

大气气溶胶研究的前沿问题*

王明星 张仁健

(中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 从 4 个方面对大气气溶胶研究的前沿问题作了总结和分析: 气溶胶的基本特征、气溶胶的气候效应、沙尘气溶胶以及气溶胶对健康环境的影响。介绍了当前国际上有关的大气气溶胶研究计划, 讨论了未来大气气溶胶研究的主要领域及研究方向。

关键词: 气溶胶; 气候变化; 沙尘气溶胶; 实验研究

1 引言

气溶胶的严格含意是指悬浮在气体中的固体和(或)液体微粒与气体载体共同组成的多相体系。相应的, 大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。大气气溶胶粒子的直径多在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间。很多过程可以产生气溶胶, 根据来源可分为自然气溶胶和人为气溶胶。自然源主要是海洋、土壤和生物圈以及火山等; 人为源主要来自化石燃料的燃烧、工农业生产活动等^[1,2]。工业革命以来, 人类活动不仅直接向大气排放大量粒子, 更重要的是向大气排放大量的 SO_2 和 NO_x , SO_2 和 NO_x 在大气中通过非均相化学反应逐渐转化成硫酸盐和硝酸盐粒子, 形成二次气溶胶。污染气体形成的大气气溶胶自工业革命以来有大幅度增加。来自自然源的气溶胶如沙尘, 也由于人类活动利用土地变化而发生着改变。

尽管气溶胶只是地球大气成分中含量很少的组分, 但由于其在许多大气过程中的重要作用而日益受到重视。随着环境污染问题的发展, 人们已认识到大气气溶胶自身的污染特性与其物理化学性质以及在大气中的非均相化学反应有着密切的关系。气溶胶还与其他环境问题如臭氧层的破坏、酸雨的形成、烟雾事件的发生等密切相关^[3,4]。此外, 气溶胶对人体和其他生物的生理健康也有其特有的影响^[5~7]。90 年代以来, 由于气溶胶的气候效应问题, 气溶胶再次成为国际学术界的研究热点之一, 大气气溶胶是当今大气化学研究中前沿的领域。国际大气化学研究计划(IGAC)科学指导委员会于 1994 年将国际全球大气化学研究计划和国际气溶胶计划(ICAP)合并重组, 大气气溶胶研究被列为 3 大研究方向之一。大气气溶胶的研究内容, 发展到包括物理和化学的性状、来源和形成、时空分布、对气候变化和环境质量的影响以及对大气化学过程的影响等多方面、多层次的综合研究, 也涉及到大气科学的各个领域, 具有很强的综合性。

现从大气气溶胶研究的 4 个主要方面: 气溶胶的基本特性、气溶胶的气候效应、沙尘气溶胶、气溶胶对环境和人体健康的影响等, 论述大气气溶胶的研究进展、相关的国际研究计划及有关问题。

2000-07-28 收到, 2000-09-07 收到修改稿

* 国家重点基础研究项目 G1999043400 和“知识创新工程”8-2101 和 8-2303 项目共同资助

2 大气气溶胶的基本特性研究

气溶胶的基本特性研究是研究气溶胶对气候和环境影响的基础。为制订合理的空气质量标准、解析污染源、研究气溶胶对大气化学过程的影响和健康效应,也需要对气溶胶的特性进行深入的研究。自从城市化开始后,大气颗粒物就成为城市空气污染的重要因素。因此,气溶胶特性研究一直是大气环境研究的重要的课题。

回顾几十年来气溶胶的研究历程,气溶胶的研究内容不断发生变化。过去着重于一次颗粒物,50年代后,逐渐从总悬浮颗粒物(TSP)转向可吸入颗粒物PM₁₀($\leq 10\ \mu\text{m}$)。90年代后期,更重视二次颗粒物的问题。现今则更侧重于PM_{2.5}($\leq 2.5\ \mu\text{m}$)、亚微米($10^{-7}\ \text{m}$),甚至超细的颗粒(nm)。以前较多地针对人为源,现今生物源、天然源都作为重要排放源来探讨。近年来,城市和区域环境的气溶胶特性的研究得到进一步重视和加强。对气溶胶颗粒的成分除一般无机元素外,还开始重视元素碳、有机碳、有机化合物,尤其是挥发性有机物VOCs、多环芳烃PAHs和有毒物^[8~10]。有些研究还对生物气溶胶(细菌、病菌、霉菌等)、元素存在形态进行分析鉴定,大大丰富了气溶胶特性研究的内容。在研究气溶胶细粒子的过程中,相关采样与分析测试技术也得到了不断改进和提高。

近年IGAC组织进行了两次气溶胶特性实验(Aerosol Characterization Experiment, ACE)。第1次(ACE-1, 1995年)在澳大利亚南部海域;第2次(ACE-2, 1998年)在大西洋北部地区。1998年,IGAC科学委员会决定,2000~2010年间,IGAC优先执行的最重要实验观测计划是“亚洲气溶胶实验观测(ACE-Asia)”,其主要内容是“亚洲地区气溶胶的特性”,也称为ACE-3。该项目打算利用地面(包括海、陆站点)定位观测、飞机取样观测、卫星遥感等观测手段,对亚洲气溶胶的特征(物理、化学及光学)、来源、输送、气候和环境效应进行综合观测研究。该项目一经提出,立即得到了日本、韩国、美国和中国科学家的响应。ACE的观测实验是依照以下3个目标设计的:(1)确定主要类型气溶胶的物理、化学、辐射、云凝结核特性,以及这些特性的相互关系的研究;(2)定量化研究控制主要气溶胶的形成、发展、核清除的物理化学过程以及这些过程怎样影响气溶胶的粒度分布、化学组成、辐射和凝结核特性;(3)进一步改进提高气溶胶过程、辐射效应及全球气候的模型。气溶胶对辐射有重要影响,其影响程度取决于气溶胶的时空分布、自身的物理化学性质(包括粒子尺度、谱分布、化学成分等等)以及下垫面的光学性质。因此,对气溶胶特性的了解对气溶胶的气候效应的研究是很重要的。而气溶胶的来源、分布、自身物理化学性质及地表状况这些因子都有极大的时间和空间变率。目前,各种气溶胶采样方法和分析手段以及取得的资料之间还缺乏可比性。到目前为止,如何获取全面有代表性的资料仍是气溶胶基本特性研究方面亟待解决的问题。

3 气溶胶的气候效应

气候变化是当前各国政府和科学界关注的重大问题。气溶胶作为影响气候变化的一

一个重要因子, 引起了全世界科学界的普遍重视。

气溶胶对气候的影响通过两种方式: 一种是通过散射和吸收太阳辐射直接影响气候; 另一种以云凝结核 (CCN) 的形式改变云的光学特性和云的分布而间接影响气候^[11,12]。

气溶胶粒子的存在是云形成的前提。在现代地球大气的温湿条件下, 如果没有气溶胶粒子, 将永远不会形成云。因此, 气溶胶粒子增加的一个最直接的影响是使云滴数量增加, 云的增加总的来说是使地表降温, 当然云增加可能引起降水增加, 进而影响地表湿度和植被从而改变地表反照率进一步影响气候。这一连串的间接影响至今尚无定量计算, 是研究气溶胶对气候影响的一个重要的也是极为困难的课题^[13]。

因此, 大气气溶胶的气候效应比温室气体复杂得多。应当强调指出, 尽管气溶胶对气候的影响与温室效应气体的影响是反向的, 但二者不能简单抵销。从二者的寿命来看, 对流层气溶胶的寿命只有几天到几周, 它的辐射强迫作用集中在排放源附近, 而且基本只影响北半球, 而温室气体的寿命是 10 年和 100 年的尺度, 已经在全球范围内产生影响。从影响的时间看, 气溶胶的影响主要是对白天的太阳辐射, 而且夏季低纬度影响较大, 而温室气体则昼夜都有影响, 冬季和中高纬度影响大。从与下垫面的关系看, 气溶胶对辐射的影响与下垫面的光学性质关系极大, 同样一层气溶胶, 下垫面光学性质不同时它产生的辐射强迫会有很大差别, 甚至引起符号相反的影响, 而温室气体的影响则基本与下垫面性质无关。

数值模拟研究使气溶胶气候效应的量化研究成为可能^[14,15]。90 年代初以来, 有关人为气溶胶辐射强迫及其气候效应的定量化研究取得了很大的进展。模式结果^[16]表明, 人为硫酸盐气溶胶的存在使地面损失太阳辐射约为 $0.5 \sim 1.6 \text{ W/m}^2$ 。应该注意, 不同的研究者根据不同的模式得到的结果差异较大, 这些结果依然存在相当大的不确定性。这是由于缺乏气溶胶浓度时空分布的信息以及气溶胶物理、化学、光学特性及其尺度分布的准确信息。

对人为气溶胶的间接效应研究也有大量的工作。各种模拟结果表明, 硫酸盐气溶胶的间接气候效应可能更为重要, 但与其直接效应相比, 间接效应的不确定性更大。研究表明, 硫酸盐的间接辐射强迫在 $0 \sim -1.5 \text{ W/m}^2$ 之间^[17]。尽管不同的研究小组的结果相近, 并不意味着估计的可信度的提高。在弄清硫酸盐气溶胶—云凝结核—云滴谱的转化关系前, 还很难说气溶胶的间接效应的量化研究结果的可信度有多大。

尽管一些初步的研究结果还存在较大的不确定性, 但气溶胶的气候效应是肯定的。一个重要的问题是如何从大量分散和不连续的气溶胶观测资料中提取适用于数值模式输入和计算结果比较的资料。只有在深入了解气溶胶物理化学特性的基础上, 才能借助不断改进的气候模式对气溶胶的气候效应进行定量研究。

解决上述问题的一种有效途径是利用空间卫星遥感结合地面光学探测的综合研究方法, 在区域尺度范围内给出气溶胶的光学厚度, 谱分布以及它们的时空分布等参数。

4 沙尘气溶胶研究

沙尘气溶胶又称为矿物气溶胶, 是对流层气溶胶的主要成分。据估计, 全球每年进

入大气的沙尘气溶胶达 $10 \sim 20$ 亿 t, 约占对流层气溶胶总量的一半。全球沙尘气溶胶主要来自撒哈拉沙漠地区、美国西南部沙漠区和亚洲地区。亚洲沙尘源区的地理位置及其形成沙尘暴的天气系统与其他沙尘源区不同, 同时, 亚洲源区位于高原, 起沙后更容易被输送到很远的地区^[18,19]。

1998年4月15~20日在中国发生的沙尘暴灾害, 影响面覆盖了几几乎中国东部所有地区, 给人民的日常生活和工矿企业、商业造成了极大破坏。在以后的几天时间, 大量浮尘通过大气上层的气流, 先向东北越过阿留申半岛和阿拉斯加, 后向南进入到太平洋彼岸的美国加利福尼亚和洛基山脉的北部(图1)。沙尘在空中所形成的“沙云”使号称“阳光之州”的加利福尼亚州从4月25~28日见不到阳光。2000年春季, 中国发生了10多次沙尘天气, 其频率之高、范围之广、强度之大为10多年来所少见。引起社会各界的广泛关注^[20]。

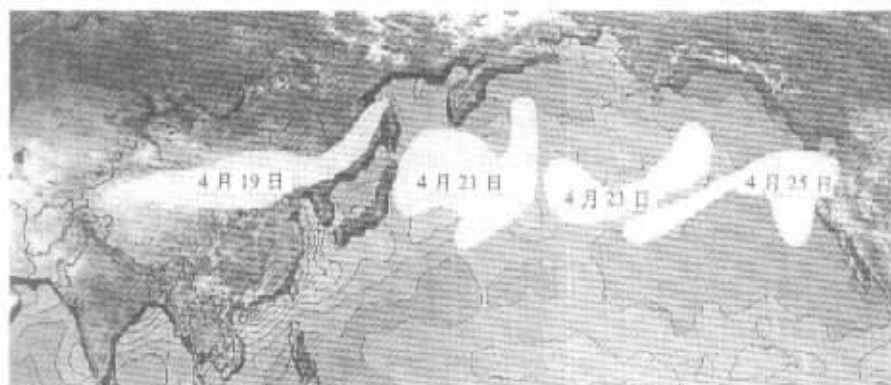


图1 1998年4月17日起源于中国新疆地区的特大沙尘暴

沙尘气溶胶与地球辐射系统的相互作用比其他气溶胶更复杂。这是由于沙尘气溶胶既能吸收又能反射太阳和红外辐射。因而在不同条件下对气候产生加热或冷却作用。目前, 有关沙尘气溶胶气候强迫的估计存在较大的不确定性, 甚至其强迫的正负号也没有确定(从 $+0.5 \text{ W/m}^2$ 到 -0.7 W/m^2), 间接效应的不确定性更大^[17]。

目前对于亚洲地区的沙尘气溶胶的研究还处于起始阶段, 已有的研究结果是分散的。沙尘气溶胶的物理、化学、光学特性以及影响沙尘输送的物理过程(起沙机制、分谱机制、沉降机制、沙尘表面的非均相过程等)都还很不清楚。与撒哈拉沙尘的研究相比还远远不够。尤其是由于缺乏相应的观测资料, 对于沙尘气溶胶输送过程所采用的参数化方案均直接引用自撒哈拉沙漠的模型, 这同亚洲的实际情况有较大的差距, 因而无法准确地描述亚洲沙尘气溶胶的产生和输送过程。

气候变化、土地利用和土地覆盖的变化、城市化和沙漠化的加剧等自然或人为因子引起的地表特征和大气状况的变化都可能改变沙尘暴的频率及强度。而目前我们对此并不清楚。亚洲沙尘的起沙、输送、沉降机理和有关模型的建立及验证, 沙尘气溶胶对酸雨的中和作用, 对硫酸盐气溶胶的形成及其谱分布和对海洋微量成分循环过程的影响将是科学界亟待深入研究的课题。

中国参加 ACE-Asia 研究对中国和国际组织均关系重大。中国参加 ACE-Asia 拟选择沙尘气溶胶为突破口和研究重点, 在沙尘研究方面, 中国拥有地域和研究基础两方面的优势。

5 气溶胶对环境 and 人体健康的影响

发现在气溶胶表面上的非均相化学过程对大气化学过程的影响是近年来的事。大气气溶胶涉及到的化学过程主要有两种: 一种是气溶胶形成的化学过程, 光化学烟雾是城市大气气溶胶的重要来源, 它是在城市污染大气中特定天气条件下发生的一种特殊现象, 是气相物质经过光化学反应急剧地向颗粒态物质转化的结果; 另一种是气相物质与气溶胶之间的化学过程, 包括气体分子与固体颗粒表面上的气/固非均相反应以及气体分子扩散到液滴内发生的气/液多相反应。它们是对流层中较为广泛而重要的化学过程, 但迄今对这方面的研究还很少。沙尘气溶胶表面的非均相化学过程将 SO_2 转化为 SO_4^{2-} , 从而对硫酸盐的分布产生影响。近年来, 发现 O_3 与颗粒物在之间存在密切的关系, 但对此了解还很少。弄清气溶胶与 O_3 之间的相互作用, 对研究环境质量和采取有效治理措施具有重要的意义。

目前, 对颗粒污染物的研究已从总悬浮颗粒物 (TSP) 转向可吸入颗粒物 (IP), 开始对粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物引起重视。美国环保局公布的大气颗粒物标准中, 1987 年用 PM10 替代 TSP; 1996 年增加了 PM2.5 细颗粒的 24 小时和年平均限值。由于可吸入细粒子携带细菌、病毒和致癌物质, 极易被人体吸收并沉积在肺中, 直接危害人体健康, 已引起了公众的极大关注。但目前关于这些可吸入有毒物质的组成以及对人体健康的影响还很不清楚, 有待深入研究。

随着人民生活水平的日益提高, 室内空气污染也受到了重视。除了炊事、家具、建筑装饰材料等释出的无机物、有机物和放射性物质外, 现在对生物气溶胶 (孢子、霉菌、细菌等) 也开始重视, 对它们的采样和检测的新方法正在研究中^[21]。

6 总结

大气气溶胶的研究已进入一个崭新的阶段。就气溶胶研究的发展趋势来看, 已从人为源逐渐向天然源、生物地球化学源发展; 从总体颗粒物的特性向单个颗粒物, 由微米级向亚微米, 甚至纳米级的粒度发展; 从一般无机元素成分向元素碳、有机碳、离子、有机物分子发展。目前, 国际上大气气溶胶的研究目的更为明确, 研究内容更为综合全面, 采用的技术手段更为多样, 应用范围更为广泛。大气气溶胶的基本特性、气溶胶的气候效应、沙尘气溶胶研究以及气溶胶对健康环境的影响将是今后几年亟待深入研究的前沿课题。

参 考 文 献

1 王明星, 大气化学 (第二版), 北京: 气象出版社, 1999.

- 2 刘毅、王明星、张仁健, 中国气溶胶研究进展, 气候与环境研究, 1999, 4(4), 406~414.
- 3 汪安瑛, 大气气溶胶研究新动向, 环境化学, 1999, 18(1), 10~14.
- 4 刘强、王明星、李晶、张仁健, 大气气溶胶研究现状和发展趋势, 中国粉体技术, 1999, 5(3), 17~23.
- 5 车凤翔, 生物气溶胶与人体健康, 第六届全国气溶胶学术会议论文集, 1997, 12~21.
- 6 任阵海, 浅谈我国的生存环境问题, 气候与环境研究, 1999, 4(1), 1~4.
- 7 任丽新、游荣高、吕位秀、张文、王秀玲, 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响, 气候与环境研究, 1999, 4(1), 67~73.
- 8 张仁健、王明星、张文、王跃思、李爱国、朱光华, 北京冬春季气溶胶化学成分及谱分布研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 6~12.
- 9 张仁健、王明星、戴淑玲、张文、王秀玲、李爱国, 北京地区气溶胶粒度谱分布研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 85~89.
- 10 王跃思、周立、王明星、郑循华、张仁健, 北京大气中可形成气溶胶的——形状及变化规律的初步研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 13~19.
- 11 Houghton J. T., 全球变暖, 戴晓苏、石广玉等译, 北京: 气象出版社, 1998.
- 12 李冰、刘小红、洪钟祥, 积云对二氧化硫和硫酸盐气溶胶作用的研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 20~24.
- 13 王明星, 气溶胶与气候, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 1~5.
- 14 王喜红、石广玉, 东亚地区人为气溶胶柱含量变化的模拟研究, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 58~66.
- 15 张立盛、石广玉, 全球人为硫酸盐和烟尘气溶胶资料及其光学厚度的分布特征, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 67~74.
- 16 Houghton J. T.(eds.), Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1995.
- 17 Houghton J. T.(eds.), Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1996.
- 18 安俊岭、张仁健、韩志伟, 北方 15 个大城市总悬浮颗粒物的季节变化, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 25~29.
- 19 张美根、韩志伟、雷孝恩, 天津市总悬浮颗粒物浓度分布的数值模拟, 气候与环境研究, 2000, 5(1), 30~35.
- 20 张仁健、王明星、浦一芬、刘强、符建中、张文, 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析, 气候与环境研究, 2000, 5(3), 259~266.
- 21 Derek Elsom, *Smog Alert: Managing Urban Quality*, Earthscan Publications Ltd. London, 1996.

Frontier of Atmospheric Aerosols Researches

Wang Mingxing and Zhang Renjian

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Frontier of atmospheric aerosols researches are summarized from four aspects: aerosol characteristics, effects on radiative forcing, dust aerosols, effect on environment and human healthy. International research plans concerned about aerosols are briefly introduced. The main fields and trends of atmospheric aerosol research in the future are pointed out and discussed.

Key words: aerosol; climate change; dust aerosol; characterization experiment