

DOI: 10.20103/j.stxb.202211143291

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影响机制分析. 生态学报, 2024, 44(4): 1662-1670.

Cai L L, Wang C H, Zhang J S, Meng P, Shi G Y. The influence mechanism of negative air ion in forest ecosystem based on structural equation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1662-1670.

基于结构方程模型的森林生态系统空气负离子影响机制分析

蔡露露^{1,2}, 王聪慧^{1,3}, 张劲松⁴, 孟平⁴, 施光耀^{1,3,*}

1 宁夏大学生态环境学院/西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 平罗县乡村振兴服务中心, 石嘴山 753400

3 宁夏银川城市森林生态系统国家定位观测研究站, 银川 750021

4 中国林业科学研究院林业研究所/黄河小浪底国家森林公园生态系统定位站, 北京 100091

摘要: 空气负离子 (Negative air ion, NAI) 是衡量空气质量的重要指标之一, 受到植被和环境的共同影响。然而, 森林生态系统作为 NAI 产生的重要来源, 森林中的植被和环境之间的相互作用以及对 NAI 的影响机制和贡献潜力仍难以捉摸。以暖温带森林生态系统中广泛分布的栓皮栎 (*Quercus variabilis* BL.) 为对象, 基于自动观测设备长期定位观测获取了气象、土壤性质、空气洁净度以及植被光合等数据, 利用皮尔逊相关系数分析和偏最小二乘结构方程模型分析了森林植被和环境要素对 NAI 的影响机制和贡献潜力。结果表明, 环境要素和植被光合对 NAI 的贡献差异显著, 植被光合对 NAI 的贡献潜力为 62.65%, 环境要素对 NAI 的贡献率为 37.35%。环境要素中太阳辐射和饱和水汽压差的影响程度最大, 分别为 68.94% 和 16.55%。植被光合和 PM_{2.5} 主要通过直接效应影响 NAI, 而光合有效辐射、紫外辐射、土壤温湿度和饱和水汽压差主要通过间接效应影响 NAI。因此, 利用结构方程模型可以阐明植被光合与环境要素的变化对 NAI 的影响趋势, 从而全面揭示了森林生态系统中植被产生 NAI 的作用机制以及环境对 NAI 的影响趋势, 并为评估森林生态系统对 NAI 的贡献潜力提供理论基础。

关键词: 空气负离子; 结构方程; 光合作用; 气象要素; 日光诱导叶绿素荧光

The influence mechanism of negative air ion in forest ecosystem based on structural equation

CAI Lulu^{1,2}, WANG Conghui^{1,3}, ZHANG Jinsong⁴, MENG Ping⁴, SHI Guangyao^{1,3,*}

1 School of Ecology and Environment, Ningxia University/ Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China

2 Rural Revitalization Service Center in Pingluo, Shizuishan 753400, China

3 Ningxia Yinchuan Urban Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Yinchuan 750021, China

4 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/ Xiaolangdi National Forest Ecosystem Research Station on the Middle Yellow River, Beijing 100091, China

Abstract: Negative air ion (NAI) is an important index for measuring air quality and is affected by vegetation and the environment in the forest. However, forest ecosystems are an essential source of NAI, and we know little about how the interactions are between forest vegetation and the environment, and its effects on NAI. In this paper, we selected *Quercus variabilis* as research subjects in warm temperate forest ecosystems and obtained meteorology, soil properties, air cleanliness, and vegetation photosynthesis data based on long-term positioning of automatic observation equipment. Finally,

基金项目: 宁夏自然科学基金 (2023AAC03142); 宁夏高等学校自然科学基金优秀青年项目 (NYG2022006)

收稿日期: 2022-11-11; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiguangyao01@163.com

we analyzed the influence mechanism and contribution potential of forest vegetation and environmental elements on NAI using Pearson correlation analysis and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). The results showed that the contribution of the environment elements and vegetation photosynthesis to NAI were significantly different, the contribution potential of vegetation photosynthesis was 62.65%, and the environment elements were 37.35%. The contribution of solar radiation and vapor pressure deficit (VPD) was the highest among the environment elements, with 68.94% and 16.55% contribution rates. Vegetation photosynthesis and $PM_{2.5}$ mainly affected NAI through direct effects, while photosynthetically active radiation, ultraviolet radiation, soil temperature, humidity, and VPD mainly affected NAI through indirect effects. Therefore, the structural equation model can be used to clarify the impact of vegetation and environment on NAI in the forest. This study can improve a comprehensively understanding of the influence mechanism of the environment elements and vegetation photosynthesis on NAI in forest ecosystems, and provide a theoretical basis for assessing the contribution potential of forest ecosystems to NAI.

Key Words: negative air ion; structural equation model; photosynthesis; meteorology; solar-induced chlorophyll fluorescence

空气负离子(Negative air ion, NAI)是指大气中自由电子与分子结合形成的带负电荷的轻离子团,广泛分布于森林和湿地等自然环境中^[1],是衡量一个地区空气清洁度的重要指标^[2]。NAI 结构特征与超氧化物自由基相似,能够破坏细胞病毒的电荷屏障和酶活性,具有较强地杀菌除尘、增强人体免疫力和辅助治疗多种疾病的功能,对人体的心理和生理机能具有重要的调节作用^[3],被誉为“空气维生素”^[4]。

NAI 受多种因素的共同制约,例如气候条件、大气质量和植被类型等,都会影响 NAI 的浓度^[5]。总的来说,自然界中 NAI 按照来源及影响作用可归纳为物理、生物两大类,物理作用主要是指闪电、雷暴、雪暴、火山爆发以及雨水的分解等环境因素引发的^[6];生物作用主要是指森林中树冠、枝叶的尖端放电以及植物光合作用过程等植被作用诱发产生的 NAI^[7]。物理作用对 NAI 的影响主要与森林环境的变化有关,涉及空气中 NAI 的扩散、电离及其与颗粒物的相互作用。目前,有关 NAI 与空气温湿度、风速、辐射、降雨量、气压以及 $PM_{2.5}$ 等关系的研究结论不一致,仅有小部分研究呈现出规律性,大范围内缺少统一、明确的定论,部分结论不一致甚至矛盾,且 NAI 的日变化表现出较大的波动性。因此,以往研究难以揭示环境要素对 NAI 的作用机理,使得物理作用对 NAI 的作用机制及影响程度等问题存在诸多不确定性。生物作用主要与植被光合过程有关,森林植被光合作用过程中的光电效应是 NAI 的重要来源和影响因素,一方面影响植物体内电子的转移和传递,另一方面促进森林植被的树冠、枝叶产生尖端放电效应,引发空气电离,促进 NAI 的产生^[8]。当前有关植被光合作用与 NAI 关系的研究大多停留在定性水平,仅能说明森林植被能够促进 NAI 的产生,但量化地研究植被与 NAI 的关系还相对较少^[9-10],这限制了对植被光合作用的实际过程对 NAI 影响程度及作用机理的了解。日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence; SIF)作为一种新兴的植被光合过程监测的技术被视为直接测量陆地植被光合作用信号的重要手段之一^[11]。SIF 对植被光合作用过程反应迅速,已被证明是植物光合过程的理想探针^[12],可以实现对植被光合能力的实时无损监测。与植被指数相比,SIF 具有更好的潜力和精度跟踪森林植被的光合过程^[13]。

森林生态系统中 NAI 受森林植被和环境要素的共同制约,其来源和影响因素存在不确定性。目前,有关 NAI 影响因素的研究主要侧重于传统的统计回归分析,用于检验独立变量和因变量之间的直接作用关系,可能忽略了间接作用的影响,导致其结果差异较大,这限制了微观尺度上植被产生 NAI 机理的研究,制约了宏观尺度上区域范围内森林生态系统对 NAI 贡献潜力和影响机制的研究^[14]。机器学习为量化植被光合和环境要素引起的 NAI 变化提供了另一种可靠的测算方法。结构方程模型(Structural equation model, SEM)作为机器学习中评估一个或多个自变量之间关系的多元过程模型,在考虑复杂概念测量误差的同时,建立了变量之间的关系,特别是因果关系,无论是连续或离散、一个或多个因变量均可以实现变量间直接因素或间接因素的

分析^[15]。

栓皮栎(*Quercus variabilis* BL.)是暖温带地区荒山造林和园林观赏的优良树种,具有抗逆性强、根系发达的特点,在防风固沙和调节小气候等方面具有较强的作用。本研究以该树种为对象,利用皮尔逊相关分析和偏最小二乘结构方程模型等方法,定量分析森林气象、土壤性质、空气洁净度以及植被对 NAI 的影响,确定森林植被和环境要素对 NAI 的影响机制和贡献潜力,旨在全面揭示了森林生态系统中植被产生 NAI 的作用机制以及环境对 NAI 的影响趋势,从而进一步精准评估森林植被对 NAI 的贡献潜力,促进森林康养旅游的发展,并为进一步丰富森林生态服务功能评估内容提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站(35°01'45"N, 112°28'08"E)进行,研究区位于河南省西部的黄土丘陵-南太行交错带,属于暖温带季风性气候,年平均气温 13.4 °C,年降雨量 641.7 mm,约 68%的降雨集中在 6—9 月。土壤成分以石灰岩风化母质淋溶性褐土和棕壤土为主,土壤结构不良,石砾含量大,春季易发生季节性干旱,夏季易受暴雨侵蚀,平均土壤深度为 50 cm, pH 值为 7.7—8.5^[16-17]。研究区以栓皮栎人工林为主,平均冠层高度 8.0 m,林分密度为 998 株/hm²,郁闭度为 0.75。

1.2 NAI 观测

空气负离子的观测采用 RR-9411A 型空气负离子自动监测仪(雨根,中国),NAI 测量范围 0—1.2×10⁷个/cm³,迁移率≥0.4 cm² V⁻¹ s⁻¹,测量精度≤±10%,观测位置为植被冠层,观测时间为 2020 年 6—9 月。

1.3 环境要素观测

环境要素主要观测了空气温湿度、风速、太阳辐射、土壤温湿度以及颗粒物浓度等 8 个要素,各要素传感器类型详见表 1。试验选取 2020 年的 6—9 月栓皮栎主要生长季定位观测获取的环境要素数据。由于饱和水汽压差(Vapour pressure deficit, VPD)表示空气的干燥程度,是表征空气温湿度的综合指标,相比于气温和相对湿度更具有代表性。因此,本研究利用 Smith 经验公式^[18]计算 VPD,用于研究空气湿润程度对 NAI 的影响,其计算式为:

$$VPD = 0.61078 \times (1 - RH) \times e^{\frac{17.27 \times Ta}{Ta + 237.3}} \quad (1)$$

式中, Ta 为气温(°C); RH 为空气相对湿度,取值(0,1),无量纲。

表 1 环境要素观测类型

Table 1 Observation types of environmental elements

变量 Variable	简称 Code	测量范围 Measuring range	精度 Precision	型号 Model	产地 Region
温度 Temperature ambient	Ta	-80—60°C	±0.12°C	HMP155	芬兰 Finland
相对湿度 Relative humidity	Rh	0—100%	±1PP	HMP155	芬兰 Finland
风速 Wind speed	Ws	0—60m/s	±2%	WindSonic	英国 Britain
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	PAR	400—700nm	±5%	LI-190SB	美国 USA
紫外辐射 Ultraviolet radiation	UV	210—380nm	±2%	TUVR	美国 USA
土壤湿度 Soil moisture	Ms	0—100%	±1PP	AV-EC5	美国 USA
土壤温度 Soil temperature	Ts	-45—65°C	±0.2°C	AV-10T	美国 USA
PM _{2.5} Particulate matter 2.5	PM _{2.5}	1—1000µg/m ³	±1%	RR-9421	中国 China

精度一列中 PP 为“百分点”

1.4 植被光合能力观测

植被光合能力的监测基于 AutoSIF-1 荧光观测设备(Ocean Optics, USA),可以实现植被光合能力的快速、无损监测^[19]。该观测设备包括 QE65Pro 光谱仪(Ocean Optics, USA)、恒温箱以及数据采集器。光谱仪光

谱范围 640—800 nm,光谱分辨率 0.31 nm,采样间隔 0.155 nm,信噪比 1000:1。设备安装在栓皮栎林冠上方 12 m 处,观测时间为 2020 年的 6—9 月。

观测期间,由于在清晨和傍晚时分会出现低光照水平,为了避免低太阳光照产生阴影的影响,在太阳天顶角(SZA) $>80^\circ$ 时采集的测量数据被排除在分析之外,因此仅使用当地时间 8:00 至 17:00 之间的数据。在数据处理和分析中,没有使用负值或值高于 $1\text{mw}/\text{m}^2/\text{nm}/\text{sr}$ 的原始 SIF 数据,此外对于测量值超出范围 $\mu \pm 3\sigma$ 的离群值也被排除在分析之外(μ 和 σ 分别是平均值和标准差)。

在本研究中应用了三维重建(Structure-From-Motion, SFM)方法获取 SIF 信号,该方法需要三个波段的光谱数据,包括一个吸收带和两个吸收带肩,其主要原理为在宽波段内 SIF 与光谱反射率呈线性变化,对多个波段进行最小二乘拟合,进而反演得到窗口内连续的 SIF 光谱曲线^[20]。

1.5 结构方程模型构建

结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)是基于变量协方差矩阵分析多变量数据之间关系的综合性数据统计与分析方法。本研究采用极大似然估计法对潜变量与潜变量之间、潜变量与显变量之间的关系进行定量分析,显变量通常指观测变量,潜变量通常指与其存在因果关系的某几个显变量的线性组合。为避免系统误差,确保样方的可比性,对输入数据进行正态性检验,剔除变量指标异常的样方数据,计算所有路径的路径系数,确定结构方程模型的相关参数^[21]。

1.6 数据处理与分析

数据处理采用 Python 软件进行分析,首先对数据进行质量控制,通过时间序列的筛选,判断和删除存储中断、设备故障引起的时间序列中断和异常的数据;剔除连续 6 个以上相同数据值的异常数据;删除超出 3 倍方差检验区间范围数据;对异常数据和缺失数据进行插补,缺失小于 2 h 的短区间利用线性方程插补,大于 2 h 的长区间利用样本边缘分布采样法插补;对插补后的数据再次处理与质量控制,将仍为异常值的数值剔除,记录为空值,输出所有有效数据。试验期间共收集了 2400 组完整的数据,剔除异常值后选取有效数据约 2000 组进行分析。模型精度的评价采用均方根误差(Root mean square error, RMSE)和决定系数(R^2)对模拟结果进行精度检验。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i)^2} \quad (3)$$

式中, o_i 和 p_i 分别为观测值和模型拟合值; \bar{o}_i 为观测值的均值。

使用 Python、Amos 和 Origin 等软件对测定数据进行分析 and 图表绘制,将 NAI 浓度值进行指数平移处理后作为 NAI 浓度依据,环境要素及植被光合对 NAI 的影响采用单、双因素方差分析,各指标间的相关性采用皮尔逊相关分析,显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 NAI 与环境要素及植被光合的关系

NAI 与环境要素及植被光合的相关关系存在显著差异。如图 1 所示,NAI 与环境要素间相关显著,其中 NAI 与温度、光合有效辐射、紫外辐射、土壤湿度呈显著正相关,相关系数分别为 0.238、0.534、0.535 和 0.308;NAI 与相对湿度、PM_{2.5}呈显著负相关,相关系数分别为 -0.145 和 -0.214。NAI 与植被光合呈显著正相关,相关系数为 0.763。植被光合受环境要素的影响显著,植被光合与温度、光合有效辐射、紫外辐射和土壤湿度呈显著正相关,相关系数分别为 0.307、0.793、0.781 和 0.255。由于,NAI 与风速相关系数较低,风速排除在结构方程模型预测之外。

2.2 环境要素及植被光合对 NAI 的影响机制

本研究对影响 NAI 的环境要素和植被光合构建结构方程模型,如图 2 所示,NAI 的影响因素复杂多变,

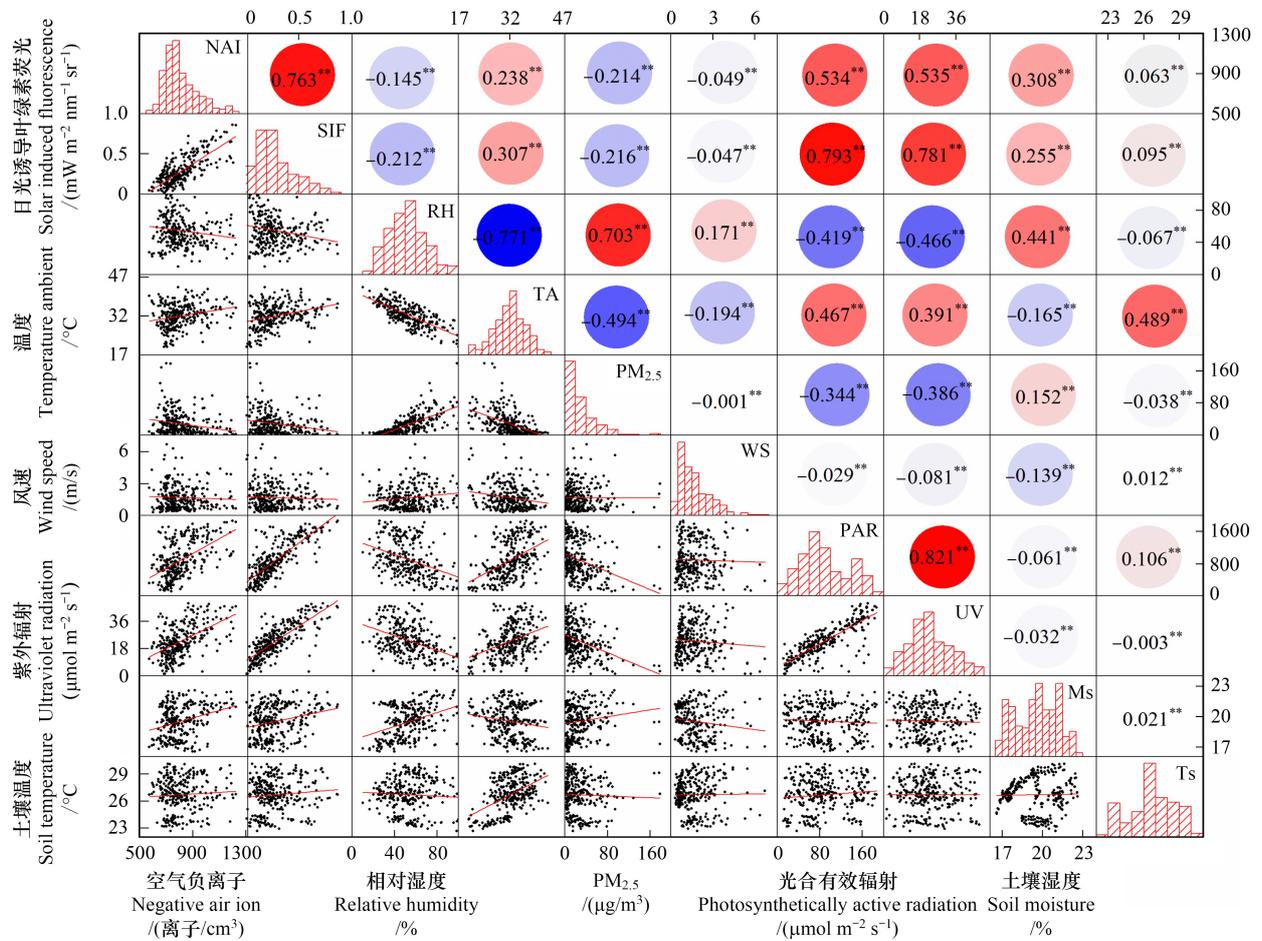


图 1 NAI 与环境要素及植被光合的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of NAI with environmental elements and vegetation photosynthesis

NAI: 空气负离子; SIF: 日光诱导叶绿素荧光; RH: 相对湿度; TA: 温度; PM_{2.5}: 颗粒物; WS: 风速; PAR: 光合有效辐射; UV: 紫外辐射; Ms: 土壤湿度; Ts: 土壤温度; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

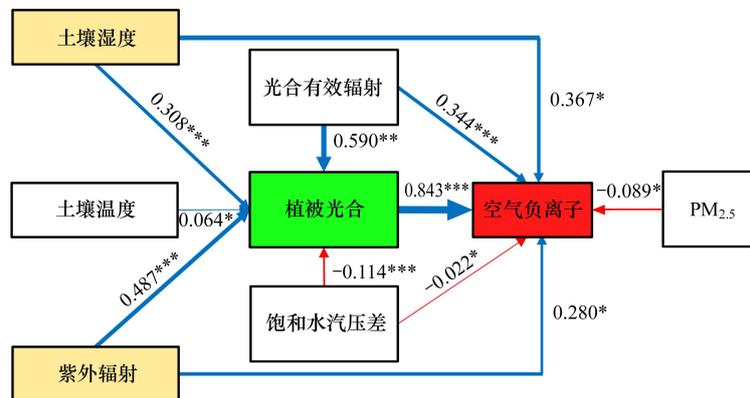


图 2 环境要素和植被光合对 NAI 影响的主要途径

Fig.2 Main pathways of the effects of environmental elements and vegetation photosynthesis on NAI

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

VPD、PM_{2.5}对 NAI 有显著负效应,总效应分别为-0.022 和-0.089;植被光合、PAR、UV 和 Ms 对 NAI 存在显著正效应,总效应分别达到了 0.843、0.344、0.280 和 0.367。此外,植被光合也受环境要素影响显著,VPD 对植被

光合有极显著负效应,总效应为-0.114,PAR、UV、Ms 和 Ts 对植被光合呈显著正效应,总效应分别为 0.590、0.487、0.308 和 0.064。

为了进一步阐明植被光合和环境要素对 NAI 的影响机制,本研究分析了环境要素对植被光合和 NAI 影响的直接效应和间接效应,结果如表 2 所示。VPD、PAR、UV、PM_{2.5}、Ms 和植被光合对 NAI 的直接效应分别为 0.073、-0.153、-0.130、-0.089、0.107 和 0.843,VPD、PAR、UV、Ms 和 Ts 对 NAI 的间接效应分别达到了-0.096、0.497、0.410、0.260 和 0.054。通过比较环境要素和植被光合对 NAI 影响的直接和间接效应程度,植被光合和环境要素中 PM_{2.5}直接作用和影响 NAI,Ts 通过影响光合作用而间接影响 NAI,而 VPD、PAR、UV 和 Ms 既可以直接影响 NAI,也可以通过影响光合作用而间接影响 NAI(图 3)。

表 2 环境要素及植被光合对空气负离子的影响效应

Table 2 Effects of environmental elements and vegetation photosynthesis on NAI

变量 Variables	总效益 Total effects	直接效益 Direct effects	间接效益 Indirect effects
植被光合 Vegetation photosynthesis (VP)	0.843	0.843	0.000
饱和水汽压差 Vapour pressure deficit (VPD)	-0.022	0.073	-0.096
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (PAR)	0.344	-0.153	0.497
紫外辐射 Ultraviolet radiation (UV)	0.280	-0.130	0.410
PM _{2.5} Particulate matter 2.5 (PM _{2.5})	-0.089	-0.089	0.000
土壤湿度 Soil moisture (Ms)	0.367	0.107	0.260
土壤温度 Soil temperature (Ts)	0.054	0.000	0.054

2.3 环境要素及植被光合对 NAI 的贡献潜力

为了量化不同环境要素对 NAI 的影响,本研究将环境要素作为潜变量再次构建结构方程模型。环境要素及植被光合对 NAI 的总效应如图 4 所示,VPD、UV 和 PAR 对环境要素有极显著正效应($P<0.001$),总效应分别为 0.438、0.902 和 0.922,PM_{2.5}对环境要素有极显著负效应($P<0.001$),总效应达到了 0.384。进一步对各要素进行归一化处理得到环境要素的贡献率,其中,环境要素中的 VPD 贡献率为 16.55%,UV 的贡献率为 34.09%,PAR 的贡献率为 34.85%,PM_{2.5}的贡献率为 14.51%。因此,间接影响 NAI 的环境要素中重要性程度从高到低分别为太阳辐射(68.94%)、空气干燥程度(16.55%)和空气质量(14.51%),环境要素主要通过太阳辐射影响植被光合从而间接影响 NAI。

为了进一步阐明环境要素和植被光合对 NAI 的贡献潜力,如图 5 所示。环境要素对 NAI 具有极显著正效应,总效应达到了 0.580,对比植被光合对 NAI 的影响,植被光合对 NAI 具有更加显著地正效应,总效应达到了 0.973。进一步对环境要素和植被光合的影响效应进行归一化处理,结果表明,植被光合对 NAI 变化影响的贡献率达到了 62.65%,环境因子对 NAI 的贡献率为 37.35%。

3 讨论

3.1 环境要素对 NAI 的影响

环境要素对 NAI 的影响显著,本研究发现环境要素中 TA、PAR、UV、Ms、Ts 与 NAI 呈显著正相关,这主要

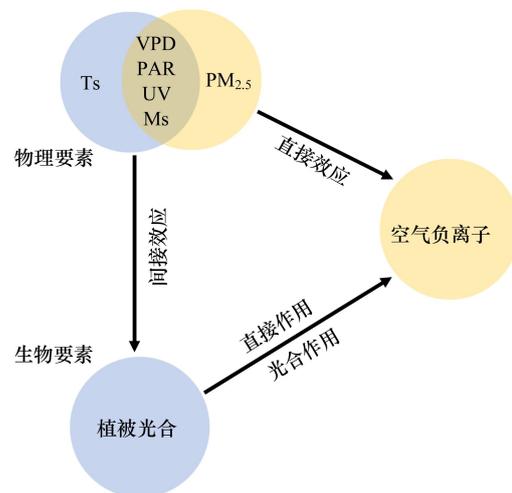


图 3 环境要素及植被光合对 NAI 的影响机制

Fig.3 Influence mechanism of environment elements and vegetation photosynthesis on NAI

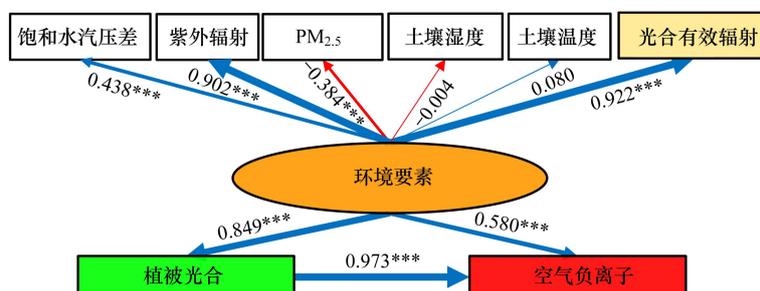


图4 空气负离子与环境要素、植被光合的通路分析

Fig.4 Path analysis of NAI with environmental elements and vegetation photosynthesis

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

是因为温度的升高可以增加分子间运动的速度和分子间碰撞的可能性,同时也提高了氧分子被电离的水平,从而有助于 NAI 的形成^[22]。例如, Li 等^[23]研究了鸡公山景区中七个不同地点的 NAI 与空气温度的变化,结果表明,在 0—25℃ 之间 NAI 与空气温度呈显著的正相关。PAR 和 UV 与太阳辐射强度密切相关,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 NAI 的主要因素,既可以通过电离空气直接产生 NAI,又能够通过影响植被的光合作用进而间接影响 NAI^[24]。例如, Zhang 等^[6]在小空间范围内对紫外辐射与 NAI 的关系进行了实验模拟分析,结果表明,紫外线强度与 NAI 密切相关,二者呈显著正相关,进一步验证了太阳辐射对 NAI 具有促进作用^[25]。Ms 直接影响植被水分的吸收和传递,影响植被的生理状态,进而间接影响 NAI。相关文献表明^[26—28],植物能够通过气孔释放挥发性有机化合物,导致 NAI 浓度的升高。此外,植物释放挥发性有机化合物的速度还取决于植物体内的代谢过程,

这在很大程度上取决于植物的种类、光照以及土壤的湿度。本研究发现 NAI 与土壤湿度的相关性较低,主要是因为本试验于植被主要生长季的 6—9 月开展试验,此时期降水充沛, Ms 不是影响植物正常生理活动的限制因子。因此, Ms 对 NAI 的影响需要在具有明显干湿季的地区进一步加以研究。Ts 对 NAI 的影响与植被根系的生理活动有关。Ts 可以通过影响植被根系的呼吸作用以及其它生理活动,包括水分和营养元素的吸收,从而影响整个植株的生理状态,促进或抑制植被气孔的开放,影响 NAI 的释放。此外,考虑到 NAI 与土壤中氨的析出直接相关,而影响氨析出的动力学的主要因素是湿度和土壤热梯度^[29]。本研究发现 NAI 与土壤温度的相关性不强,主要是因为主要生长季栓皮栎林分中土壤温度的变化差异较小,导致 Ts 对 NAI 影响的总效应较低。

本研究发现 NAI 与 RH、PM_{2.5} 呈显著负相关,主要是因为,在空气湿度较高的情况下, RH 增加会导致 O₂ (H₂O) 向更大团簇离子的平衡,导致水合 NAI 的尺寸增大,水合 NAI 就会变成带电的气溶胶,因其迁移率过低,不具备小粒子的生物学效应而被排除在 NAI 范畴之外^[30]。PM_{2.5} 对 NAI 的影响主要因为自由离子不容易在空气中长期存在,容易附着在粒子上,形成大分子沉淀物,降低了环境中 NAI 浓度^[31]。城市的空气污染程度越大, NAI 的浓度越低,同时 NAI 在城乡梯度上的差异主要是由 PM_{2.5} 等大气污染物和空气温湿度等气候因素决定。此外,空气湿度的上升会加剧空气中的颗粒物与水分子结合,易形成细小颗粒物,导致空气中 PM_{2.5} 浓度上升,加之风速较小不利于空气的流通,加剧了空气环境污染^[32]。

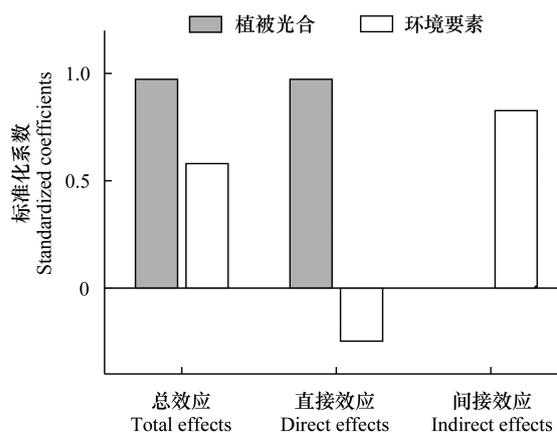


图5 环境要素及植被光合对 NAI 的影响效应

Fig.5 Effects of environmental factors and vegetation photosynthesis on NAI

本研究发现 NAI 与风速相关性较低, 主要与研究区的气候有关, 所选研究区的风速日变化波动较小, 导致 NAI 与风速的相关性不强。然而, 风速对 NAI 的影响不容忽视, 在风速差异较大的地区, 风速对 NAI 的影响显著, 一方面风速影响空气中污染物的扩散速度, 另一方面影响 NAI 的迁移^[33]。

3.2 植被光合对 NAI 的影响

森林植被作为 NAI 产生的重要来源, 本研究发现植被光合速率的提高有利于 NAI 的产生, 这主要是因为光合作用过程中的光合色素可以捕获特定的光子并反射其他颜色的光子, 反射的光子通过气孔逃逸, 与空气中的团簇离子结合形成带电粒子, 从而促进 NAI 的产生^[34]。本研究通过应用日光诱导叶绿素荧光(SIF)的观测技术, 弥补了长期以来冠层或区域尺度上植被光合过程自动观测的空白, 使得本研究可以进一步了解光合作用得实际过程对 NAI 的影响。SIF 对植被光合作用过程反应非常迅速, 已被证明是植物光合过程的理想探针^[19], 与植被指数相比, SIF 在监测森林植被光合作用变化过程方面具有更高的精度^[11]。本研究 SIF 的提取主要选择近红外波段, 尽管一些研究报告说, 红光波段 SIF 可能包含更多关于光系统 II(photosystem II, PS II) 的信息, 但是植被冠层结构和太阳视角几何结构的变化对红色 SIF 的影响比对远红色 SIF 的影响更复杂^[35]。因此, 为了更好地排除多次反射和再吸收的影响, 本研究使用了近红外 SIF(波段 760nm) 的数据。

3.3 NAI 的影响机制

森林生态系统对 NAI 具有重要有极显著的促进作用, 能够显著地增加 NAI 浓度, 改善空气质量。然而, NAI 浓度水平及变化规律受到环境要素和植被类型等多种因素的综合影响, 目前仅有小部分研究呈现出规律性, 大范围内缺少统一、明确的定论。本研究发现空气湿度和 PM_{2.5} 通过直接作用影响 NAI, 空气越干燥、空气质量越差, 环境中的 NAI 浓度越低, 主要是因为大气中水分子和颗粒物浓度的上升导致太阳辐射的吸收和折射能力增强, 从而降低了到达植被冠层的能量, 抑制了植被光合作用^[36-37]。

环境要素会不同程度地影响植被光合速率变化^[38], 本研究发现环境要素中的温度和太阳辐射的上升有利于植被光合作用, 导致植被的光合速率的提高, 从而促进 NAI 产生, 这主要是植被光合作用强度的上升会导致光合过程中光电效应的增强, 植被可以释放更多 O₂ 和 NAI^[7]。因此, 本研究基于长期定位连续观测的 NAI、植被光合能力和环境要素等指标, 将有助于了解森林生态系统对 NAI 影响的研究, 进而阐明森林植被对 NAI 的贡献潜力及影响机制。

4 结论

本研究通过对暖温带森林生态系统主要生长季长期定位观测获取的 NAI、环境要素和植被光合数据进行分析得到以下结论:

(1) 环境要素和植被光合对 NAI 的影响显著, 植被光合和环境要素中的 PM_{2.5} 主要通过直接效应影响 NAI, 环境要素中的光合有效辐射、紫外辐射、土壤温湿度和饱和水汽压差主要通过间接效应影响 NAI。

(2) 环境要素主要通过太阳辐射影响植被光合从而间接影响 NAI。

(3) 环境要素及植被光合对 NAI 的贡献率差异显著, 环境要素对 NAI 的贡献率为 37.35%, 植被光合对 NAI 的贡献潜力为 62.65%。

参考文献(References):

- [1] Miao S, Zhang X, Han Y, 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): 463-476.
- [2] Lin L, Li Y, Khan M, Sun J S, Lin J M. Real-time characterization of negative air ion-induced decomposition of indoor organic contaminants by mass spectrometry. *Chemical Communications*, 2018, 54(76): 10687-10690.
- [3] Jovanić B R, Jovanić S B. The effect of high concentration of negative ions in the air on the chlorophyll content in plant leaves. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, 129(1): 259-265.
- [4] Yan X J, Wang H R, Hou Z Y, Wang S Y, Zhang D Y, Xu Q, Tokola T. Spatial analysis of the ecological effects of negative air ions in urban vegetated areas; a case study in Maiji, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2015, 14(3): 636-645.
- [5] 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.
- [6] Zhang J, Yu Z L. Experimental and simulative analysis of relationship between ultraviolet irradiations and concentration of negative air ions in small chambers. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(10): 1347-1355.
- [7] 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.
- [8] Jiang S Y, Ma A L, Ramachandran S. Plant-based release system of negative air ions and its application on particulate matter removal. *Indoor Air*, 2021, 31(2): 574-586.
- [9] Shi G Y, Huang H, Sang Y Q, Cai L L, Zhang J S, Cheng X F, Meng P, Sun S J, Li J X, Qiao Y S. Solar-induced chlorophyll fluorescence intensity has a significant correlation with negative air ion release in forest canopy. *Atmospheric Environment*, 2022, 269: 118873.
- [10] 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.
- [11] Sun Y, Frankenberg C, Wood J D, Schimel D S, Jung M, Guanter L, Drewry D T, Verma M, Porcar C A, Griffis T J, Gu L, Magney T S, Köhler P, Evans B, Yuen K. OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science*, 2017, 358(6360): 189-194.
- [12] Köhler P, Frankenberg C, Magney T S, Guanter L, Joiner J, Landgraf J. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: first results and intersensor comparison to OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 456-463.
- [13] Jeong S J, Schimel D, Frankenberg C, Drewry D T, Fisher J B, Verma M, Berry J A, Lee J E, Joiner J. Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 178-187.
- [14] Meroni M, Rossini M, Picchi V, Panigada C, Cogliati S, Nali C, Colombo R. Assessing steady-state fluorescence and PRI from hyperspectral proximal sensing as early indicators of plant stress: the case of ozone exposure. *Sensors*, 2008, 8(3): 1740-1754.
- [15] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 刘兆刚. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2763-2772.
- [16] 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.
- [17] Tong X J, Zhang J S, Meng P, Li J, Zheng N. Environmental controls of evapotranspiration in a mixed plantation in North China. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(2): 227-238.
- [18] Smith W L. Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. *Journal of Applied Meteorology*, 1966, 5(5): 726-727.
- [19] Ryu Y, Berry J A, Baldocchi D D. What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 223: 95-114.
- [20] Cogliati S, Verhoef W, Kraft S, Sabater N, Alonso L, Vicent J, Moreno J, Drusch M, Colombo R. Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 344-357.
- [21] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [22] 穆丹, 梁英辉. 佳木斯绿地空气负离子浓度及其与气象因子的关系. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 2038-2041.
- [23] 李培学, 戴慧堂, 杨怀, 彭组强. 鸡公山空气负离子分布规律及其与环境因子的关系. *信阳师范学院学报: 自然科学版*, 2011, 24(1): 79-84.
- [24] Laakso L, Hussein T, Aarnio P, Komppula M, Hiltunen V, Viisanen Y, Kulmala M. Diurnal and annual characteristics of particle mass and number concentrations in urban, rural and Arctic environments in Finland. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(19): 2629-2641.
- [25] 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): 60-68.
- [26] 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.
- [27] Grange S K, Carslaw D C. Using meteorological normalisation to detect interventions in air quality time series. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 578-588.
- [28] Vu T V, Shi Z B, Cheng J, Zhang Q A, He K B, Wang S X, Harrison R M. Assessing the impact of clean air action on air quality trends in Beijing using a machine learning technique. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(17): 11303-11314.
- [29] Dueñas C, Fernández M C, Carretero J, Liger E, Pérez M. Release of ^{222}Rn from some soils. *Annales Geophysicae*, 1997, 15(1): 124-133.
- [30] Hörrak U, Salm J, Tammet H. Bursts of intermediate ions in atmospheric air. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 1998, 103(12): 13909-13915.
- [31] Vana M, Ehn M, Petäjä T, Vuollekoski H, Aalto P, Leeuw G, Ceburnis D, Dowd C D, Kulmala M. Characteristic features of air ions at Mace Head on the west coast of Ireland. *Atmospheric Research*, 2008, 90(2): 278-286.
- [32] Zhao S Q, Da L J, Tang Z Y, Fang H J, Song K, Fang J Y. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 341-346.
- [33] 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. *城市环境与城市生态*, 2012, 25(2): 38-40.
- [34] 邵海荣, 贺庆棠, 阎海平, 侯智, 李涛. 北京地区空气负离子浓度时空变化特征的研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 35-39.
- [35] Liu X J, Guanter L, Liu L Y, Damm A, Malenovsky Z, Rascher U, Peng D L, Du S S, Gastellu J P. Downscaling of solar-induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 110772.
- [36] Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, Fnais M, Haines A, Münzel T. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular Research*, 2020, 116(11): 1910-1917.
- [37] 施光耀, 周宇, 桑玉强, 张劲松, 孟平, 蔡露露, 裴松义, 王尧. 基于随机森林方法分析环境因子对空气负离子的影响. *中国农业气象*, 2021, 42(5): 390-401.
- [38] 王宇, 周莉, 贾庆宇, 王磊, 徐军亮. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的水稻蒸散组分模拟及其特征分析. *中国农业气象*, 2017, 38(11): 709-719.