

DOI: 10.20103/j.stxb.202408091881

朱舒欣,王锐锋,王琦雅,李伟蝶,雷霆,崔国发.基于通径分析的新疆山地森林空气负离子浓度影响因子研究.生态学报,2025,45(8):4022-4035.
Zhu S X, Wang R F, Wang Q Y, Li W D, Lei T, Cui G F. The influencing factors of negative air ion concentration in Xinjiang mountainous forest based on path analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 4022-4035.

基于通径分析的新疆山地森林空气负离子浓度影响因子研究

朱舒欣,王锐锋,王琦雅,李伟蝶,雷 霆,崔国发*

北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083

摘要:林型影响着森林群落生成空气负离子的效率,然而影响不同林型空气负离子浓度(NAIC)的关键驱动因子尚未清楚。研究选取了新疆山地森林中 4 种主要林型:针阔混交林、常绿针叶林、落叶针叶林和落叶阔叶林,并设置无林地作为对照组,监测了空气负离子浓度以及空气含氧量、空气细菌含量、PM_{2.5}浓度、PM₁₀浓度、光照强度、紫外线辐射强度、温度、相对湿度、风速和气压等 10 个环境因子,最后采用通径分析明确了不同林型 NAIC 的关键驱动因子。结果显示:(1)不同林型的 NAIC 差异显著,其中针阔混交林((3072±385)个/cm³)>常绿针叶林>落叶针叶林>落叶阔叶林>无林地。(2)在针阔混交林中,相对湿度是 NAIC 的主要决策变量,紫外线辐射强度对 NAIC 的直接正效应最大,PM_{2.5}浓度通过相对湿度对 NAIC 的间接负向作用最显著。(3)在常绿针叶林中,相对湿度是影响 NAIC 最关键的环境因子,气压对 NAIC 的直接正效应最大,紫外线辐射强度对 NAIC 的间接正效应最大,温度通过相对湿度对 NAIC 的间接负作用也最为显著。(4)在落叶针叶林中,紫外线辐射强度是 NAIC 的关键驱动因子,空气细菌含量对 NAIC 的直接负向作用最大,而相对湿度对 NAIC 的间接正效应也最为显著。(5)在落叶阔叶林中,光照强度是 NAIC 的主要决策变量,PM_{2.5}浓度对 NAIC 的直接负效应最大,相对湿度对 NAIC 起到最显著的间接促进作用。(6)在无林地中,NAIC 主要受 PM_{2.5}浓度控制,气压是影响 NAIC 最直接的正向因素,PM₁₀浓度对 NAIC 的间接负效应最大,且相对湿度间接促进了 NAIC。因此,不同林型 NAIC 的影响因子既有共性又有差异性,其中相对湿度对不同林型的 NAIC 均存在着显著影响。利用通径分析,研究阐明了环境因子对 NAIC 的作用路径和综合决定作用,为揭示不同林型 NAIC 的关键驱动因子提供理论基础。

关键词:空气负离子浓度;林型;环境因子;通径分析;新疆

The influencing factors of negative air ion concentration in Xinjiang mountainous forest based on path analysis

ZHU Shuxin, WANG Ruifeng, WANG Qiya, LI Weidie, LEI Ting, CUI Guofa *

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Stand types affect the efficiency of negative air ions generation within forest communities. However, the key driving factors of negative air ion concentration (NAIC) in different stand types remain unclear. This study selected four primary stand types within Xinjiang's mountainous forest: coniferous and broad-leaved mixed forest, evergreen coniferous forest, deciduous coniferous forest, deciduous broad-leaved forest, with non-forest land serving as the control group. NAIC and 10 environmental factors—including air oxygen content, airborne bacteria content, PM_{2.5} concentration, PM₁₀ concentration, light intensity, ultraviolet radiation intensity, temperature, relative humidity, wind speed, and air pressure—were monitored. Finally, the key driving factors of NAIC in different stand types were identified by path analysis. The results

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目——自然保护地体系总体布局与区域协调发展路径(2021xjkk1206)

收稿日期:2024-08-09; **网络出版日期:**2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fa6716@163.com

revealed that (1) Significant differences in NAIC were observed across stand types, with coniferous and broad-leaved mixed forest ((3072 ± 385) ions/cm³) having the highest NAIC, followed by evergreen coniferous forest, deciduous coniferous forest, deciduous broad-leaved forest, and non-forest land. (2) In the coniferous and broad-leaved mixed forest, relative humidity was identified as the primary determinant of NAIC, with ultraviolet radiation intensity exerting strongest direct positive influence on NAIC, and the indirect negative effect of PM_{2.5} concentration on NAIC through relative humidity was notably significant. (3) In the evergreen coniferous forest, relative humidity served as the paramount environmental factor influencing NAIC. Air pressure had the most pronounced direct positive impact on NAIC, while ultraviolet radiation intensity contributed the largest indirect positive effect. Furthermore, temperature's indirect negative influence on NAIC, mediated through relative humidity, was also remarkable. (4) In the deciduous coniferous forest, ultraviolet radiation intensity was the key driving factor of NAIC. Moreover, the direct negative influence of airborne bacteria content on NAIC was the most prominent, while the indirect positive effect of relative humidity on NAIC was equally significant. (5) In the deciduous broad-leaved forest, light intensity was identified as the primary determinant of NAIC. PM_{2.5} concentration had the most substantial direct negative impact on NAIC, while relative humidity displayed the most prominent indirect promoting effect on it. (6) In non-forest land, NAIC was predominantly controlled by PM_{2.5} concentration. Air pressure stood out as the most direct positive factor affecting NAIC, while PM₁₀ concentration had the largest indirect negative effect, and the relative humidity indirectly promoted NAIC. Therefore, the influencing factors of NAIC across various stand types exhibit both commonalities and differences, with relative humidity having a significant influence on NAIC across diverse stand types. Through path analysis, this study elucidates the action pathways and the comprehensive determining effects of environmental factors on NAIC, providing a theoretical foundation for identifying the key driving factors of NAIC in different stand types.

Key Words: negative air ion concentration; stand type; environmental factor; path analysis; Xinjiang

空气负离子是指带负电荷的单个气体分子和轻离子团的总称^[1]。近年来,在国家林业与草原局发布的关于森林康养领域的相关标准中,多次强调了空气负离子是森林康养资源的重要组成部分,明确指出在森林康养基地规划建设和质量评价中,必须考虑空气负离子浓度(NAIC)这一关键因子^[2]。森林群落为空气负离子的生成提供了有利条件,植物在光合作用过程中形成的光电效应以及尖端放电等现象促进了空气负离子的产生^[3]。森林的林型、立地条件、群落结构和冠层密度等林分特征对 NAIC 存在显著影响^[1,4-5]。此外,NAIC 受周围众多环境因子的共同制约。以往对 NAIC 影响因子的探讨,主要聚焦于温度、相对湿度、风速、气压等气象因子,以及 PM_{2.5}浓度和 PM₁₀浓度等空气质量因子^[4,6-7]。然而,对于其他关键环境因子如空气含氧量、空气细菌含量、光照强度和紫外线辐射强度等的研究还较为缺乏,对于在不同林型中环境因子对 NAIC 的作用路径和关键驱动力更是罕见报道。

目前,针对 NAIC 与环境因子的关系研究,广泛采用 Pearson 相关性分析和多元线性回归分析等传统方法^[2,8-9],但这些方法难以量化评价多个环境因子对 NAIC 的综合影响。此外,环境因子之间的共线性问题进一步复杂化了研究结果,增加其不确定性。以往研究未能充分考虑环境因子间的共线性以及它们与 NAIC 之间的复杂非线性关系,对于 NAIC 与环境因子的相互作用缺乏深入理解^[10]。与其他方法相比,通径分析在探究 NAIC 与环境因子复杂关系方面具有显著优势。通径分析是研究因变量与多个自变量之间线性关系的多元统计分析方法,通过计算直接作用系数和间接作用系数,直观展示各自变量对因变量的作用路径和影响强度^[11],从而克服了传统方法在量化综合影响方面的局限性。此外,通径分析还能通过计算决策系数,对环境因子的综合影响进行排序,识别出影响 NAIC 的关键驱动因子^[12]。

新疆作为中国西北地区主要的天然林区,在天山和阿尔泰山上分布着丰富且优质的森林资源^[13]。因此,本研究在新疆山地森林中选取了 4 种主要林型并设置无林地作为对象,筛选了 10 个关键环境因子,基于通径分析对新疆山地不同林型的 NAIC 进行影响因子研究。本研究的科学问题如下:(1)明确林型对 NAIC 的影

响;(2)探究环境因子对不同林型 NAIC 的作用路径;(3)找出不同林型 NAIC 的关键驱动因子(主要决策变量)。这不仅为空气负离子领域的理论研究增添了新的视角,为今后新疆山地森林旅游资源的科学开发与规划奠定了理论基础,还对新疆森林康养基地的合理选址提供了科学依据,有助于优化资源配置,促进新疆森林康养产业的蓬勃发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处我国西北部(东经 $73^{\circ}40'$ — $96^{\circ}23'$,北纬 $34^{\circ}25'$ — $49^{\circ}10'$),总面积 166.49 万 km^2 ,属典型的温带大陆性气候,年平均气温为 9.72°C ,年平均降水量为 135.31 mm ^[14]。新疆作为中国西北干旱半干旱区主要的天然林区,森林广布在天山和阿尔泰山^[13]。其中天山林区森林分布带的年降水量为 400—800 mm,主要土壤类型为山地灰褐色森林土^[15–16],地带性植被为天山云杉 *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*,在低海拔或较高海拔林区,伴随着天山云杉出现的还有少量阔叶树种;阿尔泰山林区森林分布带的年降水量为 300—700 mm,主要土壤类型为山地灰色森林土^[16–17],地带性植被为寒温带针叶林,优势树种有新疆落叶松 *Larix sibirica*、新疆云杉 *Picea obovata*、新疆冷杉 *Abies sibirica*、疣枝桦 *Betula pendula*、欧洲山杨 *Populus tremula*。新疆山地天然林的主要林型有常绿针叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林和针阔混交林^[18]。其中,常绿针叶林以天山云杉为优势树种,集中分布于天山南北坡中山带的阴坡、半阴坡和河谷地带^[18];落叶针叶林以新疆落叶松为优势树种,主要分布于阿尔泰山和哈密东天山迎着湿润气流的中山带和亚高山带下部、以及部分河谷地带^[19];落叶阔叶林在新疆的分布范围较广,从北端的阿尔泰山前山到南面的昆仑山山麓,从山地到平原均有分布,在天山和阿尔泰山,落叶阔叶林主要分布于中低山河谷地带和前山带的河谷阶地和山坡下部^[18–19],常见树种有天山桦 *Betula tianschanica*、天山花楸 *Sorbus tianschanica*、密叶杨 *Populus talassica*、榆树 *Ulmus pumila* 等;而针阔混交林主要分布在天山和阿尔泰山针叶林和阔叶林的过渡地带。

1.2 样地设置

本研究在天山和阿尔泰山选取了以上 4 种主要林型:针阔混交林、常绿针叶林、落叶针叶林和落叶阔叶林,并设置无林地作为对照组,对新疆山地森林不同林型 NAIC 的影响因子进行分析。其中,在天山选取了 3 处自然保护地的森林环境作为研究样地,包括:天山天池国家级风景名胜区(以下简称天山天池)、乌苏佛山国家级森林公园(以下简称乌苏佛山)和西天山国家级自然保护区(以下简称西天山);在阿尔泰山同样选取了 3 处自然保护地的森林环境作为研究样地,包括:白哈巴国家级森林公园(以下简称白哈巴)、哈纳斯国家级自然保护区(以下简称哈纳斯)和贾登峪国家级森林公园(以下简称贾登峪)。每种林型均选择 3 个样地,样地概况详见表 1。

1.3 空气负离子与环境因子测量

在 2022 年 7—8 月和 2023 年 6—8 月期间,对上述 6 处新疆自然保护地样地的不同林型(表 1)进行连续 6 d 监测,且每个样地的不同林型内均设置了 3 个样点。测量指标除空气负离子浓度外,还包括空气含氧量、空气细菌含量、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度、光照强度、紫外线辐射强度、温度、相对湿度、风速和气压等 10 个环境因子。这 11 项指标的测量工作在同一时段内同步进行,单次测量流程耗时 15—20 min,试验团队由 3—4 人组成,含 2—3 名测量员和 1 名记录员。试验均在白天(10:00—19:00)大气条件比较稳定,天气晴朗或多云的时间段进行,上述 11 项指标测量所使用的仪器(表 2)在试验前均经过校准,采样高度为距地面 1.5 m 处,与成人呼吸高度基本一致^[20]。

空气负离子浓度通过 YT—FY1 型便携式空气负离子检测仪测定,每个样点按照东、南、西、北 4 个方位依次记录一组数据,经 3 次校准归零与重复测量后,取 12 个数据的平均值确定。空气含氧量采用 TD400-SH- O_2 型便携式氧气检测仪重复测定 3 次,取其平均值确定。空气细菌含量采用 YT-QW6 型六级筛孔撞击式空气微生物采样器和 YT-ATP 型 ATP 荧光检测仪进行测定。空气微生物采样器的采样流量为 28.3 L/min ,捕获率

表 1 不同林型的样地概况

Table 1 The overview of sample plots in different stand types

林型 Stand types	样地 Sample plots	主要乔木层 Dominant tree species	海拔/m Altitude	郁闭度 Canopy density	试验时间(年-月) Test time(Year-Month)
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	白哈巴	新疆落叶松+疣枝桦	1390—1430	0.6—0.8	2022-07
	乌苏佛山	天山云杉+天山花楸	1820—1840	0.5—0.6	2023-06
	西天山	天山云杉+密叶杨	1440—1460	0.5—0.7	2023-08
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	天山天池	天山云杉	1890—1910	0.7—0.8	2023-07
	乌苏佛山	天山云杉	2010—2040	0.6—0.8	2023-06
	西天山	天山云杉	1550—1580	0.6—0.8	2023-08
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	白哈巴	新疆落叶松	1630—1660	0.7—0.8	2022-07
	贾登峪	新疆落叶松	1630—1650	0.6—0.7	2022-08
	哈纳斯	新疆落叶松	1620—1640	0.4—0.6	2023-07
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	天山天池	榆树	1050—1060	0.5—0.7	2023-07
	乌苏佛山	天山桦	1820—1860	0.6—0.7	2023-06
	西天山	密叶杨	1410—1430	0.5—0.7	2023-08
无林地 Non-forest land	天山天池	草地	1880—1900	0	2023-07
	乌苏佛山	草地	1800—1820	0	2023-06
	西天山	草地	1540—1560	0	2023-08

≥98%,采样时间为 5 min/次,通过采样器将空气中细菌采集到圆形无菌培养皿(100 mm×100 mm)中。空气细菌采集结束后,将 ATP 荧光检测仪开机校准,并激活固体表面检测拭子,用无菌棉棒对培养皿表面擦拭采样,挤压拭子头 3 次,将含有荧光素酶的采样液全部挤入无菌棉棒中,并向下轻甩 5 次,立即将拭子插入 ATP 荧光检测仪中检测,等待 15 s 后读取数据,每个样点重复 3 次试验,取平均值得到空气细菌含量。PM_{2.5}浓度和 PM₁₀浓度由 DT-96 空气质量检测仪测定,各重复 3 次。光照强度和紫外线辐射强度分别由 TES-1339 照度计与 TM-213 紫外线强度检测仪测定,均重复 3 次。温度、相对湿度、风速和气压通过 Kestrel 5000 手持式气象仪测定,每项指标均重复 3 次试验。各指标的试验仪器信息见表 2。

表 2 试验仪器信息

Table 2 The test instrument information

指标 Indicators	简称 Code	仪器名称 Instrument name	测量范围 Measuring range	精度 Precision	型号 Version	生产厂家 Manufacturer
空气负离子浓度 Negative air ion concentration	NAIC	便携式空气负离子检测仪	0—1×10 ⁶ 个/cm ³	±5%	YT-FY1	中国山东云唐智能科技有限公司
空气含氧量 Air oxygen content	AOC	便携式氧气检测仪	0—30%	±1%	TD400-SH-O ₂	中国北京天地首和科技发展有限公司
空气细菌含量 Airborne bacteria content	ABC	空气微生物采样器+ATP 荧光检测仪	0—9.9×10 ⁵ RLUs	±5 RLUs	YT-QW6+ YT-ATP	中国山东云唐智能科技有限公司
PM _{2.5} 浓度 Particulate matter 2.5 concentration	PM _{2.5}	空气质量检测仪	0—2000 μg/m ³	±1%	DT-96	中国深圳市华盛昌科技实业股份有限公司
PM ₁₀ 浓度 Particulate matter 10 concentration	PM ₁₀	空气质量检测仪	0—2000 μg/m ³	±1%	DT-96	中国深圳市华盛昌科技实业股份有限公司
光照强度 Light intensity	LI	照度计	0—9.999×10 ⁵ lx	±3%	TES-1339	中国台湾泰仕电子工业股份有限公司
紫外线辐射强度 Ultraviolet radiation intensity	URI	紫外线强度检测仪	0.01—39.99 mW/cm ²	±3%	TM-213	中国台湾泰玛斯电子股份有限公司
温度 Temperature	T	手持式气象仪	-29—70 ℃	±0.5 ℃	Kestrel 5000	美国 Nielsen-Kellerman 公司
相对湿度 Relative humidity	RH	手持式气象仪	0—100%	±2%	Kestrel 5000	美国 Nielsen-Kellerman 公司
风速 Wind speed	WS	手持式气象仪	0—60 m/s	±3%	Kestrel 5000	美国 Nielsen-Kellerman 公司
气压 Air pressure	AP	手持式气象仪	300—1100 hPa	±1.5 hPa	Kestrel 5000	美国 Nielsen-Kellerman 公司

1.4 通径分析

1.4.1 通径系数

通径分析可以在相关性分析和多元回归分析的基础上,分析多个自变量与因变量之间的线性关系,计算各变量之间的相互作用系数,通过分析自变量对因变量的直接效应与经由其他变量传导的间接效应,揭示每一自变量对因变量贡献的具体路径与程度,明确了自变量对因变量的直接重要性和间接重要性^[21]。在通径分析中,自变量(x_i)与因变量(y)之间的直接通径系数(b_i)与多元回归方程中的标准化系数(β)一致,间接通径系数的计算方法见式(1)^[22]:

$$r_{ij}b_j = r_{ij} \times b_j \quad (1)$$

式中, $r_{ij}b_j$ 为 x_i 通过 x_j 对 y 的间接通径系数; r_{ij} 为 x_i 与 x_j 的简单相关系数; b_j 为 x_j 对 y 的直接通径系数。

1.4.2 决策系数

决策系数能够反映自变量对因变量的综合决定作用,通过比较各自变量的决策系数大小,并对它们进行排序,从而确定主要决策变量和主要限制性变量^[12],其计算公式为:

$$R_{(i)}^2 = 2b_i r_{iy} - b_i^2 \quad (2)$$

式中, $R_{(i)}^2$ 为 x_i 对 y 的决策系数; b_i 为 x_i 对 y 的直接通径系数; r_{iy} 为 x_i 与 y 的简单相关系数。

1.4.3 剩余通径系数

剩余通径系数(R_e)的大小可以反映模型的完整性和解释力。当 R_e 较小时,表明模型已经较为完善地解释了影响结果的主要因素,并且具有较强的解释力和预测能力;当 R_e 较大时,表明模型中可能遗漏了重要的变量,或者存在较大的误差项,需要进一步考虑和纳入更多变量以完善模型^[22]。剩余通径系数的计算方法见式(3):

$$R_e = \sqrt{1 - (r_{1y}b_1 + r_{2y}b_2 + \dots + r_{ny}b_n)} \quad (3)$$

1.5 数据处理与分析

运用 SPSS 27.0 软件在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,进行方差分析、多重比较和多元逐步回归分析,并使用 Origin 2024 软件来绘制相关性热图。利用 Excel 软件对上述公式(1)~(3)进行通径分析,计算通径系数、决策系数和剩余通径系数的结果。

2 结果与分析

2.1 不同林型空气负离子浓度与环境因子比较

不同林型的 NAIC(平均值 $\pm$ 标准差)表现出极显著差异($P<0.001$),针阔混交林最高((3072 $\pm$ 385)个/cm³),无林地最低,约为针阔混交林的 1/3 倍。不同林型的环境因子也呈现极显著差异($P<0.001$),其中落叶阔叶林的空气含氧量最高((21.02 $\pm$ 0.07)%),针阔混交林次之。针阔混交林的空气细菌含量((124 $\pm$ 20) RLU/78.5cm²)、PM_{2.5}浓度((2.88 $\pm$ 0.95) μ g/m³)和 PM₁₀浓度((5.63 $\pm$ 1.06) μ g/m³)在不同林型中均处于最低水平,约为其无林地的 1/4 倍。光照强度和紫外线辐射强度表现出一致的规律:针阔混交林<落叶阔叶林<常绿针叶林<落叶针叶林<无林地。无林地的光照强度((89164 $\pm$ 6870) lx)和紫外线辐射强度((4.98 $\pm$ 0.30) mW/cm²)分别为其他林型的 7—10 倍和 4—8 倍。无林地的温度((30.1 $\pm$ 3.3) $^{\circ}$ C)最高,比其他林型高 6—10 $^{\circ}$ C,落叶针叶林最低。而对相对湿度而言,针阔混交林最高((51.3 $\pm$ 8.7)%),无林地最低。相反,无林地的风速((2.1 $\pm$ 0.6) m/s)显著高于其他林型,约为其 3—4 倍。落叶阔叶林的气压最高((847.4 $\pm$ 28.3) hPa),常绿针叶林最低,见表 3。

2.2 不同林型空气负离子浓度与环境因子的相关性分析

通过 Pearson 相关系数来衡量 NAIC 和环境因子的简单相关关系。结果显示在针阔混交林、常绿针叶林和落叶针叶林中,NAIC 与空气含氧量、光照强度、紫外线辐射强度、相对湿度和气压呈正相关,与空气细菌含量、PM_{2.5}浓度、PM₁₀浓度和温度呈负相关。在落叶阔叶林中,NAIC 与空气含氧量、光照强度、紫外线辐射强度

和相对湿度呈正相关,与空气细菌含量、PM_{2.5}浓度、PM₁₀浓度和温度呈负相关。在无林地中,NAIC 与风速、气压和相对湿度呈正相关,与空气细菌含量、PM_{2.5}浓度、PM₁₀浓度和温度呈负相关,见图 1。

表 3 不同林型空气负离子浓度与环境因子(平均值±标准差)
Table 3 The negative air ion concentration and environmental factors in different stand types (Mean±SD)

指标 Indicators	单位 Units	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	无林地 Non-forest land
空气负离子浓度 Negative air ion concentration	个/cm ³	3072±385a	2918±608a	2654±244b	2044±331c	1133±349d
空气含氧量 Air oxygen content	%	20.99±0.06a	20.95±0.06b	20.93±0.03b	21.02±0.07a	20.90±0.01c
空气细菌含量 Airborne bacteria content	RLU/78.5cm ²	124±20d	153±22c	168±23c	218±38b	493±32a
PM _{2.5} 浓度 Particulate matter 2.5 concentration	μg/m ³	2.88±0.95e	3.88±1.09d	4.58±0.59c	7.43±1.35b	11.88±1.65a
PM ₁₀ 浓度 Particulate matter 10 concentration	μg/m ³	5.63±1.06e	6.67±0.94d	8.20±0.96c	12.90±1.90b	23.94±2.39a
光照强度 Light intensity	lx	8238±1049c	12063±1985b	12975±2675b	9477±1431c	89164±6870a
紫外线辐射强度 Ultraviolet radiation intensity	mW/cm ²	0.66±0.23d	1.16±0.26b	1.25±0.35b	0.87±0.18c	4.98±0.30a
温度 Temperature	℃	21.3±1.1c	21.7±3.8c	20.3±1.4c	24.1±3.8b	30.1±3.3a
相对湿度 Relative humidity	%	51.3±8.7a	46.7±6.6b	44.6±5.1b	39.0±5.1c	32.6±8.7d
风速 Wind speed	m/s	0.7±0.2 bc	0.5±0.2c	0.8±0.4b	0.7±0.2 bc	2.1±0.6a
气压 Air pressure	hPa	837.7±20.5 ab	811.7±19.4c	831.5±1.3b	847.4±28.3a	819.8±14.7c

不同小写字母代表不同林分间差异显著($P<0.05$)

2.3 不同林型空气负离子浓度与环境因子的多元逐步回归分析

由图 1 可知,不同林型的环境因子之间有较强的相关性,相互影响较大,简单的 Pearson 相关系数不能准确地表达各环境因子对 NAIC 的影响。因此,将 NAIC 作为因变量,10 个环境因子作为自变量,进行多元逐步回归分析,通过 F 检验及 t 检验,去除 $P<0.05$ 水平上显著性差异的变量。结果表明(表 4),针阔混交林的 NAIC 主要受相对湿度、紫外线辐射强度和 PM_{2.5}浓度影响,这 3 个环境因子解释了 78.3%的因变量变异;常绿针叶林的 NAIC 主要受相对湿度、气压、温度和紫外线辐射强度影响,这 4 个环境因子解释了 95.8%的因变量变异;落叶针叶林的 NAIC 主要受紫外线辐射强度、空气细菌含量和相对湿度影响,这 3 个环境因子解释了 84.0%的因变量变异;落叶阔叶林的 NAIC 主要受光照强度、PM_{2.5}浓度和相对湿度影响,这 3 个环境因子解释了 78.1%的因变量变异;无林地的 NAIC 主要受 PM_{2.5}浓度、气压、相对湿度和 PM₁₀浓度影响,这 4 个环境因子解释了 92.5%的因变量变异。由此可见,相对湿度对不同林型的 NAIC 均存在不同程度的影响。

2.4 不同林型空气负离子浓度与环境因子的通径分析

通过上述分析得出不同林型 NAIC 与环境因子的简单相关系数(图 1)和直接通径系数即标准化系数(表 4),根据公式(1)计算间接通径系数。结果表明(表 5),在针阔混交林中,紫外线辐射强度对 NAIC 的直接正效应最大,PM_{2.5}浓度对 NAIC 的直接负效应最大;同时,相对湿度通过影响 PM_{2.5}浓度对 NAIC 的间接正效应最大(0.260),而 PM_{2.5}浓度受相对湿度影响对 NAIC 的间接负效应最大(-0.250),说明随着相对湿度升高,降低了 PM_{2.5}浓度,间接促进了 NAIC 的增大。在常绿针叶林中,气压对 NAIC 的直接正效应最大,而温度对 NAIC 的直接负效应最大;此外,紫外线辐射强度的直接通径系数最小,但其通过相对湿度、气压和温度对 NAIC 的间接通径系数总和最大(0.536),说明该因素对 NAIC 的间接正效应更显著。在落叶针叶林中,紫外线辐射强度对 NAIC 的直接正效应最大,而空气细菌含量对 NAIC 的直接负效应最大,且空气细菌含量受紫外线辐射强度的影响对 NAIC 的间接负效应最大(-0.307)。在落叶阔叶林中,光照强度对 NAIC 的直接正效应

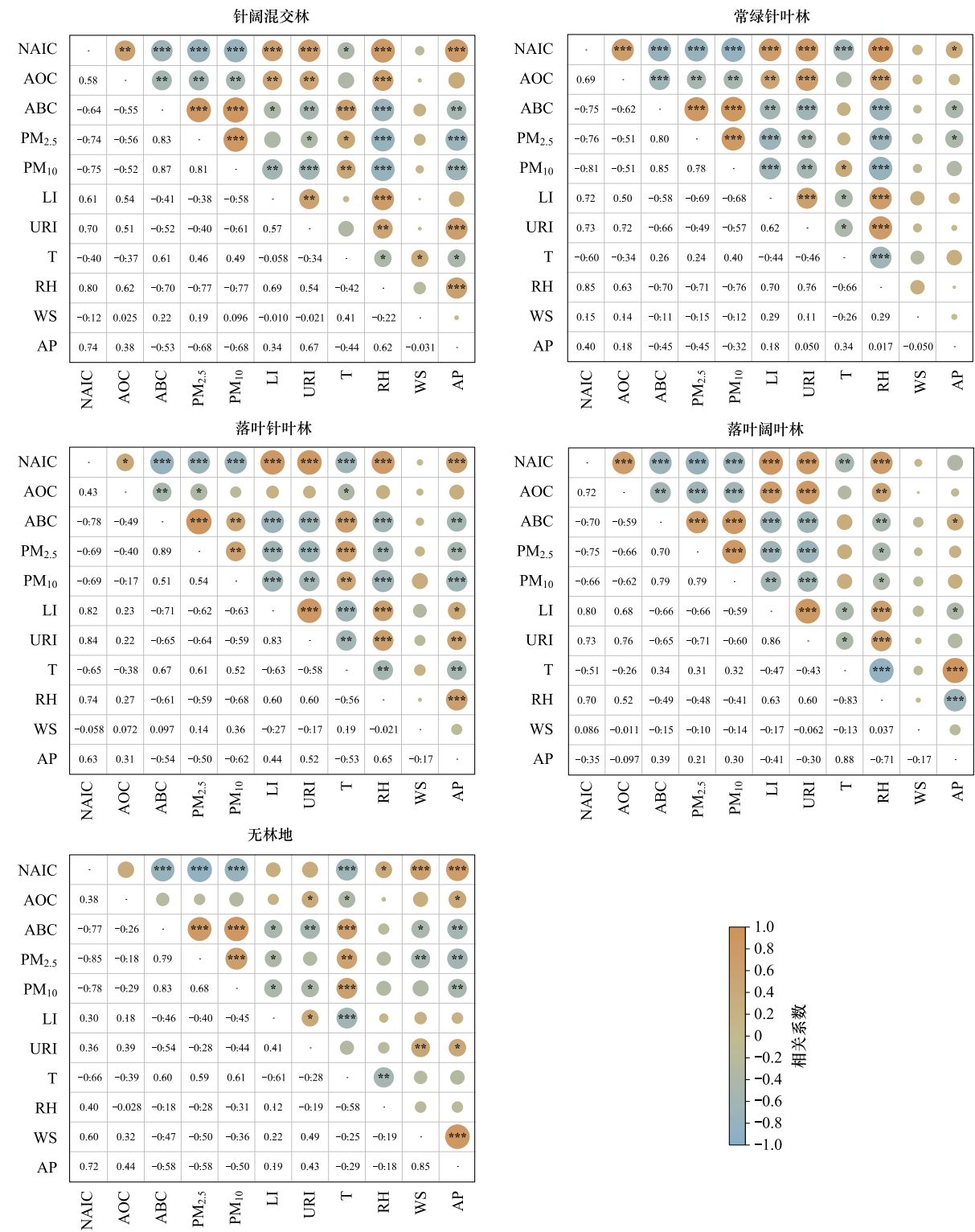


Fig.1 Correlation analysis between negative air ion concentration and environmental factors in different stand types

空气负离子浓度 Negative air ion concentration;空气含氧量 Air oxygen content;空气细菌含量 Airborne bacteria content;光照强度 Light intensity; 紫外线辐射强度 Ultraviolet radiation intensity;温度 Temperature;相对湿度 Relative humidity;风速 Wind speed;气压 Air pressure

最大,而 PM_{2.5}浓度对 NAIC 的直接负效应最大,相对湿度的直接正效应最小,但其通过光照强度和 PM_{2.5}浓度对 NAIC 的间接正效应最大(0.419),说明相对湿度对 NAIC 的间接效应比直接效应更显著。在无林地中,气

压对 NAIC 的直接正效应最大,而 $PM_{2.5}$ 浓度对 NAIC 的直接负效应最大, PM_{10} 浓度通过 $PM_{2.5}$ 浓度、气压和相对湿度对 NAIC 的间接负效应最大。

表 4 不同林型空气负离子浓度与环境因子的多元逐步回归分析

Table 4 Multiple stepwise regression analysis of negative air ion concentration and environmental factors in different stand types

林型 Stand types	模型 Model	非标准化系数 <i>B</i>	标准误差 <i>SE</i>	标准化系数 β	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	1	常量	1271.664	277.008		4.591	0.000
		RH	35.073	5.323	0.797	6.589	0.000
	2	常量	1308.035	239.858		5.453	0.000
		RH	26.013	5.468	0.591	4.757	0.000
		URI	644.802	210.028	0.381	3.070	0.005
	3	常量	2292.938	499.473		4.591	0.000
		RH	14.290	7.354	0.325	1.943	0.064
		URI	660.834	195.098	0.391	3.387	0.003
		$PM_{2.5}$	-136.931	62.160	-0.338	-2.203	0.038
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	1	常量	-769.416	460.502		-1.671	0.107
		RH	78.909	9.763	0.850	8.083	0.000
	2	常量	-10581.348	1876.569		-5.639	0.000
		RH	78.327	6.760	0.844	11.586	0.000
		AP	12.122	2.285	0.387	5.306	0.000
	3	常量	-11581.877	1314.653		-8.810	0.000
		RH	54.059	6.617	0.583	8.170	0.000
		AP	16.418	1.786	0.524	9.191	0.000
		T	-62.205	11.977	-0.393	-5.194	0.000
	4	常量	-11305.689	1146.750		-9.859	0.000
		RH	39.433	7.644	0.425	5.158	0.000
		AP	16.331	1.553	0.521	10.515	0.000
		T	-64.348	10.438	-0.407	-6.165	0.000
		URI	452.345	155.727	0.196	2.905	0.008
	1	常量	1926.583	98.374		19.584	0.000
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest		URI	583.809	76.102	0.838	7.671	0.000
	2	常量	2889.210	293.721		9.837	0.000
		URI	395.281	84.316	0.567	4.688	0.000
		ABC	-4.336	1.270	-0.413	-3.414	0.002
	3	常量	2209.660	389.561		5.672	0.000
		URI	329.199	81.746	0.472	4.027	0.001
		ABC	-3.249	1.245	-0.310	-2.610	0.016
		RH	12.993	5.402	0.270	2.405	0.025
	1	常量	280.935	262.874		1.069	0.295
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest		LI	0.186	0.027	0.805	6.781	0.000
	2	常量	1565.908	517.092		3.028	0.006
		LI	0.126	0.033	0.545	3.868	0.001
		$PM_{2.5}$	-96.196	34.548	-0.392	-2.784	0.010
	3	常量	1145.583	515.167		2.224	0.036
		LI	0.090	0.034	0.390	2.642	0.015
		$PM_{2.5}$	-88.512	32.204	-0.361	-2.748	0.011
		RH	17.980	8.087	0.280	2.223	0.036
	1	常量	3277.979	265.977		12.324	0.000
无林地 Non-forest land		$PM_{2.5}$	-180.592	22.190	-0.852	-8.138	0.000
	2	常量	-3798.404	2350.444		-1.616	0.119

续表

林型 Stand types	模型 Model	非标准化系数 <i>B</i>	标准误差 <i>SE</i>	标准化系数 β	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²
	PM _{2.5}	-138.996	23.672	-0.656	-5.872	0.000	0.904
	AP	8.029	2.654	0.338	3.025	0.006	
	常量	-8553.079	1931.335		-4.429	0.000	
	PM _{2.5}	-93.652	19.199	-0.442	-4.878	0.000	
	AP	12.584	2.103	0.530	5.983	0.000	
	RH	14.801	3.000	0.370	4.933	0.000	0.925
	常量	-6855.626	1878.079		-3.650	0.001	
	PM _{2.5}	-74.079	19.097	-0.350	-3.879	0.001	
	AP	11.197	1.984	0.471	5.643	0.000	
	RH	12.795	2.834	0.320	4.515	0.000	
	PM ₁₀	-30.408	12.321	-0.208	-2.468	0.022	

由于直接途径系数和间接途径系数的排序并不完全一致(表 5),难以综合反映自变量对因变量的决定作用,而决策系数可以明确各环境因子对 NAIC 的综合作用大小,因此根据公式(2)计算决策系数。结果显示(表 5),在针阔混交林中,各环境因子对 NAIC 的综合作用排序为:相对湿度>紫外线辐射强度>PM_{2.5}浓度,说明 NAIC 的增强,主要受相对湿度的控制;在常绿针叶林中,4 个环境因子对 NAIC 的综合作用排序为:相对湿度>温度>紫外线辐射强度>气压,说明 NAIC 的变化主要取决于相对湿度;在落叶针叶林中,各环境因子对 NAIC 的综合作用排序为:紫外线辐射强度>空气细菌含量>相对湿度,表明 NAIC 的主导因子为紫外线辐射强度;在落叶阔叶林中,各环境因子对 NAIC 的综合作用排序为:光照强度>PM_{2.5}浓度>相对湿度,表明影响 NAIC 的环境因子主要是光照强度;在无林地中,4 个环境因子对 NAIC 的综合作用排序为:PM_{2.5}浓度>气压>PM₁₀浓度>相对湿度,说明 PM_{2.5}浓度是影响无林地 NAIC 的主要决策变量。

由公式(3)计算的剩余途径系数可知(表 5),针阔混交林为 0.465,常绿针叶林为 0.208,落叶针叶林为 0.402,落叶阔叶林为 0.470,无林地为 0.270。这表明不同林型途径分析模型的解释力和预测能力均较强,其中常绿针叶林和无林地的途径分析模型较为完善地解释了影响空气负离子浓度的主要因素,而针阔混交林、落叶针叶林和落叶阔叶林的路径分析模型可能遗漏了重要的变量,还存在一些影响较大的环境因素没有纳入研究。

3 讨论

3.1 林型对空气负离子浓度的影响

林型对 NAIC 有着显著影响。结果显示 4 种森林群落的 NAIC 均显著高于无林地,约为其 2—3 倍,与绝大多数学者的研究发现一致^[20,23—24]。这与森林群落较高的森林覆盖率和植物多样性密切相关,研究表明 NAIC 随着森林覆盖率和植物多样性的上升而增强^[4,25—26]。较高覆盖率和树种丰富的森林植物群落通过光合和蒸腾作用,释放大量氧气,同时产生大量水汽,且森林具有较强的滞尘作用,这些共同促进了空气负离子的产生、累积和维持,使得森林群落 NAIC 远超无林地。在森林群落中,针阔混交林的 NAIC 最高,这与大多数学者的研究结论一致^[4,27—28]。这可能与针阔混交林的树种多样性密切相关,丰富的树种多样性对森林内 NAIC 具有显著的正向作用^[4]。研究表明,在由阔叶物种、针叶物种或两者组合的混交群落中,空气负离子存在相互作用效应,且表现为正效应^[29]。此外,结果显示针叶林的 NAIC 高于阔叶林,常绿林的 NAIC 高于落叶林。这可能与针叶林的叶尖呈针状,曲率半径较小,具有“尖端放电”的效果有关。研究发现,空气负离子主要由叶尖产生,叶尖为电子的释放提供了更多的通道^[30],随着电子在叶尖处集聚浓度的增高,空气负离子的释放能力也增强^[31],且叶尖数与空气负离子的释放能力成正比^[24,32]。由于针叶林的叶尖数远高于阔叶林,

表 5 不同林型环境因子对空气负离子浓度的通径系数和决策系数
Table 5 Path coefficient and decision coefficient of environmental factors on negative air ion concentration in different stand types

林型 Stand types	自变量 Independent variables	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数		间接通径系数 Indirect path coefficient							决策系数 Decision coefficient	剩余通径系数 Residual path coefficient	
			Direct path coefficient		RH	URI	PM _{2.5}	AP	T	ABC	LI			PM ₁₀
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	RH	0.80	0.325			0.211	0.260					0.471	0.414	0.465
	URI	0.70	0.391		0.176		0.135					0.311	0.395	
	PM _{2.5}	-0.74	-0.338		-0.250	-0.156						-0.407	0.386	
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	RH	0.85	0.425			0.149		0.009	0.269			0.426	0.542	0.208
	AP	0.40	0.521		0.007	0.010			-0.138			-0.121	0.145	
	T	-0.60	-0.407		-0.281	-0.090		0.177				-0.194	0.323	
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	URI	0.73	0.196		0.323			0.026	0.187			0.536	0.248	
	URI	0.84	0.472		0.162					0.202		0.364	0.570	0.402
	ABC	-0.78	-0.310		-0.165	-0.307						-0.472	0.388	
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	RH	0.74	0.270			0.283				0.189		0.472	0.327	
	LI	0.80	0.390		0.176		0.238					0.415	0.472	0.470
	PM _{2.5}	-0.75	-0.361		-0.134						-0.257	-0.392	0.411	
无林地 Non-forest land	RH	0.70	0.280				0.173				0.246	0.419	0.314	
	PM _{2.5}	-0.85	-0.350		-0.090			-0.273				-0.141	-0.504	0.270
	AP	0.72	0.471		-0.058		0.203					0.104	0.249	0.456
	RH	0.40	0.320				0.098	-0.085				0.064	0.078	0.154
	PM ₁₀	-0.78	-0.208		-0.099		-0.238	-0.236				-0.573	0.281	

因此其通过尖端放电产生空气负离子的能力也比阔叶林更强。部分学者在研究中同样发现了常绿林的 NAIC 高于落叶林^[33-34]。这可能是由于常绿树种的叶绿素含量比落叶树种相对较高^[35-38],其植物光合作用较强,森林中释放的氧气增加,进而形成更多的空气负离子^[2,4,39]。也有部分学者持相反观点,他们认为落叶树种释放空气负离子的能力优于常绿树种^[24,40]。相较于常绿树种,落叶树种对弱光的利用能力、体内电子传递及光能转换效率更为显著,能促成更多空气负离子的生成^[24]。

3.2 环境因子对不同林型空气负离子浓度的影响

结果显示在针阔混交林和落叶针叶林中,紫外线辐射强度对 NAIC 的直接正向作用最显著。这是由于植物的光电效应是空气负离子的重要来源之一^[26,41-42],短波紫外线辐射在叶片表面产生的光电效应可使植物的生物电势增加,促进了空气分子的电离,从而增加了 NAIC^[43]。此外,结果显示在针阔混交林和落叶阔叶林中,PM_{2.5}浓度对 NAIC 起显著的直接负效应,这与大多数的研究结论一致^[10,27,44],主要跟 PM_{2.5}的吸附作用与中和作用有关。由于 PM_{2.5}表面积大且吸附能力强,空气负离子容易被其表面吸附,导致空气中自由存在的负离子数量减少;此外带有正电荷的 PM_{2.5}易与空气负离子碰撞发生中和反应,形成中性粒子,从而降低了 NAIC^[45]。同时,结果显示 PM_{2.5}浓度受相对湿度影响对 NAIC 的间接负向作用最大。这可能是由于针阔混交林较高的相对湿度加速了 PM_{2.5}的湿沉降,空气中的水蒸气容易凝结在 PM_{2.5}上并通过重力作用沉降到地面,降低了空气中的 PM_{2.5}浓度^[46-47],从而提升了 NAIC。此外,结果显示相对湿度是针阔混交林和常绿针叶林 NAIC 的主要决策变量,这也与绝大多数的研究结论一致^[10,41,44]。空气负离子是由带有多余电荷的分子与一定量的水分子相结合的产物。由于针阔混交林和常绿针叶林的相对湿度较高(表 3),空气中水分子含量的增加会形成大量的 OH⁻,而 OH⁻与空气中的水分子相结合易形成空气负离子如 OH⁻(H₂O)_n、O₂⁻(H₂O)_n、H₃O₂⁻(H₂O)_n和 CO₃(H₂O)_n等^[8-10]。此外,当相对湿度较高时,增强了空气中微粒的凝聚效应,促使微小颗粒相互凝固成较大的颗粒并加速其沉降,进而有效减少了 NAIC 的损耗和延长其存续时长^[48]。

结果显示在常绿针叶林和无林地中,气压是影响 NAIC 最直接的正向因素。这与部分学者的观点一致^[49-52],他们认为气压与 NAIC 呈正相关关系。当气压升高时,分子之间的距离减小,分子间相互摩擦加剧促进了空气分子的电解,能产生更多的 NAIC。此外,气压更多地受到海拔条件的直接影响^[53],结合不同林型的样地概况(表 1)来看,常绿针叶林和无林地的海拔较高,气压在不同林分中最低。研究发现海拔对 NAIC 有显著影响,在山地森林中,海拔不仅可以直接影响气压和温度等气象因子,还可以间接影响植被物种分布和植物冠层形态,进一步对山地森林的太阳辐射和微气候产生影响,进而影响 NAIC^[1,54]。同时,结果显示温度对常绿针叶林 NAIC 产生最大的直接负效应,且温度通过相对湿度对 NAIC 的间接负作用也最大。这也与常绿阔叶林的海拔密切相关,随着海拔的升高,温度逐渐降低,减少了空气中的水分蒸发,使得空气中的相对湿度增大,增加了 OH⁻与水分子结合的机会,从而提升了森林群落的 NAIC。

结果显示在落叶针叶林中,空气细菌含量对 NAIC 存在显著的直接负向影响,这与大多数研究发现一致^[55-57]。这是因为空气中带有正电荷的细菌易与携带负电荷的空气负离子相结合,正、负离子碰撞形成中性分子,从而降低了 NAIC。同时,结果显示空气细菌含量通过紫外线辐射强度和相对湿度对 NAIC 的间接负效应也最为显著。研究发现空气细菌含量与紫外线辐射和相对湿度均呈负相关^[58-60]。这是因为短波紫外线能有效穿透并破坏细菌的 DNA 结构,导致细菌失去活性,从而降低空气中的细菌浓度;较高的相对湿度能够有效抑制灰尘的扬起,且促进空气颗粒物的沉降,降低了细菌依附于气溶胶传播的风险,进而减少了细菌进入大气^[60]。此外,结果表明影响落叶针叶林和落叶阔叶林 NAIC 的关键驱动因子分别是紫外线辐射强度和光照强度,均起到正向作用。紫外线辐射和光照的强度与太阳辐射强度密切相关,反映了森林内部光环境的质量状况。太阳辐射作为植被光合作用的驱动力,是影响植被光合作用和 NAIC 的关键因素。它不仅直接为空气中的电离反应供给能量,促进空气负离子的自然生成,还通过增强植被的光合作用能力,促使植被释放更多氧气,从而间接地提高了 NAIC^[3]。由光电效应产生的空气负离子主要是由紫外线的激发作用所促成的。短波紫外线可以直接促进空气电离的发生,直接促进空气负离子的生成,同时在紫外线作用下的 O₃氧分离过程,

是空气负离子形成的主要驱动力^[7]。落叶针叶林的紫外线辐射强度在 4 种林型中最大(表 3),因此落叶针叶林的 NAIC 主要受到紫外线辐射的影响。落叶阔叶林的光照强度处于适中水平(表 3),而在一定范围内,光照强度对 NAIC 有着显著的正向影响^[61-62]。这可能与光照强度影响植物电信号有关,随着光照增强,植物电信号频率增大,光合速率迅速上升,NAIC 显著提高^[63]。

结果表明在无林地中,NAIC 主要受 $PM_{2.5}$ 浓度的控制,其直接负向作用最显著。这与部分学者的研究发现一致^[6,9]。同时, PM_{10} 浓度对 NAIC 的间接负效应也最大。森林降低 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度和增加 NAIC 的能力显著高于无林地,而森林减少空气颗粒物浓度和增加 NAIC 的能力在很大程度上取决于植物群落的物种和结构特征^[64]。由于无林地仅由草本层构成,缺乏冠层的有效密度、灌木物种的多样性以及乔木树种的遮蔽作用,极大削弱了其在减少空气颗粒物方面的能力,导致无林地的 $PM_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度显著高于森林群落。因此影响无林地 NAIC 最关键的环境因子为 $PM_{2.5}$ 浓度,空气负离子容易附着在带正电荷粒子的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等颗粒物上,发生电荷中和形成大分子沉淀物,最终降低了环境中的 NAIC^[3]。

4 结论

本研究针对提出的三个科学问题得出以下结论:(1)林型显著影响着 NAIC,其中针阔混交林>常绿针叶林>落叶针叶林>落叶阔叶林>无林地,且森林群落的 NAIC 约为无林地的 2—3 倍。(2)紫外线辐射强度对针阔混交林和落叶针叶林 NAIC 的直接正效应最大,光照强度对落叶阔叶林 NAIC 的直接正效应最大,气压对常绿针叶林和无林地 NAIC 的直接正效应最大; $PM_{2.5}$ 浓度对针阔混交林和落叶阔叶林 NAIC 的直接和间接负效应均最大,温度对常绿针叶林 NAIC 的直接和间接负效应均最大,空气细菌含量对落叶针叶林 NAIC 的直接和间接负效应均最大,对无林地的 NAIC 而言, $PM_{2.5}$ 浓度的直接负效应最大, PM_{10} 浓度的间接负效应最大。(3)相对湿度是影响针阔混交林和常绿针叶林 NAIC 的主要决策变量,紫外线辐射强度和光照强度分别是影响落叶针叶林和落叶阔叶林 NAIC 的主要决策变量,而 $PM_{2.5}$ 浓度是影响无林地 NAIC 的主要决策变量。此外,由于本研究缺乏长期且连续的数据监测,尚未能全面揭示 NAIC 与环境因子随时间变化的动态关系,今后的研究需优化试验设计,建立长期监测体系,扩大试验数据量,进而增强科学性依据。

参考文献(References):

- [1] Chen Q, Wang R, Zhang X P, Liu J J, Wang D X. Effects of different site conditions on the concentration of negative air ions in mountain forest based on an orthogonal experimental study. *Sustainability*, 2021, 13(21): 12012.
- [2] 朱舒欣,何茜,苏艳,崔国发,李吉跃. 不同地理空间城市森林空气负离子浓度及其影响因素研究. *北京林业大学学报*, 2023, 45(11): 66-77.
- [3] 蔡露露,王聪慧,张劲松,孟平,施光耀. 基于结构方程模型的森林生态系统空气负离子的影响机制分析. *生态学报*, 2024, 44(4): 1662-1670.
- [4] Li A B, Li Q L, Yang Y H, Hu Y T, Xiao S H, Li Z C, Zhou B Z. Stand structure and environment jointly determine negative air ion concentrations in forests: evidence from concurrent on-site monitoring in four typical subtropical forests during the growing season. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 220: 105684.
- [5] Zhang J B, Rong Y M, Yin Q F, Zhang P, Zhao L R, Chen C L. Spatiotemporal variation and influencing factors of TSP and anions in coastal atmosphere of Zhanjiang City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(4): 2030.
- [6] Li A B, Li Q L, Zhou B Z, Ge X G, Cao Y H. Temporal dynamics of negative air ion concentration and its relationship with environmental factors: results from long-term on-site monitoring. *Science of the Total Environment*, 2022, 832: 155057.
- [7] Wang H, Wang B, Niu X, Song Q F, Li M W, Luo Y Y, Liang L D, Du P F, Peng W. Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at different spatio-temporal scales. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01008.
- [8] Li C S, Xie Z Y, Chen B, Kuang K J, Xu D W, Liu J F, He Z S. Different time scale distribution of negative air ions concentrations in mount Wuyi National Park. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(9): 5037.
- [9] Shi G Y, Zhou Y, Sang Y Q, Huang H, Zhang J S, Meng P, Cai L L. Modeling the response of negative air ions to environmental factors using multiple linear regression and random forest. *Ecological Informatics*, 2021, 66: 101464.

- [10] Miao S, Zhang X Y, Han Y J, Sun W, Liu C J, Yin S. Random forest algorithm for the relationship between negative air ions and environmental factors in an urban park. *Atmosphere*, 2018, 9(12): 463.
- [11] Güneri Ö İ, Göktaş A, Kayalı U. Path analysis and determining the distribution of indirect effects via simulation. *Journal of Applied Statistics*, 2017, 44(7): 1181-1210.
- [12] 袁志发, 周静芋, 郭满才, 雷雪芹, 解小莉. 决策系数——通径分析中的决策指标. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 29(5): 131-133.
- [13] 陈峰, 尚华明, 袁玉江. 新疆东部雪岭云杉和胡杨树轮记录的干湿变化对比分析. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(1): 34-40.
- [14] Wang Y, Shataer R, Zhang Z C, Zhen H, Xia T T. Evaluation and analysis of influencing factors of ecosystem service value change in Xinjiang under different land use types. *Water*, 2022, 14(9): 1424.
- [15] Li L P, Wang X P, Stefan Z, Zhang L Y, Fang J Y. Altitudinal patterns of stand structure and herb layer diversity of *Picea schrenkiana* forests in the central Tianshan Mountains, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(4): 254-260.
- [16] 杨承栋. 论合理保护开发利用中国森林土壤资源. *世界林业研究*, 2011, 24(1): 19-27.
- [17] Cao Q M, Wei Y, Li W J, Feng Y, Abduraimov O S. The distribution characteristics of vegetation in the subrange of the Altai Mountains, Xinjiang. *Plants*, 2023, 12(22): 3915.
- [18] 陈治中, 咎梅, 杨雪峰, 董煜. 新疆森林植被碳储量预测研究. *生态环境学报*, 2023, 32(2): 226-234.
- [19] 石雷. 近 25 年来新疆森林的动态变化. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 17-24.
- [20] Zhu S X, Hu F F, He S Y, Qiu Q, Su Y, He Q, Li J Y. Comprehensive evaluation of healthcare benefits of different forest types: a case study in Shimen national forest park, China. *Forests*, 2021, 12(2): 207.
- [21] 李江荣, 高郅, 陈康, 卢杰, 郑维列, 樊志颖. 藏东南急尖长苞冷杉林空气负离子浓度特征及其与气象因子的关系. *东北林业大学学报*, 2021, 49(10): 77-82, 103.
- [22] Zhu S X, Li J Y, He Q, Qiu Q, Su Y, Lei T, Cui G F. Temporal dynamics and influencing mechanism of air oxygen content in different vegetation types. *Forests*, 2024, 15(3): 432.
- [23] 刘洋, 段文标. 莲花湖库区水源涵养林负离子含量研究. *森林工程*, 2009, 25(1): 8-12, 20.
- [24] 李爱博, 周本智, 李春友, 叶明, 杨振亚, 赵雄伟, 童甫, 曹永慧, 赵亚敏. 基于控制实验的 6 个典型亚热带树种空气负离子效应. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 120-128.
- [25] 韩明臣, 叶兵, 张德成. 北宫森林公园空气负离子浓度变化规律及其生态价值估算. *西部林业科学*, 2013, 42(1): 32-37.
- [26] Cui Y, Zhao Y X, Zhang N, Zhang D Y, Yang J N. An inversion model for estimating the negative air ion concentration using MODIS images of the Daxing'anling region. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0242554.
- [27] Yun J Y, Yao W F, Wang X Y, Chen F, Wang S. Daily dynamics of forest air negative ion concentration in spring and the relationship of influencing factors: results of field monitoring. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2024, 17(3): 501-511.
- [28] 邓成, 张守攻, 陆元昌. 森林改善空气环境质量功能监测与评价研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 84-89.
- [29] 李爱博, 周本智, 李春友, 羊美娟, 汤丽萍, 王利仙. 树种配置和叶元素含量的空气负离子浓度效应. *林业科学*, 2022, 58(5): 65-74.
- [30] Tikhonov V P, Tsvetkov V D, Litvinova E G, Sirota T V, Kondrashova M N. Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, 51(3): 414-419.
- [31] 杨运经, 岗岗, 张社奇. 脉冲电场介导的植物空气负离子发射的倍增效应及其意义. *大学物理*, 2009, 28(12): 39-42.
- [32] 张万超, 郑俊鸣, 丁旭玲, 彭东辉, 吴仁焯, 邓传远, 郑金贵. 3 种仙人掌科植物负离子释放量与释放通道的相关性研究. *热带作物学报*, 2016, 37(7): 1298-1305.
- [33] 马荣, 王志高, 黄玉洁, 朱锦茹, 詹小豪, 江波. 午潮山国家森林公园秋季空气负离子浓度及影响因素. *森林与环境学报*, 2021, 41(1): 26-34.
- [34] 鲍风宇, 秦永胜, 李荣桓, 周金星, 杨军. 北京市 5 种典型城市绿化植物的生态保健功能分析. *中国农学通报*, 2013, 29(22): 26-35.
- [35] 石钰琛, 王金牛, 吴宁, 石凝, 王丽华, 孙建, 张林, 陈文凯, 吴彦, 何家莉. 不同功能型园林植物枝叶性状的差异与关联. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(5): 1109-1119.
- [36] 税伟, 郭平平, 朱栗锋, 冯洁, 孙祥, 李慧. 云南喀斯特退化天坑木本植物功能性状变异特征及适应策略. *地理科学*, 2022, 42(7): 1295-1306.
- [37] Li Y, Liu C C, Zhang J H, Yang H, Xu L, Wang Q F, Sack L, Wu X Q, Hou J H, He N P. Variation in leaf chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: association with gross primary productivity. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 383-389.
- [38] 吴新辉, 郭钰滢, 夏楠, 唐杨, 郭泓伯, 王洋, 杜恩在. 中国东部城市森林阔叶树种叶绿素含量空间特征及其影响因素. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(6): 910-916.
- [39] 李爱博, 赵雄伟, 李春友, 周本智, 杨振亚, 周佩佩, 赵亚敏. 基于控制试验的植株数量及空气温湿度与负离子的关系. *应用生态学报*, 2019,

30(7): 2211-2217.

- [40] 王铁浩,刘访兵,周小舟,刘茜,李彬. 重庆地区主要森林类型的空气负离子水平及其评价. 东北林业大学学报,2014,42(6): 38-42.
- [41] Zhang Y J, Hu Y S, Liu Y Q, Guo H X, Xue F, Wang Y N, Hou S Y, Liu J L. Relative humidity dominances in negative air ion concentration: insights from one-year measurements of urban forests and natural forests. *Forests*, 2024, 15(2): 295.
- [42] Ling D. Review on research of the negative air ion concentration distribution and its correlation with meteorological elements in mountain tourist area. *Earth Sciences*, 2019, 8(1): 60.
- [43] Liang H, Chen X S, Yin J G, Da L J. The spatial-temporal pattern and influencing factors of negative air ions in urban forests, Shanghai, China. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 847-856.
- [44] Luo L H, Sun W, Han Y J, Zhang W W, Liu C J, Yin S. Importance evaluation based on random forest algorithms: insights into the relationship between negative air ions variability and environmental factors in urban green spaces. *Atmosphere*, 2020, 11(7): 706.
- [45] 郑诗禹,张绿水,郭晓敏,黄子峻,肖以华. 不同森林郁闭度环境内空气负氧离子的时空变化及环境影响要素研究——以广州帽峰山为例. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2204-2212.
- [46] Cheng B W, Ma Y X, Feng F L, Zhang Y F, Shen J H, Wang H, Guo Y T, Cheng Y F. Influence of weather and air pollution on concentration change of PM_{2.5} using a generalized additive model and gradient boosting machine. *Atmospheric Environment*, 2021, 255: 118437.
- [47] 李焕,苏慧,张婷,赵竹子,王璐瑶. 基于机器学习的汾渭平原 PM_{2.5} 和 O₃ 变化特征及影响因素. 环境化学, 2024, 43(5): 1585-1598.
- [48] 唐堇洙,王梦楠,胡希军,罗紫薇,吴家荣. 上杭城区空气负离子浓度时空分布及影响因素. 湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(5): 124-135.
- [49] Wang Y F, Ni Z B, Wu D, Fan C, Lu J Q, Xia B C. Factors influencing the concentration of negative air ions during the year in forests and urban green spaces of the Dapeng Peninsula in Shenzhen, China. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(6): 2537-2547.
- [50] 彭琳玉,许方岳,王立夫,郑琪,叶清,张祖福,卜文圣,陈伏生,幸娇萍. 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. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 233-239.
- [51] 王非,李冰,周蕴薇. 城市森林公园空气负离子浓度与气象因子的相关性. 东北林业大学学报, 2016, 44(2): 18-20, 38.
- [52] 陈梓茹,杨小可,傅伟聪,朱志鹏,董建文,俞晨圣,王敏华. 龙岩国家森林公园冬季负离子浓度变化特征. 江西农业大学学报, 2016, 38(6): 1119-1126.
- [53] Zhong L S, Yu H, Zeng Y X. Impact of climate change on Tibet tourism based on tourism climate index. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(12): 2085-2100.
- [54] Wang R, Chen Q, Wang D X. Effects of altitude, plant communities, and canopies on the thermal comfort, negative air ions, and airborne particles of mountain forests in summer. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3882.
- [55] 刘畅,赵家豪,叶钰倩,关庆伟. 石灰岩山地 4 种林分空气细菌动态变化及其影响因素分析. 安徽农业大学学报, 2020, 47(2): 211-218.
- [56] 董帅伟,吴琳杰,余洁,张志铭,赵勇,贾长荣. 太行山地区典型森林类型空气细菌含量变化研究. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 62-68.
- [57] 郭二果,王成,郅光发,蔡煜. 城市森林生态保健功能表征因子之间的关系. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2893-2903.
- [58] Stone W, Kroukamp O, Korber D R, McKelvie J, Wolfaardt G M. Microbes at surface-air interfaces: The metabolic harnessing of relative humidity, surface hygroscopicity, and oligotrophy for resilience. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1563.
- [59] Zhai Y B, Li X, Wang T F, Wang B, Li C T, Zeng G M. A review on airborne microorganisms in particulate matters: Composition, characteristics and influence factors. *Environment International*, 2018, 113: 74-90.
- [60] Zhen Q, Deng Y, Wang Y Q, Wang X K, Zhang H X, Sun X, Ouyang Z Y. Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 703-712.
- [61] Wu R Y, Zheng J G, Sun Y F, Wang Q S, Deng C Y, Ye D P. Research on generation of negative air ions by plants and stomatal characteristics under pulsed electrical field stimulation. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017, 19(5): 1235-1245.
- [62] Wang J, Li S H. Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2746-2754.
- [63] 施光耀,桑玉强,张劲松,蔡露露,张家兴,孟平,薛攀,乔永胜. 不同光照强度下植物电信号变化特征及其与空气负离子的关系. 应用生态学报, 2022, 33(2): 439-447.
- [64] Niu X, Li Y, Li M N, Zhang T, Meng H, Zhang Z, Wang B, Zhang W K. Understanding vegetation structures in green spaces to regulate atmospheric particulate matter and negative air ions. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13(9): 101534.