) \quad (3)$$

式中: W_i 代表各指标权重系数, F_i 代表各指标主成分得分.通过对 FHI 值进行系统聚类分析,将 FHI 划分为 5 个等级(表 3),FHI 数值越高,其保健效果越好.

表 3 森林康养指数(FHI)评价标准

Table 3 Evaluation criteria of forest health index (FHI)

指数范围	健康情况	评价等级
≥ 0.73	很好	I
0.5-0.73	好	II
0.42-0.5	中等	III
0.16-0.42	差	IV
≤ 0.16	很差	V

3 结果与讨论

3.1 浓度特征

3.1.1 总体浓度水平 五指山地区的 NAIs 平均浓度为 (3541 ± 882) 个/ cm^3 ,最高浓度可达 50451 个/ cm^3 .各点位的 NAIC 较高(表 4),平均值均大于 2100 个/ cm^3 ,根据 WHO 的分级评价标准(表 2),表明五指山的空气清新度达到 VI 级标准.

将本研究与国内其他不同类型森林地区的

NAIC 进行了对比分析(表 5).研究认为当 NAIC 在 700~1000 个/ cm^3 范围内时对人体具有保健作用^[28],午潮山国家森林公园和北京九龙山 NAIC 低于保健作用临界值,济源南山森林公园的 NAIC 刚达到保健作用临界值.福建君子峰国家级自然保护区中的岩坑监测站、灵鹫山国家森林公园康养基地以及海南五指山热带雨林这些地区的 NAIC 均高于 3000 个/ cm^3 ,具有较高的浓度水平,是进行森林康养活动的理想场所.总体而言,五指山的 NAIC 处于较高水平,仅低于灵鹫山国家森林公园康养基地,与君子峰国家级自然保护区、尖峰岭热带山地雨林区较为接近,达到室内浓度水平的 18 倍,是国内其他森林地区的 2~4 倍.

表 4 各点位名称、海拔高度、林分及 NAIC 浓度

Table 4 Name of each site, altitude, forest stand and NAIC

点位	海拔高度 (m.a.s.l.)	主要植被类型	平均 NAIC (个/ cm^3)
御景	630	常绿阔叶林	4987±2506
桫欏公路	840	常绿阔叶林	3061±1415
国家背景站	940	针叶林、竹林	3025±1529
毛纳村	595	常绿阔叶林 落叶阔叶林	3181±874
太平水库	625	常绿阔叶林 落叶阔叶林	2292±1005
琼州大学	328	常绿阔叶林 落叶阔叶林	2479±1048
森林湖	327	常绿阔叶林 落叶阔叶林	2283±790
畅好乡	318	常绿阔叶林 落叶阔叶林 针叶林	4945±27
大峡谷	410	常绿阔叶林	3516±1464
亚泰雨林	735	常绿阔叶林 落叶阔叶林	3488±551
红峡谷	465	常绿阔叶林	3071±813

3.1.2 空间分布特征 各观测点位的 NAIs 平均浓度分布情况如图 2 所示,御景与桫欏公路差异不显著,而与其他点位有显著差异;御景 (4987 ± 2506) 个/ cm^3 、畅好乡 (4945 ± 27) 个/ cm^3 、大峡谷 (3516 ± 1464) 个/ cm^3 、亚泰雨林 (3488 ± 551) 个/ cm^3 等点位的 NAIC 明显高于毛纳村 (3181 ± 874) 个/ cm^3 、太平水库 (2292 ± 1005) 个/ cm^3 ;琼州大学 (2479 ± 1048) 个/ cm^3 、森林湖 (2283 ± 790) 个/ cm^3 的 NAIC 水平较低,其植物群落结构主要由乔木-灌木-木本混合组成.御景和畅好乡的 NAIC 水平最高,大峡谷和亚泰雨林,桫欏公路 (3061 ± 1415) 个

/cm³、国家背景站(3025±1529)个/cm³与红峡谷 (3071±813)个/cm³的NAIC水平相差不多。

表 5 我国不同地区的NAIs浓度

Table 5 Negative air ion concentrations in different areas of China

地点	区域	时间	NAIs 平均浓度(个/cm ³)
海南五指山热带雨林(本研究)	热带	2024-01	3541
三亚南岛森林康养基地 ^[29]	热带	2021-07~2021-09	2841
尖峰岭热带山地雨林区 ^[30]	热带	2019-01~2019-12	3882
吊罗山国家森林公园 ^[18]	热带	2013-07~2014-06	2351
海口市凤翔湿地公园 ^[31]	热带	2019-06~2020-01	1211
福建君子峰国家级自然保护区 ^[32]	亚热带	2022-03~2023-02	岩坑:3798
			桃源:2360
幕阜山区潜山国家森林公园 ^[10]	亚热带	2021-01~2021-12	2191
广州市帽峰山森林公园 ^[11]	亚热带	2019-01~2021-12	2066
陕西省汉中市 ^[33]	亚热带	2018-01~2021-12	宁强千山站:1709
			略阳象山站:1451
南平市九峰山城市森林公园 ^[34]	亚热带	2019-06~2020-05	1755
灵鹫山国家森林公园康养基地 ^[14]	亚热带	2019-06~2020-05	4475
石门国家森林公园 ^[35]	亚热带	2018-07~2019-04	2840
午潮山国家森林公园 ^[15]	亚热带	2019-09~2019-11	553
花溪十里河滩国家城市湿地公园 ^[36]	亚热带	2021-04,2021-08,2021-11,2022-01	571
南京市某室内 ^[37]	亚热带	2017-03~2017-04	188
合肥市某室内 ^[38]	亚热带	2017-02	187
北京松山自然保护区 ^[39]	温带	2020-01~2020-12	1496
呼伦贝尔沙地樟子松林 ^[16]	温带	2019-08~2020-07	1186
济源南山森林公园 ^[12]	温带	2018-04~2018-05	708
北京九龙山 ^[40]	温带	2016-01~2018-12	408
沈阳市城市公园 ^[41]	温带	2021-10~2022-03	262
城市室内 ^[42]	-	-	<500

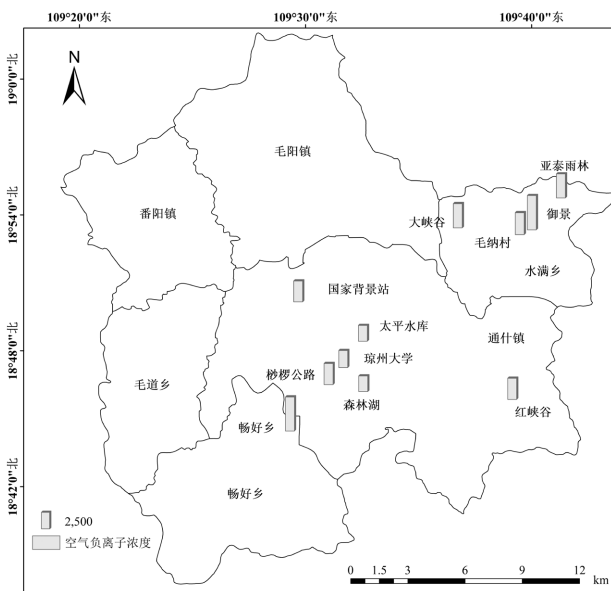


图 2 五指山地区 NAIC 的空间分布(2024 年 1 月)

Fig.2 Spatial distribution of negative air ion concentration in Wuzhishan (Jan., 2024)

不同海拔高度观测点位的NAIC差异($P<0.05$)

如图 3 所示.结果表明,NAIC 均值随着海拔的升高呈现先增大后减少的趋势.4 个海拔的 NAIC 平均值从高到低依次为 600~800m(3284±1523)个/cm³、400~600m(3211±542)个/cm³、<400m(3133±1372)个/cm³、>800m(2752±1082)个/cm³,300~800m 海拔高度处的 NAIC 显著高于 800m 以上的点位 ($P<0.05$),海拔小于 400m 的点位、海拔在 400~600m 的点位以及海拔在 600~800m 的点位,其 NAIC 没有显著差异($P>0.05$).海拔高度是影响 NAIC 的主要因素之一,海拔高度的变化通过改变林分内部的温度和相对湿度,间接对 NAIC 与气温、相对湿度等相关关系造成影响^[15].一般而言,随着海拔的升高,环境中物种丰富度呈单调递减的趋势,从而影响 NAIs 的生成.已有研究发现,随着海拔上升,NAIC 先上升后下降^[43, 44].在海拔较低处,靠近城市中心区域,人类活动较活跃,环境空气中污染物浓度高,空气中的负离子容易被吸附通过沉降去除,因此低海拔地区的 NAIC 一般较低.中海拔地区,

人类活动逐渐减少,且由于地形原因该区域的风速远小于高海拔地区,NAIs 不易扩散,另外,该地区的温湿度等环境条件更适宜 NAIs 的生成及积累,从而使得该地区的 NAIC 达到较高值.在高海拔地区,环境空旷,山风增强,植被难以抑制空气的流动,导致 NAIC 较中海拔地区降低^[43,45].

观测区域内以常绿阔叶林这类植物群落为主,因此对不同海拔高度常绿阔叶林的 NAIC 进行了对

比分析,如图 3(b)所示.结果表明,NAIC 均值仍然呈现随着海拔的升高先增大后减小的规律.5 个不同海拔梯度的 NAIC 平均值从高到低依次为 630m (4500±2573) 个/cm³,735m(3374±506) 个/cm³,325m (3264±1454) 个/cm³,465m(3234±835) 个/cm³,840m (3127±1506)个/cm³,海拔高度为 630m 常绿阔叶林的 NAIC 显著高于其余海拔高度(P<0.05),海拔 325、465、735 和 840m 处的 NAIC 没有显著差异(P>0.05).

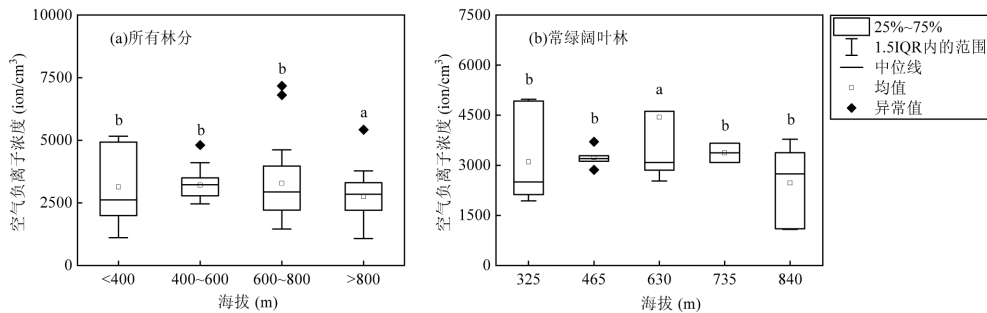


图 3 不同海拔点位的 NAIC 浓度差异比较

Fig.3 Comparison of negative air ion concentrations at different altitude gradients

不同小写字母表示差异达显著水平(P<0.05)

3.1.3 时间变化特征 五指山地区近 10 年(2013~2023)的 NAIC(数据来源:https://hnsthb.hainan.gov.cn)呈现先升高后下降的年际变化趋势(图 4).最大值出现在 2017 年(8317±535)个/cm³,2022 年呈现最低值(3439±553)个/cm³.五指山的 NAIC 具有明显的季度变化特征,在 2013~2016 年间,第三季度的 NAIC 较高;在 2017~2020 年间,第二季度的 NAIC 最高.不同季度 NAIC 表现为第二季度>第三季度>第一季度>第四季度.第二季度普遍较高的 NAIC 可能与气象因子(温湿度高、光照强)、植物 VOCs 排放量大以及西南季风影响下空气质量优良有关.

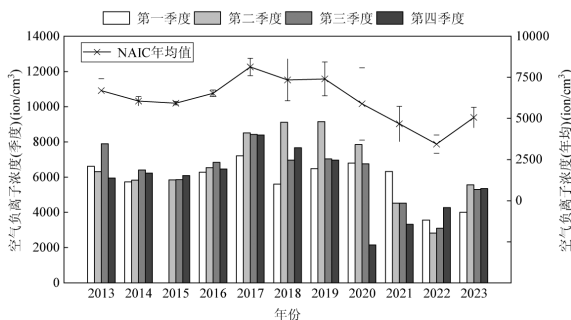


图 4 2013~2023 年五指山地区的 NAIs 浓度变化情况

Fig.4 Yearly variations of average NAIC in Wuzhishan during 2013~2023

不同点位的 NAIC 日变化趋势如图 5 所示.御景(图 5(a))、毛纳村(图 5(d))和森林湖(图 5(g))的 NAIC 日变化规律均为双峰型:御景和毛纳村的 NAIC 整体表现为先下降后上升的趋势,而森林湖则表现为先下降后上升再下降的趋势.桫椤公路(图 5(b))和红峡谷(图 5(j))的 NAIC 呈单峰型变化,日变化整体均表现为先上升后下降.国家背景站(图 5(c))呈现双峰型,在 10:00 和 17:00 达到峰值,且在中间时段变化幅度较小.太平水库(图 5(e))、琼州大学(图 5(f))、畅好乡(图 5(h))、大峡谷-亚泰雨林(图 5(i))的 NAIC 整体呈现下降的日变化趋势,峰值出现在早上,之后浓度下降到一定水平后波动相对平稳.整体来看,人类活动丰富的点位 NAIC 日变化趋势相对波动较小,而距离人类活动区域较远的点位 NAIC 日变化趋势相对波动较大.

NAIs 具有促进植物生长、抑制病原菌活性的作用,特别是在浓度较高的环境下,五指山热带雨林地区的 NAIC 在早上和下午的浓度总体上较中午高,植物可能会吸收更多的 NAIs,从而促进其生长和健康.此外,NAIs 也可能参与到大气化学反应中,影响云的形成,对局部的气候产生影响.在一定的条件下,NAIs 可以加速某些气体向固体颗粒转化的过程,

从而增加空气中的颗粒物数量,为云的形成提供更多的凝结核。

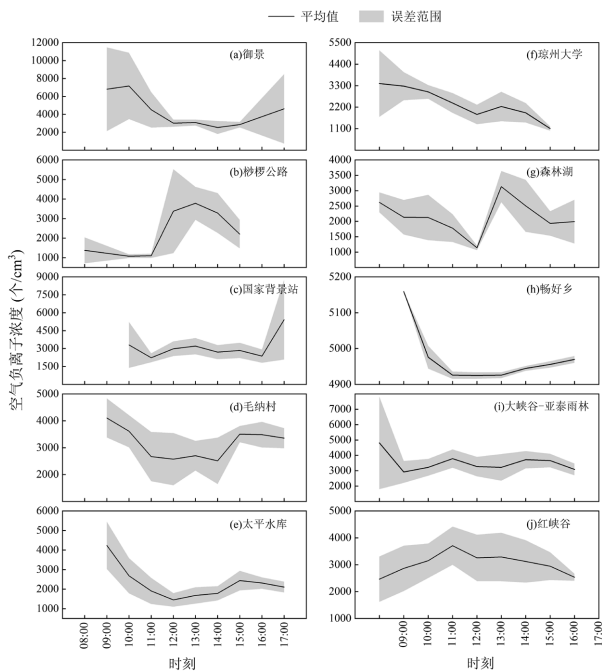


图5 不同点位 NAIC 浓度的日变化

Fig.5 Diurnal variations of negative air ion concentration at different sites

3.2 影响因素

3.2.1 林分类型 不同林分类型 NAIC 差异如图 6 所示.四种林分的 NAIC 均值从高到低依次为针叶林(3369±995)个/cm³、常绿阔叶林(3109±1446)个/cm³、竹林(2955±252)个/cm³、落叶阔叶林(2941±1144)个/cm³.四种林分的 NAIC 存在一定差异,常绿阔叶林和针叶林的 NAIC 显著高于竹林($P<0.05$).常绿阔叶林、落叶阔叶林以及针叶林之间没有显著差异.与阔叶林相比,针叶植物所具有的“尖端放电”作用,使得针叶林对空气中负离子的贡献率大于阔叶林,绿色针叶植物越多的区域,周围环境大气中的 NAIC 往往越高.本研究的结果与王顺利等^[28]的研究一致,针叶林的 NAIC 高于常绿、落叶两种阔叶林.但是在马荣等^[15]的研究中,午潮山国家森林公园总体表现出常绿、落叶两种阔叶林 NAIC 相对较高.一般地,常绿植物的光合产量要大于落叶植物,在本研究中,常绿阔叶林的 NAIC 要高于落叶阔叶林,与马荣等^[15]的研究结果一致.目前,关于不同林分类型与 NAIC 之间的关系有待进一步研究,环境条件以及植物自身的生理特性都有一定影响。

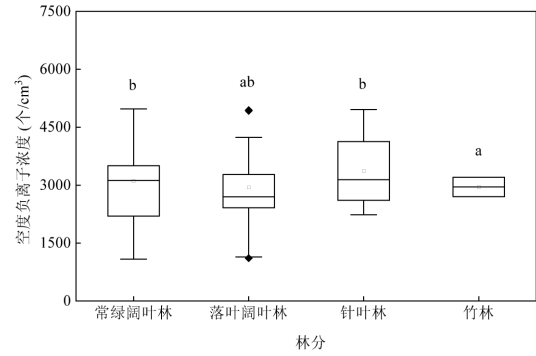


图6 不同林分 NAIC 浓度差异

Fig.6 Comparison of Negative air ion concentrations for different forest stands

不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)

3.2.2 气象因子 对五指山 NAIC 与空气温度、相对湿度、风速以及 PAR 进行相关性分析(表 6)发现,不同气象参数与 NAIC 具有不同的线性相关关系.通过双变量 Spearman 相关性双侧检验分析得到,五指山 NAIC 与相对湿度总体上呈极显著正相关($P<0.01$),即相对湿度越大,NAIC 越高,与王一荃等^[30]的研究结论一致.NAIs 主要以 $O_2^-(H_2O)_n$ 的形式在空气中相对稳定地存在,当空气相对湿度增大时, O_2^- 与水分子结合生成 NAIs 的机会增大^[46].相对湿度可能通过以下方式影响 NAIs 的浓度:1)原子核凝结半径和结合速率的增加间接引起离子迁移率的降低,从而对 NAIC 产生影响;2)在雾的形成和消散过程中也可能会引起 NAIs 的产生^[47];3)相对湿度增加使得水诱导的勒纳德效应增强,从而促进 NAIs 的产生^[48].

本研究中 NAIC 与空气温度、风速呈负相关,与张曼义等^[49]、郑诗禹^[11]的研究结果一致.研究表明,当温度升高时,环境中的污染物会因为布朗运动而加速扩散,并在扩散过程中吸附大量 NAIs,使其浓度降低.另外,随着温度的升高,植物的光合作用加强,释放出的氧气在紫外线辐射下易发生光电效应形成负氧离子,从而使 NAIC 升高^[29,50].风速不断增大,可能会导致植物叶片内外的水汽压损耗增加,为了减少叶片内部水分的流失,植物会减小气孔的开度,从而影响 NAIs 的生成^[12].但在本研究中,NAIC 与风速的关系并不显著,原因可能与不同海拔高度的风速差异较大有关。

3.2.3 空气质量 根据环境空气质量标准(GB3095-2012)所规定的浓度限值,观测时段五指山

地区的 $O_3(66\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $\text{NO}_2(6\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $\text{PM}_{2.5}(16\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $\text{PM}_{10}(17\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 均达到一级浓度限值标准.环境空气质量指数(AQI)可以反应空气的污染程度,观测时段五指山日均 AQI 为 34,达到 AQI 技术规范(HJ 633-2012)的一级标准,空气质量为优.

将五指山 NAIC 与 AQI、 NO_2 、 O_3 、 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 进行相关性分析(表 6)发现,不同空气污染物、颗粒物浓度与 NAIC 具有不同的线性相关关系.通过双变量 Spearman 相关性双侧检验分析得到,NAIC 与 NO_2 呈负相关,与 AQI 和 O_3 呈正相关,与 Zhang 等^[51]在北戴河的研究结果一致.研究表明,在充足的光照下, NO_x 会因为发生光化学反应而生成一定量的 O_3 ,使大气中的 O_3 浓度增加、 NO_2 浓度下降,同时也会生成一定量的 NAIs^[52].

表 6 环境气象参数与 NAIs 浓度相关性

Table 6 Correlation between environmental-meteorological parameters and negative air ion concentration

参数	线性拟合方程	显著水平(P 值)	相关系数(r)
温度	-	0.063	-0.206
相对湿度	$y=26.36x+1249.91$	0.003	0.323**
风速	-	0.875	-0.019
PAR	-	0.077	-0.249
AQI	-	0.580	0.200
NO_2	-	0.962	-0.005
O_3	-	0.337	0.107
PM_1	$y=1.26x+2220.90$	0.049	0.278*
$\text{PM}_{2.5}$	$y=45.71x+2129.20$	0.027	0.310*
PM_{10}	$y=44.32x+2112.93$	0.019	0.328*

注:*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$).

龚苗等^[10]研究发现潜山国家森林公园的 NAIC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈极显著负相关($P<0.01$),但在其研究期间,也出现 $\text{PM}_{2.5}$ 与 NAIC 呈正相关的现象;李少宁等^[53]发现北京西山国家森林公园的 NAIC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈极显著负相关($P<0.01$).研究表明,空气中带有负电荷的 NAIs 与正电荷的 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物会相互吸引,粘附成更大粒子后会发生沉降,从而使 NAIC 下降.但本研究中与前人的研究结论不同:NAIC 与 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 为显著正相关($P<0.05$).原因可能是本研究观测时期处于冬季,植被处于落叶期,树木的生理活动较春夏减弱,对于空气中颗粒物的调控能力减弱,且此时五指山地区处于旅游旺季,NAIs 浓度受人干扰的影响大于夏季,从而使得颗粒物与 NAIs 浓度呈现正相关^[54].除此以外,NAIC 还与研究区域、研究对象和监

测点周围空气的流通状况等因素的差异有关.

3.2.4 VOCs 观测期间各点位共检测出 66 种 VOCs(图 7),包括 22 种萜类化合物(异戊二烯、16 种单萜烯、5 种倍半萜烯)、19 种烷烃、4 种烯烃、15 种芳香烃、6 种含氧化合物.各点位的 VOCs 组成大致相同,以萜烯类化合物、含氧化合物为主,其占比高于 80%.从整体上看,各点位的日均 VOCs 浓度大小依次为:国家背景站(38.05×10^{-9})>毛纳村(32.59×10^{-9})>御景酒店(31.34×10^{-9})>桫椤公路(30.26×10^{-9})>太平水库(28.46×10^{-9})>大峡谷(28.45×10^{-9})>琼州大学(28.34×10^{-9})>亚泰雨林(26.25×10^{-9})>森林湖(23.19×10^{-9})>畅好乡(21.94×10^{-9})>初保村(19.86×10^{-9})>红峡谷(18.44×10^{-9}).

萜类化合物是非常重要的森林保健因子.植物排放的单萜烯(例如, α -蒎烯、 β -月桂烯、桉烯等)能够镇痛、抗炎杀菌,广泛应用于医药原料中,倍半萜烯(例如,石竹烯、长叶烯等)同样具有杀菌消毒、抵抗炎症等健康效应.观测期间各点位环境空气中萜烯类化合物的浓度占比很高,均达到了 70%以上.国家背景站的萜烯类化合物浓度最高(31.15×10^{-9}),其次是毛纳村(25.00×10^{-9}),初保村的萜烯类化合物浓度最低(12.95×10^{-9}).国家背景站的萜烯类化合物主要为罗勒烯、茨烯、胡椒烯、长叶烯,浓度分别为 2.10×10^{-9} 、 2.02×10^{-9} 、 1.84×10^{-9} 、 1.79×10^{-9} ;毛纳村的萜烯类化合物以长叶烯、异长叶烯、 β -石竹烯、胡椒烯为主,浓度分别为 1.70×10^{-9} 、 1.68×10^{-9} 、 1.68×10^{-9} 、 1.64×10^{-9} .毛纳村环境空气中含氧化合物浓度最高,达到了 6.93×10^{-9} ,其次是御景(6.59×10^{-9}),亚泰雨林的含氧化合物浓度最低.毛纳村的含氧化合物主要为壬醛、辛醛,浓度分别为 1.60×10^{-9} 、 1.51×10^{-9} ;御景的含氧化合物以壬醛、辛醛为主,浓度分别为 1.94×10^{-9} 、 1.50×10^{-9} .各采样点位的气象因子(气温、相对湿度、PAR 等)、环境条件以及优势树种的不同使得其空气中 VOCs 的浓度和组成存在一定差异.

将五指山 NAIC 与 VOCs(萜类、烷烃、烯烃、芳香烃、含氧化合物)进行相关性分析(图 8)发现,不同 VOCs 与 NAIC 具有不同的线性相关关系.通过双变量 Spearman 相关性双侧检验分析得到,五指山 NAIC 与倍半萜烯、芳香烃类化合物总体上呈负相关($P<0.05$),与萜烯类化合物、单萜烯、烯烃类化合

3.3 生态保健功能综合评价

如表 7 所示,6 个指标可归为 2 个相互独立的因子,其累计方差贡献率达到了 65.28%.根据主成分得分矩阵可以看出,第一主成分(F1)主要反映了 PM₁ 浓度、PM_{2.5} 浓度、PM₁₀ 浓度对 FHI 的作用,第二主成分(F2)主要反映了气候舒适度、NAIC、VOCs 浓度对 FHI 的作用,两个主成分的方差贡献率分别为 45.83%和 19.45%.

表 7 保健指标主成分得分系数矩阵

Table 7 Health indicator principal component score coefficient matrix

指标	主成分	
	1	2
气候舒适度(X1)	-0.043	0.795
PM ₁ 浓度(X2)	0.900	-0.084
PM _{2.5} 浓度(X3)	0.979	0.042
PM ₁₀ 浓度(X4)	0.973	0.057
空气负离子浓度(X5)	0.130	0.207
VOCs 浓度(X6)	0.119	-0.696
特征根	7.563	1.362
方差贡献率(%)	45.83	19.45
权重系数	0.70	0.30

在观测期间,该地区的 FHI 均值为 0.55±0.12,3 个时间段的 FHI 平均值从高到低依次为 14:00(0.61±0.19)、17:00(0.56±0.29)、10:00(0.50±0.17).其中各点位 FHI 的时间变化如图 9 所示,从图中可以看出,采样点的 FHI 在一天中的不同时刻之间具有明显的变化特征.御景、国家背景站、毛纳村和森林湖的 FHI 在 14:00 达到峰值.杪楞公路、

琼州大学和畅好乡的 FHI 呈现不断上升的日变化特征,在 17:00 达到最大值.大峡谷-亚泰雨林以及红峡谷-初保村的 FHI 呈现逐渐下降的日变化趋势,在 10:00 达到最大值.太平水库 FHI 日变化规律为 V 型,在 14:00 达到谷值,在 10:00 达到最大值.总体上,各典型林分 FHI 日间最高值多出现在 14:00,其可能原因包括以下三个方面:一是 FHI 受空气悬浮颗粒物的影响,相对于中午来说,下午的空气悬浮颗粒物浓度较低,空气较为洁净.二是受 NAIC 影响,各观测点位的 NAIC 具有早晚低、中午前后高的变化规律.最后,植物源 VOCs 作为维持森林保健的重要物质,其浓度最高的时间主要在 14:00 前后,随着午后温度的升高以及光照强度的增加,植物源 VOCs 的有关合成酶活性增强,植物所排放的有机物也会随之增加.

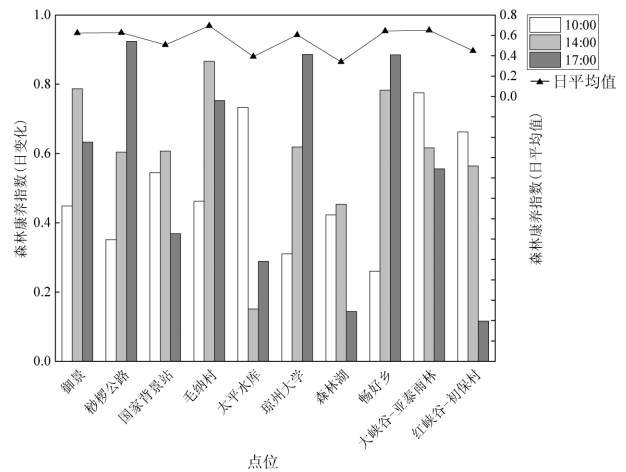


图 9 五指山 FHI 日变化特征

Fig.9 Diurnal variation of FHI in Wuzhishan

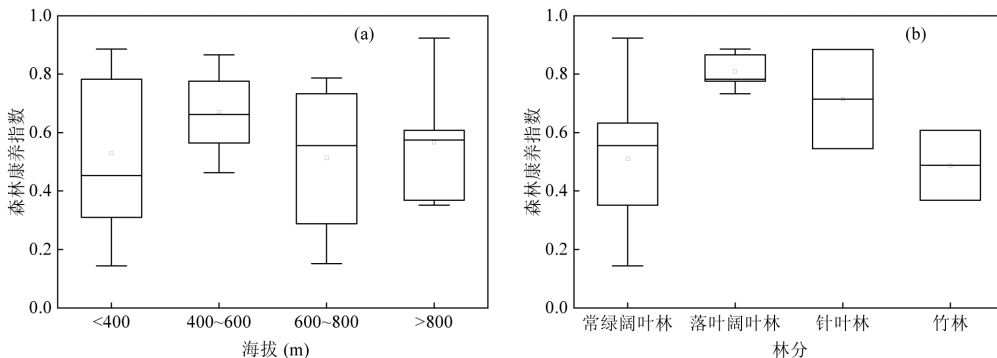


图 10 不同海拔 FHI 差异

Fig.10 Comparisons of FHI at different altitudes

各点位 FHI 日平均值变化波动幅度在 0.340~

0.694,最大值比最小值高 51.0%.其中,毛纳村的 FHI

最高,而森林湖因为靠近市区,污染物浓度较其他地区高,因此 FHI 值远低于其他点位。根据表 3 的评价标准,除了红峡谷-初保村、太平水库、森林湖,其他点位均达到了 II 级标准,综合保健效果较好,适宜开展森林康养活动。

五指山热带雨林不同海拔地区的 FHI 差异较小,从图 10(a)可以看出,FHI 随着海拔的增加呈现出先增大后减小再增加的趋势。四个不同海拔梯度的 FHI 按平均值大小依次为 400~600m(0.67 ± 0.13)、>800m(0.57 ± 0.19)、<400m(0.53 ± 0.26)、600~800m(0.51 ± 0.22),每个海拔梯度之间的 FHI 差异不显著。不同林分类型 FHI 差异如图 10(b)所示。其 FHI 均值从高到低依次为落叶阔叶林(0.73 ± 0.19)、针叶林(0.71 ± 0.17)、常绿阔叶林(0.51 ± 0.21)、竹林(0.49 ± 0.12),不同林分之间的 FHI 指数差异并不显著。

3.4 展望

本研究为海南热带雨林开展森林康养的适宜时间和区域提供了一定的数据支持,以期更好地指导人们利用 NAIs 进行养生保健,改善身体状况。但是,本研究仅在干季对五指山地区进行了加强观测,并对影响因素作了简单的相关性分析。未来,应该覆盖更广泛的地理区域进行长期观测,对不同季节的研究结果进行对比分析。此外,可以利用数值模式、神经网络等工具对各影响因素进行更精细的分析,以探究 NAIs 的生成与演化机制。

4 结论

4.1 海南五指山热带雨林地区 2024 年 1 月 NAIs 的平均浓度为 $3541 \text{ 个}/\text{cm}^3$,所有监测点位的平均浓度均大于 $2100 \text{ 个}/\text{cm}^3$,NAIs 浓度等级达到 WHO-VI 级标准,空气清新程度为非常清新,有益于居民的身心健康。

4.2 针叶林的 NAIC 相对较高。NAIC 随着海拔的升高呈现先增大后减少的趋势,中海拔区域(600~800m)的 NAIC 最高。常绿阔叶林的 NAIC 浓度在海拔 630m 最高。NAIC 呈现“两峰一谷”日变化趋势,峰值主要出现在上午 09:00~10:00 以及下午的 14:00~16:00,谷值出现在 12:00 前后。

4.3 相对湿度、大气颗粒物、萜烯类化合物、烯烃类化合物、芳香烃化合物是 NAIC 的主要环境影响因素。各点位共检测出 66 种 VOCs,其中萜烯类化合

物和含氧有机物占比最高(>80%)。NAIC 与相对湿度、大气颗粒物呈显著正相关,与 VOCs 中的倍半萜烯、芳香烃呈显著负相关,而与单萜烯、烯烃呈显著正相关。

4.4 构建了一种基于气候舒适度、颗粒物、NAIs、VOCs 等指标的 FHI 计算方法,用以综合评价森林的生态保健功能,五指山各点位 FHI 日变化差异显著,大部分点位 FHI 下午高于上午,不同海拔和林分 FHI 差异不显著。

参考文献:

- [1] 单晟焜,齐超,张冬有.漠河针叶林空气负离子浓度日变化特征研究[J].中国农学通报,2015,31(25):13-18.
Shan S Y, Qi C, Zhang D Y. Daily variation of negative air ions concentration in the coniferous forest in mohe county [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(25):13-18.
- [2] He 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.
- [3] Zhang J, Yu Z L. Experimental and simulative analysis of relationship between ultraviolet irradiations and concentration of negative air ions in small chambers [J]. Journal of Aerosol Science, 2006,37(10):1347-1355.
- [4] 薛爱爱,马国强,廉梅霞.太原东山林场森林空气负氧离子浓度研究[J].农业技术与装备,2022,(2):104-105.
Xue A A, Ma G Q, Lian M X. Study on air negative oxygen ion concentration in the east mountains forest farm in Taiyuan city [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022,(2):104-105.
- [5] 傅伟聪,陈梓茹,朱志鹏,等.福州城郊不同游憩空间大气颗粒物浓度的变化规律——以福建农林大学校园为例[J].福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(4):458-464.
Fu W C, Chen Z R, Zhu Z P, et al. Changing rule of atmospheric particulate matter concentration in Fuzhou different spatial suburb recreational region——take the campus of Fujian Agriculture and Forestry University for example [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2016,45(4):458-464.
- [6] 负航,张晓文.森林康养对人体健康的影响研究综述[J].林业调查规划,2022,47(6):135-140,154.
Yun H, Zhang X W. Review of effects of forest based health and wellness on human health [J]. Forest Inventory and Planning, 2022, 47(6):135-140,154.
- [7] 邹慧儒,彭友贵,唐刚.我国森林空气负离子研究进展[J].安徽农业科学,2024,52(7):15-18.
Zou H R, Peng Y G, Tang G. Research progress on forest negative air ions in china [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024,52(7): 15-18.
- [8] 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, et al. 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.
- [9] 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.
- [10] 龚苗,王晓荣,刘清平等.潜山国家森林公园负氧离子变化及主要气象因素的关系研究[J]. *中国农学通报*, 2023,39(30):101-107.
Gong M, Wang X R, Liu Q P, et al. Variation of negative oxygen ion and its relationship with main meteorological factors in Qianshan National Forest Park [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(30):101-107.
- [11] 郑诗禹.广州帽峰山森林公园空气负氧离子动态及环境影响研究[D].南昌:江西农业大学, 2022.
Zheng S Y. Study on the dynamics and environmental impact of air negative oxygen ions in Maofengshan Forest Park, Guangzhou [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [12] 张家兴,蒋丽娅,桑玉强等.济源南山森林公园春早期侧柏林空气负氧离子浓度及其与气象因子的关系[J]. *河南科学*, 2022,40(12):1957-1963.
Zhang J X, Jiang L Y, Sang Y Q, et al. Negative air ion concentration of platycladus orientalis forest during spring drought period and its relation with meteorological factors in Nanshan Forest Park, Jiyuan [J]. *Henan Science*, 2022,40(12):1957-1963.
- [13] 汤浩藩,吴巧花,王丽艳等.南昌市城郊针阔混交林负氧离子浓度及其影响因子研究[J]. *林业资源管理*, 2022,(5):84-90.
Tang H F, Wu Q H, Wang L Y, et al. Concentration of negative oxygen ion and its influencing factors in coniferous and broad-leaved mixed forest in the suburbs of Nanchang city [J]. *Forest Resources Management*, 2022,(5):84-90.
- [14] 廖荣俊,颜晓捷,江波等.灵鹫山国家森林公园康养基地空气负氧离子浓度变化特征及其影响因素研究[J]. *浙江林业科技*, 2021,41(5):36-41.
Liao R J, Yan X J, Jiang B, et al. Variation characteristics of negative air ions concentrations and influencing factors in Lingjiushan Mountain National Forest Health Base [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2021,41(5):36-41.
- [15] 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.
Ma R, Wang Z G, Huang Y J, et al. Spatio-temporal pattern of air anion concentrations and their influencing factors in autumn of Wuchaoshan National Forest Park [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021,41(1):26-34.
- [16] 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):55-59,79.
Zhu B B, Sun S H, Wang L J, et al. Negative oxygen ion concentration and influencing factors in pinus sylvestris var. mongolica forest in Hulunbeier Sandy Land [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021,36(4):55-59,79.
- [17] 丁文慈,赵由之.五指山水满河热带雨林空气负离子分布与评价[J]. *环境科学导刊*, 2018,37(3):66-69.
Ding W C, Zhao Y Z. Negative air ions distribution and its evaluation in Shuimanhe tropical Rainforest of Wuzhishan Mountain [J]. *Environmental Science Survey*, 2018,37(3):66-69.
- [18] 司婷婷.吊罗山热带雨林空气负离子浓度变化特征及其与气象要素的关系[D].海口:海南师范大学, 2015.
Si T T. Variation characteristics of negative air ion concentration in diaoluoshan tropical rainforest and their relation with meteorological elements [D]. Hainan: Hainan Normal University, 2015.
- [19] 丁文慈,赵由之.七仙岭国家森林公园冬季空气负离子分布与评价[J]. *海南热带海洋学院学报*, 2017,24(5):36-41.
Ding W C, Zhao Y Z. Wintertime negative air ions distribution and its evaluation in Qixian Mountain National Forest Park [J]. *Journal of Hainan Tropical Ocean University*, 2017,24(5):36-41.
- [20] 李欢欢,胡文杰,杨佳伟等.九峰国家森林公园主要森林类型夏季环境效应综合评价[J]. *湖北林业科技*, 2023,52(5):1-8,90.
Li H H, Hu W J, Yang J W, et al. Comprehensive evaluation of environmental effects of main forest types in Jiufeng National Forest Park in summer [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2023, 52(5):1-8,90.
- [21] 饶秀俊.南平市延平区溪源峡谷森林公园负氧离子调查分析[J]. *中国林副特产*, 2022,(6):17-20.
Rao X J. Negative oxygen ion survey and analysis of Xiyuan Canyon Forest Park, Yanping District, Nanping City, China [J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2022,(6):17-20.
- [22] 韩明臣.城市森林保健功能指数评价研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2011.
Han M C. Research on composite evaluation index of urban forest health effects: a case study of Beigong National Forest Park [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [23] 刘畅.徐州石灰岩山地4种典型林分保健功能的研究[D].南京:南京林业大学, 2019.
Liu C. Study on ecological health functions of four typical forest stands in Limestone Mountain of Xuzhou [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.
- [24] 许涵,李艳朋,李意德等.中国热带森林植被类型研究历史和划分探讨[J]. *广西植物*, 2021,41(10):1595-1604.
Xu H, Li Y P, Li Y D, et al. Study history and discussion on classification of the tropical forest vegetation types in China [J]. *Guihaia*, 2021,41(10):1595-1604.
- [25] Ding X, Gong D, Li Q, et al. Development of a refrigerant-free cryotrap unit for pre-concentration of biogenic volatile organic compounds in air [J]. 2024,15(5):587.
- [26] 郁珍艳,李正泉,樊高峰等.浙江省气象及环境因子对负氧离子浓度的影响[J]. *中国环境科学*, 2023,43(2):514-524.
Yu Z Y, Li Z Q, Fan G F, et al. Effects of meteorological and environmental factors on negative oxygen ions concentration in zhejiang province [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(2):514-524.
- [27] 陆鼎煌.颐和园夏季小气候 [I]//中国林业气象文集.北京:气象出版社, 1989:221-228.
Lu D H. Summer microclimate in the Summer Palace [C]//Collection of Chinese Forestry Meteorology. Beijing: China Meteorological Press,

- 1989:221-228.
- [28] 王顺利,刘贤德,金 铭,等.甘肃省森林区空气负离子分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2010,19(7):1563-1568.
Wang S L, Liu X D, Jin M, et al. Distribution characteristics of negative air ions in forest region of Gansu [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(7):1563-1568.
- [29] 司艳萍,陈 俊,曹凌仪,等.热带湿季不同海拔林分的空气负离子特征及微气候效应[J]. 中国城市林业, 2024,22(1):111-117.
Si Y P, Chen J, Cao L Y, et al. Negative air ions characteristics and microclimate effects of forest stands at different elevations in tropical wet season [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2024,22(1):111-117.
- [30] 王一荃,周 璋,李意德,等.不同热带森林空气负离子浓度评价研究[J]. 生态环境学报, 2021,30(5):898-906.
Wang Y Q, Zhou Z, Li Y D, et al. The spatial-temporal pattern and influencing factors of negative air ions in tropical forests, Hainan, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(5):898-906.
- [31] 龙 飞,董 斌,彭 阳,等.海口市凤翔湿地公园空气负氧离子及影响因素研究[J]. 林业调查规划, 2022,47(5):22-26.
Long F, Dong B, Peng Y, et al. Air negative oxygen ion and its influencing factors in Fengxiang Wetland Park of Hainan city [J]. Forestry Inventory and Planning, 2022,47(5):22-26.
- [32] 吴伟贞.空气负氧离子的时空分布特征及其影响因素研究——以福建君子峰国家级自然保护区为例[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(23):90-91,100.
Wu W Z. Spatiotemporal variation of air negative oxygen ions and their influencing factors—a case study of Junzifeng National Nature Reserve in Fujian [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023,4(23):90-91,100.
- [33] 孟 茹,胡江波,田光文,等.汉中负氧离子浓度分布特征及预测[J]. 陕西气象, 2024,(1):53-59.
Meng R, Hu J B, Tian G W, et al. Characteristics of anion concentration distribution and prediction in Hanzhong China [J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2024,(1):53-59.
- [34] 饶秀俊.南平市延平区九峰山城市森林公园负氧离子调查研究[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2021,34(1):22-25.
Rao X J. Investigation on negative oxygen ion in Urban Forest Park of Jiufeng Mountain, Yanping District, Nanping city [J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2021, 34(1):22-25.
- [35] 朱舒欣,崔 杰,刘起雨,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]. 林业与环境科学, 2019,35(5): 14-22.
Zhu S X, Cui J, Liu Q Y, et al. Evaluation of negative oxygen ion concentration and correlation analysis with environmental factors in Shimen National Forest Park [J]. Forestry and Environmental Science, 2019,35(5):14-22.
- [36] 冯慧君,安 静,杨广斌,等.城市湿地公园植物群落空气负离子浓度及影响因素——以花溪十里河滩国家城市湿地公园为例[J]. 环境化学, 2023,42(10):3487-3499.
Feng H J, An J, Yang G B, et al. Air anion concentration and influencing factors of plant community in urban wetland park—a case study of Huaxi Shilihetan National Urban Wetland Park [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(10):3487-3499.
- [37] 巫晶晶,孟艺璇,储海燕,等.室内空气负离子浓度分布特征及其影响因素[J]. 环境与健康杂志, 2018,35(9):834-836.
Wu J J, Meng Y X, Chu H Y, et al. Characteristics of indoor air negative ion concentration distribution and its influencing factors [J]. Journal of Environment and Health, 2018,35(9):834-836.
- [38] 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 J. Study on negative air ions concentration in 5 kinds of indoor ornamental plants [J]. Building Science, 2018, 34(2):21-25.
- [39] 张月娟,袁庆叶,刘艺芳,等.森林康养区空气负氧离子与环境因素相关性研究——以北京松山自然保护区为例[J]. 林业科技, 2023, 48(1):52-57.
Zhang Y J, Yuan Q Y, Liu Y F. Study on the correlation between air negative ions and environmental factors in forest therapy area—a case study of Beijing Songshan Nature Reserve [J]. Forestry Science & Technology, 2023,48(1):52-57.
- [40] 余 海,郭 嘉,李恩杰,等.北京九龙山侧柏林空气负离子时空分布特征[J]. 林业科学研究, 2021,34(3):174-179.
Yu H, Guo J, Li E J, et al. Emporal and spatial distribution characteristics of negative air ion in platycladus orientalis forest of Jiulong Mountain, Beijing [J]. Forest Research, 2021,34(3):174-179.
- [41] 陈乔春,刘录明,张 静,等.海南澄迈和辽宁沈阳城市公园负氧离子浓度及其影响因素的对比研究[J]. 林业与环境科学, 2023,39(3): 51-57.
Chen Q C, Liu L M, Zhang J, et al. A comparative study of negative oxygen ions concentrations and its influencing factors in urban parks in Chengmai, Hainan and Shenyang, Liaoning [J]. Forestry and Environmental Science, 2023,39(3):51-57.
- [42] 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.
- [43] 余 海,辛学兵,裴顺祥,等.九龙山林缘地区空气负离子浓度变化特征及与气象因素关系[J]. 生态科学, 2018,37(6):191-198.
Yu H, Xin X B, Pei S X, et al. Characteristics of air anion change and its relationship with meteorological factors in forest margin area of Jiulong Mountain [J]. Ecological Science, 2018,37(6):191-198.
- [44] 刘开明,郑 智,龚大洁.物种丰富度的垂直分布格局及其形成机制[J]. 生态学杂志, 2017,36(2):541-554.
Liu K M, Zheng Z, Gong D J. Elevational patterns of species richness and their underlying mechanism [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(2):541-554.
- [45] 邹 璐,丁 颖,冯 慧.新余市森林游憩区空气负离子与 PM_{2.5} 动态变化规律及影响因子特征研究[J]. 西部林业科学, 2024,53(1): 156-162.
Zou L, Ding Y, Feng H. Dynamic changes and influencing factors of negative air ions and PM_{2.5} in forest recreation areas of Xinyu city [J]. Journal of West China Forestry Science, 2024,53(1):156-162.
- [46] 李巧云,李高飞,廖菊阳,等.湖南省森林植物园空气负氧离子浓度特

- 征及影响要素研究 [J]. 湖南林业科技, 2019,46(1):18-23.
- Li Q Y, Li G F, Liao J Y, et al. Study on the characteristics of negative air ion concentrations and its influential factors in Hunan Forest Botanical Garden [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2019, 46(1):18-23.
- [47] 韦赛君. 3种植物挥发物对空气负离子及空气微生物的影响 [D]. 杭州:浙江农业大学, 2021.
- Wei S J. Effects of three plant volatiles on negative air ions and air microorganisms [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021.
- [48] Luo L, Sun W, Han Y, 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).
- [49] 张曼义, 丁国香, 杨伟, 等. 城市公园与高山茶园负氧离子浓度对比分析及气象要素影响 [J]. 中低纬山地气象, 2023,47(4):20-24.
- Zhang M Y, Ding G X, Yang W, et al. Comparative analysis of negative oxygen ions concentration between urban park and alpine tea garden and the influence of meteorological factors [J]. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2023,47(4):20-24.
- [50] 刘宇, 董蓉, 王晓立, 等. 不同群落结构绿地空气负离子浓度与颗粒物的关系 [J]. 江苏农业科学, 2015,(11):465-467.
- Liu Y, Dong R, Wang X L, et al. Relationship between negative air ion concentration and particulate matter in green spaces with different community structures [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015,(11):465-467.
- [51] Zhang X, Cao J, Zhang S Y, et al. Distribution characteristics of air anions in Beidaihe in different ecological environments [J]. 2018, 6(5):133-150.
- [52] 徐兰. 北京城市森林空气负离子浓度时空变化特征及影响因素 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.
- Xu L. Spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of air negative ion concentration in urban forest of Beijing [J]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [53] 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.
- Li S N, Li Y, Zhao X, et al. Relationship between negative air ions and air pollutant in Beijing Xishan National Forest Park [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021,34(10):2269-2273.
- [54] 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.
- [55] 徐晨, 章尧想, 吴迪, 等. 北京市3种典型森林类型林内植物源挥发性有机物变化特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023,43(5):130-139.
- Xu C, Zhang Y X, Wu D, et al. Variation characteristics of biogenic volatile organic compounds in three typical kinds of forests in Beijing [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023,43(5):130-139.
- [56] Ryerson T B, Trainer M, Holloway J S, et al. Observations of ozone formation in power plant plumes and implications for ozone control strategies [J]. *Science*, 2001,292(5517):719-723.
- [57] 郭二果, 王成, 鄯光发, 等. 城市森林生态保健功能表征因子之间的关系 [J]. 生态学杂志, 2013,32(11):2893-903.
- Guo E G, Wang C, Xi G F, et al. Relationships between the factors reflecting ecological health function of urban forests [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013,32(11):2893-903.

作者简介: 徐芮韵(2001-),女,广东清远人,暨南大学硕士研究生,主要从事森林空气负离子与 VOCs 方面的研究.发表论文 2 篇.xuruiyun0709@163.com.