

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2018. 01. 011

# 黄河三角洲刺槐人工林内空气负离子的变化特征<sup>\*</sup>

李永涛<sup>1,2</sup>, 王霞<sup>1,2</sup>, 魏海霞<sup>1,2</sup>, 周健<sup>1,2</sup>, 李宗泰<sup>1,2</sup>, 刘德玺<sup>1,2</sup>

(1. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东黄河三角洲森林生态系统定位研究站, 山东 东营 257000)

**摘要:** 以黄河三角洲 30 年生人工刺槐纯林和混交林为研究对象, 2015 年 3 月至翌年 2 月对其林内空气负离子和相关气象因子进行了同步观测, 以了解人工林内空气负离子浓度的变化规律。结果表明, 不同模式下空气负离子 (NAI) 浓度呈明显的季节变化, 夏季>秋季>春季>冬季; 空气离子评议系数 (CI) 表明, 夏季 (1.04) 空气质量最佳, 秋春 (0.92、0.70) 次之, 冬季 (0.64) 最低; 日变化呈双峰曲线, 峰值分别出现在 10:00–11:00 和 16:00 左右, 12:00–14:00 左右出现谷值。不同模式人工林年均空气负离子浓度和离子评议系数大小依次为刺槐+白蜡混交林 (RF) >刺槐+榆树混交林 (RU) >刺槐+臭椿混交林 (RA) >刺槐纯林 (R), 其 NAI 浓度和 CI 值分别为 705 个/cm<sup>3</sup>、656 个/cm<sup>3</sup>、623 个/cm<sup>3</sup>、585 个/cm<sup>3</sup> 和 0.93、0.84、0.78、0.75。对空气负离子浓度与林分因子和气象因子的相关分析显示, 空气负离子浓度与郁闭度呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与胸径呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与树高和枝下高呈负相关; 与林内温度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与林内湿度、风速无显著相关性。

**关键词:** 人工林; 空气负离子; 离子评议系数; 黄河三角洲; 刺槐

**中图分类号:** X 823      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-8246 (2018) 01-0059-06

## The Variation of Negative Air Ions of *Robinia pseudoacacia* Plantation in the Yellow River Delta

LI Yong-tao<sup>1,2</sup>, WANG Xia<sup>1,2</sup>, WEI Hai-xia<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, LI Zong-tai<sup>1,2</sup>, LIU De-xi<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Academy of Forestry Sciences, Jinan Shangdong 250014, P. R. China;

2. Forest Ecosystem Research Station of the Yellow River delta in Shandong, Dongying Shangdong 257000, P. R. China)

**Abstract:** Taking the 30-year-old *Robinia pseudoacacia* plantations and mixed forests as test objects, a synchronous observation was conducted on the air negative ion concentration and related meteorological factors from March 2015 to February 2016. The concentration of air negative ion (NAI) of different afforestation mode showed a trend of obvious seasonal variation, summer>autumn>spring>winter. The coefficient of air ion (CI) showed that the air quality of summer (1.04) was the best, autumn (0.92) and spring (0.70) were better, and winter (0.64) was the last one. The curve of daily variation of concentration of negative air ions showed two single peak, and the peak value were at 10:00–11:00 and 16:00, the valley value were at 12:00 to 16:00. The mean annual air negative ion and the coefficient of air ion (CI) of different afforestation mode were in the order of mingled forest of *Robinia pseudoacacia* Linn. and *Fraxinus velutina* Torr. (RF) >mingled forest of *Robinia pseudoacacia* Linn. and *Ulmus pumila* L. (RU) >mingled forest of *Robinia pseudoacacia* Linn. and *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle (RA) >*Robinia pseudoacacia* Linn. (R), and the NAI and CI of them were 705ions/cm<sup>3</sup>,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 山东省重点研发计划 (2017GNC11113), 山东省重大科技创新工程 (2017CXGC0314), 林业科技创新平台运行补助项目 (2017-LYPT-DW-051)。

第一作者简介: 李永涛 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事盐碱地改良、林业生态等方面的研究。

E-mail: liyongtao100@163.com

通讯作者简介: 刘德玺 (1962-), 男, 研究员, 主要从事盐碱地改良、林业生态等方面的研究。E-mail: llyldx@163.com

656 ions/cm<sup>3</sup>, 623 ions/cm<sup>3</sup>, 585 ions/cm<sup>3</sup> and 0.93, 0.84, 0.78, 0.75 respectively. The correlation analysis of air negative ion, forest factors and meteorological factors showed that the NAI had very significant positive correlation with crown density ( $P < 0.01$ ), significant positive correlation with DBH ( $P < 0.05$ ), and negative correlation with the height of tree and clear bole height; and the NAI had significant positive correlation with forest temperature ( $P < 0.05$ ), no significant correlation with humidity and wind speed.

**Key words:** plantation; air negative ion; coefficient of air ion; Yellow river delta; *Robinia pseudoacacia*

空气负离子 (negative air ion, 简称 NAI) 又称负氧离子, 是带负电荷的气体分子和轻离子团的总称<sup>[1]</sup>。自 Elster 和 Geital 证实空气负离子存在以来, 其产生的功能、效用也被愈来愈多的人所关注, NAI 浓度也逐渐被作为衡量空气质量好坏的一个重要指标, 且对于空气质量的改善意义重大。目前, 空气负离子的相关理论和技术已被广泛用于多个领域, 其中, 国外有关空气负离子的研究多集中于生物学效应<sup>[2]</sup>、临床医学应用<sup>[3-4]</sup>等方面, 而国内关于空气负离子的研究主要集中在不同植被类型森林与绿地空气负离子的时空变化特征<sup>[5]</sup>、浓度变化规律<sup>[6-7]</sup>、影响因素<sup>[8-9]</sup>以及评价、分级标准<sup>[10-11]</sup>等方面, 而对森林内空气负离子动态变化研究还缺少时间尺度上连续完整的研究。

黄河三角洲作为中国新生陆地生态系统, 起初生态环境极为脆弱, 抗干扰能力差, 土壤盐渍化严重, 且分布有大片未利用的盐碱化土地。为改善当地生态环境, 该地区于 20 世纪 80 年代开始大规模造林。截至目前, 区内刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 林保存面积达 5 000 hm<sup>2</sup> 左右, 是我国现存面积最大的刺槐人工林<sup>[12]</sup>, 且以刺槐为代表的人工林对于改善气候、涵养水源和保持水土都发挥了重要作用<sup>[13]</sup>。而近几年, 随着生态环境污染和人们保健意识的增强, 该区域已成为人们休闲旅游、野外露营的重要区域, 所以研究该区刺槐人工林空气负离子的浓度水平及变化规律显得十分重要。以 30 年生人工刺槐纯林和混交林为研究对象, 分 4 个季度连续测定了不同模式下人工林的空气负离子浓度, 对比分析了不同配置模式对空气负离子浓度的影响, 以期为该区域林分结构调整、森林旅游资源开发以及生态系统服务功能评估提供理论依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于山东省东营市河口区孤岛镇万亩刺槐林内, 地理坐标为 37°55′-38°16′N, 118°31′-

120°18′E, 该区海拔为 2.1 m, 地势平坦, 属暖温带大陆性季风气候, 全年平均气温 12.8℃, 无霜期 206 d, ≥10℃ 以上的积温 4 150℃。年太阳辐射总量 5 189 J/m<sup>2</sup>, 年日照时间为 2 764 h, 年降水量 562 mm, 其中约 65% 的降水集中于夏季, 年蒸发量为 1 962 mm, 是降水量的 3.5 倍。该区植物资源丰富, 植被类型以天然盐生、湿生的禾本科 (Gramineae) 植物白茅 (*Imperata cylindrica*)、芦苇 (*Phragmites communis*) 为主, 人工林主要树种为刺槐、白蜡 (*Fraxinus velutina* Torr.)、榆树 (*Ulmus pumila*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*), 区内森林覆盖率达到 50% 以上。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地选择

选取具有代表性的 4 个人工林作为观测对象, 其中刺槐纯林 1 个, 混交林 3 个, 分别为刺槐+白蜡、刺槐+榆树、刺槐+臭椿 (表 1)。该人工林于 1985 年春季采用一年生苗营造, 株行距 4 m×3 m, 各林分林龄和立地条件相同。在 4 个人工林地中各设置 20 m×20 m 的样地, 各观测样地之间的 NAI 监测工作同步进行。

#### 1.2.2 观测时间与方法

2015 年 3 月至翌年 2 月, 为了减少干扰, 选择天气晴朗, 大气状态相对稳定的天气进行观测, 测量时间为 8:00-18:00, 逐时、定点测定各监测点距地面 1.5 m 处的空气正负离子浓度, 林内空气温度、湿度、风速同步测定, 每季度 (春, 3-5 月; 夏, 6-8 月; 秋, 9-11 月; 冬, 12 月至翌年 2 月) 测定 3 d。

空气负离子测定采用日本 KEC-900 空气离子测试仪测定, 每个观测点待仪器稳定以后按东、南、西、北 4 个方向读数, 每个方向读取 3 次, 取其均值; 林内 1.5 m 左右空气温湿度、风速等气象因子采用便携式 HOBO 自动气象站测定。

#### 1.2.3 空气负离子的评价

空气质量的评级标准, 主要采用目前国际上通用的安倍空气离子评价指数法<sup>[14]</sup>。空气质量评价

指数  $CI$  的计算公式为<sup>[14]</sup>： $q = n^+ / n^-$ ， $CI = (n^- / 1000) (1/q)$ 。式中， $CI$  为安倍空气离子评价指数； $q$  为单极系数； $n^+$ 、 $n^-$  为空气正、负离子浓度 ( $\text{ions}/\text{cm}^3$ )；1000 为满足人体生物学效应最低需求的空气负离子浓度 ( $\text{ions}/\text{cm}^3$ )。按照安倍空气离子评价指数可把空气质量分为 5 个等级，其评价

标准见表 2。

### 1.3 数据分析

用 Excel 2010 进行数据处理和作图，用 SPSS 17.0 进行数据统计分析。采用单因素方差分析和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据组间的差异，显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ 。

表 1 林分特征

Tab. 1 Characteristics of 4 plant communities

代码	配置模式	树种比例/%	郁闭度/%	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	林龄/a
R	刺槐	100	71	17.73	14.63	3.8	30
RF	刺槐+白蜡	50/50	85	16.24/25.43	12.01/14.43	3.40/3.72	30
RU	刺槐+榆树	50/50	80	16.71/23.14	12.37/14.05	3.48/4.12	30
RA	刺槐+臭椿	50/50	76	17.23/19.32	13.13/13.92	3.64/5.24	30

注：刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)、白蜡 (*Fraxinus velutina* Torr.)、榆树 (*Ulmus pumila*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)。

表 2 空气清洁度与空气质量评价指数 ( $CI$ )

Tab. 2 Air cleanliness and air quality assessment index ( $CI$ )

等级	$CI$				
	$>1.0$	$1.0 \leq CI \leq 0.7$	$0.69 \leq CI \leq 0.50$	$0.49 \leq CI \leq 0.30$	$CI \leq 0.29$
清洁度	A	B	C	D	E
	最清洁	清洁	中等清洁	允许	临界值

## 2 结果与分析

### 2.1 林内空气负离子浓度的季节变化

由观测结果 (图 1) 可知，刺槐不同混交模式的人工林空气负离子浓度年变化介于  $351\text{--}920 \text{ 个}/\text{cm}^3$  之间，各模式的人工林 NAI 浓度季节变化规律基本一致。刺槐纯林内空气负离子浓度受季节影响较大，季节之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )，呈现出夏、秋 2 季高于冬、春 2 季，且夏季最高，而冬季最低，即夏季 ( $852 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )  $>$  秋季 ( $732 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )  $>$  春季 ( $584 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )  $>$  冬季 ( $402 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )。季节差异最大的是刺槐+臭椿混交林，为  $484 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ；最小的是刺槐纯林，为  $421 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。而且，3 种刺槐混交林四季空气负离子浓度均高于刺槐纯林，总体来看，刺槐+白蜡混交林四季均最高，刺槐+榆树混交林次之。

### 2.2 林内空气负离子浓度的日变化

不同造林模式下林内空气负离子浓度昼间变化 ( $8:00\text{--}18:00$ ) 见图 2。空气负离子浓度的日变化在不同季节中都呈双峰曲线，4 种模式的人工林其林内空气负离子浓度变化趋势基本趋于一致， $10:00$  和  $16:00$  左右分别出现 2 个峰值 (冬季出现在  $11:00$

左右)，最低值通常出现在  $12:00\text{--}14:00$  左右。从变化幅度来看，4 种模式的人工林的空气负离子浓度都在  $11:00\text{--}16:00$  内变幅较平缓 (夏季除外)，在  $8:00\text{--}11:00$  波动较大，最大值可达  $1073 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ，最小值为  $220 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。

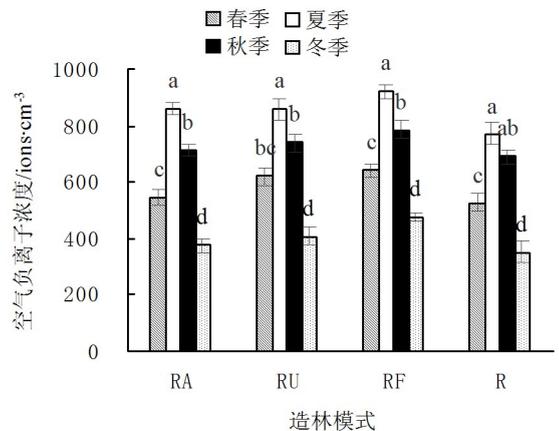


图 1 不同配置模式下林内空气负离子浓度的季节变化

注：不同小写字母表示同种模式不同季节间的差异显著。R 为刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 纯林，RF 为刺槐+白蜡 (*Fraxinus velutina* Torr.) 混交林，RU 为刺槐+榆树 (*Ulmus pumila*) 混交林，RA 为刺槐+臭椿 (*Ailanthus altissima*) 混交林。

Fig. 1 Seasonal variation of air negative ion concentration in different plantation modes

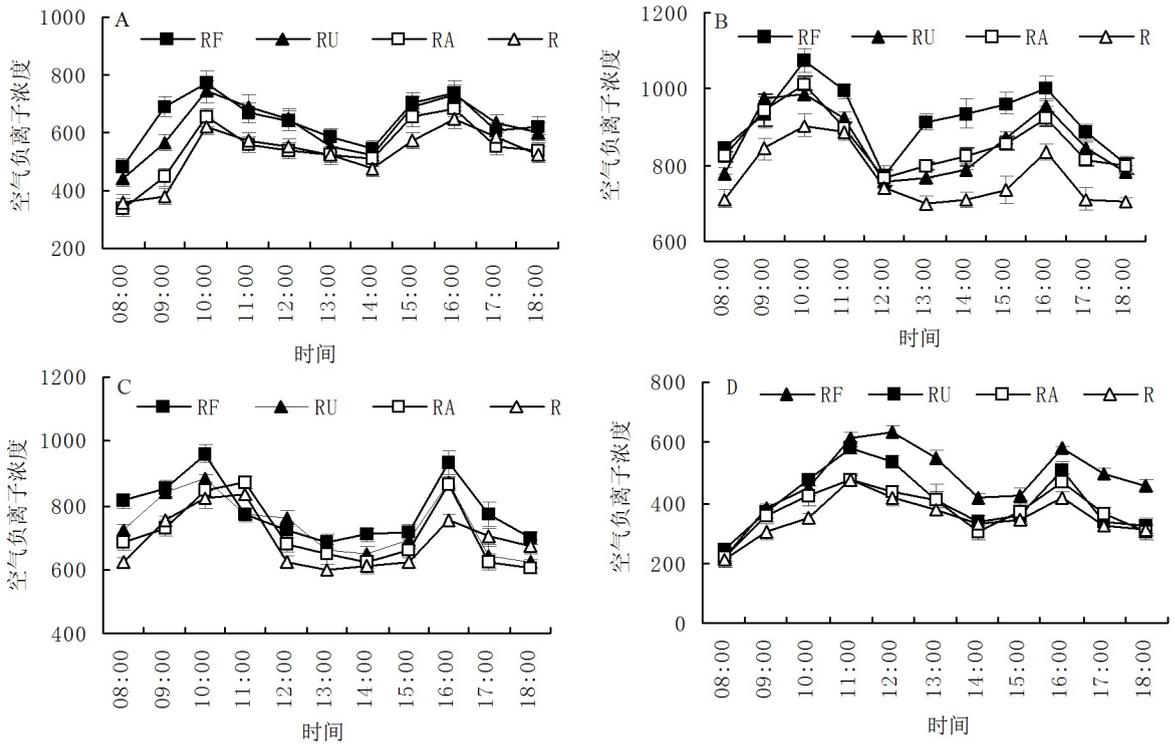


图2 不同模式人工林四季空气负离子浓度

注：A为春季；B为夏季；C为秋季；D为冬季。下同。

Fig. 2 Air negative ion concentration under different plantation modes in different seasons

### 2.3 林内空气离子评议系数

林内空气离子评议系数(CI)日变化趋势见图3-表3。各模式下CI值的日变化与空气负离子浓度日变化规律基本一致,呈高-低-高的变化趋势。清晨8:00左右随着光照的增强,CI值开始逐渐升高,10:00-11:00开始出现第一个高峰,中午经过光合“午休”现象后,16:00左右出现第二个高峰,此后随着光照减弱,植物的光合作用逐渐降低,使CI值逐渐降低。四季平均空气离子评议系数依次为:夏季(1.04) > 秋季(0.92) > 春季(0.70) > 冬季(0.64)。在空气质量等级划分上,夏季最高,达到A级最清洁标准;秋、春2季虽均达到B级,但春季处于B、C级的边缘;冬季标准最低,仅为C级中等清洁标准。

### 2.4 影响林内空气负离子浓度的关键因子分析

将空气负离子浓度与林分郁闭度,平均胸径、树高、枝下高进行相关性分析,结果发现,空气负离子浓度与郁闭度呈极显著正相关( $R=0.998^{**}$ ),与胸径呈显著相关( $R=0.976^*$ );而与树高( $R=-0.846$ )、枝下高( $R=-0.467$ )无显著相关性。

通过对林内不同季度(春,3-5月;夏,6-8月;秋,9-11月;冬,12月至翌年2月)气象因

子进行同步观测发现,不同季度林内各气象因子日变化幅度较大,但变化趋势趋于一致。其中空气湿度与风速日变化均呈现高-低-高的U字形,空气温度则相反,呈低-高-低的倒U字形。对空气负离子与林内气象因子进行相关性分析,空气负离子浓度与林内空气温度呈显著正相关( $R=0.954^*$ ),而与林内湿度( $R=0.874$ )和林内风速( $R=-0.890$ )无显著相关性。

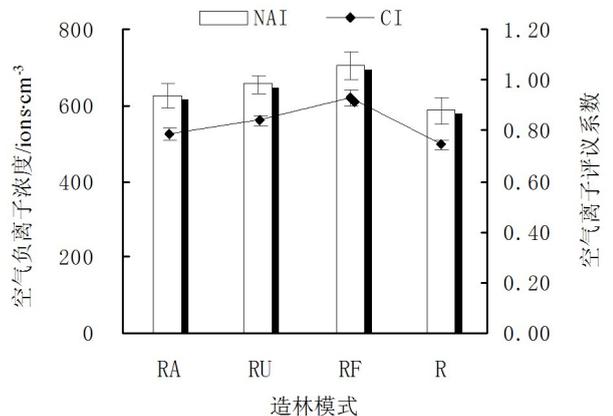


图3 不同模式人工林四季空气负离子浓度和空气离子评议系数

Fig. 3 Air negative ion concentration and coefficient of air ion under different plantation modes in different seasons

表 3 不同模式人工林四季空气离子评议系数

Tab. 3 Coefficient of air ion under different plantation forest modes in different seasons

代码	8 : 00	9 : 00	10 : 00	11 : 00	12 : 00	13 : 00	
A	RF	0.54±0.11	0.75±0.18	1.02±0.11	0.86±0.24	0.82±0.17	0.81±0.20
	RU	0.56±0.13	0.79±0.09	0.92±0.27	0.68±0.17	0.71±0.22	0.58±0.07
	RA	0.47±0.08	0.64±0.11	0.93±0.13	0.62±0.13	0.48±0.11	0.54±0.10
	R	0.41±0.06	0.65±0.07	0.72±0.22	0.49±0.09	0.51±0.14	0.52±0.14
B	RF	0.82±0.17	0.94±0.21	1.39±0.29	1.18±0.31	1.05±0.29	0.98±0.09
	RU	0.80±0.20	1.07±0.18	1.28±0.33	1.03±0.24	0.88±0.15	0.80±0.21
	RA	0.79±0.07	1.04±0.24	1.07±0.28	0.83±0.18	0.86±0.23	0.91±0.23
	R	0.81±0.14	0.96±0.23	1.12±0.31	0.84±0.19	0.79±0.11	0.76±0.17
C	RF	0.84±0.22	0.93±0.11	1.22±0.34	1.01±0.33	0.97±0.28	0.87±0.11
	RU	0.74±0.18	1.06±0.30	1.14±0.27	1.01±0.17	0.86±0.09	0.86±0.20
	RA	0.78±0.23	0.84±0.14	1.08±0.35	0.99±0.26	0.92±0.18	0.77±0.08
	R	0.87±0.13	0.91±0.17	1.11±0.31	0.92±0.31	0.81±0.11	0.75±0.14
D	RF	0.38±0.04	0.48±0.10	0.53±0.20	0.92±0.18	0.87±0.31	0.75±0.17
	RU	0.34±0.10	0.41±0.07	0.51±0.17	0.83±0.09	0.81±0.09	0.67±0.13
	RA	0.27±0.07	0.39±0.11	0.56±0.14	0.68±0.12	0.67±0.13	0.54±0.08
	R	0.28±0.05	0.44±0.09	0.59±0.16	0.71±0.14	0.62±0.17	0.60±0.10
代码	14 : 00	15 : 00	16 : 00	17 : 00	18 : 00		
A	RF	0.68±0.18	0.93±0.30	1.07±0.24	0.72±0.17	0.83±0.17	
	RU	0.63±0.14	0.75±0.22	0.96±0.21	0.64±0.09	0.67±0.11	
	RA	0.67±0.15	0.83±0.18	0.92±0.15	0.62±0.11	0.69±0.09	
	R	0.56±0.14	0.71±0.23	0.74±0.19	0.52±0.10	0.54±0.11	
B	RF	1.15±0.21	1.34±0.41	1.57±0.43	1.14±0.27	1.23±0.28	
	RU	0.97±0.23	1.20±0.31	1.45±0.31	1.12±0.19	1.16±0.24	
	RA	1.04±0.27	1.23±0.15	1.22±0.54	1.03±0.38	1.01±0.29	
	R	0.71±0.11	0.96±0.26	1.25±0.21	1.01±0.21	0.94±0.17	
C	RF	0.90±0.16	1.09±0.23	1.38±0.30	0.92±0.17	1.02±0.32	
	RU	0.80±0.27	0.94±0.19	1.23±0.24	0.74±0.13	0.93±0.21	
	RA	0.62±0.25	0.81±0.14	1.09±0.07	0.68±0.14	0.95±0.17	
	R	0.69±0.07	0.73±0.21	1.15±0.17	0.71±0.11	1.03±0.22	
D	RF	0.72±0.18	0.86±0.18	0.98±0.26	0.69±0.17	0.72±0.29	
	RU	0.74±0.21	0.75±0.23	0.85±0.18	0.62±0.09	0.61±0.14	
	RA	0.63±0.07	0.73±0.16	0.81±0.19	0.60±0.12	0.64±0.07	
	R	0.58±0.11	0.67±0.27	0.85±0.22	0.62±0.15	0.68±0.18	

### 3 结论与讨论

不同的季节条件下空气负离子浓度和空气质量出现差异，通常表现为夏季最高，冬季最低的总趋势<sup>[15]</sup>，本研究中，空气负离子浓度年变化介于 351–920 个/cm<sup>3</sup> 之间，季节变化会显著影响空气负离子浓度，空气负离子浓度夏秋高于冬春，且夏季最高，冬季最低，这与前人的研究结果一致<sup>[16–17]</sup>。这可能与夏季太阳辐射量高及空气湿度大、植物生长茂盛、光合作用强等因素有关；而冬季 NAI 浓度较小可能主要由于该季节空悬浮颗粒物增多、大气污染相对严重，同时研究区为落叶阔叶林区，林木处于休眠状态，光合作用微弱。空气离子评价系数 *CI* 的计算结果也表明，夏季 (1.04) 达到 A 级最清洁标准；秋、春 2 季 (0.92、0.70) 达到 B

级清洁标准；而冬季 (0.64) 标准最低，仅为 C 级中等清洁标准。空气负离子的日变化在一天中会出现波峰、波谷相互交替的现象，但出现时间存在一定的差异<sup>[18]</sup>。赵雄伟等<sup>[19]</sup>对北戴河联峰山公园刺槐林地内空气负离子的研究结果得出波峰出现在上午 7 : 00–11 : 00、下午 16 : 00–17 : 00，波谷出现在中午 11 : 00–13 : 00；本研究中得出，四季日变化在 10 : 00–11 : 00 和 16 : 00 左右出现 2 个峰值，12 : 00–14 : 00 出现 1 个谷值，研究区域的不同可能是结论不同的一个重要原因<sup>[20]</sup>。

空气负离子作为空气清新程度的指南针，其浓度受人为和环境的影响较大，同一区域不同优势种类型人工林空气负离子浓度均存在明显差异，优势种应用和配置带来的林分结构变化与大区域气象条件共同作用引起的林下小环境因子的变化都在一定程度上影响空气负离子的变化<sup>[21]</sup>，因而可将影响林

分空气负离子浓度的因子区分为林分因子(树高、冠幅、胸径等)和环境因子(温度、相对湿度、风速等)。本研究中,空气负离子浓度与郁闭度、胸径均呈显著正相关。说明胸径、冠幅较大的林分,单位面积内生物量较大、叶面积指数较高,从而有利于空气负离子的产生,这与周斌等人的研究结果一致<sup>[22]</sup>。空气负离子浓度受森林环境因子的影响较为复杂,其相关性很难得出统一定论。本研究得出,空气负离子浓度与林内空气温度呈显著正相关,与林内风速无显著相关性,这与周海博等<sup>[23]</sup>、王薇等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。林内温湿度对空气负离子浓度有较大影响已得到广泛共识,但究竟是何种关系,还需长期进一步地跟踪监测,使测定结果更加客观。

本研究对黄河三角洲4种不同模式人工林空气负离子水平进行研究,结果表明,混交林模式空气负离子浓度明显优于刺槐纯林,且不同混交模式下空气负离子浓度存在一定差距,4种混交模式中以刺槐+白蜡混交模式最好。目前,黄河三角洲部分人工刺槐林已出现退化、死亡现象,因此,今后该地区在退化刺槐人工林更新改造调整时宜优先考虑刺槐+白蜡混交模式。森林空气负离子方面的研究目前越来越多,但由于测试仪器、研究方法和评价标准的不统一,研究结果也不尽相同。为发挥森林生态功能,应建立完善的环境监测制度,为森林生态功能效益估算提供依据。

## 参考文献:

[1] 邵海荣,贺庆棠. 森林与空气负离子[J]. 世界林业研究,2000,13(5):19-23.

[2] Goel N, Terman M, Terman J S, *et al.* Controlled trial of bright light and negative air ions for chronic depression[J]. *Psychological Medicine*,2005,35:945-955.

[3] Shalnov G A. Air ionization and its effects on the immune system of man[J]. *Bioradiocal*,1994,34(12):391-397.

[4] Sirota T V, Safronova V G, Amelina A G, *et al.* The effect of negative air ions on respiratory organs and blood[J]. *Biophysics*,2008,53:457-462.

[5] 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(自然科学版),2005,27(3):35-39.

[6] 蒋宣斌,王轶浩,周小舟,等. 重庆主城典型地段空气负离子动态变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),

2011,33(8):14-20.

[7] 韩明臣,叶兵,张德成. 北宫森林公园空气负离子浓度变化规律及其生态价值估算[J]. 西部林业科学,2013,42(1):32-37.

[8] 龚世成,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.

[9] 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.

[10] 石强,钟林生,吴楚材. 森林环境中空气负离子浓度分级标准[J]. 中国环境科学,2002,22(4):320-323.

[11] 石强,舒惠芳,钟林生,等. 森林游憩区空气负离子评价研究[J]. 林业科学,2004,40(1):36-40.

[12] 邢尚军,张建锋. 黄河三角洲土地退化机制与植被恢复技术[M]. 北京:中国林业出版社,2006:70-88.

[13] 杜振宇,刘方春,马丙尧,等. 黄河三角洲盐碱地长期人工林生态服务价值评估[J]. 中国农学通报,2013,29(34):17-23.

[14] 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.

[15] 王淑娟,王芳,郭俊刚,等. 森林空气负离子及其主要影响因子的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2008,29(1):243-247.

[16] 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(2):373-378.

[17] 李少宁,王燕,张玉平. 北京典型园林植物区空气负离子分布特征研究[J]. 北京林业大学学报,2010,32(1):130-135.

[18] 孙晓梅,付圣东,黄彦青,等. 栎林内空气负离子变化特征与气象因子关系研究[J]. 沈阳农业大学学报,2014,45(5):548-551.

[19] 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.

[20] 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[J]. 应用生态学报,2009,20(8):2038-2041.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 周海博,李彦鹏. 西安市近地层空气离子与环境因子的关系研究[J]. 环境科学与技术,2011,34(10):85-88.

[24] 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.