毕凯, 黄梦宇, 马新成, 等. 2020. 在线连续流量扩散云室对华北冬季大气冰核的观测分析 [J]. 大气科学, 44(6): 1243−1257. BI Kai, HUANG Mengyu, MA Xincheng, et al. 2020. Observation and Analysis of Atmospheric Ice-Nucleating Particles in Online Continuous-Flow Diffusion Chamber in Winter in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1243−1257. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19194

在线连续流量扩散云室对华北冬季大气冰核的观测分析

毕凯[1, 2, 3, 4] 黄梦宇[1, 2, 3, 4] 马新成[1, 2, 3, 4] 田平[1, 2, 3, 4]
陈羿辰[1, 2, 3, 4] 丁德平[1, 2, 3, 4]

1 中国气象局华北云降水野外科学试验基地，北京 101200
2 云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室，北京 100089
3 北京市人工影响天气办公室，北京 100089
4 北京大学—北京市人工影响天气办公室云降水物理学联合实验室，北京 100089

摘 要 利用国内首台在线连续流量扩散云室，2017 年冬季在华北地区高山站开展了大气冰核观测；结合常规气象要素、降水滴谱、气溶胶观测，分析了大气冰核数浓度特征，并对冰核活化参数化方法以及降雪对冰核的影响进行了研究。结果表明：（1）大气冰核在不同时间的浓度差异较大，−20°C 时数浓度变化范围为 2.50～76.8 L^{-1}，平均值为 18.347 L^{-1}；（2）大气冰核浓度随活化温度降低呈指数增加趋势，随过饱和度增加呈指数增加，凝华核化所占比例约为 18.64%；（3）大气冰核与粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度的关系可用参数化表示，相关性大于仅基于活化温度建立的参数化公式；（4）降雪过程大气冰核具有先增加后减少的特征。降雪开始后大气冰核数浓度增加，降雪后期系统过境伴随的大风，对气溶胶的清洗作用明显，大气冰核随之减少。本研究为在线连续流量扩散云室类型的冰核观测仪在国内首次使用，所建立的冰核参数化公式有助于华北地区冬季地形云及其降水的微物理特征研究，同时在云模式的发展和人工影响天气研究中也有重要的参考意义。

关键词 在线连续流量扩散云室 大气冰核 气溶胶 冰核参数化 华北地区
文章编号 1006-9895(2020)06-1243-15 **中图分类号** P401 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19194

Observation and Analysis of Atmospheric Ice-Nucleating Particles in Online Continuous-Flow Diffusion Chamber in Winter in North China

BI Kai[1, 2, 3, 4], HUANG Mengyu[1, 2, 3, 4], MA Xincheng[1, 2, 3, 4], TIAN Ping[1, 2, 3, 4], CHEN Yichen[1, 2, 3, 4], and DING Deping[1, 2, 3, 4]

1 *Field Experiment Base of Cloud and Precipitation Research in North China, China Meteorological Administration, Beijing* 101200
2 *Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources (LCPW), Beijing* 100089

收稿日期 2019-07-26；**网络预出版日期** 2020-03-19
作者简介 毕凯，男，1986 年生，硕士，高级工程师，主要从事大气冰核与人工影响天气研究。E-mail: bikai_picard@vip.sina.com
通讯作者 马新成，E-mail: fellow_007@163.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41675138、41775138、41930968、41805114、41805113，国家重点研发计划项目 2019YFC1510301，北京市气象局科技项目 BMBKJ201701007

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41675138, 41775138, 41930968, 41805114, 41805113), National Key R&D Program of China (Grant 2019YFC1510301), Science and Technology Project of the Beijing Meteorological Service (Grant BMBKJ201701007)

3 *Beijing Weather Modification Office*, *Beijing* 100089
4 *PKU-BWMO Joint Laboratory on Cloud and Precipitation Physics*, *Beijing* 100089

Abstract In this paper, we measure ice-nucleating particle (INP) number concentrations at a mountain site on the northwestern margin of Beijing during the winter of 2017, which were obtained using a newly purchased continuous-flow diffusion chamber (BJ-CFDC). We analyzed the characteristics of the atmospheric INP number concentrations with respect to weather elements, the precipitation size distribution, and aerosol observations. We identified the relationships of the INP number concentration with activation temperature, super saturation with respect to water, and aerosol particles larger than 0.5 m. The results indicate that the atmospheric INP number concentration has a large variation with respect to different activation temperatures, ranging between 2.50–76.8 L^{-1} at −20°C, with an average of 18.347 L^{-1}. The atmospheric INP number concentration was found to increase exponentially both with decreasing temperature and increasing super saturation with respect to water. The results also revealed that the atmospheric INP number concentration has a good correlation with the concentration of aerosol particles larger than 0.5 m. With this relation, the relevance of the predicted and measured INP number concentrations is greater than the relationship based only on temperature. The atmospheric INP number concentration in snow days was found to first increase and later decrease. That is, the INP number concentration increases when the snow begins, but the strong wind in the later snow period scavenges the aerosols, which leads to a reduced INP number concentration. With the BJ-CFDC, the first instrument of its kind in China, the results of this study will advance the study of orographic cloud and precipitation in winter in North China, as well as facilitate the development of cloud modeling and weather modification studies.

Keywords Continuous-flow diffusion chamber, Atmospheric ice-nucleating particle, Aerosols, Ice-nucleating particle (INP) parameterization, North China

1 引言

大气冰核是指悬浮在大气中，能使过饱和水汽凝华或者过冷水滴冻结形成初始冰晶的微粒。大气冰核和云凝结核一样，能够通过促进水的相变参与云的微物理过程（游来光等, 2002）。冰核的异质核化有四种机制，分别是凝华核化、凝结冻结、浸润冻结和接触冻结（Vali et al., 2015），其中浸润冻结被认为是混合相态云中最主要的核化机制（Ansmann et al., 2008; Murray et al., 2012）。冰核能促进过冷云滴冰晶化，直接影响云中冰粒子的尺度和数浓度（Lohmann et al., 2004），也间接影响到降水的形成和云的生命周期（Lohmann et al., 2007），从而在水循环中有重要作用（Hoose and Möhler, 2012），反过来也会影响大气辐射传输（李娟等, 2006）和气候变化（Belosi et al., 2014）。

国外开始对大气冰核的研究时间较早。早在20世纪初，有人就提出云中需要某些核，才能使云滴冻结或水汽凝华形成冰晶（游来光, 1976）。从40年代开始，国外学者尝试设计了多种冰核观测方法与设备，主要有比格云室法（Bigg and Hopwood, 1963）、滤膜法（Stevenson, 1969）、液滴冻结计数法（Junge and Swanson, 2008）、静力真空水汽扩散云室（简称FEIDGE）（Klein et al., 2010）、单颗粒电镜法（Wang et al., 2016）、连续流量的热力扩散云室法（Rogers, 1988; DeMott et al., 2003; Bundke et al., 2006）等等。经过几十年的实验室和外场大气冰核观测研究，学者们取得了一些宝贵成果。世界上不同地区冰核浓度的时空变化差异很大（Plaude and Vychuzhanina, 2000）；大颗粒的气溶胶更易形成冰核，尤其是直径大于0.5 μm的气溶胶（DeMott et al., 2010）；冰核气溶胶粒子的直径主要在10 μm以下，尺度在1 μm以下的气溶胶（PM1）贡献50%，尺度在10 μm以下的气溶胶（PM10）贡献70%～90%（Santachiara et al., 2010）；不同来源的空气团能够影响大气冰核（Patade et al., 2014）。在冰核参数化研究方面，学者们通过实验室研究和外场观测，根据温湿度、气溶胶数浓度、尺度和化学成分等不同因素对冰核的参数化方案进行了设计，得到了活化温度与冰核浓度的关系（Fletcher, 1962），湿度与冰核浓度的关系（Meyers et al., 1992），温度、冰面过饱和度与冰核浓度三者的经验公式（Cotton and Anthes, 1989），气溶胶数浓度、温度与冰核浓度的关系（DeMott et al., 2010），气溶胶成分、表面积与冰核浓度的参数化公式（Phillips et al., 2008）。

我国从上世纪 60 年代开始了冰核的观测研究。先后在北京（游来光和石安英, 1964; 游来光等, 2002; Bi et al., 2018, 2019; Chen et al., 2018; Che et al., 2019）、吉林白城（汪学林等, 1965）、西安和大连和兰州（赵剑平等, 1965; 葛正谟和周春科, 1986）、福建石塔山（吴明林等, 1986）、南京和内蒙古东胜（陈金荣, 1994）、贺兰山（牛生杰等, 2000）、黄土高原（酆大雄等, 1994）、甘肃玛曲（李娟和黄庚, 2001）、青海（马新成等, 2002）、新疆（张建新等, 2006）、沈阳（周德平等, 2012a, 2018; Li et al., 2017）、抚顺（周德平等, 2012b）、南京（杨磊, 2013a, 2013b）、黄山（苏航等, 2014; Jiang et al., 2014, 2015）等地采用比格混合云室法、滤膜—静力扩散云室、新型静力扩散云室、冷台冻滴、连续流量扩散云室等不同方法对大气冰核浓度及其特征开展了外场观测，也在云室中对冰核活化进行了研究（石安英等, 1982; 苏正军等, 2010），同时开展了冰核的模式研究（李娟和毛节泰, 2006; 陈丽和银燕, 2009; 肖辉等, 2012; 沈新勇等, 2015; 李泽宇等, 2016; 王雨等, 2017）。

国内冰核研究初步结果表明，大气冰核的变化具有明显的区域特点，跟天气条件密切相关（赵剑平等, 1965; 苏航等 2014; Jiang et al., 2015）；人类活动和社会发展对北京地区冰核浓度的变化有重要影响（游来光等, 2002）；冰核具有明显的日变化特点，早上比午后高（吴明林等, 1986）；冰核浓度随温度降低呈指数增长，−20°C 活化温度下最大数浓度可达 186 L^{-1}（石爱丽等, 2006）甚至更高（周德平等, 2012a）；冰核浓度在低云天气下比晴空和高云下要低（牛生杰等, 2000）；冰核浓度特征及其与气溶胶粒子浓度有很大的关系（杨磊等, 2013a, 2013b）；雾和降雨对冰核有明显的冲刷作用，冰核浓度与不同来向气团的性质有关，较大粒径的气溶胶表面积浓度与冰核浓度相关性更高。可利用活化温度和气溶胶数浓度计算冰核浓度（杨磊等, 2013b）；利用飞机开展了冰核观测采样，发现冰核浓度随高度增加而减少（周德平等, 2018; 牛生杰等, 2000）。北京城区重污染天气对冰核的影响较小（Chen et al., 2018）；北京城区和山区的冰核差异较大，山区存在大量在−15°C 下活化的冰核（Bi et al., 2018），沙尘比污染对冰核的贡献大（Bi et al., 2019）。目前对华北地区的冰核观测主要是北京的城区和东部郊区平原，缺少区域代表性背景冰核的连续观测，缺乏对北京地区气溶胶与冰核关系参数化方面的研究。

基于以上考虑，本文利用目前国际上应用较广的在线连续流量扩散云室，选取了具有区域背景代表性的华北地区高海拔的海坨山区对大气冰核进行观测。配合同步的气象要素、气溶胶、降水滴谱仪等观测，以探索新型连续流量扩散云室在华北地区冬季大气冰核研究中的应用，研究华北地区大气冰核在冬季的浓度及特征，揭示大气冰核与活化温度、过饱和度和气溶胶的本地参数化关系，探索降雪对大气冰核的影响。以帮助我们深入了解大气冰核在混合云降水中的作用，为预报和云模式的本地化改进和对云降水理论研究提供一定的科学基础和参考依据。

2　资料与研究方法

2.1　研究地点及时间

海坨山区在华北平原的上风向，海拔高，很少受人为排放的气溶胶影响，具有较好的区域代表性。华北地区降水受自西向东云系系统的影响大，海坨山区的大气冰核有机会直接参与云中的物理过程，与下游华北平原的成云致雨关系密切。受海拔和地形影响，海坨山区常有低云接地，经常产生地形云降水（Ma et al., 2017），尤其是冬季地形云，大气冰核直接参与云的发展过程中。北京市人工影响天气办公室（简称北京人影办）自 2014 年起在海坨山区建立了闫家坪高山综合观测站（40°31′40″N，115°44′51″E），海拔 1344 m，简称闫家坪站，开展华北地区云与降水物理综合观测研究（Ma et al., 2017）。本项目大气冰核观测点位于闫家坪站内，该站距离市中心约 90 公里。图 1 为闫家坪观测站位置及周边地形，五角星代表北京市中心，三角形代表闫家坪站。

本文的研究时段为 2017 年 12 月 13 日～2018 年 2 月 5 日。整个观测期间同时进行了气象要素、气溶胶谱、降水等的观测。其中利用国内首套新型连续流量扩散云室在 2017 年 12 月 13～15 日、2018 年 1 月 6～7 日、1 月 18～22 日、2 月 3～5 日共计 13 天对大气冰核进行了观测。本文中的所有时间均为北京时。

2.2　研究仪器

2.2.1　新型在线连续流量扩散云室

不同测量大气冰核的设备各有优缺点，加上冰

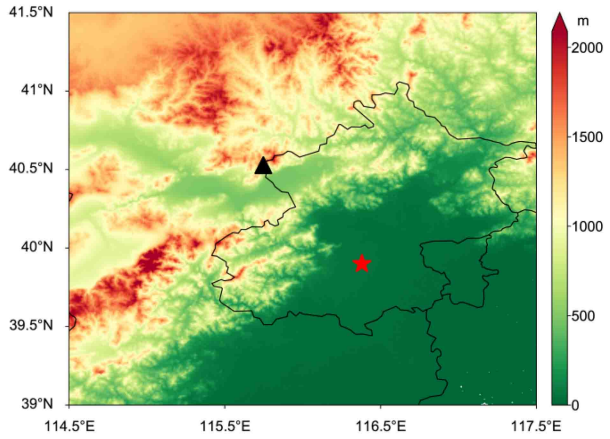

图 1 闫家坪高山综合观测站（简称闫家坪站）及周边地区地形分布图。五角星代表北京市中心，三角形代表站闫家坪观测站

Fig. 1 Topography of Yanjiaping station and the surrounding area. The star indicates the center of Beijing City as a reference. The triangle indicates the Yanjiaping station

核测量的不确定性很多，目前还没有任何可靠的设备能同时分机制测量四种不同的冰核核化机制，也不能真实反映出自然大气云中常见的缓慢冷却和长时间保持低的过饱和状态。但是，连续流量扩散云室由于可以在线实时观测，最大程度上排除了人为因素的干扰，并且可以改装后进行空中观测，国际上许多著名大气冰核观测项目均采用此类型设备进行观测（Richardson et al., 2007）。

本研究所使用的冰核观测设备为北京人影办的新型在线连续流量扩散云室冰核观测仪（Continuous Flow Diffusion Chamber-Ice Activation Spectrometer, 本文中简称 BJ-CFDC），该设备由美国 Handix 公司和美国科罗拉多州立大学 DeMott 教授团队共同研制完成，设备的测量云室部分和操作原理与之前已经得到广泛应用的美国科罗拉多州立大学连续流量扩散云室（简称 CSU-CFDC）（Rogers et al., 2001; DeMott et al., 2010）一致，这样与之前的测量结果具有可比性。为了使该类型冰核观测设备用于野外无人值守观测，BJ-CFDC 在 CSU-CFDC 的基础上进行了改进，主要对制冷系统、硬件控制系统和软件进行了改造，改进后的软件系统方便用户编程，能够自动化控制云室，包括抽真空、漏气测试、云室制冷、去离子水制冰、设置云室目标温湿度、开始采样、切换温湿度环境、融冰以及循环周期采样等等（Bi et al., 2019）。

图 2 为 BJ-CFDC 外观和主体测量原理图。在连续采样气流中，通过把环境大气引入可控温度和冰面过饱和度的云室环境中，来测量大气冰核。利用水和热量的扩散率差来控温和控制冰面饱和度。通过精确控制冷暖壁温度，在两壁之间形成特定的温度梯度。由两壁覆盖的冰层提供了暖壁向冷壁扩散的水汽源。它的测量云室腔为两个同心圆柱，通过两股鞘气之间的薄薄的圆柱形板状空间进行采样。采样时，气溶胶颗粒竖直通过两个同心圆柱之间的云室空间后，迅速到达恒定的温度和冰面过饱和度区域。由于冷却度和云室形状的差异，会形成一个较宽范围的温度和冰面过饱和度条件，通常温度范围在 −40°C～−15°C。这个温度范围覆盖了大部分混合相态云的条件。任何进入控制室环境条件下的冰核都将被核化，要么在无过冷水的条件下直接凝华核化，要么通过凝结/浸润冻结生成过冷水滴再冻结。云室内冰核一旦核化，在高过饱和度下将快速增长。采样气流接下来通过一个相对水面的次饱和区域（蒸发区），但相对冰面仍然过饱和。液滴蒸发，冰晶保留下来。气流最后通过一个光学计数器，探测到冰晶。与那些无冰核的小滴相比，这些冰晶由于尺度大而容易被探测到。

BJ-CFDC 在采样前端带有 2 个串联的 2.5 μm 的粒子筛选器，来移除可能被误认为冰核的大颗粒。该设备在采样前端使用了三通阀来控制采样大气或者过滤后的大气。通过切换过滤后的大气的测量结果作为“背景”值。采样时采用 5 分钟采样，接着 5 分钟切换到过滤后“背景”值的方法。随着采样时间的加长，在云室壁上可能产生霜，造成冰核“背景增大”，在连续 4～5 小时观测后浓度可达

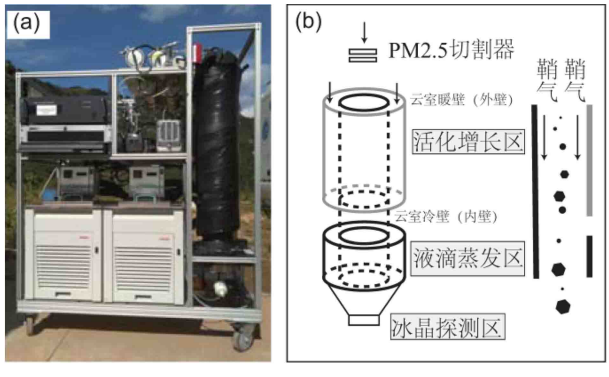

图 2 新型在线连续流量扩散云室冰核观测仪（BJ-CFDC）：（a）观测仪外观；（b）测量原理图

Fig. 2 (a) Photo of Continuous Flow Diffusion Chamber-Ice Activation Spectrometer (BJ-CFDC) and (b) a schematic of its basic operating principle

2～5 L^{-1}。本文在研究冰核随过饱和度变化时，温度设置为−25°C，过饱和度为−5%～5% 间隔 2% 进行测量。日常观测区间为温度−15～−35°C，每 5°C 一个间隔，水面过饱和度为 5%，这个过饱和度的设置能有效测量浸润冻结核化机制在内的冰核浓度（DeMott et al., 2017; Garimella et al., 2017）。在不同温度和过饱和度转变过程中由于条件不稳定，这部分数据在分析中进行了剔除。本文把 5 分钟的采样浓度减去前后相邻的 5 分钟背景冰核浓度的平均值作为校准后的冰核浓度。原始冰核浓度测量误差按照泊松分布计算得到（Schill et al., 2016）。由于 BJ-CFDC 前端两个 2.5 μm 的粒子筛选器，因此该设备所观测的大气冰核结果无法直接给出大气气溶胶中尺度大于 2.5 μm 的冰核浓度。但基于近年来学者们在地面通过滤膜法测量的冰核数浓度的尺度分布结果来看，−15°C 下 PM1 的贡献约为 50%，PM10 贡献为 70%～90%，PM2.5 中的冰核占了总悬浮颗粒物的 67%～82%（Santachiara et al., 2010）。尽管存在一定的误差，但仍然低于大气冰核本身测量的不确定性（Demott et al., 2017）。

2.2.2　其他观测仪器

在协同观测过程中，我们使用了其他观测设备。对于粒径大于 0.5 μm 的气溶胶，我们使用空气动力学粒径谱仪（APS，TSI 3321, 美国）观测。该设备基于空气动力学原理，通过单独的高速处理器在加速气流中检测单颗粒的飞行时间，来换算粒子的空气动力学粒径。APS 通过 32 个通道，对 0.5～20 μm 直径的颗粒物进行实时测量，最高时间分辨率为 1 秒。本项目中为了与其他设备协同观测，APS 的采样时间分辨率设置为 1 min。

本文使用了环境颗粒物分析仪（GRIMM EDM 180, 德国 GRIMM 公司）来测量 PM1, PM2.5 和 PM10 的质量浓度，时间分辨率为 1 min。气象数据来自于自动气象站（CAWS620－MS, 华云升达），包括风向、风速、气温、湿度。降水量数据来自于称重降雪量仪（DSC2，华云升达）。降雪滴谱资料使用二维激光降水谱仪（PARSIVEL，德国 OTT 公司）进行观测。上述设备的采样时间分辨率均为 1 min。

3　研究结果与讨论

3.1　华北地区冬季冰核总体特征

BJ-CFDC 对大气冰核进行观测期间，同时进行了气象要素、气溶胶谱、降水等的观测，其中 1 月 6 日和 1 月 22 日为降雪天气，其他天气为晴天或多云，观测期间未出现系统性沙尘天气。图 3 为观测时间段的风向、风速、气温、相对湿度等气象要素、PM10 质量浓度、PM2.5 质量浓度、粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度、以及活化温度在 −20°C 和 5% 水面过饱和度下的冰核数浓度变化特征，此时冰核包含了凝华核化、凝结冻结和浸润冻结的机制，主要测量的是浸润冻结机制的冰核数浓度（DeMott et al., 2017）。从图 3i 可以看出，活化温度相同的条件下冰核数浓度在不同时间的波动较大，活化温度−20°C 时数浓度为 2.50～76.8 L^{-1}，平均值为 18.347 L^{-1}。冰核数浓度的剧烈变化与降水过程（Jiang et al., 2015）、气溶胶数浓度（Chen et al., 2018）、风速（苏航等, 2014）等的变化有较大的相关性。图 3 中，12 月 14 日粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度出现了大幅增长，冰核数浓度也随之增长，这与前人的观测结果一致（DeMott et al., 2010; Jiang et al., 2014）。

图 4 为观测期间华北山区冰核浓度在不同活化温度下的箱式统计图特征。绿色三角为平均值，橙色为中位数值。可以看出，随着活化温度的降低，冰核数浓度呈指数增加，观测到冰核数浓度最大值约为 2500 L^{-1}（−35°C），出现在 1 月 21 日的降雪过程中。在观测时段内不同活化温度下冰核的数浓度都出现了较大的变化区间，这与 DeMott et al.（2010）在全球范围内获得的观测结果一致。大气冰核在−15°C、−20°C、−25°C、−30°C、−35°C 时冰核数浓度平均值分别为 6.190±3.625 L^{-1}、18.347±17.043 L^{-1}、51.137±31.200 L^{-1}、138.546±194.618 L^{-1} 和 455.602±437.203 L^{-1}。

与该设备在春季北京东北郊的平原地区（中国气象局华北野外科学实验基地）开展的观测结果相比（Bi et al., 2019），华北山区在活化温度为 −30°C 和−25°C 时大气冰核数浓度均远低于平原地区沙尘天气过程（−30°C 为 835±600 L^{-1}，−25°C 时为 435±400 L^{-1}）和污染天气过程（−30°C 为 330±215 L^{-1}，−25°C 时为 205±145 L^{-1}）观测的值。高于春季晴空冰核数浓度（−30°C 为 90±80 L^{-1}，−25°C 时为 40±25 L^{-1}）。一方面这种差异可能是季节差异和不同的地点造成的，平原地区受人为影响大，高山站海拔较高，远离城市，其值可以看作华北区域的背景值。另一方面，这可能与气溶胶浓

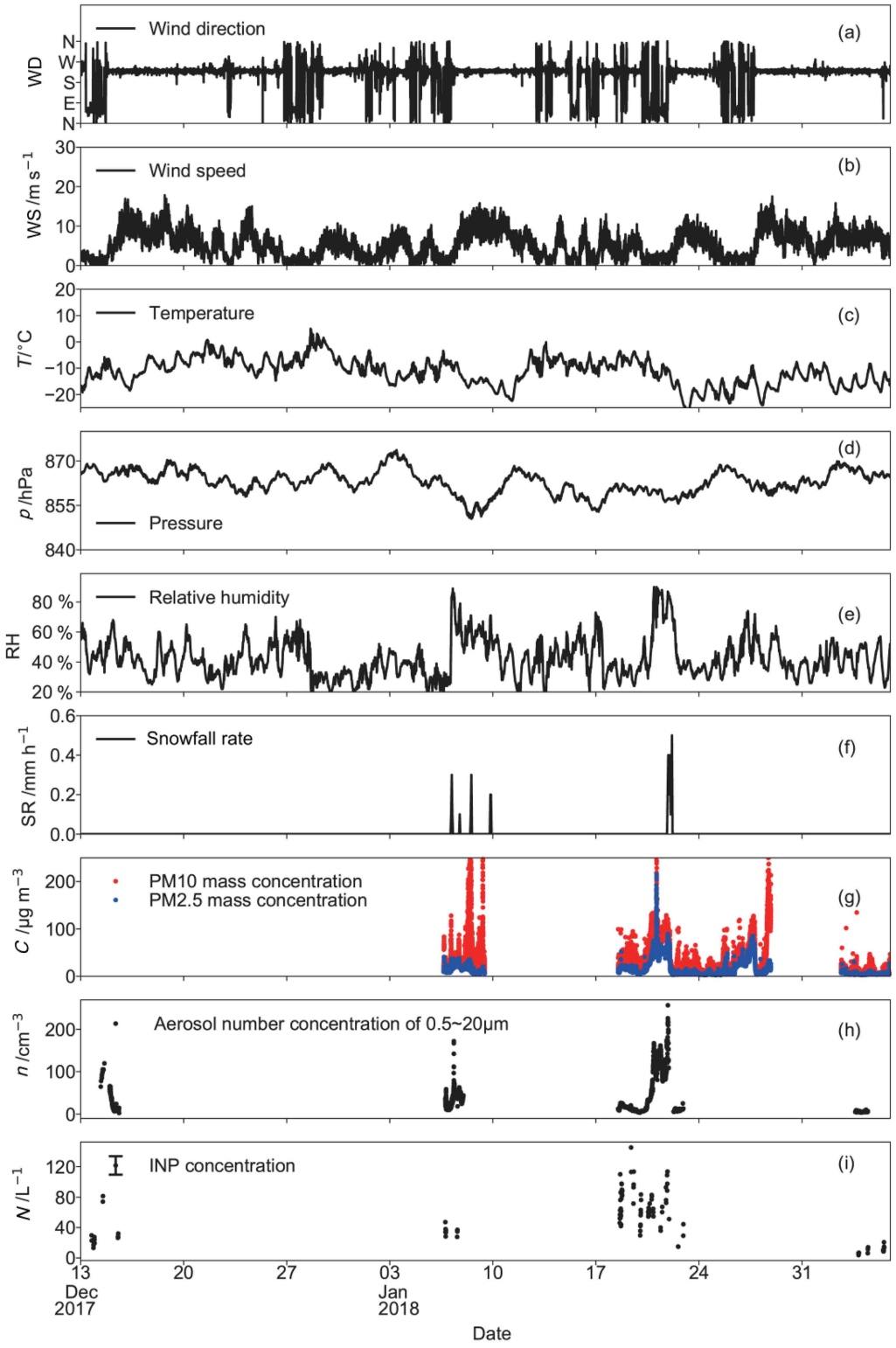

图 3 闫家坪站点气象要素、气溶胶、冰核数浓度时间序列演变：（a）风向；（b）风速；（c）温度；（d）气压；（e）相对湿度；（f）降雪率；（g）气溶胶 PM10 和 PM2.5 质量浓度；（h）0.5～20 μm 气溶胶数浓度；（i）冰核数浓度（−20°C，5% 水面过饱和度）

Fig. 3 Evolution of ice-nucleating particle (INP) concentration time series with weather elements and aerosols at Yanjiaping station: (a) Wind direction (WD); (b) wind speed (WS); (c) temperature; (d) pressure; (e) relative humidity (RH); (f) snowfall rate (SR); (g) PM10 and PM2.5 mass concentration (C); (h) number concentration of aerosols with diameters larger than 500 μm (n); (i) INP number concentration activated at −25°C at 5% supersaturation with respect to water (N)

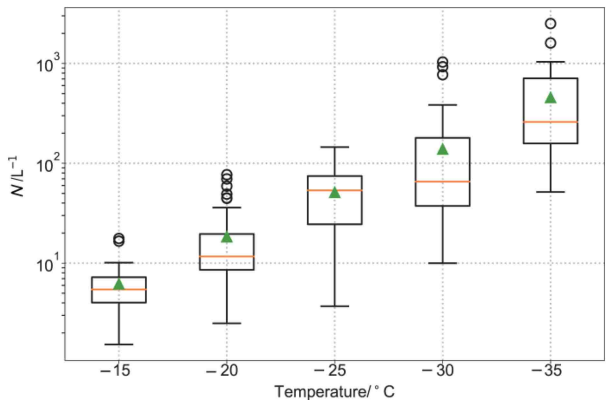

图 4　不同活化温度下的冰核数浓度统计特征图

Fig. 4　Box chart of INP number concentrations at different temperatures

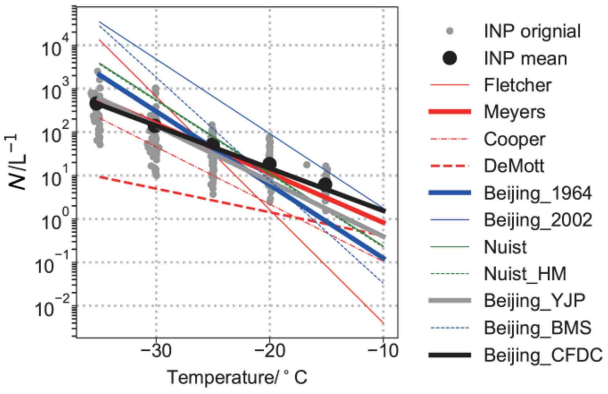

图 5　大气冰核数浓度随温度变化图及与前人拟合结果的对比图。横坐标为活化温度，纵坐标为冰核数浓度，灰色点为 BJ-CFDC 单个测量值，黑色为每个活化温度的平均值，红色细线为 Fletcher 参数化结果，红色粗实线为 Meyers 参数化结果，红色虚点线为 Cooper 参数化结果，红色虚线为 DeMott 参数化结果，蓝色粗实线为游来光和石安英（1964）年参数化结果，蓝色细实线为游来光等（2002）年参数化结果，绿色线为南京地区参数化结果，绿虚线为黄山地区参数化结果，灰色粗实线为比格混合云室测量的北京山区参数化结果，蓝色细虚线为比格混合云室测量的北京城区的参数化结果，黑色粗实线为本文 BJ-CFDC 测量的北京山区参数化结果

Fig. 5　INP number concentrations fitting at different temperatures compared with previous results (*x*-axis: activation temperature; *y*-axis: INP concentration; gray dots: original CFDC measurements; black dots: mean INP concentrations at each activation temperature; thin red line: Fletcher parameterization; thick red line: Meyers parameterization; red dash-dotted line: Cooper parameterization; red dashed line: DeMott parameterization; thick blue line: Beijing_1964 parameterization by You and Shi (1964); thin blue line: Beijing_2002 parameterization by You et al. (2002); green line: Nanjing parameterization by Nuist; green dashed line: Nuist_HM parameterization at Huangshan by Nuist; thick gray line: Beijing_YJP parameterization at Beijing mountain area measured by Bigg-type chamber; thin blue dashed line: Beijing_BMS parameterization at Beijing urban measured by Bigg-type chamber; thick black line: Beijing_CFDC parameterization measureed in this paper）

度有关，Che et al.（2019）也观测到北京地区冰核数浓度与气溶胶有很大的相关性。

本文的研究结果与其他类型设备在北京地区的观测结果相比，北京人影办曾在 2016 年冬季在本文的观测站点使用比格混合云室进行了观测（Bi et al., 2018），在活化温度−4°C～−26°C 观测到的冰核数浓度为 0.2～99.8 L^{-1}，其中−20°C 时的大气冰核数浓度为 7.36 L^{-1}，相同温度下比格云室的结果更小。这可能是由于不同时间不同气溶胶造成的，另一方面设备不同也造成了这种差异，但是随温度的变化趋势是一致的。本文与 2017 年春季北京城区的研究相比（Che et al., 2019），同样看到在高温下 BJ-CFDC 比比格云室测的结果高，低温下测的结果低。这可能是核化机制不同造成的，同时由于比格混合云室在活化时加入了大量的过冷雾滴，增加了接触冻结的冰核数量。与北京中心城区（北京大学观测点）冬季重污染天气膜采样冰核冷台分析的观测结果（Chen et al., 2018）相比，BJ-CFDC 测得的山区的观测值高，这可能是不同的观测设备和地点差异造成的，Bi et al.（2018）也观测到了城区和山区观测结果有明显差异。

3.2　大气冰核的温度谱

大气冰核数浓度随活化温度的变化通常用指数函数关系表示（Meyers et al., 1992; DeMott et al., 2010）。图 5 为不同活化温度下的冰核浓度及参数化关系及与前人的对比。图中灰色点为单个测量值，黑色圆点表示每个活化温度下大气冰核数浓度平均值。图中黑色粗实线为本文数据拟合的参数化关系线，其他不同颜色和形状的线表示前人不同的参数化关系式，具体函数关系见表 1。本文利用公式（1）进行拟合。

$$N = A \cdot \mathrm{e}^{-B \cdot T}, \qquad (1)$$

其中，N 为冰核数浓度（L^{-1}），T 表示冰核活化温度，A 和 B 为拟合系数。

从图 5 可以看出冰核浓度随温度呈指数增加。通过把本文的拟合结果与国内外学者的研究结果对比，图中黑色实线为本文的拟合结果，可以看出，本文的观测结果与前人的观测结果趋势是一致的。

另外，与其他地区拟合结果又有差异。导致这种原因是不同时间、地点和方法的不同，以及气溶胶浓度不同，随着时间推移，人为活动和工业发展等导致气溶胶浓度增加，需要进一步研究。

3.3 冰核浓度与过饱和度的关系

水汽条件能够影响气溶胶的成核特征（DeMott 2003c）。活化湿度也是影响大气冰核数浓度的重要因素之一。图 6 分别给出了活化温度为−25°C 时的华北地区冬季大气冰核数浓度与水面过饱和度、冰面过饱和度之间的关系。从图中可以看出，大气冰核数浓度随过饱和度的增加而逐渐增大，这与苏航等（2014）、Jiang（2015）和 DeMott（2010）等的观测结果趋势一致。−25°C 时−5%～5% 水面过饱和度时冰核浓度范围为 1.15～65.73 L^{-1}。另外，本文的观测结果可以看出冰核数浓度随过饱和度的变化呈明显的指数增长关系，可用公式（2）表示：

$$N = A \cdot e^{-B \cdot S}, \qquad (2)$$

其中，N 为冰核数浓度（L^{-1}），S 表示过饱和度，A 和 B 为拟合系数。本文分别给出了参数化关系，如表 2 所示。

在低过饱和度条件下，当冰核处于湿度高于冰面过饱和而低于水面过饱和时，活化机制以凝华核化为主。随着过饱和度的增大，在高过饱和度条件下，当湿度高于水面过饱和时，气溶胶主要通过凝结冻结和浸润冻结机制活化为冰晶。根据拟合结果，可以初步推测出，在本文观测条件范围内，凝华核化的冰核所占的比例约为 18.64%。

3.4 冰核与气溶胶的关系

通过图 3 可以看出冰核数浓度受气溶胶的影响。

表 1 公式（1）中大气冰核数浓度与温度关系的拟合参数

Table 1 Parameters of relationship between INP number concentration and temperature in equation (1)

参数化名称	观测地点	A	B	文献来源
Fletcher	澳大利亚	0.00001	06	Fletcher, 1962
Meyers	美国	0.06	0.262	Meyers et al., 1992
Cooper	法国	0.005	0.304	Cooper, 1980
DeMott	全球综合	0.117	0.125	DeMott et al., 2010
Beijing, 1964	北京城区	0.00254	0.389	游来光和石安英, 1964
Beijing, 2002	北京城区	0.034	0.395	游来光等, 2002
Nuist	南京	0.0049	0.388	杨磊等, 2013a
Nuist_HM	黄山	0.0046	0.388	苏航等, 2014
Beijing_YJP	华北山区	0.021	0.293	Bi et al., 2018
Beijing_BMS	北京城区	0.00014	0.546	Bi et al., 2018
Beijing_CFDC	华北山区	0.163	0.225	本文

表 2 公式（2）中大气冰核与过饱和度关系的参数

Table 2 Parameters of relationship between INP number concentration and supersaturation in equation (2)

参数化名称	活化温度	A	B
水面过饱和度（S_w）	−25°C	10.436	0.336
冰面过饱和（S_{ice}）	−25°C	0.007	0.264

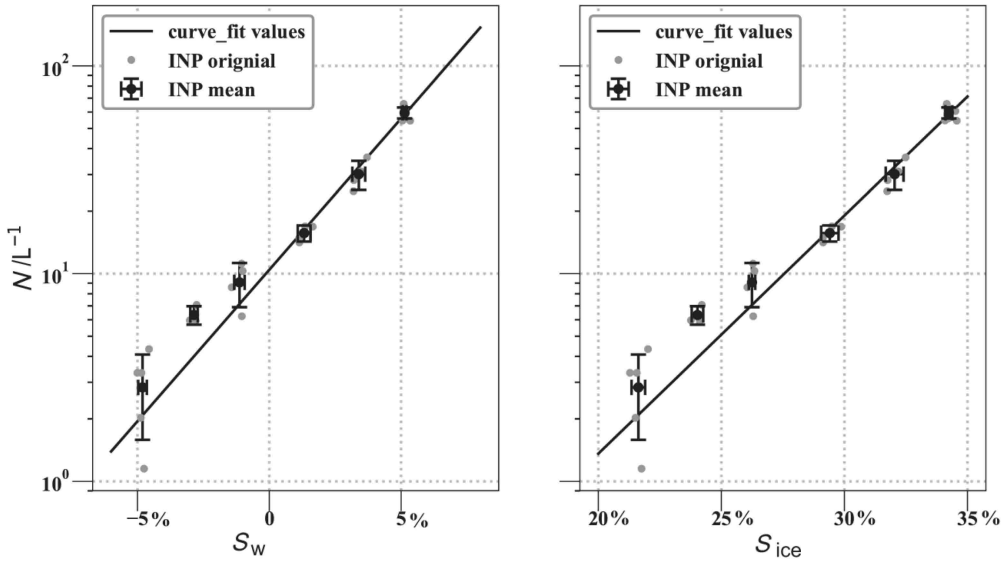

图 6 在−25°C 时冰核数浓度随水面过饱和度和冰面过饱和度的变化（S_w 为相对水面过饱和度，S_{ice} 为相对冰面过饱和度）

Fig. 6 Evolution of INP number concentration with S_w and S_{ice} at −25°C (S_w and S_{ice} are the supersaturations for water and ice respectively)

DeMott 等研究发现冰核数浓度与活化温度以及气溶胶浓度又有很好的相关性，并提出了基于全球平均的参数化公式（DeMott et al., 2010）。本文也建立了基于华北山区的冰核数浓度与气溶胶数浓度以及活化温度三者的参数化公式：

$$N_T = 0.0026 \times (-T)^{2.3816} \times n_{0.5}{}^{(-0.0256 \times T - 0.0250)}, \quad (3)$$

其中，N_T为活化温度为 T 时的冰核数浓度，$n_{0.5}$为粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度。

表 3 为本文得到的综合考虑活化温度和气溶胶进行参数化的公式，并与前人的研究结果进行对比。

本文分别利用表中的不同参数化方案对华北地区的大气冰核进行了计算并与实测值进行了比较。图 7 为不同的参数化计算的冰核观测值和实际值对比图，图 7a–f 分别对应表 3 中的 D10、D15、Jiang_12、Yang_13、Kai_19、Beijing_CFDC 建立的参数化方案。图中实线为 1:1 的线，不同的颜色代表了不同的活化温度，图中圆圈的面积差异代表了粒径大于 0.5 μm 气溶胶的浓度大小差异，气溶胶浓度越大，图中的圆圈面积越大。横轴均为实测值，纵轴为不同的参数化计算结果。从图 7 中可以看出本文建立的参数化方案与实测值最接近，相关系数达到 0.839。对于其他参数化方案，DeMott 的 D10 参数化方案与本文冰核特征最相近，只是在高温段−15°C 时对冰核数浓度有所低估。与黄山地区的参数化方案预测结果差别较大，这一方面与我国南北方的大气气溶胶特征有很大关系，另一方面，与观测方法也有差异，不同设备测量的是不同的核化机制，也有差异。南京和黄山地区使用的是离线分析的新型真空静力扩散云室，主要测量凝华核化机制。适用于南京的 Yang_13 参数化方案整体上低估了冰核数浓度，而 BJ-CFDC 则测量了凝华核化、凝结核化和浸润冻结。本文与同样是使用 CFDC 观测的 D15 参数化相比，高温段低估了冰核数浓度，低温段高估了冰核数浓度。这是由于 D15 的观测结果是基于沙尘气溶胶，沙尘气溶胶在低温下活性很大，而本文观测时段内，没有出现沙尘天气。图 7f 为单独温度建立起的参数化方案计算值与观测结果，相关性仅有 0.644。因此，同时考虑活化温度及粒径大于 0.5 μm 气溶胶浓度的公式更为合理，更接近实际。

3.5　冬季降水天气与冰核的关系

天气过程对大气冰核的影响比较明显。降雨的清除作用能够降低大气冰核的含量（杨磊等，2013a），但降雨后由于微生物的增加也可能导致大气冰核增多（Morris et al., 2014; Hara et al., 2016）。北京春季的一次连续降雨过程则出现了第一次降雨后冰核增加，紧接着的降雨导致冰核数量明显降低的特点（Bi et al., 2019）。

本文对 2018 年 1 月 21 日降雪过程前后的大气冰核变化和气象要素进行了观测分析。图 8 为这次观测时段的降雪滴谱、气溶胶和冰核数浓度特征。此次降水从 1 月 21 日 18:30 分闫家坪观测站开始零星飘雪，19:50 飘雪逐渐加密，以不规则碎冰屑和柱状冰晶为主，22:30 分降雪量达到最大，降雪颗粒逐步转为稳定的板状和六角形，22 日 04 时以后降雪逐渐停止。降雪滴谱仪响应时段为 20 时～04 时。图 8 中可以看出，降雪前和降雪开始阶段空气相对比较污染，达到降雪量最大时，气溶胶也达到最大，随着降水推进，冷空气也跟进，空气团性质改变。01 时后随着风速加大，气溶胶迅速减小。图 8 和 9 中可以看出与降雪前相比，冰核在降雪时明显增加。降雪开始后冰核数浓度增加，可能是由于此时大气中不规则碎冰屑充当了二次冰晶的作用。降雪后期，伴随风力的加大气溶胶降低，降雪结束后冰核明显降低，一方面是降雪对大气冰核有一定的清除作用（Graedel et al., 1975），起始阶段小碎冰晶对冰核的清除作用有限，随着雪型演变到稳定的大尺度板状和六角状，对冰核的清除作用

表 3　大气冰核与温度、气溶胶浓度参数化方案

Table 3　Parameterization scheme of INP with function T and aerosols

参数化名称	参数化公式	与本文数据相关性（Pearson 相关系数）	观测地点	文献来源
D10	$N_T = 0.0000594 \times (-T)^{3.33} \times n_{0.5}{}^{(-0.0264 \times T + 0.0033)}$	0.838	全球多站平均	DeMott et al., 2010
D15	$N_T = n_{0.5}{}^{1.25} \times \mathrm{e}^{(-0.46 \times T - 11.6)}$	0.798	撒哈拉沙漠沙尘	DeMott et al., 2015
Jiang_12	$N_T = 5.607 \times 10^{-12} \times (-T)^{8.721} \times n_{0.5}{}^{(0.019 \times T + 0.579)}$	0.583	黄山	蒋惠等, 2016
Yang_13	$N_T = 2.84 \times 10^{-5} \times (-T)^{2.39} \times n_{0.5\sim10}{}^{(-0.06 \times T - 0.644)}$	0.815	南京	杨磊等, 2013b
Kai_19	公式（3）	0.839	华北山区	本文

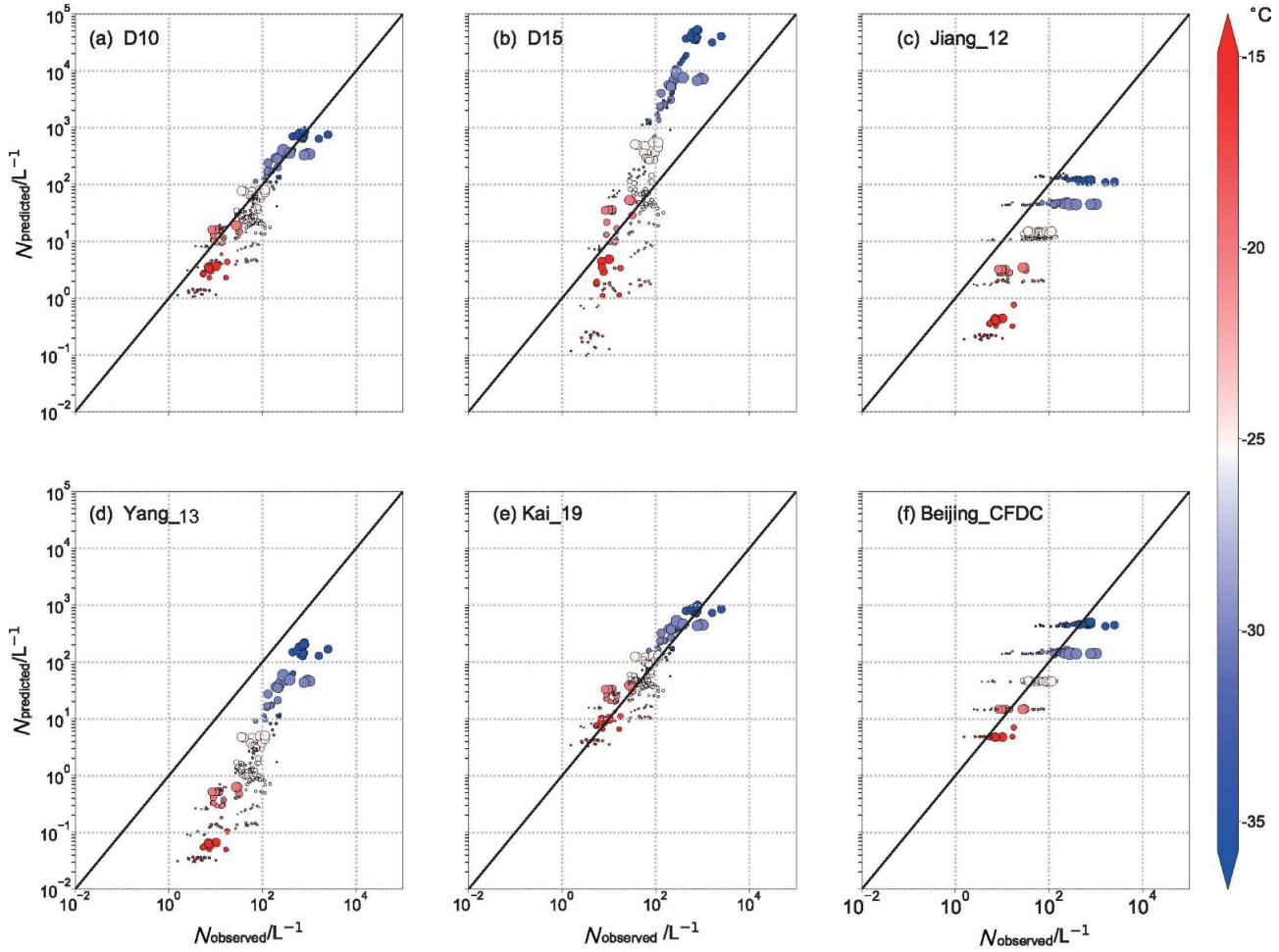

图 7 基于尺度大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度建立起的不同参数化方案的冰核数浓度计算值与观测值的对比图。图中（a–f）分别对应表 3 中的 D10、D15、Jiang_12、Yang_13、Kai_19、Beijing_CFDC 建立的参数化方案。横轴为实测值，纵轴为不同参数化方案的计算值。图中实线为 1:1 相关性直线，不同的颜色代表了不同的活化温度，圆圈的面积差异代表了粒径大于 0.5 μm 气溶胶的浓度大小差异

Fig. 7 Measured INP number concentrations compared with predicted INP number concentrations from previous parameterization based on the particle number concentrations for particle diameters larger than 0.5 μm. (a)–(f) are parameterizations from Table 3 including D10, D15, Jiang_12, Yang_13, Kai_19, and Beijing_CFDC, respectively. The solid line shows 1:1 correlation. The colors in the figure indicate different temperatures. The areas of the circles indicate the relative differences in the particle number concentrations for particle diameters larger than 0.5 μm

加大（Hara et al., 2016）。另一方面，降雪结束后冰核浓度降低，与气溶胶的迅速降低有关，这是由于雪后的大风引起的，系统过境后，冷空气带走气溶胶对空气产生了净化作用。导致气溶胶浓度持续降低，大气冰核也随之减少。这说明华北地区冬季由于风造成的稀释作用大于风造成的输送作用，与黄山地区风的影响特征（苏航等, 2014）相反。

4 结论

本文利用国内首台新型在线连续流量扩散云室（BJ-CFDC）并结合其他气象要素、降水滴谱、气溶胶等观测仪器，在华北地区闫家坪高山综合观测站对 2017 年冬季的大气冰核开展了综合观测研究，分析了大气冰核的特征，讨论了影响因素并进行了参数化研究，得出以下结论：

（1）华北地区冬季大气冰核在活化温度为 −20°C 时数浓度有较大的波动，变化范围为 2.50～76.8 L^{-1}，平均值为每升 18.347 L^{-1}。大气冰核在−15°C、−20°C、−25°C、−30°C、−35°C 时冰核数浓度平均值分别为 6.190±3.625 L^{-1}、18.347±17.043 L^{-1}、51.137±31.200 L^{-1}、138.546±194.618 L^{-1} 和 455.602±437.203 L^{-1}。

（2）华北地区冬季大气冰核随活化温度的降低而呈指数增加趋势，随过饱和度的增加呈指数增

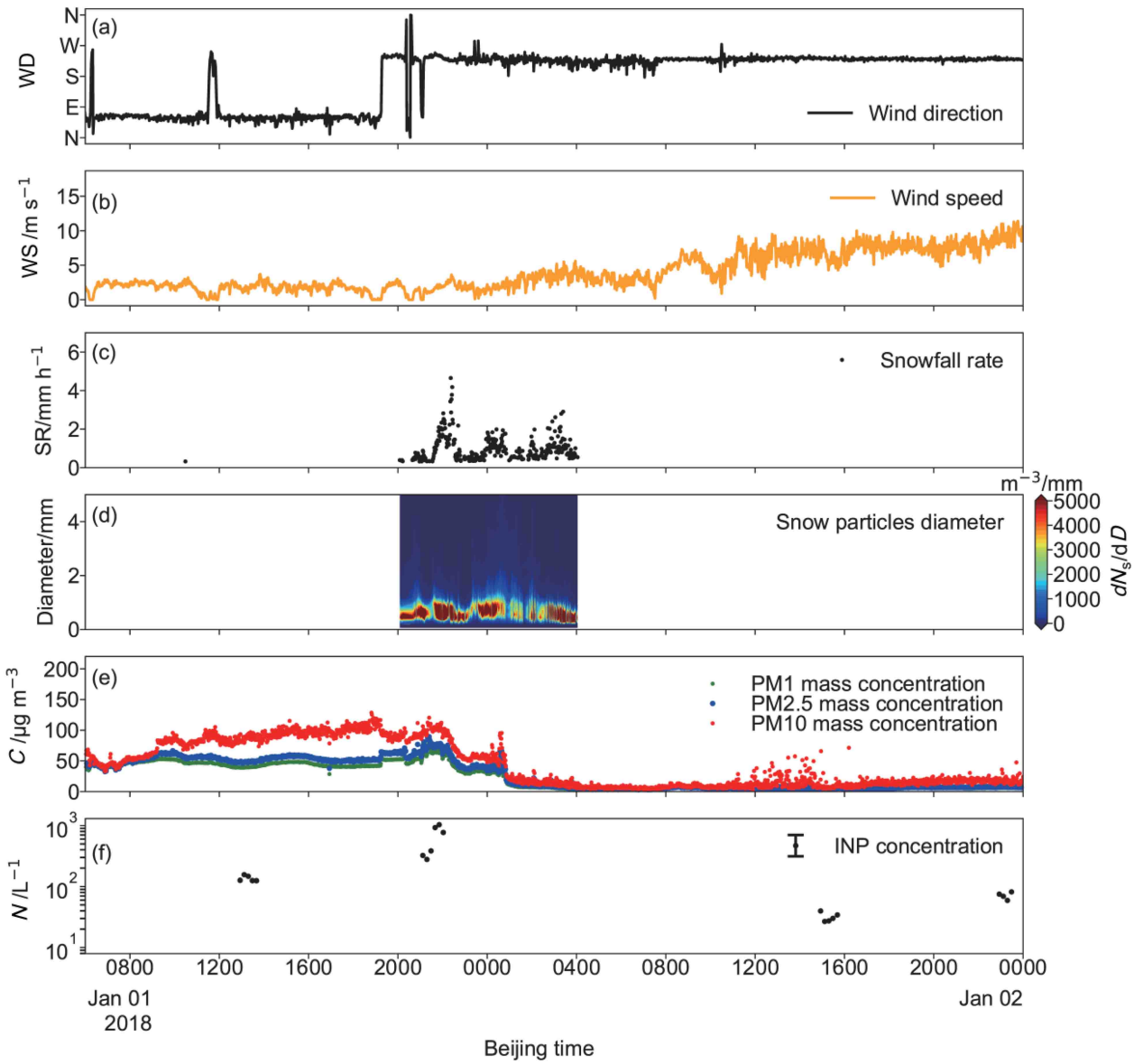

图 8　闫家坪站降雪前后气象要素、气溶胶和冰核数浓度时间序列：（a）风向；（b）风速；（c）降雪量；（d）降雪滴谱（*Ns* 为分档雪粒子数浓度，*D* 为雪粒子直径）；（d）气溶胶质量浓度；（e）0.5 μm 以上气溶胶数浓度；（f）冰核数浓度（−25°C、5% 水面过饱和度）

Fig. 8　Evolution of INP number concentrations with weather elements and aerosols before and after snowfall event at Yanjiaping station: (a) Wind direction; (b) wind speed; (c) snowfall rate; (d) aerosol mass concentration (PM10, PM2.5); (e) aerosol number concentration for particle diameters larger than 0.5 μm; (f) INP concentration activated at −25°C at 5% super saturation of water

加，冰核数浓度与温度的经验公式为：$N = 0.163\times \exp^{-0.225\times T}$，−25°C 时冰核数浓度与水面过饱和度的经验公式为：$N = 10.436\times \exp^{-0.336\times S_w}$，与冰面过饱和度的经验公式为：$N = 0.007\times \exp^{-0.264\times S_{ice}}$。

（3）华北地区大气冰核与粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度相关性大，基于活化温度和粒径大于 0.5 μm 的气溶胶数浓度的参数化公式可表示为：$N_T = 0.0026\times(-T)^{2.3816}\times n_{0.5}^{(-0.0256\times T-0.0250)}$。

（4）降雪过程前后大气冰核具有先增加后减少的特征。降雪开始后大气冰核数浓度增加，降雪后期系统过境伴随的大风，对气溶胶的清洗作用明显，从而造成降雪后大气冰核的明显减少。

致谢　感谢中国气象局华北云降水野外科学试验基地提供所有观测资料，感谢美国 Handix 公司 Gavin 博士和美国科罗拉多州立大学 Ezra 博士对 BJ-CFDC 使用和数据处理方面提供的指导帮助，感谢北京市人工影响天气办公室的刘

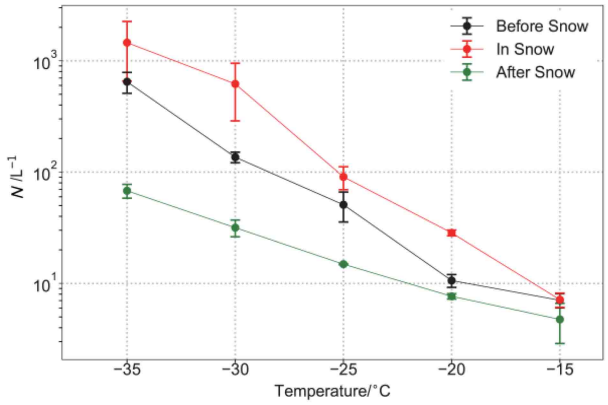

图 9 降雪前、降雪中和降雪后大气冰核在不同温度的数浓度

Fig. 9 INP number concentrations at different temperatures before snowfall, during snowfall event, and after snowfall

全博士在气溶胶资料处理方面提供的帮助，感谢高茜博士和杨燕博士在冰核参数化方面提供的帮助，感谢编辑部老师以及匿名审稿专家对文章提出的宝贵的修改意见。

参考文献（References）

Ansmann A, Tesche M, Althausen D, et al. 2008. Influence of Saharan dust on cloud glaciation in southern morocco during the Saharan mineral dust experiment [J]. J. Geophy. Res. Atmos., 113(D4): D04210. doi:10.1029/2007jd008785

Belosi F, Santachiara G, Prodi F. 2014. Ice-forming nuclei in Antarctica: New and past measurements [J]. Atmos. Res., 145-146: 105−111. doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.030

Bi K, Ma X C, Chen Y B, et al. 2018. The observation of ice-nucleating particles active at temperatures above?15°C and its implication on ice formation in clouds [J]. J. Meteor. Res., 32(5): 734−743. doi:10.1007/s13351-018-7181-z

Bi K, McMeeking G R, Ding D P, et al. 2019. Measurements of ice nucleating particles in Beijing, China [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 124(14): 8065−8075. doi:10.1029/2019JD030609

Bigg E K, Hopwood S C. 1963. Ice nuclei in the Antarctic [J]. J. Atmos. Sci., 20(3): 185−188. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0185:INITA>2.0.CO;2

Bundke U, Bingemer H, Wetter T, et al. 2006. The FINCH (Frankfurt Ice Nuclei counter)—New developments and first measurements [C]. USA, 7th International Aerosol Conference.

Che Y F, Dang J, Fang W, et al. 2019. Measurements of natural ice nucleating particles in Beijing in the spring of 2017 [J]. Atmos. Environ., 200: 170−177. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.020

Chen J, Wu Z J, Augustin-Bauditz S, et al. 2018. Ice-nucleating particle concentrations unaffected by urban air pollution in Beijing, China [J]. Atmos. Chem. Phys., 18(5): 3523−3539. doi:10.5194/acp-18-3523-2018

陈金荣. 1994. 大气冰核浓度的测量及特征 [J]. 气象科学, 14(2): 155−160. Chen Jinrong. 1994. The observation results and its features of the concentration of atmospheric ice nucleus [J]. Scientia Meteor. Sinica (in Chinese), 14(2): 155−160.

陈丽, 银燕. 2009. 沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验 [J]. 气象科学, 30(5): 208−213. Chen Li, Yin Yan. 2009. A sensitivity study of the effect of dust aerosols on the development of ice-phase cloud processes [J]. Scientia Meteor. Sinica (in Chinese), 30(5): 208−213. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2009.02.010

Cooper W A. 1980. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples [C]. Preprints, Eighth International Conference on Cloud Physics. Clermont-Ferrand, France, 665-668.

Cotton W R, Anthes R A. 1989. Storm and Cloud Dynamics [M]. London: Academic Press, 833pp.

DeMott P J, Cziczo D J, Prenni A J, et al. 2003. Measurements of the concentration and composition of nuclei for cirrus formation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100(25): 14655−14660. doi:10.1073/pnas.2532677100

DeMott P J, Prenni A J, Liu X, et al. 2010. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 107(25): 11217−11222. doi:10.1073/pnas.0910818107

DeMott P J, Prenni A J, McMeeking G R, et al. 2015. Integrating laboratory and field data to quantify the immersion freezing ice nucleation activity of mineral dust particles [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(1): 393−409. doi:10.5194/acp-15-393-2015

DeMott P J, Hill T C J, Petters M D, et al. 2017. Comparative measurements of ambient atmospheric concentrations of ice nucleating particles using multiple immersion freezing methods and a continuous flow diffusion chamber [J]. Atmos. Chem. Phys., 17(18): 11227−11245. doi:10.5194/acp-17-11227-2017

鄂大雄, 陈汝珍, 蒋耿旺. 1994. 黄土高原尘沙作为大气冰核的实验研究 [J]. 应用气象学报, 5(2): 129−134. Feng Daxiong, Chen Ruzhen, Jiang Gengwang. 1994. A laboratory study on the role of the loess particles as natural ice nuclei [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 5(2): 129−134.

Fletcher N H, 1962. The Physics of Rainclouds [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 386pp.

Garimella S, Rothenberg D A, Wolf M J, et al. 2017. Uncertainty in counting ice nucleating particles with continuous flow diffusion chambers [J]. Atmos. Chem. Phys., 17(17): 10855−10864. doi:10.5194/acp-17-10855-2017

葛正谟, 周春科. 1986. 兰州市大气冰核的观测 [J]. 高原气象, 5(2): 167−171. Ge Zhengmo, Zhou Chunke. 1986. The observations of atmospheric ice nuclei in Lanzhou [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 5(2): 167−171.

Graedel T E, Franey J P. 1975. Field measurements of submicron aerosol washout by snow [J]. Geophys. Res. Lett., 2(8): 325−328. doi:10.1029/GL002i008p00325

Hara K, Maki T, Kobayashi F, et al. 2016. Variations of ice nuclei concentration induced by rain and snowfall within a local forested site in Japan [J]. Atmos. Environ., 127: 1−5. doi:10.1016/j.atmosenv.

2015.12.009

Hoose C, Möhler O. 2012. Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: A review of results from laboratory experiments [J]. Atmos. Chem. Phys., 12(20): 9817−9854. doi:10.5194/acp-12-9817-2012

蒋惠, 银燕, 高仁杰, 等. 2016. 2012 年秋季黄山地区大气冰核的观测分析 [J]. 科学技术与工程, 16(28): 17−24, 36. Jiang Hui, Yin Yan, Gao Renjie, et al. 2016. The measurement and analysis of atmospheric ice nuclei in Mt.Huangshan in autumn 2012 [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 16(28): 17−24, 36. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2016.28.004

Jiang H, Yin Y, Yang L, et al. 2014. The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at different altitudes in the Huangshan Mountains in Southeast China [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(2): 396−406. doi:10.1007/s00376-013-3048-5

Jiang H, Yin Y, Su H, et al. 2015. The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at the top of Huangshan (the Yellow Mountains) in Southeast China using a newly built static vacuum water vapor diffusion chamber [J]. Atmos. Res., 153: 200−208. doi:10.1016/j.atmosres.2014.08.015

Junge K, Swanson B D. 2008. High-resolution ice nucleation spectra of sea-ice bacteria: Implications for cloud formation and life in frozen environments [J]. Biogeosciences, 5(3): 865−873. doi:10.5194/bg-5-865-2008

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]. Atmospheric Research, 96(2-3): 218−224. doi:10.1016/j.atmosres.2009.08.002

李娟, 黄庚. 2001. 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. 2001. Analysis of observational results of content of ice nuclei in the atmosphere in the upper reaches of Huanghe River [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 27(11): 8−12. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2001.11.002

李娟, 毛节泰. 2006. [J]. 气象, 32(2): 9−13. Li Juan, Mao Jietai. 2006. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 32(2): 9−13. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.02.002

Li L G, Zhou D P, Wang Y F, et al. 2017. An observational study of atmospheric ice nuclei number concentration during three fog-haze weather periods in Shenyang, northeastern China [J]. Atmos. Res., 188: 11−19. doi:10.1016/j.atmosres.2016.12.014

李泽宇, 孙继明, 牛生杰. 2016. 沙尘冰核对积云起电过程影响的初步数值模拟试验 [J]. 气候与环境研究, 21(1): 107−120. Li Zeyu, Sun Jiming, Niu Shengjie. 2016. Preliminary modelling for the effects of dust on the cumulus electrification process [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 21(1): 107−120. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15115

Lohmann U, Kärcher B, Hendricks J. 2004. Sensitivity studies of cirrus clouds formed by heterogeneous freezing in the ECHAM GCM [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 109(D16): D16204. doi:10.1029/2003JD004443

Lohmann U, Stier P, Hoose C, et al. 2007. Cloud microphysics and aerosol indirect effects in the global climate model ECHAM5-HAM [J]. Atmos. Chem. Phys., 7(13): 3425−3446. doi:10.5194/acp-7-3425-2007

马新成, 游来光, 王广河. 2002. 青海省河南县 2002 年秋季大气冰核观测的分析研究 [J]. 气象学报, 28(S1): 22−27. Ma Xincheng, You Laiguang, Wang Guanghe. 2002. Analysis study on atmospheric ice nucleis in spring 2002 in Henan, Qinghai Province [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 28(S1): 22−27.

Ma X C, Bi K, Chen Y B, et al. 2017. Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of northern Beijing [J]. Adv. Meteor., 2017: 3536107. doi:10.1155/2017/3536107

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. doi:10.1175/1520-0450(1992)031<0708:NPINPI>2.0.CO;2

Morris C E, Conen F, Huffman J A, et al. 2014. Bioprecipitation: A feedback cycle linking earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere [J]. Glob. Change Biol., 20(2): 341−351. doi:10.1111/gcb.12447

Murray B J, O'Sullivan D, Atkinson J D, et al. 2012. Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets [J]. Chem. Soc. Rev., 41(19): 6519−6554. doi:10.1039/C2CS35200A

牛生杰, 安夏兰, 陈跃, 等. 2000. 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): 294−297. Niu Shengjie, An Xialan, Chen Yao, et al. 2000. Measurements and analysis of concentrations of atmospheric ice nuclei in the Helanshan area [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 23(2): 294−297. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2000.02.021

Patade S, Nagare B, Wagh S, et al. 2014. Deposition ice nuclei observations over the Indian region during CAIPEEX [J]. Atmos. Res., 149: 300−314. doi:10.1016/j.atmosres.2014.07.001

Phillips V T J, DeMott P J, Andronache C. 2008. An empirical parameterization of heterogeneous ice nucleation for multiple chemical species of aerosol [J]. J. Atmos. Sci., 65(9): 2757−2783. doi:10.1175/2007JAS2546.1

Plaude N O, Vychuzhanina M V. 2000. Aerosol particle size distribution, the total number and ice nuclei concentrations in Moscow region [J]. AIP Conf. Proc., 534(1): 463−466. doi:10.1063/1.1361907

Richardson M S, DeMott P J, Kreidenweis S M, et al. 2007. Measurements of heterogeneous ice nuclei in the western United States in springtime and their relation to aerosol characteristics [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 112(D2): D02209. doi:10.1029/2006JD007500

Rogers D C. 1988. Development of a continuous flow thermal gradient diffusion chamber for ice nucleation studies [J]. Atmos. Res., 22: 149−181. doi:10.1016/0169-8095(88)90005-1

Rogers D C, DeMott P J, Kreidenweis S M, et al. 2001. A continuous-flow diffusion chamber for airborne measurements of ice nuclei [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18(5): 725−741. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<0725:ACFDCF>2.0.CO;2

Santachiara G, Di Matteo L, Prodi F, et al. 2010. Atmospheric particles

acting as Ice Forming Nuclei in different size ranges [J]. Atmos. Res., 96(2-3): 266−272. doi:10.1016/j.atmosres.2009.08.004

Schill G P, Jathar S H, Kodros J K, et al. 2016. Ice-nucleating particle emissions from photochemically aged diesel and biodiesel exhaust [J]. Geophys. Res. Lett., 43(10): 5524−5531. doi:10.1002/2016GL069529

沈新勇, 梅海霞, 王卫国, 等. 2015. 双参数微物理方案的冰相过程模拟及冰核数浓度的影响试验 [J]. 大气科学, 39(1): 83−99. Shen Xinyong, Mei Haixia, Wang Weiguo, et al. 2015. Numerical simulation of ice-phase processes using a double-moment microphysical scheme and a sensitivity test of ice nuclei concentration [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(1): 83−99. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13310

石安英, 樊慧新, 丛澜, 等. 1982. “三七”炮弹聚能分散碘化银成冰核效率的试验研究 [J]. 大气科学, 6(3): 315−323. Shi Anying, Fan Hueixin, Cong Lan, et al. 1982. A study on the ice nucleus generating efficiency by “37 model silver iodide shell” possessing aggregative energy [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 6(3): 315−323. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.03.11

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. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.02.016

Stevenson C M. 1969. An improved Millipore filter technique for measuring the concentrations of freezing nuclei in the atmosphere [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 95(403): 203−204. doi:10.1002/qj.49709540316

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. 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12211

苏正军, 郑国光, 关立友. 2010. 人工冰核的核化速率实验 [J]. 气象, 36(11): 46−49. Su Zhengjun, Zheng Guoguang, Guan Liyou. 2010. Experimental study on nucleation rate of artificial ice nuclei [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(11): 46−49. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.11.007

Vali G, DeMott P J, Möhler O, et al. 2015. Technical note: A proposal for ice nucleation terminology [J]. Atmos. Chem. Phys., 15(18): 10263−10270. doi:10.5194/acp-15-10263-2015

Wang B B, Knopf D A, China S, et al. 2016. Direct observation of ice nucleation events on individual atmospheric particles [J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 18(43): 29721−29731. doi:10.1039/C6CP05253C

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, 35(3): 273−279. Wang Xuelin, Zhang Wanjun, Xiong Shangqing. 1965. Ice nuclei measurements in spring in Baicheng area [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 35(3): 273−279.

王雨, 银燕, 陈倩, 等. 2017. 沙尘气溶胶作为冰核对阿克苏地区一次多单体型强对流风暴降水及其微物理过程影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 41(1): 15−29. Wang Yu, Yin Yan, Chen Qian, et al. 2017. A numerical study of the effect of aerosols acting as ice nuclei on the precipitation and microphysical processes in a multi-size convective storm occurring in Aksu in Xinjiang, Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(1): 15−29. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.15246

吴明林, 刘峻, 黄文娟, 等. 1986. 福建石塔山大气冰核的观测和分析 [J]. 热带气象, 2(1): 71−78. Wu Minglin, Liu Jun, Huang Wenjuan, et al. 1986. The measurement and analysis of atmospheric ice-nucleus concentration on Fujian Shita mountain [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 2(1): 71−78.

肖辉, 杨慧玲, 洪延超, 等. 2012. 大气冰核谱分布对对流风暴云人工催化影响的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17(6): 833−847. Xiao Hui, Yang Huiling, Hong Yanchao, et al. 2012. Numerical simulation of the impacts of ice nucleus spectra on cloud seeding effects in convective storm clouds [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 17(6): 833−847. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.20

杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 2013a. 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. 2013a. Measurement and analysis of atmospheric ice nuclei in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 579−594. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11242

杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 2013b. 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. 2013b. Characteristics of atmospheric ice nuclei and its relationship to aerosols in winter in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 983−993. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12098

游来光. 1976. 大气中的冰核 [J]. 气象, 2(11): 29−32. You Laiguang. 1976. Ice nuclei in atmosphere [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 2(11): 29−32. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1976.11.018

游来光, 石安英. 1964. 北京地区 1963 年春季冰核数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 number concentration at Peking during the period from march 18th to April 30th in 1963 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 34(4): 548−554.

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, 60(1): 101−109. You Laiguang, Yang Shaozhong, Wang Xiangguo, et al. 2002. Study of ice nuclei concentration at Beijing in spring of 1995 and 1996 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60(1): 101−109. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2002.01.012

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 Jianxin, Liao Feijia, Gao Ziyi, et al. 2006. Study on atmospheric ice nuclei on north slop of Mid-Tianshan Mountains in summer [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 25(1): 138−142. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.01.019

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, 35(4): 416−422.　Zhao Jianping, Zhang Mi, Wang Yuxi, et al. 1965. Analysis of atmospheric ice nuclei in North China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 35(4): 416−422.

周德平, 洪也, 王扬锋, 等. 2012a. 沈阳春夏季大气冰核浓度的观测研究 [J]. 气候与环境研究, 17(6): 719−726.　Zhou Deping, Hong Ye, Wang Yangfeng, et al. 2012. An observational study of atmospheric ice nuclei concentration in spring and summer in Shenyang [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 17(6): 719−726. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.09

周德平, 李炳昆, 陈光, 等. 2012b. 用 5L 混合云室观测抚顺市大气冰核浓度 [J]. 气象与环境学报, 28(6): 44−49.　Zhou Deping, Li Bingkun, Chen Guang, et al. 2012b. Study of atmospheric ice nuclei concentration using 5 L mixing cloud chamber in Fushun, Liaoning Province [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 28(6): 44−49.

周德平, 苏航, 耿树江, 等. 2018. 辽沈地区不同高度大气冰核数浓度的飞机观测 [J]. 气象与环境学报, 34(6): 133−139.　Zhou Deping, Su Hang, Geng Shujiang, et al. 2018. Aircraft observation of atmospheric ice nuclei concentration in Liaoning and Shenyang regions [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 34(6): 133−139. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2018.06.016