

苏航, 银燕, 陆春松, 等. 2014. 新型扩散云室搭建及其对黄山地区大气冰核的观测研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 386–398, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12211. Su Hang, Yin Yan, Lu Chunsong, et al. 2014. Development of new diffusion cloud chamber type and its observation study of ice nuclei in the Huangshan area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 386–398.

新型扩散云室搭建及其对黄山地区 大气冰核的观测研究

苏航^{1,2} 银燕¹ 陆春松¹ 蒋惠¹ 杨磊¹

¹ 南京信息工程大学中国气象局气溶胶—云—降水重点开放实验室, 南京 210044

² 沈阳中心气象台, 沈阳 110016

摘 要 本研究利用自行搭建的大气冰核高压静电采样器和静力真空水汽扩散云室, 并结合其他大气冰核及气象要素观测仪器, 于 2011 年 5~9 月及 2012 年 9~10 月在黄山三层不同高度上同时进行大气冰核及相关气象要素的连续观测。结果显示: 黄山地区总冰核数浓度平均为 18.74 L^{-1} , 凝结冻结核化冰核数浓度平均为 0.79 L^{-1} , 凝华核化冰核数浓度平均为 0.19 L^{-1} 。黄山地区冰核数浓度, 随着高度的增加而减小; 且存在春季较高、秋季居中、夏季较少的季节变化规律; 下午达到一天中的最高值, 夜晚达到一天中的最低值; 总冰核数浓度较北方少。黄山山顶冰核数浓度随活化温度的升高而减小, 随过饱和度的升高而增大, 随风速的增强而增大, 长期主要由西南风向山顶的输送, 且其主要由大粒子来充当。

关键词 大气冰核 云室 核化机制 数浓度

文章编号 1006-9895(2014)02-0386-13

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12211

Development of New Diffusion Cloud Chamber Type and Its Observation Study of Ice Nuclei in the Huangshan Area

SU Hang^{1,2}, YIN Yan¹, LU Chunsong¹, JIANG Hui¹, and YANG Lei¹

¹ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016

Abstract In this study, a high-voltage ice nuclei collector and a static vacuum water vapor diffusion cloud chamber, which were developed by the author, were combined with additional atmospheric ice nuclei and meteorological element observation instruments to simultaneously observe the constant ice nuclei and meteorological elements at three heights of Huangshan area from May to September 2011 and from September to October 2012. The results show that in the study region, the average number concentration of ice nuclei is 18.74 L^{-1} in total nucleate mode, 0.79 L^{-1} in condensation freezing nucleate mode, and 0.19 L^{-1} in deposition nucleate mode. The number concentration of ice nuclei on the Huangshan area declined with an increase in altitude to remain higher in spring, moderate in autumn, and lower in summer, attaining the peak value in the afternoon and the minimum value at night. The number concentration of ice nuclei observed in this area is lower than that in the northern parts of the country. The number concentration of ice nuclei on the top of Huangshan Mountain decreased with an increase in activation temperature and increased upon supersaturation. Moreover, the value increased with an

收稿日期 2012-12-03, 2013-04-19 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目41030962、40975084, 高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题20113228110002, 中国气象局局校合作建设项目20110107, 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD), 江苏省自然科学基金BK20130988

作者简介 苏航, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事大气环境研究。E-mail: charlie_gna@163.com

increase in wind speed, mainly from the southwest to the top of Huangshan Mountain. However, the concentration of ice nuclei on the top of Huangshan Mountain has been more significantly affected by aerosols transported over long distances from the northeast direction, which mainly created large particles.

Keywords Ice nuclei, Cloud chamber, Nucleate mode, Number concentration

1 引言

大气冰核是指大气中可以引起水汽蒸发产生凝华或过冷水滴产生冻结而形成冰晶的气溶胶粒子(游来光, 1976; Vali, 1985)。它可以通过凝华核化、凝结冻结核化、接触冻结核化、浸润冻结核化四种途径影响水的相变作用, 从而影响冷云的降水过程及冷雾的形成过程。冷云降水过程及冷雾的形成过程是气象科学理论、人工影响天气、气候变化因子的重要研究内容之一, 因此深入而系统地认识大气冰核在冷云降水物理过程及冷雾的形成过程中发挥的作用, 有着重要的科学价值和指导意义(黄燕和徐华英, 1994; Pruppacher and Klett, 1997; Zeng et al, 2009; Lu et al, 2010; 李丽光和周德平, 2011)。

目前云降水物理中大气冰核方面研究仍不成熟, 观测研究仍是主要研究手段之一。国外对大气冰核的观测研究开始较早, 且对观测设备进行了不断的改进。1957 年, Bigg (1957) 发明了快速膨胀云室, 后人也称其为毕格云室。该仪器能模拟云中大气冰核活化并长成冰晶的过程, 可以测量某一气团中冰核的数浓度。该云室操作简便、造价较低, 但难以实现空中采样, 也不能实现分机制测量, 故不利于大气冰核的深入研究。1963 年, Bigg et al. (1963) 又发明了滤膜—扩散云室, 也被称为滤膜法观测大气冰核。滤膜法具有气溶胶粒子采样与活化处理分开、取样连续、取样地点不受限制以及捕获率高等优点, 故国际上广泛采用滤膜法观测大气冰核数浓度, 并一度将其作为大气冰核数浓度的测定标准。1988 年, Rogers (1988) 提出了连续流扩散云室 (CFDC), 并详细描述了其性能及使用方法。由于连续流扩散云室 (CFDC) 可以实时观测, 温湿度可控, 并可在空中测量, 因此国际上许多知名大气冰核观测项目均采用此云室进行测量。2006 年德国歌德大学研发了快速冰核计数器 FINCH (Bundke et al., 2006), 它具有高达 5~10 L/min 的样品流速, 只需 1~2 分钟就可以得到足够的冰核数据, 故可实现大气冰核的在线测量。2008 年德国歌德大学的 Klein et al. (2010) 又研发了静力真空水汽扩散云室 (FRIDGE), 它能高精度、自动化地分

析大气冰核在凝结冻结和凝华核化作用下形成大气冰核的数浓度。从 20 世纪 60 年代起, 我国先后在吉林白城(汪学林, 1965)、甘肃兰州(赵剑平等, 1965)、陕西西安(赵剑平等, 1965)、辽宁大连(赵剑平等, 1965)、宁夏银川(牛生杰等, 2003)、内蒙古巴音浩特(牛生杰等, 2003)、青海河南县(李淑日等, 2003)、北京(游来光和石安英, 1964)、新疆天山(李艳伟和朱秉玉, 2003)、甘肃玛曲(李娟和黄庚, 2008)、江苏南京(杨磊, 2013a, 2013b)等地区使用多种方法进行了大气冰核的观测研究, 对大气冰核数浓度的空间分布、时间变化、及其与气象要素及天气系统的变化关系等进行了一系列研究工作。李淑日等(2003)等在青海省河南县的大气冰核观测研究表明: 冰核浓度的平均值随云室温度的降低呈指数式增加, 冰核浓度与湿度呈现正相关趋势。赵剑平等(1965)在甘肃兰州观测到该地冰核浓度与西风有明显的关系。Santachiara et al. (2010)在 Bologna 附近的观测结果表明较大的气溶胶颗粒更有利于形成冰核。杨磊等(2013a, 2013b)在江苏南京进行的观测表明沙尘气溶胶可能更有利于成为大气冰核。

目前我国对于大气冰核的观测研究相对较少, 观测仪器也较落后, 且主要集中在我国北方地区(如图 1 所示), 但我国南方大气冰核在冷云及冷暖混合云降水过程中仍发挥着重要的作用。所以本研究自行搭建国际先进的大气冰核高压静电采样器和静力真空水汽扩散云室, 并结合其他大气冰核及气象要素观测仪器, 对黄山地区大气冰核的浓度分布及其影响因子进行连续观测分析, 旨在了解我国南方地区大气冰核的浓度及其属性特征, 从而对我国南方地区云降水理论研究及人工影响天气作业提供一定的科学基础和参考依据。

2 研究方法

2.1 研究地点及研究时间

黄山位于安徽省南部(118°09'N, 30°08'E), 是我国著名风景区之一, 环境清洁, 可代表该地区背景气象条件。黄山地区属亚热带季风气候, 夏无酷暑, 冬少严寒, 夏季最高气温 27℃, 冬季最低

样器作为大气冰核的主要采样工具。图 3 给出了大气冰核高压静电采样器的实物结构图，该仪器的采样片由特氟纶质采样膜更换为硅制采样片，从而克服了大气冰核有时会嵌在采样膜中不易活化的缺点（张建新等，2006）。同时该仪器增加了流量控制计，从而使得该采样器对采样体积控制得更加精

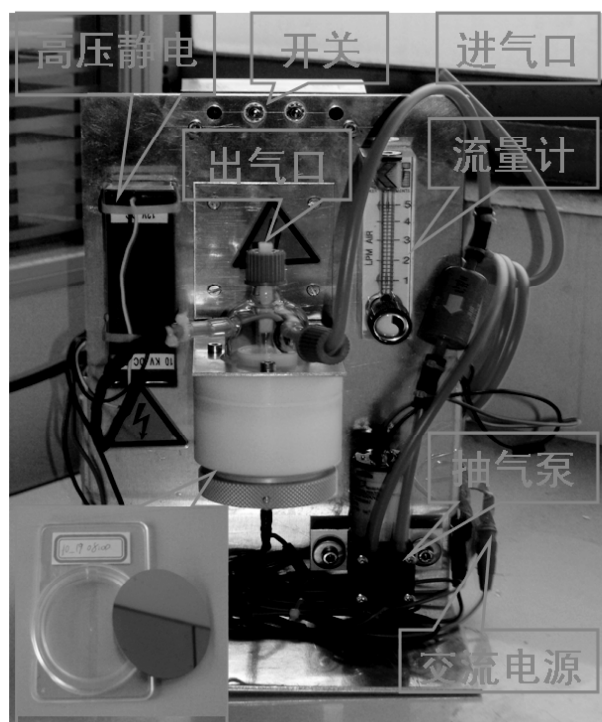


图 3 自行搭建的大气冰核采样器结构图

Fig. 3 The structure map of static vacuum water vapor diffusion chamber built by the authors

确。同时该采样器更改了走气系统的结构，从“上进下出”结构（Haunold, 2009）改为“外进内出”结构，从而使得收集效率从 92% 左右提高到 98% 左右，并且该大气冰核采样器将各部件集成，大大缩小了采样器的体积，使得其方便携带，易于各地点观测。该仪器在操作时每次采样 10 L，然后将采集到附有大气冰核的硅质采样片放入自行搭建的静力真空水汽扩散云室中进行不同温度、不同湿度下凝结冻结核化及凝华核化条件下大气冰核数浓度的分析。

2.2.2 静力真空水汽扩散云室

本研究还采用自行搭建的静力真空水汽扩散云室作为大气冰核的主要分析工具。图 4、图 5 分别给出了此台云室的照片和结构模型图。该云室通过精确控制温度、湿度、压力等气象要素，模拟大气冰核在云室中活化并长成冰晶的过程，从而实现了对凝结冻结核化及凝华核化条件下大气冰核数浓度、活化温度、活化湿度等要素的测量。在静力真空水汽扩散云室中，当采样片上的大气冰核处于冰面过饱和、水面未饱和的湿度条件时，模拟的是大气冰核的凝华核化机制；当采样片上的大气冰核达到或超过水面饱和时，模拟的是凝结冻结核化和凝华核化两种机制的共同作用。该云室温度可设置在 $0^{\circ}\text{C} \sim -90^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度可设置在 $90\% \sim 130\%$ 。其采用多重温度、湿度、压力控制元件，使得气象要素控制的精度更高，稳定性更强；该云室采用 CCD 照相机拍照并配合操作软件分析读数的方法，使其

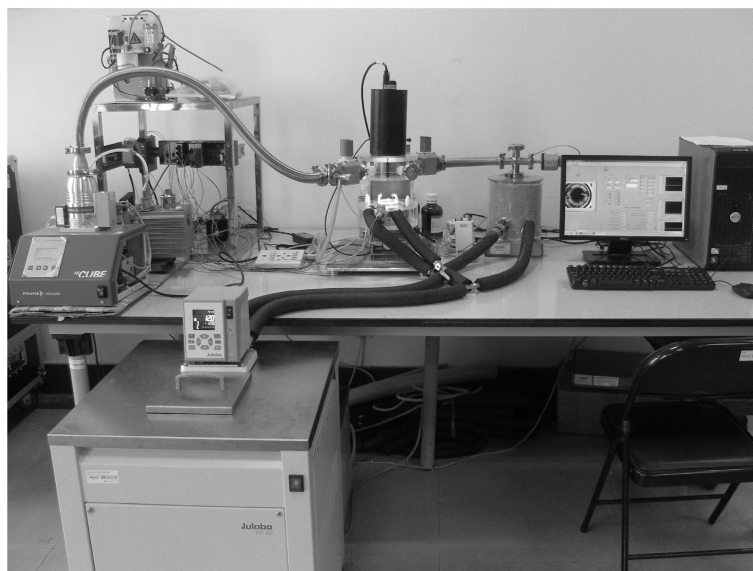


图 4 自行搭建的静力真空水汽扩散云室照片

Fig. 4 The photo of static vacuum water vapor diffusion chamber built by the authors

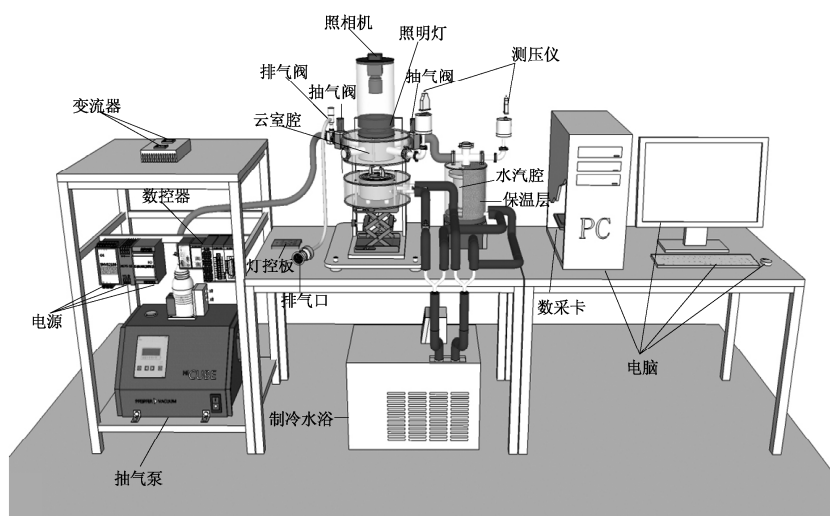


图 5 自行搭建的静力真空水汽扩散云室模型图

Fig. 5 The model picture of static vacuum water vapor diffusion chamber built by the authors

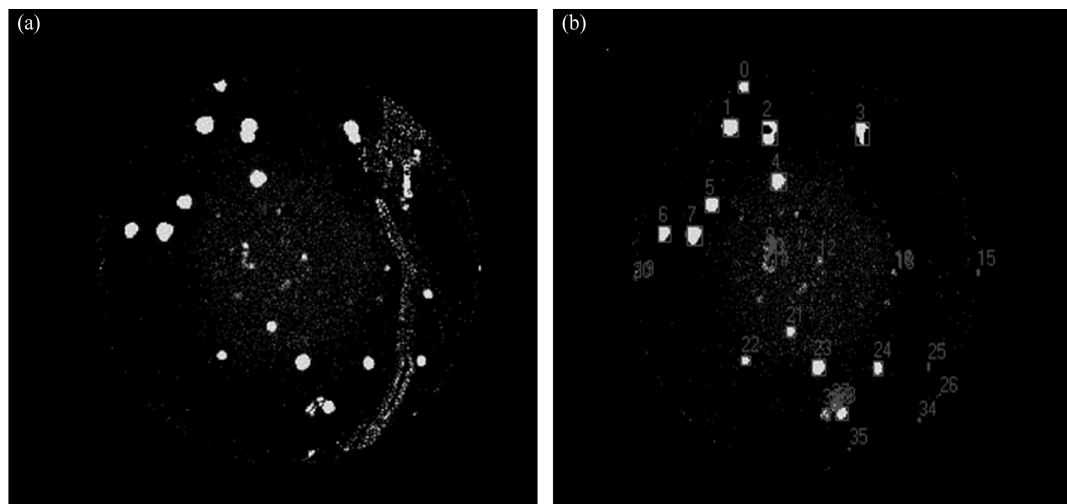


图 6 采用滤光片的静力真空水汽扩散云室相机照片 (a) 及软件读数图 (b)

Fig. 6 The filter photos of the (a) ice nuclei and (b) counting picture taken by the software of static vacuum water vapor diffusion chamber

精度较人工肉眼读数大大提高;该云室利用电脑软件自动化控制,使得操作简便,效率提高。

该云室较 Klein et al (2010) 研制的静力真空水汽扩散云室在以下方面进行了改进:(1) 该云室采用了超级制冷设备替代普通制冷设备,使得温度控制范围从原来的 $0^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 扩展到 $0^{\circ}\text{C}\sim-90^{\circ}\text{C}$,且稳定性更强;(2) 该云室采用了真空抽气泵替代普通抽气泵,使得降压效率及降压能力大大提高;(3) 该云室采用数值集成化模块及 PID 过程控制法(解丽华, 2006),使得控制稳定性增强,云室结构紧凑;(4) 该云室采用了滤光片为 CCD 相机观测前做水汽滤光处理(如图 6 所示),从而减少了由于水汽扩散造成的误差,使得观测结果更

加准确。

2.2.3 其他观测仪器及数据质量控制

本研究也采用了可测量四种机制混合作用下总冰核浓度的 5 L Bigg 型混合云室(杨绍忠等, 2005)。它利用活塞抽气的方法将包括大气冰核在内的空气一起抽到云室腔中,然后通过降温装置及对流混合作用将云室降低至预计观测的温度,并同时利用超声雾化器向云室内通入过冷水汽,空气中的大气冰核在低温及过饱和的条件下形成冰晶,掉入下方的糖液托盘,当冰晶在糖液中迅速长大到肉眼可见后,升起糖液托盘,便可利用肉眼读数,并通过换算得到该地区预定温度下单位体积空气中的大气冰核数浓度。其温度可设置在 $0^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$,

湿度为充足水汽条件状态。

本研究还采用了空气动力学粒径谱仪 (APS) (Liu et al., 2010) 来观测黄山地区气溶胶数浓度。它可以测量空气动力学粒径在 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的气溶胶粒子, 时间分辨率可以达到 1 s , 能有效地呈现出气溶胶的连续变化和瞬时变化。它的原理是通过测定每一粒子通过两束近距离激光束的飞行时间来换算加速度, 大粒子由于惯性大导致加速慢, 以此来换算粒子的空气动力学粒径。

本研究同时结合了自动气象站 (王志明, 2012) 在黄山地区观测期间的数据。该仪器具有体积小, 重量轻, 功耗小, 集成度高, 安装简单, 工作性能稳定等优点。气象站采用一体化设计, 大屏幕液晶图形显示, 利用组件采集外部的温度、湿度、压强、风向、风速、雨量、太阳辐射、紫外辐射、露点温度、土壤温度、土壤水分、叶面湿度等气象要素数据。

为了保证数据的质量, 本研究根据已知的大气冰核随温度、湿度变化的规律制定数据基本范围, 对不符合常理及基本规律约束范围的大气冰核数据进行剔除, 并对观测过程中存在或有可能存在操作错误的数据进行剔除。经过严格的质量控制后, 黄山山顶、山腰、山底大气冰核观测仪器的平均有效数据分别约为 81% 、 75% 和 78% , 所得的数据和结果相对可靠。

3 黄山大气冰核的浓度分布

3.1 黄山大气冰核浓度随高度的变化

利用 5 L Bigg 型混合云室对黄山地区观测期间总冰核数浓度进行测量并求取平均, 利用自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山地区观测期间凝结冻结核化或凝华核化大气冰核数浓度进行测量并求取平均。图 7 给出了一 20°C 活化温度, 总核化机制水汽充足, 凝结冻结核化机制 5% 水面过饱和, 凝华核化机制 5% 冰面过饱和条件下, 不同核化机制黄山大气冰核数浓度及其标准偏差随高度的变化。

凝华核化机制 5% 冰面过饱和条件下, 不同核化机制黄山地区年平均大气冰核数浓度及其标准偏差随高度的变化情况。从图中分析得出: 黄山地区总冰核数浓度平均为 18.74 L^{-1} , 凝结冻结核化冰核数浓度平均为 0.79 L^{-1} , 凝华核化冰核数浓度平均为 0.19 L^{-1} 。无论总核化机制、凝结冻结核化机制还是凝华核化机制, 均为山底大气冰核浓度最高, 山腰次之, 山顶最低, 这说明随着高度的增加, 不同核化机制条件下黄山大气冰核数浓度都在减少。这主要是因为黄山山顶及山腰地区较清洁, 大气冰核主要来源于山底颗粒物向上的输送, 高度越高, 山底颗粒物越难扩散到达, 可作为大气冰核的气溶胶浓度就越低。同时从图中可以看出总核化机制条件下大气冰核数浓度的标准偏差最大, 凝华核化条件下大气冰核数浓度的标准偏差最小, 这与该条件下大气冰核数浓度的绝对值密切相关。Ardon-Dryer, et al (2011) 的研究也证明了地表颗粒物的扩散作用是大气冰核的主要来源之一。

3.2 黄山大气冰核浓度随季节的变化

随着季节的变化, 大气气溶胶的数浓度及物理化学特性也存在着相应的变化, 从而导致了大气冰核的季节性变化。本研究以黄山 5 月、7 月、9 月的观测数据分别代表黄山山顶春季、夏季和秋季的情况, 利用 5 L Bigg 型混合云室对黄山山顶总冰核数浓度进行测量, 利用自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山山顶凝结冻结核化或凝华核化大气冰核数浓度进行测量。图 8 给出了一 20°C 活化温度、总核化机制水汽充足, 凝结冻结核化机制 5% 水面过饱和, 凝华核化机制 5% 冰面过饱和条件下, 不同核化机制黄山山顶大气冰核数浓度及其标准偏差随季节的变化。从图中可以分析得出: 黄山山顶总冰核数浓度平均为 16.61 L^{-1} , 凝结冻结核化冰核数浓度平均为 0.752 L^{-1} , 凝华核化冰核数浓度平均为 0.157 L^{-1} 。无论总核化机制、凝结冻结核化机

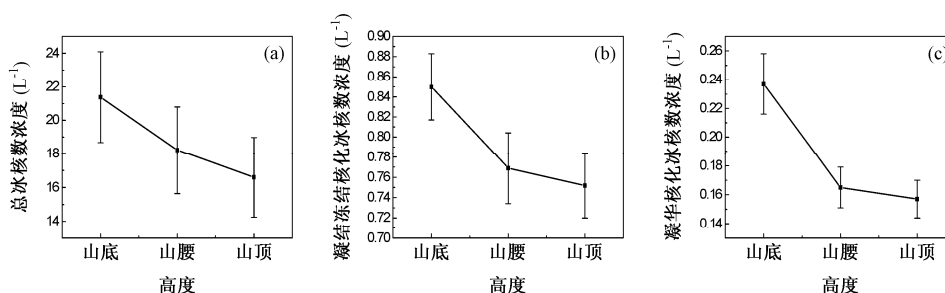


图 7 不同核化机制条件下黄山大气冰核数浓度及其标准偏差随高度的变化

Fig. 7 The change in number concentration and standard deviation of ice nuclei with height on Huangshan Mountain for different nucleate modes

制还是凝华核化机制,均为春季大气冰核浓度最高,秋季次之,夏季最低。这可能是因为黄山地区春季风速大,沙尘过程较多,降水较少,从而导致可成为冰核的气溶胶数浓度升高造成的;而黄山地区夏季风速较小,降水较多,湿清除作用明显,从而使得可以成为冰核的气溶胶较少导致的。

3.3 黄山大气冰核浓度日变化

利用 5 L Bigg 型混合云室及自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山地区观测期间总冰核数浓度、凝结冻结核化冰核数浓度或凝华核化冰核数浓度进行测量并取平均。图 9 给出了 -20°C 活化温度,总核化机制水汽充足,凝结冻结核化机制 5%水面过饱和,凝华核化机制 5%冰面过饱和条件下,黄山夏季不同高度、不同核化机制冰核数浓度的日变化特征。从图中可以看出:山顶的冰核数浓度最高,山腰次之,山底最低。这说明黄山山顶较清洁,大气冰核从山下向山顶输送。无论从不同高度,还是不同核化机制来看,冰核浓度均是白天高于夜间,下午达到一天中的最高值,夜晚达到一天中的最低值,这可能与边界层的抬升作用有关(Wang et al, 2013)。中午边界层高度最高,使得山下的大气冰核可以向山上输送,从而导致下午大气冰核数浓度的显著升高;而夜晚边界层高度最低,抑制了冰核的向上输送作用,从而使黄山地区冰核数浓度降低。从不同核化机制上来看:总冰核数浓度高于凝

结冻结核化数浓度,凝结冻结核化数浓度高于凝华核化数浓度。

利用 5 L Bigg 型混合云室及自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山地区观测期间总冰核数浓度、凝结冻结核化冰核数浓度或凝华核化冰核数浓度进行测量并取平均。图 10 给出了一 20°C 活化温度,总核化机制水汽充足,凝结冻结核化机制 5%水面过饱和,凝华核化机制 5%冰面过饱和条件下,黄山山顶不同季节、不同核化机制冰核数浓度的日变化特征。从图中可以看出:无论从季节变化,还是从核化机制角度来考虑,冰核数浓度均是白天高于夜间,下午达到一天中的最高值,夜晚达到一天中的最低值,并且夏季下午高值较其他季节变化明显,这可能与夏季有利于边界层抬升有关(Wang et al, 2013)。从季节变化上来看:春季的冰核数浓度高于秋季,秋季的冰核数浓度高于夏季。这与春季风大,输送作用较多;夏季雨多,清除作用较大密切相关。

3.4 黄山与其他地区大气冰核浓度对比

利用 5 L Bigg 型混合云室对黄山山底总冰核数浓度进行测量。表 1 给出了此次黄山山底不同温度下大气冰核浓度观测结果与中国不同时间、不同地点、不同温度下大气冰核总数浓度观测结果的对比。从表中可以推断出:20 世纪 60 年代我国各地区大气冰核浓度较低,而 21 世纪后,我国各地区大气冰核浓度有显著增加的趋势,这说明人为活动

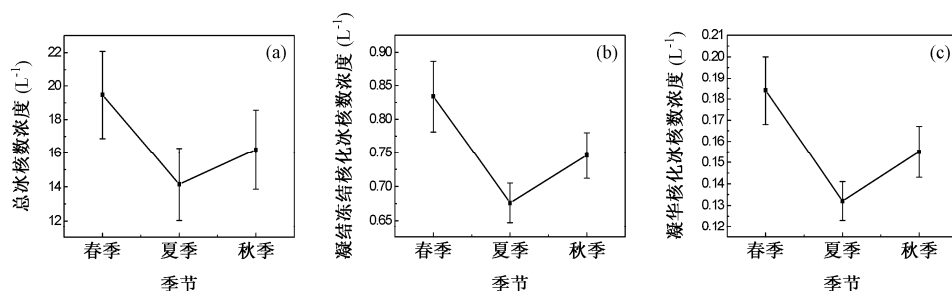


图 8 不同核化机制条件下黄山山顶大气冰核数浓度及其标准偏差随季节的变化

Fig. 8 The change in number concentration and standard deviation of ice nuclei with seasons on the top of Huangshan Mountain for different nucleate modes

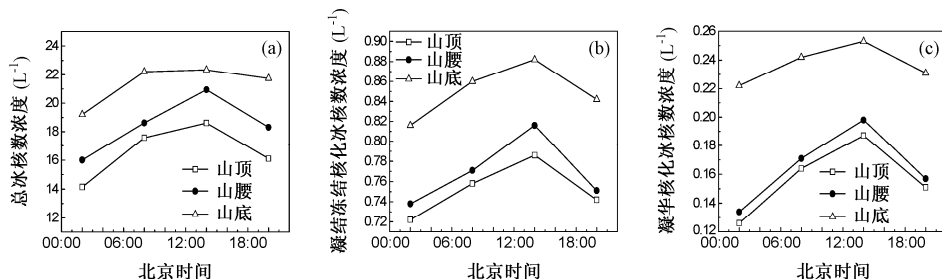


图 9 黄山夏季不同高度、不同核化机制冰核数浓度日变化

Fig. 9 The diurnal variations of ice nuclei concentration on Huangshan Mountain for different heights and nucleate modes

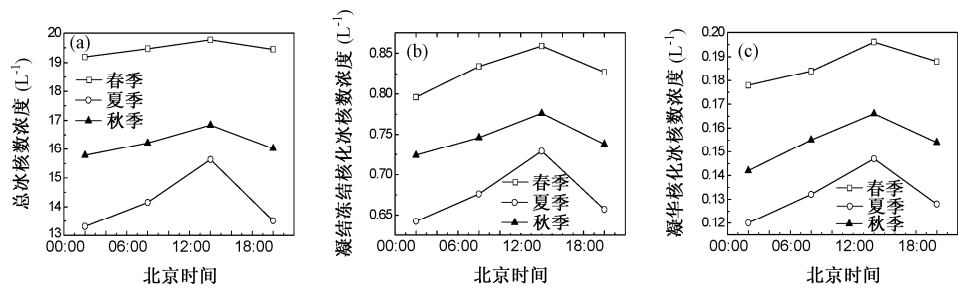


图 10 黄山山顶不同季节、不同核化机制冰核数浓度日变化
Fig. 10 The diurnal variations of ice nuclei number concentration on Huangshan Mountain for different seasons and nucleate modes

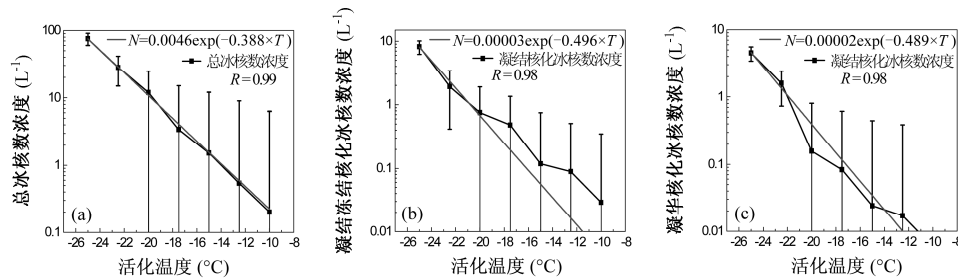


图 11 黄山山顶不同核化机制冰核数浓度随活化温度的变化
Fig. 11 The change of ice nuclei number concentration with activation temperature on Huangshan Mountain for different nucleate modes

表 1 中国不同地点大气冰核数浓度观测结果对比
Table 1 The comparison of observation results of ice nuclei number concentration at different locations of China

序号	观测时间	观测地点	数浓度 (L ⁻¹)				文献
			-15℃	-20℃	-25℃	-30℃	
1	1963 年 3~4 月	北京	1.0	4.8	43.1	—	(游来光和石安英, 1964)
2	1964 年 3~4 月	甘肃兰州	—	11.1	—	—	(赵剑平等, 1965)
3	1964 年 3~4 月	陕西西安	—	6.1	—	—	(赵剑平等, 1965)
4	1964 年 3~4 月	辽宁大连	—	8.3	—	—	(赵剑平等, 1965)
5	1964 年 4~5 月	吉林白城	2.8	5.82	14.80	102.20	(汪学林等, 1965)
6	1995 年 3~4 月	北京	21	78.9	533.2	—	(游来光等, 2002)
7	2000 年 8 月	甘肃玛曲	0.85	6.77	73	207	(李娟和黄庚, 2008)
8	2001 年 8 月	青海河南县	3.43	31.3	127	297.7	(李淑日等, 2003)
9	2003 年 10 月	青海河南县	26.3	47.4	76.1	142.4	(石爱丽等, 2006)
10	2011 年 5~8 月	江苏南京	—	20.1	—	—	(杨磊等, 2013)
11	2011 年 5~9 月	安徽黄山	9.9	21.38	72.14	137.52	本文

造成的气溶胶颗粒物排放可能是大气冰核的重要来源之一。安徽黄山地区大气冰核浓度较北方同时期大气冰核浓度较低，这可能与南方地区较清洁，可作为大气冰核的气溶胶较少，而北方地区空气质量较差，可作为大气冰核的气溶胶较多有关。而 21 世纪安徽黄山地区大气冰核浓度高于 20 世纪 60 年代我国北方地区大气冰核浓度，这可能说明人为活动的贡献及其对天气、气候产生的变化都有着重要的作用。

4 黄山大气冰核浓度与气象条件的关系

4.1 黄山大气冰核浓度与活化温度的关系

活化温度是大气冰核重要的影响因素之一。利

用 5 L Bigg 型混合云室及自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山山顶总冰核数浓度、凝结冻结核化冰核数浓度和凝华核化冰核数浓度进行测量。图 11 给出了黄山山顶总核化机制水汽充足，凝结冻结核化机制 5%水面过饱和，凝华核化机制 5%冰面过饱和条件下，不同核化机制冰核数浓度随活化温度的变化情况。从图中可以看出：无论是总核化机制、凝结冻结核化机制还是凝华核化机制，随着活化温度的升高，冰核数浓度都呈指数形式降低，这与 Pruppacher and Klett (1997) 的观测结果一致。其中各核化机制下的冰核数浓度在高温区的变化关系较拟合曲线偏离较大，这与高温区冰核数浓度绝对值较小有关。

Fletcher (1962) 曾给出大气冰核总数浓度与活化温度的经验公式:

$$N=A\times\exp(B\times T), \tag{1}$$

其中: N 是大气冰核数浓度 (L^{-1}), T 是活化温度 ($^{\circ}\text{C}$), A, B 为参数。根据该公式对黄山山顶不同核化机制的冰核数浓度随活化温度的变化关系进行拟合, 并与前人结果进行对比, 如表 2 所示。从表中可以看出: 黄山山顶总核化机制的温度谱公式与 2000 年李娟在中国玛曲的观测结果(李娟和黄庚, 2008)一致, 凝结冻结冻结核化和凝华核化机

制的温度谱公式与 1962 年 Fletcher 在澳大利亚的观测结果(Fletcher, 1962)相似, 黄山地区四种机制共同作用的温度谱公式较我国北方地区的结果偏低, 且不同地区、不同时间的不同结果差别较大, 这可能与我国南北方气溶胶背景浓度的差异及仪器误差有关。

4.2 黄山大气冰核浓度与活化湿度的关系

活化湿度也是影响大气冰核数浓度的重要因素之一。图 12 给出黄山山顶不同机制条件下大气冰核数浓度与过饱和度的关系, 从图中可以明显看

表 2 不同地区冰核温度谱公式对比
Table 2 The comparison of ice nuclei-temperature spectra equations in different areas

观测年代	参考文献	地点	核化机制	温度谱公式
1962 年	(Fletcher, 1962)	澳大利亚	凝结冻结、凝华	$N=10^{-5}\times\exp(-0.6\times T)$
1963 年	(游来光和石安英, 1964)	中国北京	凝华、凝结冻结、接触冻结、浸润冻结	$N=0.0025\times\exp(-0.389\times T)$
1980 年	(Cooper, 1980)	法国	凝结冻结、凝华	$N=0.005\times\exp(-0.304\times T)$
1992 年	(Meyers et al, 1992)	美国	接触冻结	$N=0.06\times\exp(-0.262\times T)$
1995 年	(游来光等, 2002)	中国北京	凝华、凝结冻结、接触冻结、浸润冻结	$N=0.034\times\exp(-0.395\times T)$
2000 年	(李娟和黄庚, 2008)	中国玛曲	凝华、凝结冻结、接触冻结、浸润冻结	$N=0.0035\times\exp(-0.38\times T)$
2011 年	(Ardon et al, 2011)	南极	浸润冻结	$N=3\times10^{-7}\times\exp(-0.66\times T)$
2011 年	本文	中国黄山	凝华、凝结冻结、接触冻结、浸润冻结	$N=0.0046\times\exp(-0.388\times T)$
2011 年	本文	中国黄山	凝结冻结	$N=0.00003\times\exp(-0.496\times T)$
2011 年	本文	中国黄山	凝华	$N=0.00002\times\exp(-0.489\times T)$

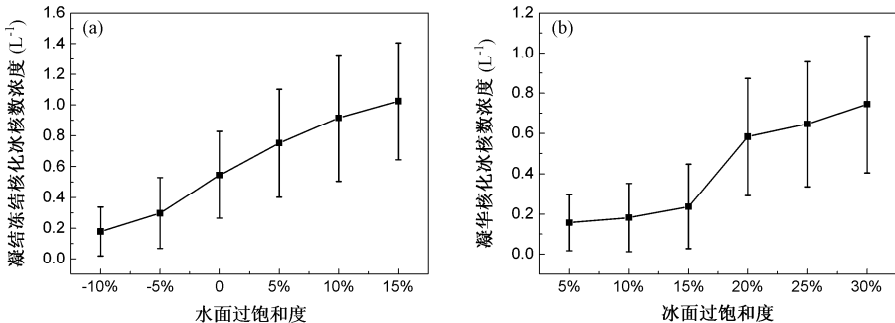


图 12 黄山山顶不同核化机制冰核数浓度活化随湿度的变化
Fig. 12 The change of ice nuclei number concentration with activation humidity on Huangshan Mountain for different nucleate modes

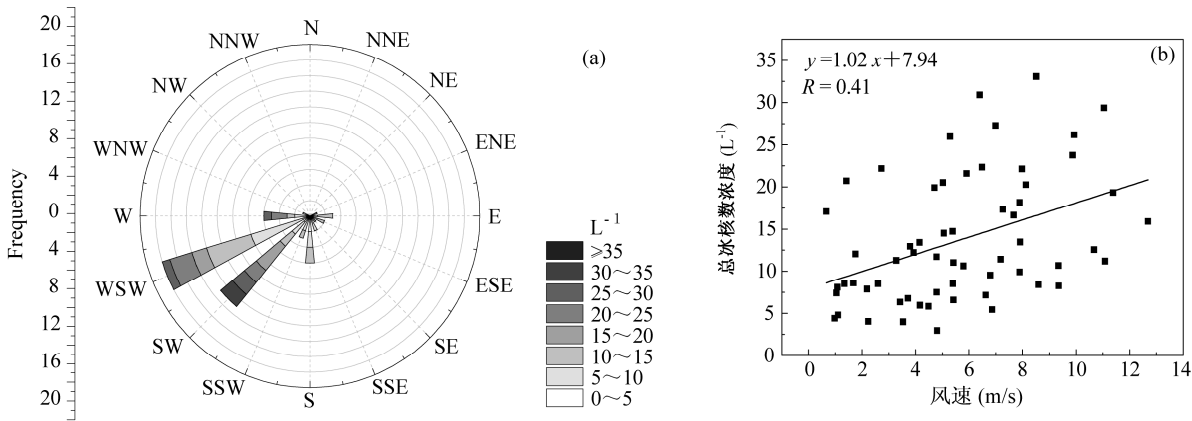


图 13 黄山山顶风向、风速与总大气冰核数浓度的关系
Fig. 13 The relationship of number concentration of ice nuclei in condensation to wind direction and speed at the top of Huangshan Mountain

出大气冰核数浓度随着过饱和度的增加而逐渐增大。这说明过饱和度越大,就有越多的气溶胶充当冰核而吸湿长大成为冰晶。当相对水面不饱和,而相对冰面过饱和时,仅仅可以通过凝华核化形成冰晶,当达到或超过水面过饱和时,凝结冻结核化机制开始作用,此时冰核浓度明显增加。这与李淑日等(2003)的观测结果相一致。

4.3 黄山大气冰核与风向风速的关系

风通过输送与稀释作用,影响着局地大气冰核数浓度的分布情况。利用 5 L Bigg 型混合云室对黄山山顶总冰核数浓度进行测量,结合自动气象站风向、风速的观测资料分析得出:黄山山顶的主要的风向来自于西南方向,且该方向的冰核浓度较高,可见黄山山顶的大气冰核主要从西南方向输送过来,随着风速的增大,黄山山顶大气冰核数浓度逐渐增加,这说明黄山山顶较清洁,由于风造成的输送作用大于由风造成的稀释作用。

利用自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄

山山顶凝结冻结核化大气冰核数浓度进行测量,并结合自动气象站风向、风速的观测资料。图 14 给出了黄山山顶风向与风速对 -20°C 活化温度,5%过饱和凝结冻结核化条件下冰核数浓度的影响。从图中可以看出:随着风速的增大,黄山山顶凝结冻结核化大气冰核数浓度逐渐增加,这说明黄山山顶较清洁,由于风造成的输送作用大于山顶的稀释作用。同时可以看出主要的风向来自于西南方向,且该方向的冰核浓度较高,可见黄山西南方向是黄山山顶大气冰核的主要来源地。

利用自行搭建的静力真空水汽扩散云室对黄山山顶凝华核化大气冰核数浓度进行测,并结合自动气象站风向、风速的观测资料。图 15 给出了黄山山顶风向与风速对 -20°C 活化温度,5%过饱和凝华条件下冰核数浓度的影响。从图中可以看出:凝华核化条件下大气冰核数浓度随风向、风速的变化特点与凝结冻结核化条件下冰核数浓度随风向、风速的变化特点总体趋势相一致,并且凝华核化条

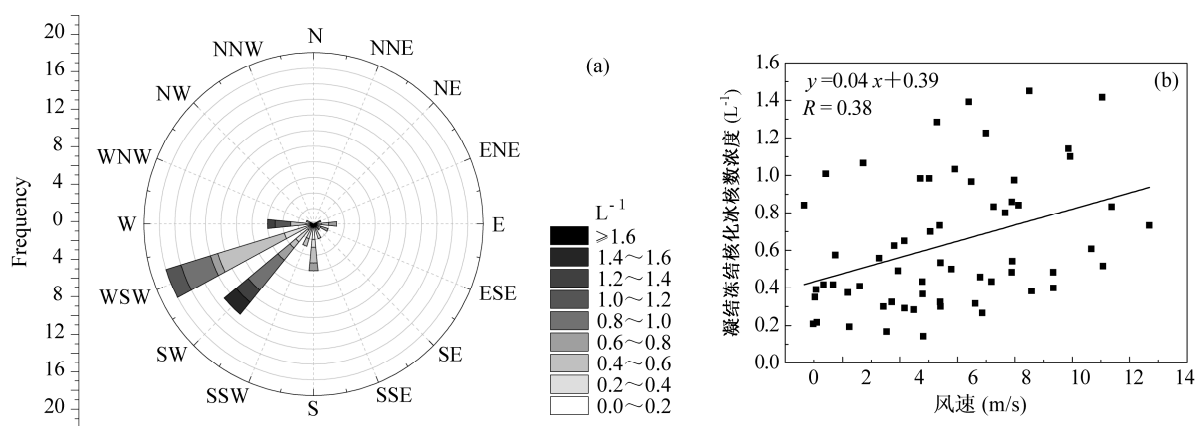


图 14 黄山山顶风向、风速与凝结冻结核化条件下大气冰核数浓度的关系

Fig. 14 The relationship of number concentration of ice nuclei in condensation to wind direction and speed at the top of Huangshan Mountain

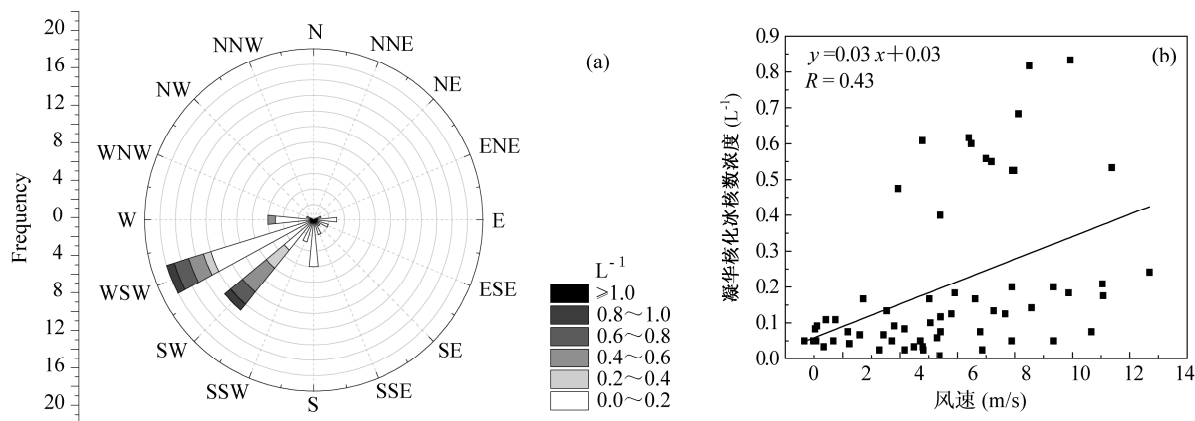


图 15 黄山山顶风向、风速与凝华核化条件下大气冰核数浓度的关系

Fig. 15 The relationship of number concentration of ice nuclei in deposition to wind direction and speed at the top of Huangshan Mountain

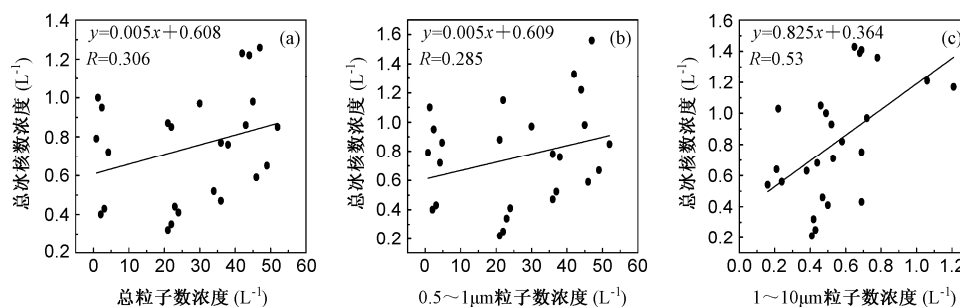


图 16 黄山山顶大气冰核浓度与不同粒径范围气溶胶数浓度的相关性

Fig. 16 The relationship of number concentration of ice nuclei to number concentration of aerosol at different sizes at the top of Huangshan Mountain

件下冰核数浓度随风速增大而增加的趋势更加明显,但随风向变化的量级较小,这主要是由于凝华核化条件下冰核的数浓度一般均低于凝结冻结核化条件下冰核的数浓度所致。

4.4 黄山大气冰核数浓度与气溶胶数浓度的关系

大气冰核是大气中可以与水汽发生贝吉龙效应形成冰晶,促进或抑制降水过程的气溶胶粒子,是空气中气溶胶粒子的一部分,因此研究大气冰核数浓度与气溶胶数浓度的相关性具有重要意义。本文利用黄山山顶 5 L Bigg 型混合云室、自行搭建的静力真空水汽扩散云室观测到得大气冰核数浓度数据,以及空气动力学粒径谱仪 (APS) 观测到的粒径在 $0.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 范围的气溶胶数浓度数据,对大气冰核与大气气溶胶数浓度的相关性进行研究。本文将气溶胶粒子按粒径分为 $0.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的总粒子、 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 的细粒子和 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的粗粒子三部分 (盛裴轩等, 2003), 分析了黄山山顶处在 -20°C , 总核化机制水汽充足, 凝结冻结核化或凝华核化 5% 过饱和条件下, 大气冰核数浓度与气溶胶粒子数浓度的相关性。如图 16 所示, 大气冰核数浓度与气溶胶总数浓度、气溶胶细粒子数浓度之间的相关性较低, 而与气溶胶粗粒子之间的相关性较好, 这说明了粒径在 $1\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围内的粗粒径气溶胶粒子更容易成为大气冰核, 这与 Klein et al (2010) 研究发现的与粒径范围在 $1.2\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子数浓度相关性较好结果相似。

5 结果与讨论

本文利用 5 L Bigg 型混合云室及自行搭建的静力真空水汽扩散云室并结合其他气象要素观测仪器, 对黄山三层高度共进行了 6 个月的观测研究, 并对该地区大气冰核数浓度及其影响因子进行分析, 得出结论如下:

(1) 黄山地区总冰核数浓度平均为 $18.74\ \text{L}^{-1}$, 凝结冻结核化冰核数浓度平均为 $0.79\ \text{L}^{-1}$, 凝华核化冰核数浓度平均为 $0.19\ \text{L}^{-1}$ 。

(2) 随着高度的增加, 黄山地区大气冰核数浓度不断减少。随着季节的变化, 黄山地区大气冰核数浓度呈现春季最高、秋季次之、夏季最少的变化情况。

(3) 黄山地区大气冰核数浓度下午达到一天中的最高值, 夜晚达到一天中的最低值。黄山地区冰核数浓度较北方同时期冰核数浓度少, 人为活动仍造成我国冰核数浓度总体增加的趋势。

(4) 随着活化温度的升高, 黄山地区冰核浓度呈指数形式降低, 总冰核数浓度与温度的经验公式为 $N=0.0046\times\exp(-0.388\times T)$ 。随着过饱和度的增大, 黄山地区冰核数浓度逐渐增大。

(5) 黄山山顶较清洁, 其大气冰核长期由西南风向山顶输送, 且其主要由大粒子来充当。

致谢 感谢黄山气象站提供的基本气象要素资料及审稿专家提出的建设性修改意见。

参考文献 (References)

- Ardon-Dryer K, Levin Z, Lawson R P. 2011. Characteristics of immersion freezing nuclei at the South Pole station in Antarctica [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 4015–4024.
- Bigg E K. 1957. A new technique for counting ice-forming nuclei in aerosols [J]. *Tellus*, 9 (3): 394–400.
- Bigg E K, Mossop S C, Meade R T, et al. 1963. The measurement of ice nucleus concentrations by means of Millipore filters [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2 (2): 266–269.
- Bundke U, Bingemer H, Wetter T, et al. 2006. The FINCH (Frankfurt Ice Nuclei Chamber) counter—New developments and first measurements [C] // 7th International Aerosol Conference September 10–15, St. Paul, MN, USA, 1350.
- Cooper W A. 1980. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples [C] // Preprints, Eighth International Conf. on Cloud Physics.

- Clermont-Ferrand, France: 665–668.
- Wang Die, Miao Junfeng, Tan Zheming. 2013. Impacts of topography and land cover change on thunderstorm over the Huangshan (Yellow Mountain) area of China [J]. *Natural Hazards*, 67 (2): 725–749.
- Draxler R R, Hess G D. 1997. Description of the HYSPLIT_4 modeling system [Z]. NOAA Technical memorandum ERL ARL–224. 1–25.
- Fletcher N H. 1962. The Physics of Rainclouds [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 52.
- Haunold W. 2009. Electrostatic aerosol collector. International. PCT/EP2009/004869 [P].
- 黄燕, 徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. *大气科学*, 18 (5): 612–622. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 18 (5): 612–622.
- Klein H, Haunold W, Bundke U, et al. 2010. A new method for sampling of atmospheric ice nuclei with subsequent analysis in a static diffusion chamber [J]. *Atmos. Res.*, 96: 218–224.
- 李娟, 黄庚. 2008. 黄河上游地区大气冰核浓度的观测研究 [J]. *气象*, 27 (11): 8–12. Li Juan, Huang Geng. 2008. Analysis of observational results of content of ice nuclei in the atmosphere in the upper reaches of Huanghe River [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 27 (11): 8–12.
- 李丽光, 周德平. 2011. 大气冰核研究进展 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1716–1721. Li Liguang, Zhou Deping. 2011. Advance in atmospheric ice nuclei [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (6): 1716–1721.
- 李淑日, 黄庚, 胡志晋. 2003. 黄河上游河南县地面大气冰核观测分析 [J]. *应用气象学报*, 14 (增刊): 41–48. Li Shuri, Huang Geng, Hu Zhijin. 2003. Analysis of ice nuclei in atmosphere in Henan county in upper reaches of Huanghe River [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 14 (supplement): 41–48.
- 李艳伟, 杜秉玉. 2003. 新疆天山山区大气冰核浓度的测量及分析 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (3): 364–370. Li Yanwei, Du Bingyu. 2003. Measurement and analysis of concentration of atmospheric ice nuclei in Tianshan Mountain area [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 26 (3): 364–370.
- Liu B Y H, Romay F J, Dick W D, et al. 2010. A wide-range particle spectrometer for aerosol measurement from 0.010 μm to 10 μm [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 10: 125–139.
- Lu C, Niu S, Tang L, et al. 2010. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics [J]. *Atmos. Res.*, 97 (1–2): 47–69.
- Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R. 1992. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 31 (7): 708–721.
- 牛生杰, 安夏兰, 陈跃, 等. 2003. 贺兰山地区大气冰核浓度的测量及初步分析 [J]. *南京气象学院学报*, 23 (2): 294–298. Niu Shengjie, An Xialan, Chen Yue, et al. 2003. Measurements and analysis of concentrations of atmospheric ice nuclei in the Helanshan area [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 23 (2): 294–298.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd ed.) [M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 309–360.
- Rogers D C. 1988. Development of a continuous flow thermal gradient diffusion chamber for ice nucleation studies [J]. *Atmos. Res.*, 22 (1): 149–181.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 5. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics* [M] (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 5.
- 石爱丽, 郑国光, 游来光. 2006. 2003年秋季青海省河南县地面大气冰核观测分析 [J]. *应用气象学报*, 17 (2): 245–249. Shi Aili, Zheng Guoguang, You Laiguang. 2006. Observation and analysis on ice nucleus of Henan county of Qinghai Province in autumn 2003 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 17 (2): 245–249.
- Vali G. 1985. Nucleation terminology [J]. *J. Aerosol. Sci.*, 16 (6): 575–576.
- 王志明, 赵廷宁, 田佳, 等. 2012. Vantage Pro2 自动气象站的使用维护研究 [J]. *湖南农业科学*, (11): 124–126. Wang Zhiming, Zhao Tingning, Tian Jia, et al. 2012. The maintenance technology of vantage Pro2 type automatic weather station [J]. *Hunan Agricultural Science* (in Chinese), (11): 124–126.
- 汪学林, 张万钧, 熊尚清. 1965. 白城地区春季的大气冰核 [J]. *气象学报*, 8 (3): 273–279. Wang Xuelin, Zhang Wanjuan, Xiong Shangqing. 1965. Ice nuclei of Baicheng area in spring [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 8 (3): 273–279.
- 解丽华. 2006. PID 过程控制及其参数整定 [J]. *科技情报开发与经济*, 16(5): 169–170. Xie Lihua. 2006. The PID course control and its parameter adjusting [J]. *Sci-Tech Information Development and Economy* (in Chinese), 16 (5): 169–170.
- 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 2013. 南京地区大气冰核浓度的测量及分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 579–594. Yang Lei, Yin Yan, Yang Shaozhong, et al. Measurement and analysis of atmospheric ice nuclei in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37 (3): 579–594.
- 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 2013. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究 [J]. *大气科学*, 37 (5): 983–993. Yang Lei, Yin Yan, Yang Shaozhong, et al. 2013. A study of characteristics of atmospheric ice nuclei and relationship with aerosol in winter of Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (5): 983–993.
- 杨绍忠, 郑国光, 楼小凤. 2005. 一种移动式混合云室装置: 中国, 实用新型专利, 200420003595.8 [P]. Yang Shaozhong, Zheng Guoguang, Lou Xiaofeng. 2005. A kind of travelling mixed cloud chamber (in Chinese): China, Useful new type patent, 200420003595.8 [P].
- 游来光, 石安英. 1964. 北京地区 1963 年春季冰核浓度变化特点的观测分析 [J]. *气象学报*, 34 (4): 548–554. You Laiguang, Shi Anying. 1964. The measurement and analysis of ice-nucleus concentration at Peking during the period from March 18th to April 30th in 1963 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 34 (4): 548–554.
- 游来光. 1976. 大气中的冰核 [J]. *气象*, 2 (1): 29–32. You Laiguang. 1976. Ice nuclei in air [J]. *Meteorology Monthly* (in Chinese), 2 (1): 29–32.
- 游来光, 杨绍忠, 王祥国, 等. 2002. 1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度的观测与研究 [J]. *气象学报*, 2 (1): 101–109. You Laiguang, Yang Shaozhong, Wang Xiangguo, et al. 2002. Study of nuclei concentration at Beijing in spring of 1995 and 1996 [J]. *Acta*

- Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (1): 101–109.
- 张建新, 廖飞佳, 高子毅, 等. 2006. 夏季新疆中天山北坡大气冰核的浓度观测分析 [J]. 高原气象, 25 (1): 138–142. Zhang Xinjian, Liao Feijia, Gao Ziyi, et al. 2006. Study on atmospheric ice nuclei on north slope of Mid-Tianshan Mountains in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 138–142.
- Zeng X P, Tao W K, Zhang M H, et al. 2009. A contribution by ice nuclei to global warming [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135 (643): 1614–1629.
- 赵剑平, 张密, 王玉玺, 等. 1965. 我国北部地区大气冰核观测的分析研究 [J]. 气象学报, 37 (4): 416–422. Zhao Jianping, Zhang Mi, Wang Yuxi, et al. 1965. The observation analysis study of ice nuclei in north area of our country [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (4): 416–422.