

石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应. 大气科学, 2008, 32 (4): 826~840

Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 826~840

大气气溶胶的辐射与气候效应

石广玉¹ 王标¹ 张华² 赵剑琦¹ 檀赛春¹ 温天雪¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘要 大气气溶胶的辐射与气候效应是目前全球气候变化研究的一个热点, 也是一个难点问题。本文从介绍一些基本概念和科学问题入手, 比较全面地回顾了我国, 特别是中国科学院大气物理研究所建所以来有关方面的研究工作, 重点在于探讨一些有待解决的科学问题。

关键词 大气气溶胶 气候变化

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0826-15

中图分类号 P422

文献标识码 A

The Radiative and Climatic Effects of Atmospheric Aerosols

SHI Guangyu¹, WANG Biao¹, ZHANG Hua², ZHAO Jianqi¹,
TAN Saichun¹, and WEN Tianxue¹

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols have been one of the key issues in understanding the global climate change. By introducing the related concepts and scientific problems, this paper reviews the works on this area by Chinese scientists, especially the works done since the foundation of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. The scientific issues to be solved are highlighted and discussed.

Key words atmospheric aerosols, climate change

1 引言

根据 2007 年 2 月发布的政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 4 次科学评估报告^[1], 在 1906~2005 年的过去一百年间, 全球平均地面温度已经上升了 0.74℃; 而且这种增暖不仅出现在地面, 也出现在大气对流层, 并由此引起了地球气候系统其他要素的变化, 例如海平面上升、云和降水及其格局的变化, 甚至是极端天气、气候事件的变化。因

此, 以全球变暖为代表的全球气候变化正在成为各国政府和一般民众所关心的重大地球科学问题。

IPCC 报告进一步认为: 造成上述全球变暖的主要原因是 1750 年的工业革命以来, 由人类活动所产生的大气温室气体 (Greenhouse Gases, 缩写为 GHGs) 的排放。目前所得到的最新结果是: 在造成有关气候变暖的辐射强迫中, 长寿命温室气体 (包括 CO₂、CH₄、N₂O 和卤代烃) 的总辐射强迫为 2.63[±0.26]W/m², 对流层 O₃ 及由 CH₄ 生成的

收稿日期 2008-01-28, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403705、2006CB403706、2006CB403707, 国家自然科学基金资助项目 40490260, 国家科技支撑计划 2007BAC03A01

作者简介 石广玉, 男, 1942 出生, 研究员, 主要从事大气辐射、大气气溶胶与全球气候变化等领域的研究。E-mail: shigy@mail.iap.ac.cn

平流层水汽的辐射强迫分别为 $0.35 [-0.1, +0.3]$ W/m^2 和 $0.07 [\pm 0.05]$ W/m^2 , 总计为 $3.05 \text{ W}/\text{m}^2$ 。与此相比, 由自然原因, 例如太阳输出变化, 引起的辐射强迫则只有 $0.12 [-0.06, +0.18]$ W/m^2 。

另一方面, 人类活动所造成的地球气候系统辐射强迫因子的变化, 并不都是使全球变暖的, 有相当一部分因子可以导致全球变冷。例如, 土地利用及覆盖的变化 (LUCC, 主要是森林砍伐和草原破坏) 可以产生 $-0.20 [\pm 0.20]$ W/m^2 的负辐射强迫。但是, 实际上导致全球变冷的主要因子是大气气溶胶。除黑碳气溶胶可产生 $0.10 [\pm 0.10]$ W/m^2 的辐射强迫外, 绝大部分气溶胶粒子 (包括硫酸盐、硝酸盐以及矿物沙尘等) 总的直接辐射强迫和间接辐射强迫 (仅包括云反照率效应, 见下) 分别为 $-0.50 [\pm 0.40]$ W/m^2 和 $-0.70 [-1.1, +0.4]$ W/m^2 , 二者总计达到 $-1.2 \text{ W}/\text{m}^2$, 已经接近工业革命以来大气主要温室气体二氧化碳所产生的 $1.66 \text{ W}/\text{m}^2$ 气候变化辐射强迫。

现在的问题是, 在排除大气气溶胶的其他环境效应, 例如对人体健康、能见度等影响之后, 单就其气候效应而言, 它在过去的气候变化中究竟起了何种作用? 如何评价它在未来全球气候变化中的作用? 如果我们因为其他环境问题的考虑, 控制、减少大气气溶胶排放的话, 会不会加速全球变暖的步伐?

本文拟较为全面地评述我国, 特别是中国科学院大气物理研究所建所 80 年来有关领域的研究状况。第 2 节将简述大气气溶胶辐射与气候效应的基本概念, 以及所涉及的一些基本科学问题。第 3 节回顾国内 (外) 的研究现状, 最后, 在第 4 节探讨未来的一些研究课题。

2 基本概念与科学问题

2.1 大气中的颗粒物

地球大气中除了气体成分之外, 还含有大量的颗粒物, 即所谓大气气溶胶。一般认为, 大气气溶胶粒子的直径在几个纳米 (nm) 到几十微米 (μm) 之间。直径小于 $1 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子, 在大气中的浓度一般是每立方厘米几十到几千个; 而直径大于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子, 一般少于每立方厘米 1 个。各个气溶胶粒子可以是固体颗粒, 也可以是液滴或者是由固体和液体颗粒共同构成; 在化学上, 它们

可以是均质的, 也可以是非均质的 (粒子的尺寸大小、形状和化学组成都可以不同)。气溶胶粒子的形状, 可以像球形液滴一样, 非常简单; 也可以是非球形的, 十分复杂。

大气气溶胶可以直接来自于源释放 (原生气溶胶), 也可以通过气-粒转换过程形成 (次生气溶胶, 例如大气 SO_2 可以转换成硫酸盐气溶胶)。另外, 按照气溶胶粒子所处环境的不同, 有时也把气溶胶分为环境气溶胶和室内气溶胶, 前者是在室外的地球大气中存在的气溶胶, 可以是人为来源的也可以是自然界产生的, 这是本文涉及的内容; 后者是室内的, 多与电子工业等高新技术所需要的高洁净环境有关, 本文将不涉及。

大气中含有的气溶胶粒子是各种各样不同类型的, 而且在不同的学科领域和日常生活中, 根据其外观和来源, 常常有各种不同的名称。例如: 硫酸盐气溶胶 (硝酸盐、铵盐等)、生物气溶胶、云滴、尘和霾、烟尘、飞沫等等, 不一而足。

与大多数温室气体相比, 要给出各种大气气溶胶的“源强”是很困难的^[2]。这是因为, 第一, 许多气溶胶 (例如硫酸盐气溶胶、次生的有机气溶胶) 并不是直接释放到大气中的, 而是由气态的前体物在大气中通过化学或光化学反应所形成; 第二, 某些气溶胶 (例如尘埃和海盐气溶胶) 是由谱分布和折射率等物理、化学特性相差很大的粒子组成的, 因为粒子的大气寿命和辐射特性与此密切相关, 所以对这类气溶胶提供一个单一的源强是没有意义的; 第三, 多种气溶胶经常结合在一起, 形成混合颗粒, 其大气寿命和辐射性质与构成它们的原来的气溶胶成分可以很不相同; 最后, 云可以以一种非常复杂的方式影响气溶胶, 例如通过湿沉降的清除、通过液相化学增加气溶胶的质量以及在云中和云附近形成新的气溶胶等等, 这给确定某一特定气溶胶的源释放强度带来很大的困难。有关原生气溶胶颗粒释放以及大气气溶胶前体物的年释放源强的估计, 可以参阅文献^[2]。

大气气溶胶的一个突出特征是其物理化学性质的高度时空可变性, 气溶胶粒子在大气中的寿命一般只有几天到几周, 其主要清除机制是干沉降 (从大气中直接降落到地面) 和湿沉降 (在降水过程中与云滴一起落到地面)。

2.2 大气气溶胶的辐射-气候效应

地球气候可以在一切时间尺度上因太阳短波辐射的散射和吸收以及地气系统吸收和发射的红外热辐射的变化而变化。如果气候系统处于平衡态, 则其吸收的太阳辐射能将精确地等于地球和大气向外空发射的红外辐射能。任何能够扰动这种平衡并因此可能改变气候的因子都被称为辐射强迫因子, 它们所产生的对地气系统的强迫则称为辐射强迫^[3]。

辐射强迫在数值上定义为某种辐射强迫因子变化时所产生的对流层顶平均净辐射的变化(太阳或红外辐射)(单位: W/m^2)。之所以选取对流层顶是因为: 至少在简单气候模式中, 在全球平均的意义上, 地表和对流层紧密地耦合在一起, 所以应当将它们作为一个单一的热力学系统来处理。当辐射强迫因子变化时, 平流层温度也将发生变化。当然, 可以把平流层温度的这种调整看作是一种反馈过程。但是, 这种调整的时间尺度一般只有几个月, 而地表-大气系统对强迫的调整由于海洋巨大的热惯性却需要十年际的时间尺度。因此, 两者相比, 可以把平流层温度的调整作为强迫本身的一部分来处理。按照是否允许平流层温度进行调整, 可以把辐射强迫具体划分为^[4]: (1) 瞬时辐射强迫(IRF), 不考虑平流层温度的变化; (2) 调整过的辐射强迫(ARF), 允许平流层温度对瞬时辐射强迫重新进行调整。

如前所述, 在研究造成工业革命以来气候变化的驱动力(辐射强迫)以及预测未来的气候变化时, 不但要考虑大气温室气体的变化, 还要考虑其他强迫因子特别是大气气溶胶的变化。由于大气气溶胶可以散射和吸收太阳短波辐射以及地球长波辐射, 影响地气系统的辐射平衡(直接效应); 与此同时, 它们还可以作为凝结核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应的速度(间接效应); 因此, 大气气溶胶在大气辐射和气候变化的研究中占有重要地位。

如何评价某种气候驱动因子(自然或人为)的气候效应, 实际上已经提出了若干种方法。例如:

(1) 地面温度的变化。如果想用一个单一的热力学物理量来表征全球气候状况的话, 那么地面温度无疑是最恰当不过的, 因为地面温度的变化是气候效应的最直观、也是最终的一种度量。但是, 地面温度变化取决于地气系统中的多种反馈过程, 例

如水汽-温度反馈、雪冰反照率-温度反馈以及云-气候反馈等。对这些反馈过程, 目前尚未完全了解。因此, 即使在气候系统的外部强迫已知的条件下, 对地面温度变化的预测的不确定性仍然很大。比如, 当大气中二氧化碳浓度增加 1 倍时, 目前预测的地面温度变化在 $1.5 \sim 4.5^\circ C$ 之间, 相差 3 倍左右。

(2) 辐射强迫。另一种评估气候强迫因子所产生的气候效应相对大小的方法是, 计算某种强迫因子所引起的对流层顶净辐射通量的变化, 即辐射强迫(RF)。用辐射强迫来表征不同温室气体气候效应相对大小的好处是: 第一, 辐射强迫可以提示气候变化的总趋势。如上所述, 辐射强迫将扰动入射和出射辐射的平衡, 为了建立新的辐射平衡, 气候系统将响应此种扰动而发生变化。例如, 平均而言, 当 $RF > 0$ (定义向下的辐射通量为正) 时, 它将加暖地面和对流层; 而当 $RF < 0$ 时, 地面和对流层将会变冷。第二, 由于避开了地气系统中的多种复杂反馈过程, 因此可以比确定气候变化本身高得多的精度来确定它, 从而得以比较它们的相对大小, 并进而给控制和减缓气候变化的政策制定提供参考依据。

(3) 还有全球增温潜能(GWP)以及近年来提出的全球温变潜能(GTP)等。

按照产生强迫的物理机制, 辐射强迫又可分为: (1) 直接辐射强迫: 由增强温室效应的 GHGs 以及大气气溶胶等的变化, 通过辐射效应直接产生的强迫; (2) 间接辐射强迫: GHGs 或气溶胶通过化学或物理过程影响其他辐射强迫因子所产生的间接效应, 例如: NO_x 、CO 等的变化将影响 GHGs (特别是对流层 O_3) 的浓度, 大气气溶胶影响云的辐射特性等; (3) 对于大气气溶胶而言, 还有半直接效应等。

与大气温室气体的辐射强迫相比, 大气气溶胶的辐射效应显得更为复杂。进入地球大气的太阳能, 可以在大气内部被吸收、散射, 然后透射到地面, 或者被反射回外空。由于大气气溶胶的存在, 引起的这些过程的改变叫做气溶胶(辐射)强迫。虽然从 1994 年开始, IPCC 一直建议并在其科学评估报告中使用时对流层顶处的净辐射通量变化作为辐射强迫的定义, 但有时仍然把大气吸收的太阳能的变化、到达地面的太阳能的变化与反射回外空的太

阳能的变化分别叫做大气强迫、地面强迫和大气顶 (TOA) 强迫^[5]。对于像硫酸盐这样的非吸收气溶胶来说，作为第一级近似，其地面强迫与 TOA 强迫几乎相同；也就是说，被气溶胶反射回外空的入射太阳辐射 (TOA 强迫) 就是地面上减少的入射太阳辐射 (地面强迫)。但当存在吸收性气溶胶时，地面上所减少的太阳辐射将等于反射回外空的太阳辐射与大气吸收的太阳辐射之和；因此，地面强迫将大于 TOA 强迫。

大气气溶胶的辐射强迫可以分为以下几种类型，图 1 给出了目前已经辨识出并认为是重要的气溶胶粒子的各种辐射强迫机制。

直接辐射强迫：气溶胶粒子可以散射和吸收太阳辐射，从而直接造成大气吸收的太阳辐射能、到达地面的太阳辐射能以及大气顶反射回外空的太阳辐射能的变化。其中不涉及与任何其他过程的相互作用，所以被称为气溶胶的直接强迫。当然，大气气溶胶粒子也可以吸收和散射长波红外辐射，但相对而言，不太重要。

间接效应：气溶胶粒子的存在，可以改变云的物理和微物理特征并进而改变云的辐射特征，影响太阳能在地气系统中的分配。由于这种效应涉及到气溶胶与大气其他辐射活性成分 (例如云) 的相互作用，因此叫做间接效应。实际上，气溶胶与云和降水之间具有多种相互作用方式，它既可以作为云凝结核或者冰核，也可以作为吸收性粒子将吸收的太阳能转换为热能，使其在云层内重新分配。总体上来说，气溶胶的间接效应，可以分为第一类间接

效应和第二类间接效应 (如图 1 所示)。

云反照率效应 (又称第一类间接效应，或 Twomey 效应)：是指在云内液态水含量不变的情况下，气溶胶粒子的增多会增加云滴数浓度，但使云滴粒子变小，从而导致云反照率变大，这是一个很单纯的辐射强迫过程。需要注意的是，无法将反照率效应与其他效应简单地分离开来。事实上，对于一个给定的液态水含量，云滴谱有效半径的减小将同时减少降水的形成，进而可能会延长云的生命期，而云生命期的增加又会导致时间平均或区域平均的云反照率增加 (云生命期效应，第二类间接效应)。

间接效应还包括：

冰核化效应：它指的是由于冰面与水面上的水汽压不同，冰核的增多将导致过冷液态水云的迅速冰核化。与云滴不同的是，这些冰晶成长于一个高度过饱和环境中，可以很快地达到降水所需要的尺度，从而将非降水性云转变为可降水云。

热力学效应：它指的是由于云滴变小，凝结滞后，致使过冷云扩展到更低的温度。此外，气溶胶除了会导致大气顶辐射收支的变化外，它还影响地面的能量收支，从而影响对流、蒸发和降水。

半直接效应：大气气溶胶的气候效应，除了它所产生的直接辐射强迫与间接效应之外，还有一种所谓半直接效应。它指的是：烟尘等对太阳辐射具有较强吸收作用的气溶胶，会将其吸收的太阳辐射能作为热辐射重新向外释放，从而加热气团、增加相对于地表的静力稳定性，也可能会导致云滴的蒸

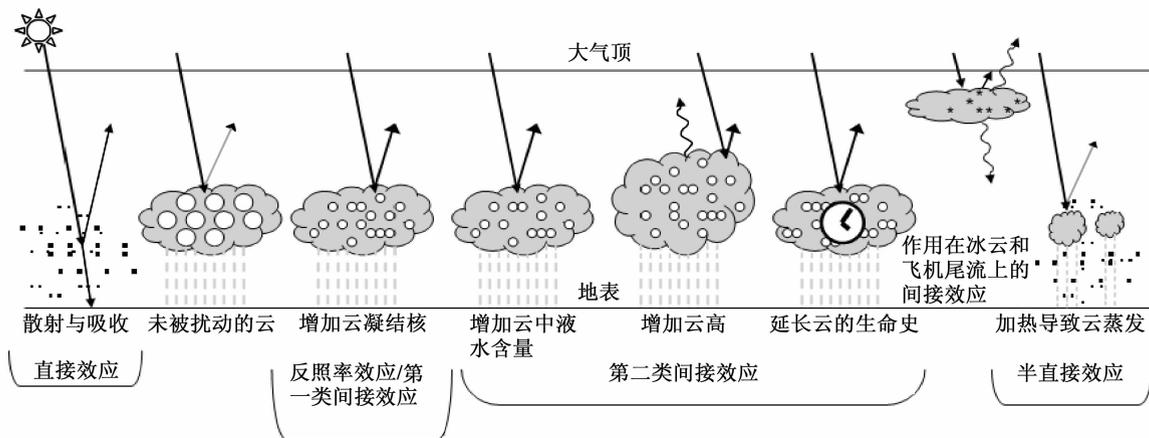


图 1 气溶胶粒子的各种辐射强迫机制 (引自文献[6])。黑点：气溶胶颗粒；空心圆：云滴；直线：太阳短波辐射；波浪线：红外辐射
Fig. 1 Radiative mechanisms of aerosol particles (from reference [6]). The dots, circles, straight lines, and wave lines denote aerosol particles, cloud droplets, solar radiation, and infrared radiation, respectively

发,造成云量和云反照率的减小,并进而影响气候^[6, 7]。

大气气溶胶除通过上述直接、半直接与间接效应,影响地气系统的辐射收支并进而影响地球气候外,气溶胶粒子的存在还将引起大气加热率和冷却率的变化,直接影响大气动力过程。沙尘等大气气溶胶还可能携带营养盐,当其沉降到海洋时会影响海洋初级生产力,影响辐射活性气体(例如 CO₂、CH₄ 和 DMS 等)的海气交换通量,并进而影响全球碳循环,最终造成对地球气候系统的冲击。这些影响均可以归类于大气气溶胶的“间接气候效应”,它们可能是非常重要的,有关研究刚刚开始不久,难于给出任何定量描述。

不难看出,大气气溶胶直接辐射强迫的符号是可正可负的,取决于气溶胶粒子反射和吸收太阳辐射的相对能力以及地面反照率等其他因子。对于像硫酸盐这样的几乎不吸收太阳辐射的气溶胶来说,其直接辐射强迫是负的,会使地面和低层大气冷却。但是,对像黑碳这样的强烈吸收太阳辐射的气溶胶而言,其直接辐射强迫将是正的,它会像 CO₂ 等温室气体一样,使大气增暖。另一方面,大气气溶胶的间接效应,不管是第一类还是第二类,其符号总是负的;而所谓半直接效应,其辐射强迫的符号却是正的(注意:这里所说的正或负系指气溶胶对气候系统的总体效应)。因此,虽然总体来说,由于硫酸盐等非吸收性气溶胶占了大气气溶胶的相当部分^[2, 8, 9],而黑碳和矿物(土壤或沙尘)气溶胶的吸收也不占统治地位,因此大气气溶胶的“净”辐射强迫应当是负的,不过,具体情景是十分复杂的。

如前所述,使情景变得更复杂的还有,大气气溶胶不但可以吸收和散射太阳辐射,而且也可以吸收和散射红外热辐射;而这两种效应所产生的辐射强迫以及对气候的影响是完全不同的。

另外,以上的讨论只限于对流层气溶胶,其中也包括由平流层输送到对流层的火山气溶胶。关于火山气溶胶的辐射强迫,由于它只对年际尺度的气候产生影响,并不是长期气候变化趋势的驱动因子,本文将不作为讨论重点。

2.3 一些基本的科学问题

从物理本质上来说,大气气溶胶的直接辐射辐射强迫与间接气候效应均决定于气溶胶本身的物理

特性(浓度、谱分布以及粒子形状等)、化学与光学特性(组成与复折射率等)以及它所处的大气环境(大气温度结构、大气相对湿度、气溶胶层所在的高度以及下垫面的反照率等等)。但是,为了根据气溶胶在大气中的含量,利用辐射传输模式计算其直接辐射强迫,就气溶胶本身而言,以下三个物理量是最重要的。(1)气溶胶光学厚度 $\tau(\lambda)$,它表征气溶胶粒子对光的衰减作用;(2)单次散射比 $\omega(\lambda, z)$ (俗称单次散射反照率),它的取值范围当在 0~1 之间:当气溶胶粒子无吸收时, $\omega(\lambda, z) = 1$;而当粒子为全吸收型时, $\omega(\lambda, z) = 0$;(3)不对称因子 $g(\lambda, z)$,用来度量前向与后向散射的辐射量之比。

如果我们能够精确地知道上述气溶胶粒子的物理、化学和光学特性及其时空分布,那么就可以从理论上计算上述三个物理量。但实际上,要“精确”得到所有这些信息是不可能的,故经常采取参数化的处理方法。在这三个参数中,大气气溶胶的光学厚度是可以通过野外测量获得的。最常用的仪器是太阳光度计;直接太阳辐射计和遮挡辐射计的测量结果也可以用来推算气溶胶光学厚度。在常规的气象台站的日射观测中,几乎所有的辐射观测仪器都是非分光的,所以无法得到不同波长的大气气溶胶光学厚度。在利用地面太阳辐射观测资料推算大气气溶胶的光学厚度中,一个值得注意的问题是:所有高度上具有不同物理、化学和光学性质的粒子以及云(特别是不太可见的卷云),都可能对总的光学厚度有贡献,这使得太阳光度计和辐射计的测量结果的解释变得复杂化,而随着高度而变的相对湿度和温度使问题变得更为复杂^[9, 10]。

在确定气溶胶引起的行星辐射收支变化的符号上也存在困难,它取决于吸收散射比、地面反照率、气溶胶的总光学厚度以及太阳高度角等。

最后是非球形散射问题。一般而言,大气中气溶胶粒子是非球形的,特别是沙尘粒子。在目前的辐射计算中通常采用球形假定只是为了便于处理。但是,采用非球形处理的代价和价值是一个有待研究的问题。

因此,虽然气溶胶粒子影响气候是毫无疑问的,但是与微量温室气体相比,要评估气溶胶的气候效应却困难得多。如上所述,这不但因为气溶胶是由具有不同谱分布、形状、化学组成和光学性质

的物质构成的, 还由于它们浓度的时空变化可达几个数量级, 而且缺乏其时空变化的观测资料。

3 研究现状

总体来说, 我国大气气溶胶辐射-气候效应的研究起步较晚。毛节泰等^[10]曾对 20 世纪中国的气溶胶研究进行了评述。1980 年代以前中国的气溶胶研究主要通过气溶胶粒子采样, 研究粒子谱分布及其与地理环境、天气条件的关系。1980 年代以来, 还进行了高空气球探测, 将气溶胶的观测范围扩展到 30 km 以上。在地面、飞机、轮船、气球等多平台气溶胶采样的基础上, 对不同地区、不同时间的气溶胶进行了多种化学成分和物理特性分析, 并获得其分布特征以及与周围环境的关系, 例如利用毛玻璃积分法所进行的气溶胶光学性质的分析, 利用试剂薄膜法、PIXE 方法所进行的气溶胶成分分析等。

1980 年代以来, 国内还开展了针对气溶胶的多种地基遥感和卫星遥感研究。地基遥感方法主要有: 太阳直接辐射的宽带分光辐射(太阳光度计)遥感、多波段光度计遥感、根据天空散射亮度分布遥感、全波段太阳直接辐射遥感、天空辐射计遥感、激光雷达遥感等, 并在遥感方法方面进行了很多理论和实践上的探索, 从有限的观测设备和信息中挖掘尽可能多的有关气溶胶辐射性质的信息, 获得气溶胶的长时间资料序列。

利用气溶胶观测资料, 部分地区开展了局地气溶胶辐射效应的研究, 包括兰州地区、重庆地区、黑河地区等。而将气溶胶与气候模式结合的研究中则使用了包括一维辐射对流、二维能量平衡、三维大气环流等不同气候模式。

进入 21 世纪以来, 气溶胶研究受到更多的关注, 观测设备和方法也更趋多样化。地基的气溶胶直接观测包括对气溶胶数浓度、质量浓度以及谱分布的观测^[11~15]和对气溶胶的采样分析观测^[16~19]。地基的遥感观测以多波段太阳直接辐射观测(太阳光度计)为主^[20~23], 并对其他多种辐射资料的利用和遥感方法进行了探索, 包括利用宽带太阳直接辐射累积量资料反演光学厚度^[24], 利用曙暮光的天空辐射反演近地层气溶胶光学厚度^[25], 根据气溶胶多波段光学厚度资料反演气溶胶粒子谱^[26], 利用天空紫外辐射反演气溶胶光学厚度^[27], 以及利

用宽带漫射信息反演气溶胶单次散射反照率^[28]等。开发和利用各类激光雷达, 并用于大气气溶胶的地基观测^[29~33]和机载观测^[34]。此外, 还开展了一些利用其他设备的气溶胶机载观测^[35~36]。

在大气气溶胶的卫星资料反演方法的研究和卫星资料的验证方面也进行了很多工作, 特别是针对 MODIS 资料的研究工作^[37~43]。此外, 还有针对静止气象卫星资料的反演算法研究^[44, 45]和其他一般性理论研究^[46, 47]。

基于各类根据宽带太阳辐射资料的气溶胶反演方法, 有大量工作对中国陆地区域气溶胶光学厚度等参数进行了分析^[48~53]。在这些观测和资料分析结果的基础上, 许多作者分析了中国各地大气气溶胶的变化特征及其与其他观测量(如能见度)和气象条件的关系^[54~62]。

中国科学家还开发和使用了全球和区域的气溶胶化学输送模式^[63], 对东亚地区气溶胶的生成、转化和输送过程进行了模拟研究, 包括硫酸盐气溶胶^[64, 65]、沙尘^[66, 67]、黑碳气溶胶^[68, 69]等。

在观测和模拟的气溶胶分布资料的基础上, 很多作者利用辐射传输模式和气候模式对气溶胶的辐射强迫进行了估算^[70~82], 主要以硫酸盐气溶胶和沙尘气溶胶为主, 并部分地讨论了气候效应。

一个比较特殊的问题是如何考虑非球形气溶胶粒子的散射问题。虽然, 目前已有不少的理论实验表明, 非球形粒子的光散射特性与其对应的所谓等效球无论是光学截面还是散射函数, 都有本质的区别^[83~88], 但是, 目前非球形粒子光散射研究所面临的一个基本挑战是如何发展完善快捷而最有足够精度的方法, 如桥接技术^[89~90], 以及巨大的计算资源消费与其所带来的气溶胶辐射-气候效应估算之间的“价能比”问题。当然, 对于沙尘气溶胶辐射强迫的研究来说, 非球形散射问题或许是相当重要的。

相对而言, 对气溶胶-云相互作用的过程及其间接气候效应研究还比较少。张连众等^[91]对大气平流层中的重力作用占优的气溶胶粒子之间的耦合碰并问题进行了理论研究。黄梦宇等^[92]利用记载粒子探测系统对层状云进行了微物理特征探测, 初步探讨了气溶胶对云的影响。赵春生等^[93]利用大气气溶胶和云分档模式研究海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用。黄蔚薇等^[94]利

用气溶胶和云滴谱航测资料,讨论了沙尘气溶胶粒子表面变性产生的不溶性沙尘粒子外包可溶性硫酸铵层的混合气溶胶粒子作为凝结核的增长规律,计算了由混和核形成的云滴谱特征,并与纯硫酸铵盐核进行对比。

此外,还有一些综述性研究。石广玉和赵思雄^[95]对沙尘暴研究进行综述,并探讨了其中一些值得注意的科学问题。颜鹏等^[96]对大气气溶胶模式的发展和应用作了简单的回顾和评述,介绍了较流行的几个气溶胶热力学平衡模式和适用于城市区域空气质量研究的气溶胶模式的特点。杜睿^[97]简述了国内外有关大气生物气溶胶的研究进展。

亚洲频繁发生的沙尘暴会向大气中注入大量沙尘气溶胶粒子。目前,关于亚洲沙尘气溶胶的环境和气候效应问题已经开始受到关注,并有了一些研究工作。近年来比较系统的国际研究计划是已于2001年结束加强观测的亚洲气溶胶特征试验(ACE-Asia),其中曾将矿物(沙尘)气溶胶作为其主要研究内容之一^[98];而于2001年开始的中国科学院-日本文部科学省的“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境的影响的研究(ADEC)”的合作项目^[99, 100],以及“大气棕色云团(ABC)”计划^[5],研究重点仍然在沙尘气溶胶的气候效应上。但是,就沙尘暴和沙尘气溶胶的气候、环境效应来说,其中一个亟待加强研究的问题是沙尘气溶胶粒子及其携带的微量物质对海洋生态环境的影响^[95]。

Jickells等^[101]的研究表明铁循环中的一个环节即含铁的土壤尘通过大气从陆地向海洋的输送会影响海洋生物地球化学,这一影响又会对气候和沙尘的产生起反馈作用。自此,研究者们越来越认识到气溶胶这一间接效应的重要性。若干研究已经表明,大气气溶胶输入是远洋中许多元素和化合物的重要来源,可以影响海洋初级生产力。太平洋上空的海气交换研究项目(SEAREX)^[102]和大西洋上空的大气海洋化学实验(AEROCE)^[103]提供了两个大洋上空大气沙尘气溶胶的浓度、沉降速率及其时空分布的观测数据,试验发现:海洋中的许多元素,如Pb、Al、V、Mn、Zn以及某些碳氢化合物和某些有机合成化合物,经由大气长距离输送是比河流入海更为重要的来源;海水,特别是远洋的海水中的铁主要来源于大气对沙尘的输送和沉降^[104]。观测表明,频繁发生的沙尘事件不仅给海洋带来丰

富的营养盐,特别是铁,而且在它从陆地到海洋的长距离输送过程中,还会成为携带许多人类影响的污染物(例如 NO_x 和 SO_4^{2-})的介质。据估算,全球每年输送到海洋的沙尘大约是 $4.5 \times 10^8 \text{ t}$,其中北太平洋占了15%^[101]。各种大的加铁试验,如2002年进行的南大洋海铁试验(SOFeX),都表明加铁的确有助于浮游植物的滋长,并提高固碳效率;另一方面,由于初级生产力的增加能够直接增加海洋对大气 CO_2 的吸收,所以试验中发现有关海区的 CO_2 和 NO_3 的浓度同时大幅度下降^[105~108]。

4 未来的研究焦点

4.1 大气气溶胶物理、化学与光学特性的观测

从本质上说,对气溶胶辐射-气候效应定量化的难点在于我们缺乏有关大气气溶胶物理、化学与光学特性及其时空分布(包括垂直分布)的确切、系统的信息。到目前为止,国内虽然已经进行了大量观测与研究,但它们多半是分散、不系统的,我们迫切需要一个较为完整、包含主要大气气溶胶成分,例如硫酸盐、硝酸盐、铵盐气溶胶,有机气溶胶,黑碳气溶胶,沙尘气溶胶等的数据库。为了达成这一目标,一个精心设计的科学计划显然是必要的,应当动用一切的地基和空基观测手段来完成这一任务。期望在不久的将来,能够有一个中国大气气溶胶模式问世。

4.2 气溶胶直接辐射强迫的研究

相对于大气气溶胶的间接气候效应而言,估算其直接辐射强迫似乎较为简单,但是,仍然存在一些重要问题需要解决。特别是,由于缺乏关于气溶胶吸收的观测资料以及陆面反照率特征(比海洋反射率变化大,且各向异性)的详细资料,因此评估起来较为困难。解决这个问题的途径之一是充分利用卫星和地面观测资料。例如,目前美国NASA的A-Train计划拥有6颗极轨卫星,它提供了一个空前的机会来改进对气溶胶光学参数的认识,MODIS、POLDER、TOMS等延续了气溶胶的长期观测仪器,另外,它还增加了星载激光雷达(CALIPSO)用以观测气溶胶的垂直廓线^[109]。

无论晴空还是有云条件下,过去几十年内地面太阳辐射长期观测记录都显示出明显的变化趋势^[110, 111]。与1990年之前广泛区域观测到的地面太阳辐射的明显下降(即所谓的全球变暗)不同,

最近 10 年内地面太阳辐射出现持续的增加。而在中国地区, 地面太阳辐射也存在类似的变化趋势^[112~114]。资料分析结果表明, 云量变化不是造成地面辐射趋势发生转变的主要因素, 这种变化可能是由于大气气溶胶直接及间接效应相互作用的变化引起的。目前, 依据地面观测资料推断气溶胶辐射强迫常见的方法有以下三种: (1) 利用地面或卫星反演得到的气溶胶辐射特性参数, 结合其他资料(如 TOMS 臭氧总量、水汽资料等), 使用大气辐射传输模式计算得到气溶胶辐射强迫; (2) 利用 AERONET 站点资料结合地面短波太阳辐射推断气溶胶辐射强迫; (3) 利用天空辐射计及地面太阳辐射观测资料推断气溶胶辐射强迫。

4.3 气溶胶间接气候效应的研究

如上所述, 气溶胶间接气候效应问题是目前最为关注的科学问题。但是, 由于受到多种因素的影响, 目前并不能通过卫星遥感观测取得云滴数密度与气溶胶数浓度之间的一致关系。特别是, 气溶胶粒子成分及其混合方式对于活化过程和云滴谱的影响仍然很不确定, 而对气溶胶成分与气溶胶粒子大小的相对重要性也存在不同观点。关于气溶胶对冰相云效应的观测与研究仍然很不充分。对于观测而言, 有几个关键的问题需要解决: (1) 如何将不同的效应(如对云粒子谱的影响和对 LWP 的影响, 气溶胶的其他间接效应、各类反馈效应等)分离开; (2) 如何观测有云状况下的气溶胶, 亦即实现气溶胶和云的真正同时同地观测。

在这种情况下, 对气溶胶间接效应的模式估算自然存在很大的不确定性。不同模式之间, 由于对各类过程的表达方式不同, 所得到的结果存在较大的分歧。更何况气候模式对云本身的模拟就存在着很大的不确定。与观测研究中的情形类似, 在气候模式中也很难对相互耦合的气溶胶过程及其气候效应加以区分^[1]。

在研究气溶胶直接辐射强迫和间接气候效应中, 另外一个值得注意的问题是, 气溶胶输送过程中的物理、化学特性变化, 即所谓内外混合问题。长期以来绝大部分模式都只研究外混合过程, 但是, 气溶胶之间的影响可能更重要。

4.4 气溶胶对海洋生态环境的影响

大气气溶胶通过沉降对海洋生物提供营养物, 影响其初级生产力, 并进而影响 CO₂ 和 DMS 等辐

射活性气体的释放, 影响海洋生物泵过程, 最后导致海洋和全球碳循环的变化, 带来极为重要的气候和环境效应。这是一个非常复杂的过程, 其中有很多问题亟待加强研究。例如, 各海域气溶胶的来源及其入海通量, 气溶胶的长距离输送、沉降过程及其中所发生的物理、化学特性变化, 影响气溶胶营养物生物可利用性的主要因子及其对海洋生态系统的影响, 气溶胶输入对海-气界面 CO₂ 等重要辐射活性气体交换量的影响, 以及这些过程的气候含义。例如, Lin 等^[115]研究发现南海的气溶胶有不同的来源, 包括中国东部的工业/城市污染, 来自亚洲沙漠的风送沙尘以及来自婆罗洲(Borneo)和苏门答腊(Sumatra)的生物质燃烧, 这些源又会在不同时间影响不同空间的南海海域。那么其他海域的情况又如何? 目前也有研究表明春季发生在中国西北的沙尘暴次数跟黄、渤海海域的赤潮次数有相关的趋势^[116], 亚洲沙尘有可能会促进日本海的春季藻华现象^[117], 以及亚洲沙尘跟西太平洋的生物活动有一定的关系^[118]。但是, 目前的研究仍处于起步阶段, 不但没有定量的结果, 而且缺乏基本的观测数据, 特别是中国近海等亚洲海域。

2001 年 2 月国际地圈生物圈计划 (IGBP) 正式发起的上层海洋-低层大气研究计划 (SOLAS) 是该计划第二阶段的核心内容, 该计划将沙尘和氮化物沉降对海洋生态和环境的影响作为其中一个重要的研究内容。大气气溶胶对海洋的影响必将是未来气溶胶间接气候效应研究的焦点之一。

总之, 大气气溶胶的辐射-气候效应是一个十分复杂的问题, 有许多课题仍待研究。特别是, 气溶胶的环境和气候效应可能是一把双刃剑。减少人为气溶胶的释放无疑将改善颗粒物污染, 有利于环境和人类健康, 但是, 硫酸盐等气溶胶释放的减少, 由于其冷却效应的减弱, 是否会加速全球气候变暖的进程, 也是令人担心的。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Solomon S, Qing D H, et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of

- the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, et al, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 881 pp
- [3] IPCC. *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Houghton J T, Jenkins G J, et al, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1990, 365 pp
- [4] IPCC. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Houghton J T, Meira Filho L G, et al., Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1995, 339 pp
- [5] UNEP and C4. *The Asian Brown Cloud: Climate and Other Environmental Impacts*. Bangkok: UNEP/RRC, AP, 2002, 53pp
- [6] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007*, Solomon S, et al. Eds., 2007
- [7] Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 2000, **288**: 1042~1047
- [8] 石广玉. 大气辐射学. 北京:科学出版社, 2007
Shi Guangyu. *Atmospheric Radiation* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007
- [9] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. Radiative forcing of climate change. *Climate Change 2001*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton J T, et al, Eds., Cambridge University Press, New York, SA: 349~416
- [10] 毛节泰, 刘晓阳, 李成才, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊): 127~135
Mao Jietai, Liu Xiaoyang, Li Chengcai, et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from modis data and ground sun-photometer observations. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2000, **13** (Suppl.): 127~135
- [11] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙气溶胶粒子谱分布的观测研究. *大气科学*, 2001, **25** (2): 243~252
Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan Mountain area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (2): 243~252
- [12] 姜忠, 石广玉, 陈焕森. 北京市 1998~2001 年大气气溶胶粒子数浓度分析. *气候与环境研究*, 2003, **8** (4): 495~502
Jiang Zhong, Shi Guangyu, Chen Huansen. Analysis on aerosol concentration of Beijing during 1998-2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 495~502
- [13] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 浑善达克沙地沙气溶胶的粒谱特征. *大气科学*, 2005, **29** (1): 147~153
Cheng Tiantao, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. The size distribution of dust aerosol particles in Onqin Daga sandland. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 147~153
- [14] 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析. *气候与环境研究*, 2005, **10** (2): 229~237
Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 229~237
- [15] 张佃国, 郭学良, 肖稳安. 北京及周边地区 2003 年夏秋季气溶胶和雨滴分布特征. *南京气象学院学报*, 2007, **30** (3): 402~410
Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Xiao Wen'an. Distribution characters of aerosols and cloud droplets in the summer and autumn of 2003 over Beijing and its peripheral areas. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (3): 402~410
- [16] 刘文菁, 黄世鸿, 李良福. 大气气溶胶虚折射指数及其与元素的相关性. *气象科学*, 2002, **22** (1): 40~46
Liu Wenjing, Huang Shihong, Li Liangfu. Imaginary part of aerosol refractive index and correlation with element contents. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **22** (1): 40~46
- [17] 杨东贞, 于海清, 丁国安, 等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析. *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊): 113~126
Yang Dongzhen, Yu Haiqing, Ding Guoan, et al. An analysis of aerosols in the lower-level atmosphere over Beijing northern suburbs in winter. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 113~126
- [18] 刘立超, 沈志宝, 王涛, 等. 敦煌地区沙气溶胶质量浓度的观测研究. *高原气象*, 2005, **24** (5): 765~771
Liu Lichao, Shen Zhibao, Wang Tao, et al. Observation study on mass concentration of dust aerosols in Dunhuang. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (5): 766~771
- [19] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究. *高原气象*, 2006, **25** (5): 877~885
Wu Dui, Deng Xuejiao, Ye Yanxiang, et al. A study on the physical and chemical features of aerosols in the area south of the Nanling Mountains. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (5): 877~885
- [20] Zhang Junhua, Mao Jietai, Wang Meihua. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (1): 136~152
- [21] 张文煜, 辛金元, 袁九毅, 等. 腾格里沙漠气溶胶光学厚度多波段遥感研究. *高原气象*, 2003, **22** (6): 613~617
Zhang Wenyu, Xin Jinyuan, Yuan Jiuyi, et al. Multi-band

- remote sensing study on aerosol optical depth in Tengger Desert. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (6): 613~617
- [22] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性. *南京气象学院学报*, 2004, **27** (5): 615~622
Liu Yujie, Niu Shengjie, Zheng Youfei. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE-318 sun tracking spectrophotometer data. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (5): 615~622
- [23] 刘菲, 牛生杰. 北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演. *南京气象学院学报*, 2006, **29** (6): 775~781
Liu Fei, Niu Shengjie. Optical thickness and size distribution of dust aerosol particles in Inner Mongolia. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2006, **29** (6): 775~781
- [24] 邱金桓, 杨理权. 从宽带太阳直接辐射小时或日曝辐量反演气溶胶光学厚度研究. *大气科学*, 2002, **26** (4): 449~458
Qiu Jinhuan, Yang Liquan. A study of retrieving aerosol optical depth from day or hour exposed broadband solar direct radiation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 449~458
- [25] 范学花, 陈洪滨, 杜秉玉. 近地层大气气溶胶对曙暮光辐射强度和天空颜色的影响. *大气科学*, 2004, **28** (2): 301~310
Fan Xuehua, Chen Hongbin, Du Bingyu. The influence of lower atmosphere aerosols on the radiance and color of the Twilight sky. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 301~310
- [26] 刘吉, 陈长和. 兰州城区冬季大气气溶胶粒子谱的反演研究. *高原气象*, 2004, **23** (1): 103~109
Liu Ji, Chen Changhe. A study on remote-sensing inversion of atmospheric aerosol particle size distribution of Lanzhou city winter. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (1): 103~109
- [27] 刘新罡, 吕达仁, 肖稳安, 等. 北京晴天紫外波段气溶胶光学厚度反演与分析. *南京气象学院学报*, 2005, **28** (1): 51~57
Liu Xingang, Lü Daren, Xiao Wen'an, et al. Retrieval and analysis of the aerosol optical depth of Beijing ultraviolet waveband in sunny day. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (1): 51~57
- [28] 邱金桓. 宽带太阳漫射辐射法反演辐射加权平均的气溶胶一次散射反照率研究. *大气科学*, 2006, **30** (5): 767~777
Qiu Jinhuan. Broadband diffuse radiation method to retrieve radiation-weighted mean aerosol single scattering albedo. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 767~777
- [29] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深, 等. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究. *大气科学*, 2003, **27** (1): 115~122
Liu Jintao, Chen Weibiao, Liu Zhishen, et al. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 115~122
- [30] 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测. *大气科学*, 2003, **27** (1): 1~7
Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, et al. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 1~7
- [31] 刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测. *大气科学*, 2003, **27** (6): 1093~1100
Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia, et al. Polarization lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosol over Hefei. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (6): 1093~1100
- [32] 贺千山, 毛节秦. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究. *气象学报*, 2005, **63** (3): 374~384
He Qianshan, Mao Jietai. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (3): 374~384
- [33] 袁松, 辛雨, 周军. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究. *大气科学*, 2005, **29** (3): 387~395
Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 387~395
- [34] 毛敏娟, 张寅超, 方海涛, 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测. *地球物理学报*, 2007, **50** (2): 370~376
Mao Minjuan, Zhang Yinchao, Fang Haitao, et al. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50** (2): 370~376
- [35] 牛生杰, 孙照渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测. *高原气象*, 2005, **24** (4): 604~610
Niu Shengjie, Sun Zhaobo. Aircraft measurements of sand aerosol over northwest China desert area in late spring. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 604~610
- [36] 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析. *气候与环境研究*, 2007, **12** (1): 49~62
Fan Ye, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (1): 49~62
- [37] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究. *气象学报*, 2003, **61** (5): 580~591
Li Xiaojing, Liu Yujie, Qiu Hong, et al. Retrieval method

- for optical thickness of aerosol over Beijing and its vicinity by using the MODIS data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 580~591
- [38] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2005, **29** (3): 335~342
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hong Kong. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 335~342
- [39] 赵秀娟, 陈长和, 张武, 等. 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度. *高原气象*, 2005, **24** (1): 97~103
Zhao Xiujuan, Chen Changhe, Zhang Wu, et al. Retrieval of aerosol optical depth over Lanzhou area using MODIS data. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (1): 97~103
- [40] 冯建东, 黄艇, 陈长和, 等. 利用 MODIS 资料遥感水体上空气溶胶粒子尺度的数值试验. *高原气象*, 2006, **25** (1): 110~115
Feng Jiandong, Huang Ting, Chen Changhe, et al. The numerical experiments of remote sensing atmospheric aerosol particle size distribution over waters using multichannel MODIS data. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (1): 110~115
- [41] 冯建东, 陈长和, 陈勇航, 等. 利用多通道 MODIS 遥感资料反演沙气溶胶尺度分布的个案试验. *高原气象*, 2006, **25** (2): 242~248
Feng Jiandong, Chen Changhe, Chen Yonghang, et al. The experimental study of retrieving dust aerosol size distribution using multichannel MODIS remote sensing data. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (2): 242~248
- [42] 黄艇, 陈长和, 陈勇航, 等. 利用 MODIS 卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度. *高原气象*, 2006, **25** (5): 886~892
Huang Ting, Chen Changhe, Chen Yonghang, et al. The aerosol optical depth over Lanzhou area retrieved with a compared method using MODIS data. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (5): 886~892
- [43] 董海鹰, 刘毅, 管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析. *南京气象学院学报*, 2007, **30** (3): 328~337
Dong Haiying, Liu Yi, Guan Zhaoyong. Validation of MODIS aerosol optical depth retrievals over East China Sea. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (3): 328~337
- [44] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2003, **27** (1): 23~35
Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai, et al. Remote sensing aerosol optical depth over China with GMS-5 satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 23~35
- [45] 胡秀清, 卢乃锰, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴. *应用气象学报*, 2007, **18** (3): 266~275
Hu Xiuqing, Lu Naimeng, Zhang Peng. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2007, **18** (3): 266~275
- [46] 张鹏, 石广玉. 从反射太阳光谱反演大气气溶胶体积分布的理论研究. *气象学报*, 2003, **61** (1): 85~94
Zhang Peng, Shi Guangyu. The theoretic study on the retrieval of aerosols' volume distribution from solar spectral reflectance. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 85~94
- [47] 延昊, 矫梅燕, 王建林, 等. 热红外通道沙尘识别及敏感性分析. *应用气象学报*, 2005, **16** (2): 238~242
Yan Hao, Jiao Meiyuan, Wang Jianlin, et al. Dust detection using thermal infrared channel. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (2): 238~242
- [48] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析. *气象学报*, 2001, **59** (1): 77~87
Luo Yunfeng, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the 1980's atmospheric aerosol optical depth over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 77~87
- [49] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. *大气科学*, 2002, **26** (6): 721~730
Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (6): 721~730
- [50] 李初, 季国良. 敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化. *高原气象*, 2003, **22** (1): 84~87
Li Ren, Ji Guoliang. The seasonal variation of aerosol optical depth in Dunhuang area. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (1): 84~87
- [51] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析. *气候与环境研究*, 2005, **10** (2): 201~208
Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 201~208
- [52] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 宽带消光法反演气溶胶光学厚度与 AERONET 北京站探测结果的对比研究. *大气科学*, 2005, **29** (4): 645~653
Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. A comparison study of aerosol optical depth retrieved from broadband extinction method and aerosol robotic network observation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (4): 645~653
- [53] 宋磊, 吕达仁. 上海地区大气气溶胶光学特性的初步研究. *气候与环境研究*, 2006, **11** (2): 203~208

- Song Lei, Lü Daren. Investigating of atmospheric optical characteristics over Shanghai region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (2): 203~208
- [54] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染. *大气科学*, 2003, **27** (5): 869~880
- Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5): 869~880
- [55] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气. *高原气象*, 2003, **22** (2): 185~190
- Shen Yanbo, Shen Zhibao, Wang Wanfu. Atmospheric aerosol optical thickness and dusty weather in northern China in spring of 2001. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 185~190
- [56] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, **15** (6): 641~650
- Li Chengcai, Liu Qihan, Mao Jietai, et al. An aerosol pollution episode in Hong Kong with remote sensing products of MODIS and lidar. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (6): 641~650
- [57] 王开存, 李维亮, 白立杰. 1984~2000 年印度洋与中国地区上空对流层中上层及平流层气溶胶变化和输送特征. *应用气象学报*, 2004, **15** (1): 32~40
- Wang Kaicun, Li Weiliang, Bai Lijie. Characteristics of change and transport of aerosols in the middle and upper troposphere and stratosphere over Indian ocean and China in 1984-2000. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (1): 32~40
- [58] 胡波, 王跃思, 何新星, 等. 北京 2004 年一次强沙尘暴过程的辐射特征研究. *气候与环境研究*, 2005, **10** (2): 265~274
- Hu Bo, Wang Yuesi, He Xinxing, et al. Variation properties of earth's surface solar radiation during a strong dust storm in Beijing 2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 265~274
- [59] 颜鹏, 张养梅, 杨东贞, 等. 2003 年夏季临安地区大气气溶胶离子成分的尺度分布特征. *气象学报*, 2005, **63** (6): 980~987
- Yan Peng, Zhang Yangmei, Yang Dongzhen, et al. The characteristics of aerosol ionic size distributions at Lin'an summer of 2003. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 980~987
- [60] 赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系. *高原气象*, 2005, **24** (4): 617~622
- Zhao Xiujuan, Chen Changhe, Yuan Tie, et al. Lanzhou aerosol optical depth in winter and their relation with visibility. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 617~622
- [61] 申彦波, 沈志宝, 杜明远. 敦煌地区春季大气气溶胶粒子数浓度的分析. *高原气象*, 2007, **26** (1): 158~164
- Shen Yanbo, Shen Zhibao, Du Mingyuan. Analysis on aerosol particle number concentration over Dunhuang region in spring. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26** (1): 158~164
- [62] 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征. *大气科学*, 2007, **31** (3): 553~559
- Ke Zongjian, Tang Jie. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 553~559
- [63] 罗淦, 王自发. 全球环境大气输送模式(GEATM)的建立及其验证. *大气科学*, 2006, **30** (3): 504~518
- Luo Gan, Wang Zifa. A global environmental atmospheric transport model (GEATM): Model description and validation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 504~518
- [64] 张美根, 韩志伟. TRACE-P 期间硫酸盐、硝酸盐和铵盐气溶胶的模拟研究. *高原气象*, 2003, **22** (1): 1~6
- Zhang Meigen, Han Zhiwei. A numerical study on distribution of sulfate, nitrate and ammonium aerosols over East Asia during the TRACE-P campaign. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (1): 1~6
- [65] 张美根, 徐永福, Uno Itsushi, 等. 东亚地区春季二氧化硫的输送与转化过程研究 I. 模式及其验证. *大气科学*, 2004, **28** (3): 321~329
- Zhang Meigen, Xu Yongfu, Uno Itsushi, et al. A study of sulfur transport and transformation over East Asia in the springtime I: Model system and its verification. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 321~329
- [66] 周荣卫, 刘红年, 蒋维楣. 中国地区沙尘气溶胶输送过程的数值模拟. *气象科学*, 2004, **24** (1): 16~25
- Zhou Rongwei, Liu Hongnian, Jiang Weimei. The study on the transport of dust aerosol in China. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (1): 16~25
- [67] 姜学恭, 赵琳娜. 一次蒙古气旋型强沙尘暴的数值模拟试验. *高原气象*, 2006, **25** (4): 672~679
- Jiang Xuegong, Zhao Linna. Numerical simulation on a severe sand-dust storm process caused by the Mongolia cyclogenesis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (4): 672~679
- [68] 张美根, 徐永福, 张仁健, 等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布. *地球物理学报*, 2005, **48** (1): 46~51
- Zhang Meigen, Xu Yongfu, Zhang Renjian, et al. Emission and concentration distribution of black carbon aerosol in East Asia during springtime. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (1): 46~51
- [69] 吴润, 符淙斌. 近五年来东亚春季黑炭气溶胶分布输送和辐

- 射效应的模拟研究. 大气科学, 2005, **29** (1): 111~119
Wu Jian, Fu Congbin. Simulation research of distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol in recent five spring seasons over East Asia region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 111~119
- [70] 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算. 大气科学, 2001, **25** (2): 231~242
Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The simulation and estimation of radiative properties and radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (2): 231~242
- [71] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响. 气象学报, 2002, **60** (2): 230~237
Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing sulfate aerosol. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (2): 230~237
- [72] 王喜红, 石广玉. 东亚地区云和地表反照率对硫酸盐直接辐射强迫的影响. 气象学报, 2002, **60** (6): 758~765
Wang Xihong, Shi Guangyu. Effect of cloud and surface albedo on direct sulfate radiative forcing over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (6): 758~765
- [73] 高丽洁, 王体健, 徐永福, 等. 中国硫酸盐气溶胶及其辐射强迫的模拟. 高原气象, 2004, **23** (5): 612~619
Gao Lijie, Wang Tijian, Xu Yongfu, et al. Modeling sulfate aerosol and its radiative forcing over China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (5): 612~619
- [74] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 硫酸盐气溶胶直接辐射效应在线与离线模拟方法的比较. 气象学报, 2004, **62** (4): 486~492
Wu Jian, Jiang Weimei, Liu Hongnian, et al. Comparison of on-line and off-line simulation methods for direct radiative forcing of anthropogenic sulfate. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (4): 486~492
- [75] 马晓燕, 石广玉, 郭裕福, 等. 硫酸盐气溶胶辐射强迫的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, **9** (3): 454~464
Ma Xiaoyan, Shi Guangyu, Guo Yufu, et al. Simulation of radiative forcing by sulfate aerosols. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 454~464
- [76] 吴润, 符淙斌, 蒋维楣, 等. 东亚地区矿物尘气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究. 地球物理学报, 2005, **48** (6): 1250~1260
Wu Jian, Fu Congbin, Jiang Weimei, et al. A preliminary simulation study of direct radiative forcing of mineral dust aerosol over the East Asia region. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (6): 1250~1260
- [77] 马晓燕, 石广玉, 郭裕福, 等. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用. 气象学报, 2005, **63** (1): 41~48
Ma Xiaoyan, Shi Guangyu, Guo Yufu, et al. Radiative forcing by greenhouse gases and sulfate aerosol. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (1): 41~48
- [78] 成天涛, 吕达仁, 徐永福. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的辐射强迫. 高原气象, 2005, **24** (6): 920~926
Cheng Tiantao, Lü Daren, Xu Yongfu. Radiation forcing of dust aerosol from Hunshan Dake sandland in China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (6): 920~926
- [79] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的光测研究. 气象学报, 2005, **63** (5): 622~635
Mao Jietai, Li Chengcai. Observation study of aerosol radiative properties over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 622~635
- [80] 田华, 马建中, 李维亮, 等. 中国中东部地区硫酸盐气溶胶直接辐射强迫及气候效应的数值模拟. 应用气象学报, 2005, **16** (3): 322~333
Tian Hua, Ma Jianzhong, Li Weiliang, et al. Simulation of forcing of sulfate aerosol on direct radiation and its climate effect over middle and eastern China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (3): 322~333
- [81] 郑飞, 张鹏, 朱江. 复杂地形城市冬季边界层对气溶胶辐射效应的响应. 大气科学, 2006, **30** (1): 171~179
Zheng Fei, Zhang Lei, Zhu Jiang. Responses of urban atmospheric boundary layer to aerosol radiative effect over complex terrains in winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 171~179
- [82] 王宏, 石广玉, 王标, 等. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加热的影响. 大气科学, 2007, **31** (3): 515~526
Wang Hong, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. The impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the North Pacific region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 515~526
- [83] Mishchenko M I, Travis L D. T-matrix computations of light scattering by large spheroidal particles. *Opt. Comm.*, 1994, **109**: 16~21
- [84] Heintzenberg J. Particle size distributions from scattering measurements of nonspherical particles via Mie-theory. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1978, **51**: 91~99
- [85] Volten H, Muñoz O, Rol E, et al. Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 17375~17401
- [86] Wiegner M, Seifert P, Schlüssel P. Radiative effect of cirrus clouds in Meteosat Second Generation Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager channels. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D18): 23217~23230
- [87] Dubovik O, Holben B N, Lapyonok T, et al. Nonspherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (10), doi: 10.1029/2001GL014506

- [88] 赵剑琦. 任意形状粒子的光散射. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士学位论文, 2003. 87pp
Zhao J Q. Light scattering by arbitrary shaped particles. Ph. D. dissertation (in Chinese), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2003. 87pp
- [89] Zhao J Q, Hu Y Q. Bridging technique for calculating the extinction efficiency of arbitrary shaped particles. *Applied Optics*, 2003, **42**: 4937~4945
- [90] Zhao Jianqi, Shi Guangyu, Che Huizheng, et al. Approximations of the scattering phase functions of particles. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23** (5): 802~808
- [91] 张连众, 温景嵩, 于瑞泉. 平流层重力占优气溶胶粒子的耦合碰并. 大气科学, 2003, **27** (2): 152~156
Zhang Lianzhong, Wen Jingsong, Yu Ruiquan. Coupled coagulation of aerosols in the stratosphere when gravity motion is dominant. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 152~156
- [92] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. 南京气象学院学报, 2005, **28** (3): 360~368
Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. Stratus cloud microphysical characters over North China region and the relationship between aerosols and clouds. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (3): 360~368
- [93] 赵春生, 彭大勇, 段英. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用. 应用气象学报, 2005, **16** (4): 417~425
Zhao Chunsheng, Peng Dayong, Duan Ying. The impacts of sea-salt and nss-sulfate aerosols on cloud microproperties. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (4): 417~425
- [94] 黄蔚薇, 杨军, 凌士兵, 等. 沙尘气溶胶粒子表面变性对云滴形成过程的影响. 南京气象学院学报, 2007, **30** (2): 210~215
Huang Weiwei, Yang Jun, Ling Shibing, et al. Effects of the heterogeneous-phase chemical processes on mineral aerosols on the growth of cloud droplets. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (2): 210~215
- [95] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. 大气科学, 2003, **27** (4): 591~606
Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 591~606
- [96] 颜鹏, 李维亮, 秦瑜. 近年来大气气溶胶模式研究综述. 应用气象学报, 2004, **15** (5): 630~640
Yan Peng, Li Weiliang, Qin Yu. A review of the current development of atmospheric aerosol models. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (5): 630~640
- [97] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展. 气候与环境研究, 2006, **11** (4): 546~552
Du Rui. The progress of atmospheric bioaerosol research. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (4): 546~552
- [98] Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (NO. D23), 8633, doi: 10.1029/2003JD003550
- [99] Mikami M, Abe O, Du M, et al. The impact of aeolian dust on climate: Sino-Japanese cooperative project ADEC. *Journal of Arid Land Studies*, 2002, **11** (4): 211~222
- [100] Mikami M, Shi G Y, Uno I, et al. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan - China joint project ADEC. *Global and Planetary Change*, 2006, **52**: 142~172
- [101] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 2005, **308**: 67~71
- [102] Prospero J M, Uematsu M, Savoie D L. Mineral aerosol transport to the Pacific Ocean. *Chemical Oceanography*, Riley J P et al, Eds. Academic Press. 1989: **10**: 188~218
- [103] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, et al. Trace elements in aerosol particles from Bermuda and Barbados: Concentrations, sources and relationships to aerosol sulfate. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**: 439~457
- [104] Duce R A. The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity. *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, Buat-Menard P, Ed. Reidel Press, 1986. 497~529
- [105] Bishop J K B, Wood T J, Davis R E, et al. Robotic observations of enhanced carbon biomass and export at 55°S during SOFeX. *Science*, 2004, **304** (5669): 417~420
- [106] Boyd P. Ironing out algal issues in the Southern Ocean. *Science*, 2004, **304** (5669): 396~397
- [107] Buesseler K O, Andrews J E, Pike S M, et al. The effects of iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Science*, 2004, **304** (5669): 414~417
- [108] Coale K H, Johnson K S, Chavez F P, et al. Southern Ocean iron enrichment experiment: Carbon cycling in high and low-Si waters. *Science*, 2004, **304** (5669): 408~414
- [109] Anderson T L, Charlson R J, Bellouin N, et al. An "A-Train" strategy for quantifying direct climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86**: 1795~1809
- [110] Martin W, Hans G, Andreas R, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, 2005, **308**: 847~850
- [111] Pinker R T, Zhang B, Dutton E G. Do satellites detect

- trends in surface solar radiation? *Science*, 2005, **308**: 850~854
- [112] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961 - 2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L06803, doi: 10.1029/2004GL022322
- [113] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961 - 2000. *Annales Geophysicae*, 2005, **23** (7): 2425~2432
- [114] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L01812, doi: 10.1029/2005GL024586
- [115] Lin I I, Chen J P, Wong G T F, et al. Aerosol input to the South China Sea; Results from the moderate resolution imaging spectro-radiometer, the quick scatterometer, and the measurements of pollution in the troposphere sensor. *Deep Sea Research Part II*, 2007, **54**, 1589~1601
- [116] Lv J H, Tang D L. Preliminary analysis of phytoplankton blooms/HAB and dust/sand storms in China. Proceedings of Conference on Dust Storms and Environmental Governance across Taiwan Straits, Nov. 29 - 30, 2005, National Central University, Taiwan, 2005. 531~538
- [117] Jo C O, Lee J Y, Park K A, et al. Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L05602, doi: 10.1029/2006GL027395
- [118] Yuan W, Zhang J. High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L07603, doi: 10.1029/2005GL025174