

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*

陈乔春¹ 刘录明² 张 静¹ 龙文芳¹ 刘云儒¹
许琼军¹ 薛 萍³ 肖 莎¹

(1. 海南医学院公共卫生与健康国际学院 Heinz Mehlhorn 院士工作站, 海南 海口 571199; 2. 海南三林旅业开发有限公司澄迈富力红树湾医院, 海南 澄迈 571900; 3. 沈阳医学院公共卫生学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘要 以海南澄迈和辽宁沈阳的城市公园为研究对象, 在2021年10月至2022年3月期间, 采用KEC-900负氧离子检测仪检测海南澄迈和辽宁沈阳的城市公园空气中NAIs浓度, 利用海南省生态环境厅 (<http://hnsthb.hainan.gov.cn/>)、辽宁省生态环境厅 (<https://sthj.ln.gov.cn/>) 和国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 获取澄迈和沈阳城市公园附近国家检测点的空气质量指标监测数据 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3) 和气象因素数据 (日均气温、日均相对湿度、日均风力等级), 比较分析两地城市公园NAIs浓度的差异及其影响因素。结果表明: 2021年10月至2022年3月期间, 澄迈NAIs月均浓度为6 725个/ cm^3 , 显著高于沈阳的262个/ cm^3 ($P<0.05$), 其中澄迈NAIs浓度在10月份最高 (7 577个/ cm^3), 3月份最低 (6 475个/ cm^3), 而沈阳NAIs浓度则是2月份最高, 10月份最低。澄迈NAIs浓度与CO呈负相关 ($\beta=-640.058$, $P<0.01$), 与风力等级 ($\beta=139.565$, $P<0.01$)、相对湿度 ($\beta=7.092$, $P<0.01$) 呈正相关; 沈阳城市公园NAIs浓度主要与 O_3 ($\beta=2.115$, $P<0.05$)、相对湿度呈正相关 ($\beta=1.755$, $P<0.05$)。以上结果表明澄迈城市公园NAIs浓度显著高于沈阳, CO、 O_3 、风力等级、相对湿度等是影响空气中NAIs浓度的主要环境因素。降低CO浓度、增加风力等级和湿度可提高澄迈NAIs浓度。

关键词 负氧离子; 空气污染物; 气象因素

中图分类号: R122.2、S73 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 03-0051-07

A Comparative Study of Negative Oxygen Ions Concentrations and Its Influencing Factors in Urban Parks in Chengmai, Hainan and Shenyang, Liaoning

CHEN Qiaochun¹ LIU Luming² ZHANG Jing¹ LONG Wenfang¹
LIU Yunru¹ XU Qiongjun¹ XUE Ping³ XIAO Sha¹

(1. Hainan Medical University International School of Public and One Health Workstation of Academician Heinz Mehlhorn, Haikou, Hainan 571199, China; 2. Hainan Sanlin Travel Development Co. Ltd. Chengmai R&F Mangrove Bay Hospital Interna, Chengmai, Hainan 571900, China; 3. Shenyang Medical College School of Public Health, Shenyang, Liaoning 110034, China)

Abstract Using urban parks in Chengmai, Hainan, and Shenyang, Liaoning as the research objects, the

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (82060603), 海南省自然科学基金高层次人才项目 (820RC648), 海南医学院研究生创新课题基金 (HYYS2021A11)。

第一作者: 陈乔春 (1995—), 女, 在读硕士, 研究方向为疾病预防与控制, E-mail: 2495095832@qq.com。

通信作者: 肖莎 (1986—), 女, 副教授, 主要从事环境与健康相关研究工作, E-mail: xiaosha4226@126.com。

薛萍 (1988—), 女, 讲师, 主要从事分子流行病学相关研究工作, E-mail: xueping311@sina.com。

KEC-900 negative oxygen ion monitor was used to detect the concentrations of NAIs in the air of urban parks in Chengmai, Hainan, and Shenyang, Liaoning during the period from October 2021 to March 2022, using the Department of Ecology and Environment of Hainan Province(<http://hnsthb.hainan.gov.cn/>), the Department of Ecology and Environment of Liaoning Province(<https://sthj.ln.gov.cn/>) and the National Meteorological Science Data Centre(<http://data.cma.cn/>) to obtain air quality index monitoring data($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3) and meteorological factor data(average daily temperature, average daily relative humidity, average daily wind scale), to compare and analyze the differences in the concentrations of NAIs between the two urban parks and their influencing factors. The results showed that from October 2021 to March 2022, the monthly average concentration of NAIs in Chengmai was $6\ 725\ \text{ions}/\text{cm}^3$, which was significantly higher than that in Shenyang($262\ \text{ions}/\text{cm}^3$) ($P<0.05$), with the highest concentrations of NAIs in October($7\ 577\ \text{ions}/\text{cm}^3$) and the lowest in March ($6\ 475\ \text{ions}/\text{cm}^3$), while the concentrations of NAIs in Shenyang was the highest in February and the lowest in October. NAIs concentrations in Chengmai were negatively correlated with CO ($\beta=-640.058$, $P<0.01$) and positively correlated with wind scale ($\beta=139.565$, $P<0.01$) and relative humidity ($\beta=7.092$, $P<0.01$); NAIs concentrations in Shenyang city park were mainly positively correlated with O_3 ($\beta=2.115$, $P<0.05$) and relative humidity ($\beta=1.755$, $P<0.05$). The above results show that the concentrations of NAIs in Chengmai city park are significantly higher than those in Shenyang and that CO , O_3 , wind scale, and relative humidity are the main environmental factors affecting the concentrations of NAIs in the air. Reducing CO concentration, and increasing wind scale and humidity can increase the concentrations of NAIs in Chengmai.

Key words negative oxygen ions; air quality factors; meteorological factors

负氧离子 (Negative Air Ions, NAIs) 是空气中一种带负电的离子, 空气负氧离子不仅具有去除空气中的尘埃、净化空气的作用, 而且具有杀灭病毒和细菌的作用^[1]。浓度较高的空气负离子, 能抑制多种病菌的繁殖, 降低积压和消除疲劳, 促进人体的新陈代谢, 调节和促进人体的生长发育, 增强机体免疫力, 而且它还能对人的心理和生理机能产生促进作用^[1]。有学者认为自然界中负氧离子的产生机制主要分为物理、生物两大类, 物理类指大气中的氧分子受闪电、雷暴、风暴及空气和山地岩石中放射性元素诱导而发生电离以及水分子的分解等^[2-3], 生物类指森林中树冠、枝叶的尖端放电以及绿色植物光合作用中的光电效应等^[4-5]。因此空气负氧离子浓度已经成为评价环境空气清洁度 (城市 / 自然地域) 的重要参数^[6]。

研究发现空气中 NAIs 浓度越高, 空气质量越好, 对人体越有益, 因而空气 NAIs 浓度是评价空气质量好坏的重要指标之一^[7]。国内外学者探讨了影响空气中负氧离子浓度因素, 如时空分布特征、温湿压风、水体、植物、建筑等^[8-10]。有研究报道森林和绿地空气中 NAIs 浓度明显高于城市中心, 且空气 NAIs 浓度时间变化差异较大, 一般认为白天高于夜间^[11-14]; 不同天气条件下空气负离

子含量大小顺序为雨天>晴天>阴天^[15-16]; 空气负离子浓度季节变化为夏季>秋季>春季>冬季, 日变化呈现波动性, 在 8:00—10:00 时最高, 16:00 时最低^[17]。由于负氧离子受周边环境的影响较大, 不同地区的负氧离子与气温、相对湿度、日照时数、天气状况等影响因子的关系存在着一定的区域性特点^[18-21], 朱舒欣等^[22]发现气温、相对湿度和风力等级是影响石门国家森林公园负氧离子浓度的关键因子。因此, 负氧离子与气象条件等影响因素间的相关性存在地区差异^[23]。

综上, 本文选择自 2021 年 10 月—2022 年 3 月, 在海南澄迈和辽宁沈阳两地城市公园开展为期 6 个月的环境监测, 比较分析影响两地城市公园空气 NAIs 浓度的环境因素, 有利于更好地了解不同地区城市公园 NAIs 浓度特征及其影响因素, 为城市公园建设和环境保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择海南澄迈县某城市公园 (北纬 $19^{\circ}53'53''$ ~ $19^{\circ}54'29''$, 东经 $110^{\circ}0'14''$ ~ $110^{\circ}0'22''$) 和沈阳市某城市公园 (北纬 $41^{\circ}52'5''$ ~ $41^{\circ}50'42''$, 东经 $123^{\circ}26'3''$ ~ $123^{\circ}26'6''$) 作为监测点。澄迈县红树湾

湿地公园地处亚热带区域,属海洋性热带季风气候,气温年较差小,年平均气温高;干季、雨季明显,冬春干旱,夏秋多雨。沈阳市某城市公园地处北暖温带区域,属半湿润季风气候,四季分明、雨热同期、天气呈非周期性变化,一般冬季的气温都低于零下,雨水冬少夏多。

1.2 负氧离子浓度监测

于2021年10月—2022年3月期间,对两座城市公园进行数据测定,采样时天气状况相似,且多为晴天或多云,选择监测时间段为上午9:00—12:00时和下午15:00—17:00时,对空气负氧离子进行采样。

在澄迈县某城市公园和沈阳市某城市公园选择林中空地、河流边、售票处空地、展馆外和出口处空地5个监测区,在每个区域采用对角线布点法布设3个监测点,5个区域共15个监测点,每个监测区周边10 m范围内无建筑物。测定前仪器进行校正,待仪器稳定后读取数据,每个监测点进行4个方向(东、南、西、北)数据的读取,每个方向连续记录30个数据,取均值得到该监测点的负氧离子浓度,每月记录有效数据25天。监测采用日本KEC-900负氧离子检测仪监测NAIs浓度,监测范围为10~200万个/cm³,监测时监测仪置于平面,设备进风口距离地面为1.5 m。

1.3 空气负氧离子质量评价

在环境监测中,常按照国家森林公园负氧离子等级评价标准进行空气质量评价^[22],见表1。

表1 负氧离子浓度与空气质量的对应标准
Table 1 The corresponding standards between concentration of negative ions and air quality

负氧离子浓度 / 个/cm ³ Negative oxygen ion concentrations	空气质量等级 Air quality grade	空气清新程度 Air freshness degree
> 2000	一级	非常清新
1501~2000	二级	清新
1001~1500	三级	较清新
501~1000	四级	一般
≤ 500	五级	不清新

1.4 空气质量及气象因素数据

利用国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)获取澄迈和沈阳的气象因素数据(日均气温、日

均相对湿度、日均风力等级)。分别从海南省生态环境厅(<http://hnsthb.hainan.gov.cn/>)和辽宁省生态环境厅(<https://sthj.ln.gov.cn/>)获取澄迈和沈阳城市公园附件国家监测点的空气质量指标监测数据(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃)。

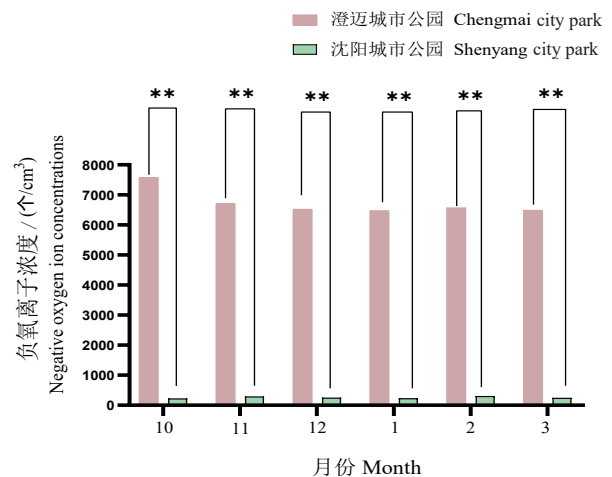
1.5 统计分析

采用SPSS20.0软件进行统计分析,正态数据采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,应用Spearman相关分析、多重线性回归分析等方法,比较分析海南澄迈和辽宁沈阳地区空气中负氧离子浓度差异及其可能的影响因素,当 $P < 0.05$ 时,认为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 澄迈和沈阳城市公园NAIs浓度比较

2021年10月—2022年3月期间,澄迈10月份NAIs浓度最高,达7577个/cm³,1月份浓度最低,为6475个/cm³;沈阳2月份NAIs浓度最高,有307个/cm³,10月份最低,仅有230个/cm³。澄迈NAIs浓度各个月份均值均显著高于沈阳,两地不同月份NAIs浓度差异具有统计学意义($P < 0.05$),总体来说,澄迈NAIs浓度显著优于沈阳,澄迈NAIs月份均值浓度空气清新程度均达到非常清新标准,对人体健康的影响极其有利;而沈阳NAIs月份均值浓度空气清新程度均为不清新,对人体健康不利,高NAIs浓度具有镇静、镇痛、镇咳、降压、催眠等功能作用。见图1。



注: ** 表示两地NAIs浓度相比较, $P < 0.01$ 。

Note: ** indicates the comparison of NAIs concentrations between the two places, $P < 0.01$.

图1 澄迈和沈阳城市公园NAIs浓度变化特征

Fig.1 Variation characteristics of NAIs concentration in urban parks in Chengmai and Shenyang

2.2 澄迈和沈阳的空气污染物和气象因素的变化趋势

2.2.1 澄迈和沈阳的空气污染物变化趋势 将两地公园空气污染物浓度进行比较,结果显示两地 NO 、 PM_{10} 浓度有差异,因此只描述 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 和 O_3 浓度变化趋势。由图2所示,澄迈城市公园不同空气污染物分布规律较为一致, SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 呈先上升后下降的趋势,而 O_3 则相反呈先下降后上升, CO 浓度变化较为稳定;沈阳城市公园 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 呈先上升后下降的趋势, O_3 浓度变化同澄迈城市公园,呈先下降后上升的趋势, CO 浓度变化同澄迈城市公园,均较为稳定。

2.2.2 澄迈和沈阳的气象因素变化趋势 将两地公园气象因素进行比较,结果显示两地气温有差异,因此只描述风力等级和相对湿度变化趋势。

由图3可见,澄迈城市公园相对湿度呈先下降后上升的趋势,于3月份达到最低,风力等级则呈下降趋势,于3月份达到最低;沈阳城市公园相对湿度呈先上升后下降的趋势,于11月份达到最高,风力等级则较为平稳。

2.3 影响澄迈和沈阳城市公园 NAI_s 浓度的环境因素

2.3.1 环境因素与澄迈和沈阳城市公园 NAI_s 浓度的相关性分析 分别对两地城市公园 NAI_s 与空气污染物指标、气象因素数据进行相关性分析,结果显示澄迈城市公园 NAI_s 浓度与 CO ($r=-0.392$, $P<0.05$) 呈负相关,与 SO_2 ($r=0.194$, $P<0.05$)、风力等级 ($r=0.395$, $P<0.05$) 呈正相关;沈阳城市公园 NAI_s 浓度与各环境因素无相关关系 ($P>0.05$),见表2。

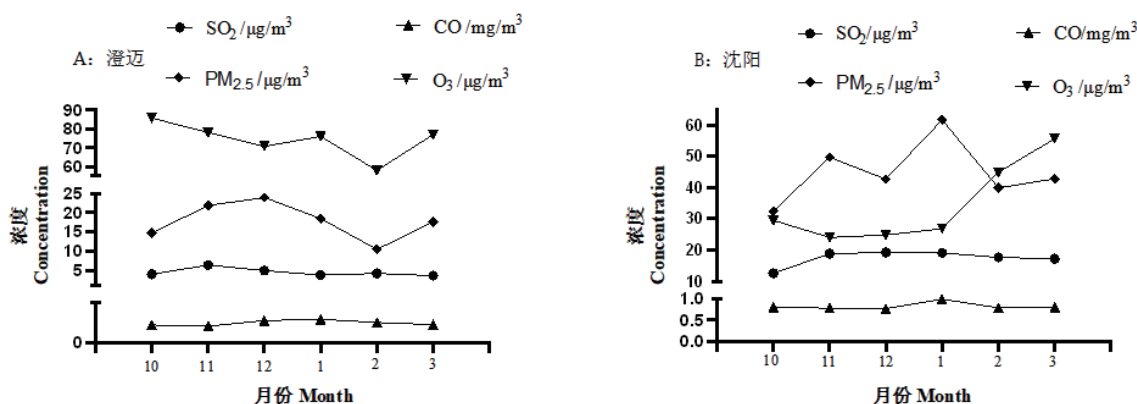


图2 两城市公园空气污染物的变化趋势

Fig. 2 Trends in air pollutants in the two urban parks

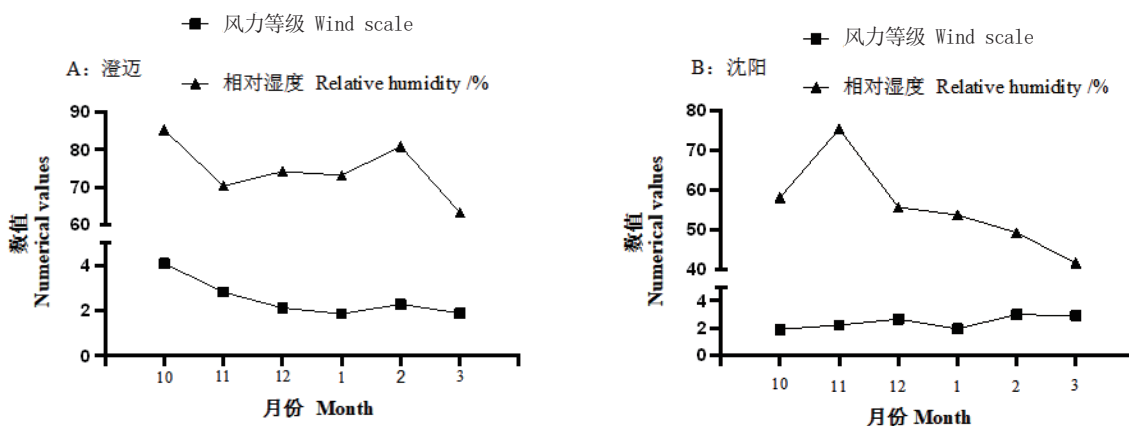


图3 两城市公园气象因素的变化趋势

Fig. 3 Trends in meteorological factors in the two urban parks

表 2 澄迈和沈阳城市公园 NAI_s 浓度与环境因素的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between concentrations of NAI_s and environmental factors in urban parks in Chengmai and Shenyang

变量 Variables	相关系数 (r) Pearson correlation	
	澄迈 Chengmai	沈阳 Shenyang
SO ₂	0.194 [*]	0.084
CO	-0.392 ^{**}	0.028
O ₃	0.045	0.104
PM _{2.5}	-0.137	0.036
风力等级 Wind scale	0.395 ^{**}	-0.159
相对湿度 Relative humidity	0.056	0.118

注：“*”表示 $P<0.05$ ，“**”表示 $P<0.01$ 。
Note: “*” indicates $P<0.05$, “**” indicates $P<0.01$.

2.3.2 澄迈和沈阳城市公园 NAI_s 浓度影响因素的多重线性回归分析 以 NAI_s 浓度作为因变量，环境因素作为自变量进行多重线性回归分析，结果显示澄迈多重回归方程 R^2 值为 0.399，而沈阳多重回归方程 R^2 值为 0.090。澄迈城市公园 NAI_s 浓度主要受 CO、风力等级及相对湿度的影响，与 CO 呈负相关，与风力等级及相对湿度呈正相关，即随着 CO 浓度的升高 NAI_s 浓度降低，随着风力等级和相对湿度的增加 NAI_s 浓度升高；沈阳城市公园 NAI_s 浓度主要受 O₃ 和相对湿度影响，与其呈正相关，即随着 O₃ 和相对湿度的升高 NAI_s 浓度升高，见表 3。

3 结论与讨论

随纬度变化我国区域气候差异大，呈现北方地区降水少、气温低，南方地区降水多、气温高的特征，使得南北方不同城市公园的 NAI_s 浓度影响因素也不尽相同。研究报道南方城市公园 NAI_s 浓度主要受相对湿度、风力等级、降水量、日光辐射和地表温度等影响，气温与森林 NAI_s 浓度之间的相关性相对较弱^[24-25]，而北方城市公园 NAI_s 浓度主要受 O₃、TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、日光辐射等影响^[26-27]，我们通过对海南澄迈和辽宁沈阳城市公园 NAI_s 影响因素的对比分析，结果发现澄迈城市公园 NAI_s 浓度显著优于沈阳，澄迈城市公园 NAI_s 浓度主要受 CO、风力等级及相对湿度的影响，沈阳城市公园 NAI_s 浓度主要受 O₃ 和相对湿度影响。

研究报道 NAI_s 浓度与相对湿度呈正相关^[28]，认为高相对湿度有利于空气的电离作用，故相对湿度愈大、NAI_s 浓度愈高；另有研究报道，NAI_s 浓度与相对湿度呈负相关^[29-30]，认为相对湿度较高时，NAI_s 浓度反而低，主要原因为相对湿度较高时，大气电离作用减小，从而导致减少 NAI_s 的产生。我们在澄迈红树湾湿地公园的调查结果发现该公园的 NAI_s 浓度与相对湿度呈正相关，这与较多关于南方森林公园 NAI_s 影响因素的研究结论相一致^[31-33]。彭琳玉^[34]等人对九连山国家森林公园的气象要素及森林资源结构对森林中 NAI_s

表 3 澄迈和沈阳城市公园 NAI_s 浓度的多重线性回归分析
Table 3 Multiple linear regression analysis of NAI_s concentrations in urban parks in Chengmai and Shenyang

变量 Variables	澄迈 Chengmai			沈阳 Shenyang		
	β	SE	P	β	SE	P
SO ₂	1.623	12.707	0.899	3.056	2.974	0.306
CO	-640.058	218.573	0.004 ^{**}	-0.116	48.035	0.998
O ₃	1.112	0.865	0.201	2.115	0.871	0.017 [*]
PM _{2.5}	-2.450	2.549	0.339	-0.452	0.536	0.401
风力等级 Wind scale	139.565	27.707	<0.001 ^{**}	-14.613	9.124	0.112
相对湿度 Relative humidity	7.092	2.401	0.004 ^{**}	1.755	0.825	0.036 [*]

注：“*”表示 $P<0.05$ ，“**”表示 $P<0.01$ 。
Note: “*” indicates $P<0.05$, “**” indicates $P<0.01$.

浓度的影响程度进行研究,结果显示原始阔叶林的 NAI_s 浓度基本与湿度呈正相关;马荣^[35]等人以午潮山国家森林公园内不同林分类型为研究对象,探讨森林 NAI_s 浓度的变化规律,结果表明整个秋季不同海拔的常绿阔叶林空气 NAI_s 浓度与湿度呈正相关。NAI_s 浓度与相对湿度呈正相关主要原因可能是水诱导的勒纳德效应促进了 NAI_s 的产生^[36],同时水分子与植物叶片光合作用产生的氧气具有较强的亲水性^[37]。我们的研究结果发现沈阳城市公园 NAI_s 浓度仅与 O₃ 浓度呈正相关,考虑可能与季节有关,这与许多在北方国家公园开展的 NAI_s 浓度影响因素的调查结果一致,同样发现冬季 NAI_s 浓度与 O₃ 浓度呈正相关^[38-39]。

赵艳佩^[40]通过对 NAI_s 浓度和 O₃ 浓度的研究,发现1到5月份,NAI_s 浓度和 O₃ 浓度存在着非常明显的正相关,相关系数达到了 0.265。此外,还证实了 O₃ 浓度与其他污染物的浓度都呈现出非常明显的负相关,而 NAI_s 浓度与其他污染物的含量也呈现出了明显的负相关,这也从侧面证明了 O₃ 浓度与 NAI_s 浓度存在着一定的正向相关性。曹建新^[41]等人的研究表明,在一年中,NAI_s 浓度与 O₃ 浓度之间存在着极强的正相关关系,其相关系数为 0.217。NAI_s 浓度和 O₃ 浓度呈正相关,这是由于在大气离子化形成 NAI_s 时,氧原子被释放出来,与大气中的氧结合形成 O₃。

高浓度 NAI_s 能调节机体的呼吸系统、循环系统,促进新陈代谢,调节内分泌,降低血压、缓解抑郁和精神焦虑等^[42]。空气 NAI_s 的来源广泛,影响因素众多,作用机制复杂,空气中的其他物质,如紫外辐射、风等均有可能对其产生影响,因此,在今后的研究中,应全面考虑其影响因素,并采用通径分析等方法深入探讨其产生机制^[16]。总体来说,我们的研究发现澄迈 NAI_s 含量显著优于沈阳,达到非常清新标准,另外澄迈的空气污染物和气象因素也均优于沈阳,相对湿度和风力等级是影响其空气 NAI_s 浓度的主要环境因素,而并未发现显著影响沈阳 NAI_s 浓度的环境因素。

参考文献

[1] 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.

- [2] 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.
- [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]. J.Aerosol Sci,2006,37(10):1347-1355.
- [4] LUTS A, PARTS T. Evolution of negative small air ions at two different temperatures[J].J.Atmos.Sol. Terr. Phys,2002,64(7):763-774.
- [5] 单晟烨,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.
- [6] 李正泉,郑健,胡晓,等.负氧离子浓度等级预测[J].林业与环境科学,2021,37(5):84-90.
- [7] 方砚秋,张方敏,陈龙,等.江西省空气负离子浓度特征与气象因子相关分析[J].气象科学,2022,42(2):254-260.
- [8] 贾倍思,刘思贝,吴隽洋,等.空气质量与住区形态特征的相关性研究简介[J].西部人居环境学刊,2020,35(6):1-9.
- [9] 彭巍,李明文,王慧,等.空气负离子国内外研究进展及其在森林康养方面的积极作用综述[J].温带林业研究,2020,3(3):11-14,54.
- [10] 施光耀,桑玉强,张劲松,等.自然状态下栓皮栎人工林空气负离子浓度与相对湿度的关系[J].中国农业气象, 2021,42(1):24-33.
- [11] 卫淑芸,刘文霞,吴明作,等.河南省不同生境空气负离子空间变化特征[J].城市环境与城市生态,2016,29(3):31-36,41.
- [12] 马晶昊,董子舟,杨云芸,等.长沙市负氧离子浓度变化特征与气象因子相关初探[J].安徽农业科学,2014,42(28):9872-9874.
- [13] 韩阳,周秀梅,陈超萍,等.木香薷群落负离子及PM_{2.5}浓度的时空变化及其影响因素[J].北方园艺,2020(11):83-90.
- [14] 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.
- [15] 陈步峰,肖以华,王莘仪,等.广州帽峰山林区空气负离子和气象因素全年时尺度变化及关系[J].生态环境学报,2020,29(11):2240-2250.
- [16] 高郾,卢杰,李江荣.林芝市主城区空气负离子特征及影响因素研究[J].高原农业,2019,3(3):323-331.
- [17] 刘秀萍,李新宇,赵松婷,等.北京市广阳谷城市森林公园康养环境监测评价[J].北京农学院学报,2022,37(3):79-87.
- [18] 姚益平,郁珍艳,李正泉,等.浙江省空气负离子浓度分布特征[J].气象科技,2019,47(6):1006-1013.
- [19] 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.
- [20] 尚媛媛,王红波,陶勇,等.赤水市大气负氧离子的时

- 空特征及其与气象因子的关系[J].中低纬山地气象,2018,42(4):43-48.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 林锦冰,李晓桃,陈浩,等.揭西县负氧离子浓度特征及与气象条件的关系[J].广东气象,2021,43(4):40-44.
- [24] 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.
- [25] 胡文杰,崔鸿侠,唐万鹏,等.神农架国家公园典型林分空气负离子浓度特征及其影响因素[J].林业科技通讯,2022(3):23-27.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 林喜珀,黄钰辉,陈永聚,等.鹅凰嶂自然保护区空气负离子时空分布及其与环境因子的关系[J].林业与环境科学,2016,32(3):14-18.
- [29] 程昊.银川市典型城市森林生态保健功能评价[D].银川:宁夏大学,2022.
- [30] 胡梦玲,庆涛,朱鑫君,等.江宁区负氧离子变化特征及其与气象因素关系[J].环境科学与技术,2021,44(S2):32-40.
- [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.
- [32] 陈绮锴,陆晓婧,邓嘉丽,等.南宁市典型森林公园空气负氧离子特征及影响因素研究[J].林业与环境科学,2022,38(3):128-134.
- [33] 关昶翔,许新宇,林双毅,等.福州国家森林公园空气负氧离子浓度变化特征与影响因素[J].中国城市林业,2022,20(6):79-84.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [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.
- [38] 李媛,鲁绍伟,李少宁,等.北京城市森林空气负离子与臭氧特征及相互作用[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(3):53-61.
- [39] 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.
- [40] 赵艳佩.上海市环境空气负离子分布规律及其与影响因素的关联性研究[D].上海:上海师范大学,2014.
- [41] 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.
- [42] 连人豪,钱银兰,张华,等.石门国家森林公园不同杉木群落类型空气负离子浓度变化特征[J].林业与环境科学,2022,38(3):140-147.