

广州城市绿地植物群落空气负离子特征研究

陈雷¹, 孙冰^{1*}, 谭广文², 李子华², 陈勇¹, 黄应锋¹, 廖绍波¹

(1. 中国林业科学院 热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 广州普邦园林股份有限公司, 广东 广州 510627)

摘要:为探讨城市绿地植物群落差异对空气负离子特征的影响,研究了5种不同典型城市绿地植物群落:次生常绿阔叶林群落(SF)、人工改造常绿阔叶林群落(IF)、人工常绿阔叶景观林群落(CF)、人工稀树灌草群落(OF)、交通绿岛群落(TA)下空气负离子浓度及空气清洁度,并以缺乏绿色植被的火车站广场(RS)作为对照。结果表明,空气负离子浓度和空气清洁度在不同植物群落和时间段内存在显著差异($p<0.05$)。其中,城市绿地植物群落中空气负离子浓度日变化普遍呈现双峰曲线;群落结构相对较为复杂的SF群落空气负离子浓度和空气清洁度最为优秀。总的来说,空气负离子浓度从大到小排序如下:SF>IF>CF>OF>RS>TA;而空气清洁度则为SF>CF>IF>OF>RS>TA;回归分析表明,大气相对湿度显著影响空气负离子浓度($R^2=0.478$, $p<0.05$)。

关键词:城市绿地;空气负离子;空气清洁度;植物群落

中图分类号:S731.2 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2015)01-0227-06

Characteristics of Negative Air Ions in Different Plant Communities of Urban Green Space, Guangzhou

CHEN Lei¹, SUN Bing^{1*}, TAN Guang-wen², LI Zi-hua², CHEN Yong¹,
HUANG Ying-feng¹, LIAO Shao-bo¹

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;
2. Guangzhou Pubang Landscape Corporation, Guangzhou, Guangdong 510627, China)

Abstract: To explore the effects of different plant communities in urban green space on the characteristics of negative air ions, air qualities were measured in 5 typical plant communities: secondary evergreen broad-leaved forest (SF), improved evergreen broad-leaved forest (IF), planted evergreen broad-leaved plantscape forest (CF), landscape communities with shrubs, herbaceous, and few arbor (OF), traffic artery green (TA), and a comparison site in railway station without any plants (RS). The results showed that significantly different negative air ion concentrations and air qualities were found among different time and communities ($p<0.05$). Concentrations of negative air ions in the daytime in urban green space exhibited a bimodal curve. The SF communities with complex community structure had the highest concentrations of negative air ions and air quality within the community was the best. Generally, the negative air ion concentrations in different plant communities were in a descending order of SF>IF>CF>OF>RS>TA, while the air qualities were SF>CF>IF>OF>RS>TA. Regression analysis showed a significant effect of atmospheric relative humidity to negative air ion concentration ($R^2=0.478$, $p<0.05$).

Key words: urban forest; negative air ion; air quality; plant community

收稿日期:2014-04-09 修回日期:2014-07-15
基金项目:广州市科技攻关与成果推广计划(2012-GX-042);国家林业局948引进项目(2011-4-40)。
作者简介:陈雷,男,博士,助理研究员,研究方向:城市林业和园林植物。E-mail: footchen@126.com
* 通信作者:孙冰,男,研究员,研究方向:森林景观。E-mail: gdsunbing@126.com

空气负离子又被称为大气维生素,它可以调节人体神经介质 5-HT(5-羟色胺)的浓度,进而影响全身各系统^[1]。研究证实,空气负离子不仅具有提高免疫力^[2]、调节血液循环^[3]等多种保健功能,而且还能用于治疗呼吸系统等方面疾病^[4]。在通常情况下,空气分子呈电中性,并随着环境的变化进而裂解为带正电荷的正离子和带负电荷的负离子,同时空气中也存在使离子消失的复合过程,这也使得正、负离子数保持一定的动态平衡。在空气受到污染时(如气体污染和粉尘污染),一些电子就会被微尘及污染物俘获,进而使空气负离子含量下降。因此,该指标能够反映空气污染状况,并受到人们的广泛认可^[5-7]。

近些年来,国内外林业和环境工作者对城市空气负离子浓度变异及其影响因素展开了多方面研究。这些研究多集中于城市边缘森林及森林公园^[8-10]、城市人工绿地^[11]及旅游景点^[7,12]等区域。而对城市中心区域居民日常休闲的绿地仍缺乏较为全面的认识。因此本研究以广州市中心区域的越秀公园及其周边绿地为样本,探讨不同城市绿地对空气负离子浓度的影响,为城市居民日常休闲绿地的选择提供参考,并为全面评价城市森林和园林绿化的生态效益提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广州市越秀区的越秀公园及其周边绿地,该地区为广州市的传统老城区之一,而且靠近火车站及北京路等繁华路段。

1.2 样点设置

2013 年 6 月份在试验地全面踏查的基础上,采用典型取样法,根据城市绿地植物群落特征差异,分别在越秀公园及周边绿地中布置 4 个约 1.0~2.1 hm² 试验点,并设立 3 个重复。为避免水体和人为因素对空气负离子的干扰,在样点布置时,周围 50 m 处避免出现水体、交通干道及一些大型休息区。

典型的次生常绿阔叶林群落(SF),约 2.1 hm²,人为干扰较少,且不存在人工抚育痕迹。该林分郁闭度为 0.85。群落结构完整,且形成明显的亚乔木层。主要树种有:幌伞枫(*Heteropanax fragrans*)、假柿木姜子(*Litsea monopetala*)、黄桐(*Endospermum chinense*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)、对叶榕(*Ficus hispida*)、朴树(*Celtis sinensis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等;林下植被主要包括海金沙(*Lygodium japonicum*)、半边旗(*Pteris*

semipinnata)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、白花灯笼(*Clerodendrum fortunatum*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)等。

人工改造的常绿阔叶林群落(IF),约 1.8 hm²。该群落为提升其观赏价值,在 SF 模式的基础上,对林下植被和部分乔木进行了改造,林下存在人工抚育痕迹,该群落郁闭度为 0.82。群落中能够形成较为完整的乔灌木结构,亚乔木层不明显,且部分区域灌木层缺失。主要树种有:阴香、大花紫薇(*Lagerstroemia speciosa*)、刺桐(*Erythrina variegata*)、幌伞枫、木棉(*Bombax malabaricum*)、朴树等树种;林下植被为人工种植的朱蕉(*Cordyline fruticosa*)、箭叶芋(*Syngonium podophyllum*)和海芋(*Alocasia macrorrhiza*)等。

人工阔叶林群落模式(CF),约 1.4 hm²,该群落为提升公园景观效果而种植,为典型的景观林,并且形成较为完整的乔灌木结构。林下植被以观赏植物为主,且需要人工抚育,该样地林分郁闭度达到了 0.86。林分中主要树种为:朴树、阴香、小叶榕(*Ficus concinna*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、蒲桃(*Syzygium jambos*)、杧果(*Mangifera indica*)等。林下植被包括:一叶兰(*Aspidistra elatior*)、文殊兰(*Crinum asiaticum* var. *sinicum*)、朱蕉、万年青(*Rohdea japonica*)等。

人工稀树灌木群落(OF),约 1.0 hm²,该群落树木较小,且稀疏,样地中存在大面积大叶油草(*Axonopus affinis*)和马尼拉(*Zoysia matrella*)草坪,其郁闭度仅为 0.16。群落中主要树种有:山杜英、木棉、小叶榄仁(*Terminalia mantaly*)、美丽异木棉(*Chorisia speciosa*)、银海枣(*Phoenix sylvestris*)、洋蒲桃(*Syzygium samarangense*)等。林下植被主要包括肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、红千层(*Callistemon rigidus*)、翠芦莉(*Aphelandra Ruellia*)等。

交通主干道绿岛乔灌木群落(TA),该绿岛位于 2 条交通主干道交汇处,面积较小,周边车流量大。绿岛能够形成较为完整的乔灌木结构,主要乔木为小叶榕和白千层(*Melaleuca leucadendron*),林下灌木和草本包括文殊兰、非洲茉莉(*Fagraea ceilanica*)、春羽(*Philodendron selloum*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)等。

对照样地(RS),反应缺乏绿色植被的水泥地。该样地位于广州市火车站广场,周边缺乏绿色植被。

1.3 方法

1.3.1 试验测定仪器及方法 采用福建省漳州市

东南电子技术研究所研制的 DLY-5G 型空气离子测量仪(由中国生物物理学会空气离子专业组监制)测定空气离子浓度。由于夏秋两季为广州市居民外出游憩最为频繁的季节,同时,相关研究也指出该两季节也是一年中林内空气负离子浓度含量最高的时段^[5]。因此,本研究分别于夏(7 月)秋(10 月)2 季选择晴朗、静风的天气对样地空气负离子浓度日变化进行测定,进而能够更好的为城市居民日常休闲绿地提供参考。测定时间从 8:00 开始,18:00 结束,每 2 h 测定 1 次。测定方法参考徐猛^[9]等方法,在每个观测点中选择一定点为圆心,以 5 m 为半径,每次观测都取 4 个方向总读数不少于 30 次,取均值分析,同时用自动温湿度测定仪记录每个样地的温湿度。

1.3.2 空气清洁度评价 空气清洁度评价采用单极系数(q)和安培空气离子评价指数(CI)来进行评价^[13]。

$$q=n^{+}/n^{-} \tag{1}$$

$$CI= n^{-}/1\,000q \tag{2}$$

式中: n^{+} 为空气正离子浓度; n^{-} 为负离子浓度;1 000 为对人体能产生生物学效应的最低负离子浓度。

通过计算所得的安培空气离子评价指数利用五分法将空气清洁度分为 5 个等级(表 1)。

表 1 空气清洁度分级标准

CI	清洁度
>1.00	最清洁
1.00~0.70	清洁
0.69~0.50	中等
0.49~0.30	容忍
≤0.29	差

1.3.3 数据处理与分析 数据采用 Excel 和 SAS 统计分析,并用 Duncan 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同绿地植物群落空气负离子浓度日变化

空气负离子主要源于群落中生物生命活动,这也导致了在城市绿地中空气负离子浓度在不同时间段及植物群落间存在显著差异($p<0.05$)。从图 1 中可以看出,在一天之中,除了夏季 OF 群落外,不同时段空气负离子浓度存在显著差异。不同模式间,空气负离子普遍呈现双峰曲线,在中午时段普遍存在一个低谷,而 10:00 和 14:00 或 16:00 达到最高值。此外,城市绿地中夏季空气负离子浓度普遍优于秋季。

不同植物群落间,SF、IF 和 CF 群落中空气负离子浓度显著高于其它群落和对照,特别是 SF 群落下平均空气负离子浓度在夏季和秋季分别达到了 1 425、1 255 个·cm⁻³,显著高于其它群落。OF 群落则较为特别,在夏季,该群落中空气负离子浓度显著高于 TA 和 RS,但是秋季并不存在显著差异。总的来说,不同植物群落中,空气负离子浓度排序如下:SF>IF>CF>OF>RS>TA。

2.2 不同城市森林景观空气清洁度日变化

通过空气中的正负离子浓度数据,可以进一步获得空气离子评价体系和空气清洁度等级,进而可以对广州市城市绿地空气清洁度进行分级。从表 2 中可以看出,在一天不同时段中,空气清洁度也存在一定变异。除了 SF 和 CF 群落外,其他群落中 14:00—18:00 空气清洁度普遍优于 8:00—10:00,而 CF 群落则刚好相反,上午时段空气清洁度优于下午时段。

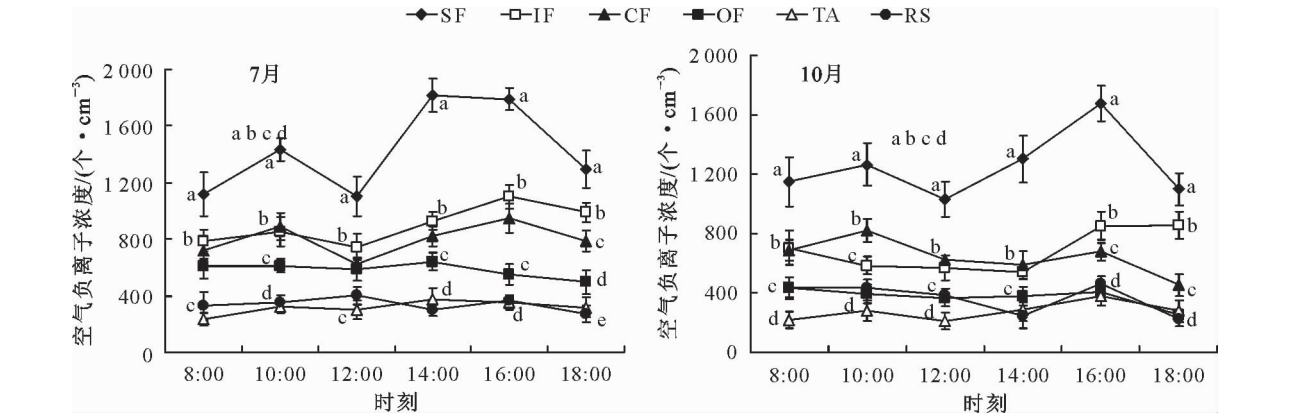


图 1 不同城市绿地植物群落空气负离子浓度日变化

Fig. 1 Daily variations of negative air ions in different plant communities

空气清洁度在不同群落间也存在一定的差异。总的来说,SF 群落下空气最为清洁,均能维持于清

洁水平,最清洁时段甚至达到了 41.67%;而在 IF 和 CF 群落中,清洁及最清洁时段分别为 33.33%和

58.33%；在 OF、TA 和 RS 群落中，监测显示，这 3 个模式下并没有出现空气清洁时段，反而空气清洁度差的时段分别出现了 1 次、7 次和 5 次，分别达到

了总数的 8.33%、58.33%和 41.67%。不同模式下空气清洁度从大到小排序如下：SF>CF>IF>OF>RS>TA。

表 2 不同城市绿地植物群落空气清洁度日动态

Table 2 Daily variations of air qualities in different plant communities

模式		8:00		10:00		12:00		14:00		16:00		18:00	
		CI	清洁度	CI	清洁度	CI	清洁度	CI	清洁度	CI	清洁度	CI	清洁度
夏季	SF	0.86	清洁	1.22	最清洁	0.94	清洁	1.70	最清洁	0.93	清洁	0.98	清洁
	IF	0.46	容许	0.67	中等	0.48	容许	0.90	清洁	0.84	清洁	0.81	清洁
	CF	0.83	清洁	1.37	最清洁	0.88	清洁	0.65	中等	0.88	清洁	0.61	中等
	OF	0.48	容许	0.48	容许	0.60	中等	0.53	中等	0.34	容许	0.33	容许
	TA	0.14	差	0.19	差	0.34	容许	0.54	中等	0.48	容许	0.16	差
	RS	0.37	容许	0.21	差	0.47	容许	0.52	中等	0.36	容许	0.18	差
秋季	SF	0.90	清洁	0.91	清洁	1.25	最清洁	1.56	最清洁	1.70	最清洁	0.90	清洁
	IF	0.60	中等	0.65	中等	0.38	容许	0.42	容许	0.66	中等	0.77	清洁
	CF	1.30	最清洁	1.53	最清洁	0.82	清洁	0.54	中等	0.57	中等	0.56	中等
	OF	0.49	容许	0.27	差	0.36	容许	0.51	中等	0.56	中等	0.47	容许
	TA	0.09	差	0.20	差	0.24	差	0.22	差	0.35	容许	0.32	容许
	RS	0.38	容许	0.41	容许	0.23	差	0.18	差	0.36	容许	0.20	差

2.3 空气负离子的影响因素

由于空气负离子的产生源于空气分子的裂解，因此这一过程也受到各方面因素的影响。线性回归分析表明，大气温度并不能显著影响到空气负离子浓度，说明在城市绿地中，大气温度不是影响空气负离子浓度的因素(图 2)。大气相对湿度能够显著影响空气负离子浓度($p<0.05$)，其回归方程为 $y=0.034x+23.275$ ，其中 y 值为大气相对湿度， x 值为空气负离子浓度($R^2=0.478$)。说明在城市绿地中，空气负离子浓度随着大气相对湿度的上升而上升(图 3)。

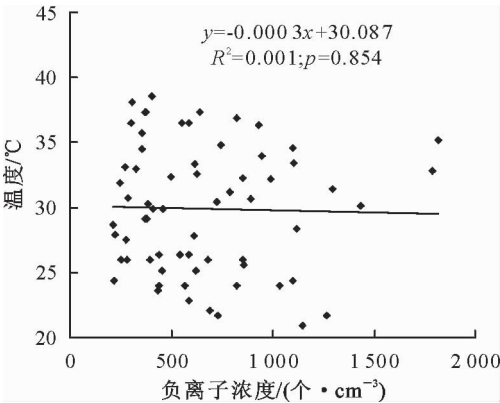


图 2 大气温度与空气负离子的关系

Fig. 2 The relationships among air temperature and negative air ions

物的生命活动过程。因而促使植物群落对系统空气负离子浓度产生深远的影响^[14]。

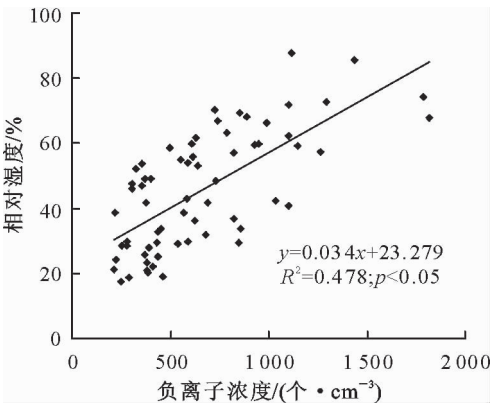


图 3 大气相对湿度与空气负离子的关系

Fig. 3 The relationships among humidity and negative air ions

3 结论与讨论

在天然环境中，空气负离子的产生途径有 2 种，一种是物理性发生，主要存在于水分子裂解；另一种为生物性发生，主要发生于土壤、植物、动物和微生物

的生命活动过程。因而促使植物群落对系统空气负离子浓度产生深远的影响^[14]。本研究发现，与相比，SF、IF 和 CF 群落下空气负离子浓度显著高于缺乏绿色植被的样地(RS)，这也说明绿色植被能够促进空气中负离子浓度的增加。该结果与之前研究较为一致，研究显示，在公园绿地建成之后，空气负离子的含量显著上升^[8]。植被群落的复杂程度也是影响空气负离子的关键，复合结构配置的人工景观群落下的空气负离子浓度高于简单结构的景观^[11]。秦俊^[15]等研究发现，与水泥地相比，植物群落能够显著提升空气负离子浓度，而草坪效果较差。本研究也有着类似的结构，群落结构最为复杂的 SF 空气负离子显著高于其它绿地群落，而 OF 群落空气负离子浓度显著低于 SF、IF 和 CF 群落。岳麓山景区及其周边环境的研究同样显示，景区植被较为复杂的次生林环境下空气负离子浓度高于植被较为简单的公园景观林^[6]。值得注意

的是,有研究指出交通干道周围的空气负离子浓度要高于汽车站等缺乏植被的样地。这个结果与本研究结果存在一定的差异。在本研究中,虽然与 RS 相比,TA 存在一定的绿色植被,然而该模式下空气负离子浓度仍然低于火车站广场(RS)。其可能的原因在于空气负离子浓度与大气污染物呈现负相关,而与火车站广场相比,交通干道和汽车站的车辆较多,其尾气排放降低了空气负离子浓度。

植物生长旺季通常是空气负离子最高的季节。研究显示,农田防护林中,空气负离子浓度在植物生长旺季的 6—8 月较高,而在冬季较低^[16]。本研究有着类似的结果:城市绿地中夏季空气负离子浓度普遍优于秋季。同时,空气负离子浓度在一天之中存在着一定的波动。本研究显示,存在绿色植被的模式(SF、IF、CF、OF 和 TA)中空气负离子浓度在午间(12:00)较低,其变化呈现双峰曲线。这个结果与彭辉武^[5]等较为一致,该研究同样发现在秋茄群落中,空气负离子含量在中午时段出现下降趋势,此后又重新呈现上升趋势。此外,张建国^[17]等在橘林中也发现类似结果。主要原因在于植物光合作用是空气负离子浓度的重要来源之一,由于大部分植物光合作用存在午休现象,这也导致了空气负离子在中午时段呈现下降趋势。除了植物光合作用,研究证实人流量和车流量也是影响空气负离子的重要因素^[18]。特别是车流量的增加使得大气污染物含量得到了提升,也降低了空气负离子的浓度。这也导致了在本研究中在城市下班高峰期(16:00)之后,所有模式中空气负离子又开始呈现下降趋势。而在火车站广场,由于夏季中午(12:00)酷暑天气使得人流的减少,也促使该模式下空气负离子在该时段出现上升趋势。

通过空气正负离子指标对旅游景区和森林公园空气清洁度进行评价已经被广泛采用^[7,10,12]。石强^[12]等建立了空气负离子系数模型及森林空气离子评价模型,制定出了森林游憩区空气负离子分级标准及评价指数分级标准,并在张家界森林公园中得到了很好的应用。由于这些评价体系以空气负离子浓度为基础,因而使空气清洁度与负离子浓度密切相关。因此,在本研究中,SF 群落中,空气清洁度最为优秀,OF、TA 和 RS 群落的空气清洁度较差。邵海荣^[19]等同样认为,在北京地区,有林地区空气清洁度明显好于无林地区。但是值得注意的是,空气负离子浓度并不能完全反应空气清洁度。本研究中,虽然 IF 群落中空气负离子高于 CF 群落,但是其空气清洁度却比 CF 群落差。这显然是由于 CF 中空气正离子较少的缘故。这也说明了经过合理配

置的景观林中空气清洁度能够达到甚至超过改造后的次生林水平。

除了景观变异外,气象因子变化是影响空气负离子变异的重要因素。现有的研究普遍认为大气相对湿度与空气负离子呈显著相关性^[5,20,21],本研究结果有着类似的发现。水分子的裂解是空气负离子的主要来源之一,在一些靠近水源的区域如瀑布,空气负离子的含量显著高于其他样地^[9]。这也与本试验中空气负离子浓度和大气相对湿度的显著相关性一致。然而,现阶段,一些气象因子如:大气温度对空气负离子浓度的影响仍然存在一定的争议。章志攀^[20]等认为天目山国家级自然保护区中空气负离子与气温呈显著负相关;而对合肥市公园、生活居住区、商业区和工业区的研究则认为气温对空气负离子浓度影响相对较小^[21];类似的,在红树林系统中同样发现空气负离子浓度与气温相关性并不显著^[5]。而本研究同样认为空气负离子浓度与气温并不存在显著相关性,说明气温并不是影响空气负离子指标的重要因素。

综上所述,本研究结果证实了植物群落和大气相对湿度是影响空气负离子浓度和空气清洁度的关键因素。在城市绿地中,群落结构复杂、人为干扰少的 SF 群落中空气负离子浓度和空气清洁度最为优秀。但是,实际上,影响空气负离子的因素非常复杂,黄世成^[22]等通过途径分析认为气象因子与空气负离子浓度的相关性在很大程度也会受到降雨状况和景观类型的影响。说明景观因素和气象因素对空气负离子的影响是个相互的、综合性的过程,而这个过程仍然需要进一步的研究。

参考文献:

[1] KRUEGER A P, SMITH R F. The biological mechanisms of air ion action II. negative air ion effects on the concentration and metabolism of 5-hydroxytryptamine in the mammalian respiratory tract[J]. The Journal of General Physiology, 1960, 44(2): 269-276.

[2] 张毅,崔留欣,程学敏,等. 空气负离子对小鼠免疫功能的影响[J]. 河南医科大学学报, 1996, 31(2): 56-58.

ZHANG Y, CUI L X, CHENG X M, *et al.* The effect of negative air ions on the immunological function of mice[J]. Journal of Henan Medical University, 1996, 31(2): 56-58. (in Chinese)

[3] 王红梅,高珊,马玲,等. 空气负离子对小鼠血液生化指标和血乳酸的影响[J]. 毒理学杂志, 2012, 26(1): 31-33.

[4] 刘小喜. 庐山空气负离子对支气管哮喘的防治效果[J]. 解放军预防医学杂志, 1992, 10(3): 54-56.

[5] 彭辉武,郑松发,刘玉玲,等. 珠海淇澳岛红树林群落空气负离子浓度特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(5): 64-67.

PENG H W, ZHENG S F, LIU Y L, *et al.* Air anion concen-

tration of mangrove communities in Qi'ao Island, Zhuhai of Southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(5): 64-67. (in Chinese)

[6] 吴甫成, 姚成胜, 郭建平, 等. 岳麓山空气负离子及空气质量变化研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1737-1744.
WU P C, YAO C S, GUO J P, *et al.* Distribution of negative air ions and its relation to air quality of the Yuelu Mountain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (10): 1737-1744. (in Chinese)

[7] 张建国, 俞益武, 章志攀, 等. 衢州七里旅游区环境质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 167-170.
ZHANG J G, YU Y W, ZHANG Z P, *et al.* The evalution of environmental quality in Qili Tourism area of Quzhou [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(4): 167-170. (in Chinese)

[8] 潘剑彬, 董丽, 晏海. 北京奥林匹克森林公园绿地空气负离子密度季节和年度变化特征[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 44-50.
PAN J B, DONG L, YAN H. Seasonal and annual characteristics of concentration of negative air ions in Beijing Olympic Forest Park [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(9): 44-50. (in Chinese)

[9] 徐猛, 陈步峰, 栗娟, 等. 广州帽峰山林区空气负离子动态及与环境因子的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1891-1897.
XU M, CHEN B F, SU J, *et al.* Dynamic of negative air ions and its relationship to environmental factors in Maofeng Mountain, Guangzhou [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1891-1897. (in Chinese)

[10] 冯磊, 胡希军, 罗慧敏, 等. 城郊型森林公园环境评价及研究——以宜昌市夷陵森林公园为例[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 177-180.
FENG L, HU X J, LUO H M, *et al.* Environment assessment and landscape planning of suburban forest park——a case study of Yiling Forest Park, Yichang [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 177-180. (in Chinese)

[11] 范亚民, 何平, 李建龙. 城市不同植被配置类型空气负离子效应评价[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 883-886.
FAN Y M, HE P, LI J L. Effect evaluation of air negative ions under different vegetation arrangements in Nanning city [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(8): 883-886. (in Chinese)

[12] 石强, 舒惠芳. 森林游憩区空气负离子评价研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 36-40.
SI Q, SHU H F. Research on evaluation of the aeroanion in forestry recreational areas[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(1): 36-40. (in Chinese)

[13] KRUEGER A P, REEDE E J. Biological impact of small air ions[J]. Science, 1976, 193: 1209-1213.

[14] 李年麒, 苏印泉, 张楠阳, 等. 黄土高原腹地千阳不同林分空气负离子分布规律研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 24-28.
LI N L, SU Y Q, ZHANG N Y, *et al.* Distribution pattern of air anion in different stands in Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 24-28. (in Chinese)

[15] 秦俊, 王丽勉, 高凯, 等. 植物群落对空气负离子浓度影响的研究[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(2): 303-308.
QIN J, WANG L M, GAO K, *et al.* Improvement of negative air ions concentration by plant communities [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 303-308. (in Chinese)

[16] 崔晶, 薛兴燕, 胡秀丽, 等. 河南黄淮海平原农田防护林空气负离子变化规律[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 30-35.
CUI J, XUE X Y, HU X L, *et al.* Variation regularity of air anion in agroforestry ecosystem in Huang-Huai-Hai Plain in Henan Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 30-35. (in Chinese)

[17] 张建国, 徐文俊, 崔会平, 等. 柑橘纯林空气负离子水平的研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 31-34.
ZHANG J G, XU W J, CUI H P, *et al.* Aero-anion levels in citrus plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 31-34. (in Chinese)

[18] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光. 广州绿地空气负离子水平及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1049-1053.
ZENG S C, SU Z Y, CHEN B G. Air negative ion concentrations and their affecting factors in greenbelts of Guangzhou [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(7): 1049-1053. (in Chinese)

[19] 邵海荣, 杜建军, 单宏臣, 等. 用空气负离子浓度对北京地区空气清洁度进行初步评价[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 56-59.
SHAO H R, DU J J, CHAN H C, *et al.* Assessment of air-cleanness degree in Beijing using negative air ion concentration as an index [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(4): 56-59. (in Chinese)

[20] 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]. 浙江林学院学报, 2008, 25(4): 481-485.
ZHANG Z P, YU Y W, ZHANG M L, *et al.* Negative air ion concentration and environmental factors for Mount Tianmu of Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(4): 481-485. (in Chinese)

[21] 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.
WEI C L, WANG J T, JIANG Y L, *et al.* Air negative charge ion concentration and its relationships with meteorological factors in different ecological functional zones of Hefei City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2158-2162. (in Chinese)

[22] 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.
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, 38(11): 1417-1422. (in Chinese)