

# 基于控制实验的6个典型亚热带树种 空气负离子效应

李爱博<sup>1,2</sup>, 周本智<sup>2</sup>, 李春友<sup>1\*</sup>, 叶明<sup>3</sup>, 杨振亚<sup>2</sup>, 赵雄伟<sup>1</sup>,  
童冉<sup>2</sup>, 曹永慧<sup>2</sup>, 赵亚敏<sup>2,4</sup>

(1. 河北农业大学, 河北 保定 071000; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 钱江源森林生态系统国家定位观测研究站, 浙江 杭州 311400; 3. 浙江省建德市寿昌林场, 浙江 建德 311600; 4. 浙江师范大学, 浙江 金华 321004)

**摘要:** [目的] 比较分析不同树种的生理特性差异及其对空气负离子(NAI)浓度影响,为探究森林植被对NAI作用机理提供理论依据。[方法] 2018年6—9月,在中国林科院亚热带林业研究所人工气候室内,分别对6个典型亚热带树种NAI效应进行连续定位监测,选择无植株的土盆作为空白对照,并对各树种叶片形态特征、叶绿素荧光参数、叶绿素含量等性状特征进行测定和分析。[结果] 人工气候室放入植株后,NAI浓度均极显著高于对照组( $P < 0.01$ );植株NAI浓度由高到低依次为:红豆杉( $876 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 枫香( $828 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 杉木( $733 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 榉树( $685 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 青冈( $677 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 闽楠( $665 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 对照( $345 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。总体而言,针叶树种NAI效应显著大于阔叶树种( $P < 0.05$ ),落叶阔叶树种NAI效应显著大于常绿阔叶树种( $P = 0.05$ )。NAI浓度同树种叶尖数、叶片含水量和叶面积均呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与叶生物量显著正相关( $P < 0.05$ ),与叶绿素a/叶绿素b显著负相关( $P < 0.05$ )。比较阔叶树种可得出,叶厚度及叶片长宽比与NAI浓度呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与大多数叶绿素荧光参数指标呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。[结论] 试验树种显著提高空气负离子(NAI)浓度,树种间NAI效应存在差异,针叶树种NAI效应高于阔叶树种,落叶阔叶树种NAI效应高于常绿阔叶树种。叶片形态、叶尖数和光合荧光生理特性等是造成树种间NAI效应差异的重要原因。

**关键词:** 人工气候室;空气负离子;亚热带树种;叶片性状特征

**中图分类号:** S718.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)04-0120-09

空气负离子(Negative air ion,简称NAI)被誉为“空气维生素和生长素”<sup>[1-2]</sup>,具有抑菌杀菌、降尘等作用<sup>[3-5]</sup>,有益于增加人体免疫力,提高人体的各项生理机能<sup>[6-7]</sup>。NAI浓度已被列为评价地区环境空气质量的重要指标之一<sup>[8-9]</sup>。根据大地测量学和地理学国际联盟大气联合委员会采用的理论,空气负离子的分子式 $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ 或 $(\text{OH})^-(\text{H}_2\text{O})_n$ 或 $\text{CO}_4^-(\text{H}_2\text{O})_n$ <sup>[10]</sup>。研究表明产生NAI的能量来源多种,自然界中的放射性物质电离作用、水的勒纳德(Lenard)效应、森林树冠及植物枝叶尖端放电、叶片

光合作用形成的光电效应等均会使大气中产生大量负氧离子<sup>[11-13]</sup>。国外的研究主要侧重NAI浓度变化规律及医疗健康的应用等方面<sup>[2,14-15]</sup>,Hirsikko和Richardson等对NAI浓度的时间和空间分布规律进行探讨<sup>[9,16]</sup>,认为不同径级的空气负离子具有不同的季节分布规律,NAI浓度与垂直距离的对数具有线性关系。我国对空气负离子的研究起步相对较晚<sup>[2]</sup>,近年来已有学者对NAI浓度与空气温湿度等环境因子间的相关关系进行研究,大多认为NAI浓度与空气温度呈负相关,与空气湿度呈正相关,但研

收稿日期: 2018-10-21 修回日期: 2019-01-22

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: 李春友. E-mail: lchy0815@163.com

究结果并不完全一致,目前还未得出明确结论<sup>[4,14,17]</sup>。部分研究者在室外对不同树种或林分结构空气负离子水平进行比较<sup>[18-21]</sup>,还有一些学者在室内对不同观赏植物的负离子浓度进行研究<sup>[10,22-23]</sup>,均表明植物对NAI浓度有一定促进作用,不同植物对NAI浓度影响具有差异,且1d内空气中负氧离子含量随时间不断发生变化,出现峰值的时刻有所不同。

植物叶片作为空气负离子产生场所之一,其生理特性与负离子浓度的关系具有很高的研究意义<sup>[24]</sup>。然而,现有研究大多以NAI浓度日变化规律观测及其与环境因子相关分析为主,对植物生理机制方面的讨论较少,特别是控制环境下的NAI浓度与植物生理效应的研究还鲜有报道。同时由于多种条件的限制,前人大多使用便携式设备测定NAI浓度的瞬时值,数据量少且波动大。因此,作者采用空气负离子自动监测系统实时定位测定空气中的负离子浓度,每秒记录一次数据,并通过人工气候室控制环境因子,减小了人为因素干扰和温湿度、风速等环境因子带来的误差,数据量和可靠性均较以往有了很大提升。本试验对亚热带地区6个典型树种NAI产生效应及其与生理特性关系进行初步研究,以期探究森林植被对NAI作用机理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在浙江钱江源森林生态系统国家定位观测站虎山试验基地(119°95' E,30°05' N)进行。该地属亚热带季风湿润气候,四季分明。地貌类型较为复杂,低山、丘陵面积广大,平均海拔高度300.5 m。全年平均气温18.1℃,平均相对湿度77%,年降水量1415.7 mm,年日照时数1816 h。夏季气候炎热、湿润,平均气温为28.2℃,平均相对湿度79.3%,降水量723.8 mm,日照时数663.2 h。

### 1.2 试验材料

1.2.1 植物材料 以青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang)、榉树(*Zelkova schneideriana* Hand.-Mazz.)、红豆杉(*Taxus chinensis* (Pilger) Rehd.)和杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)6个不同科的亚热带典型树种为试验材料(表1)。所用2年生苗木均购自浙江开化县林场,同一树种各植株的生理状态和形态特征基本相同,苗木栽植于高17 cm、口径25 cm的花盆中,每盆栽植1株,盆内为3 kg黄土和2 kg泥炭土。于试验基地内培育适应后开始试验。

表1 供试树种及基本特征

Table 1 Experimental tree species and basic characteristics

编号 Number	种名 Specific name	科名 Plant family name	类型 Type	苗高 Seedling height/cm	地径 Ground diameter/mm	苗龄 Seedling age/a
S1	青冈 <i>C. glauca</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿阔叶 Evergreen broadleaf	105.75 ± 6.80	7.45 ± 1.18	2
S2	枫香 <i>L. formosana</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶阔叶 Deciduous broadleaf	98.87 ± 4.74	7.23 ± 1.00	2
S3	红豆杉 <i>T. chinensis</i>	红豆杉科 Taxaceae	针叶 Conifer	109.17 ± 2.32	8.05 ± 0.60	2
S4	闽楠 <i>Ph. bournei</i>	樟科 Lauraceae	常绿阔叶 Evergreen broadleaf	108.40 ± 2.39	9.25 ± 0.24	2
S5	杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉科 Taxodiaceae	针叶 Conifer	63.30 ± 2.69	6.43 ± 0.41	2
S6	榉树 <i>Z. schneideriana</i>	榆科 Ulmaceae	落叶阔叶 Deciduous broadleaf	165.77 ± 14.44	8.71 ± 0.65	2

1.2.2 试验仪器 采用北京雨根科技有限公司研发的RR-9411A空气负离子自动监测系统,进行24 h空气负离子浓度、温湿度、光照总辐射等参数的测量。系统含有DTU900C型GPRS远程传输模块,方便数据传输获取,减小了人为因素的干扰,数据量大且波动幅度小。该仪器主要测量离子迁移率 $\geq 0.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小粒径大气负离子浓度,测量范围为 $0 \sim 1.2 \times 10^7 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,测量离子浓度误差 $\leq \pm 10\%$ 。使用6盏额定功率为100 W的FL2C-2型

LED投光灯为室内植物提供光照;使用752N紫外可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)测定叶片浸提液吸光度并计算叶绿素含量;植物叶片叶绿素荧光参数使用LI-6400便携式光合作用测定仪(LICOR, Lincoln, Nebraska, USA)测定。

### 1.3 试验方法

试验于2018年6—9月在虎山试验基地的人工气候室内进行,室内面积 $10 \text{ m}^2$ ,高度3 m。为了满足植物正常生命活动进行,气候室内模拟室外日平

均温湿度,控制恒温( $30 \pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、恒湿( $70 \pm 10$ )%。每日6:00—19:00开灯照明,夜晚关闭。通过人工气候室控制环境因子,尽量排除了温湿度、风速和太阳辐射等环境因子的干扰。为消除人为因素的干扰,负氧离子监测完成后,隔日上午9:00—11:00进行叶绿素荧光等生理特性测定及植株收获,立即带回实验室测量叶片生物量、面积、长宽比、厚度、含水量和叶绿素含量等其它相关性状特征。

**1.3.1 空气负离子测定** 将负离子传感器置于气候室内中央位置,测定人体呼吸高度1.5 m处的NAI浓度。1 s读数1次计算3 min均值并自动上传到PC端,最终计算NAI浓度日平均值进行对比分析。每种植物监测完成后空室1 d,避免对下一树种试验结果造成影响。研究表明室内单株植物释放的NAI很难被检测<sup>[10]</sup>,为获取本试验测量数据,每次试验时室内均匀放入40株长势一致的同种植物,经一段时间适应后统计数据。研究表明土壤对空气负氧离子也具有一定影响<sup>[25-26]</sup>,故本试验将无植株的同等规格、相同土壤的花盆放入气候室内,作为空白对照。

**1.3.2 叶片性状特征测定** 由于样本数量较多,试验选取6株长势中等的植株为代表进行叶片性状测定。叶面积采用剪纸称质量法进行测定<sup>[27]</sup>,随机选取10片鲜叶用分析天平称质量后,将叶片平铺在A4纸上,沿边缘画线并剪下,称纸质量后换算求得叶面积;将全部叶片摘下放入烘箱内,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青后,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量称得叶片干物质量;叶片含水量通过公式(鲜质量-干质量)/鲜质量 $\times 100\%$ 计算得出;叶片的长度、宽度、厚度使用游标卡尺进行测量;阔叶树种的叶尖数统计方式为叶片全部采下逐片计数,针叶树种则采用计数方式,每株取300片叶片称质量,并称取全部鲜叶质量后换算求得;在每株植物上选取3~5片叶子,参考李得孝等<sup>[28]</sup>的方法进行叶绿素含量测定;选取植株上部受光良好的成熟叶片(从顶部数第3~4片叶),于上午9:00—11:00使用LI-6400便携式光合作用测定仪进行叶绿素荧光参数测定<sup>[29]</sup>。

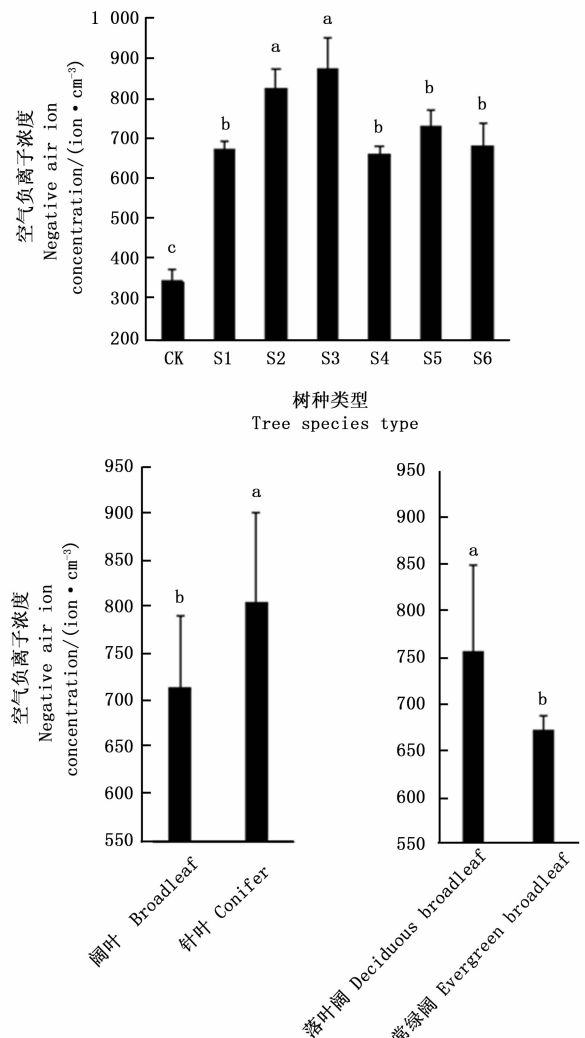
## 1.4 数据统计分析

采用Microsoft Excel 2007软件对测量数据加以运算整理和图表绘制,将各树种的NAI浓度日均值加权平均作为比较不同树种类型的NAI浓度依据,利用SPSS 17.0软件进行单因素方差分析及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同树种的NAI效应

由图1可知,人工气候室条件下测得的6个树种空气负离子(NAI)浓度日平均值依次为:红豆杉( $876 \pm 78 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 枫香( $828 \pm 49 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 杉木( $733 \pm 42 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 榉树( $685 \pm 58 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 青冈( $677 \pm 18 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 闽楠( $665 \pm 17 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 对照( $345 \pm 32 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。方差分析表明,气候室内6个树种的NAI浓度日平均值与对照组具有极显著差异( $P < 0.01$ ),分别为对照试验浓度的2.53、2.4、2.12、1.98、1.96和1.92倍。红豆杉与枫香的NAI效应均极显著高于其它4个树



注:不同字母表示不同树种间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters indicated significant difference among different tree species at 0.05 level.

图1 不同树种NAI浓度

Fig. 1 NAI concentration of different tree species

种( $P < 0.01$ ),且两者间差异不显著( $P = 0.228$ )。红豆杉和枫香的NAI浓度日平均值分别比最低的闽楠高31.73%和24.51%;经LSD多重比较分析,得出杉木、闽楠、榉树和青冈间NAI浓度差异均不显著。

结果表明,所测2个针叶树种的NAI浓度日平均值显著高于4个阔叶树种的日平均值( $P = 0.046$ ),为阔叶树种的1.12倍。2个针叶树种NAI浓度日平均值为 $805 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,4个阔叶树种的NAI浓度日平均值为 $714 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。将4个阔叶树种进行比较分析,得出常绿阔叶树种NAI浓度显著低于落叶阔叶树种( $P = 0.05$ )。枫香与榉树NAI浓度日平均值为 $757 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,青冈和闽楠NAI浓度日平均值为 $672 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。单位叶面积NAI浓度从高到低为:青冈( $1.69 \times 10^{-2} \text{ ion}$ ) > 杉木( $1.63 \times 10^{-2} \text{ ion}$ ) > 榉树( $0.92 \times 10^{-2} \text{ ion}$ ) > 闽楠( $0.81 \times 10^{-2} \text{ ion}$ ) > 红豆杉( $0.78 \times 10^{-2} \text{ ion}$ ) > 枫香( $0.67 \times 10^{-2} \text{ ion}$ );单位生物量NAI浓度从高到低为:榉树( $2.62 \pm 0.22 \text{ ion}$ ) > 杉木( $2.27 \pm 0.13 \text{ ion}$ ) > 青冈( $1.65 \pm 0.04 \text{ ion}$ ) > 枫香( $1.57 \pm 0.09 \text{ ion}$ ) > 红豆杉( $1.10 \pm 0.10 \text{ ion}$ ) > 闽楠( $1.01 \pm 0.03 \text{ ion}$ )。

## 2.2 树种叶片性状与NAI浓度的相关性分析

### 2.2.1 形态特征及部分生理指标与NAI浓度相关性分析

植物光合作用释放氧气是空气负离子的重要来源之一<sup>[3]</sup>,叶片生物量、叶片含水量、叶片面积和叶片厚度质地等对植物光合、呼吸、蒸腾和挥发性有机物释放等生态功能和植物生长代谢活动都具有

重要意义<sup>[30]</sup>;叶片尖端放电产生等离子体也是负氧离子的生成途径<sup>[31]</sup>。对6个树种的NAI浓度与植物叶片性状进行Pearson相关性比较分析,可知NAI浓度与叶尖数、叶片含水量、叶面积均在 $P < 0.01$ 水平上呈极显著正相关,相关系数分别为0.691、0.830、0.666。NAI浓度与叶生物量呈显著正相关( $P < 0.05, R = 0.504$ ) (表2)。进一步分析阔叶树种的相关性得知,NAI浓度与叶尖数、叶面积、叶片含水量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),相关系数分别为0.754、0.742、0.822。NAI浓度同叶片长宽比和叶厚度在0.05水平上呈显著负相关,相关系数分别为-0.701、-0.684 (表3)。试验数据显示,红豆杉的叶生物量最高,为19.84 g,极显著大于除闽楠外的4个测试树种( $P < 0.01$ ),叶生物量最小的榉树仅为红豆杉的32.96%。枫香的叶面积略大于红豆杉,但差异不显著( $P = 0.316$ ),两者均显著大于其它树种( $P < 0.05$ )。叶面积最大的枫香约为青冈的3.11倍。红豆杉的叶尖数最多,与其它试验树种均具有极显著差异( $P < 0.01$ ),叶尖数平均值约为青冈的61.5倍。叶片含水量从高到低依次为:红豆杉 > 枫香 > 杉木 > 榉树 > 闽楠 > 青冈,红豆杉和枫香差异不显著( $P = 0.597$ ),杉木和榉树差异不显著( $P = 0.188$ ),闽楠和青冈无显著差异( $P = 0.143$ )。闽楠和红豆杉叶片相对较厚,叶厚度

分别为0.44 mm和0.41 mm,枫香叶片相对最薄,平均厚度仅为0.19 mm,显著低于其它试验树种( $P < 0.05$ ) (表4)。

表2 6个树种NAI与叶片性状Pearson相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between NAI and leaf traits among six tree species

项目 Item	叶尖数 Leaf tip number	叶片长宽比 Leaf length-width ratio	叶厚度 Leaf thickness	叶面积 Leaf area	叶生物量 Leaf biomass
NAI	0.691 **	0.179	-0.152	0.666 **	0.504 *
项目 Item	叶片含水量 Leaf water content	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a Chl a + 叶绿素 b Chl b	叶绿素 a Chl a / 叶绿素 b Chl b
NAI	0.830 **	-0.120	-0.024	-0.098	-0.535 *
项目 Item	类胡萝卜素 Car	$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$
NAI	0.021	0.021	0.357	0.335	0.170
项目 Item	$qP$	$qN$	$ETR$	$\Phi PSII$	
NAI	0.170	-0.207	0.215	0.215	

注: \*\*表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; \*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。 $F_o$ :固定荧光; $F_m$ :最大荧光; $F_v$ :可变荧光; $F_v/F_m$ :PSII原初光能转化效率; $qP$ :光化学猝灭系数; $qN$ :非光化学猝灭系数; $ETR$ :表观电子传递效率; $\Phi PSII$ :PSII实际量子产量;下表同。

Note: \*\* Significant correlation at  $P < 0.01$  level; \* Significant correlation at  $P < 0.05$  level.  $F_o$ : Fixed fluorescence;  $F_m$ : Maximum fluorescence;  $F_v$ : Variable fluorescence;  $F_v/F_m$ : Conversion efficiency of primary light energy in PSII;  $qP$ : Photochemical quenching coefficient;  $qN$ : Non-photochemical quenching coefficient;  $ETR$ : Apparent electron transfer efficiency;  $\Phi PSII$ : Actual quantum yield of PSII; The following table is identical.

表3 阔叶树种 NAI 与叶片性状 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient between NAI and leaf traits among broad-leaved tree species

项目 Item	叶尖数 Leaf tip number	叶片长宽比 Leaf Length-width ratio	叶厚度 Leaf thickness	叶面积 Leaf area	叶生物量 Leaf biomass
NAI	0.754 **	-0.701 *	-0.684 *	0.742 **	0.128
项目 Item	叶片含水量 Leaf water content	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a Chl a + 叶绿素 b Chl b	叶绿素 a Chl a/叶绿素 b Chl b
NAI	0.822 **	0.185	0.279	0.098	-0.665 *
项目 Item	类胡萝卜素 Car	$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$
NAI	0.317	-0.459	0.891 **	0.876 **	0.752 **
项目 Item	$qP$	$qN$	$ETR$	$\Phi PSII$	
NAI	0.567	-0.884 **	0.796 **	0.795 **	

表4 6个树种叶片形态及相关生理特性方差分析

Table 4 Variance analysis of leaf morphology and some physiological characteristics among six tree species

编号	叶生物量 Leaf biomass/g	叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>	叶片含水量 Leaf water content/%	叶片长宽比 Leaf length-width ratio	叶厚度 Leaf thickness/mm	叶尖数 Leaf tip number/个
S1	(10.28 ± 1.97) cd	(999.23 ± 112.74) c	(43.93 ± 2.16) c	(2.59 ± 0.24) cd	(0.36 ± 0.02) b	(60 ± 18) c
S2	(13.16 ± 3.19) bc	(3 108.34 ± 471.85) a	(71.67 ± 3.01) a	(0.90 ± 0.01) d	(0.19 ± 0.01) e	(423 ± 118) c
S3	(19.84 ± 2.64) a	(2 807.79 ± 534.71) a	(73.32 ± 1.56) a	(9.72 ± 1.25) b	(0.41 ± 0.03) ab	(3 692 ± 754) a
S4	(16.50 ± 0.11) ab	(2 060.82 ± 72.13) b	(52.65 ± 0.85) c	(4.40 ± 0.23) c	(0.44 ± 0.03) a	(221 ± 17) c
S5	(8.06 ± 1.04) d	(1 122.35 ± 230.34) c	(63.92 ± 1.97) b	(16.64 ± 2.36) a	(0.29 ± 0.03) c	(1 275 ± 174) b
S6	(6.54 ± 4.21) d	(1 854.92 ± 756.77) b	(59.69 ± 7.87) b	(1.98 ± 0.04) d	(0.24 ± 0.01) d	(232 ± 44) c

注:表中数据为测定的平均值 ± 标准误;表中同列小写英文字母不同者表示差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: The data in the table is the mean ± standard error of the measurement; There are significant differences among the different lowercase letters in the table ( $P < 0.05$ ). The following table is identical.

2.2.2 叶绿素含量与 NAI 浓度相关性分析 叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,是反映植物光合能力的重要指标之一<sup>[32]</sup>。叶绿素 a/叶绿素 b 能够反映植物在弱光条件下的光合活性,数值越低表明植物在弱光条件下活性越高<sup>[33-34]</sup>。相关性分析得出 NAI 浓度与树种叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + 叶绿素 b 的含量均无显著相关关系,相关系数分别为 -0.120、-0.024、-0.098,NAI 浓度与叶绿素 a/叶绿素 b 显著负相关( $P < 0.05$ ,  $R = -0.535$ ) (表2)。对阔叶树种分析后得出同样的结论(表

3)。单因素方差分析可知,榉树的叶绿素 a、叶绿素 b 含量均显著高于其它树种( $P < 0.05$ ),总叶绿素含量为杉木的 2.96 倍。红豆杉和杉木 2 个针叶树种的叶绿素含量相对较低,分别为  $(2.38 \pm 0.22) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $(1.66 \pm 0.21) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,说明所测针叶树的光合能力可能弱于阔叶树种。阔叶树种中枫香的叶绿素 a/叶绿素 b 值最低,平均值为 3.16。青冈的叶绿素 a/叶绿素 b 值最高,平均值为 3.73,且与其它树种差异显著( $P < 0.05$ ) (表5)。

表5 6个树种叶绿素含量方差分析

Table 5 Variance analysis of chlorophyll content among six tree species

编号 Number	叶绿素 a Chl a/(mg · g <sup>-1</sup> )	叶绿素 b Chl b/(mg · g <sup>-1</sup> )	叶绿素 a Chl a + 叶绿素 b Chl b/(mg · g <sup>-1</sup> )	叶绿素 a Chl a/ 叶绿素 b Chl b	类胡萝卜素 Car/(mg · g <sup>-1</sup> )
S1	(1.67 ± 0.35) c	(0.45 ± 0.10) d	(2.11 ± 0.44) d	(3.73 ± 0.06) a	(1.82 ± 0.35) de
S2	(2.87 ± 0.65) b	(0.90 ± 0.23) b	(3.77 ± 0.88) b	(3.19 ± 0.09) cd	(3.28 ± 0.70) ab
S3	(1.81 ± 0.16) c	(0.57 ± 0.06) cd	(2.38 ± 0.22) cd	(3.16 ± 0.06) d	(2.31 ± 0.14) cd
S4	(2.35 ± 0.24) bc	(0.67 ± 0.08) c	(3.02 ± 0.32) bc	(3.50 ± 0.07) b	(2.66 ± 0.27) bc
S5	(1.24 ± 0.17) c	(0.42 ± 0.05) d	(1.66 ± 0.21) d	(2.97 ± 0.13) e	(1.44 ± 0.19) e
S6	(3.79 ± 0.04) a	(1.13 ± 0.04) a	(4.92 ± 0.05) a	(3.34 ± 0.13) bc	(3.78 ± 0.14) a

2.2.3 叶绿素荧光特性与 NAI 浓度相关性分析 叶绿素荧光特性主要反映了光合机构光系统 II (PSII) 的生理生化变化,是光合作用的探针<sup>[35]</sup>,通

过对各种荧光参数的分析,可以得到有关光能利用途径的信息。 $F_v/F_m$  反映了 PSII 反应中心最大光能转化效率,比值小说明发生光抑制可能性大; $ETR$  反

映了PSII反应中心内电子传递情况; $\Phi PSII$ 可以评价PSII反应中心实际初光能捕获效率; $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v$ 通常被用作评估植物PSII反应中心活性<sup>[36]</sup>。整体比较6个树种NAI浓度与叶片叶绿素荧光特性的相关性后得出,两者并无显著相关关系(表2),对阔叶树种分析显示NAI浓度与非光化学猝灭系数( $qN$ )在0.01水平上呈极显著负相关,与光化学猝灭系数

( $qP$ )和固定荧光( $F_o$ )相关性不显著,与其余测量的荧光指标均在0.01水平上呈极显著正相关(表3)。结果显示,枫香的光能实际捕获效率、转化效率和PSII反应中心电子传递活性均显著优于其它树种( $P < 0.05$ )。针叶树种各项数据低于阔叶树种,且阔叶常绿树种低于落叶常绿树种(表6)。

表6 6个树种叶绿素荧光特性方差分析

Table 6 Variance analysis of chlorophyll fluorescence characteristics among six species

编号 Number	$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$	$qP$	$qN$	ETR	$\Phi PSII$
S1	(683.27 ± 59.40) ab	(2 941.28 ± 427.17) b	(2 258.00 ± 386.94) b	(0.76 ± 0.03) b	(0.62 ± 0.06) a	(0.81 ± 0.06) a	(63.51 ± 11.63) b	(0.29 ± 0.05) b
	(627.36 ± 19.69) c	(3 424.49 ± 156.12) a	(2 797.13 ± 167.64) a	(0.82 ± 0.01) a	(0.65 ± 0.10) a	(0.65 ± 0.05) b	(88.98 ± 17.13) a	(0.41 ± 0.08) a
S2	(695.50 ± 68.04) ab	(2 938.71 ± 151.12) b	(2 243.20 ± 84.97) b	(0.76 ± 0.01) b	(0.48 ± 0.15) ab	(0.85 ± 0.04) a	(42.40 ± 13.73) c	(0.19 ± 0.06) c
	(633.99 ± 21.66) bc	(2 973.31 ± 44.57) b	(2 339.32 ± 55.95) a	(0.79 ± 0.01) ab	(0.49 ± 0.04) ab	(0.79 ± 0.01) a	(49.62 ± 4.33) bc	(0.23 ± 0.02) bc
S3	(594.16 ± 30.53) c	(2 893.53 ± 238.72) b	(2 299.37 ± 245.89) b	(0.79 ± 0.02) ab	(0.45 ± 0.12) b	(0.85 ± 0.03) a	(47.44 ± 12.72) bc	(0.22 ± 0.06) bc
	(717.65 ± 41.11) a	(3 003.93 ± 266.37) b	(2 286.27 ± 306.98) b	(0.76 ± 0.04) b	(0.43 ± 0.17) b	(0.80 ± 0.04) a	(41.84 ± 14.78) c	(0.19 ± 0.07) c

### 3 讨论

人工气候室条件下6个亚热带典型树种对空气负离子浓度具有显著影响,测得浓度值均极显著高于对照组,这与大多数学者的研究结果一致<sup>[10,19]</sup>,主要原因是植物枝叶尖端放电,叶片光合作用形成的光电效应等均会使空气中产生大量负氧离子。结果显示,NAI浓度与叶面积、叶生物量、叶尖数呈正相关关系,与大多数学者的研究结果一致<sup>[11,37-38]</sup>;胡国长<sup>[39]</sup>研究显示,叶绿素含量、叶片长宽比均与NAI浓度呈正相关关系,李萌萌<sup>[40]</sup>认为NAI浓度与除叶绿素a以外的其它叶片色素含量均呈显著负相关关系。本研究对6个树种比较分析后并未得出相同结论,进一步分析阔叶树种得出长宽比与NAI浓度呈负相关,这可能是由于试验树种间其它与负离子相关指标差异过大,显著降低了上述指标的影响。

本试验所测6个树种间NAI浓度日平均值存在一定差异,与前人的研究得出相似结论<sup>[18,26,41]</sup>。方差分析表明,红豆杉和枫香的NAI效应显著高于其它4个树种,主要是由于2个树种的总叶面积和叶片含水量均显著大于其它树种。赵怡宁等<sup>[24]</sup>研究表明,植物光合作用与空气负离子呈显著正相关关

系。叶面积越大植物光合效率可能越明显,释放的氧气越多。叶片含水量越大植物的生长代谢活动越明显。分析枫香的荧光特性得知,其对光能的捕获效率、电子传递效率以及光能转化效率均为最佳,且有研究表明叶片中芳香类化合物含量同样对NAI浓度存在影响<sup>[11,39]</sup>。红豆杉的内在电子传递较弱,但叶尖数极显著大于其它树种,尖端放电是导致其NAI浓度高的主要原因。虽然闽楠的叶生物量与枫香等无显著差异,但NAI效应却最低,可能是由于闽楠叶片相对最厚,叶片含水量相对较低,叶绿素a/叶绿素b值高,叶片在气候室内弱光条件下的光合活性较低造成的。闽楠、青冈、杉木、榉树的NAI效应差异并不明显,杉木未表现出较高的NAI效应可能是由于杉木叶生物量小且植株较矮,负离子采集器高度为1.5 m,负离子传递过程中存在扩散消亡,张帅<sup>[11]</sup>的试验得到相似结论。虽然青冈的叶面积和叶片含水量均为最低,但与闽楠等树种的NAI效应无显著差异可能是由于青冈叶片前端呈锯齿状,增强了电子释放能力。

本研究中,针叶树种NAI效应显著高于阔叶树种,与大部分学者研究结果一致<sup>[1,20]</sup>,也有部分学者持相反观点<sup>[42-43]</sup>,可能是由于植物的生长状态不同,研究条件存在差异造成的。分析叶绿素荧光特

性得知,针叶树种的光合及内在电子传递能力均低于阔叶树种,而其 NAI 效应较高可能是因为针叶树种的叶尖数极显著高于阔叶树种,叶尖可能为电子释放提供了更多的通道,植株生理活动过程中电子可以更好地通过叶尖释放到空气中,且针叶叶片的曲率半径小,尖端放电产生等离子体使空气发生电离的作用更加明显<sup>[44]</sup>。本研究结果显示落叶阔叶树种 NAI 效应显著高于常绿阔叶树种,王轶浩等<sup>[45]</sup>的研究得出类似结论。经分析认为,可能是本试验所用 2 种落叶树种的叶片相对较薄,保水能力较差,植株蒸腾过程中散失到空气中的水分子增加,叶绿素含量相对较高,植物光合能力较强,氧气和水分子比氮气更具有亲电性,更易形成空气负离子<sup>[46]</sup>。数据显示落叶阔叶树种的光合能力、对弱光的利用能力、体内电子传递及光能转换效率均优于常绿树种,且叶绿素荧光特性指标与 NAI 浓度呈极显著正相关,表明光合能力及叶绿素荧光特性是影响阔叶树种 NAI 浓度的关键指标,对阔叶树种的 NAI 效应贡献作用更大。

本试验仅对 6 个亚热带常见树种 NAI 效应进行了初步的测定分析,研究结果存在一定程度的不确定性,且植物的高 NAI 效应是由于本身释放出 NAI 较多还是保持空气中负氧离子浓度能力较强,暂无法作出具体的分析,日后需深入研究。

## 4 结 论

(1) 试验树种显著提高空气负离子 (NAI) 浓度。所测 6 个树种的 NAI 效应存在差异,不同树种 NAI 浓度由高到低依次为:红豆杉 ( $876 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 枫香 ( $828 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 杉木 ( $733 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 榉树 ( $685 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 青冈 ( $677 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 闽楠 ( $665 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 对照 ( $345 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。红豆杉和枫香的 NAI 效应显著高于其它 4 个树种。

(2) NAI 效应与树种叶面积、叶生物量、叶片含水量及叶尖数呈正相关;NAI 效应与叶绿素 a/叶绿素 b 呈负相关;NAI 效应同叶绿素含量、叶片长宽比相关性不显著;阔叶树种的 NAI 效应与叶绿素荧光特性呈正相关,与叶厚度、叶片长宽比呈负相关。

(3) 总体而言,针叶树种 NAI 效应高于阔叶树种,落叶阔叶树种 NAI 效应高于常绿阔叶树种。叶生物量、叶面积、叶尖数及叶片含水量可作为评价植物 NAI 效应的重要指标;叶片形态、叶尖数以及叶片光合能力、叶绿素荧光特性是造成树种间 NAI 效应

差异的重要原因。

## 参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 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,2013,22(4):705-711.
- [3] 章志攀,俞益武,张明如,等. 天目山空气负离子浓度变化及其与环境因子的关系[J]. 浙江农林大学学报,2008,25(4):481-485.
- [4] 韦朝领,王敬涛,蒋跃林,等. 合肥市不同生态功能区空气负离子浓度分布特征及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报,2006,17(11):2158-2162.
- [5] 熊丽君,赵艳佩,黄沈发,等. 基于空气负离子的生态用地健康效益评价[J]. 生态环境学报,2014,23(6):985-991.
- [6] Alexander D D, Bailey W H, Perez V, et al. Air ions and respiratory function outcomes: a comprehensive review[J]. Journal of Negative Results in Bio Medicine, 2013, 12(2): 1-16.
- [7] 司婷婷,罗艳菊,黄 宇,等. 吊罗山热带雨林雾天空气负离子含量分布特征及其与气象要素的关系[J]. 海南师范大学学报:自然科学版,2015,28(2):199-202.
- [8] 王 薇,余 庄,冀凤全. 基于空气负离子浓度的城市环境空气质量评价[J]. 生态环境学报,2013,22(2):298-303.
- [9] 黄向华,王 健,曾宏达,等. 城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1761-1768.
- [10] 吴仁焯,邓传远,王 彬,等. 具备释放负离子功能室内植物的种质资源研究[J]. 中国农学通报,2011,27(8):91-97.
- [11] 张 帅. 植物与空气离子关系的研究[D]. 南京:南京林业大学,2010.
- [12] 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.
- [13] 曾曙才,苏志尧,陈北光. 我国森林空气负离子研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(5):107-111.
- [14] 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.
- [15] Krueger A P. The biological effects of air ions[J]. International Journal of Biometeorology, 1985, 29(3): 205-206.
- [16] Richardson G, Harwood D J, Eick S A, et al. Reduction of fine airborne particulates (PM<sub>3</sub>) in a small city center office by altering electrostatic forces[J]. Science of the Total Environment, 2001, 269(1):145-155.
- [17] 王 薇. 空气负离子浓度分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报,2014,23(6):979-984.
- [18] 吴际友,程政红,龙应忠,等. 园林树种林分中空气负离子水平的变化[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(4):78-80.
- [19] 周 斌,余树全,张 超,等. 不同树种林分对空气负离子浓度的影响[J]. 浙江农林大学学报,2011,28(2):200-206.
- [20] 穆 丹,梁英辉. 不同树种对空气负离子水平的影响[J]. 安徽

- 农业科学,2010,38(3):1549-1550.
- [21] 赵雄伟,李春友,葛静茹,等.刺槐林地空气负离子水平[J].东北林业大学学报,2007,35(11):29-31.
- [22] 王 薇,刘仍辉,甘伟喆.5种室内观赏植物的空气负离子浓度研究[J].建筑科学,2018,34(2):21-25.
- [23] 徐文俊,翁永发,廖荣俊,等.办公场所5种典型绿化植物的负氧离子及空气质量差异变化[J].天津农业科学,2016,22(1):140-144.
- [24] 赵怡宁,史常青,许荡飞,等.崇礼区典型林分空气负离子浓度及影响因素[J].林业科学研究,2018,31(3):127-135.
- [25] 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.
- [26] 许贤书,郑俊鸣,方 笑,等.常态下景天科室内观赏植物释放负离子的研究[J].热带作物学报,2016,37(11):2127-2132.
- [27] 于守超,张秀省,冀芦莎.基于 Photoshop CS5 的植物叶面积测定方法[J].湖北农业科学,2012,51(15):3340-3342.
- [28] 李得孝,员海燕,郭月霞,等.混合液浸提法测定玉米叶绿素含量的研究[J].玉米科学,2006,14(1):117-119.
- [29] 齐 华,白向历,孙世贤,等.水分胁迫对玉米叶绿素荧光特性的影响[J].华北农学报,2009,24(3):102-106.
- [30] 李 群,赵成章,姚文秀,等.张掖湿地芦苇蒸腾速率与叶性状关系对土壤水分的响应[J].生态学杂志,2018,37(4):1095-1101.
- [31] 汤秋嫒,邢海莹,张冬有.北极村樟子松与落叶松林区空气负离子浓度及其与气象因子的关系[J].中国农学通报,2017,33(13):107-111.
- [32] 孙小玲,许岳飞,马鲁沂,等.植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J].植物生态学报,2010,34(8):989-999.
- [33] 唐 微,徐久伟.不同耐光特性植物的光合速率日变化[J].华中农业大学学报,1998,17(4):317-320.
- [34] 朱婷婷,王懿祥,朱旭丹,等.遮光对木荷和枫香光合特性的影响[J].浙江农林大学学报,2017,34(1):28-35.
- [35] 黄华宏,陈奋学,童再康,等.矮生杉木光合特性及叶绿素荧光参数研究[J].北京林业大学学报,2009,31(2):69-73.
- [36] 王 雯,李 曼,王丽红,等.酸雨对全生育时期水稻叶绿素荧光的影响[J].生态环境学报,2014,23(1):80-85.
- [37] 刘 新,吴林豪,张 浩,等.城市绿地植物群落空气负离子浓度及影响要素研究[J].复旦学报:自然科学版,2011,50(2):206-212.
- [38] 丁旭玲,张万超,黄龙飞,等.常态下仙人掌科植物负离子释放量与其刺尖数量的相关性研究[J].安徽农业大学学报,2015,42(2):263-267.
- [39] 胡国长.不同林分类型空气离子的时空分布及其影响因素研究[D].南京:南京林业大学,2008.
- [40] 李萌萌.河北太行山低山区水土保持林空气离子特征研究[D].保定:河北农业大学,2014.
- [41] 张水生.5种阔叶树种群落空气负离子特征研究[J].西南林业大学学报:自然科学版,2014,34(4):82-85.
- [42] 吴志萍,王 成,许积年,等.六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(12):2153-2157.
- [43] 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.
- [44] 杜万光,王 成,王 茜,等.北京香山公园主要植被类型的夏季环境效应评价[J].林业科学,2018,54(4):155-164.
- [45] 王轶浩,刘访兵,周小舟,等.重庆地区主要森林类型的空气负离子水平及其评价[J].东北林业大学学报,2014,42(6):38-42.
- [46] 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.



# Negative Air Ion Effect of Six Typical Subtropical Tree Species Based on Control Experiment

LI Ai-bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Ben-zhi<sup>2</sup>, LI Chun-you<sup>1</sup>, YE Ming<sup>3</sup>, YANG Zhen-ya<sup>2</sup>, ZHAO Xiong-wei<sup>1</sup>,  
TONG Ran<sup>2</sup>, CAO Yong-hui<sup>2</sup>, ZHAO Ya-min<sup>2,4</sup>

(1. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 3. Shouchang Forest Center of Jiande City, Zhejiang Province, Shouchang 311600, Zhejiang, China; 4. Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] To compare and analyze the differences of physiological characteristics of different tree species and their effects on negative air ion (NAI) concentration in order to provide references for studying the mechanism of forest vegetation acting on NAI. [Method] The NAI effect of six typical subtropical tree species was monitored continuously in artificial climate room located in Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, from June to September, 2018. The soil basin without plant was selected as blank control, and the characteristics of leaf morphology, chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content of each tree species were also measured. [Result] The concentration of NAI in the artificial climate chamber was significantly different from that in the control group ( $P < 0.01$ ). The results of daily mean value showed that the order of NAI concentration from high to low was: *Taxus chinensis* var. *maireri* ( $876 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > *Liquidambar formosana* ( $828 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > *Cunninghamia lanceolata* ( $733 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > *Zelkova serrata* ( $685 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > *Quercus aliena* ( $677 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > *Phoebe bournei* ( $665 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > control ( $345 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). On the whole, the NAI effect of coniferous tree species was significantly higher than that of broadleaved tree species ( $P < 0.05$ ) and the deciduous broadleaved tree species was significantly higher than that of evergreen broadleaved tree species ( $P < 0.05$ ). A comprehensive comparison of six tree species showed that NAI concentration was positively correlated with the number of leaf tips, leaf water content and leaf area ( $P < 0.01$ ), the effect of leaf biomass had a significant positive correlation ( $P < 0.05$ ). There was a significantly negative correlation between chlorophyll a/chlorophyll b ( $P < 0.05$ ). Comparing broadleaved tree species, it was found that NAI concentration had a significantly negative correlation with leaf thickness and leaf length and width ratio ( $P < 0.05$ ) while had a very significantly positive correlation with most chlorophyll fluorescence parameters ( $P < 0.01$ ). [Conclusion] The concentration of negative ions in the air was significantly increased by plants, and the NAI effect was different among tree species. The NAI effect of coniferous tree species is higher than that of broadleaved tree species, and the NAI effect of deciduous broadleaved tree species is higher than that of evergreen broadleaved tree species. Leaf morphology, leaf tip number and photosynthetic fluorescence physiological characteristics are important reasons for the difference of NAI effect among tree species.

**Keywords:** artificial climate chamber; negative air ion; subtropical tree species; leaf traits

(责任编辑:金立新)