

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201507015

张兵, 储双双, 张立超, 等. 广东车八岭国家级自然保护区空气负离子水平及其主要影响因子 [J]. 广西植物, 2016, 36(5):523-528
ZHANG B, CHU SS, ZHANG LC, et al. Air negative ion concentrations and their affecting factors in Guangdong Chebaling National Nature Reserve [J].
Guihaia, 2016, 36(5):523-528

广东车八岭国家级自然保护区空气 负离子水平及其主要影响因子

张 兵¹, 储双双¹, 张立超¹, 张朝明², 宋相金², 孔德敏², 肖梦蕊¹, 曾曙才^{1*}

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 广东车八岭国家级自然保护区, 广东 韶关 512600)

摘 要: 空气负离子(Negative air ion, NAI)是综合反映空气质量的重要指标,对人类的生活环境具有重大意义。该研究选定广东车八岭国家级自然保护区内 10 个典型观测点,在 5 月份(夏季)和 10 月份(秋季)进行 NAI 观测。结果表明:保护区内 NAI 浓度较高,均高于 700 个·cm⁻³;各观测点的 NAI 浓度基本呈现水体>森林>草坪>楼内的规律;秋季 10 个观测点的 NAI 浓度从高到低依次为博物馆旁河中央、漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、针阔混交林、针叶林、博物馆前草坪、单竹坑、吊桥、办公楼内;观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的 NAI 水平与单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林均有显著差异。夏季各观测点的 NAI 浓度从高到低依次为小瀑布口、博物馆旁河中央、小瀑布支柱、漂流起点、针阔混交林、针叶林、单竹坑、博物馆前草坪、吊桥、办公楼内,其中观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央显著高于其它地点,观测点针阔混交林、针叶林显著高于单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内,观测点办公楼内显著低于其他点。区内 NAI 浓度受到季节、水体、植被类型等因素的影响。

关键词: 车八岭国家级自然保护区, 空气负离子, 观测点, 影响因子, 水体

中图分类号: Q948.1, S731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)05-0523-06

Air negative ion concentrations and their affecting factors in Guangdong Chebaling National Nature Reserve

ZHANG Bing¹, CHU Shuang-Shuang¹, ZHANG Li-Chao¹, ZHANG Chao-Ming²,
SONG Xiang-Jin², KONG De-Min², XIAO Meng-Rui¹, ZENG Shu-Cai^{1*}

(1. College of Forestry & Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2. Guangdong Chebaling National Nature Reserve, Shaoguan 512600, China)

Abstract: The negative air ion (NAI) is one of the most important indicators of air quality, and is of great significance to human being's living environment. The authors selected 10 typical observation sites in Guangdong Chebaling National Nature Reserve and measured the NAI concentrations in summer and autumn. The results showed that NAI concentrations in the reserve was relatively high, with the NAI concentrations at all the observation sites above 700 ions·cm⁻³. The NAI near waters was the highest, followed by those in forest, lawn and building in a decreasing sequence. NAI concentrations in autumn at the ten sites exhibited a decreasing order of river near the museum (Site

收稿日期: 2015-08-16 修回日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(31270675); 广东省科技计划项目(2014A020216032) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31270675); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2014A020216032)].

作者简介: 张兵(1989-), 男(土家族), 湖北恩施人, 硕士, 主要从事森林生态与森林环境学研究, (E-mail)462850522@qq.com。

*通讯作者: 曾曙才, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态学和环 境生态学研究, (E-mail)sczeng@scau.edu.cn。

10), starting point of drift (Site 7), waterfall (Site 8), waterfall pillar (Site 9), conifer-broad leaved forest (Site 5), coniferous forest (Site 6), lawn near the museum (Site 3), Danzhu Pit (Site 1), suspension bridge (Site 2) and office (Site 4). There was a significant difference in NAI concentration between sites 7, 8, 9, 10 and sites 1, 2, 3, 4, 5, 6. In summer, the NAI concentrations at the ten sites showed a decreasing order of sites 8, 10, 9, 7, 5, 6, 1, 3, 2 and 4. NAI at sites 7, 8, 9, 10 was significantly higher than other sites. NAI at sites 5, 6 was significantly higher than sites 1, 2, 3, 4. Site 4 was significantly lower than other sites. Season, water and vegetation type were found to influence the NAI concentrations in the reserve.

Key words: Chebaling National Nature Reserve, negative air ion (NAI), observation sites, affecting factors, water

空气负离子 (Negative air ion, NAI) 由德国科学家 Elster 和 Geitel 首先发现, 其浓度水平已成为评价一个地方空气清洁程度的指标 (王薇和余庄, 2013)。1978 年, 在中国兴起研究空气负离子, 并经历了 20 世纪八九十年代两个探索高潮 (章志攀等, 2006)。到目前为止, 有关空气负离子的研究大都侧重于自然环境中和人为干扰条件下的浓度水平、医疗保健作用及资源开发利用等 (邵海荣和贺庆棠, 2000)。吴楚材等 (2001) 发现 NAI 对生命必不可少, 对人体健康十分有益。自然界中 NAI 的产生机制主要有 3 种: 一是紫外线、宇宙射线和放射性物质等因素作为电离剂, 使空气发生电离, 生成空气负离子; 二是树木叶枝的尖端放电及绿色植物光合作用形成的光电效应, 使空气电离产生空气负离子; 三是水的勒纳德效应 (Lenard waterfall effect), 水在重力作用下自上而下高速运动, 在运动过程中水分子由于发生碰撞而裂解, 进而产生大量空气负离子 (赵雄伟等, 2007)。

随着现代工业化飞速发展, 污染问题愈加严重, 环境正受到前所未有的破坏, 大自然良好的环境日益受到人们重视, 其中 NAI 水平成为近年来人们关注和研究的热点, 并已取得重要研究成果。范亚民等 (2005) 发现空气负离子的浓度有随植被群落郁闭度增加而增大的趋势; Wu et al (2006) 的研究表明湿度与负氧离子存在正相关关系; 胡国长 (2008) 通过对南京 7 片林地空气负离子的研究发现, 不同林分类型在相同环境下空气负离子的差异显著, 具体表现为圆柏 > 水杉 > 竹林 > 香樟 > 落叶栋林 > 马尾松 > 草坪; Wang & Li (2009) 研究发现光照强度在植物生长繁殖的过程中对空气负离子生产能力具有一定影响; 熊丽君等 (2014) 利用主成分分析法, 结合空气负离子, 评价了不同生态用地的健康效益, 为人们外出休闲游憩提供了参考和借鉴。本研究测定了广东车八岭国家级自然保护区 NAI 浓度水平, 分析了

植被类型、季节、水体等对空气负离子浓度的影响, 以期为保护区生态效益评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

车八岭国家级自然保护区位于广东韶关市始兴县境内 (114°09'04" ~ 114°16'46" E, 24°40'29" ~ 24°46'21" N)。区内地貌复杂、山高谷深, 地势西北高东南低, 最高峰天平架海拔为 1 256 m, 最低处樟栋水海拔为 330 m。保护区属中亚热带季风气候区, 年平均气温 19.6 °C, 年降水量 1 468 mm, 气候温暖湿润。观测地点包括保护区内的单竹坑 (观测点 1)、吊桥 (观测点 2)、博物馆前草坪 (观测点 3)、办公楼内 (观测点 4)、针阔混交林 (观测点 5)、针叶林 (观测点 6)、漂流起点 (观测点 7)、小瀑布口 (观测点 8)、小瀑布支柱 (观测点 9)、博物馆旁河中央 (观测点 10)。

1.2 研究方法

测定空气负离子的仪器为日产 AIC-2M 型空气负离子测定仪, 该仪器工作温度为 -10 ~ 50 °C, 检测范围为 $\pm 0.1 \sim 1.999 \times 10^5$ 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 风速 $< 15 \text{ km} \cdot \text{hr}^{-1}$, 测量单位为 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 分解能力为 10 个 (0.01 $\times 10^3$ 个), 离子浓度误差及迁移率 $\leq \pm 25\%$, 是测量大气离子的常用仪器, 具有数据稳定、灵敏度高以及便携性好等优点。

在研究区内选定适宜观测点, 选取相互垂直的 4 个方向进行空气负离子的测定。仪器以恒定流速把空气吸入测定仪, 通过微电流计测定空气粒子所携带的电荷形成电流, 根据测得的电流值和采集的空气流量计算出空气负离子浓度。每个方向连续记录 10 次空气负离子浓度波峰值, 取 4 个方向的算术平均值作为该观测点的负离子浓度值, 同时详细记录观测点周边的环境条件。在研究各因子对空气负

离子浓度的影响时,遵照单一差异原则,在考察某一个因子对空气负离子浓度的影响时,要求其他环境因子基本一致,如在考察季节对空气负离子影响时选择相同的观测地点,并在相同的时间段对空气负离子进行测定。

1.3 数据统计与分析

采用软件 Excel 2003 整理数据、Origin 8.0 绘制图形、SPSS 19.0 统计分析;运用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan 多重极差检验法比较不同数据组间的差异、系统聚类法对观测点聚类。

2 结果与分析

2.1 韶关车八岭自然保护区的空气负离子水平

从图 1 可以看出,保护区 NAI 浓度较高,说明该保护区内空气清新。在秋季,观测点单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内的 NAI 浓度较接近,针阔混交林、针叶林接近,漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央接近,夏季基本相似,且 NAI 浓度为观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央>观测点针阔混交林、针叶林>观测点单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内。秋季各个观测点的 NAI 浓度(个· cm^{-3})从大到小依次为博物馆旁河中央、漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、针阔混交林、针叶林、博物馆前草坪、单竹坑、吊桥、办公楼内;夏季的 NAI 浓度从大到小依次为小瀑布口、博物馆旁河中央、小瀑布支柱、漂流起点、针阔混交林、针叶林、单竹坑、博物馆前草坪、吊桥、办公楼内。在秋季,观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的 NAI 浓度与单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林均有显著差异,针阔混交林、针叶林与其他观测点均有显著差异,单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内与其他观测点有显著差异,观测点单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内间无显著差异,针阔混交林、针叶林间无显著差异,漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央间无显著差异。在夏季,观测点办公楼内与其他点均有显著差异,单竹坑、吊桥、博物馆前草坪与其他观测点有显著差异,针阔混交林、针叶林与其他观测点有显著差异,漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央与其他观测点有显著差异。

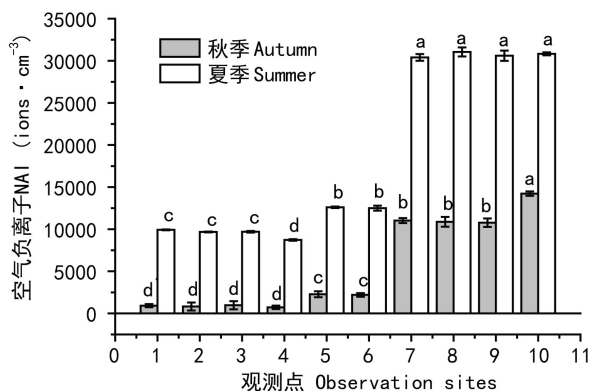


图 1 观测点夏季和秋季的 NAI 浓度(个· cm^{-3}) 数据为平均值 ± 标准误,多重比较采用 Duncan 法,同一季节数据标注不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 NAI concentrations at different observation sites in summer and autumn (ions · cm^{-3}) The data is mean ± SE in the table, using Duncan's multiple comparison method, the data marked by different letters in the same season is significant ($P < 0.05$).

2.2 各观测点空气负离子浓度聚类分析

用系统聚类方法对观测点春季和秋季空气负离子进行聚类分析,由图 2 可知,组间距离较大、组内距离较小,说明聚类结果较为理想。观测点单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林归为一大类;漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央归为一大类。从观测点单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林的聚类分析(图 3)看出,针阔混交林、针叶林一类,单竹坑、吊桥、博物馆前草坪一类,办公楼内单独一类。由观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的聚类分析(图 4)可知,漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱一类,博物馆旁河中央单独一类。综上所述可知,地面观测点(无水体)归为一类,其他有水体的归为一类,说明观测点有无水体对 NAI 有影响。图 3 把陆地观测点再次聚类,发现茂密森林为一类,稀疏林木为一类,室内单独为一类,说明植被组成及室内外环境对 NAI 水平有影响。图 4 把有水体的观测点再次聚类,漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱为一类,博物馆旁河中央单独一类,说明水体的流态对 NAI 浓度有影响。

2.3 保护区 NAI 主要影响因子分析

2.3.1 水体对 NAI 的影响 水体能增加其周围空气负离子的浓度。由图 1 可知,有水体的观测点漂流

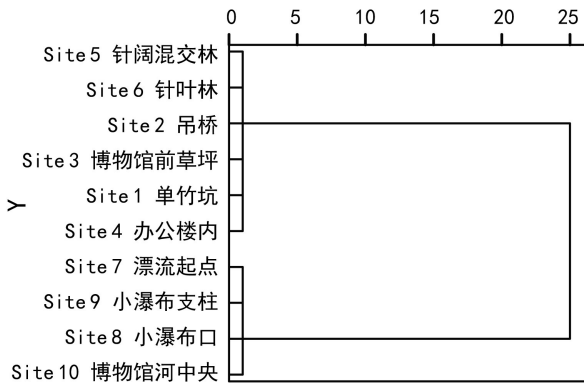


图2 各观测点聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of all the observation sites

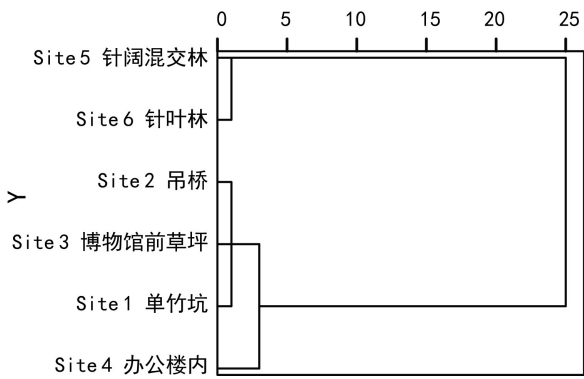


图3 地面观测点聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of the terrestrial observation sites

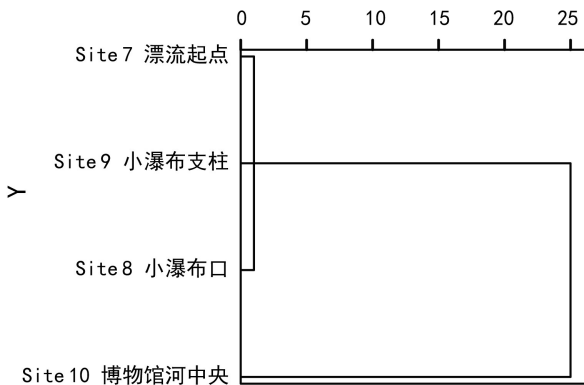


图4 水面观测点聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of the observation points near the water

(有水体)的空气负离子浓度为30 400、31 050、30 600、30 825个· cm^{-3} ;单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林(无水体)的空气负离子分别为9 925、9 675、9 700、8 725、12 600、12 500个· cm^{-3} 。在秋季,观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央(有水体)的空气负离子浓度分别为11 025、10 875、10 775、14 225个· cm^{-3} ;单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内、针阔混交林、针叶林(无水体)的空气负离子浓度分别为925、825、975、725、2 275、2 200个· cm^{-3} 。总之,在不同季节有水体观测点空气负离子浓度明显高于无水体的。

2.3.2 季节对空气负离子的影响 由图1可知,在同一观测点,夏季的空气负离子的数值均远远高于其秋季的数值,其增量从1到10依次为9 000、8 850、8 725、8 000、10 325、10 300、19 375、20 175、19 825、16 600个· cm^{-3} 。总而言之,季节的变化会显著影响空气负离子浓度。

2.3.3 植被对NAI的影响 保护区内地面(无水体)各观测点NAI秋季为针阔混交林>针叶林>博物馆前草坪>单竹坑>吊桥>办公楼内,夏季为针阔混交林>针叶林>单竹坑>博物馆前草坪>吊桥>办公楼内,NAI浓度基本呈现森林>草地>室内的规律,其中观测点单竹坑、博物馆前草坪在秋季的NAI浓度博物馆前草坪>单竹坑,而在夏季的值刚好相反,为单竹坑>博物馆前草坪,可能是观测点单竹坑、博物馆前草坪植物量相当,两者均无水体存在,受两观测点海拔,风力和植被类型等综合影响。秋季和夏季观测点针阔混交林、针叶林的NAI浓度显著高于单竹坑、吊桥、博物馆前草坪、办公楼内,即森林内观测点的空气负离子浓度高于森林外观测点(图1)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

广东车八岭自然保护区NAI浓度明显高于广州帽峰山NAI浓度。徐猛等(2008)的研究表明帽峰山林内空气负离子浓度基本在840~1 200个· cm^{-3} ,而车八岭自然保护区林内的空气负离子浓度基本在5 000~7 500个· cm^{-3} ,这可能与车八岭自然保护区植物多样性较高有关,车八岭保护区物种资源丰富,仅调查鉴定的植物种类就已达1 928种,隶属于290科925属(张璐等,2004)。相对而言,帽峰

起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的空气负离子浓度高于其他无水体的。在夏季,观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央

山森林公园的常见植物只有 125 科, 447 种(刘惠明等, 2003)。车八岭自然保护区物种更加丰富, 植被覆盖率更高, 因而空气负离子含量相对更高。

有水体的观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的空气负离子浓度高于其他无水体的。观测点漂流起点、小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆旁河中央的 NAI 浓度之所以显著高于陆地的, 是因为观测点存在勒纳德效应。在空气中, 水滴运动能量的消耗常常伴随着电荷的分离, 在外加剪切力作用下水滴剥离大水滴形成水雾, 水雾从大水滴表面脱离时带上负电荷(王洪俊, 2003)。水滴破碎之后较大液滴带有正电荷, 在撞击下被空气带走的小水雾液滴带有负电荷, 从而形成负离子。水的喷溅等作用洗走了空气中的灰尘, 对空气起到清洁作用, 使空气中的负离子数量不断累积, 从而负离子浓度逐渐上升。小瀑布口、小瀑布支柱、博物馆河中央、漂流起点因为有水体存在, 存在勒纳德效应, 使其周边的空气负离子不断增加, 从而使这些观测点的浓度显著高于其他的。秋季观测点的 NAI 浓度为博物馆旁河中央>小瀑布口>小瀑布支柱>漂流起点, 夏季的浓度从大到小依次为小瀑布口、博物馆旁河中央、小瀑布支柱、漂流起点, 说明秋季观测点博物馆旁河中央勒纳德效应强于小瀑布口, 而夏季观测点的勒纳德效应变得更加强烈, 导致其 NAI 浓度超过博物馆旁河中央达到最大(王薇和余庄, 2013)。水体的存在能明显增加其周围的空气负离子数量, 如何平等(2015)发现在含有水体的生态功能区空气负离子浓度明显高于游客聚集区; 司婷婷等(2014)的研究表明负离子浓度与降雨强度有显著正相关关系。本研究仅从有无水体的角度分析了其对 NAI 浓度的影响, 为了更好地了解水体对 NAI 浓度的影响, 还可从水体流速、水体量等因素进一步深入研究。

季节变化会显著影响空气负离子浓度, 各观测点夏季的空气负离子数量均高于其秋季空气负离子数量。夏季空气湿度较大, 水滴对大气可吸入灰尘等悬浮颗粒具有良好的清洗作用, 从而能减少空气中凝结核的数量, 结果使空气中负离子的消亡速率小于其生成速率(陈欢和章家恩, 2010)。本研究负离子浓度增加, 结果夏季观测点的空气负离子浓度高于秋季的。这与以往的研究结果一致, 如徐猛等(2008)研究广州帽峰山林区空气负离子时发现该区域夏季空气负离子浓度显著高于其他季节。

植物数量对空气负离子浓度有显著影响, 如蒙晋佳和张燕(2004)研究表明植物数量与空气负离子浓度有显著正相关关系; 李少宁等(2010)发现有植被地区空气负离子数值明显高于无植被区; 肖红燕等(2014)发现林地的空气负离子浓度明显高于无林地区。因为植物叶枝的尖端放电能生成大量负离子, 而植物稀少或无植物地区负离子一般是宇宙射线、阳光中紫外线和地面放射性物质等作为电离剂使空气电离后产生的, 这些方式产生的空气负离子数量比植物叶枝尖端放电所产生的要少得多(蒙晋佳和张燕, 2004)。由于针阔混交林、针叶林都富含植物, 所以其空气负离子浓度要高于其他 4 个观测点。另外, 针阔混交林和针叶林内植物光合作用强烈, 蒸腾旺盛, 易产生水汽, 这进一步促进了空气负离子生成(吴志萍等, 2007)。本研究分析表明保护区内地面(无水体)各观测点 NAI 浓度基本呈现森林>草地>室内的规律, 但尚未分析不同环境下的主要影响因素, 因此还需进一步全面了解各个因素对 NAI 浓度的影响大小。

空气负离子研究中, 测定方法和仪器的稳定可靠是研究结果可靠性至关重要的保障因素。测定过程中务必选择代表性观测点, 应多次重复读取波峰值, 同时要求在相互垂直的 4 个方向进行测定。鉴于空气负离子浓度的易变性, 在今后的研究中应进行同一地点的多天连续观测, 并将最高值、最低值、平均值、中值、变异系数、方差等一一列出, 这样有助于更加全面客观地了解空气负离子。另外, 仪器在使用前和使用过程中要不断进行调试校准, 加强仪器的保养和维护。为了增强研究方法的科学性和结果的可靠性, 使不同学者的研究成果具有可比性和相互参考价值, 今后有必要制定空气负离子监测和研究方法的行业标准。

3.2 结论

通过对广东车八岭国家级自然保护区空气负离子水平及其影响因素的研究, 得到的主要结论如下: (1) 韶关车八岭自然保护区 NAI 浓度较高, 对空气具有良好的清新作用; (2) 季节对空气负离子有显著影响, 各观测点夏季空气负离子明显高于秋季; (3) 水体也对空气负离子影响显著, 有水体观测点高于无水体观测点; (4) 植被与空气负离子浓度关系密切, 植物量大的观测点高于量少的观测点, 植被类型与空气负离子密切相关, 夏季和秋季空气负离子浓度表现为针阔混交林>针叶林>草坪>楼内; (5)

不同季节,各观测点空气负离子浓度大小顺序有所不同,说明空气负离子浓度受各因素的综合影响,在不同的环境下,主要影响因素会发生变化。

参考文献:

- CHEN H,ZHANG JE, 2010. Review on factors influencing the concentration distribution of negative air ions [J]. *Ecol Sci*,29(2): 181-185. [陈欢,章家恩, 2010. 空气负离子浓度分布的影响因素研究综述 [J]. *生态科学*,29(2):181-185.]
- FAN YM,HE P,LI JL,et al, 2005. Effect evaluation of air negative ions under different vegetation arrangements in Nanning city [J]. *J Biol*,24(8): 883-886. [范亚民,何平,李建龙,等, 2005. 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*,24(8):883-886.]
- HU GC, 2008. The study of air ions space-time distribution and influential facts of different forest types [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University. [胡国长, 2008. 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.]
- HE P,CHANG SL,ZHANG YT,et al, 2015. Spatiotemporal distribution and influence factors of negative air ion in forest recreation areas across Xinjiang [J]. *Res Sci*, 37(3): 629-635. [何平,常顺利,张毓涛,等, 2015. 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*,37(3):629-635.]
- LI SN,WANG Y,ZHANG YP,et al, 2010. Distribution characteristics of negative air ions in typical garden areas of Beijing [J]. *J Beijing For Univ*,32(1): 130-135. [李少宁,王燕,张玉平,等, 2010. 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*,32(1):130-135.]
- LIU HM,YANG YQ,LUO FH,et al, 2003. Analysis of forest landscape diversity of Maofeng Mountain forest park in Guangzhou [J]. *Ecol Sci*,22(1): 30-33. [刘惠明,杨燕琼,罗富和,等, 2003. 广州市帽峰山森林公园森林景观多样性分析 [J]. *生态科学*,22(1):30-33.]
- MENG JJ,ZHANG Y, 2004. The distribution of air anion concentration above ground at some scenic sites in Guangxi [J]. *Res Environ Sci*,17(3):25-27. [蒙晋佳,张燕, 2004. 广西部分景点地面上空气负离子浓度的分布规律 [J]. *环境科学研究*,17(3):25-27.]
- SI TT,LUO YJ,ZHAO ZZ,et al, 2014. Relationship between negative air ion concentration and meteorological elements in Diaolushan tropical rainforest [J]. *Res Sci*,36(4):788-792. [司婷婷,罗艳菊,赵志忠,等, 2014. 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*,36(4):788-792.]
- SHAO HR,HE QT, 2000. Forest and air anion [J]. *World For Res*,13(5):19-23. [邵海荣,贺庆棠, 2000. 森林与空气负离子 [J]. *世界林业研究*,13(5):19-23.]
- WANG W,YU Z, 2013. Research progress on negative air ions in urban environment in China [J]. *Ecol Environ Sci*,22(4):705-711. [王薇,余庄, 2013. 中国城市环境中空气负离子研究进展 [J]. *生态环境学报*,22(4):705-711.]
- WANG HJ, 2003. Study on the temporal-spatial pattern of aero-anion in urban green space [D]. Harbin:Northeast Forestry University. [王洪俊, 2003. 城市绿地空气负离子分布规律的研究 [D]. 哈尔滨:东北林业大学.]
- WANG J,LI S, 2009. Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change [J]. *J Environ Manag*,90(8):2746-2754.
- WANG W,YU Z,JI FQ, 2013. Evaluation of air cleanness degree of the urban environment based on negative air ion concentration [J]. *Ecol Environ Sci*,22(2):298-303. [王薇,余庄,冀凤全, 2013. 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*,22(2):298-303.]
- WU CC,ZHENG QM,ZHONG LS, 2001. A study of the aero-anion concentration in forest recreation area [J]. *Sci Silv Sin*,37(5):75-81. [吴楚材,郑群明,钟林生, 2001. 森林游憩区空气负离子水平的研究 [J]. *林业科学*,37(5):75-81.]
- WU CC,LEE GWM,YANG S,et al, 2006. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air [J]. *Sci Total Environ*,370(1):245-253.
- WU ZP,WANG C,XU JN,et al, 2007. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer [J]. *J Tsinghua Univ: Nat Sci Ed*,47(12):2153-2157. [吴志萍,王成,许积年,等, 2007. 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*,47(12):2153-2157.]
- XIONG LJ,ZHAO YP,HUANG SF,et al, 2014. Ecological health benefit analysis of ecological land based on negative air ions in Shanghai [J]. *Ecol Environ Sci*,23(6):985-991. [熊丽君,赵艳佩,黄沈发,等, 2014. 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*,23(6):985-991.]
- XU M,CHEN BF,SU J,et al, 2008. Dynamic of negative air ions and its relationship to environmental factors in Maofeng Mountain, Guangzhou [J]. *Ecol & Environ*,17(5):1891-1897. [徐猛,陈步峰,粟娟,等, 2008. 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*,17(5):1891-1897.]
- ZHANG L,YANG JZ,ZENG SC,et al, 2004. Air anion concentrations in Chebaling National Nature Reserve [J]. *J S Chin Agric Univ*,25(3):26-28. [张璐,杨加志,曾曙才,等, 2004. 车八岭国家级自然保护区空气负离子水平研究 [J]. *华南农业大学学报*,25(3):26-28.]
- XIAO HY,TAN YM,TANG Y, 2014. Analysis on variation of negative air ion in Hunan Forest Botanical Garden [J]. *J Centr S Univ For Technol*,34(5):92-95. [肖红燕,谭益民,汤炎, 2014. 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*,34(5):92-95.]
- ZHANG ZP,YU YW,MENG MH,et al, 2006. Progresses of aero-anion in tourism environments [J]. *J Zhejiang For Univ*,23(1):103-108. [章志攀,俞益武,孟明浩,等, 2006. 旅游环境中空气负离子的研究进展 [J]. *浙江林学院学报*,23(1):103-108.]
- ZHAO XW,LI CY,GE JR,et al, 2007. Forest environment air negative ion research progress [J]. *J NW For Univ*,22(2):57-61. [赵雄伟,李春友,葛静茹,等, 2007. 森林环境中空气负离子研究进展 [J]. *西北林学院学报*,22(2):57-61.]