

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.01.003

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

## 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\*

施光耀<sup>1,2</sup>, 桑玉强<sup>3</sup>, 张劲松<sup>1,2\*\*</sup>, 孟平<sup>1,2</sup>, 蔡露露<sup>3,4</sup>, 裴松义<sup>5</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 河南农业大学, 郑州 450002; 4. 河南省地球物理空间信息研究院, 郑州 450016; 5. 国有建平县黑水机械化林场, 朝阳 122000)

**摘要:** 空气负离子是衡量一个地区空气清洁度的重要指标, 对人体的心理和生理机能具有重要的促进作用。随着森林生态旅游的兴起, 空气负离子的发生过程及影响机制已成为生物气象、森林生态和森林康养等相关领域的研究热点。本研究以华北低丘山地栓皮栎人工林为试验对象, 在 2018 年和 2019 年 6-9 月森林植被叶面积相对不变期间, 定位观测获取人工林冠层空气负离子及微气象参数, 采用 Python 软件筛选出光合有效辐射约为零, 温度、风速及颗粒物浓度相对不变条件下的观测数据, 分析空气湿度(RH)对空气负离子浓度(NAI)的影响特征, 建立基于空气相对湿度的预测模型, 并对模型进行检验。结果表明, 在不同空气相对湿度范围内, 空气负离子浓度随空气湿度的升高呈现三种变化趋势, 在空气相对湿度 35%~55%范围内, 空气负离子浓度相对稳定, 二者呈稳定常数关系; 在相对湿度 55%~75%范围内, 空气负离子浓度迅速上升, 二者呈线性递增关系; 在相对湿度 75%~95%范围内, 空气负离子浓度适度下降, 二者呈线性递减关系。在此基础上, 构建了空气负离子浓度与空气相对湿度的分段拟合方程, 3 个湿度区间分别为  $NAI=729$ ;  $NAI=9.396RH+198.994$ , 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.807 ( $P<0.01$ ); 以及  $NAI=-4.849RH+1232.992$ , 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.642 ( $P<0.01$ )。各拟合函数的预测值与实测值均不存在显著差异, 均方根误差 (RMSE) 分别为 6.175、7.091、8.213, 而 RH 在 55%~75%和 75%~95%范围内决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.806、0.836, 模型的模拟精度高且均方根误差较小。说明构建的分段拟合函数能够准确反映空气相对湿度对空气负离子浓度的影响, 可为进一步深入研究空气负离子对气候变化的响应机制提供基础依据。

**关键词:** 空气负离子; 空气湿度; 估算模型; 气象因子

## Relationship between Negative Air Ion and Relative Humidity in *Quercus variabilis* Plantation under Natural Conditions

SHI Guang-yao<sup>1,2</sup>, SANG Yu-qiang<sup>3</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1,2</sup>, MENG Ping<sup>1,2</sup>, CAI Lu-lu<sup>3,4</sup>, PEI Song-yi<sup>5</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 3. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; 4. Henan Geophysical Space Information Research Institute, Zhengzhou 450016; 5. State Owned Jianping County Heishui Mechanized Forest Farm, Chaoyang 122000)

**Abstract:** Negative air ion is an important indicator of measuring air cleanliness in an area, and it plays an important role in promoting the psychological and physiological functions of the human body. With the rise of forest eco-tourism, the produce process and influence mechanism of negative air ion have become research hotspots in

\* 收稿日期: 2020-08-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2018ZA002)

\*\* 通讯作者: 张劲松, 研究员, 研究方向为林业气象, E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

第一作者联系方式: 施光耀, E-mail: shiguangyao01@163.com

related fields such as biometeorology, forest ecology, and forest health. In this study, the *Quercus variabilis* plantation in the hilly area of North China was taken as the experimental object. The negative air ions and micrometeorological parameters of the canopy were obtained by positioning observation under the condition of relatively constant leaf area of forest from June to September in 2018 and 2019, respectively. Python software was used to screen out the observation data under the condition that the photosynthetically active radiation is about zero and the temperature, wind speed, and pollutant concentration were relatively constant. The impact of relative air humidity on negative air ions was analyzed. The results show that negative air ion present three changing trends with the increase of air humidity, which is relatively stable within the range from 35% to 55% of relative air humidity; rapidly increase within the range from 55% to 75% of relative air humidity, represents a linearly increasing relationship; moderately decrease within the range of 75% to 95% of relative air humidity, represents a linear decreasing relationship. Based on this, the piecewise fitting equations of negative air ion and air relative humidity are constructed as  $NAI=729$  (RH35%–55%);  $NAI=9.396RH+198.994$  (RH55%–75%), and the coefficient of determination ( $R^2$ ) is 0.807 ( $P<0.01$ );  $NAI=-4.849RH+1232.992$  (RH75%–95%), and the coefficient of determination ( $R^2$ ) is 0.642 ( $P<0.01$ ). There is no found a significant difference between the measured value and predicted value of the constructed piecewise fitting function through the analysis and comparison. The root means square error (RMSE) is 6.175, 7.091, and 8.213, respectively, while the coefficient of determination ( $R^2$ ) is 0.806 and 0.836 within RH55%–75% and RH75%–95%, respectively. The accuracy of the model is high and the root means square error is small. Therefore, the piecewise fitting function constructed in this study can accurately reflect the impact of air humidity on negative air ion, thereby providing a working foundation for further research on the response mechanism of negative air ion to meteorological changes.

**Key words:** Negative air ions; Air humidity; Estimation model; Meteorological factor

空气负离子 (Negative air ion; NAI) 是指获得多余电子的带负电荷的空气离子, 因空气中氧分子化学性质活泼优先获得电子, 故也称负氧离子, 其广泛分布于自然环境中, 如森林和湿地<sup>[1-2]</sup>。目前, NAI 已成为衡量一个地区空气清洁度的重要指标之一<sup>[1]</sup>, 同时具有多种抗菌作用和生物学效应, 对人体的心理和生理机能具有重要的促进作用<sup>[2-3]</sup>, 被誉为“空气维生素”<sup>[4]</sup>。因此, 开展森林对 NAI 影响作用的研究, 对进一步深入评价林区空气质量, 促进森林康养产业发展具有重要意义。

近年来随着森林生态旅游的兴起, NAI 备受人们关注, 相关研究也越来越活跃<sup>[5-7]</sup>, NAI 发生过程及影响机制已成为生物气象、森林生态和森林康养等相关领域共同关注的热点研究内容<sup>[8]</sup>。为准确预测复杂的环境因素对 NAI 的影响, 国内外许多学者将自然界中 NAI 的来源及影响因素归纳为物理、生物两大类, 物理类指闪电、雷暴、雪暴、风暴、火山爆发的放电现象以及雨水的分解等<sup>[9-10]</sup>; 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<sup>[11-15]</sup>。其中, 空气湿度是影响 NAI 的重要因素, 既是物理类, 也是生物类的影响因素,

前者涉及 NAI 在空气中的水化以及与水的化学反应, 后者通过影响植被的光合生理过程<sup>[16]</sup>, 进而间接影响 NAI。Luts 等<sup>[17]</sup>研究发现, 随着水浓度的增加,  $O_2^-(H_2O)$  的平衡向更大的团簇离子方向移动, 空气湿度的增加有助于 NAI 产生; Goldstein 等<sup>[18-19]</sup>研究表明, 潮湿空气中的超氧化物产生低浓度过氧化氢 ( $H_2O_2$ ), 可分解产生大量的  $OH^-$ , 成为 NAI 的重要组成部分; Junninen 等<sup>[20]</sup>报告表明, 芬兰北部森林环境中夜间的小离子浓度和平均大小都有所增加, 与繁华的商业区和交通站点相比, 植物多、水体多的森林小离子浓度明显较高, 且夜间 NAI 浓度对次日环境质量具有一定影响; 司婷婷等<sup>[21]</sup>在热带雨林地区研究发现夏季空气负离子含量与相对湿度呈显著正相关。然而 Fujioka 等<sup>[22]</sup>证明了 NAI 的迁移率随绝对湿度的增加而降低, 不利于空气负离子的产生; 黄世成等<sup>[23]</sup>在暖温带森林生态系统中研究发现空气湿度与 NAI 的相关关系在不同条件下不尽相同, 在雨日两者相关不显著, 但在无雨日相关显著; 张双全等<sup>[24]</sup>在神农谷国家森林公园中研究发现 NAI 浓度年变化与气温和空气相对湿度均无相关性。

目前,国内外对于空气湿度与 NAI 关系的研究已经取得了许多成果,但是由于气象因子的复杂多变<sup>[25-26]</sup>,气候条件、森林覆盖率、大气流动、微粒吸附和自然地理条件等都会影响 NAI 的浓度<sup>[9]</sup>,迄今为止很少有通过控制其它条件下独立分析 NAI 随空气湿度波动变化的研究报道<sup>[5-6]</sup>,这就导致了无法揭示物理或生物因素对 NAI 的独立作用,致使有关空气湿度与 NAI 关系的研究结论存在着诸多不确定性。空气湿度对 NAI 的影响是促进或抑制,已有的研究结果无法给出统一的定论<sup>[27]</sup>,有的甚至出现了相互矛盾的结论<sup>[28-29]</sup>。因此,如要独立分析自然界空气湿度对 NAI 的物理作用,则需要控制植被光合作用强度相对不变,然而受技术条件限制在白天条件下无法实现,但在夜间条件下,植被光合速率可视为零,这就为独立分析湿度对 NAI 的影响提供了可能。

本研究以华北低丘山地栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.) 人工林为试验对象,于 2018 年、2019 年 6-9 月森林植被叶面积相对不变条件下定位观测获取森林冠层空气负离子及微气象参数,采用 Python 软件筛选出光合有效辐射约为零,温度、风速及污染物浓度相对不变条件下的观测数据,独立分析空气湿度对 NAI 的影响特征,为进一步深入研究 NAI 对气象响应机制提供基础依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

实验在河南黄河小浪底森林生态系统国家定位观测研究站 (35°01'45"N, 112°28'08"E, 海拔 410m) 进行,研究区位于河南省济源市,地处黄河中游,紧连太行山脉,温带大陆性季风气候,年平均气温 12.4~14.3℃,年均降水量 641.7mm,季节分配不均,6-9 月降水量占全年的 68.3%。全年日照时数为 2368h,0℃ 以上的年平均有效积温为 5282℃·d,10℃ 以上年均积温达 4847℃·d。研究区域为以栓皮栎为主的混交林,林龄为 33a,平均株高为 8m,其它树种包括侧柏 (*Platycladus orientalis* L.)、白皮松 (*Pinus bungeana* Zucc.) 等。土壤成分主要为棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土,土壤结构不良,土壤中石砾含量大,春季经常发生季节性干旱,夏季有暴雨时易受侵蚀,平均土壤深度为 50cm, pH 值 7.7~8.5。

### 1.2 观测内容及方法

空气负离子的观测采用 RR-9411A 型空气负离子自动监测仪 (中国),NAI 测量范围 0~ $1.2\times 10^7\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,迁移率 $\geq 0.4\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{S}^{-1}$ ,测量精度 $\leq \pm 10\%$ ,采集频率为 1s,存储周期为 5min,安装高度垂直地面 1.5m 且无遮挡物,观测时间为 2018 年及 2019 年 6-9 月。此外,同步观测林冠下方空气温湿度、风速、太阳辐射及颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  浓度等微气象参数,观测高度 1.8m。空气温湿度传感器型号为 HMP155 (芬兰),温度测量范围 -80~65℃,精度 $\leq \pm 0.1^\circ\text{C}$ ;湿度测量范围 0~100%,精度 $\leq \pm 1\%$ 。风速传感器型号为 WindSonic (英国),测量范围 0~60 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,测量精度 $\leq \pm 2\%$ ;太阳辐射传感器为 Li200X (美国),光谱范围 400~1100nm,测量精度 $\leq \pm 2\%$ ;颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  传感器为 RR-9421 (中国),测量范围 1~1000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。上述监测指标均通过 CR1000 (美国) 采集器进行存储,通过 DTU900C 型 GPRS 远程传输模块实现数据实时快速传输并自动上传存储至服务器。

### 1.3 数据统计分析

利用 Python 软件对数据进行初步筛选。筛选过程为,(1)对时间序列进行筛选,排除因设备存储中断、故障引起的时间序列不连续以及异常数据;(2)将每个数值与其前后的值进行对比,若该值小于前后值的 3 倍或 1/3,舍弃并记录为 NA;(3)将连续 6 个或以上的相同数据值判定为异常值,记录为 NA;(4)对小于 10 的数值进行差值计算,以前后 2 个数据取均值并取整,记录为该时刻插值后的数值;(5)赋值后再次筛选,将仍小于 10 的数值剔除,记录为 NA,输出所有有效数据。最终对 2018、2019 年内 6-9 月不同天气条件下的 NAI 浓度、空气湿度、空气温度、风速和  $\text{PM}_{2.5}$  的监测,共收集 9720 组完整数据,剔除异常值后选取有效数据约 9500 组。

将所得数据按照 30min 时间步长取均值进行整合,利用 Python 软件对分布于夜间的数据 (20:00-次日 4:00) 进行筛选,筛选条件为风速小于  $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  小于  $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,气温  $30.0\pm 0.5^\circ\text{C}$  进行筛选,筛选后得到符合条件的 500 组 NAI 分布的完整数据。通过 Python、SPSS 和 Origin 软件进行数据分析并绘制图表。数据分析方法包括筛选分析、单因子回归分析和多因子回归分析,这些方法已经广泛

应用于生态系统模型中<sup>[30-31]</sup>，能够使用较少的因子来解释因变量的最大可变性<sup>[32-33]</sup>，具有较高的精度和应用潜力。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然状态下空气负离子浓度与空气湿度数据组筛选

自然状态下影响林中空气负离子含量的因素很多，如图 1 所示，以 2019 年主要生长季为例，NAI 和各气象因子的日变化过程复杂，从变化趋势上无法准确判断单一环境因子对 NAI 的影响规律。

为独立分析空气湿度对 NAI 的影响，需要将其它气象条件控制在相对不变条件的条件下。因此，对 2018 年及 2019 年 6-9 月的气象数据进行筛选，最终选出符合条件的 500 组数据进行分析。利用 Python 软件对所选数据进行随机抽样，将数据分为训练样本（70%）和验证样本（30%）。为评价不同空气相对湿度范围内实测值与估算值之间的差异性，采用决定系数（Coefficient of determination,  $R^2$ ）与均方根差（Root mean square error, RMSE）作为指标进行综合评定。

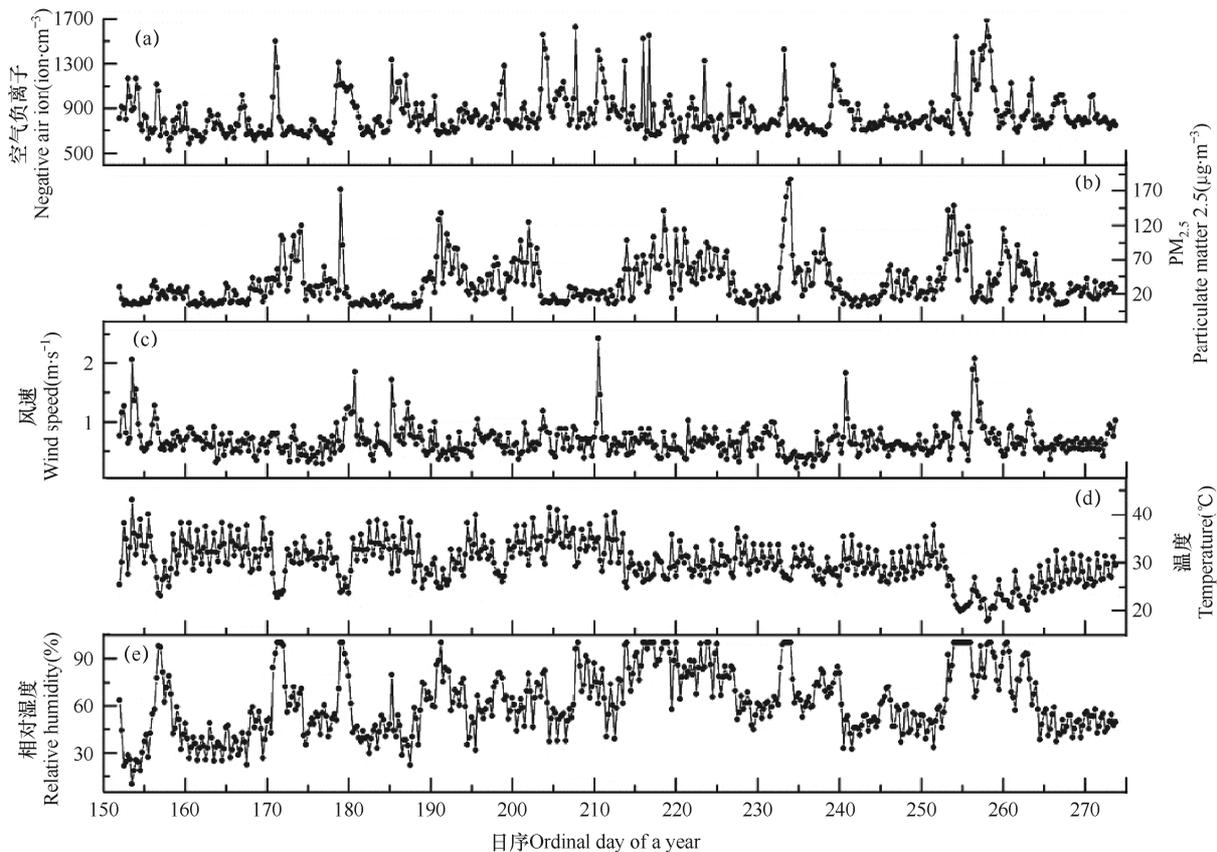


图 1 自然状态下 2019 年 6-9 月各要素变化过程

Fig. 1 Change process of various elements from June to September in 2019 in natural state

### 2.2 空气负离子随空气湿度变化的阶段特征分析

由于环境因子对空气负离子（NAI）的作用规律复杂，因此需要筛选出特征变量就空气相对湿度（RH）对 NAI 的影响进行独立分析。在气温相对稳定、风速小、空气质量优（ $PM_{2.5}$  小于  $50\mu g \cdot m^{-3}$ ）和光合有效辐射为零的条件下，筛选出 NAI 和 RH 数据组共 500 组，其变化过程如图 2 所示。由图可见，NAI 与 RH 的关系表现为随着 RH 的升高，NAI 呈现平缓、上升、下降趋势（图 2）。在 RH35%~55%

范围内，NAI 浓度呈平缓下降趋势，受 RH 的影响较小，NAI 趋于平衡，波动不明显，整体保持在相对较低水平且比较稳定。在 RH55%~75% 范围内，NAI 与 RH 呈显著正相关，NAI 浓度随 RH 的增加而迅速上升，平均增长幅度为 18.6%，在 RH 达到 73% 时，NAI 浓度达到最高  $902 ion \cdot cm^{-3}$ 。在 RH75%~95% 范围内，NAI 与 RH 呈现显著负相关，NAI 浓度随 RH 增加而降低，平均下降幅度为 10.4%。

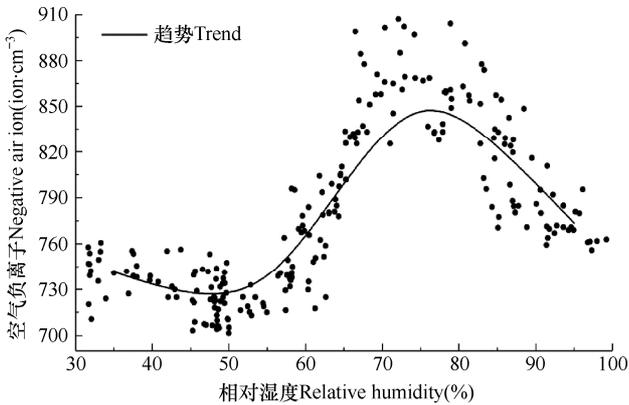


图 2 空气负离子与相对湿度的关系

Fig. 2 Relationship between negative air ion and relative humidity

### 2.3 空气负离子与相对湿度关系的分段拟合

#### 2.3.1 分段拟合函数的构建

将所有符合条件的数据组按空气相对湿度 (RH) 35%~55%、55%~75%和 75%~95%进行分组, 建立空气负离子 (NAI) 与 RH 的分段拟合模

型, 结果见图 3。由图 3a 可见, 在 RH35%~55% 区域内, NAI 随 RH 的变化较平缓, NAI 浓度在 701 ~ 760ion·cm<sup>-3</sup> 范围内波动, 平均值为 729ion·cm<sup>-3</sup>, 其拟合方程用 NAI=729 表示; 在 RH55%~75%区域内 (图 3b), NAI 随 RH 增加呈线性递增趋势, 二者呈极显著正相关关系 (P<0.01), 回归方程为 NAI=9.396RH+ 198.994, 方程的决定系数 (R<sup>2</sup>) 为 0.807; 在 RH75%~95%区域内 (图 3c), NAI 随 RH 增加呈现线性递减趋势, 回归分析表明, 二者呈极显著正相关关系 (P<0.01), 回归方程为 NAI=-4.849RH+1232.992, 方程的决定系数 (R<sup>2</sup>) 为 0.642。可见, 在自然条件下, 通过人为筛选、排除其它因素, 空气相对湿度对空气负离子的影响作用规律明显, 分段拟合模型能够有效排除其它气象因子的干扰, 各阶段可使用不同的方程表述, 结果也表明了空气负离子浓度的大小与空气相对湿度有很大关系。

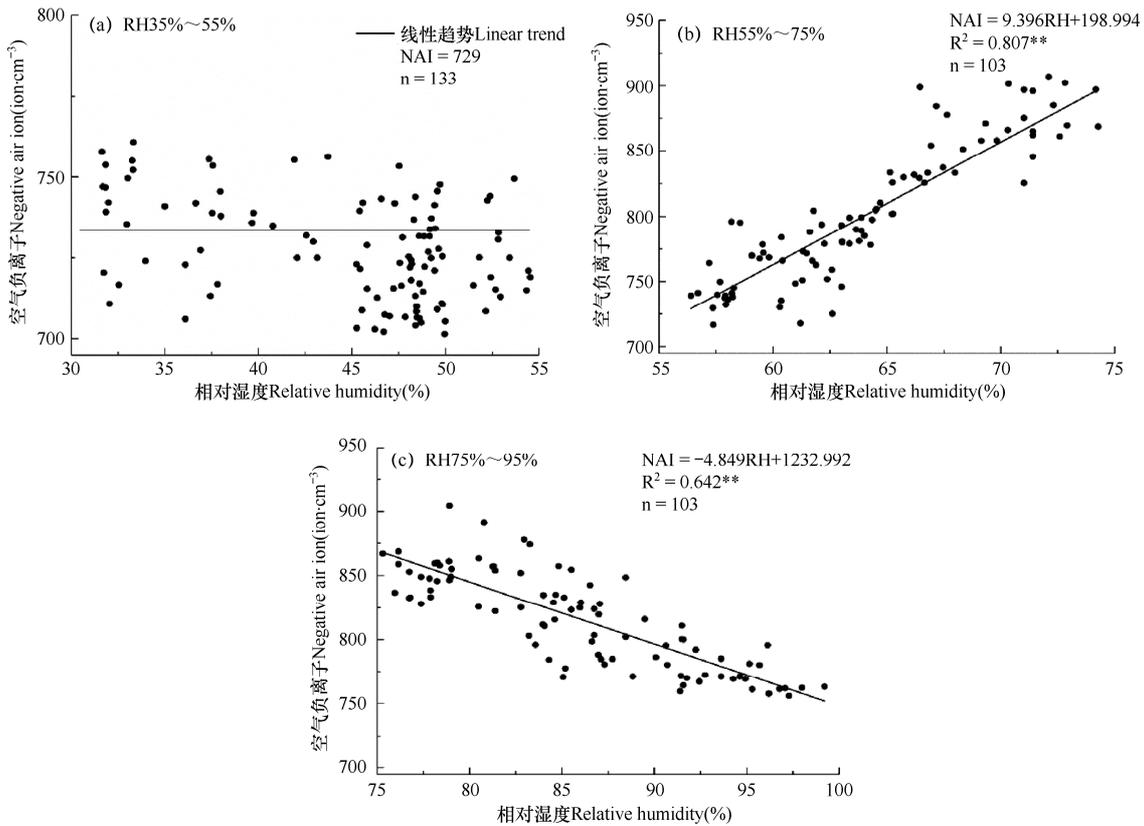


图 3 空气负离子浓度与相对湿度的相关性

Fig. 3 Correlation between negative air ions and relative humidity

注: \*\*表示相关系数通过 0.01 水平的显著性检验。

Note: \*\* is P<0.01.

### 2.3.2 分段拟合偏差检验

为了检验模型的稳定性和精度，如图 4 所示，选取三组 RH35%~55% (图 4a)、RH55%~75% (图 4b) 和 RH75%~95% (图 4c) 范围内验证样本数据进行经验曲线拟合偏差检验。利用空气负离子浓度与空气湿度建立的分段拟合函数，计算得到空气负离子浓度的估算值，并结合空气负离子浓度的实测值，分别对 RH35%~55%、RH55%~75% 和 RH75%~95% 范围内空气负离子浓度的估算结果进

行检验。结果表明，在 RH35%~55% 范围内，偏差检验的经验模型误差小于 11%，均方根误差 (RMSE) 为 6.175；在 RH55%~75% 范围，经验模型决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.806，均方根误差 (RMSE) 为 7.091；在 RH75%~95% 范围内，经验模型决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.836，均方根误差 (RMSE) 为 8.213。总体来说，空气负离子浓度估算值与实测值差异较小，分段拟合函数较好地估算了不同湿度条件下空气负离子浓度的变化特征。

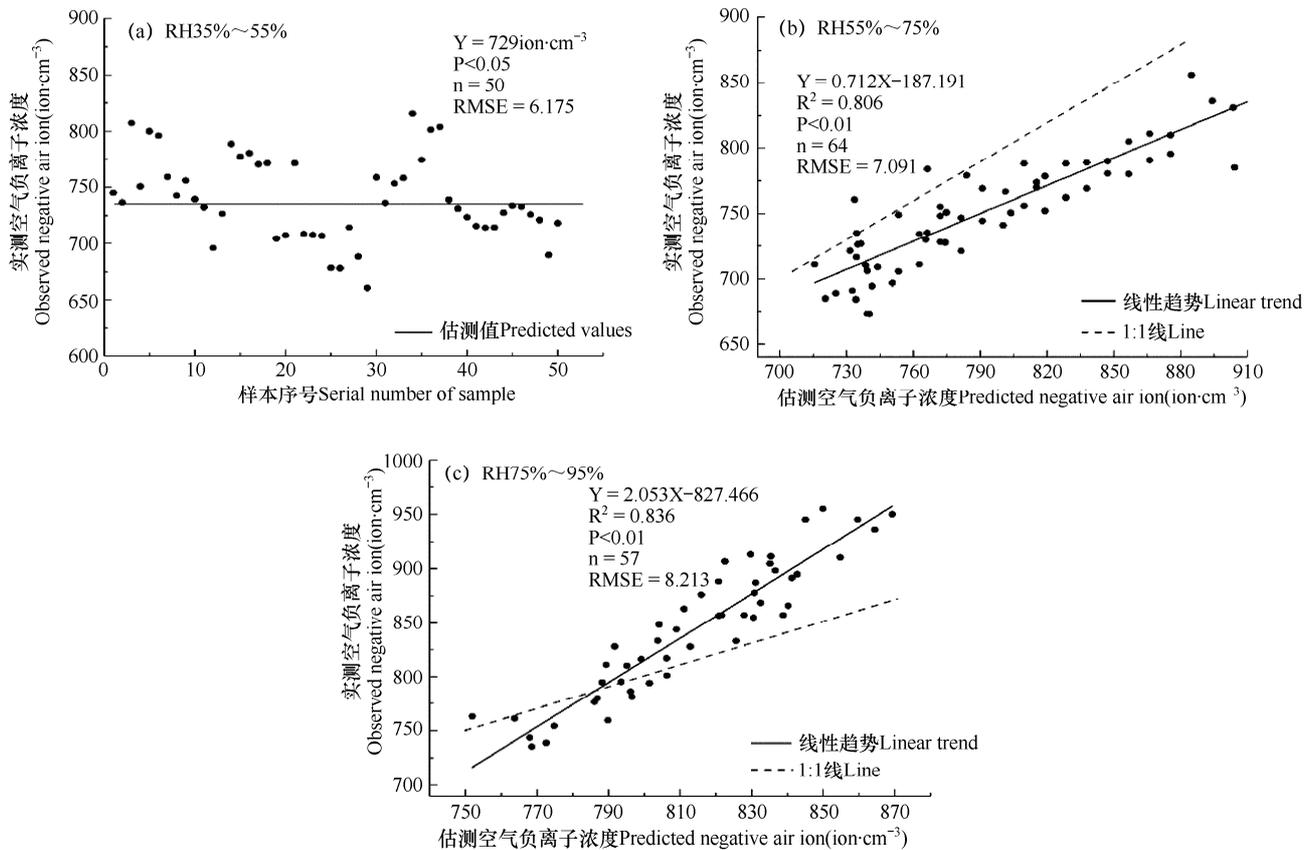


图 4 空气负离子预测值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and observed values of negative air ions

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

空气负离子 (NAI) 对环境因素的响应机制，既与研究区域地理位置、下垫面的差异有关，又与大气环境中气象要素间相互作用有关。已有研究表明空气负离子可能与多种气象要素相关<sup>[34-35]</sup>，但在具体因子的分析上，结果仍存在不确定性。由于太阳辐射对植被的影响，研究 NAI 浓度变化就会受到植被光合过程和空气湿度的双重影响，空气湿度对 NAI

的影响无法摆脱植被光合过程的限制。因此，在研究影响空气离子浓度的变化时，需要尽可能排除所有其它因素，控制单一变量预测 NAI 的变化<sup>[36]</sup>。目前 NAI 随湿度变化的研究，主要集中在野外非限制试验和室内人工模拟试验<sup>[16,37-38]</sup>。野外条件下开展的试验，日间的 NAI 因环境因素差异没有可比性，对湿度以外的气象条件难以限制且受人为因素干扰较大；室内基于控制条件下开展的湿度对 NAI 的影响多以负离子发生器等电器设备作为负离子源，其

来源与自然状态下 NAI 产生的途径不一致,同时 NAI 浓度过高,可达数十万级以上且浓度无法控制<sup>[39]</sup>。对于近自然条件下,极少可能出现数十万级的浓度,其研究结果可能不适于近自然状态下的 NAI 随湿度的变化<sup>[28-29]</sup>。

空气湿度对空气负离子的影响极为复杂,不同的湿度条件对空气负离子的影响程度不同。在 RH35%~55%范围内,空气负离子与空气相对湿度(RH)无显著相关性,主要是因为水分子是空气离子形成的重要组成部分,水分子的不足是 NAI 形成的制约因素,导致 NAI 浓度在此范围内波动不大;在 RH55%~75%范围内,NAI 随 RH 的升高而增大,主要是因为随着水分子的不断增多,水分子不再是 NAI 形成的限制因子,越来越多的 NAI 与水分子结合形成的水合团簇离子,Smirnov<sup>[40]</sup>相关研究指出, $O_2^-(H_2O)$ 的寿命是  $O_2^-(N_2)$ 的  $1.1 \times 10^4$  倍, $O_2^-(H_2O)_2$ 的寿命是  $O_2^-(H_2O)$ 的 3.3 倍,水合离子的增多是导致 NAI 上升的主要原因,环境中水分子不断增加,NAI 更加稳定。在 RH75%~95%范围内,NAI 随 RH 的升高而降低,在空气湿度较高的情况下,湿度的增加会导致  $O_2^-(H_2O)$ 向更大团簇离子的平衡<sup>[17]</sup>,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空气离子之外<sup>[41]</sup>。综合来说,空气湿度对 NAI 的影响机制包含化学反应和水合作用两方面。化学反应主要由水分子形成了大量的  $OH^-$ ,是 NAI 的重要组成部分,其大小取决于相对湿度<sup>[19]</sup>。NAI 的水合作用是 NAI 的一个稳定过程,在湿润空气中,NAI 处于稳定状态的主要团簇离子为  $O_2^-(H_2O)_n$  和  $CO_3^-(H_2O)_n$  水合物,二者共同影响着 NAI 浓度的高低<sup>[42-43]</sup>。Bowers 等<sup>[5]</sup>相关研究发现瀑布附近的负离子浓度增加主要与水汽有关,这些中间离子在很大程度上可以由一个  $OH^-$  和一个水团簇离子组成,然而部分研究也表明了空气负离子与空气湿度成负相关等不一致的结论<sup>[22]</sup>。究其原因,可能与不同研究者获取监测数据和统计分析方法的不同有关,也与不同环境下的气象要素有关,环境各要素相互作用的复杂性、研究区域的地理位置、气候背景和垫面差异都会对研究结果产生影响。

本研究观测数据主要基于植被光合作用停止的夜间数据,但 NAI 浓度变化可能与植物生理活动的变化有关<sup>[44]</sup>,夜间植物呼吸逐渐增强导致气孔张开,

从而促进了 NAI 的释放。本研究表明,空气湿度对 NAI 的影响,在高湿条件下呈现下降趋势,可能由于湿度过高的阴雨天白天植被光合作用较低,植被尖端放电效应较弱,释放的空气负离子较少,导致空气负离子的产生和积累量较低造成的。此外,分段经验曲线拟合检验偏差表明,经验曲线拟合的偏差随相对湿度的增加而增大,尽管本研究对经验曲线拟合进行了检验,但在不同的环境条件下,由这些经验公式得到的 NAI 浓度可能有所不同,主要是因为没有限定的自然环境中,一些因素可能会影响 NAI 浓度,如植被类型、环境质量、植被覆盖度、人为因素、粒子浓度等。

### 3.2 结论

空气负离子与空气相对湿度的关系在不同空气湿度条件下表现出不同的规律,在 RH35%~55%范围内,NAI 与 RH 无显著相关性,呈稳定趋势;在 RH55%~75%范围内,NAI 与 RH 呈极显著正相关关系,在此范围内有利于空气负离子的产生;在 RH75%~95%范围内,NAI 与 RH 呈极显著负相关关系。构建的 NAI 与 RH 分段拟合函数,能够较好地反映不同湿度条件下 NAI 浓度的变化特征。为评价分段拟合函数的估算精度,采用决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)进行综合评定,在 RH35%~55%、55%~75%和 75%~95%范围内,空气负离子的估算值与实测值的均方根误差(RMSE)分别为 6.175、7.091 和 8.213,而 RH 在 55%~75%和 75%~95%范围内决定系数分别为 0.806、0.836,表明所构建的分段拟合函数能够较好地反映空气相对湿度对空气负离子浓度的影响,从而为进一步深入研究空气负离子对气象变化的响应机制提供理论依据。

由于不同树种之间光合等生理特性、不同区域气候条件等方面存在差异,本研究结果仅基于河南黄河小浪底森林生态系统国家定位观测研究站观测数据,普适性有待验证。未来应进一步开展多区域、多树种的联合观测,应用大数据理论和技术,分析空气负离子对空气湿度响应的不确定性,以更加全面系统了解森林小气候对空气负离子的影响规律。

### 参考文献 References

- [1] 邵海荣,贺庆棠.森林与空气负离子[J].世界林业研究,2000(5):20-24.  
Shao H R,He Q T.Forest and negative air ions[J].World

- Forestry Research,2000(5):20-24.(in Chinese)
- [2] 吴楚材,郑群明,钟林生.森林游憩区空气负离子水平的研究[J].林业科学,2001,37(5):75-81.  
Wu C C,Zheng Q M,Zhong L S.A study of the aero-anion concentration in forest recreation area[J].Scientia Silvae Sinicae,2001,37(5):75-81.(in Chinese)
- [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[J].Water Air & Soil Pollution,2001, 129(1-4): 259- 265.
- [4] 王薇,余庄.中国城市环境中空气负离子研究进展[J].生态环境学报,2013(4):705-711.  
Wang W,Yu Z.Research progress on negative air ions in urban environment in China[J].Ecology and Environmental Sciences,2013,(4):705-711.(in Chinese)
- [5] Bowers B,Flory R,Ametepe J,et al.Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder[J].Psychiatry Res,2017,259:7-14.
- [6] Virkkula A,Hirsikko A,Vana M,et al.Charged particle size distributions and analysis of particle formation events at the Finnish Antarctic research station Aboa[J].Boreal Environment Research,2007,12(3):397-408.
- [7] Miao S,Zhang X,Han Y,et al.Random forest algorithm for the relationship between negative air ions and environmental factors in an urban park[J].Atmosphere,2018(9):463-476.
- [8] Ling X,Jayaratne R,Morawska L.Air ion concentrations in various urban outdoor environments[J].Atmospheric Environment, 2010, 44(18):2186-2193.
- [9] Zhang J,Yu Z.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.
- [10] Luts A,Parts T.Evolution of negative small air ions at two different temperatures[J].Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics,2002,64(7):763-774.
- [11] 单晟焯,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.(in Chinese)
- [12] 齐冰,杜荣光,邵碧嘉.杭州市空气负离子变化特征分析[J].气象与减灾研究,2011,34(4):68-71.  
Qi B,Du R G,Shao B J.Characteristics of anion variation in Hangzhou[J].Meteorology and disaster reduction Research, 2011, 34(4):68-71.(in Chinese)
- [13] 邵海荣,贺庆棠,阎海平,等.北京地区空气负离子浓度时空变化特征的研究[J].北京林业大学学报,2005,27(3):35-39.  
Shao H R,He Q T,Yan H P,et al.Spatio-temporal changes of negative air ion concentrations in Beijing[J].Journal of Beijing Forestry University,2005,27(3):35-39.(in Chinese)
- [14] Bai Z.A preliminary study on interaction of negative air ion with plant aromatic substance[J].Journal of Chinese Urban Forestry,2008,6:56-58.
- [15] Liang H,Chen X,Yin J,et al.The spatial-temporal pattern and influencing factors of negative air ions in urban forests,Shanghai,China[J].Journal of Forestry Research, 2014, 25(4):847-856.
- [16] Tikhonov V P,Tsvetkov V D,Litvinova E G,et al.Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil[J].Russian Journal of Plant Physiology,2004,51(3):414-419.
- [17] Luts A,Salm J.Chemical composition of small atmospheric ions near the ground[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres,1994,99(D5):10781-10785.
- [18] Goldstein N I,Goldstein R N,Merzlyak M N.Negative air ions as a source of superoxide[J].International Journal of Biometeorology,1992,36(2):118-122.
- [19] Smith W L.Note on the relationship between precipitable water and surface dew point[J].Journal of Applied Meteorology, 1966(5):726-727.
- [20] Junninen H,Hulkkonen M,Riipinen I.Observations on nocturnal growth of atmospheric clusters[J]. Tellus, 2008, 60(3):365-371.
- [21] 司婷婷,罗艳菊,毕华.吊罗山热带雨林空气负离子含量变化特征初探[J].林业资源管理,2015(4):139-144.  
Si T T,Luo Y J,Bi H.Diurnal and seasonal variation characteristics of NAIC and their relation with meteorological elements in diaoluoshan tropical rainforest[J]. Forest Resources Management,2015(4): 139-144. (in Chinese)
- [22] Fujioka N,Tsunoda Y,Sugimura A,et al.Influence of humidity on variation of ion mobility with life time in atmospheric air[J].IEEE Trans Power Syst,1983,102(4): 911-917.
- [23] 黄世成,徐春阳,周嘉陵.城市和森林空气负离子浓度与气

- 象环境关系的通径分析[J].气象,2012(11):1417-1422.
- Huang S C,Xu C Y,Zhou J L.Path analysis on negative air ion concentration and the meteorological environment in urban and forest zones[J].Meteorological Monthly,2012(11): 1417-1422.(in Chinese)
- [24] 张双全,谭益民,吴章文.空气负离子浓度与空气温湿度 的关系研究[J].中南林业科技大学学报,2011,31(4):114-118. Zhang S Q,Tan Y M,Wu Z W.The relationship between air anion concentration and air temperature and air relative humidity[J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2011,31(4):114-118.(in Chinese)
- [25] 胡琦,董蓓,潘学标,等.不同时间尺度下华北平原干湿气候 时空变化及成因分析[J].中国农业气象,2017,38(5): 267-277. Hu Q,Dong B,Pan X B,et al.Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate at different time scales in north China plain[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2017,38(5):267-277.(in Chinese)
- [26] 李晓川,陶辉,刘厚勇,等.气候变化对库尔勒香梨始花期的 影响及其预测模型[J].中国农业气象,2012,33(1):119-123. Li X C,Tao H,Liu H Y,et al.The impact and prediction of climate change on first-flowering date of Korla Fragrant pear[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2012,33(1): 119-123.(in Chinese)
- [27] Iwama H.Negative air ions created by water shearing improve erythrocyte deformability and aerobic metabolism[J]. Indoor Air,2004(14):293-297.
- [28] 季玉凯.棋盘山风景区空气负离子分布与变化规律的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2007:1-46. Ji Y K.Distribution and variation of negative air ions in Qipanshan scenic area[D].Shenyang:Shenyang Agricultural University,2007:1-46.(in Chinese)
- [29] 陈欢,章家恩.空气负离子浓度分布的影响因素研究综述 [J].生态科学,2010,29(2):181-185. Chen H,Zhang J E.Review on factors influencing the concentration distribution of negative air ions[J].Ecological Science,2010,29(2):181-185.(in Chinese)
- [30] 蔡怡亨,蔡元刚,陈东东,等.利用地面气象资料建立四川省 日总辐射计算模型[J].中国农业气象,2019,40(9):543-556. Cai Y H,Cai Y G,Chen D D,et al.Using surface meteorological data to establish daily total solar radiation calculation model for Sichuan province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(9):543-556.(in Chinese)
- [31] 左琛,宋锋惠,罗达,等.新疆平欧杂种榛种植气候区划[J]. 中国农业气象,2020,41(3):146-155. Zuo C,Song F H,Luo D,et al.Climate regionalization of hybrid hazel planting in Xinjiang[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(3):146-155.(in Chinese)
- [32] 李辉,姚凤梅,张佳华,等.东北地区玉米气候产量变化及其 对气候变化的敏感性分析[J].中国农业气象,2014, 35(4): 423-428. Li H,Yao F M,Zhang J H,et al.Analysis on climatic maize yield and its sensitivity to climate change in northeast China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2014, 35(4): 423-428.(in Chinese)
- [33] 康丽娟,巴特尔·巴克,罗那那,等.阿勒泰地区不同时间尺 度参考作物蒸散量的时空变化及影响[J].中国农业气 象,2018,39(8):502-511. Kang L J,Bateer B K,Luo N N,et al.Temporal and spatial variation of reference crop evapotranspiration at different time scales in Altay[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2018,39(8):502-511.(in Chinese)
- [34] 石彦军,余树全,郑庆林.6种植物群落夏季空气负离子动态 及其与气象因子的关系[J].浙江农林大学学报,2010,27(2): 185-189. Shi Y J,Yu S Q,Zheng Q L.Aero-anion ecological efficacy in six types of plant communities[J].Journal of Zhejiang Forestry College,2010,27(2):185-189.(in Chinese)
- [35] Deng L.Review on research of the negative air ion concentration distribution and its correlation with meteorological elements in mountain tourist area[J].Earth Sciences,2019,8(1):60-68.
- [36] Sinicina N,Skromulis A,Martinovs A.Impact of microclimate and indoor plants on air ion concentration[J]. Environment Technology Resources,2013(1): 66-72.
- [37] 李爱博,周本智,李春友.基于控制实验的 6 个典型亚热带 树种空气负离子效应[J].林业科学研究,2019(4):120-128. Li A B,Zhou B Z,Li C Y.Negative air Ion effect of six typical subtropical tree species based on control experiment[J].Forestry Research,2019(4):120-128.(in Chinese)
- [38] 李爱博,赵雄伟,李春友.基于控制试验的植株数量及空气 温湿度与负离子的关系[J].应用生态学报,2019(7): 2211-2217. Li A B,Zhao X W,Li C Y.Relationship of plant abundance,

- air temperature and humidity with negative ions based on control experiment[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2019(7):2211-2217.(in Chinese)
- [39] Wu C C, Lee G W M, Yang S, et al. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370(1):245-253.
- [40] Smirnov B. Cluster ions and van der Waals Molecules[M]. Gordon and Breach Science Publishers, 1992:54-61.
- [41] Hörrak U, Salm J, Tammet H. Bursts of intermediate ions in atmospheric air[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103(D12):13909-13915.
- [42] Luts A. Evolution of negative small ions at enhanced ionization[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1995, 100(D1):1487-1496.
- [43] Skalny J D, Mikoviny T, Matejcik S. An analysis of mass spectrometric study of negative ions extracted from negative corona discharge in air[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233:317-324.
- [44] Kalivitis N. Night-time enhanced atmospheric ion concentrations in the MBL[J]. Atmos. Chem. Phys., 2012(12): 3627-3638.