

中英双语版

AN OBSERVATION-BASED METHOD FOR INVESTIGATING
THE ATMOSPHERIC AEROSOL RADIATIVE PROPERTIES
IN PEARL RIVER DELTA OF CHINA

珠江三角洲

大气气溶胶辐射特性

基于观测的模型方法及应用

程雅芳 张远航 胡敏 著
Alfred Wiedensohler

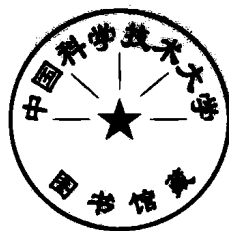


科学出版社
www.sciencep.com

珠江三角洲大气气溶胶辐射特性

——基于观测的模型方法及应用

程雅芳 张远航 胡敏 著
Alfred Wiedensohler



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在系统观测的基础上,采用数值模型方法研究了珠江三角洲新垦地区大气气溶胶的辐射特性。本书依据以气溶胶辐射特性为核心的“闭合实验”方案,精心组织了对大气气溶胶物理-化学-光学特性的综合观测,细致介绍了仪器特性和数据资料处理等。基于该观测资料,本书采用了一套系统数值模型方法,对观测地区气溶胶中元素碳混合状态、颗粒物吸湿增长特性及其对气溶胶辐射特性和直接辐射强迫的影响进行了深入研究,进而解析出当地气溶胶光学污染的化学贡献率。本书对珠江三角洲新垦地区气溶胶辐射特性进行了系统、深入的研究,深化了对该区域细粒子及其环境效应的科学认识,在方法学和基础理论研究上也有独到之处。

本书的主要读者是大专院校和研究机构大气环境、大气化学、大气物理和气候研究专业的科研人员、研究生和本科生。中英文对照的形式有利于读者获得更多、更全面的信息。

图书在版编目(CIP)数据

珠江三角洲大气气溶胶辐射特性:基于观测的模型方法及应用 / 程雅芳等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021671-7

I. 珠… II. 程… III. 珠江三角洲-气溶胶-辐射-大气散射-特性-研究 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053806 号

责任编辑:张震卜新 / 责任校对:曾茹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

深海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张: 32 1/4 插页: 6

印数: 1—1 500

字数: 650 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

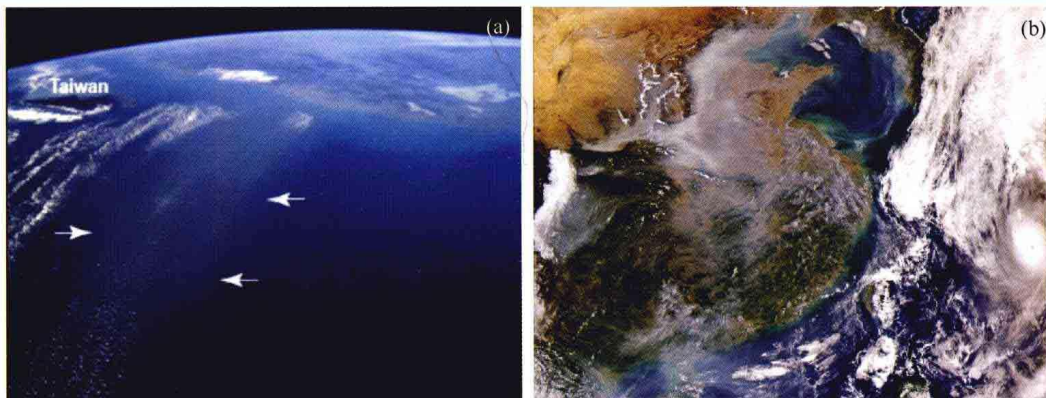


图 1-2 气溶胶对太阳光的反射。(a) 从距日本 Okinawa 278 km 上空的空间站向西南方向观察中国东南沿海和中国台湾岛（图中标记为“Taiwan”）。在距中国 600 km 的海域可明显观察到由东北风携带的气溶胶烟羽（位于白色箭头之间），有少量云嵌入其间。气溶胶使得海面的反照率增强得到证实，同时也可能存在气溶胶的间接辐射强迫效应。(b) 2004 年 10 月 8 日的卫星图片展示了一条横跨中国南北的气溶胶霾带（haze）

资料来源：(a) Anderson 等 (2003a)

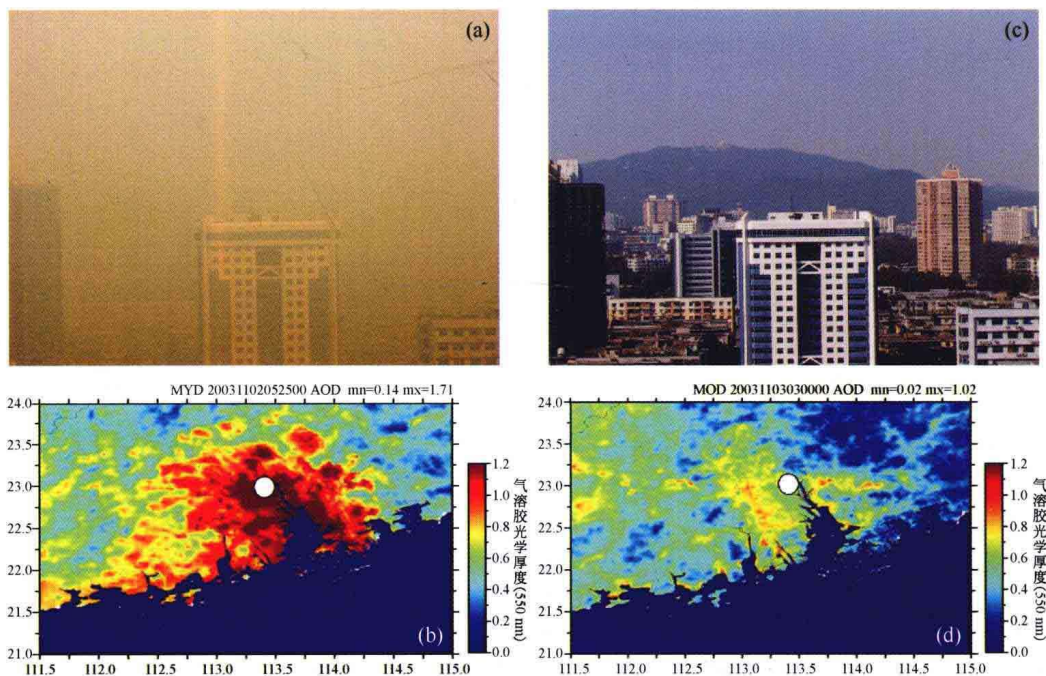


图 1-10 严重气溶胶污染致使广州能见度极度下降的一个个例研究（2003 年秋）。图中同时对对应地展示了表征广州能见度的照片以及从 MODIS 卫星资料反演的当天 8:00 的气溶胶光学厚度（AOD）。(a) 和 (b) 是 2003 年 11 月 2 日,(c) 和 (d) 是 2003 年 11 月 3 日。

AOD 图中的白色圈表示的是广州的位置

资料来源：Wu 等 (2005)

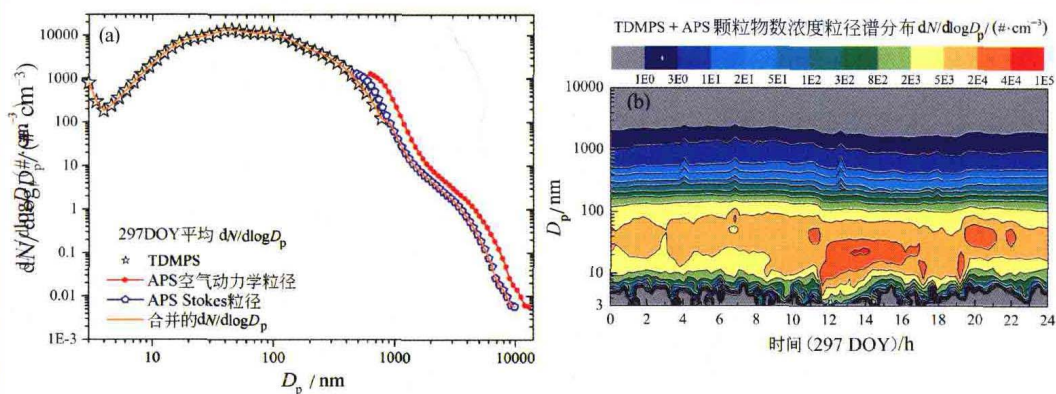


图 2-12 (a) 2004 年 10 月 23 日 (297 DOY) 的平均颗粒物粒子谱分布。该图展示了合并前分别来自双电迁移性颗粒物粒径分析仪 TDMPS 和空气动力学颗粒物粒径分析仪 APS 的数据以及合并后的总粒子谱分布情况。干颗粒物平均密度 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 被用于将 APS 的空气动力学粒径转化为 Stokes 粒径。(b) 297 DOY 的颗粒物数浓度粒径谱分布的时间序列等浓度图

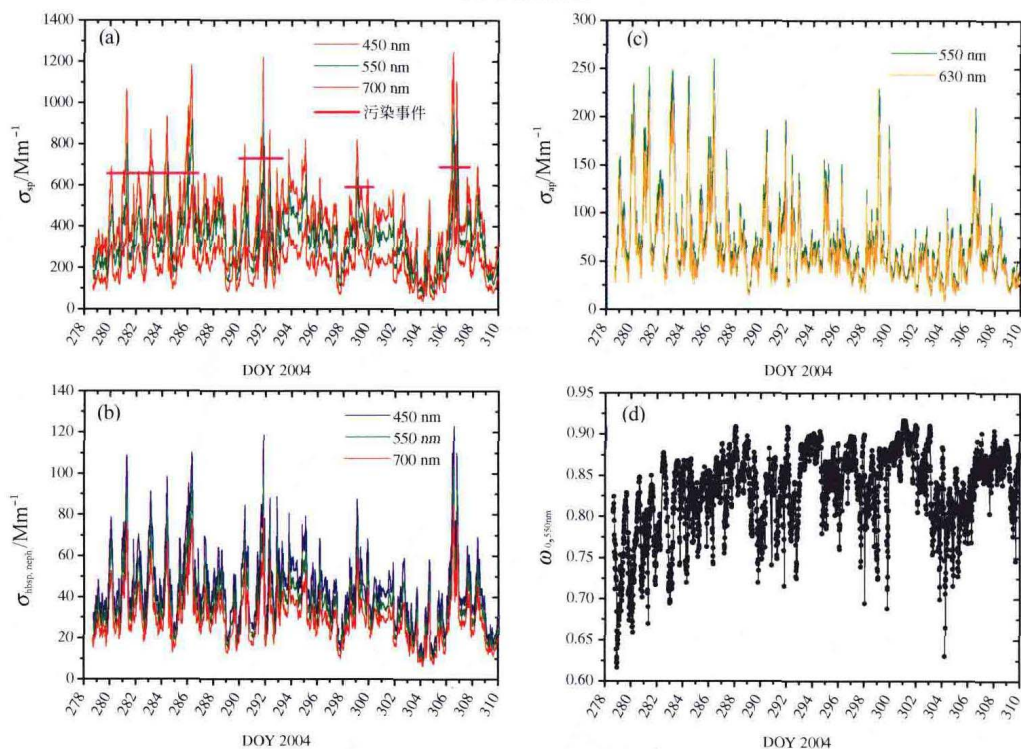


图 3-1 2004 年新垦观测期间 (278~310 DOY) 干状态 ($\text{RH} < 20\%$) 下气溶胶光学性质的完整时间序列。(a) 经过校正的颗粒物总散射系数 (σ_{sp}); (b) 半球后向散射系数 ($\sigma_{\text{hbsp,neph}}$); (c) 吸收系数 (σ_{ap}); (d) 单散射反照率 (ω_0)

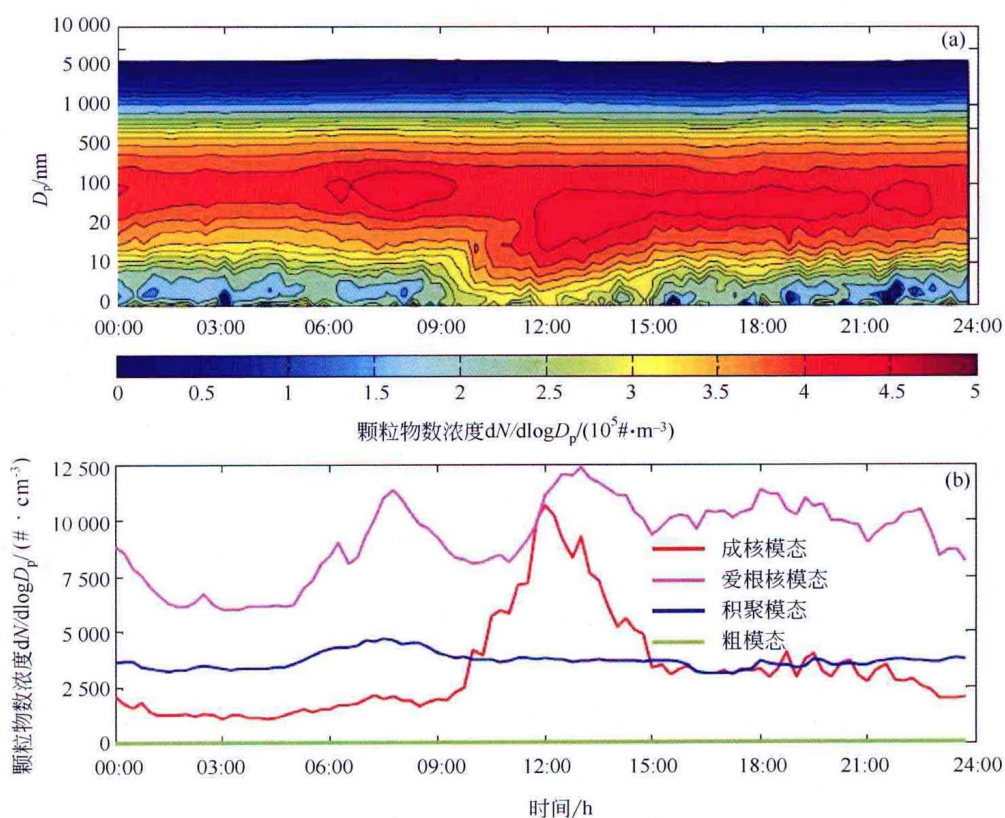


图 3-11 (a) 新垦干状态颗粒物平均数浓度谱分布的等高线图; (b) 四个模态 (包括成核模态、爱根核模态、积聚模态和粗模态) 的平均日变化图

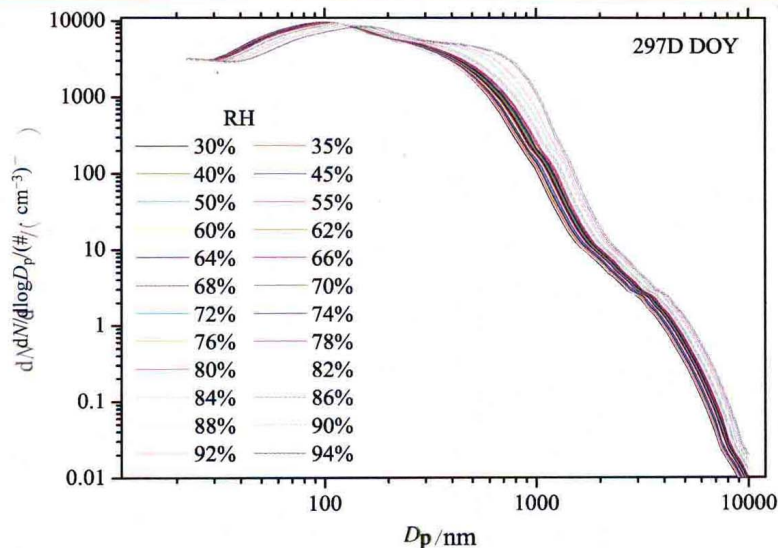


图6-2 设定相对湿度序列中,不同相对湿度下颗粒物数浓度粒径谱分布的例子(297D DOY,“D”表示白天8:00~20:00的12h平均的数据)。从图中可以清楚的看到,随着相对湿度的增大,颗粒物数浓度谱分布向较大的粒径方向移动

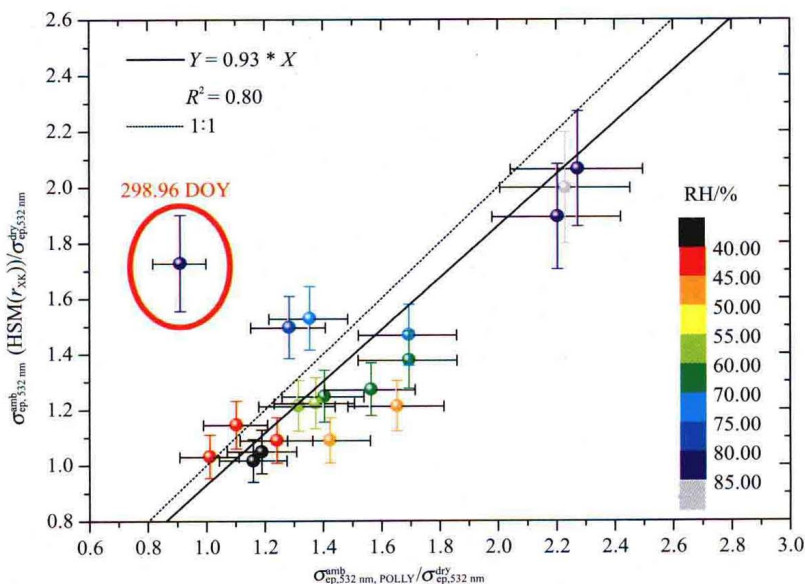


图6-6 2004年10月23~26日(297~300 DOY), 环境状态下模拟与观测的气溶胶消光系数($\sigma_{ep,532\text{ nm}}^{\text{amb}}$)的统计比较, 以及气溶胶消光系数随环境相对湿度的变化。图中所采用的是采用干状态气溶胶在532 nm的消光系数($\sigma_{ep,532\text{ nm}}^{\text{dry}}$)归一化的 $\sigma_{ep,532\text{ nm}}^{\text{amb}}$ 的数据。误差线表示的是 $\sigma_{ep,532\text{ nm}}^{\text{amb}}$ 一倍标准偏差(68%置信限)的不确定性

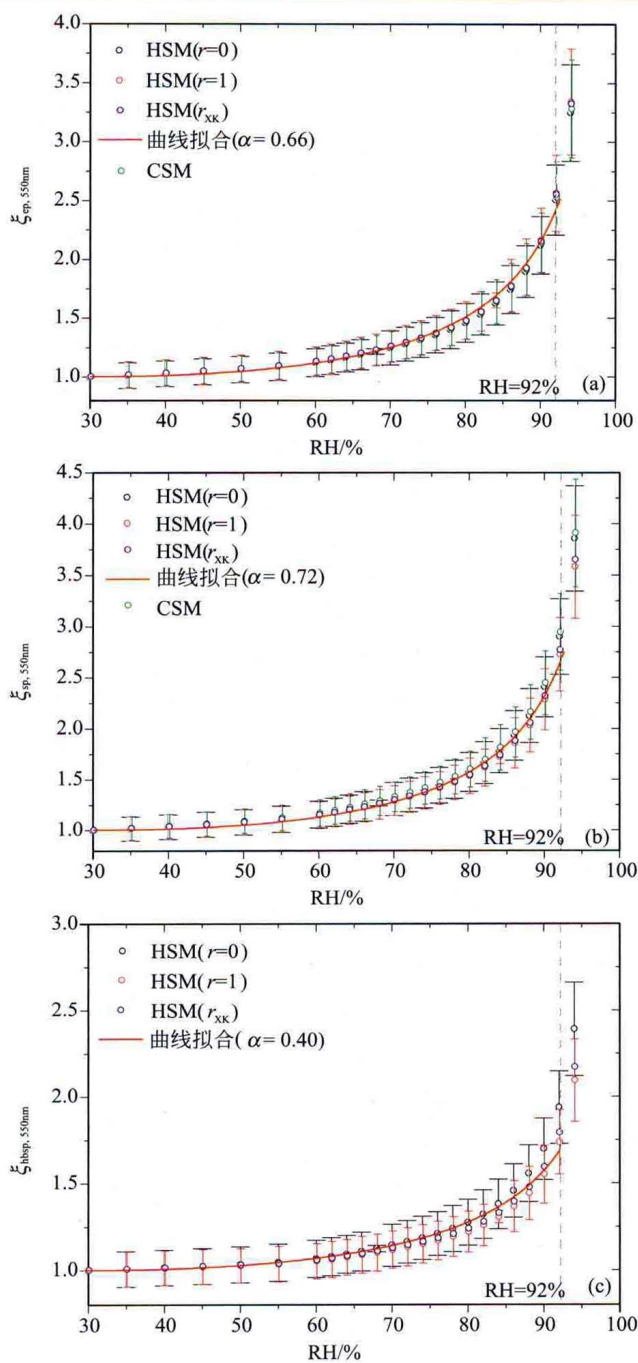


图 6-7 四种不同 EC 混合状态时，550 nm 的颗粒物消光、总散射和半球后向散射系数的吸湿增长因子($\xi_{ep;sp;hbsp,550\text{ nm}}$)。图中显示的是 672 个数据点的平均值。Monte Carlo 误差分析得到的 $\xi_{ep;sp;hbsp,550\text{ nm}}$ 的不确定性表示为 68% 置信限的一倍标准偏差

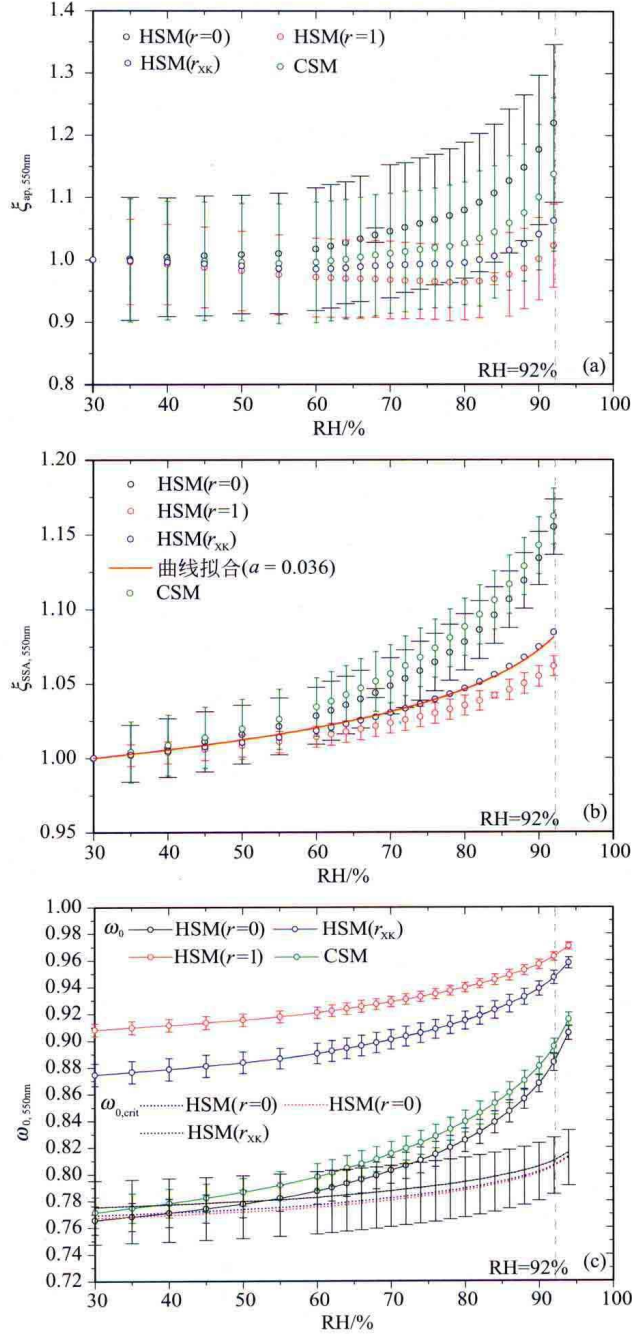


图6-11 四种EC混合状态下, 550 nm颗粒物光吸收系数与单散射反照率(ω_0)的吸湿增长因子 [$\xi_{ap,550nm}(RH)$ 和 $\xi_{SSA,550nm}(RH)$]。空心点为672个数据点的平均值。(c)展示了平均临界单散射反照率 $\omega_{0,crit,550nm}$ 。误差线是 Monte Carlo 不确定性分析得到的 68% 置信水平的一倍标准偏差

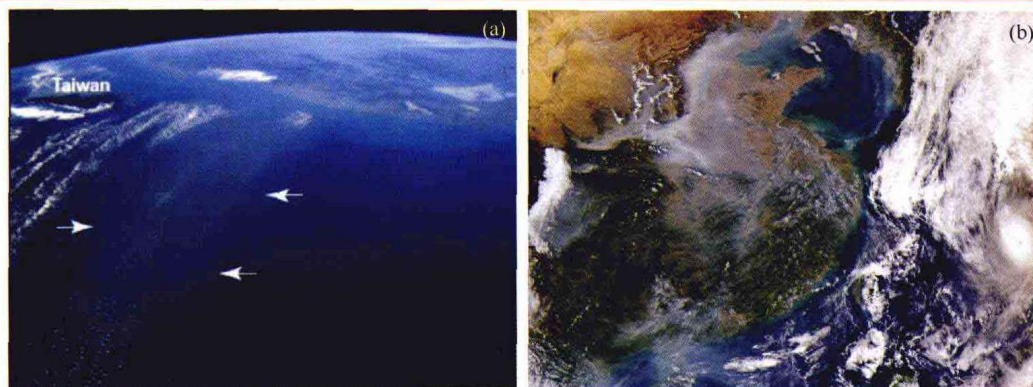


Figure 1-2 Reflection of sunlight by aerosols. (a) the southeast coast of China and the island of Taiwan viewed toward the southwest from the Space Shuttle at an altitude of 278 km above Okinawa, Japan. An aerosol plume (between arrows) is carried by northwest winds from China a distance of more than 600 km over the ocean; small clouds are embedded in the plume. Albedo enhancement is evident over the ocean, and indirect effects on clouds are possible. Sources: Anderson *et al.* (2003a); (b) a haze layer over China, satellite picture on 8 October 2004

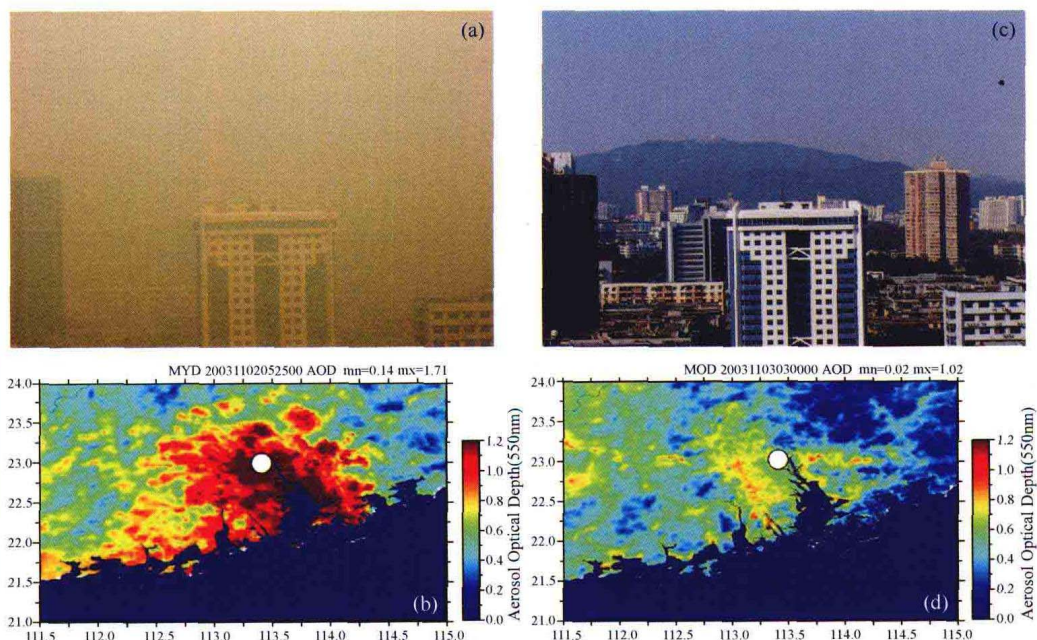


Figure 1-10 An example of extremely low visibility due to aerosol particles in Guangzhou during the fall of 2003 (similar period to the 2004 PRD campaign), as well as the corresponding Aerosol Optical Depth (AOD) retrieved from MODIS satellite data. (a) and (b) are on November 2 2003; (c) and (d) are on November 3 2003. AOD data is at 8 AM and the white circle represents the location of Guangzhou. Sources: Wu *et al.* (2005)

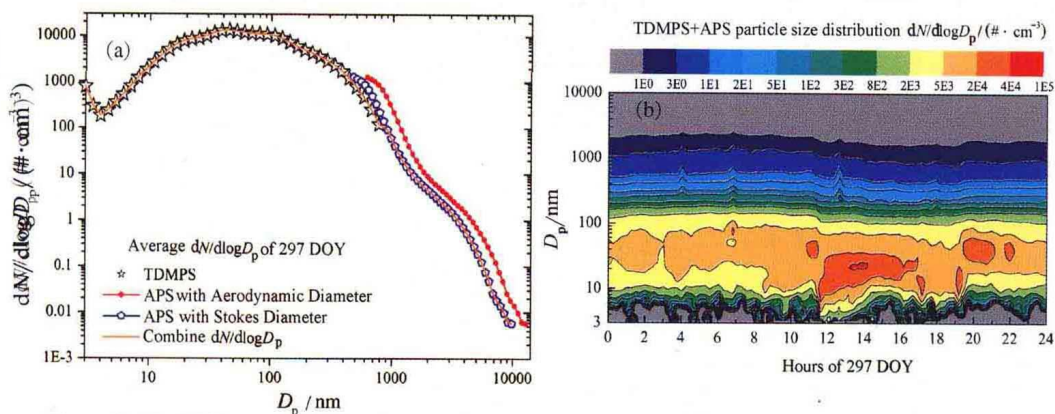


Figure 2-12 (a) Example for the data combination of Tandem Differential Mobility Particle Sizer and Aerodynamic Particle Sizer (APS) with the average number size distribution on 297 DOY. The density of the dry particle used to convert the aerodynamic diameter of APS to Stokes equivalent diameter is $1.7 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})$. (b) The contour plot of the time series of the particle number size distributions on 297 DOY

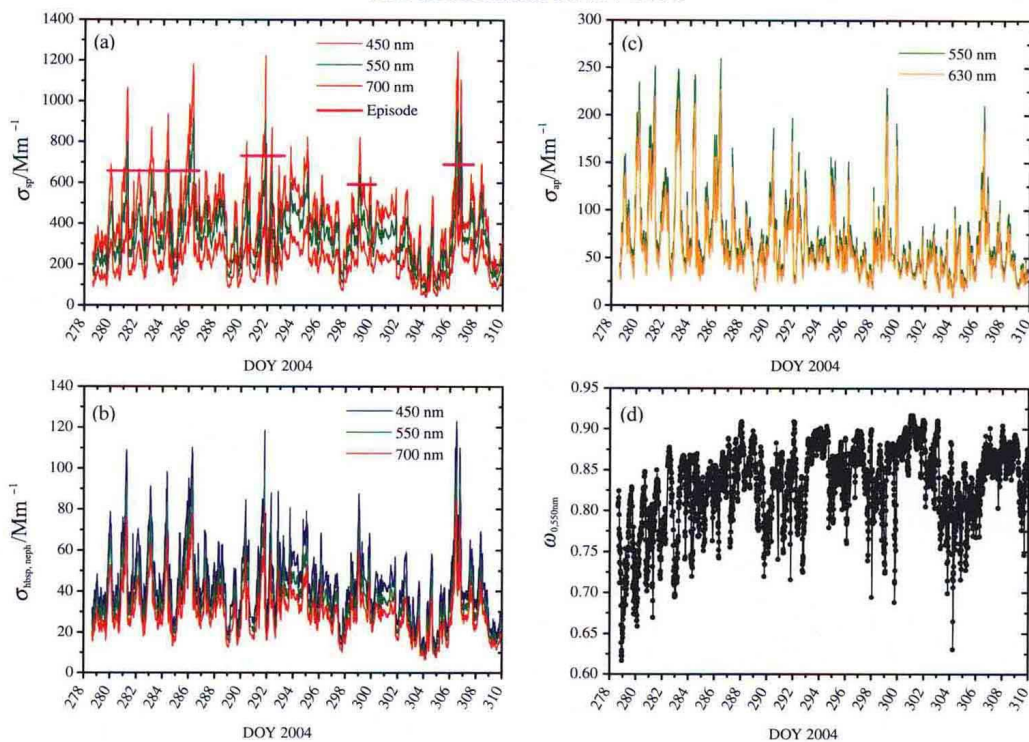


Figure 3-1 The complete time series of the measured dry aerosol optical properties ($\text{RH} < 20\%$) at different wavelengths at Xinken in Pearl River Delta of China from 278-310 DOY 2004. (a) the corrected total scattering coefficient (σ_{sp}); (b) hemispheric-back scattering coefficient ($\sigma_{hbsp, neph}$); (c) absorption coefficient (σ_{ap}); (d) single scattering albedo (ω_0)

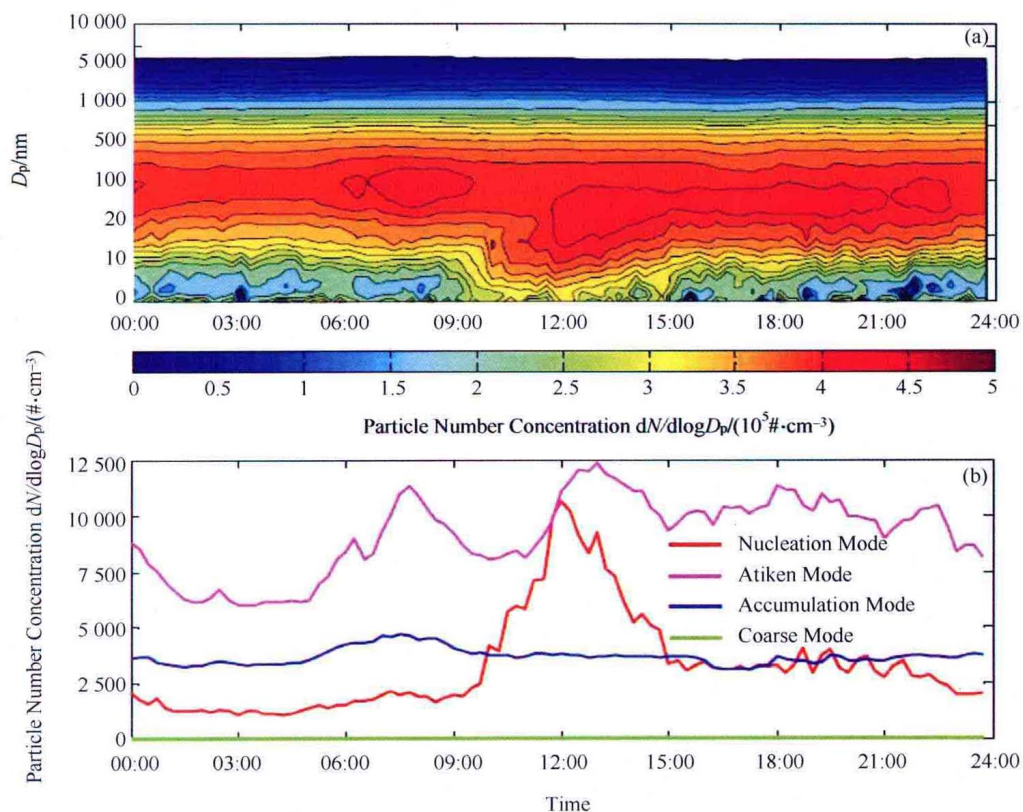


Figure 3-11 (a) Contour plot of the diurnal particle number concentrations during the field experiments at Xinken in Pearl River Delta 2004; (b) Diurnal variation of the four modes, including nucleation, Aitken, accumulation and coarse modes

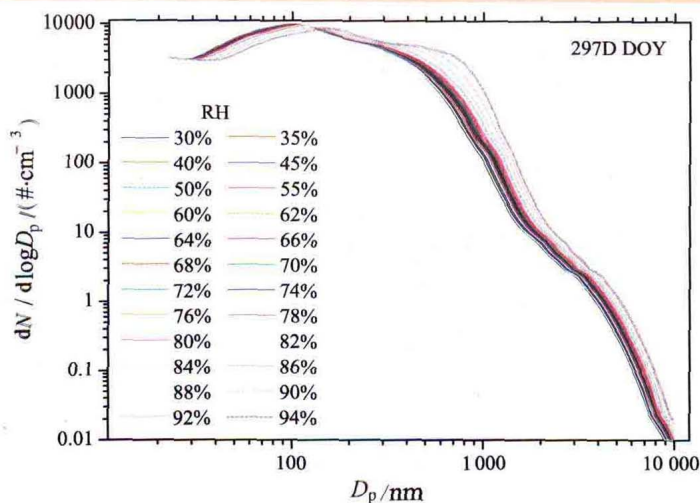


Figure 6-2 An example of the reconstructed particle number size distributions at different RH in the RH profile (297D DOY, “D” means the daytime from 8:00 to 20:00), from which the shift of the particle number size distributions during the humidification can be clearly seen

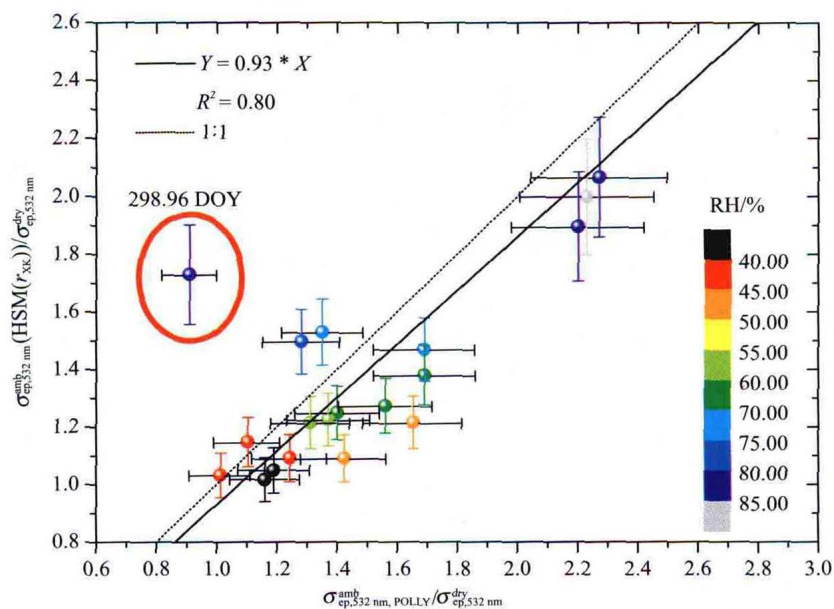


Figure 6-6 Statistic comparison of the ambient particle extinction coefficients derived from model and experiment and the RH dependence of $\sigma_{\text{ep}}^{\text{amb}}$. $\sigma_{\text{ep},532 \text{ nm}}^{\text{amb}}$ are normalized with those at dry condition ($\sigma_{\text{ep},532 \text{ nm}}^{\text{dry}}$). The error bars are presented as the uncertainties with one standard deviation at 68% confidence level, for which only the uncertainties of the simulated and measured $\sigma_{\text{ep},532 \text{ nm}}^{\text{amb}}$ have been taken into account, but not the uncertainties of the dry ones

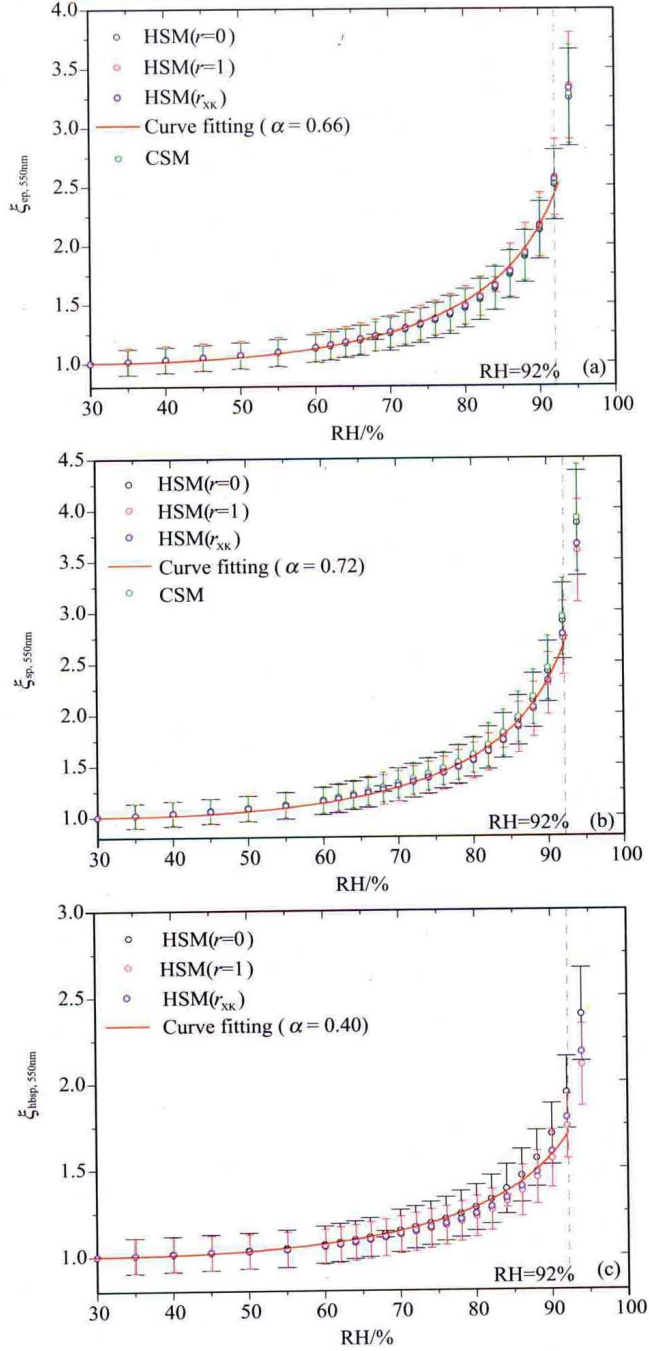


Figure 6-7 Humidification factor of aerosol extinction and total/hemispheric-back scattering coefficients at wavelength of 550 nm ($\xi_{ep,sp,hbsp,550nm}$) with four aerosol mixing states. Circles are the mean values of the 672 evaluated data points. The error bar indicates the uncertainties of $\xi_{ep,sp,hbsp,550nm}$ with one relative standard derivation at 68% confidence level derived from the Monte Carlo simulation

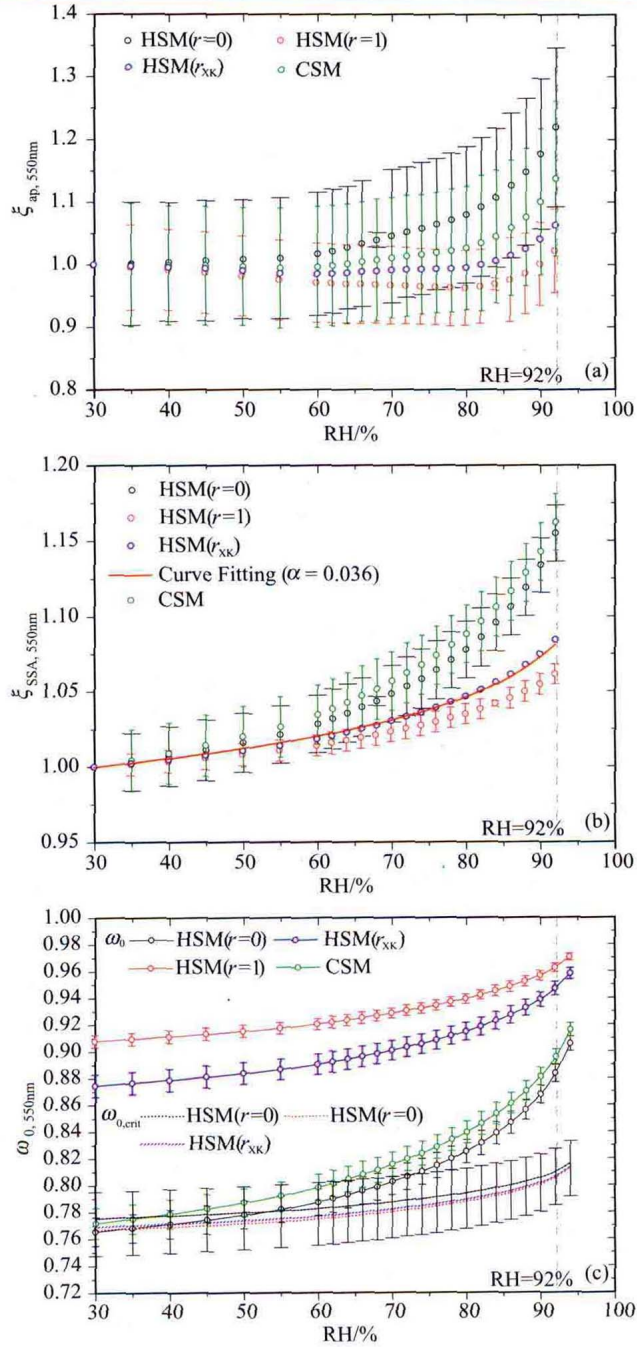


Figure 6-11 Humidification factor of aerosol absorption coefficient (σ_{ap}) and single scattering albedo (ω_0) at wavelength of 550 nm [$\xi_{ap,550nm}(RH)$ and $\xi_{SSA,550nm}(RH)$] with four aerosol mixing states. Circles are the mean values of the 672 evaluated data points. In (c) the average critical single scattering albedo $\omega_{0,crit,550nm}$ are also presented. The error bar indicates the modeling uncertainties with one relative standard derivation at 68% confidence level derived from the Monte Carlo simulations

前 言

当前我国城市及区域空气污染呈现复合型大气污染的特征，并已成为制约我国社会经济可持续发展的关键环境问题之一。气溶胶细颗粒物作为大气复合污染的核心污染物，其物理-化学-光学性质及其大气辐射效应一直是环境和气候科学领域研究人员关注的科学前沿，但迄今对此的研究仍相当薄弱。元素碳混合状态和颗粒物吸湿增长特性是评估气溶胶直接辐射强迫时不确定性最大的两个关键因素。因此，对其开展深入探讨不仅可减少评估气溶胶辐射强迫时对其辐射特性和相关机制所做假设的不确定性，而且有助于深入了解气溶胶颗粒物污染导致能见度下降的成因，进而更准确地评估气溶胶的区域气候效应。在此方向的研究突破将为改善我国城市和区域空气质量提供重要的决策支持。

大气气溶胶辐射特性研究同时涉及气溶胶物理、化学、光学性质以及大气辐射学等多个相关学科领域。除 J. H. Seinfeld 和 S. N. Pandis 的 *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* 这部海纳百川的入门者必读著作外，更专业的书需要从各领域去寻找，如 K. N. Liou 的 *An introduction to atmospheric radiation*、C. Bohren 和 D. Huffman 的 *Absorption and scattering of light by small particles* 等。同时，由于需要对大量环境数据进行处理、校正和模拟等，除各领域的专业知识外，数值模拟工具和程序语言也是必需的。在研究过程中，作者从上述经典教材中受益匪浅。同时，又感到一丝遗憾：一方面，经典教材往往注重基础理论讲解，而对其在实际中的应用则着墨不多；另一方面，教材通常基于某个科研领域对知识进行阐述，而缺乏综合运用各领域知识针对某一实际案例的分析。为此，我们在书中更加强调各领域知识在解决实际问题中的综合应用。本书系统阐述了一套以气溶胶辐射效应为核心、基于观测的数值闭合实验（closure experiment）方法；并以 2004 年 10 月珠江三角洲新垦地区（113.6°E，22.6°N）的综合观测数据为案例，揭示了该地区气溶胶中元素碳的混合状态，探讨了相对湿度对气溶胶光学性质及其近地面边界层直接辐射强迫的影响，进而解析出当地气溶胶光学污染的化学贡献率。

从全书结构来看：基于对大气气溶胶光学性质及其辐射效应国内外研究进展的系统而全面的综述（第 1 章），从研究方案的设计到实施（包括观测实验、数据资料处理以及所建立和使用的数值模型），本书均有细致而深入的阐述，具有很好的系统性、合理性和衔接性，对核心案例的研究结果也在书中做了深入剖析

和充分论证（第2~7章）。第8章是对全书的总结，同时对后续相关研究也提出了一些建议和展望。总体而言，本书的主体可分为两个部分：①观测实验的设计和开展以及实验数据的全面评述（第2、3章）；②基于观测数据的数值模拟研究（第4~7章）。

为了正确认知、量化和评价气溶胶颗粒物对新垦地区能见度和辐射强迫的影响，本研究设计了干状态和环境状态下两个气溶胶光学闭合实验。根据闭合实验对数据的需求，2004年秋研究组在广东省珠江三角洲新垦地区针对气溶胶的光学、物理和化学性质开展了为期一个月的综合加强观测。对观测实验的介绍见第2章。首先，第2章简要描述了观测站点新垦地区周边情况以及实验期间的气象条件。其次，根据所测量的不同气溶胶性质分门别类地详细介绍了在新垦站测量中使用的仪器设备。由于评估是否能够从气溶胶相应的物理和化学性质正确模拟其光学性质是本研究的一个重要议题，因此，第2章还着重说明了各仪器的运行原理以及它们在观测期间的运行状况，同时还明确了由仪器设备本身性质决定的测量实验结果在技术上和统计上的不确定性。第3章分析了观测期间气溶胶各类光学、微物理和化学性质以及它们的变化趋势和相互关系。结合文献，第3章将世界上其他站点的相应观测数据与本次观测结果进行比较，揭示了新垦地区气溶胶污染的复杂性和严峻性。

大气气溶胶是一个极为复杂的体系，包含了许多同时进行着的物理和化学过程，它们与入射太阳辐射发生着复杂的相互作用。数值模型提供了一个有效的框架，能够将这些看似独立的过程和性质放到这个框架中进行综合研究。因此，本书在第4~7章中将数值模拟技术应用于探讨新垦地区气溶胶复杂的光学性质以及光学性质与微物理和化学性质之间的相互关系。第4章回顾了基础的Mie理论，重点放在如何从Mie理论的解析模拟计算球形颗粒物光学性质的数值方法上。这为后续的模型方法及其相关修正的演绎和讨论提供了数值理论基础。为了更好、更方便地模拟气溶胶光学性质，第4章结尾部分还讨论并提出了本数值模型研究的基本假设——“三组分”的光学平衡球形气溶胶模型。基于第4章的理论和假设，在第5~7章中，每章都将有针对性地探讨一个本书拟解决的科学问题。这3章的结构类似，主要包括3部分：①针对不同问题而设计的模型和数据处理方法；②结果与讨论；③一个简要的小结。这几章还突出了模型模拟中的不确定性及其来源分析，并利用Monte Carlo方法对由输入参数的实验误差以及模型假设的不确定性导致的输出结果的不确定性进行了综合评估。

第5章利用干状态下气溶胶光学性质的闭合实验研究了新垦地区气溶胶中元素碳的混合状态。在原位（in-situ）观测的气溶胶微物理、化学性质以及“三组分”光学平衡气溶胶模型的基础上，该章介绍了闭合实验的设计框架以及元素碳