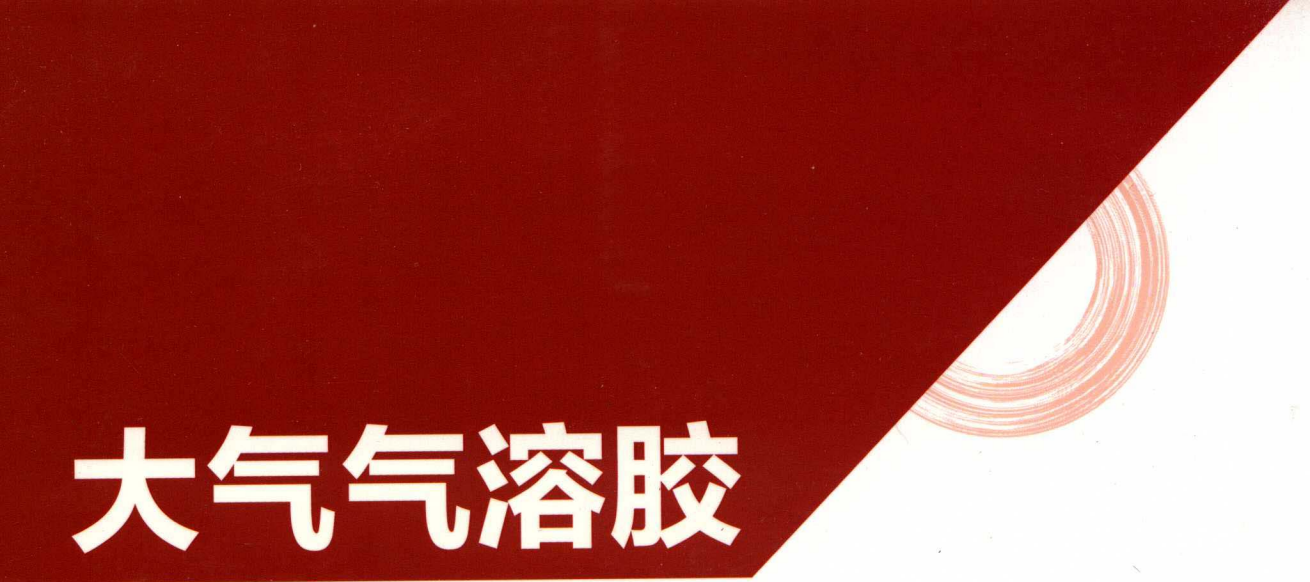


大气气溶胶

及其气候效应

张 华 王志立 赵树云 等◎编著



气象出版社
China Meteorological Press

大气气溶胶及其气候效应

张 华 王志立 赵树云 等 编著

内容简介

本书介绍了基于国家气候中心自主研发的大气辐射传输模式、气溶胶/大气化学-辐射-气候双向耦合模式并结合气象卫星等观测资料获得的气溶胶的分布、辐射强迫和气候效应方面的研究结果,旨在对气溶胶的变化特点及其对气候的影响提供比较全面和系统的认识。全书重点对以下问题做了深入的阐述:全球和中国区域不同种类气溶胶浓度和光学性质的分布特征;气溶胶的直接和间接辐射强迫以及有效辐射强迫的分布特征;气溶胶-云-辐射相互作用对东亚季风系统和全球气候的影响;未来气溶胶减排对全球气候的影响。

本书对从事气溶胶光学、辐射强迫及其气候效应研究的人员和学者有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

大气气溶胶及其气候效应 / 张华等编著. --北京:
气象出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5029-6676-8

I. ①大… II. ①张… III. ①大气-气溶胶-气候效
应-研究 IV. ①P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281010 号

Daqi Qirongjiao jiqi Qihou Xiaoying

大气气溶胶及其气候效应

张 华 王志立 赵树云 等 编著

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑: 杨泽彬

责任校对: 王丽梅

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 330 千字

版 次: 2017 年 11 月第 1 版

定 价: 80.00 元

邮政编码: 100081

E-mail: qxcbs@china.gov.cn

终 审: 张

责任技编: 赵树云



印 张: 13.125

彩 插: 3

印 次: 2017 年 11 月第 1 次印刷

前言

本书是国家气候中心张华研究员及其指导的研究生团队,近年来在气溶胶光学特性、辐射强迫及其气候效应领域最新研究成果的集成。内容包括了气溶胶的浓度、光学性质、辐射强迫和气候效应等。书中同时介绍了自主研发的国家气候中心气溶胶/大气化学-辐射-气候双向耦合模式。该模式是目前中国唯一自主研发的包含了气溶胶-云-辐射相互作用过程的双向耦合模式,并参与了多个关于气溶胶的国际研究比较计划,它估算的气溶胶辐射强迫值被 IPCC 第五次评估报告(IPCC AR5)引用,使得在 IPCC 评估报告历史上第一次有了中国模式的估计值。

气溶胶是大气的重要组成成分。与温室气体一样,以人类活动排放源为主的气溶胶也是影响地球气候系统辐射能量收支平衡的外部强加扰动,称为辐射强迫因子。气溶胶可通过多种方式影响地球气候,近年来气溶胶的辐射强迫及其气候效应成为国内外的研究热点。气溶胶吸收和散射能量的作用取决于气溶胶的浓度和光学性质。气溶胶的光学性质包括光学厚度、单次散射比和非对称因子。因此,本书第 2 章首先介绍了全球和中国区域气溶胶浓度和光学性质的分布及季节变化特征。

辐射强迫是衡量气溶胶和温室气体气候效应最为广泛使用的指标。辐射强迫可以为比较不同因子引起的气候响应,尤其是全球平均地表气温的变化,提供一个简单而量化的标准,因而在科学界得到了广泛的应用。本书第 3 章介绍了辐射强迫的概念,并详细阐述了全球和中国区域气溶胶直接辐射强迫、间接辐射强迫、有效辐射强迫及冰雪表面黑碳气溶胶辐射强迫的分布及季节变化,以及不同因子对气溶胶辐射强迫的影响。

气溶胶可通过多种方式影响地球气候系统:它们能够直接吸收和散射红外和太阳辐射,扰动地-气系统的能量收支;作为云凝结核或冰核,它们可以改变云的微物理性质,间接影响气候系统;处于云层处的吸收性气溶胶能吸收太阳辐射,直接加热大气层,可以使得云滴蒸发、云量减少;吸收性气溶胶沉降到冰雪表面还能减小冰雪表面的反照率,增加地表对太阳辐射的吸收。本书第 4 章、第 5 章和第 6 章分别介绍了气溶胶-辐射相互作用、气溶胶-云相互作用和气溶胶的综合效应对全球气候、亚洲季风、热带云、地表干旱等的影响,以及未来气溶胶减排对气候的影响。

本书第 7 章详细介绍了张华带领团队自主研发的气溶胶/大气化学-辐射-气候双向耦合模式 BCC_AGCM2.0_CUACE/Aero,包括模式耦合的基本思路、模式模拟性能的评估,以及参与气溶胶国际研究比较计划和 IPCC AR5 中对气溶胶辐射强迫评估的情况。

全书由张华、王志立、赵树云等编著。

第 1 章由张华主笔。

第 2 章的 2.1 节由崔振雷、张华主笔;2.2 节由王志立、张华主笔。

第 3 章的 3.1 节由赵树云、张华主笔;3.2 节由张华、王志立、马井会、沈钟平、周晨主笔;

3.3 节由张华、王志立、荆现文、卢鹏主笔;3.4 节由赵树云、张华主笔;3.5 节由王志立、张华主笔。

第4章由王志立、张华主笔。

第5章的5.1节由彭杰、张华主笔;5.2、5.3节由王志立、张华主笔。

第6章的6.1节由赵树云、张华主笔;6.2节由赵树云、周晨、张华主笔;6.3节由王秋艳、王志立主笔;6.4节由王志立、张华主笔。

第7章由张华、王志立、王在志、刘茜霞、荆现文主笔。

周喜讯为本书做了大量细致和繁琐的整理、修改及其他辅助工作。在此谨向为本书做出贡献的所有成员表示诚挚的感谢。

在完成本书研究工作中,国家气候中心王在志研究员和刘茜霞高工,中国气象科学研究院张小曳研究员、龚山陵研究员、王亚强研究员、周春红副研究员和车慧正研究员,中国科学院大气物理研究所石广玉院士、王跃思研究员、辛金元博士和张美根研究员,美国华盛顿大学大气科学系付强教授,日本东京大学中岛映至教授,加拿大气候模拟与分析中心李江南博士和美国马里兰大学李占清教授都曾给予非常重要的帮助。在此谨向他们表示诚挚的感谢。

本书中很多新的研究成果分别是在国家重点基础发展研究计划项目课题“气溶胶气候效应及未来的情景预估(合同号:2006CB403707)”“全球气溶胶的气候效应及对亚洲季风的影响(2011CB403405)”、科技部公益性行业专项项目“新一代云-辐射-气溶胶物理过程模块的研制与应用(GYHY201406023)”、国家自然科学基金项目“新的水云和冰云辐射参数化方案的研究及其在气候模式中的应用(合同号:41375080)”“短寿命气候污染物和人为气溶胶的有效辐射强迫和它们的减排对全球变暖的影响研究(合同号:41575002)”“双参数层云微物理方案在气候模式中的应用及气溶胶间接效应的初步研究(合同号:41205116)”“东亚季风系统对过去和未来人为气溶胶排放变化响应的模拟研究(合同号:41575139)”“中国大气污染物对云和辐射的影响及其气候效应研究(合同号:91644211)”等的资助下完成的。

本书的研究和出版得到了国家重点基础研究计划项目课题“全球气溶胶的气候效应及对亚洲季风的影响(合同号:2011CB403405)”的资助,在此一并致谢。

由于时间仓促,科学认识水平有限,书中难免有误,敬请读者指正。

张 华

2017年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 主要的气溶胶种类及来源	(1)
1.2 气溶胶影响气候的方式	(3)
1.3 气溶胶的气候效应	(5)
参考文献	(7)
第 2 章 气溶胶的浓度和光学性质	(12)
2.1 中国地区气溶胶浓度和光学厚度的分布特征及分析	(12)
2.2 气溶胶浓度和光学性质的全球分布及分析	(24)
参考文献	(38)
第 3 章 气溶胶的辐射强迫	(41)
3.1 气溶胶辐射强迫的概念	(41)
3.2 气溶胶的直接辐射强迫	(42)
3.3 气溶胶的间接辐射强迫	(66)
3.4 人为气溶胶的有效辐射强迫	(72)
3.5 冰雪表面黑碳的辐射强迫	(77)
参考文献	(78)
第 4 章 气溶胶-辐射相互作用对气候的影响	(82)
4.1 碳类气溶胶对亚洲气候的影响	(82)
4.2 人为气溶胶对东亚夏季风的影响	(88)
4.3 冰雪表面黑碳的气候反馈	(90)
参考文献	(93)
第 5 章 气溶胶-云相互作用对气候的影响	(94)
5.1 热带地区气溶胶的激活效应	(94)
5.2 气溶胶间接效应对气候的影响	(107)
5.3 黑碳-云滴混合效应对气候的影响	(111)
参考文献	(115)
第 6 章 气溶胶的综合气候效应	(119)
6.1 人为气溶胶对全球气候的影响	(119)
6.2 气溶胶对地表干旱程度的影响	(126)

6.3 人为气溶胶对东亚夏季风的影响	(140)
6.4 未来减排气溶胶对气候的影响	(147)
参考文献	(161)
第7章 BCC_AGCM2.0_CUACE/Aero 双向耦合模式系统发展	(164)
7.1 大气环流模式 BCC_AGCM2.0	(164)
7.2 气溶胶/大气化学模式 CUACE/Aero	(166)
7.3 模式耦合基本思路	(172)
7.4 对耦合模式模拟性能的评估	(172)
7.5 参与国际气溶胶模式与观测比较计划(AeroCom)和 IPCC AR5 对气溶胶及其 辐射强迫的评估	(195)
参考文献	(197)

第1章 绪论

气溶胶通常是指悬浮在大气中粒径大约在 $1\text{ nm}^{\text{①}}\sim 100\text{ }\mu\text{m}^{\text{②}}$ 的固体和液体粒子。气溶胶在自然界中存在着广泛的源,如土壤和岩石的风化、火山喷发、植物花粉、海沫破裂干涸等。气溶胶是形成云、雾滴,继而形成降水的必要条件。然而自工业革命以来,人类通过各种活动(工业、农业、交通运输、建筑等)向大气中排放了大量的气溶胶。根据政府间气候变化专门委员会第五次评估报告(IPCC,2013),人类活动已经成为硫酸盐、黑碳、硝酸盐、铵盐以及很大一部分有机气溶胶的主要来源。大气中气溶胶含量的增加,除了造成严重的环境问题外,所带来的气候效应也逐渐引起了广泛的关注。

1.1 主要的气溶胶种类及来源

1.1.1 硫酸盐气溶胶

近几十年来,由于化石燃料使用量的增加引起了大气中 SO_2 浓度的上升,从而使全球硫酸盐气溶胶的大气含量明显增加。Haywood 等(2000)对 SO_2 的排放源进行了统计,指出全球 SO_2 的排放量约为 $66.8\sim 92.4\text{ Tg}^{\text{③}}\cdot\text{a}^{-1}(\text{S})$,其中大约 72%来自化石燃料燃烧,19%来自海洋浮游植物的排放,9%来自火山排放。Streets 等(2003)指出,1980 年以来亚洲 SO_2 的排放增加明显,至 2000 年排放强度达到了 $17\text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}(\text{S})$ 。近几十年,亚洲 SO_2 排放增加的主要原因是发展中国家经济的快速发展对含硫矿物燃料(煤)的使用量剧增。目前,东亚是全球硫化物排放较多的地区之一。含硫气体的增加造成了大量硫酸盐气溶胶的生成,除了使环境恶化外,还可能对区域气候造成一定的影响。

自 20 世纪 90 年代以来,许多学者对我国和东亚地区的硫酸盐气溶胶及其前体物的浓度分布做了研究,包括对 SO_2 排放的估计(白乃彬,1996),对个别城市 SO_2 和硫酸盐气溶胶浓度的观测研究(盛立芳 等,2002;刘宇 等,2002),建立数值模式和开展理论研究工作(毛节泰,1992;程新金 等,2002),以及对 SO_2 和硫酸盐气溶胶的输送机理、浓度分布和季节变化特征进行的数值模拟研究(王喜红,2000;王喜红 等,2001)。

1.1.2 含碳气溶胶

含碳气溶胶包括黑碳和有机碳。黑碳气溶胶来源于含碳物质的不完全燃烧。Bond 等(2004)对

① $1\text{ nm}=1\times 10^{-9}\text{ m}$

② $1\text{ }\mu\text{m}=1\times 10^{-6}\text{ m}$

③ $1\text{ Tg}=1\times 10^9\text{ kg}$

全球黑碳气溶胶的排放进行了详细的分析,指出黑碳的排放强度大约为 $8.0 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$,其中化石燃料和生物质燃烧贡献 $4.6 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$,露天焚烧贡献 $3.3 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$ 。Ito 等(2005)的研究表明,2000 年全球来自化石燃料燃烧的黑碳气溶胶排放强度为 $2.8 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$,该值相对于 20 世纪 50 年代的黑碳气溶胶排放强度增加了约 3 倍。20 世纪 50 年代以前,北美和西欧为最大的黑碳气溶胶排放源地,而目前位于热带和东亚地区的发展中国家已经成为黑碳的最大源区(Bond *et al.*, 2007),这主要归咎于近几十年发展中国家的经济膨胀。

有机碳气溶胶由含碳物质充分燃烧产生,既包含一次气溶胶颗粒,又有来自半挥发或挥发性有机气体的冷凝物形成的二次气溶胶颗粒。全球化石燃料燃烧排放的有机碳气溶胶约为 $2.2 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,而生物质燃烧排放的有机碳气溶胶约为 $7.5 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,有机碳气溶胶总的排在 1870 至 2000 年间增加了约 3 倍(Ito *et al.*, 2005)。

目前中国的能源结构依然是以煤为主,而且燃烧方式比较落后。另外,生物质燃烧量也相当可观,这些因素决定了含碳气溶胶是中国大气气溶胶的重要组成部分,并且可能对中国的区域气候产生重要的影响。

1.1.3 硝酸盐气溶胶

大气中硝酸盐气溶胶的含量与太阳辐射、温度、湿度、 NO_x 、 NH_3 、 O_3 等前体物的浓度密切相关(Wang *et al.*, 2006)。Putaud 等(2004)对细模态硝酸盐气溶胶的地面观测表明,一般在工业高度发达的地区硝酸盐浓度较高,而在乡村地区硝酸盐的浓度较低。从全球来看,硝酸盐气溶胶的前体物 NO_x 主要来自自然过程排放,但随着近年来全球经济的发展,化石燃料的使用量增加迅速,使得含氮污染物的排放量也在逐年升高(Ohare *et al.*, 2007)。在中国,城市硝酸盐气溶胶及其前体物的浓度与机动车排放关系非常密切。近年来中国各大城市的机动车保有量在不断上升,这可能导致了我国城市硝酸盐气溶胶的大气含量整体略高于美国(Zhang *et al.*, 2009)。

1.1.4 沙尘气溶胶

沙尘气溶胶也称矿物沙尘,主要源于干旱、半干旱地区风对地表的侵蚀(钱云 等, 1999)。全球主要有 4 个沙尘暴多发区:中亚、北美、中非和澳大利亚。IPCC 第四次评估报告(AR4)估计直径在 $10 \mu\text{m}$ 以下的沙尘气溶胶排放强度在 $1000 \sim 3000 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,其中的 7%~20%是直径在 $1 \mu\text{m}$ 以下的沙尘粒子。气溶胶观测与模式比较计划(AeroCom)给出的 2000 年多模式对沙尘气溶胶柱含量模拟的中值为 $31.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Zhang 等(1997)估算出亚洲沙尘气溶胶的排放强度大约为 $800 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,其中大约 30%的沙尘会重新沉降在沙漠地区,20%的沙尘粒子可以进行区域间传输,而剩下的大约 50%的沙尘粒子可以传输到太平洋甚至更远的地方。

1.1.5 海盐气溶胶

海盐气溶胶主要由海浪飞沫破裂干涸产生,是海洋大气中主要的气溶胶种类。海盐气溶胶具有很好的吸湿性,是影响云和降水形成的重要因素。海盐气溶胶被认为是一种自然源气溶胶,但是人为活动造成的气候变化也会影响海盐气溶胶的排放。Textor 等(2005)统计了 AeroCom 不同模式模拟的海盐气溶胶排放强度,平均值为 $16300 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,但不同模式结果之间的标准差为该平均值的 2 倍。观测和模拟结果表明,在 $30^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ 和 $30^\circ \sim 60^\circ \text{S}$ 的洋面上,存在着两个海盐气溶胶柱含量的大值带(Takemura *et al.*, 2002; Liao *et al.*, 2004)。

1.2 气溶胶影响气候的方式

1.2.1 气溶胶-辐射相互作用

气溶胶可以散射和/或吸收长、短波辐射,从而直接影响地-气系统的辐射平衡,进而对气候产生影响。气溶胶-辐射相互作用对气候产生的影响与气溶胶本身的光学性质有着密切的关系。气溶胶-辐射相互作用通常也称为气溶胶的直接效应。

硫酸盐气溶胶对太阳辐射具有强烈的散射作用,从而在大气顶造成负的辐射强迫。观测表明,自20世纪50年代以来,中国东部大部分地区日照时数和到达地面的太阳辐射呈明显减少的趋势,一般认为包含硫酸盐在内的人为气溶胶的逐年增加是造成这种减少趋势的主要原因之一(周秀骥等,1998;罗云峰,1998)。Kiehl等(2000)利用美国国家大气研究中心(NCAR)的全球气候模式CCM3模拟的硫酸盐气溶胶的全球年平均直接辐射强迫为 $-0.56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。孙家仁等(2008)利用NCAR的大气环流模式CAM3.0单向耦合一个气溶胶同化系统,模拟出中国硫酸盐气溶胶造成的全球年平均直接辐射强迫为 $-0.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。吴蓬萍等(2009)利用一个耦合了硫循环过程的动力模式模拟了硫酸盐气溶胶直接效应对水循环过程的影响,发现硫酸盐造成的降水变化最大区域在 $15^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$,而对 $15^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{S}$ 的降水影响相对较小。Fischer-Bruns等(2009)研究了硫酸盐气溶胶直接效应对未来北大西洋气候的影响,发现硫酸盐在大气顶产生负的辐射强迫将减弱未来气候的变暖,会对北大西洋涛动产生一定影响。

黑碳气溶胶具有特殊的光学性质,可以吸收从短波到红外很宽波段的太阳辐射。黑碳对太阳短波辐射的吸收,使得到达地面的太阳辐射减少,在地面造成负的辐射强迫(张华等,2008;王志立等,2009)。与此同时,黑碳气溶胶吸收太阳辐射后可以加热其所在的局部大气,使得大气向下的红外辐射增加,从而在对流层顶造成正的辐射强迫。黑碳气溶胶可以增加对流层大气的稳定度,抑制对流的发生,减少地表蒸发,进而影响水循环。张华等(2008)利用一个辐射传输模式,并结合全球气溶胶数据集(GADS),得出晴空条件下黑碳气溶胶在对流层顶的全球冬、夏季(对北半球而言)平均的辐射强迫分别为 $+0.085$ 、 $+0.155 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,在地面则分别为 -0.37 、 $-0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Ramanathan等(2008)认为黑碳气溶胶在大气顶的直接辐射强迫为 $+0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,比除 CO_2 以外的其他温室气体的辐射强迫都要大;黑碳气溶胶对整个大气层的辐射加热效应为 $+2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,几乎为所有温室气体对大气加热值的两倍。另外,大量观测表明黑碳气溶胶能够与硫酸盐、有机碳等可溶性气溶胶发生内混合,从而极大地改变自身的光学特性,增强其正辐射强迫。

有机碳气溶胶是一种以散射性为主的气溶胶,但由于有机碳吸湿后复折射指数会发生很大变化,使得相关研究存在很大的不确定性。IPCC AR5给出了1750—2010年间来自化石和生物燃料燃烧产生的有机碳的直接辐射强迫为 -0.09 ($-0.16 \sim -0.03$) $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

硝酸盐气溶胶的全球平均直接辐射强迫为负值。目前,国内外对硝酸盐气溶胶辐射强迫的研究较少,IPCC AR5给出硝酸盐气溶胶的直接辐射强迫为 -0.11 ($-0.3 \sim -0.03$) $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Adams等(2001)利用模式模拟了IPCC SRES A2排放情景下2005年和2100年硝酸盐和硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫,结果表明2005年硝酸盐和硫酸盐气溶胶引起的人为辐射强迫分

别为 -0.19 、 $-0.95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,到2100年则分别为 -1.28 、 $-0.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Liao等(2005)同样在SRES A2排放情景下模拟了硝酸盐气溶胶2000年和2100年的直接辐射强迫,分别为 -0.22 、 $-1.01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这表明未来硝酸盐气溶胶的直接辐射强迫将逐渐增大,并超过硫酸盐。同时也意味着对硝酸盐气溶胶辐射强迫的研究很可能会成为未来气候变化研究的一个热点。

沙尘气溶胶的消光效应以散射短波辐射为主,但对红外辐射也具有较强的吸收作用。沙尘气溶胶造成到达地面的太阳辐射减少和地面气温下降,同时沙尘的吸收作用也会加热大气层,从而改变大气的层结稳定度。IPCC AR5给出人为沙尘气溶胶的全球年平均直接辐射强迫为 $-0.3 \sim +0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,同时指出沙尘气溶胶的直接辐射强迫仍具有很大的不确定性。Shi等(2005)发现亚洲沙尘在短波和大部分红外波段的复折射指数的实部均高于世界气象组织(WMO)的结果,而虚部在短波波段却小于WMO的结果。

海盐气溶胶也是一种散射性气溶胶,所造成的负辐射强迫几乎遍布所有洋面上。Takemura等(2002)模拟的海盐气溶胶年平均直接辐射强迫为 $-0.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而Grini等(2002)的模拟结果为 $-1.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这说明目前海盐气溶胶的辐射强迫仍具有很大的不确定性。

值得注意的是,气溶胶-辐射相互作用除了依赖气溶胶本身的性质外,如粒子谱分布、形状、化学组成、混合状态等,还取决于地面反照率和云的情况等因素。因此,目前关于气溶胶-辐射相互作用仍有很大的不确定性。

1.2.2 气溶胶-云相互作用

大约60%的地球表面被云覆盖,云在影响地-气系统辐射收支方面有着重要的影响。云既能反射太阳短波辐射,也能吸收地表发出的红外辐射。云量及云光学性质的改变能对地-气系统的能量平衡产生极大的扰动。气溶胶颗粒物与云微物理性质之间的联系很早就被科学家们所发现(Warner *et al.*, 1967; Egan *et al.*, 1974)。许多研究发现亚马孙流域森林火灾所产生的浓烟可以导致云滴数浓度增加和粒径减小(Reid *et al.*, 1999; Andreae *et al.*, 2004; Mircea *et al.*, 2005)。大量的飞机和卫星观测也显示,无论是在区域还是全球尺度上气溶胶颗粒与云的微物理特性之间均存在复杂的关系。但是气溶胶颗粒与云之间的相互作用非常复杂,而且很多是非线性过程(Ramaswamy *et al.*, 2001),因而具有极大的不确定性,是当前气候研究中的难点问题。

气溶胶对暖云反照率和生命期影响的相关研究起始于Ferek等(1998)对加利福尼亚沿岸因轮船轨迹扰动而产生的海洋层云的观测。Brenguier等(2000)和Schwartz等(2002)对大西洋上云的观测表明,受气溶胶污染后云中云滴更小,云更薄。Nakajima等(2001)分析AVHRR卫星观测资料发现,海洋上气溶胶柱含量和柱云滴数浓度之间存在正相关。这种正相关关系也被其他研究所证实(Brenguier *et al.*, 2000; Rosenfeld *et al.*, 2000)。黄梦宇等(2005)利用机载粒子探测系统对1990年秋季和1991年春季层状云进行了探测,发现华北地区层状云的云下气溶胶数浓度与云滴数浓度之间存在正相关关系。但是,除了造成层状云云滴数量增加和粒径减小外,也有研究强调气溶胶对云中液态水含量影响的重要性,指出在一些高污染地区云的液态水含量减少,云的反射比也相应有所减小(Jiang *et al.*, 2002; Brenguier *et al.*, 2003; Twohy *et al.*, 2005)。

气溶胶对混合相云的影响首先体现在对大尺度混合相云的影响。大部分的降水来源于冰

相云粒子,所以气溶胶通过影响冰云而导致的水循环变化比通过影响水云更大(Lau *et al.*, 2003)。一般情况下,过冷却水云中的温度达不到发生同质成核的条件($T < -35^{\circ}\text{C}$),为了使成核过程发生就需要气溶胶提供一个形成冰核的表面。气溶胶可以通过与过冷却云滴接触、浸润和作为沉降核对混合相云产生影响。接触冷却在一些小的过冷却现象中经常是最有效的过程,但是当温度较低时浸润冷却可能更加普遍。由于从水汽到冰的相变需要克服较大的能量,通过沉降核所起的作用一般效率最低(IPCC, 2007)。冰核一般是不溶于水的颗粒物,如特定的矿物尘、烟尘和一些生物物质,这与云凝结核有所不同。目前,由于大气中冰核的增加导致过冷却云形成冰粒子的概率更高,冰相降水也更多,进而导致北半球中高纬地区的云量减少和更多的太阳辐射被地-气系统所吸收(IPCC, 2007)。

目前,人们对气溶胶颗粒在过冷却水云中的作用机制已经有所了解,但是对异质冰晶成核机制的探索仍处于初级阶段。有研究表明飞机尾气中含有许多气溶胶颗粒物,一方面在较低的气压和温度条件下可以直接形成飞行云,另一方面也可以影响对流层上层卷云的冰核数量。Penner 等(1999)把飞机对对流层卷云的影响作为一个潜在的气候强迫。Boucher(1999)分析了云量和飞机燃料消耗数据的关系,指出 20 世纪 80 年代空中交通燃料消耗增多,同时卷云云量也增多。Minnis 等(2004)通过对 1971—1995 年美国地表数据的分析,证实了该时期北方海洋和美国卷云量有所增加。需要指出的是,科学界对气溶胶与卷云之间相互作用的了解还远远不够,因此在气候模式中模拟气溶胶与卷云之间的相互作用还存在很大困难。

1.2.3 冰雪表面黑碳的作用

大气中的吸收性气溶胶(如黑碳、沙尘)可以随着大气环流进行远距离传输,沉降到冰雪表面,从而降低冰雪表面的反照率(Warren *et al.*, 1980; Hansen *et al.*, 2004; Jacobson, 2004)。冰雪中黑碳气溶胶对反照率的影响主要集中在波长 $0.9\ \mu\text{m}$ 以下。Hansen 等(2004)通过对阿拉斯加、加拿大、格陵兰岛、极地等全球多个站点冰雪样品的分析,发现冰雪中的黑碳气溶胶能使波长小于 $0.77\ \mu\text{m}$ 的北极冰雪反照率减小 2.5%,北半球陆地被雪覆盖区域的反照率减小 5%,除南极外的南半球冰雪覆盖区域的反照率减小 1%。Ming 等(2009)对中国西部及青藏高原多个站点的观测研究也显示,冰雪中黑碳气溶胶造成哈希勒根(43.73°N , 84.46°E)和庙儿沟(43.06°N , 94.32°E)站的反照率减小 6%,拉弄(30.42°N , 90.57°E)的反照率减小 5%,慕士塔格(75.02°E , 38.28°N)的反照率减小 4%,站点平均反照率减小约 5%。目前已有科学家利用大气环流模式模拟冰雪中黑碳气溶胶的辐射强迫($+0.007 \sim +0.24\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),并发现黑碳对冰雪反照率的影响机制在增加全球平均地表温度方面比 CO_2 的效率更高(Hansen *et al.*, 2004; Flanner *et al.*, 2007)。

1.3 气溶胶的气候效应

1.3.1 气溶胶对亚洲季风的影响

亚洲季风是全球最复杂、影响最广的季风系统,它带来的降雨量影响近 60% 地球总人口的生活和生产活动。最近几十年的高速工业化、城市化和农业等人类活动,使得亚洲成为气溶胶排放增长速度最快的地区之一。大量研究表明,气溶胶能改变大气和地球表面能量平衡,进

而改变大气环流和地球水循环(Kristjánsson *et al.*, 2005; Koch *et al.*, 2007)。在亚洲季风区, 气溶胶是一个重要的气候影响因子, 它与亚洲季风之间的相互作用是一个研究热点。

21 世纪以来, 已有很多学者开展了气溶胶对季风影响的研究。Menon 等(2002)利用大气环流模式 GISS 模拟了东亚季风区黑碳气溶胶的气候效应, 表明中国夏季近 50 年来经常发生的南涝北旱现象可能与黑碳气溶胶增加有关。而 Zhang 等(2009)利用全球气候模式 CAM3/NCAR, 在同时考虑了具有吸收效应的黑碳和散射效应的有机碳的情况下, 发现碳类气溶胶不会引起中国出现南涝北旱的现象。Lau 等(2006)的研究指出, 青藏高原南北侧的吸收性气溶胶能够强烈吸收太阳短波辐射, 加热该地区的大气, 可能会导致 5 月底到 6 月初孟加拉湾西南气流加强, 降水增多, 且有利于南亚夏季风的提前建立。Chung 等(2006)利用大气环流模式研究了南亚地区黑碳气溶胶对局地环流和夏季降水的影响, 结果表明黑碳气溶胶可以加热对流层, 引起北印度洋和印度次大陆垂直上升运动增强和降水增加。孙家仁等(2008)利用 NCAR 的新一代模式 GCM CAM3.0 离线耦合了一个气溶胶同化系统, 模拟研究了中国硫酸盐和黑碳气溶胶的直接气候效应对东亚夏季风及降水的影响, 结果表明硫酸盐气溶胶导致东亚夏季风强度减弱, 中国地区季风降水明显减少, 但是黑碳气溶胶对东亚夏季风减弱的程度较小。许多研究还表明, 在长时间尺度上, 气溶胶可以阻挡到达地表的太阳辐射, 引起地表冷却, 导致热带水循环逐渐减慢和亚洲季风减弱(Ramanathan *et al.*, 2005), 但是在季节和年际尺度上, 气溶胶对亚洲季风的影响机制还有待于进一步研究。

1.3.2 气溶胶对地表干旱程度的影响

目前绝大部分针对气溶胶气候效应的研究归结点为降水, 而气溶胶对地表干旱程度的影响极少被提及或用其对降水的影响来代替。但是降水变化不能全面反映一个地区干旱或湿润程度的变化。

地表是连接大气与土壤的界面(Fraedrich *et al.*, 2011), 地表水分平衡的变化在很大程度上与土壤干湿变化是耦合的, 这就为我们研究气溶胶对地表干旱程度的变化提供了方便。事实上, 关于温室气体对地表干旱程度的影响研究已经开展。Emanuel 等(1985)以霍尔德里奇生命区(Holdridge, 1947)的分布变化为判断标准, 利用一个气候模式模拟了 CO_2 造成的增温对地表生态复杂性的影响, 发现 CO_2 造成的生态系统变化主要发生在高纬度地区, 因为那里的增暖最明显; 寒带森林可能会被冷温带森林或苔原所取代; 而在低纬, 副热带湿润森林可能会被热带干旱森林所取代。Gao 等(2008)以 Köppen(1900)、Budyko(1974)和 UNEP(1992)三种气候类型划分方法为依据, 利用区域气候模式 RegCM 研究了在 IPCC A2 和 B2 一高一低两种排放情景下, 地中海地区地表干旱程度的变化, 发现在 CO_2 浓度不断增加的过程中, 地中海地区可能会经历干旱程度增加和干旱地区向北扩张。Fraedrich 等(2011)根据 Budyko(1974)的气候分类法, 利用全球气候模式 ECHAM5 模拟了 A1B 排放情景下地表干旱程度的变化, 并发展了一个水域尺度的诊断气候变化的新指标“湖泊面积比”, 发现 CO_2 浓度增加会造成全球地表干旱程度增加。Feng 等(2013)根据 UNEP(1992)推荐的气候划分方法, 利用观测资料以及 CMIP5^① 多模式集合平均结果研究了过去和未来干旱区面积的变化, 发现 1948—2008 年全球干旱区在扩张, 在 RCP8.5 排放路径下 21 世纪末全球干旱区面积可能比 1961—1990

① CMIP5: 世界气候研究计划(WCWP)组织实施的第 5 阶段国际耦合模式比较计划。

年平均状态多10%。Fu等(2014)同样根据 UNEP(1992)推荐的干燥度指数以及 CMIP5 的试验结果发现在 CO_2 浓度加倍的情况下,全球地表干旱程度会加重,并重点探索了 CO_2 增加造成地表干旱程度加重的内在机制。Cook等(2014)以 PDSI(Palmer 旱涝指数)和 SPEI(标准降水蒸发指数)为标准,通过分析 CMIP5 多模式的历史模拟和在 RCP8.5 排放情景下对未来的模拟结果,发现全球变暖引起地表蒸发需求增加,不仅使本已经历了降水减少的地区干旱加剧,甚至会使部分降水增加的地区反而变得干旱,从而带来一个整体更加干旱的气候。

综合以上的研究结果可以发现,温室气体,尤其是 CO_2 主导的全球气候变暖可以造成地表干旱程度的增加。与温室气体一样,气溶胶也是人类活动的产物,了解气溶胶对地表干旱程度的影响对我们更全面地理解人类活动的气候影响非常重要。同时,前人针对温室气体的研究经验也为我们研究气溶胶对地表干旱程度的影响提供了有价值的参考。本书第6章在讨论气溶胶综合气候效应的基础上,集中讨论人为气溶胶和自然气溶胶中的沙尘气溶胶对全球地表干旱程度的影响。

参考文献

- 白乃彬,1996. 中国大陆 CO_2 , SO_2 和 NO_x $1^\circ \times 1^\circ$ 网格排放估计[M]//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 北京:气象出版社:145-150.
- 程新金,黄美元,安峻岭,等,2002. 大气污染物 SO_x 输送方程的尺度分析[J]. 气象学报, **60**(4):468-476.
- 黄梦宇,段英,赵春生,等,2005. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院学报, **28**(3):360-368.
- 刘宇,祁斌,2002. 兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系[J]. 高原气象, **21**(3):322-326.
- 罗云峰,1998. 中国地区气溶胶光学厚度特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟[D]. 北京:北京大学.
- 毛节奏,1992. 广东、广西地区酸沉降统计模式的研究[J]. 环境科学学报, **12**(1):28-36.
- 钱云,符淙斌,王淑瑜,1999. 沙尘气溶胶与气候变化[J]. 地球科学进展, **14**(4):391-394.
- 盛立芳,高会旺,张英娟,等,2002. 夏季渤海 NO_x , O_3 , SO_2 和 CO 浓度观测特征[J]. 环境科学, **23**(6):31-35.
- 孙家仁,刘煜,2008. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响(I):硫酸盐气溶胶的影响[J]. 气候变化研究进展, **4**(2):111-116.
- 王宏,石广玉,王标,等,2007. 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[J]. 大气科学, **31**(3):515-526.
- 王喜红,2000. 东亚地区人为硫酸盐气溶胶气候效应的数值研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所.
- 王喜红,石广玉,2001. 东亚地区人为硫酸盐的直接辐射强迫[J]. 高原气象, **20**(3):258-263.
- 王志立,郭品文,张华,2009. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究[J]. 气候与环境研究, **14**(2):161-171.
- 吴蓬萍,刘煜,2009. 硫酸盐气溶胶对全球水循环因子的影响[J]. 气候变化研究进展, **5**(1):44-49.
- 张华,马井会,郑有飞,2008. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究[J]. 大气科学, **32**(5):1147-1158.
- 周秀骥,李维亮,罗云峰,1998. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟[J]. 大气科学, **22**(4):418-427.
- Adams P J, Seinfeld J H, Koch D, et al., 2001. General circulation model assessment of direct radiative forcing by the sulfate-nitrate-ammonium-water inorganic aerosol system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**(D1):1097-1111.

- Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, *et al.*, 2004. Smoking rain clouds over the Amazon[J]. *Science*, **303** (5662):1337-1342.
- Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, *et al.*, 2007. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850—2000 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, **21** (2), doi: 10.1029/2006GB002840.
- Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.*, 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109** (D14), doi: 10.1029/2003JD003697.
- Boucher O, 1999. Air traffic may increase cirrus cloudiness[J]. *Nature*, **397** (6714):30-31.
- Brenguier J L, Pawlowska H, Schüller L, 2003. Cloud microphysical and radiative properties for parameterization and satellite monitoring of the indirect effect of aerosol on climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108** (D15), doi: 10.1029/2002JD002682.
- Brenguier J L, Pawlowska H, Schüller L, *et al.*, 2000. Radiative properties of boundary layer clouds: Droplet effective radius versus number concentration[J]. *Journal of the atmospheric sciences*, **57** (6):803-821.
- Budyko M I, 1974. *Climate and Life*. Academic Press, 508pp.
- Chung C E, Ramanathan V, 2006. Weakening of North Indian SST gradients and the monsoon rainfall in India and the Sahel[J]. *Journal of Climate*, **19** (10):2036-2045.
- Cook B I, Smerdon J E, Seager R, *et al.*, 2014. Global warming and 21st century drying[J]. *Climate Dynamics*, **43** (9-10):2607-2627.
- Eagan R C, Hobbs P V, Radke L F, 1974. Measurements of cloud condensation nuclei and cloud droplet size distributions in the vicinity of forest fires[J]. *Journal of Applied Meteorology*, **13** (5):553-557.
- Emanuel W R, Shugart H H, Stevenson M P, 1985. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes[J]. *Climatic change*, **7** (1):29-43.
- Feng S, Fu Q, 2013. Expansion of global dryland under a warming climate[J]. *Atmos. Chem. Phys*, **13** (10):081-10.
- Ferek R J, Hegg D A, Hobbs P V, *et al.*, 1998. Measurements of ship-induced tracks in clouds off the Washington coast[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103** (D18):23199-23206.
- Fischer-Bruns I, Banse D F, Feichter J, 2009. Future impact of anthropogenic sulfate aerosol on North Atlantic climate[J]. *Climate dynamics*, **32** (4):511-524.
- Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, *et al.*, 2007. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112** (D11), doi: 10.1029/2006JD008003.
- Fraedrich K, Sielmann F, 2011. An equation of state for land surface climates[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **21** (12):3577-3587.
- Fu Q, Feng S, 2014. Responses of terrestrial aridity to global warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119** (13):7863-7875.
- Gao X, Giorgi F, 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model[J]. *Global and Planetary Change*, **62** (3):195-209.
- Grini A, Myhre G, Sundet J K, *et al.*, 2002. Modeling the annual cycle of sea salt in the global 3D model Oslo CTM2: Concentrations, fluxes, and radiative impact[J]. *Journal of Climate*, **15** (13):1717-1730.
- Hansen J, Nazarenko L, 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedo[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101** (2):423-428.
- Haywood J, Boucher O, 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols:

- A review[J]. *Reviews of geophysics*, **38**(4):513-543.
- Holdridge L R, 1947. Determination of world plant formations from simple climatic data[J]. *Science*, **105**: 367-368.
- 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 [Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.*, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.*, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.
- Ito A, Penner J E, 2005. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870-2000[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**(2), doi:10.1029/2004GB002374.
- Jacobson M Z, 2004. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**(D21), doi:10.1029/2004JD004945.
- Jiang H, Feingold G, Cotton W R, 2002. Simulations of aerosol-cloud-dynamical feedbacks resulting from entrainment of aerosol into the marine boundary layer during the Atlantic Stratocumulus Transition Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**(D24), doi:10.1029/2001JD001502.
- Kiehl J T, Schneider T L, Rasch P J, *et al.*, 2000. Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3[J]. *Journal of Geophysical Research*, **105**(D1):1441-1457.
- Koch D, Bond T C, Streets D, *et al.*, 2007. Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**(D2), doi:10.1029/2005JD007024.
- Köppen W, 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt[J]. *Geographische Zeitschrift*, **6**:593-611, 657-679.
- Kristjánsson J E, Iversen T, Kirkevåg A, *et al.*, 2005. Response of the climate system to aerosol direct and indirect forcing: Role of cloud feedbacks[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110**(D24), doi:10.1029/2005JD006299.
- Lau K M, Kim K M, 2006. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, **33**(21), doi:10.1029/2006GL027546.
- Lau K M, Wu H T, 2003. Warm rain processes over tropical oceans and climate implications[J]. *Geophysical Research Letters*, **30**(24), doi:10.1029/2003GL018567.
- Liao H, Seinfeld J H, 2005. Global impacts of gas-phase chemistry-aerosol interactions on direct radiative forcing by anthropogenic aerosols and ozone[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110**(D18), doi:10.1029/2005JD005907.
- Liao H, Seinfeld J H, Adams P J, *et al.*, 2004. Global radiative forcing of coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**(D16), doi:10.1029/2003JD004456.
- Menon S, Genio A D D, Koch D, *et al.*, 2002. GCM simulations of the aerosol indirect effect: Sensitivity to cloud parameterization and aerosol burden[J]. *Journal of the atmospheric Sciences*, **59**(3):692-713.
- Ming J, Xiao C, Cachier H, *et al.*, 2009. Black Carbon(BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedo[J]. *Atmospheric Research*, **92**(1):114-123.
- Minnis P, Ayers J K, Palikonda R, *et al.*, 2004. Contrails, cirrus trends, and climate[J]. *Journal of Climate*, **17**(8):1671-1685.

- Mircea M, Facchini M C, Decesari S, *et al.*, 2005. Importance of the organic aerosol fraction for modeling aerosol hygroscopic growth and activation; a case study in the Amazon Basin[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**(11):3111-3126.
- Nakajima T, Higurashi A, Kawamoto K, *et al.*, 2001. A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters[J]. *Geophysical Research Letters*, **28**(7):1171-1174.
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J I, *et al.*, 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**(16):4419-4444.
- Penner J E, Lister D H, Griggs D J, *et al.*, 1999. Aviation and the Global Atmosphere[M]. New York: Cambridge Univ. Press, 373.
- Putaud J P, Raes F, Van Dingenen R, *et al.*, 2004. A European aerosol phenomenology—2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe[J]. *Atmospheric environment*, **38**(16):2579-2595.
- Ramanathan V, Carmichael G, 2008. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. *Nature geoscience*, **1**(4):221-227.
- Ramanathan V, Chung C, Kim D, *et al.*, 2005. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **102**(15):5326-5333.
- Ramaswamy V, Coauthors, 2001. Radiative forcing of climate change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Houghton *et al.*, Eds.), Cambridge University Press, 349-416.
- Reid J S, Eck T F, Christopher S A, *et al.*, 1999. Use of the Ångström exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104**(D22):27473-27489.
- Rosenfeld D, Woodley W L, 2000. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C [J]. *Nature*, **405**(6785):440-442.
- Schwartz S E, Benkovitz C M, 2002. Influence of anthropogenic aerosol on cloud optical depth and albedo shown by satellite measurements and chemical transport modeling[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **99**(4):1784-1789.
- Shi G, Wang H, Wang B, *et al.*, 2005. Sensitivity experiments on the effects of optical properties of dust aerosols on their radiative forcing under clear sky condition[J]. *J Meteorological Society of Japan*, **83**:333-346.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.*, 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108** (D21), doi: 10.1029/2002JD003093.
- Takemura T, Nakajima T, Dubovik O, *et al.*, 2002. Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model[J]. *Journal of Climate*, **15**(4):333-352.
- Textor C, Schulz M, Guibert S, *et al.*, 2005. Results from simulations of an ensemble of global aerosol models using the same emission data within AeroCom[C]. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Twohy C H, Petters M D, Snider J R, *et al.*, 2005. Evaluation of the aerosol indirect effect in marine stratocumulus clouds: Droplet number, size, liquid water path, and radiative impact[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110**(D8), doi:10.1029/2004JD005116.
- UNEP, 1992. World Atlas of Desertification. Edward Arnold: London.
- Wang T, Li S, Jiang F, *et al.*, 2006. Investigations of main factors affecting tropospheric nitrate aerosol using a