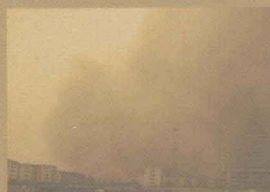


张强 郭锐 等主编

# 沙尘暴

形成机理及监测、  
预报和影响评估技术研究



# 沙尘暴形成机理及监测、预报和 影响评估技术研究

主 编 张强 郭锐 等

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内 容 简 介

本书是在“十一五”国家科技支撑计划重点项目“沙尘暴遥感监测与预报集成技术研究”第四课题“省级沙尘暴遥感监测预警评估与服务应用示范”研究成果基础上,从课题组或合作者近期发表或完成的本课题或其他相关项目资助的有关沙尘暴方面的研究论文中遴选出的 30 篇比较有代表性的论文组成。内容主要包括沙尘暴发生机理、监测方法、沙尘天气分析、沙尘预报预测以及沙尘影响评估等 5 个方面。这些研究成果不仅具有较高的理论水平和学术价值,而且具有较好的业务参考性和实用性,部分成果已经应用在业务服务中,发挥出了比较好的效益。该书可供气象、地理、环境、医疗、农业等领域从事科学研究和业务技术服务的专业人员、管理人员及高校的教师和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

沙尘暴形成机理及监测、预报和影响评估技术研究/张强等主编.

—北京:气象出版社,2011.12

ISBN 978-7-5029-5391-1

I. ①沙… II. ①张… III. ①沙尘暴-研究

IV. ①P425.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 251827 号

---

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:张 斌 陈悦丽

封面设计:博雅思企划

责任校对:永 通

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:420 千字

版 次:2011 年 12 月第 1 版

定 价:50.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审:汪勤模

责任技编:吴庭芳

印 张:16.5

印 次:2011 年 12 月第 1 次印刷

## 前 言

沙尘暴是全球干旱和半干旱地区常见一种的天气现象,影响范围十分广泛。西北及华北北部是我国沙尘暴的多发区,也是全球主要的沙尘源地之一。沙尘暴是全球主要的灾害性天气,具有很强的破坏力,它不仅给农业、交通、电力、通信以及人民生命财产和健康造成严重危害,而且其释放的沙尘粒子对地球环境有重大影响。因此,对沙尘暴形成机理、监测预报方法以及影响等方面的科学问题和业务应用技术的研究是科学有效防御和减轻沙尘暴危害的重要手段之一。

本书是“十一五”国家科技支撑计划重点项目“沙尘暴遥感监测与预报集成技术研究”第四课题“省级沙尘暴遥感监测预警评估与服务应用示范”的主要成果之一。收录了课题组及其合作者受本课题或其他相关项目资助完成的 30 篇沙尘暴方面的研究论文,内容涵盖了沙尘暴形成机理、沙尘暴监测方法、沙尘天气分析、沙尘暴预测预报以及沙尘影响评估 5 方面。这些成果不仅具有较高的理论水平和学术价值,而且有很好的实用性,不少成果已经在沙尘暴监测、预报和服务中发挥着重要的作用。希望这些成果能够为有关研究和业务单位人员及高校师生从事该领域研究工作有所帮助。

本书由张强、郭锐、陶建红、王式功、李耀辉、李云鹏、刘治国等人收集、整理、编辑,并得到课题组全体同仁大力协助和支持。本书还得到国家科技部、中国气象局、甘肃省科技厅、中国气象局兰州干旱气象研究所、甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室、中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室、兰州中心气象台、西北区域气候中心、兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室、兰州大学大气科学学院、兰州大学公共卫生学院、内蒙古生态与农业气象中心、内蒙古气象科技服务中心等单位资助和支持。气象出版社责任编辑张斌负责编审并作了繁重的文字工作,特表感谢。由于删减仓促,编者水平有限,难免挂一漏万,敬请批评指正。

编者

2011 年 10 月

# 目 录

## 沙尘暴形成机理

|                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应·····          | 张强 王胜(3)        |
| 民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究 ·····        | 李岩璞 张强 薛新玲等(12) |
| 我国北方沙尘暴年代际变化与北大西洋海气系统年代际变率的联系 ····· | 李耀辉 孙国武 张良等(22) |
| 沙粒启动机制的理论分析 ·····                   | 赵建华 张强 袁铁等(30)  |
| 西北特殊地形与沙尘暴发生的关系探讨 ·····             | 郭铤 张杰 韩涛等(43)   |
| 河西走廊东部冬春季积雪对沙尘天气的影响分析 ·····         | 李玲萍 李岩璞 王兵(51)  |

## 沙尘监测方法

|                                                           |                  |
|-----------------------------------------------------------|------------------|
| 利用 MODIS 资料定量判识沙尘暴方法研究 ·····                              | 郭铤 梁芸(63)        |
| MODIS 沙尘暴判识方法与业务系统 ·····                                  | 郭铤 蔡迪花 韩兰英等(70)  |
| NOAA 卫星沙尘暴光谱特征分析及信息提取研究 ·····                             | 郭铤 倾继祖(78)       |
| 基于 EOS/MODIS 资料的沙尘信息遥感监测模型研究 ·····                        | 韩涛 李耀辉 郭铤(85)    |
| 黄土高原半干旱地区 MODIS 反演气溶胶算法的地表反射率关系研究 ·····                   | 白鸿涛 陈勇航 冯建东等(95) |
| 2008 年 5 月 28 日沙尘暴过境前后呼市气象要素和 PM <sub>10</sub> 变化特征 ····· | 司瑶冰 李云鹏 杨秀洪(104) |
| 激光雷达监测呼市沙尘气溶胶垂直变化特征分析·····                                | 司瑶冰 李云鹏(111)     |
| 沙尘天气器测资料与常规观测资料的对比分析·····                                 | 云静波 王文 孙永刚等(117) |

## 沙尘天气分析

|                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| 2006 年 4 月 4—6 日河西走廊沙尘暴天气的成因分析 ····· | 陶健红(123)          |
| 甘肃夏季特强沙尘暴分析·····                     | 王锡稳 黄玉霞 刘治国等(131) |
| 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析 ·····             | 王锡稳 刘治国 黄玉霞等(140) |

## 沙尘暴预报预测

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| 水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用·····   | 李岩璞 张强(149)      |
| “7.17”西北夏季沙尘暴数值模拟····· | 赵建华 张强 李耀辉等(162) |

相似离度在甘肃省冬春季强沙尘暴天气入型判别和预报中的应用研究 ..... 王遂缠 王锡稳 李栋梁等(172)

沙尘浓度观测在 GRAPES 沙尘模式中的变分同化及其影响研究 ..... 赵建华 李耀辉 蒲朝霞等(179)

下垫面变化对沙尘模式输出结果的影响..... 蔡迪花 赵建华 李耀辉等(189)

西北地区春季沙尘暴气候分析及预测方法研究..... 赵红岩 陈旭辉 王锡稳等(195)

卫星反演陆表温度变化作为沙尘暴预报因子的初步研究..... 韩晖 郭铤 蔡迪花等(201)

沙尘暴影响评估

河西走廊沙尘活动对兰州 PM<sub>10</sub> 浓度的影响及其评估 ..... 陶健红 黄玉霞 陆登荣(207)

沙尘暴影响综合评价指标体系及评估方法研究..... 王静 郭铤 赵建华(214)

沙尘暴天气对兰州市环境影响的个例分析..... 杨民 王式功 李文莉等(226)

沙尘暴对成人健康效应的影响 ..... 赵春霞 王振全 王式功等(232)

沙尘暴对儿童呼吸系统症状的影响 ..... 赵春霞 王振全 牛静萍等(241)

沙漠尘肺及其研究现状综述 ..... 王振全 王式功 连素琴等(250)

# 沙尘暴形成机理



# 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应

张 强 王 胜

(中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020)

**摘 要** 在总结过去研究结果的基础上,对特强沙尘暴的发生机制进行了进一步的理论分析,探讨了大气强对流对特强沙尘暴(黑风)形成的作用;从物理上系统解释了特强沙尘暴天气的沙尘壁特征;概述了特强沙尘暴的大气沙尘粒子尺度和垂直分布;定性评估了沙尘暴的直接和间接、短期和长期气候效应;最后,还讨论了沙尘暴研究中存在的一些关键科学问题。

**关键词** 特强沙尘暴 发生机制 物理特征 沙尘壁 气候效应

## 1 引 言

沙尘暴是一种发生在沙漠或干旱沙漠化地带的区域性天气现象,但它的影响已波及全球,发生在中亚或中国西部的沙尘暴可以影响到东亚甚至美洲西海岸;发生在非洲撒哈拉沙漠地区的沙尘暴其部分沙尘被风带过大西洋到达了南美洲亚马逊地区,甚至有的沙尘被吹到了欧洲。目前,就全球范围来讲,共有北美、澳洲、中亚以及包括中非和西亚在内的中东地区等四大沙尘暴多发区,这使得全球 1/4 以上的陆地面积遭到沙尘暴的严重危害。据联合国环境计划署(UNEP)报告,半个世纪以来,亚洲沙尘暴的强度增加了近 5 倍,是全球自然灾害增多的重要方面。仅在亚洲沙尘暴每年造成的经济损失达 65 亿美元左右。

沙尘暴是强风从沙漠或沙漠化地面卷扬起大量沙尘,并使空气能见度急剧恶化的灾害性天气。它是干旱荒漠区冬春和夏初季节比较常见的一种天气景观。在天气学上,能见度和风速是划分沙尘暴强度的两大要素指标。一般将因风沙造成大气能见度小于 1000 m 的天气称为沙尘暴天气。有的研究<sup>[1]</sup>还作了更详细的划分,把风速大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,能见度小于 200 m 的天气称为强沙尘暴天气;风速大于  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,能见度小于 50 m 的称为特强沙尘暴天气。就近 20~30 a 来几次特强的沙尘暴特征来看<sup>[2]</sup>,其风速均超过  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其能见度均为 0,所以也称特强沙尘暴为“黑风”。特强沙尘暴是一种致灾性极强、对社会和生活直接影响非常严重的天气过程,它的强大风暴能摧毁房屋、拔起树木、危及人类生命,低能见度会引发大量交通事故,搬运的沙尘能毁坏农田、阻塞交通。譬如,在 20 世纪 30 年代美国西部大平原发生的一场美国历史上最严重的沙尘暴中,大平原损失了 3 亿 t 的肥沃土壤,几百万公顷的农田废

基金项目:“西部开发科技行动”重大项目“祁连山空中云水资源开发利用研究”(2004BA901A16);国家自然科学基金项目(编号 40175004)共同资助

本文发表于《中国沙漠》,2005,25(5),675-681。

弃,几十万人流离失所,许多人被迫向加利福尼亚迁移,引发了美国历史上最大的移民潮。另外,因为沙尘颗粒中含有有害的污染物质,特强沙尘暴也是影响大气环境质量的主要因素。如韩国在 2002 年 4 月测定的沙尘含量达  $2070 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,超过健康标准 2 倍。

国际上对沙尘暴的研究已有较长的历史,国际交流也日趋活跃。我国对沙尘暴比较系统的研究大概已有近 30 a 的历史,最早的研究工作是徐国昌等对 1977 年 4 月 22 日甘肃河西的一次特强沙尘暴的分析<sup>[3]</sup>。此后,国内几次研究沙尘暴的高潮均是因为几次特强沙尘暴所产生的重大社会影响而兴起的。目前,针对一些典型特强沙尘暴的天气特征分析已经不少<sup>[3,4]</sup>,对沙尘暴的气候规律的统计分析则更加广泛<sup>[5-10]</sup>,对沙尘暴的成因和对策研究也逐步开始<sup>[11,12]</sup>。但对特强沙尘暴物理特征的系统认识却相对不足。

特强沙尘暴作为一种特殊的中尺度天气系统,有其独特的物理结构和宏观特征,与台风和龙卷风等天气现象一样是自然界的一种非常典型的自组织过程<sup>[13]</sup>。它巧妙地利用自然界的力量通过内部的能量转化和调整获得局部动能突然大幅度跃升,从而产生爆发性的动力效果。同时,特强沙尘暴的发生是通过空气动力克服沙尘重力和摩擦力而实现较粗沙粒搬运和上升的过程。所以,特强沙尘暴在理论上比较符合一般的力学原则,具有自身的物理特征和发展规律。

## 2 对流体与特强沙尘暴

### 2.1 特强沙尘暴的发生机制

关于特强沙尘暴的形成机制,目前还没有一个特别统一的说法,在许多方面还有不同看法。但一般认为强风、沙源和大气热力不稳定是形成沙尘暴的三大因子<sup>[1]</sup>。其中,强风是特强沙尘暴发生的非常重要的动力因子。强风一般来源于天气尺度系统的冷锋过境。另外,地形引起的下坡风和狭管效应也均能加助冷锋的风力,大气中的惯性震荡也在每天会出现风速相对较大的时刻。但并不一定强风天气在沙源地遇到大气热力不稳定情况就一定形成特强沙尘暴,有可能只形成一般的沙尘暴或沙尘天气。事实上,许多观测事实表明,只有在天气尺度的冷锋系统能够诱发出系列有组织的对流体时,才能在沙源地形成特强沙尘暴天气。初步推断,对流体内强大的垂直上升气流可能是卷起地面沙尘的主要动力。已有观测表明,对流体垂直上升气流的速度范围为  $1 \sim 63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[14]</sup>。

从气候特征上讲,特强沙尘暴与降水的气候趋势关系也比较密切,因为降水不仅影响地表土壤的黏性,而且影响沙粒的重量,直接影响起沙过程。同时,降水造成土壤湿度的变化也会改变地表的热力过程,从而影响边界层热力不稳定和热力对流的产生。另外,降水还会影响到地表植被程度,这些都会关系到沙尘暴的发生。特别需要说明的是,一般沙漠地区的表面沙粒已经过沙尘暴天气无数次的筛刷,能够被大气动力过程远距离输送的沙粒并不多。在干旱导致的荒漠化地带,由于细沙尘比较丰富,却正好是沙尘天气能够实现起沙的主要源地。所以一般大范围、连续的特强沙尘暴的发生会与重要的干旱事件相联系,比如,发生在美国 20 世纪 30 年代的“沙尘暴(Dust Bowl)”就是典型的干旱导致的大范围的特强沙尘暴的个例之一<sup>[15]</sup>,它影响美国 2/3 的地区以及墨西哥和加拿大的一部分地区。

另外,人类活动也是影响沙尘暴发生的重要驱动力之一,而且它的作用正变得日益突出。

由于人口的快速增加,普遍出现土地利用不当,过量灌溉用水,乱砍滥伐,超载放牧、过度开垦等,从而造成草场退化、田地荒芜、沙漠化蔓延等环境问题,这使得发生沙尘暴的天气条件的阈值有所降低,必将加剧沙尘暴发生的频率和强度。

不过,大风、沙源、大气热力不稳定、干旱气候和人类活动只是特强沙尘暴发生的一般条件,特强沙尘暴能否发生关键还在于能否出现强对流过程。所以,分析强对流形成机制对研究特强沙尘暴显得非常重要。

## 2.2 强对流体的诱发和形成

一般而言,大气强对流不稳定是产生对流体的必要条件。关于对流体的诱发过程,Raymond 认为<sup>[16]</sup>,两个以上大气波在对流不稳定大气中相互作用并加强时,就会出现强烈对流活动。Sun 和 Ogura 则认为<sup>[17]</sup>,对流体可通过边界层与天气尺度气流相互作用产生的温度梯度差异而激发。Uccellini 指出<sup>[15]</sup>,对流层高低空急流的强迫也经常与对流体形成有关。另外,强低压在地形作用下的“抽吸效应”有时也能形成对流。沙漠地表对太阳辐射加热的响应快而剧烈,使得大气边界层自由对流运动比较活跃,这种强的边界层活动对天气尺度的冷锋能够产生较显著的强迫作用,从而有助于激发起对流运动。所以,在干旱地区,沙尘暴天气的对流体诱发机制大多比较符合 Sun 和 Ogura 的观点<sup>[17]</sup>。从该地区沙尘暴一般多爆发在下午地表加热最强的时刻就充分说明了这一点。最近,胡隐樵的研究表明了局地近地层大气不稳定对触发沙尘暴的作用<sup>[19]</sup>,这与 Sun 和 Ogura 的观点是一致的。不过,只有在边界层热力强迫达到一定程度即温度垂直梯度足够强时才能由天气尺度的冷锋过程中激发对流活动<sup>[20]</sup>。并且,对不同强度和类型天气尺度冷锋激发对流体所要求的边界层热力强迫程度也会不同。多大强度的边界层强迫才能在天气尺度的冷锋过程中触发对流体目前根本不清楚。但这个临界值或临界曲线的确定对预报特强沙尘暴天气将是十分重要的。Raymond<sup>[17]</sup>和 Uccellini<sup>[18]</sup>等所提出的诱发机制也许在某些时候也会起作用,但总的来看不会为主导。在新疆塔里木盆地等地也有少数情况是强低压在地形作用下的“抽吸效应”形成对流天气。冷锋形成的沙尘暴天气一般是大范围的,而“抽吸效应”形成的沙尘暴天气基本上是小范围的、局地的。

最近在河西敦煌地区初步发现的厚度达到 3~4 km 的深厚热力对流大气边界层和高空急流<sup>[21]</sup>,也许可以部分说明该地区容易出现特强沙尘暴的原因,因为深厚热力对流边界层和急流为强对流的发展提供了极为有利的热力和动力基础。

## 2.3 强对流体的结构及其对沙尘暴的贡献

对流单体内一般存在一向后倾斜的阵风锋面,以阵风锋面为界在其后方有下沉气流,而其前方却有强的相对于阵风锋面的反后上升气流,并且这一上升气流在对流体上部向前方延伸和扩展。在湿润地区,由于大气水分比较充分,对流体气流上升过程中凝结释放的潜热贡献能使对流体发展的很深厚,一般能达到 10 km 左右,甚至还要更厚一些。但沙尘暴天气的对流单体由于出现在干旱气候条件下,大气水分稀少,气流上升过程中潜热的贡献很弱,甚至可能是干对流,所以很难发展得比较深厚。正如有研究指出<sup>[1]</sup>,沙尘暴是一种对流层低层的强对流天气。沙尘暴天气的对流单体高度一般在 2~3 km 以内。如果是绝对干对流情况,它更多是在大气边界层内发展。并且,在西北干旱地区,热力自由对流也比湿润地区更充分,急流产生的动力强迫也更显著,所以它的边界层对流会比一般大气边界层的对流更深厚。沙尘暴扬起

的沙粒和尘埃造成的辐射冷却能使冷锋锋面后大气降温升压,加大与冷锋前低压区的气压差,使风速更大,辐合上升更强,能加剧对流的发展。并且,沙尘吸收太阳辐射对大气的加热作用能起到类似湿对流的潜热释放的功效,增加大气对流不稳定性,有利于对流单体发展。这两方面的正反馈机制<sup>[21]</sup>必然使沙尘暴天气过程的对流体虽不深厚,但却比较强烈。

## 2.4 “准干飚线”特征

天气尺度的冷锋前方诱发出的总是一系列对流单体。根据冷锋过程的强弱和边界层强迫的程度,诱发的对流单体或多或少,或强或弱。一系列对流单体或单独存在或合并为对流复合体,并在冷锋前方排成一条对流线,由一条或若干条对流线组成的对流体阵列在宏观上构成了带状分布的对流系统,通称为飚线。特强沙尘暴过程实质上与飚线密切相关。在我国西北地区一般可能更多是冷锋前一条对流线构成的强沙尘暴,而在美洲平原地区则比较容易出现冷锋前有多条对流线构成的强沙尘暴。飚线天气系统是一个叠加在天气尺度冷锋系统上的中尺度天气系统,它所表现出的气象要素突变要比冷锋系统更明显<sup>[19]</sup>。由于沙尘暴过程有时观测不到降水,所以称特强沙尘暴过程的飚线为干飚线<sup>[21]</sup>。而事实上,沙尘暴过程有不少时候伴有少量降水发生<sup>[1]</sup>,所以称它为“准干飚线”比较客观。飚线过境时的一般特征是,本站气压急剧跃升,风速猛增,表面气温猛降,入射短波辐射剧降(特强沙尘暴时甚至会降成零)。正是由于飚线组成的阵势强大的对流阵列使得特强沙尘暴来势迅猛,横扫的范围比较宽阔,破坏性也极强。

# 3 沙尘壁(或沙墙)

## 3.1 外观形状

在特强沙尘暴来临时,一般都能看到一堵沙墙滚滚而来,一般称此沙墙为“沙尘壁”,也有称其为“沙暴锋面”<sup>[19]</sup>。这是特强沙尘暴最突出的外观特点。一般,沙尘壁的前方下部向内陷,中前部呈“鼻”形向前突出,这种结构与对流单体的动力特征有关。沙尘暴前方相对于阵风锋面的反向上升气流在沙尘壁的形成过程中起了关键作用。“鼻”尖的高度大约在100 m左右,人们一般看到的沙尘壁的高度为300~400 m<sup>[22]</sup>。但受人的视角所限,人眼看到的只是沙尘壁前缘突出部分的高度,实际高度可能还要更高一些。从1993年5月5日甘肃河西特强沙尘暴后乌鞘岭山上积雪出现下面黄、上面白的分界线估计,沙尘壁的高度可能在700 m左右<sup>[4]</sup>。就理论而言,在整个对流体高度内估计沙尘都比较盛行,所以从理论上讲沙尘壁的高度达到1000 m左右都是有可能的。有时,还能看到沙尘壁呈三层结构,每一层有一球状沙尘团在不断滚动<sup>[23]</sup>。从上往下看,沙尘壁并不是一个简单的弧,而是沙尘流从内向外翻滚,呈莲花状<sup>[24]</sup>,这正好符合对流体的动力结构特征。

## 3.2 时空尺度

一般,沙尘壁长约100 km,宽约几十千米甚至100 km的尺度。以“93.5.5”特强沙尘暴为例,从金昌→武威→古浪再到民勤,沙尘壁的宽度依次从最大193 km减小到162 km、108 km,最后减到84 km。沙尘壁厚度和浓度在以上的宽度范围并不是均匀的,它总是时而浓时而淡。

这意味着沙尘壁可能由几条更黑更浓的更强的次一级沙尘壁组成,每条次级沙尘壁的宽度约10~20 km,过境时间约20 min。两条强沙尘壁的间隔,大约25 km左右,时间间隔约半小时,在间隔期沙尘相对要淡的多。实际上,每条强沙尘壁对应一条对流线,控制整个沙尘壁的飚线实际上就是几条对流线的复合带。

### 3.3 光色特征

特强沙尘壁的光色很奇特。壁下面为黑色,中上层分别为红、黄<sup>[22]</sup>,有时也红、黄相间<sup>[25]</sup>。沙尘壁过境时天色也变幻莫测,天色红一阵,黑一阵,天色发红时沙尘壁外观好似着火一般,天色发黑时沙尘壁的颜色由紫黑变成黑,伸手不见五指。沙尘壁的光色分布可以从光学原理上得到解释,众所周知,太阳光由赤、橙、黄、绿、靛、紫七种单色光组成,且它们的波长从0.75  $\mu\text{m}$  依次递减到0.40  $\mu\text{m}$ 。在沙尘壁中,对流体上升气流与沙粒重力相平衡的结果使沙尘壁底部的沙粒直径最大,中层次之,上层主要是浮尘。当太阳光通过沙尘大气时,因浮尘对黄色光有散射作用,所以我们看到沙尘壁上层为黄色;太阳光到达沙尘壁中层时,沙尘粒径普遍比上层大,这个尺度的沙粒正好散射的是红色光,所以沙尘壁中层为红色;当太阳到达沙尘壁低层时,沙尘粒子更大,浓度更强,所有波长的太阳光几乎被散射和反射殆尽,因此,最下层为黑色。至于沙尘壁过境时的天色变化,也同样是光学现象,它与飚线在顺风向的上升气流不均匀有关,因为上升气流的强度的不均匀决定了大气沙尘粒径大小和粒子浓度的水平空间分布。就对流单体而言,前部为上升气流,沙粒尺度大而且浓度强;后部为下沉气流,沙粒尺度小而且浓度稀。所以天色可能先黑色后变为黄色或红色。同时,由于“准干飚线”由对流复合带构成,还会出现<sup>[4]</sup>天色由黑色转为黄色要反复好几次。

### 3.4 动力因素

形成高大雄壮的沙尘壁必须要有强大的动力因素。首先,对流单体内强大的反向上升气流不仅能卷扬起大量沙尘,甚至粒径较大的沙粒,而且还有足够的动力把这些沙粒输送到较高层的大气。另外,水平强风也能扬起不少沙粒。但水平强风对大粒径沙粒主要起近距离搬运作用,向上的输送主要靠对流和湍流运动输送。如果没有强对流过程发生,即使水平风速再强,它能扬起并输送到大气中的仅是很小的沙粒。因此,仅能出现一般沙尘暴或扬沙天气,而很难出现沙尘壁景观。可见沙尘壁的形成主要靠强大的反向上升气流的卷扬来完成。一系列对流线组成的对流带或飚线的系统性反向上升气流带是沙尘壁景观形成的关键动力因素。

## 4 沙尘粒子的尺度和垂直分布

特强沙尘暴的动力作用越强,沙粒浓度会越强,并且粒子谱分布越明显向大尺度偏移。在“93.5.5”特强沙尘暴事件,在金昌市观测到的大气含沙量高达1016  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[22]</sup>。一般,特强沙尘暴天气沙尘粒子浓度能增加50多倍<sup>[26]</sup>,不仅1.0  $\mu\text{m}$ 以上的巨粒子浓度剧增,而且Aitken核粒子浓度也有明显增加。但从大气粒子谱来看,沙尘暴天气的大气沙尘粒子尺度主要集中在1.0  $\mu\text{m}$ 以上的巨粒子<sup>[27]</sup>,约占总质浓度的80%以上。根据国家卫星气象中心的云图资料,1990年4月下旬华北沙尘暴的沙尘顶高为4500 m<sup>[28]</sup>,”93.5.5”黑风暴时沙尘顶高为2100 m<sup>[28]</sup>。而美国1977年2月德克萨斯州的一次沙尘暴顶高与前者更相近<sup>[29]</sup>。HEIFE试

验的激光探测资料表明<sup>[30]</sup>。沙尘粒子基本分布在 2700 m 以内,大约在 1200 m 范围内即大气边界内沙尘粒子浓度总体比较大。但浓度最大在 800 m 左右,这相当于沙尘壁的高度。这与撒哈拉沙漠的情况基本一致<sup>[31]</sup>。当然,不同粒径的沙尘粒子浓度有各自的垂直分布规律,但对此认识有限。原则上讲,由于重力作用,巨粒子主要分布在大气低层,随着高度增加主要以细粒子为主,比较高处尺度谱基本上为典型的 Junge 分布。

## 5 气候效应

### 5.1 短期效应

短期效应是指特强沙尘暴在爆发期对气候要素引起的变化。特强沙尘暴对气候的短期效应非常明显。主要体现在动力效应和辐射效应两个方面。动力效应表现为,水平风速剧增,强大的垂直运动出现,水平和垂直方向风速切变加剧,动量传输加快,强对流单体形成。同时,还会由于此时的强对流过程的动力贡献,引起一定的降水过程发生。还有,对流单体后下方的下沉气流将把上层冷空气输送到下层,会使低层大气温度降低。

辐射效应是沙尘暴短期气候效应的主要方面。在特强沙尘暴过境时,太阳短波入射为 0,地面长波向上辐射剧减,大气向下长波略有增加,地表辐射平衡的结果是地表净辐射基本为负<sup>[19]</sup>。这反映了沙尘粒子的“遮阳效应”,这预示着会引起地表冷却,使低层沙尘大气温度迅速下降。同时,沙尘粒子还能在辐射传输过程中吸收太阳辐射使高层沙尘大气增温。沙尘暴时大气增温最强出现在对流层中层(大约 5 km 高处)。沙尘暴的辐射效应对大气的过程实质上是沙尘消光冷却和吸收加热两个相反过程的共同作用。定性而言,这两种作用的最终效果基本上使边界层大气降温,使对流层中上层大气增温。从整层大气来看,沙尘暴对大气是增温效应,这从地表接收到的大气向下长波辐射的增加就能判定<sup>[21]</sup>。另外,由于冷锋过境和大气的辐合作用,沙尘暴到来时大气湿度也会猛增。

沙尘暴的直接效应是局地的、短期的,随着沙尘暴的爆发或到达而表现出来,并随着沙尘暴的结束或过境而很快消失,一般仅能延续一天左右的时间。

### 5.2 长期效应

特强沙尘暴的长期气候效应主要是沙尘暴过后在大气中继续滞留的沙尘粒子的作用,这种效应的气候意义更深远。这种效应不仅对沙尘暴发生地局地气候有重要影响,而且由于其长距离输送对发生地下游广大地区的气候也会有比较明显地影响。一般半径大于  $10\ \mu\text{m}$  沙尘粒子由于重力而很快沉降,小于  $0.3\ \mu\text{m}$  的沙尘粒子由于布朗聚合则仅能在大气中保留一天。所以,在长期气候效应中起主要作用的是尺度在  $0.3\ \mu\text{m}$  附近的沙尘粒子,它在大气中的滞留时间可达数百天。

大气滞留的沙尘在不同地区的气候效应是不同的,在反照率较高的沙漠地区,大气沙尘减小行星反照率,导致地气系统加热<sup>[32]</sup>;而在低地表反照率的湿润地区,大气沙尘增加行星反照率,冷却地气系统<sup>[33]</sup>。所以,在中国西北干旱区沙尘暴发源地,沙尘暴的间接效应对地气系统起加热作用,而在其下游湿润地区却起冷却作用。

另外,Charney 等认为,大气中滞留的沙尘增加了大气稳定度,导致降水减少,驱使干旱和

沙漠化加剧<sup>[35]</sup>。与此相反,也有研究认为<sup>[34]</sup>,沙尘粒子长距离输送有增加下游地区降水量和缓解酸雨危害的明显作用。有人对河北省沙尘暴天气和降水的统计表明,其上游沙尘暴和滞后两个月的本地降水有非常好的相关<sup>[36]</sup>。日本经过观测也确认,来自中国的沙尘粒子是日本冰晶凝结核的主要部分,对日本降水有重要作用<sup>[37]</sup>。可见,沙尘暴对降水的作用比较复杂。

对1988年4月一次沙尘暴事件中北京地区沙尘粒子含量的分析发现<sup>[38]</sup>,沙尘以多呈碱性的铝、铁等8种元素为主。沙尘中这些碱性元素无疑能对酸雨起到一定程度的中和作用。

### 5.3 间接效应

人们近来又发现,沙尘暴对长时间尺度的气候循环有明显的间接贡献。对极地冰芯中沙尘、温度、CO<sub>2</sub>浓度及海洋原始生产力的古气候记录进行对比分析,发现<sup>[39-41]</sup>沙尘既是气候的产物,它又通过海洋“生物泵”对气候起着控制作用。在冰期,水循环减弱,土地覆盖减少,沙源扩展,风力加大,沙尘暴发生频繁;同时由于海平面下降,沿海大陆架出露,又增加了新的沙源,使冰期沙尘暴的发生更加剧烈,从而为海洋提供了大量富含铁质的营养物质,海洋浮游植物大发展,通过海洋“生物泵”作用,降低了大气中的CO<sub>2</sub>浓度,进而使大气温度进一步下降,而下降的温度又加剧了沙尘向海洋的输送,这样周而复始,直到海洋中的营养物质过剩,浮游植物不再发展,“生物泵”作用消失,大气中的CO<sub>2</sub>浓度开始增加,温度上升,水循环加强,海平面上升,植被覆盖增加,沙源减少,风力减弱,沙尘输送到海洋中的物质减少,浮游植物生产力下降,CO<sub>2</sub>浓度进一步增加,大气升温,全球变暖。不过,沙尘对气候的控制相对于米氏天文周期仍是一个次级气候控制因子。

## 6 结束语

特强沙尘暴是属于中尺度过程,但我国目前还没有建立起真正的中尺度气象监测网。目前的天气观测网对沙尘暴的监测并不很得力,其分辨率决定了统计结果的局限性,更加限制了对沙尘暴中尺度结构的详细了解。本来一些综合性的野外观测试验可以获取一些对沙尘暴物理过程的认识。但是,由于大多数观测试验仪器比较脆弱或昂贵,在真正沙尘暴来临时往往一些观测被人为终止,至今还很少在沙尘暴发源的沙漠地带获得真正意义上比较完整的沙尘暴天气的大气边界层和陆面过程的观测资料,这使得我们至今无法用观测试验资料来揭示特强沙尘暴的真实物理特征。数值模式虽然是一种可以替代的沙尘暴研究工具,但至今还没有发展出十分理想的沙尘暴数值模式,所以用数值模拟研究沙尘暴同样使人们感到缺乏信心。

起沙过程是特强沙尘暴的关键环节,然而我们对起沙机制的认识却十分有限。这使我们至今始终无法完全搞清楚沙粒到底是怎样从地表输送到大气。事实上,起沙过程是十分复杂的力学过程,它牵扯到重力、黏性力、碰撞、摩擦、湍流应力和对流活动等一系列力学因素。理想的结果是获得以牛顿定律为基础的力学方程来表示的起沙过程。如果这个目标能实现,在给定沙尘密度、尺度和形状以及地表粗糙度和土壤湿度等陆面和土壤参数后,原则上就可以由大气动力和热力过程控制起沙方程,使大气运动过程与起沙过程完全耦合起来。这项工作虽然困难重重,但如果长期坚持把高性能风洞实验结果和精密仪器进行的野外观测结果相结合,再通过扎实而巧妙的物理构思和数学推导,有可能获得起沙方程或比较有理论依据的起沙参数化公式。

目前,一般比较强调单方面因素对沙尘暴气候规律的影响,结果似乎都有一些道理,但又都道理不足。这往往会造成研究结果缺乏很强说服力。实际上,沙尘暴气候规律必须综合地形、生态植被变化、人类活动、大气活动中心的震荡甚至全球气候变暖等多种因素。如果能够利用多种资料 and 不同手段进行长时间序列的多因子综合分析也许能够取得一些对沙尘暴气候规律更深刻地认识。

特强沙尘暴是大气中结构性比较强的系统,它的发生和发展无疑符合系统论的一些原则。如果把特强沙尘暴看做一个相对独立而完整的自然界的系统,按系统论的观点,它的状态和演化过程将完全由进入这个系统的能量和物质流来决定。这样可以把许多复杂的因素和过程综合进能量和物质过程,从思路上来说可能更简洁一些。有可能以能量和物质方程为基础获得对特强沙尘暴演化的一般规律性认识。

### 参考文献

- [1] 钱正安,贺慧霞,瞿章,等.我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A]//方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997:1-10.
- [2] 许宝玉,钱正安,焦彦军.甘肃河两“5.5”黑风天气系统结构特征及其成因分析[A]//方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997:44-51.
- [3] 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.
- [4] 钱正安,胡隐樵,龚乃虎,等.“93.5.5”特强沙尘暴调查报告及其分析[A]//方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997:37-43.
- [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分析[J].中国沙漠,2001,22(2):106-111.
- [6] 王式功,王金艳,周自江,等.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,58(2):193-200.
- [7] 丁瑞强,王式功,尚可政,等.近45a我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J].中国沙漠,2003,23(3):206-310.
- [8] 杨民,蔡玉琴,王式功,等.2000年春季中国北方沙尘暴天气气候成因研究[J].中国沙漠,2001,21(Suppl.):6-11.
- [9] 周自江,王锡稳,牛若芸.近47年中国沙尘气候特征研究[J].应用气象学报,2002,13(2):193-200.
- [10] 邱新法.我国沙尘暴的时空分布规律及其移动路径[J].地理学报,2001,56(3):316-322.
- [11] 王涛,陈广庭,钱止安,等.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠,2001,21(4):321-327.
- [12] 王式功,杨德保,金炯,等.我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠,1995,15(1):19-30.
- [13] 胡隐樵.非平衡态大气热力学的研究[J].高原气象,1999,18(3):306-320.
- [14] Atkinson B W. 大气中尺度环流[M].《大气中尺度环流》翻译组译校.北京:气象出版社,1987:338-343.
- [15] Schuber L S D, Suarez M J, Pegion P J, et al. On the cause of the 1930s Dust Bowl[J]. Science, 2004, 303: 1855-1859.
- [16] Raymond D J. A model for predicting the movement of continuously propagating convective storm[J]. J. Atmos. Sci., 1975, 32: 1308-1317.
- [17] Sun W Y, Ogura Y. Boundary-layer forcing as a possible trigger to a squall line formation[J]. J. Atmos. Sci., 1979, 36: 235-254.
- [18] Uccellini L W. On the role of upper tropospheric jet streaks and leeside cyclogenesis in the development of low-level jets in the Great Plain[J]. Mon. Weather Rev., 1980, 108: 1689-1696.
- [19] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴发展与干飚线——黑风暴形成机理的分析[J].高原气象,1996,15(2):178-185.

- [20] 张强,卫国安,侯平.初夏敦煌荒漠戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究[J].高原气象,2004,**23**(6):587-597.
- [21] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J].大气科学,1996,**21**(5):1582-1589.
- [22] 朱福康,汤绪.我国沙尘暴天气的研究[J].气象科技,1994(1):11-13.
- [23] 张钦仁.西北地区“黑风”成因及预报方法探讨[A]//方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997:70-74.
- [24] Idso S B. An American haboob[J]. *Bull. AMS*,1972,**53**:930-935.
- [25] 徐国昌,谢明庆.“5.5”特强沙尘暴的调查报告[R].全国沙尘暴天气研讨会,1993年9月7—9日,兰州.
- [26] 杨东贞,于晓岚,颜鹏,等.“93.5.5”黑风沙尘气溶胶的分析[A]//方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.
- [27] 尹宏,韩志刚.气溶胶大气对太阳辐射的吸收[J].气象学报,1989,**47**(1):118-123.
- [28] 郑新江.沙尘暴天气的云图特征分析[J].气象,1995,**21**(2):46-49.
- [29] Swap R. Saharan dust in the Amazon[J]. *Tellus*,1992,**44B**(2):133-149.
- [30] Kcn J K. Lidar observation of the Asian dust(kosa)over the Gobi desert during the dust season of 1991 [A]. *International symposium on HEIFE* 1993[C]. 1993. 634-641.
- [31] Foughart Y. Observation of Saharan aerosols:Result of ECLATS field experiment. Part 1:Optical thickness and aerosol size distributions[J]. *J. C. A. M.*,1987,**26**(1):28-37.
- [32] 方宗义,朱福康,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997:103-110.
- [33] Sokolik I, Goliesyn G. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosols[J]. *Atmospheric Environmet*,1993,**27A**(16):2509-2517.
- [34] 成天涛.中国西北大气沙尘光学特性和辐射强迫的数值模拟[D].中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士论文,1999:30-31.
- [35] Charney J G. Dynamics of desert and drought in Sahel[J]. *Quart. J. R. Met. Soi.*,1975,**101**:193-202.
- [36] 瞿章,许宝玉,贺慧霞.《930505》沙尘暴的若干启示[R].全国沙尘暴天气研讨会,1993年9月7—9日,兰州.
- [37] 杨东贞,纪湘明,徐晓斌,等.一次黄沙天气过程的分析[J].气象学报,1991,**49**:334-342.
- [38] 李清森.河北省沙尘暴天气气候分析[R].全国沙尘暴天气研讨会,1993年9月7—9日,兰州.
- [39] Watson A J, Bakker D C E, Ridgwell A J, *et al.* Effect of iron supply on Southern Ocean CO<sub>2</sub> uptake and implications for glacial atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*,2000,**407**:730-733.
- [40] Coale K H. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean[J]. *Nature*,1996,**383**:495-601.
- [41] Bishop J K B, Davis R E, Sherman J T. Robotic observations of dust storm enhancement of Carbon biomass in the North Pacific[J]. *Science*,2002,**298**:817-821.