

李力, 银燕, 顾雪松, 等. 2014. 黄山地区不同高度云凝结核的观测分析 [J]. 大气科学, 38 (3): 410–420, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13149. Li Li, Yin Yan, Gu Xuesong, et al. 2014. Observational study of cloud condensation nuclei properties at various altitudes of Huangshan Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 410–420.

黄山地区不同高度云凝结核的观测分析

李力¹ 银燕^{1,2} 顾雪松¹ 陈魁¹ 谭稳¹ 杨磊¹ 袁亮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 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 为研究华东高山地区云凝结核 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) 沿山峰的垂直变化特征, 2011 年 6 月利用云凝结核计数器 (Cloud Condensation Nuclei Counter, CCNC) 在黄山三个不同高度处对 CCN 进行观测。观测结果表明, 不同高度的 CCN 浓度随时间的变化趋势基本一致, CCN 浓度随高度的升高而减小, 过饱和度为 0.8% 时山顶、山腰、山底 CCN 浓度平均值分别为 1105.62、1218.39 和 1777.78 cm^{-3} , 山底的高 CCN 浓度 (大于 1000 cm^{-3}) 出现频率大于山腰和山顶, 表明山底受周边污染源的影响较山顶和山腰大。山顶和山底的日变化曲线均为双峰型, 两个峰值分别出现在午前和午后, 与大气边界层高度及山谷风变化有关。利用公式 $N=CS^k$ 拟合了山顶在不同天气条件下 CCN 活化谱, 并分析了其变化特征。结果显示, 晴天、雨天和雾天的 C 值分别为 2798、384、765, 小于一些污染城市, 属于清洁大陆型核谱。本文结果有助于改进对华东背景地区云凝结核时空分布的认识, 为该地区云雾核化在数值模式中的表达提供观测依据和参数化方案。

关键词 气溶胶 云凝结核 不同高度 黄山

文章编号 1006-9895(2014)03-0410-11

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13149

Observational Study of Cloud Condensation Nuclei Properties at Various Altitudes of Huangshan Mountains

LI Li¹, YIN Yan^{1,2}, GU Xuesong¹, CHEN Kui¹, TAN Wen¹, YANG Lei¹, and YUAN Liang¹

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

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044

Abstract To investigate the vertical variability of cloud condensation nuclei (CCN) along mountain peaks in alpine regions of eastern China, the number concentration of CCN were obtained using a cloud condensation nuclei counter (CCNC) at three altitudes of Huangshan Mountains in June 2011. The results show that the time series of CCN concentration at these altitudes were nearly consistent and that the CCN concentration decreased with altitude. At a supersaturation level of 0.8%, the average CCN number concentrations were 1105.62 cm^{-3} , 1218.39 cm^{-3} , and 1777.78 cm^{-3} at the foot, mid-height and summit of the mountain, respectively. The occurrence frequency of a high CCN concentration of more than 1000 cm^{-3} recorded at the foot of the mountain is higher than that recorded at mid-height and the summit of the mountain. These results suggest that the environment at the foot of the mountain was influenced by the

收稿日期 2013-04-10, 2013-10-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41030962, 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD), 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室开放课题 KDW1101

作者简介 李力, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气气溶胶的环境气候效应。E-mail: lili_cijue@163.com

通讯作者 银燕, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

pollution sources in the surrounding areas which were heavier than those at mid-height and the summit. A bimodal pattern at both the summit and the foot of the mountain was presented in the diurnal variation. A peak appeared at forenoon and at afternoon, which is related to variation in the atmospheric boundary layer height and the valley wind. The fitted CCN spectra for various weather conditions at the summit of the mountain were obtained using the expression $N = CS^k$, and the properties were analyzed. The results show that the fitted spectra parameter C was 2798, 384, and 765 on sunny, rainy, and foggy days, respectively, which is lower than the results recorded in some polluted cities. The size distribution of the CCN is shown to be a clean continental type. The results of this study will be conducive to a better understanding of the temporal and spatial distributions of CCN, particularly for eastern China. In addition, the basis for observation and parameterization schemes will be improved for the presentation of cloud activation in numerical models over this region.

Keywords Aerosol, Cloud condensation nuclei, Various altitudes, Huangshan Mountains

1 引言

随着工业的不断发展和人口的不断增多,由自然因素和人为因素排放的气溶胶粒子浓度在持续增长,种类也在不断增多,这些气溶胶粒子正通过多种方式直接或间接地影响人们的生活。悬浮在空气中的气溶胶粒子,通过吸收、散射等作用削弱到达地面的太阳辐射进而影响气候,研究表明,直径大于 $0.05 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,特别是硫酸盐粒子,为云滴和冰晶的形成贡献了大部分凝结核 (Twomey, 1974),一部分气溶胶粒子作为云凝结核 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) 可以改变云的理化特性。CCN 在云和降水过程中起重要的作用,决定了云滴浓度和初始大小的分布 (Sax and Hudson, 1981),可参与暖云形成的微物理过程,对暖云降水有影响,高浓度的 CCN 会抑制暖云降水的发生 (Hudson, 1993)。在冷云降水过程中,CCN 能通过影响云滴尺度来影响降雪率 (Mitchell, 1990)。CCN 能直接将气溶胶和云定量联系起来,对其特征的研究是研究气溶胶、云和气候相互作用的重要环节。同时,气溶胶通过间接辐射强迫影响云的气候效应还存在很多不确定因素 (IPCC, 2007),而这些不确定性很大程度上是由于对气溶胶核化性质的认识不足造成的,因此对 CCN 特性的研究是研究气候变化的一个重要组成部分。

国内外学者针对 CCN 浓度在时间和空间上的分布特征做了大量外场观测实验 (Baumgardner et al., 2004; Reade et al., 2006; Kuwata et al., 2008),我国从 20 世纪 80 年代开始,采用美国 Mee 公司生产的 130 型云凝结核计数器针对西北、青岛沿海等地进行了 CCN 的观测分析 (何绍钦, 1987; 樊曙先和安夏兰, 2000; 黄庚等, 2002)。由于 130 型

云凝结核计数器不能进行连续气流采样,并有粒子增长时间长、标定困难等缺点,已经停止使用。近年来国内用较先进的美国 DMT (Droplet Measurement Technologies) 公司生产的连续气流纵向热梯度云凝结核计数器测量了地面和高空的 CCN 浓度。大量观测研究表明,CCN 主要来源于地面,CCN 浓度随高度增加而减少,云对 CCN 有消耗作用 (石立新和段英, 2007; 岳岩裕等, 2010; 封秋娟等, 2012)。孙霞等 (2012) 分析了石家庄地区雾霾天气下 CCN 垂直和水平分布特征以及谱分布,张晶等 (2011) 分析了石家庄周边秸秆焚烧事件中云凝结核变化的特征, Liu et al. (2011) 认为 CCN 浓度与气溶胶光学厚度有很好的相关性。为研究气溶胶的粒径分布和化学组分对 CCN 活化特性的影响,国内外学者也运用了多种方法进行 CCN 闭合实验的研究 (Chuang et al., 2000; Cantrell et al., 2001; Deng et al., 2011; Yang et al., 2012), Sinder and Brenguier (2000) 利用上升气流速度和 CCN 活化谱计算得到层积云中的云滴数浓度,并与观测到的云滴数浓度一致。关于 CCN 浓度变化对数值模式模拟结果的影响也开展了相关的研究工作 (金莲姬等, 2007; 董昊等, 2012), 得到了大量有意义的研究成果。然而少有对长江三角洲背景地区 CCN 特性的观测分析,且针对高山地区 CCN 浓度沿垂直方向分布特征的研究更少。本研究将观测地点选取在安徽黄山三个不同高度处,山顶海拔高度达 1840 m, 大气环境受周围局地污染源的影响较小,而山底受人为影响较山顶和山腰大,因此比较这三个观测点的 CCN 特性有利于研究高山地区山地气候特点对 CCN 特征的影响,能更好的理解高山地区大气边界层和自由大气交换过程对云凝结核的影响及其与气溶胶和云雾的相互作用关系。

2 资料与方法

2.1 观测仪器与观测地点

黄山观测期间同时使用三台由美国 DMT 公司设计制造的云凝结核计数器 (Cloud Condensation Nuclei Counter, CCNC) 观测山顶、山腰、山底在不同过饱和度下的云凝结核数浓度。通过设定 CCNC 内部云室过饱和度, 能够测量出连续气流在相应过饱和度下的 CCN 浓度。CCNC 的核心部分是一个高 50 cm、内径 2.3 cm 的圆柱形连续气流纵向热梯度云室。云室上、中、下部分别安放了热敏元件以精确测量温度, 通过上、中、下部的 3 组热电制冷器使云室内温度从低到高线性增加, 形成一定的温度梯度, 云室内壁维持一定量的水流以保持湿润。由于从云室内壁向云室内部的水汽扩散速率大于热扩散速率, 因而在云室的垂直中心区域过饱和度达到最大值。环境空气进入仪器后被分为采样气流和鞘流两部分, 鞘流经过过滤和加湿后去除了原有的气溶胶粒子, 环绕在采样气流周围进入云室, 这样采样粒子就被限制在云室垂直中心区域, 并在设定的过饱和度下活化增长。活化后的粒子进入云室下面的光学粒子计数器 (Optical Particle Counter, OPC) 腔体。OPC 内照射激光的波长为 660 nm, 通过粒子侧向散射计算得到活化的 CCN 粒子尺度和个数 (探测的最小粒子直径 0.75 μm)。DMT CCN 仪的主要技术参数为: 过饱和度范围 0.1%~2.0%, 云室总气流率 500 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$, 最佳鞘流和采样气流率比例 10:1, 采样频率 1 Hz, 测量粒子尺度 0.75~10 μm 。

观测地点位于安徽省南部黄山地区, 海拔高度达 1800 m 以上, 与周围的平原和丘陵形成强烈对比, 该地区以旅游业为主要产业, 受到周边工业和城市污染影响较小。气候特征既有华东北亚热带季风特点, 又有山地气候垂直变化的特色, 云雾多、温差大、降水多, 是观测气溶胶与云的理想地点。本研究选取黄山三个由南向北、由低到高的站点开展观测, 山顶的观测点在黄山光明顶气象站 (海拔 1840 m, 30°8'3.6"N, 118°09'53.41"E), 另两个观测点分别位于半山寺消防宿舍区 (海拔 1351 m, 30°07'06.2"N, 118°10'14.11"E) 和山底寨西人工影响天气示范基地 (海拔 464 m, 30°03'32.45"N, 118°09'56.55"E), 三个观测点几乎分布在同一经度上, 这样便能在黄山观测到一个 CCN 随高度变化

的情况, 观测时间为 2011 年 6 月 5 日到 6 月 20 日, 期间山顶气象要素变化如图 1 所示, 山顶月平均气温为 15.9°C, 比历年均值偏高 0.8°C, 月降水量为 982.3 mm, 比历年均值偏多 114.2%, 日照偏少, 相对湿度均维持在 70%以上, 平均风速为 5.5 m s^{-1} , 风向以西南风为主。

2.2 数据处理

在三个观测点同时开展了云凝结核的连续观测试验, 并结合同期在相同位置由自动气象站取得的气象要素观测资料进行分析, 观测数据体现了三个高度在时间上的连续性和空间上的同步性。观测时在三个观测点对 CCNC 过饱和度的设定共分 5 档, 分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%, 各档时间设置均为 20 分钟, 为了避免过饱和度从 1.0%到 0.2%出现大的变化, 采用先从 0.2%到 1.0%递增后反向递减的过饱和度变化方式进行观测, 避免了过饱和度出现大的跨度, 更好的控制了数据质量。考虑到仪器开机后需要一定时间稳定, 以及 CCNC 在过饱和度换挡时不稳定的问题, 对原始数据做了剔除, 仪器开机后和每次过饱和度换挡时前五分钟的数据, 并剔除了“Temps Stabilized”为 0 时的数据。

3 结果与讨论

3.1 CCN 浓度变化特征

在过饱和度接近 0.8%时, 粒径较小的气溶胶粒子的活化率能达到 80%以上 (Deng et al., 2011), 因此认为此时进入 CCNC 的气溶胶粒子大部分能成为 CCN, 这里以过饱和度为 0.8%时为例, 给出三个观测点 CCN 浓度变化的时间序列 (图 2), 后文中如无特殊说明, 图均以过饱和度为 0.8%时给出。如图 2 所示, 山顶、山腰、山底 CCN 浓度随时间的变化趋势基本一致, 观测期间影响 CCN 浓度变化的主要因子是降水, 由图 1 中降水量变化情况可知, 6 月 7 日到 8 日几乎没有降水, 而对应的 CCN 浓度增高并在 6 月 8 日达到 3000 cm^{-3} 左右的极大值。6 月 9 日到 11 日的降水冲刷使得 CCN 浓度下降, 第二个极大值出现在 6 月 12 日到 13 日, 达到 2000 cm^{-3} 左右, 对应的只是微量降水, 14 日到 15 日持续的降水导致 CCN 的浓度很低, 维持在 1000 cm^{-3} 以下。

观测期间降水日次较多, 考虑到降水对气溶胶粒子有明显的冲刷作用 (胡敏等, 2006), 本文对

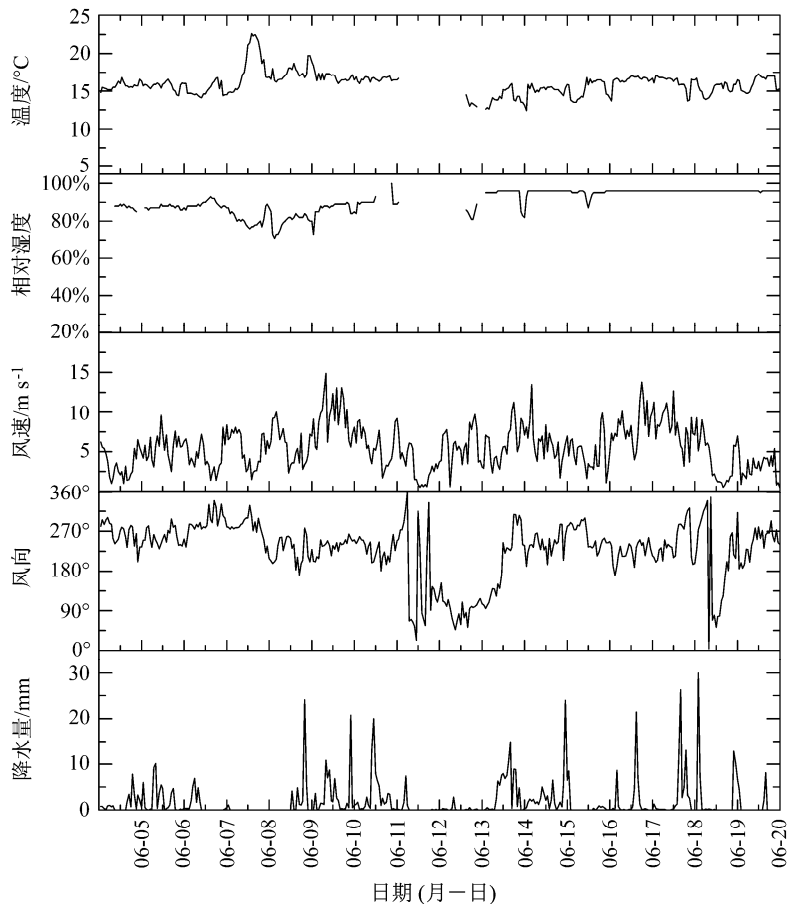


图1 观测期间山顶各气象要素变化

Fig. 1 Variation of meteorological elements at summit of the mountain during observation

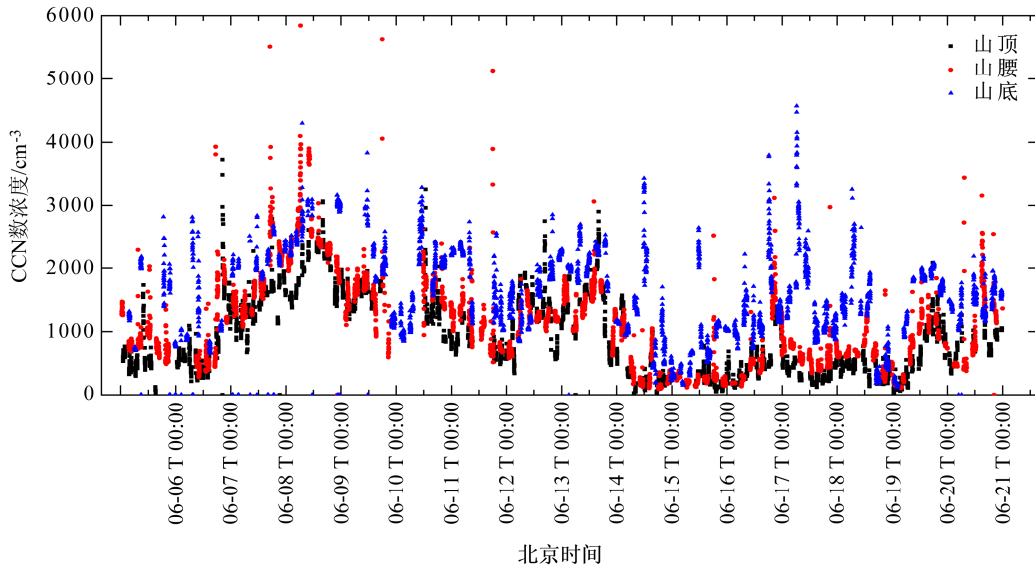


图2 三个不同高度云凝结核 (CCN) 浓度变化 (S=0.8%)

Fig. 2 The variation of the cloud condensation nuclei (CCN) concentration at three different altitudes (S=0.8%)

剔除降水后的 CCN 数浓度进行统计, 表 1 统计了三个观测点的 CCN 浓度在不同过饱和度下的平均值、最大值、最小值以及标准偏差。各观测点 CCN

浓度基本是随过饱和度增加而增加。过饱和度为 0.8% 时, 山顶、山腰、山底 CCN 浓度的平均值和标准差分别为 $1105.62 \pm 590.91 \text{cm}^{-3}$ 、 $1218.39 \pm$

713.77 cm^{-3} 、 $1777.78 \pm 595.95 \text{ cm}^{-3}$ ，山底的 CCN 浓度比山腰和山顶的分别高出 45% 和 60%，山腰比山顶的高出 10%，每一过饱和度下 CCN 浓度都随高度的升高而减小。同期对黄山三个高度气溶胶粒子的水溶性离子分析（文彬等，2013）中也指出，气溶胶中水溶性组分质量浓度随高度递减，且山底离子浓度最大值都高出其他观测点 $10 \mu\text{g m}^{-3}$ ，表明山底受周边污染源的影响较大，气溶胶粒子较多。然而总体而言黄山的 CCN 浓度并不高，三个观测点在不同过饱和度下 CCN 浓度的平均值均未超过 2000 cm^{-3} ，而在一些污染较重的城市 CCN 浓度则远远大于黄山，如 2005 年夏季石家庄地面 CCN 在 $S=0.1\%$ 、 0.3% 、 0.5% 下的最大值分别为 9495、16332 和 21812 cm^{-3} （石立新和段英，2007），2007 年 7 月在 $S=0.5\%$ 时银川地面 CCN 浓度最大值为 11901 cm^{-3} （岳岩裕等，2010），黄山地区相对来说是比较清洁的。

表 1 黄山 3 个不同高度 CCN 浓度统计值

Table 1 The statistics of CCN concentration at three altitudes of Huangshan Mountains.

	过饱和 度 S	平均浓度/ cm^{-3}	最大浓度/ cm^{-3}	最小浓度/ cm^{-3}	标准 偏差
山顶	0.2%	580.32	1973.15	5.53	515.01
	0.4%	847.91	2602.27	12.22	637.47
	0.6%	974.63	2392.87	16.44	603.76
	0.8%	1105.62	2392.70	92.62	590.91
	1.0%	1146.33	2381.85	160.93	597.94
山腰	0.2%	683.35	2792.81	14.97	615.08
	0.4%	1187.71	3969.18	42.02	842.27
	0.6%	1149.38	3919.76	53.57	811.60
	0.8%	1218.39	3765.27	117.88	713.77
	1.0%	1125.28	2899.61	196.61	657.16
山底	0.2%	784.73	2011.69	142.24	525.34
	0.4%	1367.70	2848.13	249.45	627.02
	0.6%	1576.28	3271.65	552.16	684.32
	0.8%	1777.78	3039.20	735.46	595.95
	1.0%	1798.48	2896.46	870.94	618.39

对观测期间 CCN 数浓度进行统计给出其概率分布，如图 3a-c。对三个观测点每个过饱和度下的观测数据几乎可以以 CCN 数浓度为 1000 cm^{-3} 为界分为两部分，在 CCN 数浓度小于 1000 cm^{-3} 的情况下，过饱和度 (S) 为 0.6%、0.8%、1.0% 时，山顶的 CCN 数浓度范围大约为 $500 \sim 900 \text{ cm}^{-3}$ 、 $600 \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$ 、 $700 \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$ ，山腰和山底的与山顶的相差不大，但山底 CCN 浓度小于 1000 cm^{-3} 的概率分布小于山腰和山顶。而在 CCN 数浓度大于 1000

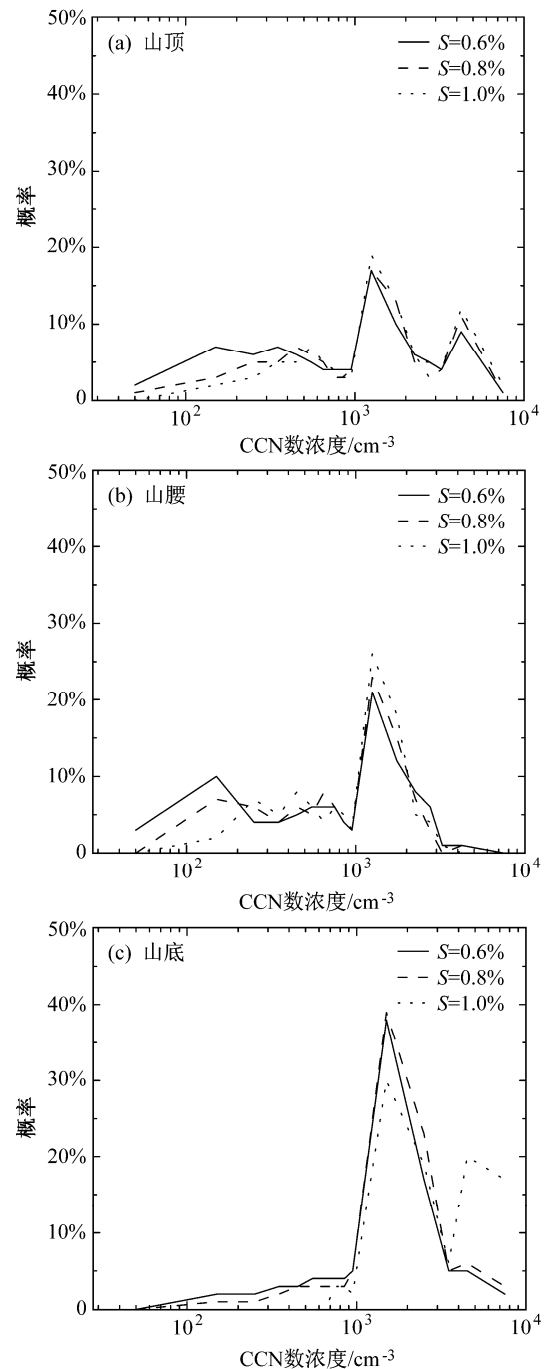


图 3 不同高度 CCN 数浓度概率分布

Fig. 3 The probability distributions of CCN concentration at different altitudes

cm^{-3} 的情况下山顶三个过饱和度的 CCN 浓度范围均为 $1000 \sim 6000 \text{ cm}^{-3}$ ，山腰和山底的 CCN 浓度在 1000 cm^{-3} 以上的概率分布比山顶的大，其中山底最大，山腰次之、山顶最小，说明山底受人为因素影响较大，气溶胶粒子多。邓兆泽（2011）在武清和天津也做了类似的研究，与黄山的相比，武清和天津的 CCN 浓度低于 100 cm^{-3} 的概率分布几乎为零，

而黄山的在 100 cm^{-3} 以下仍有分布，武清和天津的 CCN 浓度高于 10000 cm^{-3} 的概率占到很大的比例，而黄山则没有高于 10000 cm^{-3} 的概率分布，这主要是因为华北地区受到工业和城市污染比黄山严重，高气溶胶浓度导致了高 CCN 浓度，且黄山观测期间降水时次较多，对气溶胶粒子的冲刷作用使得 CCN 浓度较低。

3.2 不同高度 CCN 浓度的相关性分析

为了进一步分析山顶、山腰、山底 CCN 数浓度之间的关系，将观测期间剔除降水后山顶和山腰、山顶和山底、山腰和山底的 CCN 分别做了相关性的比较，如图 4a-c 所示，三个观测点的 CCN 数浓度相关性都较好，相关系数 R 均达到 0.7 以上，但是山顶和山腰的相关性最好，相关系数达到 0.85，山腰和山底的相关性次之，相关系数为 0.78，山顶和山底的相关性与前两项相比较差，相关系数为 0.71，晴天情况下黄山边界层的高度能抬升到 1900 m 左右（张小培，2012），山顶处于边界层顶部，污染物通过湍流向上输送到边界层顶，所以三个点有较好的相关性，同时由于山底所受到的人为活动影响较大，气溶胶的源比山腰和山顶的复杂，且受到三个观测点之间垂直落差和水平距离的影响，以及各观测点气象要素的不同，气溶胶粒子在传输过程中容易受到环境因素影响，存在较大的不确定性，可能导致了相关系数随着观测点之间垂直距离的增大而减小。

3.3 CCN 浓度日变化

2011 年黄山 6 月 10 日入梅，7 月 15 日出梅，观测地点的天气多以雨和雾为主，将观测期间有持续降水的情况排除后讨论山顶和山底 CCN 晴天的日变化情况（图 5a、b）。图中可以看到 CCN 浓度基本随过饱和度的升高而升高，但山底部分时刻的 CCN 浓度在 0.8% 的过饱和度下小于过饱和度为 0.6% 时的浓度，这可能是由于 6 月 8 日下午观测资料有缺失所致。两个观测点的日变化曲线均为双峰型，山顶第一个峰值出现在 12:00（北京时间，下同）左右，第二个峰值出现在 17:00 左右，山底的第一个峰值出现在上午 08:00~09:00，第二个峰值出现在 17:00 左右，在黄山光明顶观测的气溶胶吸收系数和散射系数也出现了类似的双峰型日变化（陈景华等，2011），散射和吸收系数在午夜和凌晨较低，白天在午后有一个小低谷，一天中两个较大的峰值一个出现在中午前，一个出现在傍晚 18:00 左

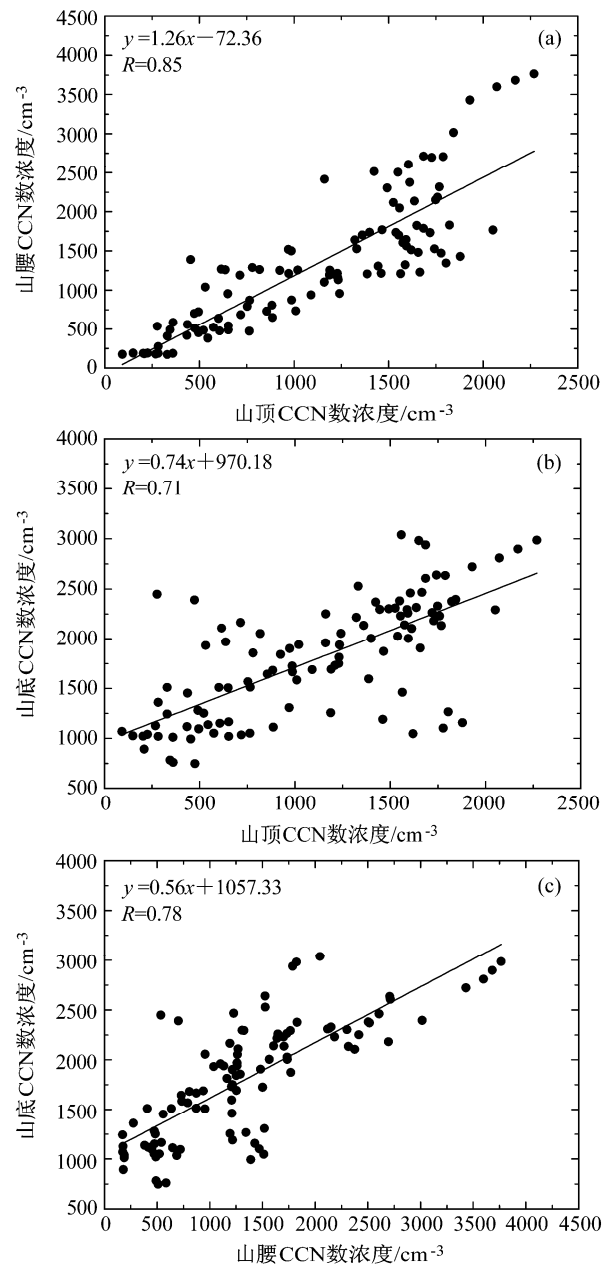


图4 不同高度 CCN 数浓度相关性: (a) 山顶和山腰; (b) 山顶和山底; (c) 山腰和山底

Fig. 4 Correlation of CCN concentration between different altitudes: (a) Summit and mid height of the mountain; (b) summit and foot of the mountain; (c) mid height and foot of the mountain

右。有研究认为高山地区 CCN 浓度日变化与混合层高度的变化有关 (Philippin and Betterton, 1997), 在对黄山上空污染物的数值模拟研究 (金祺等, 2012) 中也指出白天边界层抬升, 污染气体通过湍流向上输送到边界层顶, 晚上污染物又随着边界层的下降回到地面附近, 重复前一天的过程。早晨由于交通早高峰等人为活动排放的气溶胶粒子增加, 山底 CCN 浓度在 09:00 达到峰值。而山顶达

到第一个峰值的时间比山底的滞后,可能是因为夜晚和清晨山顶在边界层顶以上,气溶胶浓度较小,日出之后太阳辐射逐渐增强,边界层顶由山底逐渐向山顶抬升,边界层高度内的湍流混合作用将山底较高浓度的 CCN 和气溶胶粒子向上输送,山顶 CCN 浓度逐渐增高,中午太阳辐射最强时山顶处于边界层高度内,CCN 数浓度在 12:00 达到第一个峰值。午后湍流交换加强,CCN 不易在低层积累,山底 CCN 浓度降低,达到谷值,且与同时段内山顶的 CCN 浓度范围相一致,在 $2000\sim 2500\text{ cm}^{-3}$ 范围内,同时山顶贴地层也受到湍流的影响,加快了粒子在垂直方向上的扩散,将山顶的气溶胶粒子继续垂直向上输送,从而导致山顶 CCN 浓度在午后 14:00 左右也出现了谷值。17:00 太阳辐射开始减弱,边界层高度降低,山顶由不稳定层结向稳定层结过渡,湍流垂直混合作用减弱,气溶胶粒子开始累积,形成 CCN 浓度的第二个峰值,而傍晚山底受到太阳辐射减弱以及人为活动增强的影响,CCN 浓度升高出现第二个峰值。日落以后边界层顶逐渐下降,湍流扩散受到抑制,山顶的气溶胶粒子减少,CCN 浓度也迅速下降。同时 CCN 的日变化也有可能受到山谷风的影响,银燕等(2010)在研究黄山光明顶气溶胶粒子日变化时也指出,白天风由山谷吹向山坡,低层浓度高的气溶胶粒子向上输送,对气溶胶有一定的积累作用,气溶胶浓度下午比上午高,导致山顶 CCN 浓度第二个峰值大于第一个峰值,晚上风由山坡吹向山谷,气溶胶浓度降低,而山底两个峰值的 CCN 浓度则相差不大。

3.4 不同天气条件下的 CCN 活化谱

气溶胶粒子能否作为 CCN 不仅与粒子尺度有

关,还与过饱和度、粒子化学成分、上升速度等因素有关。但 Dusek et al. (2006) 指出气溶胶粒子的尺度比化学成分更能影响其活化作用,对于可溶性无机盐溶液,主要由柯拉曲线(Kohler, 1936)来描述相对湿度与粒子尺度的关系。CCN 活化谱即 CCN 数浓度随过饱和度的变化曲线,是 CCN 数浓度观测结果的重要应用,目前我国研究活化的 CCN 浓度最常用的是利用经验公式 $N=CS^k$ (Twomey, 1959),其中 S 为过饱和度, N 为过饱和度 S 下的 CCN 数浓度, C 和 k 为拟合参数,气溶胶粒子群尺度或化学成分的信息隐含在参数 C 和 k 之中。Hobbs et al. (1985) 根据 C 、 k 值把核谱分为大陆型($C\geq 2200\text{ cm}^{-3}$, $k<1$)、过渡型($1000\text{ cm}^{-3}<C<2200\text{ cm}^{-3}$, $k>1$)、海洋型($C\leq 1000\text{ cm}^{-3}$, $k<1$)。本文选取观测期间山顶晴天、雨天、雾天的 CCN 活化谱做相关分析。

观测期间设定每个过饱和度的观测时间为 20 分钟,这样将 CCN 数浓度随一轮过饱和度(0.2%~1.0%)变化的关系拟合生成 CCN 活化谱,从而得到 CCN 活化谱随时间的变化情况,拟合参数如表 2 所示。从山顶晴天 CCN 活化谱(图 6a)来看,从凌晨 04:00 开始到下午 18:00,CCN 浓度呈现一个逐渐升高的趋势,夜晚 CCN 浓度逐渐降低,这与前面提到山顶晴天 CCN 的日变化一致,主要受到晴天边界层发展和山谷风的影响。晴天时的 C 值均在 10^3 量级,平均值为 2797.84, k 值均小于 1,按照 Hobbs et al. (1985) 的分类方法,黄山晴天时属于大陆型核谱, C 值也与 CCN 浓度变化一致,呈现出明显的日变化。图 6b 为山顶雨天 CCN 活化谱的拟合曲线,选取了 6 月 17 日的一次降水过程,降

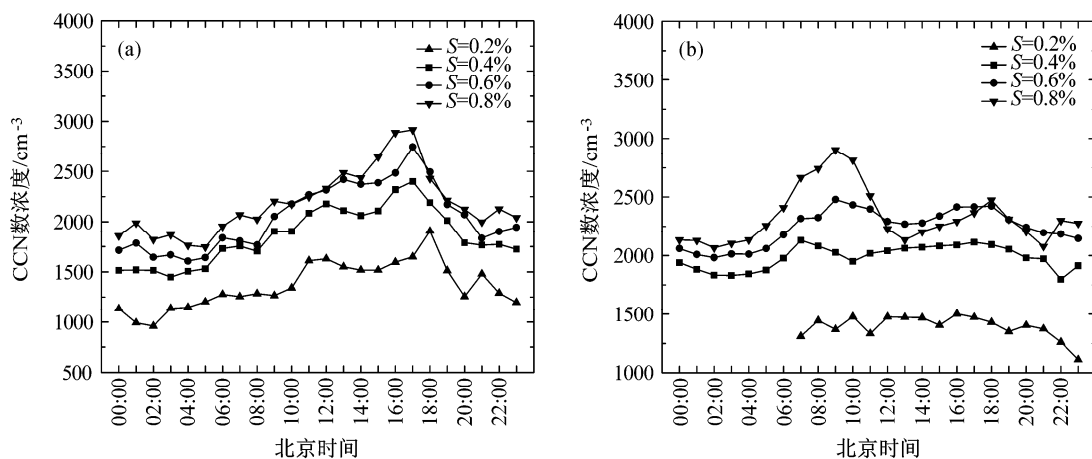


图 5 CCN 数浓度日变化: (a) 山顶; (b) 山底

Fig. 5 The diurnal variation of CCN concentration: (a) Summit of the mountain; (b) foot of the mountain

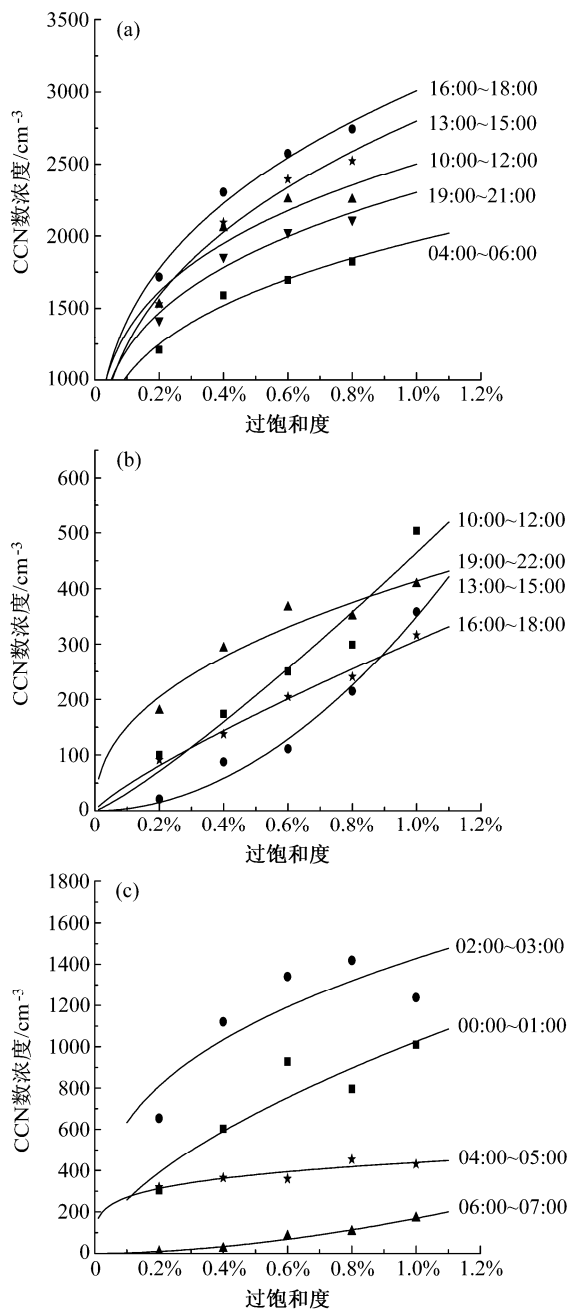


图6 不同天气条件下山顶CCN活化谱: (a)晴天; (b)雨天; (c)雾天
Fig. 6 The fitted CCN spectra under different weather conditions: (a) Sunny day; (b) rainy day; (c) foggy day

水期间CCN数浓度比晴天低, 10:00~12:00时平均降水量为 0.3 mm h^{-1} , 13:00~15:00平均降水量为 11.03 mm h^{-1} , CCN浓度达到了最低值, 到了16:00~18:00平均降水量为 0.47 mm h^{-1} , CCN浓度较先前有所增加, 但是仍然维持在一个较低的水平, 19:00~22:00平均降水量为 0.1 mm h^{-1} , CCN浓度升高。雨天的 C 值比晴天的小, 平均值为383.70, k 值在10:00~18:00均大于1, 只有雨强较小的19:00~21:00小于1。CCN数浓度和 C 值是随

着雨强的增大而减小的, 降水对CCN的湿清除作用明显。利用FM-100雾滴谱仪及VPF-730能见度仪监测云雾的资料, 选取了6月14日凌晨一次雾过程做CCN活化谱的拟合, 如图6c所示00:00~03:00平均相对湿度达92%, 平均风速为 7.65 m s^{-1} , 平均云雾滴数浓度和平均液态含水量分别为 57.59 cm^{-3} 和 0.007 g cm^{-3} , 04:00~05:00时相对湿度逐渐增加, 云滴数浓度增加到 164.88 cm^{-3} , 液态含水量也增加到 0.07 g cm^{-3} , 同时CCN数浓度也逐渐减小, 表明在高相对湿度条件下一部分CCN能活化形成云雾滴, 云雾过程对CCN有明显的湿清除作用。07:00开始有降水, 降水量为 2 mm h^{-1} , 导致浓度本来就低的CCN被降水冲刷得更低。雾天 C 的平均值为764.97, 比晴天低比雨天高, 云雾滴对CCN的清除作用比降水的弱。

表2 山顶不同天气条件下CCN活化谱拟合参数值

Table 2 The parameters of fitted CCN spectra at the summit of the mountain in different weather conditions

天气情况	时间	C	k	R^2
晴天	04:00~6:00	1965.87	0.28	0.95
	10:00~12:00	2500.81	0.27	0.85
	13:00~15:00	2799.70	0.35	0.96
	16:00~18:00	3713.77	0.219	0.87
	19:00~21:00	3009.06	0.33	0.97
雨天	6月17日 10:00~12:00	464.63	1.17	0.91
	6月17日 13:00~15:00	349.77	1.96	0.97
	6月17日 16:00~18:00	306.58	2.76	0.98
	6月17日 19:00~22:00	413.80	0.44	0.88
雾天	6月14日 00:00~01:00	1024.40	0.60	0.80
	6月14日 02:00~03:00	1428.33	0.35	0.63
	6月14日 04:00~05:00	438.08	0.21	0.73
	6月14日 06:00~07:00	169.06	1.77	0.97

注: 晴天拟合所用CCN浓度值为观测期间晴天情况下的平均值。

本文总结了近年来我国利用经验公式 $N=CS^k$ 拟合得出的 C 、 k 参数值及各地区拟合的核谱类型(表3)。从中可以看出, 在一些人为影响小的较清洁地区, 如盐池、祁连山, C 值较小, 多为清洁大陆型核谱, 而在污染较为严重的城市, 如石家庄、银川、武清, C 值较大, 多为典型的大陆型核谱。对比本文中拟合出的黄山 C 值, 可以看到, 晴天情况下黄山的 C 值比石家庄和银川的 C 值小, 与祁连山和谭稳等(2010)在黄山得到的 C 值相差不大, 属于清洁大陆型核谱, 表明黄山地区与污染城市相比可以算比较清洁的, 但这仅是一种经验的线性拟合, 与实际观测值有一定差距, 如何找出一个更好的方法来确定CCN与过饱和度的关系, 还有待探究。

表 3 不同地区 CCN 活化谱拟合参数统计

Table 3 Summary of CCN spectra in different regions

观测时间	观测地点	天气状况	核谱		参考文献
			C	k	
2005 年 6 月	石家庄	小雨	8276	0.69	石立新和段英 (2007)
2005 年 7 月		晴	21748	0.65	
2007 年 7~8 月	盐池	—	1605	0.83	岳岩裕等 (2010)
2007 年 7 月	祁连山	雷阵雨	805	0.64	赵永欣等 (2010)
		晴	3022	0.90	
2007 年 8 月	银川	晴	7457	0.8	赵永欣等 (2010)
2008 年 4~7 月	黄山	—	2119	1.57	谭稳等 (2012)
2009 年 11~12 月	武清	—	16812	0.49	王婷婷 (2011)
		雨	384	1.58	
2011 年 6 月	黄山	晴	2798	0.28	本文
		雾	765	0.73	

注：表中“—”表示原文中未注明天气状况。

4 结论

本文根据 2011 年 6 月在黄山山顶、山腰、山底得到的 CCN 观测资料，分析了黄山不同高度处 CCN 数浓度的分布特征和日变化规律，对比了不同天气条件下 CCN 活化谱的特征，得到的主要结论如下：

(1) 山顶、山腰、山底的 CCN 数浓度随时间的变化趋势基本一致，CCN 浓度随高度的递减，山底的 CCN 浓度在大于 1000 cm^{-3} 的概率分布最大，山腰的次之，山顶的最小。表明山底受人为活动影响较大，气溶胶粒子较多。

(2) 对三个观测点之间的 CCN 浓度做相关性分析发现，三个观测点之间相关性都较好，山顶和山腰的相关性最好，山腰和山底的相关性次之，山顶和山底的相关性较差，相关系数随着观测点之间垂直距离的增大而减小，

(3) 山顶和山底的日变化曲线均为双峰型，两个峰值分别出现在午前和午后，中午时分有一个谷值，山顶 CCN 的日变化主要受到大气边界层的日变化和山谷风的影响，山底 CCN 的日变化主要受到早晚人为活动频繁的影响。

(4) 对不同天气条件下山顶 CCN 活化谱的特征分析表明，晴天时的 C 值较高，平均值为 2797.84， k 值均小于 1，属于大陆型核谱。雨天 CCN 数浓度比晴天低， C 值比晴天的小一个量级，平均值为 383.70，CCN 浓度和 C 值是随着雨强的增大而减小的，降水对 CCN 的湿清除作用明显。雾天 C 值的平均值为 764.97，比晴天低比雨天高，云雾过程对

CCN 有明显的湿清除作用。黄山地区与其他污染城市相比 C 值较小，而与较清洁地区相比 C 值相差不大，属于清洁大陆型核谱。

参考文献 (References)

- Baumgardner D, Raga G B, Muhlia A. 2004. Evidence for the formation of CCN by photochemical processes in Mexico City [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 357–367.
- Cantrell W, Shaw G, Cass G R, et al. 2001. Closure between aerosol particles and cloud condensation nuclei at Kaashidhoo Climate Observatory [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 28711–28718.
- 陈景华, 银燕, 林振毅, 等. 2011. 黄山顶大气气溶胶吸收和散射特性观测分析 [J]. *气候与环境研究*, 16 (5): 641–648.
- Chen Jinghua, Yin Yan, Lin Zhenyi, et al. 2011. An observational study of aerosol optical properties at the top of Huangshan Mountains [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (5): 641–648.
- Chuang P Y, Collins D R, Pawlowska H, et al. 2000. CCN measurements during ACE-2 and their relationship to cloud microphysical properties [J]. *Tellus B*, 52: 843–867.
- 邓兆泽. 2011. 华北地区气溶胶活化特性的观测研究 [D]. 北京大学博士学位论文.
- Deng Zhaoze. 2011. Observational study of aerosol activation properties in North China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University.
- Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al. 2011. Size-resolved and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 3835–3846.
- 董昊, 徐海明, 罗亚丽. 2012. 云凝结核浓度对 WRF 模式模拟降水的影响: 不同云微物理参数化方案的对比研究 [J]. *大气科学*, 36 (1): 145–169.
- Dong Hao, Xu Haiming, Luo Yali. 2012. Effects of cloud condensation nuclei concentration on precipitation in convection permitting simulations of a squall line using WRF model: Sensitivity to cloud microphysical schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 145–169.
- Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. 2006. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles [J]. *Science*, 312: 1375–1378.
- 樊曙先, 安夏兰. 2000. 贺兰山地区云凝结核浓度的测量及分析 [J]. *中国沙漠*, 20 (3): 107–109.
- Fan Shuxian, An Xialan. 2000. Measurement and analysis of the concentration of cloud condensation nuclei in MT. Helanshan area [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 20 (3): 107–109.
- 封秋娟, 李培仁, 樊明月, 等. 2012. 华北部分地区云凝结核的观测分析 [J]. *大气科学学报*, 35 (5): 533–540.
- Feng Qiujuan, Li Peiren, Fan Mingyue, et al. 2012. Observational analysis of cloud condensation nuclei in some regions of North China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 533–540.
- 何绍钦. 1987. 青岛沿海地区夏季云凝结核浓度观测及分析 [J]. *南京气象学院学报*, 10: 452–460.
- He Shaoqin. 1987. Cloud condensation nuclei concentration over Qingdao area in summer [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 10: 452–460.
- Hobbs P V, Bowdle D A, Radke L F. 1985. Particles in the lower

- troposphere over the high plains of the United States. II: Cloud condensation nuclei [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 42: 1358–1369.
- 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 2006. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响 [J]. *环境科学*, 27: 2293–2298. Hu Min, Liu Shang, Wu Zhijun, et al. 2006. Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distributions in the summer of Beijing [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 27: 2293–2298.
- 黄庚, 李淑日, 德力格尔, 等. 2002. 黄河上游云凝结核观测研究 [J]. *气象*, 28 (10): 45–49. Huang Geng, Li Shuri, De Ligeer, et al. 2002. Observational analysis of content of condensation nuclei in the atmosphere in upper reaches of Huanghe River [J]. *Meteorology (in Chinese)*, 28 (10): 45–49.
- Hudson J G. 1993. Cloud condensation nuclei [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32: 596–607.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 金莲姬, 银燕, 王盘兴, 等. 2007. 热带深对流云砧数值模拟及云凝结核数浓度对其影响的初步试验 [J]. *大气科学*, 31: 793–804. Jin Lianji, Yin Yan, Wang Panxing, et al. 2007. Numerical modeling of tropical deep convective anvil and sensitivity test on its response to changes in the cloud condensation nuclei concentration [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31: 793–804.
- 金祺, 银燕, 谭稳. 2012. 黄山地区复杂地形下污染气体输送过程的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 35: 680–688. Jin Qi, Yin Yan, Tan Wen. 2012. Numerical simulation of transport process of pollution gases over the complex terrain of Mountain Huang region [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35: 680–688.
- Kohler H. 1936. The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets [J]. *Trans. Faraday Soc.*, 32: 1152–1161.
- Kuwata M, Kondo Y, Miyazaki Y, et al. 2008. Cloud condensation nuclei activity at Jeju Island, Korea in spring 2005 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8: 2933–2948.
- Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, et al. 2011. Analysis of cloud condensation nuclei properties at a polluted site in southeastern China during the AMF-China Campaign [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116 (D16), doi:10.1029/2011JD016395.
- Mitchell D L. 1990. Evolution of snow size spectrapredicted by the growth processes of diffusion, aggregation and riming [C] // *Conference on Cloud Physics*. San Francisco, CA: AMS, 270–277.
- Philippin S, Betterton E A. 1997. Cloud condensation nuclei concentrations in Southern Arizona: Instrumentation and early observations [J]. *Atmos. Res.*, 43: 263–275.
- Reade L, Jennings S G, McSweeney G. 2006. Cloud condensation nuclei measurements at Mace Head, Ireland, over the period 1994–2002 [J]. *Atmos. Res.*, 82: 610–621.
- Sax R I, Hudson J G. 1981. Continentality of the South Florida summertime CCN aerosol [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1467–1479.
- 石立新, 段英. 2007. 华北地区云凝结核的观测研究 [J]. *气象学报*, 65: 644–652. Shi Lixin, Duan Ying. 2007. Observations of cloud condensation nuclei in North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65: 644–652.
- Snider J R, Brenguier J L. 2000. Cloud condensation nuclei and cloud droplet measurements during ACE-2 [J]. *Tellus B*, 52: 828–842.
- 孙霞, 银燕, 韩洋, 等. 2012. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征 [J]. *中国环境科学*, 32 (7): 1165–1170. Sun Xia, Yin Yan, Han Yang, et al. 2012. Distribution characteristics of cloud particles and cloud condensation nuclei during haze/fog events in Shijiazhuang [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 32 (7): 1165–1170.
- 谭稳, 银燕, 陈魁, 等. 2010. 黄山顶云凝结核的观测与分析 [C] // 第 27 届中国气象学会年会人工影响天气与云雾物理新技术理论及进展分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Tan Wen, Yin Yan, Chen Kui, et al. 2010. An observational study of cloud condensation nuclei properties at the top of Mt. Huang [C] // *The Theory and Progress of New Technology of Weather Modification and Cloud Physics at the Venue in the 27th Chinese Meteorological Society Annual Meeting (in Chinese)*. Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 谭稳. 2012. 华东高海拔地区大气气溶胶粒径分布及增长特征研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Tan Wen. 2012. Size distribution and growth characteristics of atmospheric aerosols in high latitude regions of eastern China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 2013. 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 [J]. *环境科学*, 34 (5): 1973–1981. Wen Bin, Yin Yan, Qin Yanshuo, et al. 2013. Chemical characteristics of water-soluble components of aerosol particles at different altitudes of the Mount Huang in the summer [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 34 (5): 1973–1981.
- Twomey S. 1959. The nuclei of natural cloud formation. Part I: The chemical diffusion method and its application to atmospheric nuclei [J]. *Geophys. Pure Appl.*, 43: 227–242.
- Twomey S. 1974. Pollution and the planetary albedo [J]. *Atmos. Environ.*, 8 (12): 1251–1256.
- 王婷婷. 2011. 华北地区云凝结核特性研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Wang Tingting. 2011. The characteristic of cloud condensation nuclei in North China Plain [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Yang F, Xue H, Deng Z, et al. 2012. A closure study of cloud condensation nuclei in the North China Plain using droplet kinetic condensational growth model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (12): 5399–5411.
- 银燕, 陈晨, 陈魁, 等. 2010. 黄山大气气溶胶微观特性的观测研究 [J]. *大气科学学报*, 33 (2): 129–136. Yin Yan, Chen Chen, Chen Kui, et al. 2010. An observational study of the microphysical properties of atmospheric aerosol at Mt. Huang [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 129–136.
- 岳岩裕, 牛生杰, 桑建人, 等. 2010. 干旱区云凝结核分布及其影响因子的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 30: 593–598. Yue Yanyu, Niu Shengjie, Sang Jianren, et al. 2010. Observational study on the distribution of cloud condensation nuclei and its causes in drought region [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 30: 593–598.
- 张晶, 郑有飞, 李云川, 等. 2011. 石家庄市周边秸秆焚烧导致云凝结核变化的特征 [J]. *大气科学学报*, 34 (3): 343–350. Zhang Jing, Zheng Youfei, Li Yunchuan, et al. 2011. Characteristics of CCN concentration

- change caused by straw burning around Shijiazhuang City [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 343–350.
- 张小培. 2012. 黄山顶大气气溶胶粒子来源和输送过程的数值模拟 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Zhang Xiaopei. 2012. Numerical simulation of source and transport of aerosol particles at mountain Huang [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 赵永欣, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2010. 2007年夏季我国西北地区云凝结核的观测研究 [J]. *高原气象*, 29: 1043–1049. Zhao Yongxin, Niu Shengjie, Lü Jingjing, et al. 2010. Observational analyses on cloud condensation nuclei in northwestern China in summer of 2007 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29: 1043–1049.