

城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述^{*}

黄向华^{1,2} 王 健^{1,2} 曾宏达^{1,2} 陈光水^{1,2**} 钟羨芳^{1,2}

(¹ 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007; ² 福建师范大学地理科学学院,福州 350007)

摘 要 空气负离子(NAI)是综合反映空气质量的重要指标,对人居环境有重要意义.本文综述了城市空气负离子时空分布特征,并根据不同环境因子对其理化过程的影响及其在城市中的特点探讨了城市NAI时空分布特征的成因:NAI分布的时间动态主要受控于太阳辐射的周期变化;空间分布的城乡梯度差异受城市气溶胶、下垫面性质及城市热岛效应影响;城市绿地的高NAI浓度与植被生命活动和土壤辐射有关;近水环境中NAI浓度较高的原因在于水分子通过多种途径参与NAI生成过程;其余环境因子可在一定程度上影响NAI的生成、寿命、组分、迁移和分布;增加城市绿化面积和大气湿度、保持下垫面土壤自然属性均可有效地提高NAI水平,改善城市空气质量.

关键词 空气负离子 时空分布 城市 影响因素

文章编号 1001-9332(2013)06-1761-08 **中图分类号** X820.2, X823 **文献标识码** A

Spatiotemporal distribution of negative air ion concentration in urban area and related affecting factors: A review. HUANG Xiang-hua^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, ZENG Hong-da^{1,2}, CHEN Guang-shui^{1,2}, ZHONG Xian-fang^{1,2} (¹ Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China; ² School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2013 24(6): 1761-1768.

Abstract: Negative air ion (NAI) concentration is an important indicator comprehensively reflecting air quality, and has significance to human beings living environment. This paper summarized the spatiotemporal distribution features of urban NAI concentration, and discussed the causes of these features based on the characteristics of the environmental factors in urban area and their effects on the physical and chemical processes of NAI. The temporal distribution of NAI concentration is mainly controlled by the periodic variation of solar radiation, while the spatial distribution of NAI concentration along the urban-rural gradient is mainly affected by the urban aerosol distribution, underlying surface characters, and urban heat island effect. The high NAI concentration in urban green area is related to the vegetation life activities and soil radiation, while the higher NAI concentration near the water environment is attributed to the water molecules that participate in the generation of NAI through a variety of ways. The other environmental factors can also affect the generation, life span, component, translocation, and distribution of NAI to some extent. To increase the urban green space and atmospheric humidity and to maintain the soil natural attributes of underlying surface could be the effective ways to increase the urban NAI concentration and improve the urban air quality.

Key words: negative air ion; spatiotemporal distribution; urban; affecting factor.

空气质量是影响人类福祉乃至生存的主要城市环境问题.空气负离子(negative air ion, NAI)具有多种抗菌作用和生物学效应,对人体七大系统30多种疾病有抑制、缓解或辅助治疗作用^[1-6],因此被看作

是重要生命资源,是综合反映空气质量的重要指标.在自然环境中,NAI不断生灭交替,其浓度可保持动态平衡并呈现一定的日变化和年变化规律,通常地表附近的负离子比正离子多10%~20%^[7-8].随着城市化进程的不断加快和城市土地利用的改变,导致大气环境效应过程和机理发生急剧变化.20世纪初,空气中正、负离子比为1:1.2,21世纪初已急剧

* 国家自然科学基金项目(31000321, 31200366)和福建省科技厅省属公益类科研专项(K3-299)资助.

** 通讯作者. E-mail: gshuichen@163.com
2012-09-05 收稿, 2013-03-17 接受.

升高至 $1.2:1$ ^[9], 原有的正、负离子平衡被破坏. 为深入探讨土地利用变化与生态环境、生态系统服务以及人类福利之间的关系, 学者们对城市和森林等多种环境的 NAI 浓度水平开展了大量研究. 由于 NAI 微粒极小、寿命极短, 同时受多种环境因素影响和仪器灵敏度限制, 其理化过程通常难以观测^[10], 现有研究多以现象观测为主, 对结果的分析往往缺乏机理性的解释. 本文综述了城市空气负离子时空分布规律, 并结合理化过程和影响因素的研究, 探讨城市空气负离子分布特征的成因, 以期为空气质量的研究和城市环境的改善提供参考.

1 城市 NAI 浓度时空分布特征

自然环境中的空气离子浓度水平为每立方厘米几十个到上万个, 常态下正、负离子浓度为 $400 \sim 700 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[11], 寿命从几秒到数千秒不等. 城市中 NAI 的分布存在明显的时间变化和一定的空间分布规律.

1.1 NAI 浓度的时间分布特点

特定环境的 NAI 有明显日变化和季节动态规律, 但其浓度和浓度峰值出现时间随环境的不同而有较大差异. NAI 浓度日变化通常表现为明显的双峰曲线; 最高峰值一般出现在 9:00—11:00, 另一峰值一般出现在 14:00—17:00, 最低值通常在正午出现^[12-13]; 但个别研究的日变化峰值出现在夜间^[14]. NAI 浓度季节动态通常以夏季最高, 秋季高于春季, 冬季最低; 夏季最高值在 $1000 \sim 1500 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 冬季在 $200 \sim 700 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 但变异系数不大^[15]. Hirsikko 等^[16]对南部芬兰 SMEAR II 站不同径级大小的离子的季节变化进行为期 3 年的研究, 发现大、中、小离子的季节规律并不相同, 离子簇浓度均值在秋天和早冬高于春天和夏天, 小离子簇 ($d < 1.6 \text{ nm}$) 浓度在 $200 \sim 1500 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 中间离子 ($1.6 \sim 6.3 \text{ nm}$) 浓度通常保持在 $200 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下, 正负离子簇的月均浓度除部分秋季的值异常外, 均在 $600 \sim 800 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围. 小于 1.6 nm 的最小离子几乎不受季节支配, 大离子有明显的年际循环, 最高值出现在夏天, 最低值出现在冬天. 对各类绿地的研究表明, NAI 浓度与植物的生命活动、生长节律等表现出一致性. 植物在不同时期的 NAI 浓度依次为植物生长盛期 > 植物生长初期 > 植物生长末期^[17-18].

1.2 NAI 浓度的空间分布规律

1.2.1 不同城市功能区 NAI 浓度差异 NAI 含量

以自然森林和动态水区域最高, 在 $5000 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上^[19]; 城郊森林绿地在 $1000 \sim 2000 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$; 城市公园大多在 $300 \sim 1500 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[20], 附属绿地一般在 $1000 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下; 广场、道路、室内等无绿化区 NAI 含量较低, 从几十个到几百个不等, 城市室内一般在 $500 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下; 污染较重地区的 NAI 浓度甚至为 0. 邵海荣等^[21]对北京地区的实测结果表明, 空气负离子浓度从市中心向郊区逐渐增大, 室内空气负离子浓度低于室外. 尹俊光等^[22]对上海浦东新区和浙江天童国家森林公园的研究表明, 近自然森林空气负离子浓度高于常见城市人工绿地类型, 但远低于天童常绿阔叶林. 总的看来, NAI 浓度的空间分布表现出从自然环境到人工环境逐步递减的规律.

1.2.2 NAI 浓度分布的水平和垂直梯度性 尽管 NAI 浓度梯度的研究很少, 关于垂直梯度的研究更少, 但已有证据都表明空气离子的分布存在水平梯度和垂直梯度. 蒋文伟等^[23]对杭州市 8 种类型森林绿地的观测表明, NAI 浓度由林缘向林内呈增加趋势; 赖胜男和刘青^[24]研究结果表明, 距喷泉中心不同距离处的空气负离子水平差异较大, 由大到小依次为 $0 \text{ m} > 15 \text{ m} > 20 \text{ m} > 25 \text{ m}$, 随着距喷泉中心距离的增大, 空气负离子水平降低, 降低的程度随之变小. Kondrashova 等^[8]和 Richardson 等^[25]研究结果显示, NAI 浓度与距离之间的对数呈线性关系, 其相关系数达 0.9613. Tammet 等^[12]研究结果表明, 芬兰针叶林近地面的空气离子浓度显著高于靠近树冠顶端, 且 2 m 高处的电离率高于 14 m 高处的冠层. Wu 等^[1]对无光放电和 3 万伏电压放电生成负离子浓度的研究结果表明, 室内 NAI 的浓度梯度非常复杂, 在距离电极 $10 \sim 30 \text{ cm}$ 处, NAI 浓度受湿度影响很轻微; 距电极 $70 \sim 360 \text{ cm}$ 处的浓度值随湿度上升而下降; 距电极 $420 \sim 450 \text{ cm}$ 处, NAI 浓度变得平滑稳定; 距电极 $560 \sim 900 \text{ cm}$ 处, NAI 浓度随距离的增加而增加.

1.2.3 城市绿地的 NAI 浓度水平 在城市环境中, 城市绿地中的 NAI 含量可达无植物区的上百倍^[17, 26], 有林地区空气负离子浓度明显高于无林地区^[12, 26]. 不同生境、不同林分 NAI 的平均值、最大值、瞬时值均存在差异. Vartiainen 等^[26]在城市森林中测得空气正、负离子浓度水平差异不显著且浓度均较高(可达 $5000 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$). Hörrak 等^[27]研究结果表明, 芬兰北方森林小离子浓度在 $110 \sim 1183 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均值为 $480 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$. 曾曙才等^[28]

指出,广州城市绿地空气负离子浓度高达 $3367 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均值为 $426 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$. 植物配置结构影响 NAI 浓度水平, 依次为复层结构(乔灌木) > 简单植被配置结构(乔灌木、乔草、灌木) > 单一配置结构(稀乔、稀灌木、草坪) > 裸地^[29]. 秦俊等^[30]认为, NAI 与群落叶面积指数呈显著正相关, 与群落优势种的胸径、树高无关.

1.2.4 水体周围的 NAI 浓度 一般情况下, 瀑布沟谷小溪等周围的空气负离子水平比林地高 1 个数量级, 有瀑布和溪流等动态水之处的空气负离子浓度明显增加^[24, 31]. 瀑布等动态水体附近的 NAI 含量最高, 在 $10000 \sim 20000 \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$, 动态水中的 NAI 含量以瀑布最高, 人工喷泉次之, 小溪流最低^[28-29]. Akihiro 等^[32]将石块浸入温泉, 发现浸水条件下湿岩石生成的负离子高于干岩石. Yamada 等^[31]观测到源于水的 NAI 具有较长寿命.

2 环境因子对城市 NAI 时空分布的影响

NAI 产生的理化过程与空气中各微粒特性密切相关, 而微粒的特性和空间分布变化无常, 并且环境的湿度、温度、太阳辐射强度、紫外线强度、风速、噪音等气象因子, 水体、植被、土壤、海拔、建筑物等下垫面因素以及空气粉尘含量、放射性污染源、可吸入颗粒物等人为活动均会对 NAI 浓度和分布产生影响^[21, 26-29]. 城市发展导致原来的自然环境演变为自然与人工复合的生态环境, 几乎所有地表天气环境(如太阳辐射、温度、湿度、能见度、风速和风向及降雨等^[28-32])都发生了变化, 使城市 NAI 时空分布的成因异常复杂. 在诸多的影响因子中, 对 NAI 理化过程产生直接影响的因素尤其值得关注.

2.1 理化机制研究概要

2.1.1 离子化过程的理论和物理参数 NAI 产生的动力包括三大物理作用: 辐射作用、水的喷筒电效应和电场力^[11]. NAI 的生成从电离发生到空气离子的最终稳定状态又可划分为离子化、附着和聚集 3 个物理阶段^[33]. 空气正负离子电离的同时总是伴随着复合过程. Hoppel 和 Frick^[34]假定了中性气体被电离后正负离子浓度平衡, 提出了双极环境中简化大气离子平衡的基本数学模型——大气离子平衡方程:

$$dn/dt = q - an^2 - \beta_{\text{eff}} N_{\text{tot}} n$$

式中: q 为离子化率; a 为重组系数; n 为小离子浓度; N_{tot} 为气溶胶微粒总浓度; β_{eff} 为离子对气溶胶的吸附系数. n 与 q 成正比, 与气溶胶对离子的吸附

及重组沉降呈负相关. 小离子寿命与由离子对气溶胶的吸附和小离子重组所致的总离子损失成反比^[10, 12, 34]. 其中, 离子生成率或离子化率是空气离子平衡的主要因素^[31-32]. 一般情况下, 近地表平均离子化率 $q \approx 10 \text{ ion pairs} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (由地面或大气中的放射性物质和宇宙射线放射生成), 其被看作是陆域离子化率的平均值; 重组系数依赖于自然小离子和环境特征^[35], 约 $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 陆地区域的参数吸附系数依赖于气溶胶微粒的分布^[35-36], 变化范围在 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.1.2 化学过程中 NAI 的主要类型、优势离子和生成机制 NAI 的化学组分有赖于空气组分和离子的寿命^[37]. 由于连续的带电分子反应, 离子寿命一般不超过 100 s ^[38]. 因此, 明确地观测所有离子过程和化学组分非常困难, 辨识空气中长寿命的离子和不同阶段的优势离子是目前的重要课题^[39]. Luts^[38]研究结果表明, 超氧化物(O_2^-) 在 NAI 的组成类型中占 95%, 比其他主要类型的离子更稳定. Huertas 等^[39]认为, 在人工正常大气压强下, 阿尔法射线生成的负离子主体是简单离子的水合物和复杂离子的水合物, 丰度最大的正离子也是水合物类型. Nagato 等^[37]发现, 由电晕放电生成的 NO_3^- 是核心离子, 并且可能是室内负离子中生命期最长的离子类型. Huertas 等^[39]研究结果表明, HCO_3^- 是对流层条件中在 10^{-5} s 条件下形成的终端离子. Nagato 等^[37]对关键离子及其生成机制的研究表明, 简单离子的水合物和复杂离子的水合物是主要的 NAI 类型, CO_3^- 、 NO_3^- 、 HNO_3^- 、 OH^- 、 HCO_3^- 等是不同反应阶段的优势负离子. Richardson 等^[25]认为, 水分和湿度对 NAI 浓度的影响机制包括化学反应和水化反应, H_2O 是 OH^- 的来源, H_2O 参与 CO_3^- 、 NO_3^- 、 HNO_3^- 、 OH^- 、 HCO_3^- 等关键离子类型的反应过程, 可加速主要负离子转换为 NO_3^- , 并形成 NO_3^- 和 $\text{NO}_3^- \cdot \text{HNO}_3$ 等终端离子. 各种证据表明, H_2O 的存在是控制终端离子类型和寿命的决定性因子.

2.2 太阳辐射因子与 NAI 的时间变化

离子化率是空气离子平衡的主要因素^[40-41]. 由于太阳辐射、地表辐射物质组分、土壤性质和山岳地形的地域差异, 不同地区、不同季节的离子化率将显示出相当大的变化^[42]和特定的日变化^[43]. 如林冬青和金荷仙^[44]观测结果表明, 杭州西湖的日空气负离子浓度随光照加强而增加; 石彦军等^[13]研究发现, 空气离子浓度与户外紫外线强度呈显著正相关

($P < 0.05$); 张明如等^[45]对柳杉群落的测定显示,盛夏时光量子是影响空气负离子浓度的主要因子; Wang 和 Li^[46]研究发现,封闭环境内 5 种植物在不同光强条件下的 NAI 浓度与光强呈指数函数关系; Zhang 和 Yu^[47]指出,离子的生成与电子能量和光波长均有关联,太阳辐射变化的时间动态与 NAI 的季节动态一致. 从上述研究推测,太阳辐射和紫外线等宇宙射线的变化极可能是 NAI 时间动态的重要成因. 对此也有不同观点,如 Hirsiko 等^[48]认为,离子化率的阶段性变化(年际的和日变化)大部分归因于空气中镭射气和钍射气浓度.

2.3 气溶胶与 NAI 的城乡梯度

章志攀等^[17]在天目山国家级自然保护区的研究发现,空气负离子与可吸入颗粒物之间呈极显著负相关($r = -0.812$, $P < 0.01$). Kolarž 等^[49]在 Belgrade 地区对多种环境因子和 NAI 浓度进行同步测定. Hirsiko 等^[48]在芬兰赫尔辛基对室内外大气离子浓度的研究,以及 Tammet 和 Kulmala^[41]对针叶林的研究均发现,NAI 浓度与可吸入颗粒物呈负相关.

空气中 70% 的空间电荷为气溶胶所携带^[10]. 离子沉降包括正、负离子重组沉降和离子对气溶胶的吸附^[33-34, 43]. 在城市等空气污浊的区域,由气溶胶增加所致的 NAI 沉降占总离子沉降的 65% ~ 84%^[8, 36, 49],说明气溶胶的增加可直接导致 NAI 浓度的显著减小^[9]. 张春桂等^[51]反演福建三大城市群气溶胶光学厚度的时空分布与变化特征,发现在时空分布上,气溶胶光学厚度高值区与城区分布一致,表现出从自然环境到人工环境递增的规律,这与 NAI 浓度从自然环境到人工环境递减的现象相吻合. 从离子沉降的物理机制来看,NAI 分布的城乡梯度极可能是由人为干扰所致的气溶胶增加引起,其他城市环境因子(如城市热岛,下垫面性质)的分布特征也可能有一定的影响.

2.4 水分和湿度对 NAI 的影响

从化学反应过程来看,水分对 NAI 的作用最显著^[36, 39, 51]. 许多研究表明,湿度与 NAI 呈显著正相关关系^[34, 42],也有个别研究认为二者为负相关^[21]. 夏季植物群落的空气负离子与其他气象因子的相关分析显示,空气负离子与相对湿度呈极显著正相关^[13]. 厉月桥等^[52]发现,在清西陵森林中,旱季的 NAI 浓度与湿度呈正相关,雨季的 NAI 浓度随相对湿度的增高呈先上升后下降的趋势. 韦朝领等^[19]对合肥不同生态功能区空气负离子浓度与湿度相关性的拟合结果显示,二者呈指数递增关系. 厉

月桥等^[53]对空气负离子与空气温度、相对湿度的拟合结果为三次曲线关系. Wu 等^[20]研究结果显示,不同空间位置的 NAI 与湿度的相关性显示出 4 种不同趋势.

2.5 植物生命活动与城市绿地 NAI 浓度

城市绿地的 NAI 浓度值在 300 ~ 1500 $\text{ions} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[23],通常都高于同一环境背景区的无覆盖区. Tikhonov 等^[53]和李继育等^[54]用 50 kV 的高压刺激多种植物周围的土壤,测得植物周围 NAI 平均浓度为 3700 ~ 830790 $\text{ions} \cdot \text{cm}^{-3}$,最高达 1185530 $\text{ions} \cdot \text{cm}^{-3}$,均远高出正常值. 但是, Tikhonov 等^[53]指出,正常情况下植物产生 NAI 的现象极其微弱. Jovanic 等^[55]研究表明,植物光合速率与 NAI 日变化有很好的-一致性. 但由于光强、光波长等的变化,其既是生成 NAI 光致电离水平的主控因素^[46],又控制着植物光合强度. 因此,这种一致性很可能由太阳辐射引起的. Laakso 等^[56]也指出,正常情况下植物叶片尖端放电产生 NAI 的现象较弱. 可见,植物对 NAI 的作用机理仍不明确.

植物蒸腾作用是调节植被-土壤-大气连续系统水分循环的主要环节,对环境具有明显的增湿效应. 倪黎等^[57]对长沙的研究表明,绿化地的日均空气相对湿度比非绿化地高约 20%; 宫伟等^[58]对哈尔滨的研究表明,绿化环境的空气湿度平均增加 14.6%. 有研究表明,水分对 NAI 生成的化学过程作用非常关键^[36]. 此外,绿地植物具有滞留或附着、附着和粘附气溶胶的效应,不同生活型植物的滞尘量取决于植物滞尘特征、叶面积和林木郁闭度,复层结构的绿地滞尘效应高于单一结构. NAI 浓度分布表现为乔灌木复层结构高于单一结构^[47, 55]. 这说明城市绿地 NAI 水平高于城市无覆盖区很可能与植物蒸腾作用和滞尘效应有关.

2.6 下垫面辐射状况与 NAI 垂直分布

通常,近地表平均电离率为 10 $\text{ion pairs} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,土壤中的放射性元素、宇宙高能射线、放射性气溶胶、紫外线辐射等对 NAI 的贡献可能大于 40%^[12, 16]. Tammet 等^[12]对芬兰针叶林的观测发现,近地面的电离率和 NAI 浓度显著高于靠近树冠的顶端. Pawar 等^[15]对印度农村的观测结果表明,在冬季,氡和放射性气溶胶在近地层富集,使离子化速率增加;在夏季,气体携带着氡和放射性气溶胶向上移动,从而减少近地层电离.

NAI 分布的垂直差异可能是土壤辐射的垂直差异所致. 下垫面的差异在城市和自然环境之间最鲜

明. 强烈的人为活动使地表植被和自然地形遭到严重破坏, 进而改变地面的辐射特性和大气环境组分, 最终影响大气质量^[55]. 因此, 城市化所致的下垫面改变对 NAI 的影响不容忽视.

2.7 环境污染因子对 NAI 的影响

城市环境中污染因素类型众多, 多数会对 NAI 电离率、沉降率和寿命产生影响, 但目前相关报道甚少, 结果也不甚一致. 朱春阳等^[59]对北京城市带状绿地的研究结果显示, NAI 浓度与空气含菌量呈显著负相关, 但相关机理并不明确. 吴子良^[60]对景德镇负离子与气象要素的研究结果表明, 负离子与空气污染物(SO_2 、 NO_2 和可吸入颗粒物) 含量的关系不大, 相关系数最高值为可吸入颗粒物(-0.0879). 吴志萍等^[61]对 6 种城市绿地夏季 NAI 与颗粒物的相关性研究显示, 二者的相关性不显著. 何学利^[62]对道路两旁空气 NAI 的研究结果表明, 汽车流量越大, 负离子越低, 可能由于汽车尾气中的氮氧化物、 SO_2 和固体悬浮物导致 NAI 的降低. 前述的 3 种物质中, 总固体悬浮物对 NAI 降低的影响最甚, 二者存在静电作用, 相互结合导致 NAI 凝聚沉降.

2.8 仪器和观测方法对 NAI 研究的影响

国内外测试空气离子的相关仪器类型较多, 其设计原理均基于 Tammet 等^[12]的理论模型, 采用吸气式设计. 根据离子迁移率和仪器捕获电荷数对离子总浓度进行积分式计数. 但是, 该理论模型低估了仪器内的小离子损耗^[63]. 近年来, 新型仪器对进气口加以改进, 离子收集器出现了圆筒式设计, 在一定程度上减少了离子在仪器内部的损耗, 提高了仪器精度. 尽管如此, 受仪器技术的制约, 多数仪器仍探测不到 $<3 \text{ nm}$ 的离子^[64], 导致 NAI 数量、成分、物理模型的参数确定存在难以跨越的瓶颈.

国内外负离子观测仪器的生产标准、仪器精度、离子收集技术、抽气动力、进气速度、仪器反应速度以及对湿度的耐受范围等均不统一. 国产空气离子测量仪器以 DLY-3G、DLY-5G、DLY-7 系列居多, 优点是可分别测定大、中、小离子, 缺点是空气离子收集器采用平板式设计, 技术较落后. 相对于国外进口仪器, DLY 系列比较笨重($3 \sim 10 \text{ kg}$). 进口仪器主要有美国产 AIC1000、AIC2000 型(平板式设计)和日本产 ITC-201A、ITC-203A、KEC-900、COM-3200 型(圆筒式设计). 总的来看, 日本产的仪器技术先进, 具有反应灵敏(2 s)和精度高的优势, 因此, 国际上普遍选采用日本制定的空气质量评价指标——单极系数和安倍系数.

目前, NAI 观测方法缺乏一致性. 由于离子浓度本身不稳定, 瞬时值变化较大, 野外观测时受环境要素空间变化的影响, 因此, 观测结果存在很大的不确定性. 国内研究的原位观测绝大多数操作如下: 采用同一地点观测相互垂直的 4 个方向, 人为读取若干个瞬时值, 最后取均值^[13-14, 19, 21, 28, 44-55]. 但对于瞬时取值应当达到多大的样本容量, 几乎所有的文献都没有分析. 采样高度、采样时间间隔、仪器可观测的微粒粒径范围等均缺乏相关技术规范, 观测时段也很不统一($8:00-18:00$), 个别研究甚至只是随机取样. 这些均使不同试验背景的研究结果不易比较, 个别文献的观测值与绝大多数同类研究存在数量级差异, 可信度较低.

近年来, 高分辨率质谱仪、高分辨率离子迁移率分析仪(可探测到 1 nm 微粒^[65])、光学积分离子计数器、多通道空气离子探测仪(可探测范围 $0.8 \sim 40 \text{ nm}$)等仪器的研制成功为负离子研究带来了新契机. 理化机制的相关研究(如地表覆盖、土壤状况及植物的生理特性、生命活动与 NAI 的关系; 水分与气溶胶对 NAI 的耦合效应; 不同径级 NAI 的理化过程等问题)有望进一步深入.

3 结 语

研究表明, 水分、气溶胶、植物、辐射因素等对城市 NAI 时空分布的影响最直接和显著, 其他因素的影响较弱或仅为间接和次要影响因子. 从理化机制来看, 地表、大气、宇宙等辐射因素直接影响 NAI 的生成率; 气溶胶密度增加直接导致离子吸附和沉降; 水分是 NAI 生成过程中的决定性关键因子, 可直接参与化学反应, 也可通过气溶胶的吸湿增长和沉降对 NAI 产生间接作用. NAI 浓度明显的日变化和季节变化受控于不同环境下离子生成率的时间变化. NAI 的空间分布明显表现出从自然环境到人工环境而递减的规律, 主要原因在于人为干扰所致的城区气溶胶增加. NAI 浓度垂直分布和水平分布的梯度, 可能主要受离子的空间迁移扩散能力以及下垫面辐射性质的影响. 植物可能主要通过增加环境湿度、减少气溶胶含量等间接地提高城市绿地 NAI 含量. 增加空气湿度、控制大气气溶胶浓度、增加绿化量(尤其是乔灌木复层结构的绿化)、保持下垫面自然土地覆被等措施将有益于增加 NAI 含量, 从而改善城市日益恶化的空气质量.

参考文献

- [1] Wu CC, Lee GWM, Cheng P, et al. Effect of wall sur-

- face materials on deposition of particles with the aid of negative air ions. *Journals of Aerosol Science*, 2006, **37**: 616–630
- [2] Grinshpun SA, Mainelis G, Trunov M, et al. Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces. *Indoor Air*, 2005, **15**: 235–245
- [3] Daniels SL. On the ionization of air for removal of noxious effluvia. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**: 1471–1481
- [4] Lee BU, Yermakov M, Grinshpun SA. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 4815–4823
- [5] Wu CC, Lee GWM. Oxidation of volatile organic compounds by negative air ions. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 6287–6295
- [6] Dal Maso M, Kulmala M, Riipinen I, et al. Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: Eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland. *Boreal Environment Research*, 2005, **10**: 323–336
- [7] Tyagi AK, Nirala BK, Malik A, et al. The effect of negative air ion exposure on *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens*. *Environmental Science and Health, Part A*, 2008, **43**: 694–699
- [8] Kondrashova MN, Grigorenko EV, Tikhonov AN, et al. The primary physico-chemical mechanism for the beneficial biological/medical effects of negative air ions. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**: 230–237
- [9] Krueger AP. The biological effects of air ions. *Biometeorology*, 1985, **29**: 205–206
- [10] Tammet H. Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions. *Journal of Aerosol Science*, 1995, **26**: 459–475
- [11] Laakso L, Hussein T, Aarnio P, et al. Diurnal and annual characteristics of particle mass and number concentrations in urban, rural and Arctic environments in Finland. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 2629–2641
- [12] Tammet H, Horrak U, Laakso L. Factors of air ion balance in a coniferous forest according to measurements, Hyytiälä, Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**: 3377–3390
- [13] Shi Y-J (石彦军), Yu S-Q (余树全), Zheng Q-L (郑庆林). Aero-anion ecological efficacy in six types of plant communities. *Journal of Zhejiang Forestry College (浙江林学院学报)*, 2010, **27**(2): 185–189 (in Chinese)
- [14] Xu M (徐猛), Chen B-F (陈步峰), Su J (粟娟), et al. Dynamic of negative air ions and its relationship to environmental factors in Maofeng Mountain, Guangzhou. *Ecology and Environment (生态环境)*, 2008, **17**(5): 1891–1892 (in Chinese)
- [15] Pawar SD, Meena GS, Jadhav DB. Diurnal and seasonal air ion variability at rural station Ramanandnagar (17°2' N, 74° E), India. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10**: 154–166
- [16] Hirsikko A, Laakso L, Hörrak U, et al. Annual and size dependent variation of growth rates and ion concentrations in boreal forest. *Boreal Environment Research*, 2005, **10**: 357–369
- [17] Zhang Z-P (章志攀), Yu Y-W (俞益武), Zhang M-R (张明如), et al. Negative air ion concentration and environmental factors for Mount Tianmu of Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Forestry College (浙江林学院学报)*, 2008, **25**(4): 481–485 (in Chinese)
- [18] Fan Y-M (范亚民), He P (何平), Li J-L (李江龙), et al. Effect evaluation of air negative ions under different vegetation arrangements in Nanning city. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2005, **24**(8): 883–886 (in Chinese)
- [19] Wei C-L (韦朝领), Wang J-T (王敬涛), Jiang Y-L (蒋跃林), et al. Air negative charge ion concentration and its relationships with meteorological factors in different ecological functional zones of Hefei City. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2006, **17**(11): 2158–2162 (in Chinese)
- [20] Wu CC, Lee GW, Yang S, et al. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**: 245–253
- [21] Shao H-R (邵海荣), He Q-T (贺庆棠), Yan H-P (阎海平), et al. Spatio-temporal changes of negative air ion concentrations in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University (北京林业大学学报)*, 2005, **27**(3): 35–39 (in Chinese)
- [22] Yin J-G (尹俊光), Peng Y (彭鹏), Zhang J-G (章君果), et al. Study on ecological benefits of urban near-natural forests. *Journal of East China Normal University (Natural Science) (华东师范大学学报·自然科学版)*, 2009(5): 63–74 (in Chinese)
- [23] Jiang W-W (蒋文伟), Zhang Z-Z (张振峥), Zhao L-J (赵丽娟), et al. The research on aero-anion ecological efficacy in different types of urban forest green space. *Journal of Chinese Urban Forestry (中国城市林业)*, 2008, **6**(4): 49–57 (in Chinese)
- [24] Lai S-N (赖胜男), Liu Q (刘青). Study on change law of negative air ions around the fountain. *Journal of Anhui Agriculture Sciences (安徽农业科学)*, 2008, **36**(24): 10585–10586 (in Chinese)
- [25] Richardson G, Harwood DJ, Eick SA, et al. Reduction of fine airborne particulates (PM₃) in a small city center office by altering electrostatic forces. *Science of the Total Environment*, 2001, **269**: 145–155
- [26] Vartiainen E, Kulmala M, Ehn M, et al. Ion and particle number concentrations and size distributions along the Trans-Siberian railroad. *Boreal Environment Research*, 2007, **12**: 375–396
- [27] Hörrak U, Aalto PP, Salm J, et al. Characterization of air ions in boreal forest air during BIOFOR III campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2005, **5**: 2749–2790
- [28] Zheng S-C (曾曙才), Su Z-R (苏志尧), Chen B-G (陈北光). Air negative ion concentrations and their affecting factors in greenbelts of Guangzhou. *Chinese Jour-*

- nal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(7): 1049–1053 (in Chinese)
- [29] Liang Y-H (梁英辉), Mu D (穆丹), Qi J-Z (戚继忠). Study progress of air negative ions in urban green-belt. *Anhui Agricultural Science Bulletin* (安徽农学通报), 2009, **15**(16): 66–67 (in Chinese)
- [30] Qin J (秦俊), Wang L-M (王丽勉), Gao K (高凯), et al. Improvement of negative air ions concentration by plant communities. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2008, **27**(2): 303–308 (in Chinese)
- [31] Yamada R, Yanoma S, Akaike M, et al. Water-generated negative air ions activate NK cell and inhibit carcinogenesis in mice. *Cancer Letters*, 2006, **239**: 190–197
- [32] Akihiro S, Katsumi H, Naoto H, et al. A comparative study on the characteristics of radio activities and negative air ions originating from the minerals in some radon hot springs. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, **65**: 50–56
- [33] Manuel A, José PS, Esther H, et al. First differential mobility analysis (DMA) measurements of air ions produced by radioactive source and corona. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**: 453–457
- [34] Hoppel WA, Frick GM. Ion attachment coefficients and the steady state charge distribution on aerosols in a bipolar ion environment. *Aerosol Science Technology*, 1986, **5**: 1–21
- [35] Hoppel WA. Ion-aerosol attachment coefficients, ion depletion, and the charge distribution on aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 1985, **90**: 5917–5923
- [36] Parts TE, Luts A, Laakso L, et al. Chemical composition of waterfall-induced air ions: Spectrometry vs. simulations. *Boreal Environment Research*, 2007, **12**: 409–420
- [37] Nagato K, Matsui Y, Miyata T, et al. An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2006, **248**: 142–147
- [38] Luts A. Evolution of negative small ions at enhanced ionization. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**: 1487–1496
- [39] Huertas ML, Marty AM, Fontan J, et al. Measurement of mobility and mass of atmospheric ions. *Journal of Aerosol Science*, 1971, **2**: 145–150
- [40] Yu F, Turco RP. Ultrafine aerosol formation via ion-mediated nucleation. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**: 883–886
- [41] Tammet H, Kulmala M. Simulation tool for atmospheric aerosol nucleation bursts. *Journal of Aerosol Science*, 2005, **36**: 173–196
- [42] Kolarž P, Filipović D. Measurements and correlations between several atmospheric parameters. *Physics, Chemistry and Technology*, 2008, **6**: 99–104
- [43] Nishikawa K, Nojima H. Air purification effect of positively and negatively charged ions generated by plasma at atmospheric pressure. *Japanese Journal of Applied Physiology*, 2001, **40**: 835–837
- [44] Lin D-Q (林冬青), Jin H-X (金荷仙). Observations on negative ions concentration in the sanatoriums in the West Lake scenic area. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology* (浙江林业科技), 2010, **30**(2): 65–69 (in Chinese)
- [45] Zhang M-R (张明如), Yu Y-W (俞益武), Zhao M-S (赵明水), et al. Diurnal changes in the negative ion concentration of the air for two *Cryptomeria fortunei* communities of National Nature Reserve of Mount Tianmu. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2009, **26**(5): 701–707 (in Chinese)
- [46] Wang J, Li SH. Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**: 2746–2754
- [47] Zhang J, Yu ZL. Experimental and simulative analysis of relationship between ultraviolet irradiations and concentration of negative air ions in small chambers. *Aerosol Science*, 2006, **37**: 1347–1355
- [48] Hirsiko A, Taina Y, Tuomo N, et al. Indoor and outdoor air ions and aerosol particles in the urban atmosphere of Helsinki: Characteristics, sources and formation. *Boreal Environment Research*, 2007, **12**: 295–310
- [49] Salm J, Tammet E. Dependence of the ion-aerosol Equivalent attachment coefficient on the ratio of polar conductivities in a steady state. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**: 211–217
- [50] Zhang C-G (张春桂), Peng Y-F (彭一峰), Lin J (林晶), et al. Remote sensing retrieval and spatio-temporal analysis of aerosol over three cities of Fujian. *Meteorological Monthly* (气象), 2010, **36**(8): 92–99 (in Chinese)
- [51] Skalný JD, Mikoviny T, Matejčík S, et al. An analysis of mass spectrometric study of negative ions extracted from negative corona discharge in air. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, **233**: 317–324
- [52] Li Y-Q (厉月桥), Bi Y-G (毕拥国), Huang Q-X (黄秋娴), et al. Distribution characteristics of negative air ions concentration in area of Qingxiling. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报), 2008, **31**(3): 46–50 (in Chinese)
- [53] Tikhonov VP, Tsvetkov VD, Litvinova EG, et al. Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, **51**: 414–419
- [54] Li J-Y (李继育), Su Y-Q (苏印泉), Li Y-Y (李印颖), et al. Effects of high-voltage pulse stimulation on the generative of negative air ions by several pot plants. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2008, **23**(4): 38–41 (in Chinese)
- [55] Jovanic BR, Jovanic SB. The effect of high concentration of negative ions in the air on the chlorophyll content in plant leaves. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **129**: 259–265
- [56] Laakso L, Petäjä T, Lehtinen KEJ, et al. Ion production rate in a boreal forest based on ion, particle and ra-

- diation measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, **4**: 1933–1943
- [57] Ni L (倪黎), Shen S-Y (沈守云), Huang P-S (黄培森). Research on city gardening to reduce the urban heat island effect of Changsha City. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2007, **27**(2): 36–43 (in Chinese)
- [58] Gong W (宫伟), Han H (韩辉), Liu X-D (刘晓东), *et al.* Vertical green plants in Harbin effect of cooling humidification. *Territory & Natural Resources Study* (国土与自然资源研究), 2009(4): 69–70 (in Chinese)
- [59] Zhu C-Y (朱春阳), Li S-H (李树华), Li X-Y (李晓艳) Effects of the different canopy density of urban green belts on the air anion concentration, bacteria rate. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2012(9): 72–77 (in Chinese)
- [60] Wu Z-L (吴子良). Content characteristics of negative ion and its relationship with the meteorological elements in Jingdezhen City. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2010(19): 264–266 (in Chinese)
- [61] Wu Z-P (吴志萍), Wang C (王成), Xu J-N (许积年), *et al.* Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer. *Journal of Tsinghua University* (Science and Technology) (清华大学学报·自然科学版), 2007, **47**(12): 2153–2157 (in Chinese)
- [62] He X-L (何学利). Negative air ions beside roadway. *China Science and Technology Information* (中国科技信息), 2011(15): 16–18 (in Chinese)
- [63] Fletcher LA, Noakes CJ, Sleigh PA, *et al.* Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 2008, **17**: 173–182
- [64] Parts TE, Luts A. Observed and simulated effects of certain pollutants on small air ion spectra: I. Positive ions. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 1283–1289
- [65] Alonso M, Santos J, Hontanón E, *et al.* First differential mobility analysis (DMA) measurements of air ions produced by radioactive source and corona. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**: 453–457

作者简介 黄向华,女,1974年生,硕士,助理研究员.主要从事城市生态学研究. E-mail: hxx010704@qq.com

责任编辑 杨弘

封面说明

封面图片由中国科学院沈阳应用生态研究所徐文铎研究员提供. 图中为河岸沙地云杉林. 沙地云杉 [*Picea mongolica* (H. Q. Wu) W. D. Xu (*Picea meyeri* var. *mongolica* H. Q. Wu)] 是地质历史变迁的残遗种, 也是我国特有的珍稀濒危树种, 仅分布在小腾格里(浑善达克)沙地东部边缘, 在内蒙古白音敖包干旱沙地上集中分布, 面积约 6737 hm². 沙地云杉树高 12 ~ 18 m、胸径 24 ~ 42 cm; 沙地云杉林是陆地森林生态系统中特殊的森林类型, 处在森林向草原过渡地带. 以沙地云杉为建群种形成的森林类型有: 藓类苔草-沙地云杉林、禾草杂类草-沙地云杉林、杂类草-杨桦-沙地云杉混交林和河岸沙地云杉林. 沙地云杉林不同于欧亚大陆任何云杉林. 其群落组成总是或多或少的有草原成分, 如羊草 (*Leymus chinensis*)、防风 (*Siler divaricatum*)、山竹子 (*Hedysarum fruticosum*)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 等.

沙地云杉长期生长在干旱贫瘠的沙地上, 对恶劣环境有着强大的适应能力. 研究沙地云杉对于了解我国云杉起源、演化及古气候变迁具有重要意义. 1998 年建立的白音敖包国家级自然保护区是沙地云杉分布面积最大、最有代表性的地区, 也是我国最大的沙地云杉天然基因库, 可为我国西部大开发、防风固沙林营造、城市绿化以及三北防护林体系建设提供大量种苗基因资源. 同时, 其作为华北地区天然屏障, 对于控制内蒙古土地沙漠化进程, 减少北京的风沙暴和降尘起着重要的作用.