

周德平, 洪也, 王扬锋, 等. 2012. 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.09.
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 and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 719–726.

沈阳春夏季大气冰核浓度的观测研究

周德平 洪也 王扬锋 刘宁微 张云海 李丽光

中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

摘 要 为了解沈阳地区大气冰核浓度的时空分布状况, 2010 年起开始对沈阳地区的大气冰核浓度分布进行观测和研究。地面采用 Bigg 型混合云室法和滤膜法进行冰核气溶胶的采样测量, 高空利用辽宁省人工影响天气办公室租用的人工增雨飞机进行滤膜法采样。采样滤膜的处理都是统一在活化温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及冰面过饱和度 20%、水面过饱和度 3% 的湿度条件下进行的。根据取得的部分观测资料, 给出了沈阳春夏季大气冰核的浓度及冰核温度谱分布参数, 分析了冰核浓度在 3~6 月各月以及在不同天气状况下的分布特征, 初步给出了大气冰核浓度的尺度谱分布及其随高度的变化。

关键词 沈阳 大气冰核 Bigg 型混合云室 滤膜采样

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0719-08

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.09

An Observational Study of Atmospheric Ice Nuclei Concentration in Spring and Summer in Shenyang

ZHOU Deping, HONG Ye, WANG Yangfeng, LIU Ningwei, ZHANG Yunhai, and LI Liguang

Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016

Abstract Observation and research on the distribution of atmospheric ice nuclei (IN) concentration was started in 2010, in order to understand the temporal and spatial distributions of IN concentrations in Shenyang area. Ground measurement was made by Bigg mixing chamber and sampling of IN aerosols was done by membrane filter method. Airborne IN measurements were made on the artificial precipitation aeroplane Y-12 which being lended by Wheather Modification Office of Liaoning Province during April–September 2011. Sampling membrane filter processing conditions is unified in the activation temperature about $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and from ice saturation to 3% water supersaturation. According to some of the observation data, IN concentration and its temperature distribution parameters in spring and summer in Shenyang is given. The monthly variation of IN concentrations from March–June and the distribution characteristics in different weather conditions are analyzed. And the changes of IN concentration with particle size and height are given primiparously.

Keywords Shenyang, Atmospheric ice nuclei, Bigg mixing chamber, Membrane filter sampling

1 引言

大气中的冰核 (IN) 主要来源于自然过程和人

类活动。IN 是一种非吸湿性气溶胶, 它可以通过参加云中的微物理过程使冷云中的初始冰晶浓度产生变化, 从而影响整个冰水转化过程, 使云的宏观结构随之改变, 进而影响大气的辐射过程 (Vali,

收稿日期 2012-08-30 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40975084

作者简介 周德平, 女, 1962 年出生, 研究员, 主要从事大气物理和大气环境研究。E-mail: yanqizhou234@163.com

1991; Zeng et al., 2009)。因此, IN在各种天气过程中的影响具有重要作用, 其辐射强迫的变化是影响全球气候和辐射平衡最不确定的因子之一 (Stephens et al., 1990; Wylie et al., 1994)。观测研究冰核气溶胶的浓度和分布对于云降水物理过程、人工影响天气、气候效应以及全球变化等大气和气候方面的研究意义重大。

尽管如此, 由于 IN 观测的可比较性差, 观测中模拟冰核活化的程序复杂, 冰核的观测研究相对较少 (游来光等, 2002)。我国自 20 世纪 60 年代以来, 先后在北京 (游来光和石安英, 1964; 游来光等, 2002; 杨绍忠等, 2004)、白城 (汪学林等, 1965)、兰州、西安和大连 (赵剑平等, 1965)、贺兰山 (牛生杰等, 2000)、新疆 (李艳伟和杜秉玉, 2003; 张建新等, 2006)、甘肃 (葛正谟和周春科, 1986; 李娟和黄庚, 2001)、青海 (李淑日等, 2003; 石爱丽等, 2006) 等地区用多种方法进行过 IN 的观测研究。得到的初步结果表明: IN 浓度的变化具有明显的地区特点, 并且与天气过程、天气现象有密切的联系 (赵剑平等, 1965); 除自然条件差异外, 人类活动和社会发展对 IN 浓度的变化也可能有重要影响 (杨绍忠等, 1995; 游来光等, 2002); 冰核浓度随高度增加基本呈减少趋势 (牛生杰等, 2000)。沈阳地区作为东北三省经济、文化中心的, 这项工作却一直未能开展, 在许多自然冷云降水研究和人工影响天气作业中, 缺乏对自然冰核浓度及其时空分布状况的了解。为此, 自 2010 年春季开始, 在沈阳地区开展了对 IN 浓度分布的全面观测和研究。本文是其中部分观测结果的初步总结。

2 采样观测方法与数据处理

目前国际上对 IN 的检测主要有混合云室法和扩散云室法 (也称滤膜法)。这两种方法各有其自身的优缺点。滤膜法取样简单, 可以在地面或飞机上进行, 再在扩散云室里进行处理, 得到的是凝华核或凝华-冻结核的数浓度; 混合云室法是在形成过冷水雾的云室内送入冰核, 检测形成的冰晶数目, 更接近于自然云中的冰晶形成过程, 得到的基本是所有类型冰核的总数。本研究对冰核的测量在空中采用滤膜法, 在地面则同时采用滤膜法和混合云室法, 这样既可以便于空地观测资料的对比, 也便于与国内外已有的观测结果进行比较。

地面的冰核采样点设置在东北区域气象中心大楼楼顶平台上。平台位置较高距地面约 50 m, 周围没有障碍物影响采样, 所有采样器的大气入口高度距平台地面约 1.5 m, 故采得的样品可以代表周边一定区域内 IN 气溶胶的平均状况。采样观测程序与数据处理与游来光等 (2002) 所用的方法相同, 即利用混合云室观测冰核浓度, 采用内差或外延的方法计算不同温度下的冰核浓度。同时采用逐次拟合冰核浓度温度谱的方法求取冰核活性谱参数。区别在于本观测采样的混合云室 (即 Bigg 型冰核计数器) 已经过杨绍忠等 (1995) 的进一步改进 (周德平等, 2012), 云室有效体积为 7.42 L, 观测计量体积为 5.38 L; 观测的最低检测浓度为 0.186 L^{-1} , 观测一组不同温度下的冰核数据约需 4~8 h。滤膜法采样时所用气泵为中流量空气采样器, 平均流速约 40 L/min, 故每组样本的采样时间根据当时的空气质量状况分别为 30、40、60、90 和 120 s。另外, 为了解不同尺度大小气溶胶粒子的冰核活性及其成冰性能, 还在地面采样点用 Anderson 分级气溶胶采样器进行了滤膜采样。FA-3 型 9 级撞击式气溶胶采样器, 瞬时流量为 28.3 L/min, 故采集一组样本约需 8~12 h。

空中采样是以辽宁省人工影响天气办公室的人工增雨作业飞机 (Y-12) 为平台, 采样进气管道从机舱底部伸出, 利用滤膜进行采样, 与地面滤膜法采样的方法和程序一致, 鉴于空中冰核浓度较低, 故每组样本的采样时间根据取样高度不同一般为 5~15 min 之间。

地面和空中采样所用的滤膜、采样后滤膜的活化处理程序以及进行冰核活化显示处理的扩散云室均与杨绍忠等 (1995) 所用方法相同。在预定温度、湿度条件下, 扩散云室中同时处理一次获得的 4 片滤膜。显现处理后, 将得到的 4 片滤膜的冰晶数求平均, 以平均值作为一个数据记录。本文中采样滤膜统一在活化温度 -15°C 、冰面过饱和度 20%、水面过饱和度 3% 的湿度条件下集中处理。由于滤膜法采集的样本较多, 而且处理时周期比较长, 对实验室的环境条件要求比较高, 所以活化处理需要分批进行。

3 结果与分析

游来光等 (2002) 观测发现, 采用不同观测

方法影响冰核活化条件，观测结果差异巨大。但不同观测方法观测的冰核浓度具有相同的逐日变化趋势，观测结果相互间有明显的正相关。文中未标注或说明的数据均为混合云室的采样观测结果。

3.1 地面 IN 浓度的分布特征

2011 年 3 月 21 日至 7 月 2 日间用混合云室法观测，取得有效观测资料 30 d 共 147 组，其中晴天 17 d、阴天 4 d、雨天 6 d、沙尘暴 1 d。表 1 列出了 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3 个活化温度下的冰核浓度值，图 1 中 -25 、 -20 、 -15 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰核浓度是由该温度附近两相邻温度下的观测结果取对数内插或外延得到的。由表 1 和图 1 可见，沈阳春夏季地面的平均冰核浓度约 100 L^{-1} ，冰核浓度的日际变化很大，最大浓度差值可达 1~2 个数量级。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活化温度下，最大浓度值 478.0 L^{-1} 出现在 6 月 9 日阴雨天，最小浓度值 5.6 L^{-1} 出

现在 3 月 25 日晴天。3~6 月各月平均值依次为 37.82 L^{-1} 、 58.36 L^{-1} 、 101.30 L^{-1} 和 233.85 L^{-1} ；观测期间总平均值 99.53 L^{-1} 。与国内同类观测结果比较，本次观测得到的沈阳春夏季的 IN 浓度同北京 1995 年和 1996 年（游来光等，2002）的结果相近，显著高于青海高原地区 2001~2003 年的观测结果（石爱丽等，2006），尤其是低温段（ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下）的冰核浓度约高一个数量级，高温段（ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的冰核浓度则与 2003 年的结果相差不大。

在现有冰核观测中，冰核浓度的季节变化研究结果相对较少。中国青海（赵仕雄等，2000）和莫斯科（Plaude and Vychuzhanina, 2000）均观测到春季冰核浓度高于冬季。本试验统计发现，在不同月份 IN 浓度的平均值有明显的差异。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，3 月浓度最小，6 月浓度最大，两者相差 6 倍多（表 1）。5 月受沙尘天气的影响，低温段冰核浓度的最小值

表 1 不同活化温度下的冰核浓度

Table 1 The ice nuclei (IN) concentration at three activity temperatures L^{-1}

观测时间	$-25\text{ }^{\circ}\text{C}$			$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$			$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
3 月 21~31 日	1384.33	17.02	281.53	135.64	5.56	37.82	13.29	0.36	7.23
4 月 1~30 日	1506.10	52.54	312.77	138.49	18.77	58.36	50.56	5.16	16.17
5 月 5~29 日	780.31	337.38	556.87	153.86	57.99	101.30	39.67	9.97	19.71
6 月 1~23 日	2820.33	70.24	1114.24	478.00	42.43	233.85	81.01	20.76	52.40
7 月 2 日			207.34			78.13			29.44
3 月 21 日至 7 月 2 日	2820.33	17.02	519.44	478.00	5.56	99.53	81.01	0.36	22.86

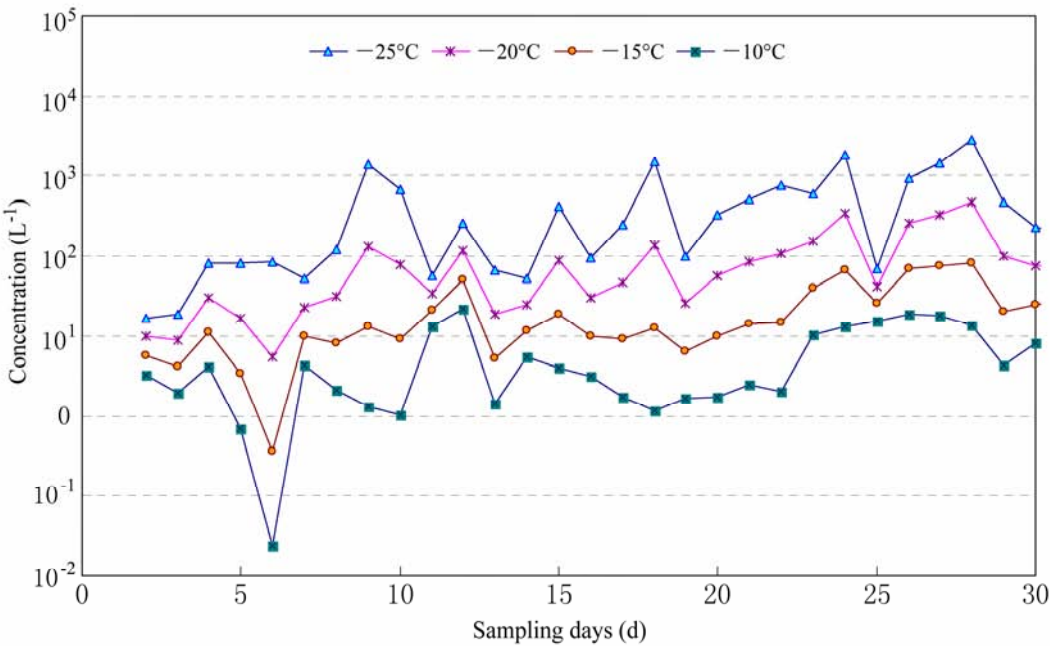


图1 2011年3月21日至7月2日沈阳地面大气冰核浓度的日均变化特征
Fig. 1 The daily variations of the concentration of atmospheric ice nuclei at earth surface in Shenyang during 21 Mar–2 Jul 2011

明显大于其他月份。图 2 是春季和夏季晴天的冰核谱, 可见两条谱线基本平行, 但夏季 IN 浓度明显大于春季。

3.2 IN 浓度的温度谱分布特征

由图 1 可以看出, IN 浓度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最多可相差 3 个数量级 (在充分满足水汽供应的前提下)。IN 浓度随活化温度的降低近似地呈指数增加这一性质 (游来光和石安英, 1964; Zimmermann et al., 2007) 在本观测中进一步得到证实, 可以表示为

$$N(T)=N_0\exp(-BT),$$

其中, N 代表过冷却温度小于 T 时单位体积内核化冰核数, N_0 和 B 为参数。表 2 列出了观测期间地面 IN 最高活化温度 and 不同观测时段冰核的温度谱参数。可见沈阳地区地面 IN 浓度值较高, 与北京 1995 年的观测结果 (游来光等, 2002) 相近。而且, 在观测期间除 3 月外, 4~7 月高温核比较多见。统计发现, 有 17 d 观测到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温核, 占观测日数的 56.7%。特别地, 在 6 月 8 日下午观测到了浓度为 1.12 L^{-1} 的生物冰核 (活化温度

$-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

由图 3 可见, 沙尘天冰核浓度明显高于非沙尘天, 尤其在低温段表现更为突出。在低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温段 IN 浓度, 沙尘天最高, 其次是阴雨天, 晴天最低, 最多相差一个数量级; 而在高于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温段 IN 浓度, 阴天最高, 其次是沙尘天和晴天, 雨天最低。而冰核浓度随温度降低而增加的分布在沙尘天斜率最大, 其次是雨天, 阴天最低。

3.3 IN 浓度的尺度谱分布特征

为了解不同尺度大小气溶胶粒子的冰核活性及其成冰性能, 观测期间我们还在地面采样点用 Anderson 分级气溶胶采样器进行了滤膜采样。共取得了 11 组 99 份 $0\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 尺度的冰核粒子浓度观测资料, 将 4 组采样时间在沙尘天的数据结果除外 (沙尘天冰核浓度观测结果将另文讨论), 其余 7 组数据按不同粒径大小取平均后, 其尺度谱分布结果绘于图 4。由图 4 可见, 粒径大于 $4.7\text{ }\mu\text{m}$ 的冰核浓度大约都超过 20 L^{-1} , 而粒径小于 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 的冰核浓度大约都不超过 5 L^{-1} ; 冰核浓度基本随着粒子直

表 2 IN 浓度的温度谱及观测到的最高活化温度

Table 2 The temperature spectra and the maximum activity temperature of atmospheric ice nuclei

观测时段	温度谱			最高活化温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最高活化温度观测环境		
	$N_0\text{ (L}^{-1}\text{)}$	$B\text{ (}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)}$	相关系数		日期	时间 (北京时间)	天气状况
3 月 21~31 日	0.0416	0.3572	0.994	-12.6	3 月 30 日	15:56	晴
4 月 1~30 日	0.2131	0.2989	0.990	-5.1	4 月 21 日	12:06	阴转小雨
5 月 5~29 日	0.1361	0.3339	1.000	-5.6	5 月 29 日	15:50	晴
6 月 1~23 日	0.4489	0.3325	0.999	-3.0	6 月 8 日	15:15	阵雨转阴
7 月 2 日	1.5752	0.1952	0.972	-8.9	7 月 2 日	13:55	小雨转阴

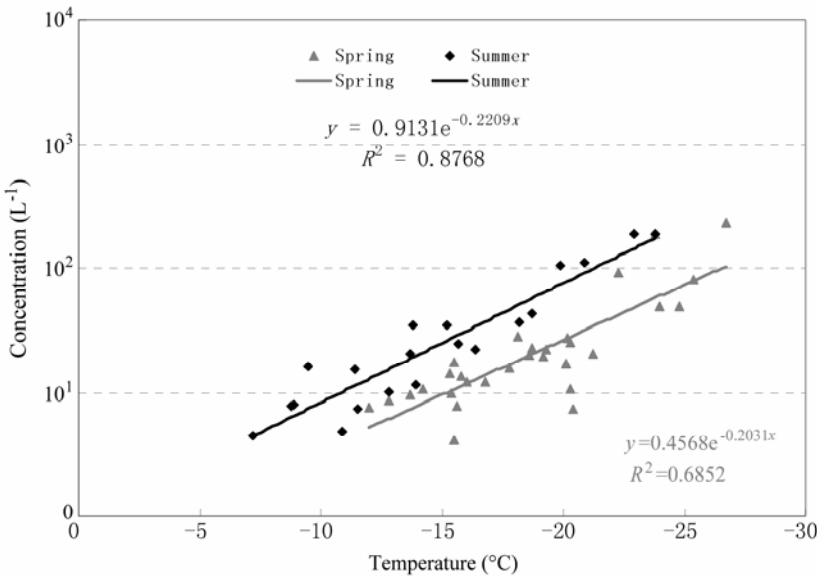


图2 春季和夏季晴天 IN 浓度谱

Fig. 2 The spectras of IN concentration during fine days in spring and summer

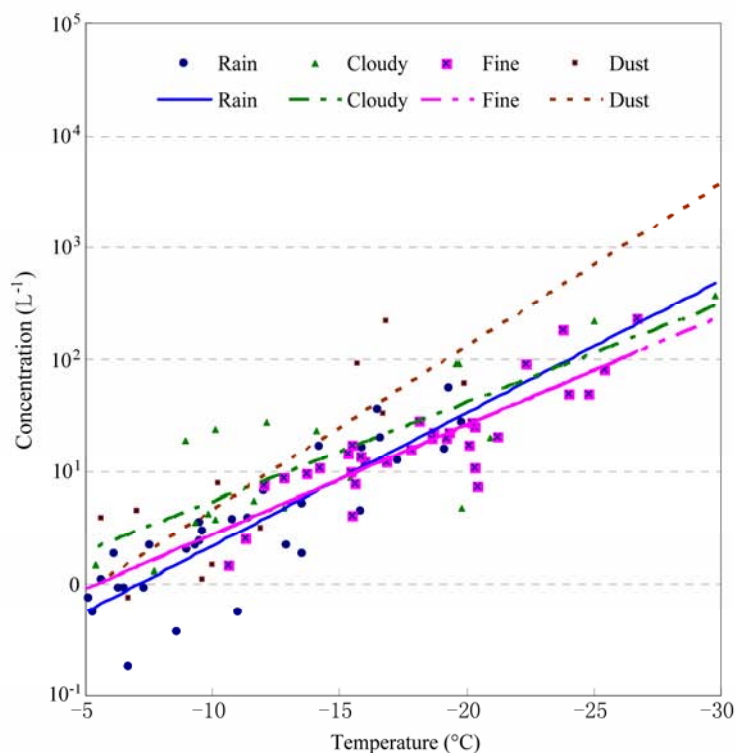


图3 春季雨天、阴天、晴天、沙尘天的 IN 浓度谱

Fig. 3 The spectras of IN concentration during rain days, cloudy days, fine days, and dust days in spring

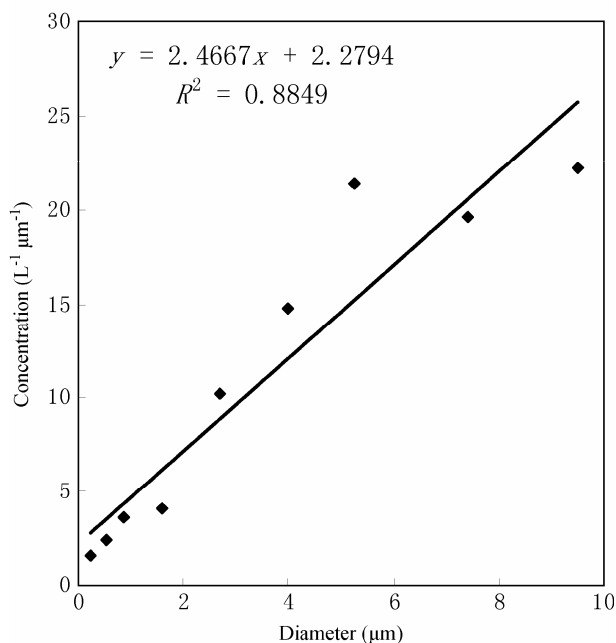


图4 春季大气冰核浓度的尺度谱变化

Fig. 4 Scale spectra variation of atmospheric IN concentration in spring

径增大而增加，近似服从直线关系式：

$$N(D)=2.4667 D+2.2794,$$

相关系数为 0.9407，说明在同一温湿度条件下，大一些的粒子更容易活化成为冰核。

3.4 IN 浓度的垂直分布特征

2011 年 4~9 月利用人工增雨飞机进行了空中 IN 的采样观测，春季采集了 4 架次（4 月 1 日、21 日、29 日和 5 月 18 日）24 组 96 份样本。采样观测最大高度 4.2 km，飞行区域均在辽宁境内。除 4 月 1 日是晴天外，其余 3 日均为阴雨天并同时实施了人工增雨作业，故采样基本都在云中进行。探测中曾经观测到空中 3.3 km 高度的冰核浓度最大达 7.640 L^{-1} （可能受到了人工催化的影响），最小浓度 0.195 L^{-1} 。

图 5 是 4 架次观测到 IN 浓度随高度分布的散点图，可见，冰核浓度随高度增加基本呈递减趋势。用幂指数曲线拟合得到冰核浓度 C 与高度 H 的近似关系式：

$$C=1.7638H^{-0.7503},$$

相关系数为 0.7754。

4 结论与讨论

根据 2010 年和 2011 年对沈阳 IN 浓度的测量，选取了 3~7 月（春、夏季）间的部分观测数据进行分析，初步得到以下几点结论。

4.1 混合云室法观测结果

（1）2011 年春夏季沈阳地区 IN 的浓度变化

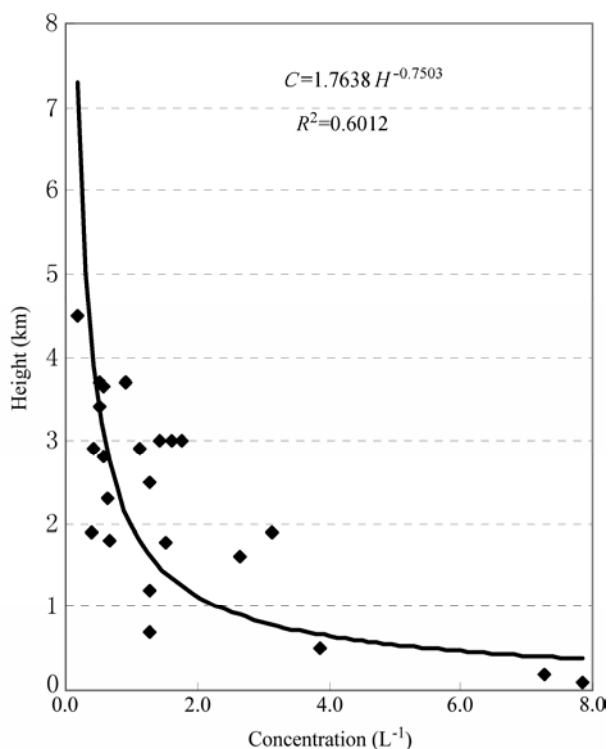


图5 冰核浓度随高度的分布

Fig. 5 The variation of IN concentration with the altitude

幅度较大, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 IN 浓度在 $5.6\sim 478.0\text{ L}^{-1}$ 之间, 最大浓度出现在 6 月的阴雨天, 最小浓度出现在 3 月的晴天; 总平均值 99.5 L^{-1} 。将这一测量结果与国内近 20 年的观测结果相比较, 略高于北京 1995 年和 1996 年的平均值 (游来光等, 2002); 低温段 ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下) 的 IN 浓度比青海高原地区 2001~2003 年的观测结果 (石爱丽等, 2006) 约高一个数量级, 高温段 ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的 IN 浓度与其 2003 年的结果相差不大。与国外结果比较, 接近欧洲或美国 20 世纪 50 年代城市污染地区条件下的冰核浓度值 (Perez et al., 1985), 表明沈阳地区 IN 浓度受人类活动影响显著。

(2) 沈阳春夏季 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温核 (即高活性冰核) 比较多见, 特别是在夏季雨后观测到了活化温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰核。这类冰核大多来源于腐蚀的植物叶片、昆虫尸体以及具有冰核活性的细菌等 (Vali et al., 1976; Schnell, 1977; Szyrmer and Zawadzki, 1997)。

沙尘天冰核浓度明显高于非沙尘天, 尤其是低温核 (即低活性冰核) 表现更为突出。这说明作为 IN 主要来源的土壤 (鄧大雄等, 1994) 其成冰活性较低。高活性冰核浓度较高时一般都出现在阴天, 李娟和黄庚 (2001) 在黄河上游观测到的结果显示,

晴天与阴天相比, IN 浓度差别不大。沈阳春季的观测结果是: 晴天与阴天比较, 低活性核的浓度差异不大, 而高活性核的差异较明显, 阴天的高活性核浓度较晴天、雨天和沙尘天都高。这也说明 IN 的存在与云的形成有密切关系, 而在雨后高活性冰核浓度最低, 显然是由于降水冲刷使 IN 浓度衰减的缘故。

(3) 沈阳夏季 IN 浓度明显高于春季。3~6 月中, 6 月的 IN 浓度最大, 3 月浓度最小。尽管 5 月受沙尘天气影响, 其低活性核浓度较大, 但总体平均浓度却仅为 6 月平均的 1/2 左右。究其原因, 发现沈阳春夏季的 IN 浓度与风向有密切的关系。一般在没有降水的情况下, 高 IN 浓度常对应西南风, 而地面为东北风时, 测量到的 IN 浓度都比较低。

4.2 滤膜法观测结果

(1) 冰核浓度基本随着粒子直径增大而增加, 近似服从直线关系式:

$$N(D)=2.4667 D+2.2794,$$

相关系数为 0.9407。这说明在同一温湿度条件下, 大一些的粒子更容易活化成为冰核。这一结果与 Berezinskiy and Stepanov(1986)、DeMott et al.(2003) 研究结果相一致, 即冰核活性会随着粒子表面积的增加而增加。

(2) 在海拔 3.3 km 高度的空中, 最大 IN 浓度达 7.640 L^{-1} (可能受到了人工催化的影响), 最小 IN 浓度 0.195 L^{-1} 。这与牛生杰等 (2000) 在贺兰山观测到的结果相近。冰核浓度随高度增加基本呈递减趋势, 其近似关系式为

$$C=1.7638H^{-0.7503},$$

相关系数为 0.7754。

以上结果都是初步的, 游来光等 (2002) 观测发现, 不同观测方法影响冰核活化条件, 观测结果差异巨大。混合云室法测量自然冰核时, 采样空气中的各种气溶胶粒子经历突然降温然后通雾, 此时其湿度环境就有一个从冰面欠饱和到冰面过饱和再到水面高度过饱和的变化, 因此凝华、凝结—冻结、接触冻结和浸入冻结各种机制都有可能发生 (杨绍忠等, 2004); 滤膜法采样后需要在扩散云室中进行活化处理, 本文中采样滤膜的处理都是统一在活化温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及冰面过饱和度 20%、水面过饱和度 3% 的湿度条件下进行的, 模拟的主要为凝华机制, 但也有凝结—冻结核化机制产生作用 (章澄昌, 1987)。有关这两种方法采样结果的对比分析, 作者将另文讨论。

参考文献 (References)

- Berezinskiy N A, Stepanov G V. 1986. Dependence of the concentration of natural ice-forming nuclei of different size on the temperature and supersaturation [J]. *Izv Atmospheric Oceanic Physics*, 22: 722–727.
- DeMott P J, Sassen K, Poellot M R, et al. 2003. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (14): 1732–1736.
- 鄯大雄, 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]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5 (2): 129–134.
- 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 Meteorology (in Chinese)*, 5 (2): 167–171.
- 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]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 27 (11): 8–12.
- 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 (S1): 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]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 14(S1): 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.
- 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): 294–298. Niu Shengjie, An Xialan, Chen Yao, et al. 2000. 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.
- Perez P J, Garcia J A, Casanova J. 1985. Ice nuclei concentration in Valladolid, Spain, and their relation to meteorological parameters [J]. *J. Rech. Atmos.*, 19: 153–158.
- Plaude N O, Vychuzhanina M V. 2000. Aerosol papticle size distribution, the total number and ice nuclei concentrations in Moscow region [C]. *Nucleation and Atmospheric Aerosols 2000: 15th International Conference*. CP534, 463–466.
- Schnell R C. 1977. Ice nuclei in seawater, fog water and marine air off the coast of Nova Scotia: Summer 1975 [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34 (8): 1299–1305.
- 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 (in Chinese)*, 17 (2): 245–249.
- Stephens G L, Tsay S C, Stackhouse P W, et al. 1990. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climate feedback [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47: 1742–1753.
- Szyrmer W, Zawadzki I. 1997. Biogenic and anthropogenic sources of ice-forming nuclei: A review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78 (2): 209–228.
- Vali G. 1991. Report of the experts meeting on interaction between aerosols and clouds [R]. WCRP-59, WMO/TD-No, 423.
- Vali G, Christensen M, R W Fresh, et al. 1976. Biogenic ice nuclei. Part II: Bacterial sources [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33: 1565–1570.
- 杨绍忠, 马培民, 游来光. 1995. 用滤膜法观测大气冰核的静力扩散云室 [J]. *气象学报*, 53(1): 91–100. Yang Shaozhong, Ma Peimin, You Laiguang. 1995. A static diffusion chamber for detecting atmospheric ice nuclei by using filter technique [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 53 (1): 91–100.
- 杨绍忠, 王祥国, 游来光, 等. 2004. 用混合和扩散云室对大气冰核浓度的观测分析 [J]. *气象*, 30 (12): 39–43. Yang Shaozhong, Wang Xiangguo, You Laiguang, et al. 2004. Observation of ice nuclei concentration using mixing cloud chamber and static diffusion chamber in Beijing [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 30 (12): 39–43.
- 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. Shi Anying, You Laiguang. 1964. The measurement and analysis of ice-nucleus concentration at Peking during the period from Mar 18th to Apr 30th in 1963 [J]. *Acta Meteorologica 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 Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 101–109.
- 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): 223–239. Wang Xuelin, Zhang Wanjuan, Xiong Shangqing. 1965. Ice nuclei in atmosphere at Baicheng area in spring [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 35 (3): 223–239.
- Wylie D P, Menzel W P, Harold M W, et al. 1994. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS [J]. *J. Climate*, 7 (12): 1972–1986.
- 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: 1614–1629.
- 章澄昌. 1987. 静力扩散云室中用滤膜测定自然冰核活化数的过饱和度和温度谱 [J]. *南京气象学院学报*, 10 (1): 1–7. Zhang Chengchang. 1987. Measurements of supersaturation and temperature spectra of natural ice nuclei in a static vapour-diffusion chamber [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 10 (1): 1–7.
- 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 Meteorology (in Chinese)*, 25 (1): 138–142.
- 赵剑平, 张澍, 王玉玺, 等. 1965. 我国北部地区大气冰核观测的分析和研究 [J]. *气象学报*, 35 (4): 416–422. Zhao Jianping, Zhang Mi, Wang Yuxi, et al. Analysis and research on the obaervations of ice nuclei in

- atmosphere in the north China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 35 (4): 416–422.
- 赵仕雄, 党积明, 周江. 2000. 西宁地区大气冰核的观测研究 [M]// 青藏高原云和降水人工影响天气研究. 北京: 气象出版社, 24–29. Zhao Shixiong, Dang Jiming, Zhou Jiang. 2000. Study on atmospheric ice nuclei in Xining area [M]// *Study on Cloud and Precipitation and Weather Modification of Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorology Press, 24–29.
- 周德平, 李炳昆, 陈光, 等. 2012. 用 5 L 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. 2012. An observational study of atmospheric ice nuclei concentration using 5 L mixing cloud chamber in Fushun, Liaoning Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 28 (6): 44–49.
- Zimmermann F, Ebert M, Worringer A, et al. 2007. Environmental scanning electron microscopy (ESEM) as a new technique to determine the ice nucleation capability of individual atmospheric aerosol particles [J]. *Atmos. Environ.*, 41 (37): 8219–8227.