

# 崇礼区典型林分空气负离子浓度及影响因素

赵怡宁<sup>1</sup>, 史常青<sup>1</sup>, 许荡飞<sup>2</sup>, 康秀亮<sup>3</sup>, 刘晓玥<sup>4</sup>, 赵廷宁<sup>1\*</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 张家口市林业工作站, 河北 张家口 075000;  
3. 张家口市崇礼区林业局, 河北 张家口 076350; 4. 北京市园林绿化局造林处, 北京 100013)

**摘要:** [目的] 对崇礼区 3 种主要林分类型的空气负离子浓度变化规律以及影响因素进行研究, 为该地生态效益评估以及生态旅游规划提供依据。 [方法] 本研究通过对崇礼区典型林分类型空气负离子浓度进行连续观测, 并以开阔无林地作为参照对象, 采用柱状图、散点图、回归分析等方法研究河北杨 (*Populus hopeiensis*, PHF)、白桦 (*Betula platyphylla*, BF) 和油松 (*Pinus tabulaeformis*, PF) 3 种纯林以及无林地 (NF) 空气负离子浓度日变化特征, 分析气象因素及植物光合特性对空气负离子的影响, 并运用单极系数法以及空气质量系数法对不同林分空气质量进行评价。 [结果] 表明: (1) 空气负离子浓度变化趋势呈双峰型, 最低值一般出现在中午, 不同林分最高值出现时间不同。不同林分空气负离子浓度具有明显差别, 空气负离子浓度从高到底依次为: 河北杨 ( $1\ 101\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 白桦 ( $847\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 油松 ( $755\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 无林地 ( $344\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。 (2) 不同林分空气负离子浓度与气温呈负相关, 与相对湿度呈正相关; 不同林分空气负离子浓度与植物光合特性总体呈正相关。 (3) 计算空气质量评价参数得出不同林分单极系数从小到大依次为河北杨 (0.92) < 油松 (1.01) < 白桦 (1.25) < 无林地 (1.37), 各林分空气质量评价指数从大到小依次为河北杨 (1.25) > 白桦 (0.85) > 油松 (0.80) > 无林地 (0.27)。 [结论] 不同林分空气负离子浓度存在差异且阔叶林高于针叶林, 空气离子浓度的变化受外界气候因素及自身植物光合特性的影响明显, 不同林分空气质量评价指数也存在差异, 合理配置林分资源有利于空气质量提升。

**关键词:** 崇礼区; 林分类型; 空气负离子浓度; 影响因素; 空气质量评价参数

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)03-0127-09

## Variations in Negative Air Ion Concentrations Associated with Different Vegetation Types and Influencing Factors in Chongli District

ZHAO Yi-ning<sup>1</sup>, SHI Chang-qing<sup>1</sup>, XU Dang-fei<sup>2</sup>, KANG Xiu-liang<sup>3</sup>, LIU Xiao-yue<sup>4</sup>, ZHAO Ting-ning<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry Station of Zhangjiakou, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 3. Forestry Bureau of Chongli District, Zhangjiakou 076350, Hebei, China; 4. Division of Afforestation and Forest Management, Beijing Gardening and Greening Bureau, Beijing 100013, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the variation of negative air ion concentration in three main types of stand at Chongli district and the influencing factors in order to lay basis for ecological benefit evaluation and ecotourism planning. [Method] Based on continuous observation of negative air ion concentration in typical stand at Chongli, the diurnal variation of negative air ion concentration in poplar (*Populus hopeiensis* Hu et Chow) forest (PHF), birch (*Betula platyphylla* Suk.) forest (BF), pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) forest (PF), and non-forest site (NF) was studied. The effects of meteorological factors and plant photosynthetic characteristics on negative air ion concentration were analyzed. The air quality of different stands was evaluated by unipolar coefficient method and air quality

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 京冀合作造林项目生态效益监测评价(2016HXFWsBX014)

作者简介: 赵怡宁(1993—), 硕士研究生, 主要研究方向: 空气负离子浓度变化规律研究。E-mail: zynbeilin@bjfu.edu.cn

\* 通讯作者: 赵廷宁(1962—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 水土保持环境监测、生态修复和工程绿化理论等研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

coefficient method. [ **Result** ] The variation trend of negative air ion concentration had two peaks. The lowest value appeared at noon but the maximum value appeared in different time. The negative air ion concentration in different stands was obviously different. Broadleaved forest was superior to coniferous forest. The negative air ion concentrations of PHF, BF, PF and NF were 1 101, 847, 755 and 344 ion · cm<sup>-3</sup> respectively. The negative air ion concentration in different stands was negatively correlated with temperature, but positively correlated with humidity and the photosynthetic characteristics of plants. The single grade coefficients of PHF, BF, PF and non-forest land were 0.92, 1.01, 1.25 and 1.37. The air quality evaluation index of PHF, BF, PF and non-forest land were 1.25, 0.85, 0.80 and 0.27. [ **Conclusion** ] The concentration of negative air ions in different stands is different and the broadleaved forest is superior to coniferous forest. The concentration of air ions is affected by external climatic factors and the photosynthetic characteristics of plants. There are also differences in the air quality evaluation index of different stands. Reasonable allocation of forest resources is beneficial to air quality improvement.

**Keywords:** forest type; negative air ion concentrations; influencing factors; air quality evaluation parameters

空气负离子是指具有负电荷的气体分子以及轻离子团的总称,能吸附空气中的悬浮污染物,具有医疗保健、净化、杀菌、降尘的作用,被称为“空气维生素”<sup>[1-2]</sup>。空气负离子可调节呼吸系统、心血管系统、神经系统等人类生理机能,并提高人体对外界环境的抵抗力<sup>[3-4]</sup>,其浓度大小是评价空气质量的重要指标<sup>[5]</sup>。空气负离子在森林、海边、瀑布等地方含量较高,其产生机制主要是植物叶片尖端放电、自然界的雷电现象、光电效应、喷泉等冲击作用<sup>[6]</sup>。目前,我国气象、林业部门等已将空气负离子浓度作为气象监测站监测的重点参数,其监测结果可作为地区空气清洁度以及生态健康性的依据,研究其变化规律及空气离子浓度的影响因素对生态评估有重要意义。

国内外学者对空气负离子浓度已经有了一定研究,目前,国外研究主要侧重空气负离子在医疗健康<sup>[7-8]</sup>和临床医学上的功用<sup>[9]</sup>、不同空气负离子浓度变化规律<sup>[10]</sup>等方面。国内对空气负离子浓度的研究也进入一个新的阶段,研究方向主要是对城市绿地及森林旅游区空气离子浓度监测<sup>[11-13]</sup>,以及不同环境因素对空气负离子浓度变化的影响<sup>[14-16]</sup>。肖红燕<sup>[17]</sup>、叶彩华<sup>[18]</sup>、邓玲<sup>[19]</sup>等研究了森林内空气负离子浓度在不同生态环境条件下的差异性以及变化规律,主要集中在气象因素、林分因素方面,结果表明,空气负离子浓度与风速、水、植物、相对湿度等外界环境因素有较为密切的关系,其中水对空气负离子浓度影响最大<sup>[20]</sup>。王晓磊<sup>[21]</sup>、段文军<sup>[22]</sup>、关蓓蓓<sup>[23]</sup>等对济南、深圳等温带、亚热带气候城市内部林分的空气负离子浓度进行观测并进行评价,研究其保健效果,主要侧重于空气负离子浓度对人居环

境的改良与净化作用<sup>[24]</sup>。总体上,不同空气负离子浓度会随周边环境不同而产生差异,城市和森林生态系统空气负离子浓度存在差异,森林区的空气负离子浓度要高于城市区<sup>[25]</sup>。

目前国内外对于空气负离子浓度变化规律及影响因素仍处于探索阶段。空气负离子浓度随自然环境条件不同存在差异,且现阶段主要集中在东南地区的研究<sup>[26-27]</sup>,对北方土石山区的研究较少。张家口市是冀西北地区的中心,具有典型冀北山区特征,是连接京津的交通枢纽。崇礼区紧邻张家口市中心,更是2022年冬奥会举办地之一,该地区对空气质量有较高的要求,空气离子浓度特征具有重要研究价值。本研究通过对油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)林(PF)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)林(BF)、河北杨(*Populus hopeiensis* Hu et Chow)林(PHF)3种崇礼区主要林分类型的空气负离子浓度变化规律以及影响因素进行研究,为该地生态效益评估以及生态旅游规划与发展提供依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区域概况

崇礼区位于河北省西北部(40°47′~41°17′ N, 114°17′~115°34′ E),地处内蒙古高原与华北平原过渡地区,隶属于张家口市,属于东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区,夏季凉爽而短促,气温比较稳定,昼夜温差较大,雨量集中,平均气温在19℃左右,是2022年冬奥会主要竞赛场地之一。崇礼区森林资源丰富,林地面积达4 500 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率达到52.38%,常见乔木种有油松、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、白桦、河北杨等;常见灌木种

有沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、榛子 (*Corylus heterophylla* Fisch.) 等; 常见草本有披碱草 (*Elymus dahuricus* Turcz.)、碱菀 (*Tripolium vulgare* Nees) 等。

## 1.2 研究方法

1.2.1 试验设备 采用日本 COM 3200PRO 空气负离子检测仪, 测量区域内不同林分的负离子浓度, 测量分辨率为  $10 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 测量范围为  $0 \sim 1\,999\,000 \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 工作气温在  $5 \sim 35^\circ\text{C}$  之间, 工作相对湿度在 85% 以下。气温、相对湿度采用 NK4500 手持气象站同步测量, 不同林分叶片光合特性采用 LI-6400 光合作用仪测定<sup>[23]</sup>。

1.2.2 试验方法 本研究观测时间为 2016 年 8 月 3 日到 28 日, 选取崇礼区石窑子乡 ( $115^\circ 15' 49'' \sim 115^\circ 15' 33'' \text{E}$ ,  $40^\circ 59' 35'' \sim 40^\circ 59' 10'' \text{N}$ ) 河北杨 (PHF)、白桦 (BF) 和油松 (PF) 3 种纯林, 各林分基本情况如表 1, 并以开阔无林地作为参照, 在试验期

间, 选择晴朗无风 (平均气温  $28 \sim 32^\circ\text{C}$ , 相对湿度 35%~55%) 的天气条件下观测, 以每周为 1 组共进行 3 组试验, 每组在天气适宜情况下测量 4 天, 且 3 种林分同时测量, 每个林分试验人员两名, 采用 3 组测量结果求平均值的方法。每个林分类型在林深 15 m 以上选点并设立两个测点作为对照, 每个测点仪器离地高度为 1.5 m, 测量时间为 8:00—18:00, 由一名试验人员每次连续测量 10 min 并记录数据, 每隔 1 h 观测 1 次, 求得 3 组共 12 天平均值作为有效值并分析不同林分类型日变化规律及特点。同时, 另一名试验人员负责使用手持气象站和 LI-6400 光合作用仪测量气象因素以及植物光合特性。气象因素包括林内气温、相对湿度; 植物光合特性包括植物光合速率、呼吸作用速率、气孔导度以及蒸腾速率, 测量时间与地点选择与空气负离子浓度测量一致。

表 1 不同林分类型基本情况

Table 1 Basic situation of different forest types

林分类型 Stand type	林龄 Age of stand /a	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean breast high diameter/cm	郁闭度 Canopy density	海拔 Altitude/m	坡度 Slope position/ $^\circ$	坡向 Slope aspect	密度 Density/ ( $n \cdot \text{hm}^{-2}$ )
PHF	28	14.8	25	0.75	1 150	28	阴坡	964
BF	30	12.6	23	0.70	1 035	20	阴坡	922
PF	20	8.5	19	0.67	893	25	阴坡	1 035

1.2.3 数据处理方法 对各测点观测数据整理分类, 计算各个时间段内不同林分类型空气负离子浓度平均值并列表综合比较, 作对比图, 分析各林分类型空气负离子浓度随时间变化的特征。

本研究筛选可能影响空气负离子浓度的主要因素, 包括空气负离子浓度与气温、相对湿度、植物光合特性, 并进行相关性分析, 研究不同因素对空气负离子浓度的影响。相关性分析运用 SPSS19 数据分析软件统计。

不同林分空气质量特征是通过单极系数法以及空气质量评价系数来研究, 单极系数是指空气正离子与负离子的比值, 其中,  $n^-$  为空气负离子浓度,  $n^+$  为空气正离子浓度<sup>[19]</sup>。大多数学者经过研究后认为,  $q$  值应等于或小于 1, 才能带给人舒适感<sup>[24]</sup>。计算公式如下:

$$q = n^+ / n^-$$

空气质量评价系数是以空气中离子浓度为评价因子, 评价空气质量是否利于人类活动的最常用的指标<sup>[25]</sup>, 其计算公式如下:

$$CI = n^- / 1\,000q$$

式中,  $CI$  为空气质量评价系数;  $q$  为单极系数。1 000 为满足人体生物学效应最低需求的空气负离子浓度。按空气质量评价系数可以将空气质量划分为 5 个等级, 各评价等级如表 2 所示。

表 2 空气质量评价系数等级划分标准

Table 2 Criteria for classification of air quality evaluation coefficients

等级 Grade	空气质量 Air quality	空气质量评价系数 Air ion assessment index
A	最清洁 The cleanest air	> 1
B	一般清洁 Clean air	1.0 ~ 0.7
C	中等 Moderate clean air	0.69 ~ 0.50
D	允许 Allowable clean air	0.49 ~ 0.30
E	临界值 Unclean air	< 0.291

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分空气负离子浓度变化规律

选择在 8:00—18:00 时间范围内对不同林分类型及无林地空气负离子浓度日变化进行连续观测,

分析不同林分类型空气负离子浓度变化特点。

对崇礼区3种典型林分以及无林地空气负离子浓度日变化进行观测,如图1所示,总体来说,早上8:00开始负离子浓度随时间增加而增加,10:00左右达到第一个峰值,在13:00左右达到低谷,但随着时间的变化空气负离子浓度又重新呈增加趋势,在16:00左右达到第二个峰值后又呈逐渐降低趋势。空气负离子浓度均值从高到底依次为:河北杨( $1\ 101\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 白桦( $847\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 油松( $755\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 无林地( $344\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。其中,河北杨纯林在16:00左右空气负离子浓度达到峰值 $1\ 479\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,在8:00为最低值 $864\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;白桦纯林空气负离子浓度最高的时间为16:00左右,达

到 $1\ 142\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最低的时间为8:00左右为 $674\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;油松纯林空气负离子浓度在10:00左右达到峰值为 $954\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,在11:00左右达到最低值为 $562\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。分析可知,生长状况相似条件下,3种纯林变化规律总体呈“双峰型”,河北杨空气负离子浓度波动幅度最大,白桦空气负离子浓度波动幅度居中,油松空气负离子浓度波动较小,但波动幅度均值均大于无林地。不同林分空气负离子浓度均值存在较大差异,河北杨、白桦纯林空气负离子浓度要高于油松,表明阔叶林空气负离子浓度要高于针叶林,且有林地空气负离子浓度明显高于无林地,这与周斌<sup>[28]</sup>、汤秋嫒<sup>[29]</sup>等的研究结论一致。

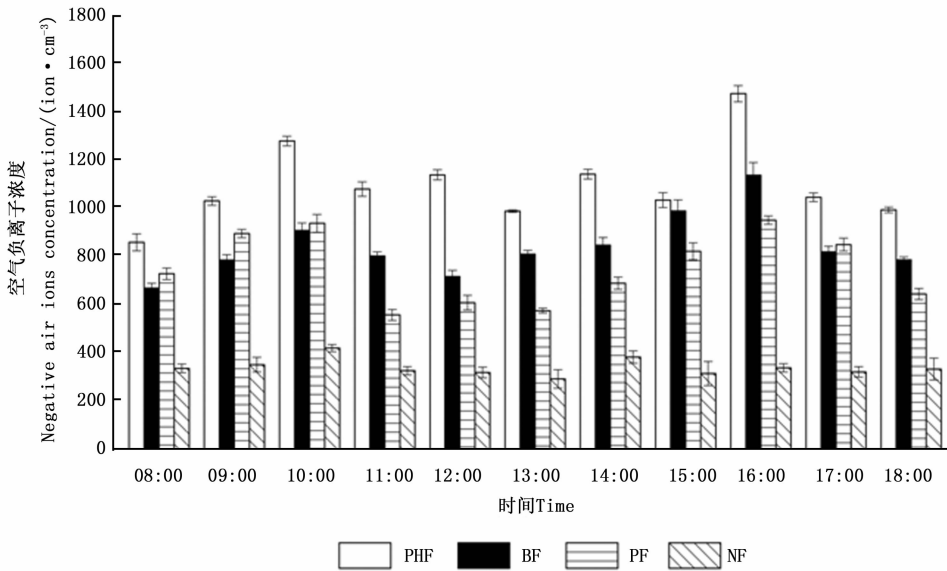


图1 不同林分空气负离子浓度日变化规律

Fig. 1 Diurnal variation of negative air ion concentration in different forest types.

## 2.2 空气负离子浓度影响因素

不同林分空气负离子浓度不仅受外界环境的影响,还与自身植物特性有关<sup>[20]</sup>。本文选择海拔、坡度等地形因素相近、树种不同的纯林为研究对象,对影响空气负离子浓度变化的主要气象因素与植物因素进行相关性分析,研究各因素对不同林分类型空气负离子浓度变化的影响。

2.2.1 气象因素的影响 空气负离子浓度受气温、相对湿度影响较大,在测量不同林分空气负离子浓度日变化时同步测量各林分气温、相对湿度日变化情况,对河北杨、白桦、油松负离子浓度与气温、相对湿度数据绘制散点图,如图2、图3所示,可看出各林分与气温、相对湿度呈线性相关。

通过回归分析可知,河北杨空气负离子与气温、湿度的回归方程分别为  $y = -43.665x + 2\ 215.6, R^2 = 0.583$ ;  $y = 18.664x + 252.15, R^2 = 0.8198$ 。白桦空气负离子与气温、湿度的回归方程分别为  $y = -86.894x + 3\ 240.4, R^2 = 0.5276$ ;  $y = 17.947x + 114.42, R^2 = 0.6378$ 。油松空气负离子与气温、湿度的回归方程分别为  $y = -45.939x + 2\ 020.6, R^2 = 0.6093$ ;  $y = 20.067x - 123.33, R^2 = 0.6956$ 。

对不同林分空气负离子浓度与气温、相对湿度进行 Pearson 相关性分析(表3)。可知河北杨、白桦、油松纯林空气负离子浓度与气温均在 0.01 水平上呈极显著负相关;且与相对湿度在 0.01 水平上呈极显著正相关。表明当气温、相对湿度变化时,空气

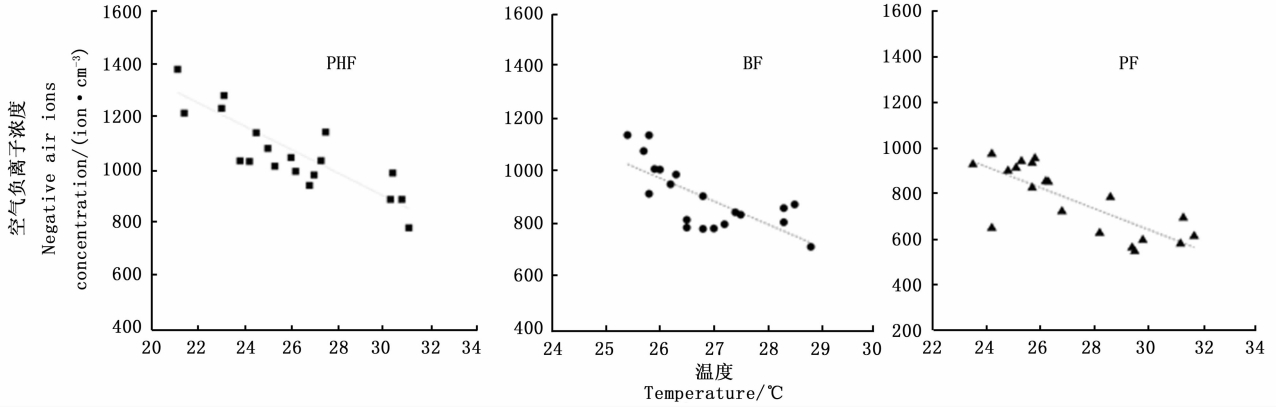


图2 不同林分空气负离子与气温的关系

Fig.2 The relationship between negative ions and temperature in different stands

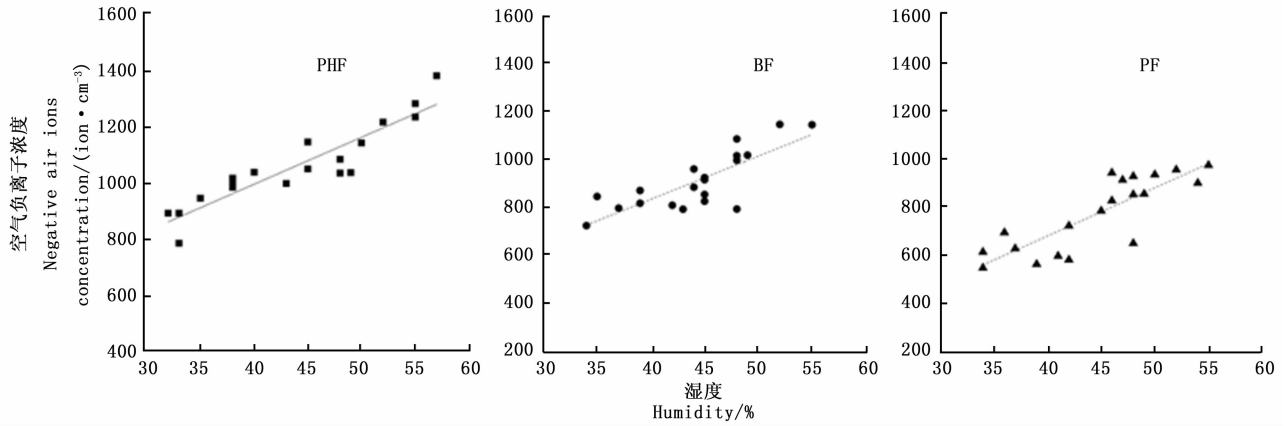


图3 不同林分空气负离子与湿度的关系

Fig.3 The relationship between negative ions and humidity in different stands

表3 不同林分空气负离子浓度与温湿度

Pearson 相关性系数

Table 3 Correlative coefficient of negative air ion concentration and meteorological factors

类型 Stand type	负离子浓度 NAI concentration	
	气温 Temperature	相对湿度 Humidity
PHF	-0.764 **	0.905 **
BF	-0.726 **	0.799 **
PF	-0.740 **	0.834 **

\*\* 表示在0.01水平(双侧)上极显著相关

\*\* Indicates an extremely significant correlation at 0.01 level (bi-lateral)

离子浓度随之发生改变。在一定范围内,气温升高,空气负离子浓度降低,呈负相关;而相对湿度升高,空气负离子浓度随之升高,呈正相关。从相关性系数可看出,各个林分类型与相对湿度的相关系数数值要大于气温,表明相对湿度对空气负离子浓度的影响作用要大于气温对空气负离子浓度的影响。

2.2.2 植物光合特性的影响 本研究选择在监测空气负离子浓度的同时,对不同树种光合特性日变化进行监测得到其变化情况,如图4所示。3种纯林净光合速率均值从大到小依次为河北杨( $8.82 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 白桦( $7.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 油松( $6.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );蒸腾速率均值从大到小分别为油松( $2.68 \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 河北杨( $1.42 \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 白桦( $1.36 \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );胞间  $\text{CO}_2$  浓度均值从高到低分别为河北杨( $304.24 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) > 白桦( $274.68 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) > 油松( $195.37 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ );气孔导度均值从大到小分别为河北杨( $0.17 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 白桦( $0.15 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 油松( $0.10 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。可知3种林分净光合速率与蒸腾速率均有明显“午休”现象,均在12:00—13:00左右出现低谷,变化趋势较一致。河北杨与油松在13:00左右出现低谷,是温度过高导致气孔关闭造成的,而白桦在13:00左

右出现一个峰值,可能由于白桦叶片对温度适应能力更强;而各林分的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度变化总体呈逐渐

降低的趋势并伴随波动,没有明显规律;气孔导度日变化波动不明显。

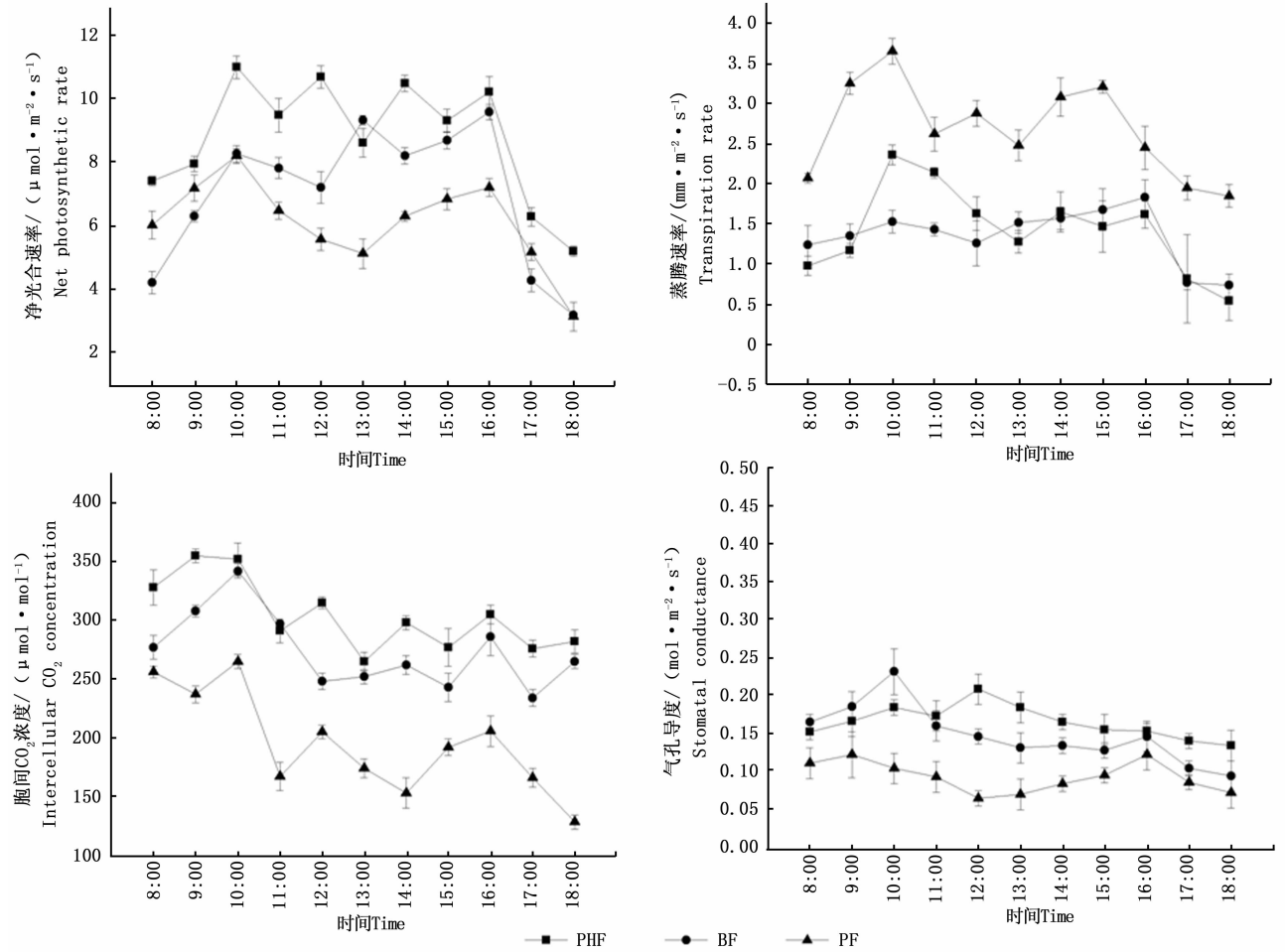


图4 不同林分空气负离子与植物光合作用的关系

Fig. 4 The relationship between negative ions and plant photosynthetic characteristics in different stands

对不同林分空气负离子浓度与各林分植物光合特性进行 Pearson 相关性分析,如表 4 所示,发现空气负离子浓度与光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度之间存在正相关关系,但不同林分类型与各指标显著程度存在差异。河北杨纯林空气负离子与光合速率、蒸腾速率在 0.05 水平上呈显著正相

关,相关系数分别为 0.608、0.593;与气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的相关性不显著,表明河北杨纯林空气负离子浓度主要受光合速率和蒸腾速率影响,随着其升高而升高。白桦纯林空气负离子浓度与光合速率、蒸腾速率在 0.05 水平上呈显著正相关,相关系数分别为 0.615、0.610;与气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度

表 4 空气负离子浓度与植物光合特性 Pearson 相关性系数

Table 4 Correlative coefficient of negative air ion concentration and plant photosynthetic characteristics

类型 Stand type	光合速率 Photosynthesis speed	蒸腾速率 Transpiration rate	气孔导度 Blowhole leading	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration
PHF	0.608 *	0.593 *	0.254	0.202
BF	0.615 *	0.610 *	0.218	0.129
PF	0.609 *	0.601 *	0.487	0.594 *

\* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

\* Indicates an extremely significant correlation at 0.05 level (bilateral)

的相关性不显著,与河北杨相似。油松纯林空气负离子浓度与光合速率、蒸腾速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度在 0.05 水平上呈显著正相关,相关系数分别为 0.609、0.601、0.594;与气孔导度的相关性不显著,除了与光合速率、蒸腾速率呈显著正相关外,油松空气负离子浓度变化还与胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈显著正相关,可能受其针叶叶型的影响。综合分析可知,植物光合特性与空气负离子浓度呈正相关,其中光合速率、蒸腾速率对空气负离子浓度影响较大。

## 2.3 不同林分空气质量评价参数

**2.3.1 单极系数评价** 对 3 种林分空气负离子浓度监测同时对正离子浓度进行同步测量,研究该地区不同林分空气质量评价指数,得到崇礼区 3 种典型林分类型的空气单极系数日变化规律,如图 5 所示。其中,无林地单极系数总体远高于有林地单极系数,且无林地在各个时间段内单极系数值均大于 1,均值为 1.37;不同林分空气单极系数变化规律总体上呈双低谷型,变化规律与空气负离子变化规律总体相反,其最大值出现的时间基本处于 11:00—13:00 之间,即不同空气负离子浓度最低的时间段,此时各林分单极系数总体大于等于 1,不适宜人类外界活动。不同林分单极系数平均值从小到大依次为河北杨(0.92) < 油松(1.01) < 白桦(1.25) < 无林地(1.37),单极系数越小,表明该林地舒适感越好,说明有林地更适宜室外休闲活动。

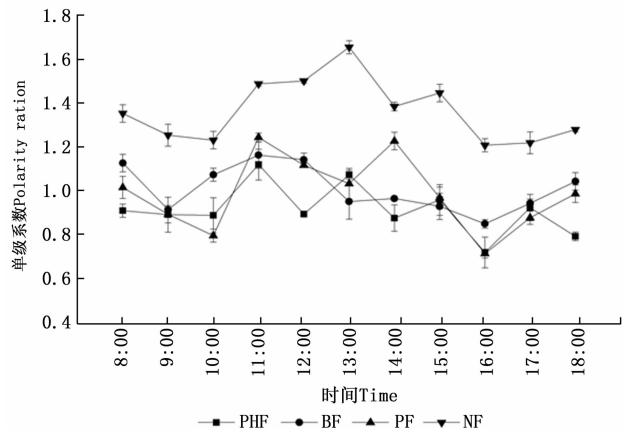


图 5 不同林分单极系数日变化规律

Fig. 5 Diurnal variation of unipolar coefficient of different forest

**2.3.2 空气质量系数评价** 根据崇礼区 3 种典型林分类型的空气质量评价系数日变化规律,如图 6 所示,可知无林地 CI 明显低于有林地,且随时间变化特征不明显。河北杨 CI 随时间波动较大,大部分时间段空气等级达到等级 A,其最大值出现在 16:00

达到等级 A,最低值出现在 13:00 为等级 B;白桦与油松 CI 随时间变化呈双峰型,白桦在 9:00 达到第一个峰值达到等级 B,12:00 降至最低值为等级 C,随后不断增加在 16:00 达到第二个峰值为等级 A;油松在 10:00 达到第一个峰值为等级 A,随后迅速降低达到最低值为等级 D,其后时间段内变化不明显直至 16:00 达到第二个峰值为等级 A。

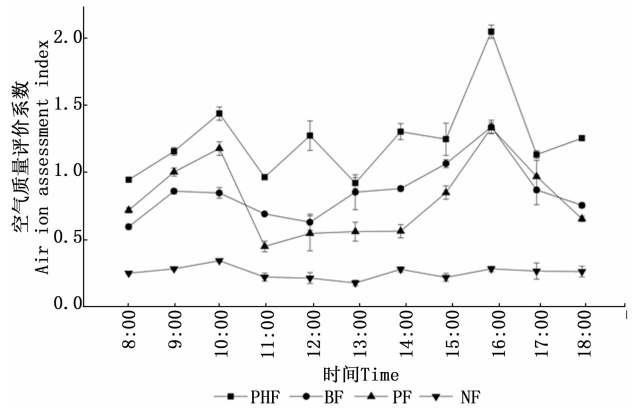


图 6 不同林分空气质量评价系数日变化规律

Fig. 6 Diurnal variation of air quality evaluation coefficient in different stand

总体分析可知,不同林分类型空气质量评价系数日变化趋势有很大不同,但其均值均达到等级 B 以上且明显高于无林地,表明不同林分类型对空气质量有明显改善作用,各林分空气质量评价指数从大到小依次为河北杨(1.25) > 白桦(0.85) > 油松(0.80) > 无林地(0.27),崇礼区典型林分类型空气质量评价指数极大值出现在 16:00,表示此时空气质量最好,11:00—13:00 时间段的系数相对较小。

## 3 讨论

对崇礼区 3 种典型林分研究表明,不同林分空气负离子浓度日变化存在明显差异,空气负离子浓度变化趋势呈双峰型,空气负离子浓度最高值一般出现在上午 10:00 及下午 16:00 左右,最低值出现在 12:00—13:00 点左右。分析可知,阔叶林空气负离子浓度要大于针叶林,林分对空气负离子浓度有显著调节作用,各林分类型空气负离子浓度变化规律相似并呈双峰型,且有明显午休现象,这与梁红<sup>[30]</sup>、冯鹏飞<sup>[31]</sup>等研究结果相似。但高铭聪<sup>[32]</sup>、袁相祥<sup>[33]</sup>等研究发现空气负离子浓度峰值出现在上午 10:00 与下午 14:00,最低值出现在早晨 8:00、正午 12:00 以及下午 18:00 后,虽然总体都呈现双峰

型,但空气负离子浓度出现峰值时间不同。经分析认为,这是由于研究地区地理条件与外界环境存在差异,且研究林分类型有所不同造成的,属于合理范围内的偏差。

根据前人研究表明,空气负离子浓度受气象因素与植物因素影响较大。空气负离子浓度与气象相关性尚未得出统一定论,本研究得出崇礼区3种典型林分空气负离子浓度与气温呈显著负相关,与湿度呈显著正相关。这与邓玲<sup>[20]</sup>、曹建新<sup>[34]</sup>等大部分学者对空气负离子水平与气象因素相关性研究成果一致,但与胡国长<sup>[35]</sup>、潘剑彬<sup>[36]</sup>、任晓旭<sup>[37]</sup>等人观点相反,可能是植被种类及生长状况、研究地气象条件、受人类影响程度以及数据量的大小等原因造成的。空气负离子浓度与植物因素的相关性研究相对较少,植物尖端放电以及光电效应是空气负离子产生机理之一,不同植物类型对空气负离子浓度有不同的影响。植物叶片是空气负离子产生的重要场所之一,具有较高研究意义<sup>[33]</sup>。本研究通过对植物生理生化特性进行研究可知,不同林分空气负离子浓度与植物光合特性呈正相关关系,其中光合速率与蒸腾速率对空气负离子浓度影响较大。区域空气负离子浓度变化机理是复杂多样的,本研究仅针对当地典型林分进行短期监测,仍然需要长期监测获得大数据量来深入研究。

崇礼区是2022年冬奥会举办地之一,且具有北方土石山区特征,其生态旅游发展规划与负氧离子浓度状况紧密相关。本研究对崇礼区3种典型林分类型空气质量状况进行评价,发现有林地单极系数明显低于无林地,空气质量系数明显高于无林地,表明林分对空气质量有明显改善作用,且阔叶林高于针叶林。16:00左右,该区域空气质量评价指数均达到一般清洁以上,可以为人类活动提供良好环境,其中河北杨纯林空气质量评价指数最高,可为造林设计提供参考并提高空气负离子水平,研究表明在下午16:00左右各林分空气质量均达到最高水平,对户外活动与旅游安排有参考作用。本研究分析崇礼区空气负离子浓度变化规律及其影响因素,首先,弥补了空气负离子浓度研究在冀北土石山地区的缺失,为地区范围内其他城市空气负离子浓度研究提供参考;其次,本研究为改善区域舒适度及空气质量提供基本数据,并有利于当地植被配置模式的改良与调整,发挥其生态旅游服务功能,有助于旅游经济与生态保护协调发展,为2022年冬奥会提供绿色健

康的环境。

## 4 结论

(1)崇礼区不同林分类型空气负离子日平均浓度从高到低为:河北杨( $1\ 101\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 白桦( $847\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 油松( $752\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) > 无林地( $344\ \text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),空气离子浓度变化趋势呈双峰型,空气负离子浓度最高值一般出现在上午10:00及下午16:00左右,最低值出现在12:00—13:00点左右。

(2)影响空气负离子浓度的主要气象因素为温度与湿度,研究表明,空气负离子浓度与温度呈负相关,与湿度呈正相关,其中不同林分类型空气负离子浓度与温度、湿度均呈极显著线性关系,且相关性明显高于无林地。

(3)影响空气负离子浓度的主要植被因素为植物光合特性以及叶片色素含量,其中,空气负离子浓度与植物光合特性呈正相关关系,且光合速率、呼吸速率对空气负离子浓度影响较大。

(4)对崇礼区3种典型林分类型空气质量状况进行评价,不同林分单极系数从小到大依次为河北杨(0.92) < 油松(1.01) < 白桦(1.25) < 无林地(1.37),各林分空气质量评价指数从大到小依次为河北杨(1.25) > 白桦(0.85) > 油松(0.80) > 无林地(0.27),表明林分对空气质量有明显改善作用,且阔叶林优于针叶林,下午16:00左右更易于人类休憩娱乐。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Pino O, Ragione F L. There's something in the air: Empirical evidence for the effects of negative air ions (NAI) on psychophysiological state and performance[J]. Science and Education Publishing, 2013, 1(4): 48-53.
- [3] 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.
- [4] Iwama H. Negative air ions created by water shearing improve erythrocyte deformability and aerobic metabolism [J]. Indoor Air, 2004, 14(4): 293-297.
- [5] 何平,常顺利,李毓涛,等.新疆森林游憩区空气负离子浓度时空分布特征及其影响因素[J].资源科学,2015,37(3):629-635.
- [6] 冯莎莎.北京西山油松栓皮栎林几种游憩影响因子的研究[D].北京:北京林业大学,2012.



- [7] Bottalico F, Chirici G, Giannetti F, *et al.* Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence[J]. *Agriculture & Agricultural Science Procedia*, 2016, 8(8): 243-251.
- [8] Amaral L D P, Ferreira R A, Lisboa G D S, *et al.* Spatial variability of the Shannon-Wiener Diversity Index in a mixed ombrophilous forest. [J]. *Scientia Forestalis*, 2013, 41(97):83-93.
- [9] Bonnie B, Randall F, Joseph A, *et al.* Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder [J]. *Psychiatry Research*, 2017, 259: 7-14.
- [10] Goel N, Terman M, Terman J S, *et al.* Controlled trial of bright light and negative air ions for chronic depression [J]. *Psychological Medicine*, 2005, 35(7): 945-955.
- [11] 张毓涛, 李吉玫. 新疆主要城市不同生态功能区夏季空气负离子特征[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(6): 5-8.
- [12] 单晟焯, 李佳珊, 张冬有. 哈尔滨城市公园湿地环境空气负离子浓度及其生态价值估算[J]. *湿地科学*, 2015, 13(4): 478-482.
- [13] 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.
- [14] 吴楚材, 钟林生, 刘晓明. 马尾松纯林分因子对空气负离子浓度影响的研究[J]. *中南林学院学报*, 1998, 18(1): 70-73.
- [15] 刘宇, 王晓立, 董蓉, 等. 供暖季4种林地空气负离子浓度变化及其与主要影响因素的关系[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(12): 248-252.
- [16] 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清洁度评价[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 298-303.
- [17] 肖红燕, 谭益民, 汤炎. 湖南省森林植物园空气负离子浓度变化[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(5): 92-95.
- [18] 叶彩华, 王晓云, 郭文利. 空气中负离子浓度与气象条件关系初探[J]. *气象科技*, 2000, (4): 51-52.
- [19] 邓玲, 廖春花, 李学敏, 等. 山岳型景区空气负离子浓度分布特征及其与气象要素相关性研究综述[J]. *环境科学研究*, 2017, 45(5): 882-888.
- [20] 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.
- [21] 王晓磊, 李传荣, 许景伟, 等. 济南市南部山区不同模式庭院林空气负离子浓度[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(02): 373-378.
- [22] 段文军. 深圳园山三种典型城市森林康养环境保健因子动态变化[D]. 北京:中国林业研究科学院, 2017.
- [23] 关蓓蓓, 郑思俊, 崔心红. 城市人工林空气负离子变化特征及其主要影响因子[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2016, 40(1): 73-79.
- [24] 谢雪宇, 胡希军, 朱炫霓. 寨场山森林公园空气负离子浓度的时空变化特征[J]. *西北林学院学报*, 2014, 30(5): 37-41.
- [25] 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, 38(11): 1417-1422.
- [26] Harmer C J, Charles M, McTavish S, *et al.* Negative ion treatment increases positive emotional processing in seasonal affective disorder [J]. *Psychol Med*, 2012, 42(8): 1605-1612.
- [27] 司婷婷, 罗艳菊, 赵志忠, 等. 吊罗山热带雨林空气负离子浓度与气象要素的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 788-792.
- [28] 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.
- [29] 汤秋嫫, 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.
- [30] 梁红, 陈晓双, 达良俊. 上海佘山国家森林公园空气负离子动态及其主要影响因子[J]. *城市环境与城市生态*, 2014, 27(1): 7-11.
- [31] 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.
- [32] 高铭聪, 蒋文伟, 金竹秀, 等. 西径山森林公园夏季空气负离子日变化[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, 28(4): 667-673.
- [33] 袁相洋, 孙迎, 田媛, 等. 北京市不同功能区空气负氧离子及影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(6): 97-102.
- [34] 曹建新, 张宝贵, 张友杰. 海滨、森林环境中空气负离子分布特征及其与环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 92-95.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 任晓旭, 陈勤娟, 董建华, 等. 杭州城区空气负离子特征及其与气象因子的关系[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(3): 109-112.

(责任编辑:彭南轩)