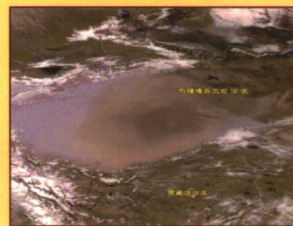
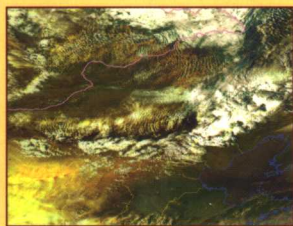
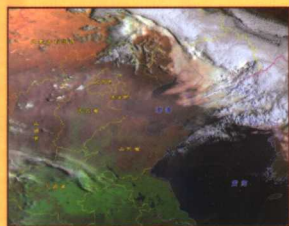


千里黄云

—东亚沙尘暴研究



曾庆存 董超华 彭公炳
赵思雄 方宗义 等著



科学出版社
www.sciencep.com



平里香云

中国书画函授大学



中国书画函授大学

中国书画函授大学

千里黄云

——东亚沙尘暴研究

曾庆存 董超华 彭公炳
赵思雄 方宗义 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面阐述东亚地区沙尘天气监测、预警、预告的方法和结果分析以及灾情的评估方法, 主要内容包括: 我国沙尘天气的长期统计特征及其气候环境背景分析, 东亚沙尘天气监测分析和沙尘特性的定量观测分析和遥感反演, 风沙动力学, 沙尘天气的数值预告和气候距平形势的动力学预测, 灾害评估方法, 以及世界沙尘天气概况; 并涉及沙尘暴防治问题。

本书体现了多学科的交叉渗透, 将应用卫星的监测系统、地面站网观测系统、地理信息系统、天气学分析和气候学统计、风沙动力学、沙尘暴天气和气候数值预报以及应用业务系统集成成为一个有机体系。

本书包含了大量的新观测事实和若干创造性研究成果, 并在实际应用中发挥了显著作用。全书写作方法独特, 内容全面, 资料翔实, 图文并茂, 深入浅出, 雅俗共赏, 具有重要的科学意义和实用价值, 也兼具科学普及功能。

本书可供气象、环境和地球科学等领域的科学研究、教学及相关业务部门使用, 又可供中高层领导干部参阅, 同时也可作为科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

千里黄云: 东亚沙尘暴研究/曾庆存等著. —北京: 科学出版社, 2006

ISBN 7-03-017510-7

I. 千… II. 曾… III. 沙尘暴—研究—东亚 IV. P425.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第069982号

责任编辑: 彭胜潮 韩 鹏等/责任校对: 包志虹

责任印刷: 钱玉芬/封面设计: 黄华斌

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>

深圳中华商务安全印务股份有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2006年8月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 1~2000

定价: 198.00元

千里黄云

——东亚沙尘暴研究

曾庆存 董超华 彭公炳 赵思雄 方宗义 等著

主要作者(按姓氏笔画排列)

马 岚 方宗义 卢乃锰 孙建华 张时煌 杨忠东 邵亚平 周自江
林朝晖 胡 非 赵思雄 高庆先 彭公炳 曾庆存 董超华

作者(按姓氏笔画排列)

马 岚	方 萌	方 翔	方宗义	牛若芸	王 炜	王业桂	王会军
王自发	卢乃锰	任 晰	刘 诚	孙建华	吴晓京	张 鹏	张仁健
张东凌	张甲坤	张时煌	张晔萍	张高英	李三妹	李小龙	杨 军
杨 虎	杨忠东	邵亚平	陆文杰	陈 红	周广庆	周自江	林朝晖
罗东风	罗敬宁	郎咸梅	郑新江	郑照军	胡 非	胡秀清	赵凤生
赵思雄	赵琳娜	徐 喆	高庆先	黄 签	黄 玫	彭 珍	彭公炳
曾庆存	程雪玲	董超华	雷 航	蔡淑英			

图像后期处理

黄 签

序 一

进入21世纪以来，我国沙尘暴的发生频次呈现出上升趋势，引起国家、政府和人民的广泛关注。沙尘暴作为一种自然现象，古而有之；作为一种自然灾害，则严重地影响着人民的身体健康、交通运输和工农业生产等诸多领域。深入研究沙尘暴的形成机理，预报沙尘暴的发生与移动，评估沙尘暴过程带来的灾害及其对社会、经济的影响，寻求减缓沙尘暴灾害的调控措施等，是实现社会经济可持续发展的重要组成部分，也是达到人与自然和谐发展的重要举措之一。

以著名大气物理学家曾庆存院士为首的一批从事气象、遥感、地理和环境研究的科技工作者，在国家项目的支持下，充分发挥多学科联合攻关的优势，在沙尘暴研究方面取得了多方面的创新性研究成果。在六年的潜心研究中，他们把卫星遥感和地面观测结合起来，监测沙尘暴的发生、发展和演变；采用资料融合分析和数值模拟等手段，研究沙尘暴的形成机理、预报、预测和灾情评估方法；形成了用于沙尘暴监测和预报业务服务的沙尘天气监测-预测研究与应用集成业务系统，在沙尘暴监测和预报实践中发挥了很好的作用。

《千里黄云——东亚沙尘暴研究》这部专著是他们研究成果的结晶和升华。全书以图为主的方式给出了以下几方面的主要研究成果：通过近40年来我国沙尘暴的统计特征及其与土壤质地、地表覆盖类型等地理特征和降水、风力等气象参数的关系分析，阐明了我国西北地区成为沙尘暴主要发生区和频发区的原因；卫星遥感揭示出的大范围沙尘暴演变图像，生动地展现了黄沙滚滚、黄云蔽日的景象及其发生、发展、演变过程；沙尘特性观测、数值模拟、数值预报和预测部分则清楚地阐明了在近地面大风湍流驱动下，裸露于地表的、不同粒径的沙尘扬起、垂直输送和水平传输过程，从而基本弄清了沙尘暴的形成机理和能对它进行短期预报和气候预测；世界范围内的沙尘暴概况分析，说明在全球范围内，只要有裸露、疏松的地表和大风就可能发生沙尘(暴)天气这一客观事实。

本书用图文并茂、以图为主的出版方式，既能生动再现所取得的研究成果及其深刻的物理内涵，也便于更多的不从事这一专业的读者能了解这一科学问题。就这种意义上说，该书既是从事大气、环境和地理领域工作人员和学生的参考书，也是

广大读者了解沙尘暴这一自然现象的入门书；是迄今为止，既有形成机理又有实际沙尘发生个例，既有观测、监测又有预报、预测、评估和防治，全面而深入浅出地阐述沙尘暴的专著。就是对广大行政管理人员，该书也具有很好的参考价值。

国家科学技术部副部长
国际欧亚科学院院士

刘燕华

2006年7月9日

序 二

沙尘暴是一种在我国北方干旱和半干旱地区突发的灾害性天气，其浮尘可以遍及长江以北甚至南岭以北的大部分地区。它既影响人民的身体健康、正常生活和工农业生产，还通过飘浮在空中的沙尘，对地球大气系统的直接和间接辐射强迫而影响短期气候变化；而细颗粒已成为气溶胶，可飘浮到海洋上空，对天气气候乃至生物地球化学循环起到极为重要的作用。因此，气象工作者一直对沙尘暴的形成机理、传输过程、监测预报方法和灾情评估等科学和应用问题十分关注。但由于沙尘暴发生于观测台站十分稀少的沙漠、戈壁等荒芜地区，而传统的气象探测技术又无法获取制约沙尘暴发生的土壤质地和粒径、土地覆盖状况、大气边界层风廓线、大气中沙尘浓度和含量等地球物理参数，因而束缚了研究工作。

20世纪90年代以来，卫星遥感、激光雷达、超声风速仪、铁塔边界层观测等探测技术的迅速发展，地理信息系统的引入，以及物理过程更加完备的大气数值模式的开发，使我们对沙尘天气的深入研究、监测和预警成为可能。正是在这样的背景条件下，以中国科学院曾庆存院士为首的一批从事沙尘天气研究和业务的科技工作者，在国家财政部、国家自然科学基金委员会、中国科学院和中国气象局的多项科研和业务建设项目的支持下，经过六年多的潜心研究，在沙尘天气的监测技术、形成机理、预报和评估方法等方面均取得了丰硕的成果。这本专著就是他们主要研究成果的积淀。

与沙尘天气相伴的漫天黄尘、滚滚奔袭而来的沙墙以及泥雨和黄雪等自然景观均给人们留下了深刻印象。本书全面介绍了沙尘天气监测、预警、预报直到灾情评估方法，全面介绍了监测沙尘天气从发生、输送、直到沉降等各个环节的方法、技术和分析结果。全书共分十章，主要包括四方面内容：一是近40年我国沙尘天气的统计特征分析及其相应的气候和环境背景状况；二是按沙尘移动路径和影响区域划分的影响我国三类沙尘天气和沙尘特性的卫星遥感图像特征及其相应的天气系统和演变；三是沙尘天气的监测技术和监测结果分析；四是风沙动力学和沙尘天气的数值预报(包括中短期预报、气候预测和灾情评估)。此外，该书还给出了世界沙尘天气概况。该书不乏新的观测事实、创新性研究成果和亮点，其成果已在实际应用中

发挥了显著作用。

该书的特点是多学科交叉渗透，既有坚实的风蚀物理学和大气动力学的理论基础，又紧密结合东亚和我国的特点。全书内容全面、新颖和翔实，其文、图并茂的编排方式有利于雅俗共赏，可以起到既促进学科发展，又有实用价值，同时又具有普及知识的作用。

中国气象局局长
中国科学院院士

秦大河

2006年6月10日

序 三

曾庆存院士等专家的研究群体，凝聚着气象、气候和地理学界的精英，引领数值分析预报的潮流。即将出版的《千里黄云——东亚沙尘暴研究》这部力作，对沙尘暴的发生、发展进行了系统分析和精辟研究，为我国读者加深对沙尘暴的再认识，为政府领导部门以科学发展观统领我国环境保护工作，都是一项具有开拓性、创新性的贡献。他们这种“先天下之忧而忧”的拳拳之心，实事求是的科学态度，我更是衷心敬佩、深受感动的。

我国每年治理沙化土地大约 950 km^2 ，仅占全国沙化面积 174 万 km^2 的 0.54% ，以 0.54% 递减的速度，远不足以缓解全球气候变化导致的沙尘暴灾害，这是显而易见的。特别是在我国北方地区，沙化土地比较集中，约有 160 万 km^2 ，加上邻近的蒙古国和哈萨克斯坦的沙化土地，又不下于 100 万 km^2 ，围绕在远离海洋的欧亚大陆中心的温带荒漠边缘。对位于西风带影响下的北京及黄河流域的威胁，也是不言而喻的。

我国实施天保防护林工程、退耕还林还草工程、京津冀风沙源治理工程，在京津西北桑干河流域、内蒙古、晋陕、宁夏一带都可以看到。典型的示范工程都非常成功，阶段成果成绩斐然；但全面推广，区域覆盖，非一日之功。七八年以后能初见成效，就算不错了。

以位于内蒙古东南部的敖汉旗为例。1978~2000年间，保林、造林 378 万亩 ，造林投入 3.68 亿元 (人民币)。现在可以看到，流动沙丘由 57 万亩 减少到 7 万亩 ；半固定沙地则由 171 万亩 减少到 30 万亩 ；固定沙地由 13 万亩 增加到 222 万亩 。 100 万亩 农田和 150 万亩 牧场，实现了林网化。林带网片、草灌乔相结合的防护林体系初步形成，能控制水土流失面积 635 万亩 。在苦战23年之后，才获得了连续8年丰收，进入产棉大县和畜产品先进县的行列。绿化祖国，来之不易！

北京市办好“绿色奥运”的热情，兑现清洁空气的承诺，令人感动。渴望每年能够出现200多个晴天，为此采取了一切可能的措施：取暖用的天然气已经比20世纪90年代增加了四倍，以期减少燃煤和工厂排放。更换了尾气排放达不到欧Ⅱ标准的公交车和出租车。严禁施工场地裸露扬土。不惜把占市财政税收70%的重化工厂和钢铁厂迁出市区。甚至用化学制剂催下阵雨……。然而，对于北京城市的虔诚和努力，苍天仍然无动于衷，毫无恻隐之心。今年春季，我国北方降水减少了8成，气温增高了 $1\sim 2^\circ\text{C}$ ，加上

历史罕见的强对流天气，导致频发的沙尘暴天气有增无减！不仅使人们切身感受到呼吸近乎窒息，尤其是对奥运天气的担心！大家都感受格外深切和无奈。沙尘暴直接关系到国计民生，社会也逐渐形成共识。

其实，沙尘暴不是区域性的环境问题，可以局部谋求解决的。它是一个全球性的问题、一个长周期的问题。它涉及的时间与空间尺度都很宽广。记得2000年北京市斥资60亿，用于构建绿色屏障、防风固沙的时候，我们就曾在中央电视台“实话实说”：不可能独善其身！后来济南市和山西省深入的实验研究证明，周边地区的大气环境质量与北京市是休戚相关的。2005年3月，中国科学院大气物理研究所和台湾“中央研究院”同步发行了两期专刊，指出沙尘暴不仅影响到北京，也波及台北。在这本《千里黄云——东亚沙尘暴研究》一书中，系统、详尽地剖析了2000~2006年间我国西北、华北和东北地区的典型案例，旁征博引全球范围的事实，采用大量卫星遥感反演和地面台站观测纪录相结合的分析方法，从风沙动力学机理，推导出数值化、量化的沙尘天气短中期预告、短期气候预测和灾害评估模型。从全球的视角出发来研究东亚沙尘暴，纲举目张，取精用宏，图文并茂，深入浅出，让我们读者对沙尘暴的来龙去脉，发微知著，大开眼界！

更耐人寻味的是：今天的沙尘暴现象与地质时期的黄土沉积有着历史唯物主义的辩证关系。来者之视今，犹今人之视昔！在历史长河中，“沙尘暴”曾经造就了黄河中下游的黄土高原和泛滥平原，孕育了中原文化和炎黄子孙。刘东生院士曾著文指出，欧亚大陆的黄土分布与丝绸之路并非历史巧合。地质学家对南京和六合一带的下蜀黄土景观的研究，海洋学家对黄海海底沉积物和化石的分析，都启迪我们，要开展多学科的交叉研究，呼唤我们，要加强沙尘暴研究的国际合作与交流。需要进一步解放思想，开拓创新，全面地把握沙尘暴的时空规律，我们才能积极应对沙尘暴这一自然现象，顺应自然去获取更大的自由。《千里黄云——东亚沙尘暴研究》对沙尘暴研究的启示和示范作用，就更见作者们的用意深远了。

中国科学院院士
国家环境保护总局科学技术委员会主任

刘东生
2006年6月19日

前言

沙尘天气，尤其是沙尘暴及与之相应的土壤风蚀和“千里黄云”，是一种非常严重的天气灾害现象，其频繁出现又能造成长时期的或即气候效果，影响其覆盖地区乃至全球的气候和环境变化。因此，沙尘暴已成为当今一个热门的研究对象，沙尘天气气候也越来越受到人们的关注。

东亚的西部广大地区，由于其气候属于干旱或半干旱类型，岩土又易风化，沙漠地区广大，植被或稀少或脆弱，干旱季节(如春季)多大风，就极易起沙扬尘，形成沙尘天气和沙尘暴，以致“千里黄云”，迷空蔽日。东亚是世界沙尘暴较频发、较严重的地区之一。这是特定的自然气候和地理环境条件所造成，自古而然。即使不谈地质年代和史前时期的资料分析，我国数千年的文字历史就颇多关于沙尘天气和沙尘暴事件的记载，而文章、诗词更叙述得深刻入微，惟妙惟肖。例如唐朝高适《别董大》一诗的前二句：

“千里黄云白日曛，北风吹雁雪纷纷”，就简练且深刻地描绘出大范围的沙尘暴图像和与之配合的天气过程，这 and 现代气象卫星和地面站网监测到的完全一致。为志我国先民们的智慧，本书就特以“千里黄云”为名。

尽管沙尘暴严重影响我国北方的事实早已为国人所熟知，但对它用现代的科学技术和方法进行系统的研究，却只是最近十多年来的事。尤其是进入21世纪以来，由于经济发展迅速，科技条件改善，而沙尘暴又爆发频繁，人们猛然醒悟到研究沙尘暴的重要性和可能性，于是研究项目逐渐增多。我们也有幸提出并承担了一个较大的研究项目——“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”。在执行过程中，我们又扩展为更大一些的地区范围——我国北方和东北方，和更准确的内容——土壤水分、风蚀和沙尘暴。该科研项目内容包括利用气象卫星的遥感资料 and 将遥感和地面站网观测资料相结合；有关地理信息系统的建立和应用；有关天气系统、土壤、风蚀和扬沙及传输的动力学机理分析；沙尘天气和土壤湿度的数值天气预告和短期气候预测等，并最后集成为可供日常业务使用的监测和预测系统。至于相关的灾害评估的理论方法，则虽有一些结果，但尚未集成为可供业务使用的系统，需要后续项目的执行才能完成。此外，在同一时期，我国各研究和业务部门，例如中国科学院有关单位、中国气象局和国家环境保护总局等，各自还有很多关于沙尘暴的研究项目，有些还是国际合作的重要项目。本项目“西北地区

土壤水分、沙尘暴监测预测研究”的执行单位和大部分研究人员也都参与其事，也得到了很好的结果，特别是沙尘特性的定量、精细的监测和分析研究及数值模式比较研究方面。这些研究相互补充，已取得了为世人所称道的系统研究成果，我们十分高兴而且十分感谢大家给我们的真诚支持。

尽管我们的许多研究成果多已以文章形式发表了 [例如在《气候与环境研究》上以“风蚀与沙尘暴研究专辑”的形式发表于2004年第9卷第1期，英文学术期刊 *Monitoring and Modelling of Asian Dust Storms, Global and Planetary Changes*, Vol.52, No.1~4, 专集 (2006年) 和在其他国内外有影响的杂志上发表的文章]，但还有许多研究成果未曾发表过。我们觉得应该把已发表和未发表过的研究成果总结在一起，而且能形象鲜明地表达出来，以便于社会各界人士所易识，于是我们寻求以形象的方法作介绍，作为一个尝试，以图为主，附以必要的简短说明，遂成本书。希望这种方式能深入浅出，为大家所易于接受。若能部分地达到此目的，那么我们的尝试就没有白费力气了。

本书内容大体上分为下列几个部分：一是气候统计和气候与环境背景的图示及其说明；二是按地区即按分别影响我国华北地区、西北地区、东北地区的典型沙尘暴选例作图示和解说；三是对沙尘特性等的定量测量问题和典型个例的分析解说；四是沙尘起动和传播机理，以及沙尘天气的数值预报问题，附以个例图示和解说；五是对与沙尘天气频数有密切关系的气候距平形势作短期气候预测（一月、一季至跨季度和跨年度），以及直接作沙尘天气的中期数值预报；六是沙尘暴灾害和影响评估的初探，最后一章则是世界沙尘暴的概述和例示。

虽然我们的研究结果可以说是目前对沙尘暴研究比较全面和比较深入的一个，但沙尘暴是成因和过程表现很复杂和多端的灾害现象，用图说方式将其表现出来，难尽其各个方面，大概也只能做到“直观”其“表象”，而难于“深刻”其“微奥”。至于机理探索和理论研究方面，用图说方式来描述，也只能指其“概要”或“线索”，而难陈其“精微”或“严深”，否则就要列出许多数学公式，为难一部分读者了。看来，要用图解方式既“深入”又“浅出”地很好表达出来，还有待于科学艺术的“深加工”，在表达方法上创新再创新。这是必须坦诚说明的，以待有志者努力。还有，即使就沙尘暴作为灾害来研究，也还应包括其对环境、生态、国民经济与人民健康等方面的影响的定性和定量评估，以及研究防与治的对策，这些在我们业已完成的研究项目之中比例过小，将作为延续项目再多加研究。至于沙尘暴的气候效应和洲际传播

问题，尽管国际上现已开始热炒起来，不过一来实测资料不足，二来机理复杂待探，我们不拟在本书中论述，而留待今后研究，希望国内学者关注这个国际课题。

上面也还只是就沙尘暴作为灾害的一面来研究和讲述的。其实，就辩证法而言之，无论是东方古代的朴素辩证法，还是现代的科学辩证法，一切事物无不具有两重性，土壤侵蚀和流失以及沙尘传播和沉降也不例外。就其短时而言之，沙尘暴确是对人类的一种灾害（姑且不谈它还有中和酸雨的作用等），要想尽办法监测它、预报它、预防它、躲避它。但就百万年时间尺度而言之，风沙又何尝不是对人类的一种莫大的恩赐。试就东亚和我国来说，设无百万年的风沙，就没有独具特色的黄土高原和华北平原沃土，也就没有中华文明所赖以形成和发展的地理环境条件，从而难有这样一个非常优秀的世界古代文明中心。其次，如无沙尘的传播和沉降，尤其是如无黄河等大河的冲积，也就没有渤海、黄海中充足的营养物质而盛产鱼虾。就这方面来说，土壤流失和侵蚀以及沙尘暴，正是上天（即自然界通过气候和地理环境）的恩赐，功莫大焉。人类应该采取正确的哲学观和科学方法，即采取科学的发展观和政策与方法，顺乎自然发展的大方向，合理调控其可以人为及之的自然界局部，以趋利避害，把自然界的资源在顺乎自然界演变规律和最有利于人们发展的地区和形式加以合理地利用，这样才能顺天利人，持续与和谐发展。这似乎应是自然控制论的外延，而不仅仅是其狭义的内涵，即利用现代的科学方法研究自然环境的自调控机理和可能的合理的人为调控方法。对于沙尘暴这一类灾害的问题，我们也应该采取这样的态度。除研究这类灾害的短期行为及防避之法外，更应研究其长期演变规律，知其所以然，规划好人类的活动，以便将人为破坏了的那部分秀美河山得以再造，并把可以人为改善的那些天气、气候、环境、生态改造成更适合于人居和发展。这样就可以从长远上避免沙尘暴的灾害，但我们不应该也无法和无力改变那些不可抗争的自然力。在将来，除非地壳变动，大片的干旱地带、大片的沙漠和沙尘暴仍然会存在，但不会危害人类的发展。当然，这样的研究项目应是将来的任务了。

几点说明

(1)本专著是在众多作者提供的材料、图、文基础上，由主笔按本书的统一构思和逻辑进行剪裁、加工和全面改写而成，为表明各人的贡献和责任，各章均列出其作者姓名。

(2)本专著的绝大部分文、图都是本书作者收集的第一手资料和数年来的研究成果，相当多的还是第一次在本书正式发表。

(3)本书也引用了一些不是本书作者的资料和图，这些都一一标明出处，并征得原作者的同意；用到的别人的概念和方法等也一一在文字中指明（现已成为专业人员所共知者除外），并在参考文献中列出其原著。

(4)本书各章都列出参考文献，主要是本书作者近年来在有关项目研究中已发表过且为本书内容用到的文章；也开列了本书作者写本书时参考过或认为重要的国内外文献，以利于读者查阅。因文献甚多，只能囿于本书作者的见识进行选择，不可能尽收，遗漏在所难免，敬希专家和读者原谅。

(5)本书列有专有名词的中、英文对照表和索引，有些名词还作了简明的解说，以利读者。索引则只列出该名词出现在哪些章，这对读者已足够方便，不再列出其页码。

(6)本书采用度量衡公制，即千克(kg)－米(m)－秒(s)制，但因本研究对象跨度很大，在不同情况下要用放大或缩小了的单位，例如质量用吨($1\text{t}=10^3\text{kg}$)、或克($1\text{g}=10^{-3}\text{kg}$)、或毫克($1\text{mg}=10^{-3}\text{g}$)、或微克($1\mu\text{g}=10^{-6}\text{g}$)；长度用千米即公里($1\text{km}=10^3\text{m}$)、或厘米($1\text{cm}=10^{-2}\text{m}$)、或毫米($1\text{mm}=10^{-3}\text{m}$)、或微米($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$)、或纳米($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)；时间用年(a)、或月(month)、或日(day)即24小时(24h)、或小时(h)、或分钟(min)、或秒(s)或毫秒($1\text{ms}=10^{-3}\text{s}$)。文、图、表中大都只写英文字母，不附中文，也不在“名词对照和索引”中列出。

(7)本书的文、图、表中所用的日期和时刻，除特别注明者外，都指北京标准时。

(8)本书中影像和地图上的国界和省界均为概略性的示意性界线，仅供参考。

目 录

序 一	
序 二	
序 三	
前 言	
几点说明	
第一章 绪 论	1
1.1 引言：沙 尘天气的定义、分类和举例	1
1.2 本书简介	2
参考文献	2
彩 图	3
第二章 沙尘天气的气候-环境背景与统计特征	8
2.1 引 言	8
2.2 我国沙尘天气频次的40年平均气候统计 (1961~2000年)	8
2.3 沙尘天气多发区域的气候背景	8
2.4 沙尘天气多发区域的地理环境背景	8
2.5 沙尘天气多发年的地表特性和近地面空气特性	8
2.6 沙尘天气频次的年际变化	8
2.7 近几年我国春季沙尘天气频次和气候异常形势的关系	9
2.8 沙尘天气的日变化、日际、旬际与月际变化	9
参考文献	9
彩 图	10
第三章 侵袭我国华北地区的典型沙尘天气	33
3.1 引 言	33
3.2 2000年典型案例	33
3.3 2001年典型案例	33
3.4 2002年典型案例	33
3.5 2004年典型案例	33
3.6 2006年典型案例	33
参考文献	34
彩 图	35
第四章 侵袭我国西北地区的典型沙尘天气	57
4.1 引 言	57
4.2 2001年典型案例	57
4.3 2002年典型案例	57

4.4	2003年典型案例	57
4.5	2004年典型案例	58
4.6	2006年典型案例	58
	参考文献	58
	彩图	59
第五章	侵袭我国东北地区的典型沙尘天气	88
5.1	引言	88
5.2	2000年典型案例	88
5.3	2001年典型案例	88
5.4	2002年典型案例	88
5.5	2003年典型案例	88
5.6	2004年典型案例	88
	参考文献	88
	彩图	90
第六章	沙尘天气和沙尘特性的定量观测分析和遥感反演研究	100
6.1	引言	100
6.2	与沙尘天气密切相关的地表特性	100
6.3	沙尘浓度、沙尘特性及其空间分布和时间演变的定量监测	101
6.4	沙尘天气过程近地面大气边界层的特征	101
6.5	沙尘浓度和特性等的定量遥感反演	101
	参考文献	102
	彩图	104
第七章	风沙动力学和沙尘暴数值预告	132
7.1	引言	132
7.2	风沙动力学	132
7.3	沙尘天气数值预告中的天气形势预告	132
7.4	地面起沙通量和近地面空气中沙尘浓度的数值预告之例	133
7.5	近地面空气沙尘浓度时间变化数值预告的逐时和逐日显示	133
7.6	沙尘天气过程的三度空间流场和沙尘浓度时间演变的数值预告之例	133
7.7	敏感性试验	133
	参考文献	133
	彩图	135
第八章	沙尘天气的中期预告和短期气候预测试验	156
8.1	引言	156
8.2	春季3~4月份沙尘天气频发和少发至平常年份的气候距平形势及其主要特征	156
8.3	跨季度和跨年度气候距平预测实例	157
8.4	月份沙尘天气-气候的预测实例	157
8.5	沙尘天气的中期数值预告实例	157
	参考文献	157