

# 中国沙尘暴天气研究进展及主要科学问题

程相坤<sup>1,2</sup> 蔡冬梅<sup>2</sup> 王式功<sup>1</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 2. 大连市气象局, 大连 116001)

**摘要:** 沙尘暴是一种危害极大的灾害性天气。近年来, 沙尘暴天气受到广泛关注。概述了我国沙尘暴的成因、源地和移动路径、分布特征及演变规律, 探讨了沙尘暴天气的大气环流特征、物理化学特性和数值模拟及预报方法, 基于中国气象事业发展战略, 针对未来沙尘暴的主要科学问题进行了展望, 试图为今后沙尘暴研究提供基本框架与思路。

**关键词:** 沙尘暴天气; 研究进展; 主要科学问题

## 1 引言

沙尘暴(sand-dust storm)为沙暴(sand storm)和尘暴(dust storm)两者兼有的总称, 指强风将地面大量沙尘吹起, 导致空气浑浊, 水平能见度小于1 km的天气现象。当大风将地面大量沙尘吹起, 导致空气浑浊, 水平能见度小于500 m时, 称为强沙尘暴。强沙尘暴有时伴有“黑风”出现(如1993年5月5日出现在甘肃的黑风天气)。沙尘暴是一种危害极大的灾害性天气, 它的发生发展既是土地荒漠化加速的标志, 也是土地荒漠化发展到一定程度的具体表现。

与国外沙尘暴研究相比, 我国沙尘暴天气研究起步较晚。美国自20世纪30年代就开始了沙尘暴分布、形成、监测及对策的系统研究。我国关于沙尘暴的研究始于20世纪70年代。特别是发生于1993年5月5日的我国西北地区特强沙尘暴天气, 造成了严重经济损失, 引起了我国政府和科学工作者们的高度重视, 有力地推动了沙尘暴研究的广泛开展。针对此次沙尘暴天气, 中国气象局和中国科学院于1993年9月7—9日在兰州联合召开了“首届全国沙尘暴天气研讨会”, 重点讨论了1993年5月5日发生强沙尘暴灾害的机制、成因、预报服务和防灾救灾情况, 为我国西北地区强沙尘暴天气的监测、警报服务、综合治理以及为西北地区国民经济建设合理规划布局、协调发展提供有科学价值的建议和意见, 开启了我国沙尘暴研究和防治的新纪元。

进入21世纪, 随着我国经济的发展和人民生活水平的提高, 建立人与自然的和谐、保护环境以及提高空气质量越来越受到党和政府的重视, 尤其是

2006年4月18日, 北京上空黄沙弥漫, 24 h降尘量高达30万t, 灾害影响堪称近年之最, 引起了社会的广泛关注。沙尘暴监测、预警预报及其灾害防治进一步引起了人们的高度关注。为此, 本文试图对近年来我国在沙尘暴天气方面的最新研究成果进行综述, 并结合中国气象事业发展战略, 探讨未来我国拟重点加强的研究领域。

## 2 我国沙尘暴的成因和源地及移动路径

### 2.1 沙尘暴的成因

沙尘暴的形成必须具备2个条件:一是要有足够强大而持续的风, 将大量沙尘、土粒吹入空气中;二是土质干燥松散、植被稀疏、地表裸露, 即风土地带最易形成沙尘暴。风沙土在我国分布很广, 东起黑龙江, 西至新疆9个省区, 而土地荒漠化正以每年1 560 km<sup>2</sup>的速度迅速扩大<sup>[1]</sup>。张志刚等<sup>[2]</sup>认为, 沙尘暴的发生还必须具备气流辐合(垂直对流)条件。

### 2.2 沙尘暴源地及移动路径

所谓沙尘暴源地是指一次沙尘暴天气过程, 第一天发生沙尘暴的所有地区中, 处于最上风方向的地区。邱新法等<sup>[1]</sup>利用1971—1996年的地面气象记录月报和地面天气图资料对在我国发生的4 147次沙尘暴天气过程统计分析表明:在我国发生的沙尘暴天气过程根据沙尘暴的起源可分为外源型和内源型2类;影响范围较大的沙尘暴天气过程(即含10个以上气象记录的沙尘暴天气过程), 其源地均在我国境外, 属外源型沙尘暴天气过程。外源型沙尘暴的移动路径主要包括北路和西路2条:(1)北路。即泰米尔半岛—西伯利亚中西部—蒙古地区—中国新疆东部及内蒙古地区—华北地区;(2)西路。即西北

收稿日期:2007-04-20; 修订日期:2007-08-30。

基金项目:国家自然科学基金项目(40675077)资助。

作者简介:程相坤,男,1961年生,高级工程师,主要从事天气动力学方面的研究。

欧—西西伯利亚—中国新疆西部地区—河西走廊和柴达木盆地—河套地区和内蒙古东部。统计表明,入侵我国的沙尘暴天气过程中,西路沙尘暴影响范围较大;而北路沙尘暴次数较多,北路沙尘暴天气过程次数是西路的 2 倍。内源型沙尘暴起源于南疆的塔克拉玛干沙漠及其周边地区、北疆的准噶尔盆地南沿、甘肃河西走廊和内蒙古干燥沙漠及青海柴达木盆地等地。

刘晓强等<sup>[3]</sup>认为影响甘肃的沙尘暴运行的路线主要有 3 条:第 1 条形成于甘肃河西走廊和内蒙古阿拉善地区。强大的沙尘暴,横扫宁夏、鄂尔多斯高原和陕北,风势减弱后进入中原地区,一直影响到长江流域;第 2 条主要形成于帕米尔高原,经塔里木盆地南下,影响甘肃河西地区;第 3 条形成于中蒙西部边境戈壁地区,在内蒙古高原得到加强,从西北部进入河北省,越过燕山进入北京。随着城市化进程的加快,城市周边的小型沙地、裸露荒地、闲置耕地、干河道、建筑工地、垃圾场是众多的小型沙尘源,在适当的天气背景下对沙尘暴起着推波助澜的作用<sup>[4]</sup>。

### 3 我国沙尘暴分布特征及演变规律

#### 3.1 沙尘暴分布特征

钱正安等<sup>[5]</sup>对我国西北及内蒙古中西部地区 1952—2000 年 130 次强或特强沙尘暴频数分布分析发现,频数在 10 次以上的沙尘暴分布可分为 3 大片:以民勤为中心(达 43 次)的河西走廊及内蒙古阿拉善高原区;以和田为中心(达 42 次)的南疆盆地南缘区;以朱日和为中心(达 10 次)的内蒙古中部区。

#### 3.2 沙尘暴演变规律

对于我国沙尘暴过去的变化和未来的变化趋势,由于不同作者分析的沙尘暴发生的时期不同、地区不同,加之采用了不同的分级标准,因此对近 50 a 来我国沙尘暴的年代际变化趋势曾有不同的看法。根据 1994 年以前西北地区的强和特强沙尘暴统计资料,钱正安等<sup>[6]</sup>曾认为近 50 a 来强和特强沙尘暴的频数是增加的;有的文章和媒体报道中还认为 20 世纪 90 年代增加得特别明显<sup>[8,10]</sup>;有的将一般强度的沙尘暴也包括在内,认为自 20 世纪 50 年代以来沙尘暴频数是一直减少的;还有的指出内蒙古中部 20 世纪 60 年代特强沙尘暴多,但 80—90 年代内蒙古西部的特强沙尘暴在增多<sup>[7,9]</sup>。

最新的研究表明,自 20 世纪 50—90 年代(截止于 1999 年)我国北方的沙尘暴频数呈波动减少之势。其中,60—70 年代沙尘暴频数呈波动上升,80—90 年代呈波动减少,且 90 年代减少更加明显,特别是民勤及和田地区<sup>[5]</sup>。崔彩霞等<sup>[11]</sup>用新疆近 40 a 万方数据

气象资料,分析了沙尘暴长期变化趋势,发现自 20 世纪 60 年代—90 年代,新疆的沙尘暴发生频率并不是简单的递增或递减而是呈现出波动趋势。

### 4 我国沙尘暴天气环流特征

沙尘暴天气发生在特定的大气环流背景下,冷空气活动是其发生的必要条件,蒙古气旋是我国强沙尘暴天气的重要影响系统。王式功等<sup>[12]</sup>利用 1970—1997 年计 28 a 的 NCEP 再分析资料以及我国北方 147 例典型强沙尘暴事件,对我国强和特强沙尘暴天气进行了分型,即:(1)锋面气旋型沙尘暴;(2)强干冷锋型沙尘暴;(3)干飑线+冷锋的强对流性混合型沙尘暴;(4)强冷锋+蒙古高压+柴达木低涡发展型沙尘暴。徐国昌<sup>[13]</sup>和陈敏连等<sup>[14]</sup>对 1997 年 4 月 22 日、1993 年 5 月 5 日的 2 次强黑风暴天气的研究后认为,黑风暴发生时往往伴随着 500 hPa 环流形势的一次调整。沙尘暴天气发生在欧亚范围内由纬向环流向经向环流的调整过程中,使中纬度的冷空气沿西北气流迅速南下,造成一次系统性的强冷锋后的大风,激发沙尘暴,引起黑风天气。

王式功<sup>[15]</sup>对 1993 年“5.5”黑风天气研究认为,冷锋过境是造成黑风天气的主要影响系统。陈勇航等<sup>[16]</sup>对盛夏塔克拉玛干沙漠腹地 10 次沙尘暴过程进行了综合分析,提出了“中小尺度型”作为对前人沙尘暴天气学分型的补充,将这 10 次沙尘暴分为冷空气翻山型、锋前热低压型和中小尺度型 3 类。认为对流层顶部存在南亚高压双体型长维持和中亚地区副热带超长波大槽长维持的大尺度环流背景。在此期间又存在伊朗副热带高压的南北振荡和青藏高压的东西振荡,使得天气尺度影响系统以及中小尺度系统一次接一次地影响南疆,是 1996 年盛夏沙漠地区沙尘暴天气频繁发生的主要天气学成因,并进一步提出盛夏沙漠腹地沙尘暴预报着眼点。

王锡稳等<sup>[17]</sup>利用地面气压场和有关气象站的气压、气温、湿度、风速自记资料,对 2000 年 4 月 12 日强沙尘暴天气分析认为,主要天气系统是冷锋过境。锋面前的抬升作用是必要的触发机制,而中小尺度低压系统的生成与环境场对流不稳定产生的扰动,对沙尘暴的突发、加强起到激发作用。

### 5 我国沙尘暴的沙尘浓度及其物理化学特性

张仁健等<sup>[18]</sup>对 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性进行了分析,通过对 4 月 6 日北京地区发生的特大沙尘暴化学元素成分的研究表明,沙尘暴期间 20 种元素总质量浓度高达  $1\text{--}536 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,是

1999年同期的31.4倍。即使沙尘暴过后,污染依然严重,各种元素总质量浓度仍高达 $3\ 387\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,是1999年春季的7倍。研究还发现,沙尘暴期间来自远方的大粒子占了很大的比例,绝大多数的元素浓度在粒径大于 $16\ \mu\text{m}$ 处出现一个高值,远高于其他谱段的浓度;在沙尘暴后及其他时间,还没有观测到这种谱分布。沙尘暴期间的粗粒子( $d > 2\ \mu\text{m}$ )数浓度是沙尘暴后的20倍以上,细粒子( $d < 2\ \mu\text{m}$ )的数浓度是沙尘暴后的7倍。

庄国川等<sup>[19]</sup>分析了2000年我国沙尘暴的组成、来源和粒径分布,指出沙尘暴期间总颗粒物高达约 $6\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,比平日高近30倍。主要污染源元素As, Sb和Se的富集系数平日更高,主要污染源不仅来自于北京局部地区,而且来自于其长距离传输过程中的区域污染源。污染源元素Pb, Zn, Cd和Cu相比于平日富集系数下降,主要来源于北京地区。Al, Fe, Sc, Mn, Na, Ni, Cr, V和Co等9种元素的富集系数均接近于1,主要来自于地壳源。S在沙尘暴中含量高达 $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,比平常高出4倍,主要来源于长期传输过程中由气体到气溶胶的转化。沙尘暴包含有大量的细粒子,粒径小于 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $9.0\ \mu\text{m}$ 的部分分别占总量的16.1%和76.9%。值得注意的是,在沙尘暴中检测出Fe(n)。Fe(n)为大洋表层水带去可供生物吸收的营养元素Fe,从而导致表层生物二甲基硫排放的增加。大气中的铁和硫的相互耦合及其正反馈过程是值得进一步探讨的可能影响全球气候变化的重要机制之一。

王玮等<sup>[20]</sup>利用2000年春季北京市出现的12次沙尘暴天气,分析了沙尘暴天气和非沙尘暴天气中TSP, PM<sub>10</sub>的质量浓度、酸度和酸化缓冲能力,研究结果表明,发生沙尘暴时大气气溶胶的污染水平极高,同时其酸度相对较低,对酸化有非常强的缓冲能力。因此,沙尘暴天气时产生的大气气溶胶可以在一定程度上避免酸性降水的发生。

## 6 我国沙尘暴天气数值模拟及预报

纪飞等<sup>[21]</sup>在有限区域模式MM4的基础上,发展了一个沙尘暴传输扩散模式,对模式中源汇的处理进行了精细处理,模式区域中心位于 $110^\circ\text{E}, 40^\circ\text{N}$ ,水平网格在东西方向( $x$ )和南北方向( $y$ )划分为 $45 \times 31$ ,格距为100 km。垂直方向分为不等距15层,其中边界层中有5—7层。将粒子分为13档。最小的粒子半径定为 $0.25\ \mu\text{m}$ ,最大的粒子半径为 $64.0\ \mu\text{m}$ 。应用1991年4月30日的实况资料检验模式的性能,并与实测沙尘暴过程中TSP浓度对比,结果表明:(1)浓度场随时间的演变表明,扬起的万方数据

沙尘在高空气流的引导下,向下游方向传播。本次沙尘暴事件中,由于源区有2个起沙中心,浓度场也呈现相应的分布。浓度最大值的演变可近似反映沙尘暴产生、快速增强、维持和减弱消亡的过程;(2)累积沉降场的结果表明,扬起的沙尘中,大于 $10\ \mu\text{m}$ 的较大粒子主要沉降在源区及其附近,远距离传输主要是小于 $10\ \mu\text{m}$ 的较小粒子。从而用数值模拟的方法来揭示沙尘暴的起沙机制、远距离传输及沉降特征。

王强等<sup>[22]</sup>利用PSU/NCAR中尺度数值模式(MM4),以常规观测资料为初始场,成功地模拟了造成“94.4.5”沙尘暴天气的主要天气系统张掖热低压。并通过给原有的中尺度模式系统加入沙尘输送方程和驱动地面沙尘抬升参数化方案,用改进后的中尺度数值模式系统,成功地模拟了沙尘抬升和输送,与实况比较一致。

刘春涛等<sup>[23]</sup>为了研究黑风暴和沙尘暴的沙尘形成、输送及沉降机制,提出了一种沙尘源、汇项的参数化方案和一个沙尘输送方程,进而引入已有的MM4中尺度数值模式模拟系统;应用这个改进和发展的模式模拟系统基本成功地模拟了“93.5.5”黑风暴的天气系统演变及其沙尘浓度的近地层和垂直分布以及沙尘的沉降与输送。

刘毅等<sup>[24]</sup>利用MM4中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式,模拟分析了1992年4月10日发生的一次沙尘暴天气及沙尘气溶胶(黄沙)输送过程。对近地层沙尘浓度场模拟得出的沙尘源区、北京和青岛尘暴出现的时间和浓度与观测结果比较一致。在尘暴形成的初始阶段,源区大气边界层内沙尘浓度迅速增加。低层以大粒子为主,高层以小粒子居多。当尘暴形成一段时间后,边界层内沙尘浓度有所减少,而 $2\ 000\text{ m}$ 高度以上浓度有所增加,其中大粒子浓度增加最为显著。沙尘气溶胶主要通过 $4\ 000\text{ m}$ 以下和 $4\ 000\text{ m}$ 以上2层气层进行水平输送。下层气层中沙尘随冷锋一起向下游扩散,以半径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的粒子为主;上层气层中沙尘先通过垂直气流输送到高空再随西风气流迅速输送到下游地区。沙尘源区上空存在强上升气流是上层输送的必要条件。

张小玲等<sup>[25]</sup>利用美国PSU/NCAR发展的非流体静力中尺度模式(MM5V2)对2000年4月6日影响北京的沙尘暴天气过程的中尺度系统和垂直上升运动以及到达北京地区的时间、风速、风向的突变均进行了较好的模拟,可作为沙尘暴发生发展机理研究的一种方法和预报参考依据。用中尺度模式和轨迹分析模式模拟的沙尘过程空气质量点路径,结合卫

星监测图像,可以较好地演示沙尘的发生源地、移动方向,对预报和分析有重要作用。

中国学者赵琳娜等<sup>[26]</sup>利用澳大利亚新南威尔士大学(UNSW)邵亚平博士发展的具有清晰物理概念的起沙数值模式(非参数化方案),与 PSU/NCAR 的中尺度气象预报模式 MM5 进行偶合。根据陆面状况和大气条件,定量模拟出沙尘(暴)起沙的过程。起沙模式中需要的陆面参数:土壤类型、土地利用指数、植被类型、植被高度、叶面积指数和植被覆盖率。对 2000 年 4 月 6—7 日发生在华北和北京的一次沙尘暴过程的数值试验结果表明,该模式对沙尘天气的起沙过程具有较好的模拟能力。

王建捷等在 2000 年 8 月中国气象局启动的“沙尘暴天气监测、预警系统的研究”项目的基础上完成了沙尘暴天气中尺度数值预报业务模式系统,并投入业务应用。该系统在引进与开发的沙尘暴模式技术的基础上,依托国家气象中心实时业务 T213L31 数值预报业务,通过大量研究和数值模拟试验,对模式的一些物理参数进行调试,确立了符合我国实际的沙尘天气数值预报业务方案;研究沙尘暴天气的起沙机制、物理过程、发生发展规律等;研究各种监测资料在沙尘暴数值预报模式中的应用;开发建设沙尘暴天气的中、短期天气预报和短期气候预测业务系统;研究影响我国沙尘暴天气的移动路径及源地;研究开发卫星监测资料、辐射观测资料、太阳光谱观测资料、常规观测资料、各种数值预报产品等在沙尘暴天气预报业务中的应用方法。建立了中国沙尘暴数值预报业务系统,实时提供和发布数值预报产品;建立沙尘暴的天气预报业务系统和相应的业务流程,提供沙尘暴天气的中短期预报预警和短期气候趋势预测服务产品。重点是要提供全方位的沙尘暴预报预警服务产品。

## 7 沙尘暴研究展望

近 20 多年来,我国在沙尘暴学研究方面取得了明显的进展。但是,与国际前沿水平相比,仍有差距,在沙尘气溶胶研究方面差距较大。根据 21 世纪国内外大气科学的发展趋势、人类和自然实现和谐的需求,鉴于我国在沙尘暴方面的研究状况,结合中国气象事业发展战略,建议今后应重点深入开展以下方面的研究。

### 7.1 搞好沙尘暴与干旱生态环境的监测

由干旱导致的荒漠化环境是形成沙尘暴的重要因素。近 50 a 来,我国北方荒漠化区的生态环境治理虽在局部地区卓有成效,但从整体看,荒漠化面积还在扩大,北方干旱化形势严峻,生态环境仍在继续

万方数据

恶化。不合理的人类活动对生态环境的破坏是加剧干旱化的重要因素。位于气候和生态系统过渡带的半干旱区具有敏感性和可恢复性的双重特征,是沙尘暴和干旱生态环境监测和研究的重点地区。

要不断充实和完善沙尘天气动态监测、预警系统。要应用卫星遥感、多普勒雷达、自动气象站以及常规气象观测手段对沙尘暴的形成、发展和移动路径进行跟踪监测,搞好预警和服务。建立和完善沙尘暴与干旱生态环境评价指标体系,建成静态和动态的评价指标、模型和体系。当前,迫切需要一些新的技术手段来支撑沙尘暴与干旱生态环境评价。由于沙尘暴与干旱生态系统是一个自然—社会—经济的复合系统,它受到多种因素的影响,表现出复杂性和不确定性,因此其评价应当是综合评价。

### 7.2 加强在气候变暖背景下沙尘暴年代际变化的研究

随着全球气候变暖,年代际气候变化的研究成为目前气候研究的热点问题。根据模式预估结果,21 世纪中国的地表气温将继续升高,冬半年和北方地区变暖可能更为明显。大气科学在 21 世纪最重要的进展是科学预测 10—100 a 间的气候—环境变化趋势。对年代际尺度的沙尘暴气候变化来说,一方面,它可能对年际尺度的沙尘暴变化现象具有重要的影响;另一方面,自身又叠加在全球变暖的趋势背景下。因此,如何认识了解该尺度沙尘暴气候变化的特征及其可能机制,进而确定其可预报性程度,已成为重大科学前沿问题。

当前,气象工作者的研究重点:(1)沙尘暴年代际时间尺度的气候自然变化规律(阶段性与突变);(2)历史时期和器测时期气候冷暖与沙尘多少的关系;(3)沙尘暴低频变化与高频变化(低于年代际尺度)的相互关系怎样?对年际尺度变率的影响程度究竟如何?有无反馈作用;(4)深入了解自然变化和人为因素在实际沙尘暴气候变化中的相对贡献;(5)从观测与模拟方面探讨在气候变暖背景下沙尘暴年代际变化其可能机制。上述科学问题十分具有挑战性。

### 7.3 广泛开展沙尘气溶胶的观测和研究

沙尘是大气气溶胶的重要成分。为了解沙尘被吹起的气象及下垫面条件、沙尘浓度及物理化学特性,为沙尘暴爆发和沙尘输送的数值预报和模拟提供参数化方案和实测值,应广泛开展沙尘气溶胶的观测和研究。当前,尽管国内已经对沙尘气溶胶进行了许多观测和研究,但迄今为止,这些研究多半是分散的、个例的、不系统的,而且大部分研究的科学深度有待加强。今后,应该全面地、系统地、连续地

对沙尘的化学成分、沙尘的粒径谱、沙尘浓度和光学厚度开展观测和研究。另外,对沙尘气溶胶的辐射效应,沙尘粒子的环境、生态效应,沙尘粒子对海洋环境的影响也要开展观测、评估和研究。

#### 7.4 加强典型沙尘暴事件的深入分析

尽管已作了不少沙尘暴气候平均特征的分析,但沙尘暴是小概率事件,其成因分析困难,预测信号较弱,所以,某月偶尔1—2次沙尘暴过程的“预测信号”常被月季背景信息所掩盖,难以在该月平均场特征中体现。因而仅仅研究平均特征是不够的,应针对沙尘暴特多和特少的月、季、年,特多和特少的持续期,强沙尘暴天气典型个例进行深入分析。同时,加强对起沙机制和沙尘输送规律等的研究,将有助于揭示新事实,发现新问题,由个别到一般,深化对沙尘暴的科学认识。

需要指出的是,近年来,我国虽然在沙尘暴研究方面取得了显著的成果,但由于沙尘暴研究涉及到气象、水文、地质、地理、化学和遥感等多种学科,其影响涉及到气候、环境、生态以及社会和经济等部门,因此未来沙尘暴研究方向,尚需多学科、多部门共同协作和努力,使我国的沙尘暴研究更加广泛地深入开展。

### 参考文献

- [1] 邱新法,曾燕,缪启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J].地理学报,2001,56(3):317—319.
- [2] 张志刚,赵燕华,陈万隆,等.北京沙尘天气与源地气象条件的关系[J].安全与环境学报,2003,3(1):20—23.
- [3] 刘晓强,肖铮,李晓红,等.沙尘暴路径分析[J].甘肃环境研究与监测,2001,14(4):201—203.
- [4] 李令军,高庆生.2000年北京沙尘暴源地解析[J].环境科学研究,2001,14(4):2—4.
- [5] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势[J].中国沙漠,2002,22(2):106—111.
- [6] 钱正安,贺慧霞,瞿章,等.我国西北沙尘暴的分级标准:中国沙尘暴研究[M].北京:气象出版社,1997:1—10.
- [7] 周自江,王锡稳,牛若芸.近47年中国沙尘暴和扬沙天气[C].兰州:沙尘暴学术会议,2001.
- [8] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513—522.
- [9] 陈晓光,张华,李耀辉,等.我国西北地区沙尘暴分析
- [C].兰州:沙尘暴学术会议,2001.
- [10] 王涛.走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J].中国沙漠,2001,21(1):1—3.
- [11] 崔彩霞.新疆近40年气候变化与沙尘暴趋势分析[J].气象,2000,27(12):38—41.
- [12] 王式功.中国北方沙尘暴天气气候特征及其成因研究[C].北京:草原与沙尘暴高层论坛会议,2006.
- [13] 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4·22”特大沙尘暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26—35.
- [14] 陈敏连,郭清台,徐建芬,等.黑风暴天气的研究和探讨[J].甘肃气象,1993,11(3):16—27.
- [15] 王式功,杨德宝,孟梅芝,等.甘肃河西“5·5”黑风天气系统结构特征及其成因分析[J].甘肃气象,1993,11(3):28—31.
- [16] 陈勇航,向鸣,吕新生,等.塔克拉玛干沙漠腹地盛夏十场沙尘暴综合分析与预报探讨[J].新疆气象,1999,22(1):9—12.
- [17] 王锡稳,李宗义,王宝鉴.“4·12”强沙尘暴中小尺度天气分析[J].甘肃气象,2001,19(2):27—30.
- [18] 张仁健,王明星,浦一芬,等.2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J].气候与环境研究,2000,5(3):259—266.
- [19] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等.2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001,46(3):191—196.
- [20] 王玮,王英,苏红梅,等.北京市沙尘暴天气大气气溶胶酸度和酸化缓冲能力[J].环境科学,2001,22(5):24—28.
- [21] 纪飞,秦瑜.东亚沙尘暴数值模拟[J].北京大学学报:自然科学版,1998,34(5):639—645.
- [22] 王强.一次沙尘暴中尺度低压和沙尘输送的数值模拟[J].甘肃气象,1997,15(4):1—5.
- [23] 刘春涛,程麟生.黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验[J].气象学报,1997,55(6):727—737.
- [24] 刘毅,任丽新,周乐义,等.一次黄沙输送过程的数值模拟研究[J].大气科学,22(6):905—912.
- [25] 张小玲,王迎春.北京地区沙尘暴天气分析及数值模拟[J].甘肃气象,2001,19(2):10—14.
- [26] 赵琳娜,孙建华,赵思雄,等.一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究[J].气候与环境研究,2002,7(3):279—293.
- [27] 石广玉.地球环境视野中的沙尘暴“功绩”[EB/OL].(2006-06-05).[http://www.duststorm.com.cn/Article/showArticle.asp,\(2006-06-01\).](http://www.duststorm.com.cn/Article/showArticle.asp,(2006-06-01).)

## Advance in study on sand-dust storm and its key scientific tasks in China

CHENG Xiangkun<sup>1,2</sup> CAI Dongmei<sup>2</sup> WANG Shigong<sup>1</sup>

(1. School of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2. Dalian Meteorological Bureau, Dalian 116001)

**Abstract:** The sand-dust storm is a kind of disaster weather with serious harmfulness. It has drawn more and more attention during recent years. The formative causes, sources, moving routines, distribution and evolution rules of sand-dust storm were summarized. The characteristics of atmospheric circulation, physical and chemical characteristics, numerical simulation and forecast methods on sand-dust storm were also discussed. The key scientific tasks of sand-dust storm in China are suggested according to the development stratagem of China Meteorological Administration (CMA).

**Key words:** Sand-dust storm weather; Research advance; Key scientific tasks