

沙尘暴研究中的若干科学问题^{*}

石广玉 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

P44 A

摘要 近年来, 中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起世人的关注。实际上, 沙尘暴不仅影响空气质量、交通, 造成土壤风蚀和其他人、畜生命财产等社会、经济损失, 作为一种特殊类型的大气气溶胶, 沙尘粒子还具有重要的气候和环境效应。作者在简单综述沙尘暴研究的基础上, 将重点探讨沙尘暴研究中一些值得注意的科学问题。

关键词: 沙尘暴; 沙尘气溶胶; 气候效应; 环境效应

1 引言

近年来, 中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起了国内和国际的关注, 沙尘暴已成为一个重要的地球环境问题^[1]。

沙尘暴的危害是多方面的: 沙尘暴下层的沙粒在狂风的驱动下滚滚向前, 当遇到障碍物或风力减弱时, 大量的沙尘粒子落到地面, 埋压农田、村庄、工厂、铁路、公路、水源等形成沙瓣、沙堆和沙丘; 大风经过干旱地区, 将疏松土壤的表土刮去一层, 使土壤变贫瘠, 扩大沙化的区域; 其强风有时拔树毁屋、刮翻火车, 破坏农业设施, 甚至造成人畜伤亡; 沙尘暴还造成空气污染, 水源污染, 而可吸入细粒子, 更直接危害人体健康; 沙尘暴还影响太阳和长波辐射, 影响区域气候, 尤其是地气系统的辐射收支和能量平衡; 由于沙尘暴来临时, 能见度很低, 严重影响城市交通, 甚至影响高速公路的正常运行等。总之, 沙尘暴的危害十分严重。例如, 1993年5月5日西北地区黑风暴中共死亡85人、伤264人、失踪31人, 此外, 死亡和丢失大牲畜12万头(只), 农作物受害560万亩, 沙埋干旱地区水渠总长2000多公里, 直接经济损失5.6亿元。由于风蚀使该地区土壤荒漠化加快, 造成的生态环境和间接经济损失难以估量。

国外对沙尘暴的研究起步较早。上世纪20年代初 Hankin^[2]首先对印度的“An-dhi”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了分析。之后, Idso^[3]和 Jeseph^[4]先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场的差异等作了多方面的研究。20世纪80年代以来研究有了进一步的深入, Braze^[5]对发生于美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型作了详细分析。Jauregui^[6]对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究。Ott等^[7]曾利用卫星和GATE资料对撒哈拉沙尘暴的爆发作过分析。此外, 利用数值模拟方法研究起沙

2003-03-18 收到, 2003-05-10 收到修改稿

* 中国科学院知识创新项目 KZCX2-305、中国科学院国际合作局中日 ADEC 项目、国家重点基础研究规划项目 G2000048703 和国家财政部项目 Y0101 共同资助

率的做法，也渐渐发展起来，并得到越来越广泛的应用。近年来，随着对土壤风蚀过程认识的不断加深，Shao 等^[8, 9]将地理信息系统（GIS）、气象模式与起沙模式耦合起来，对澳大利亚墨累河—达令河流域（Murray-Darling Basin）和澳大利亚大陆的土壤风蚀做了模拟；Marticorena 等^[10]将设计的起沙方案用于模拟撒哈拉的沙尘暴天气的起沙过程，模拟结果与卫星云图比较一致。上述两种模式在模拟沙尘源和起沙率方面都有较好的能力。

我国历史文献浩瀚，有关沙尘暴天气的记载不绝于书。有书记载：康熙十四年（公元 1675 年）三月二十六日，冀州起异风，“黄霾蔽天，屋瓦皆飞”。雍正元年（公元 1723 年）四月初七，“献县风霾，昼晦”；恩县“夜起大风，飞石拔木有顷，黑霾如墨，良久复变为红霾，乍明乍暗，逮晓方息”等等。表明我国人民从古代以来对于沙尘天气一直给予了高度的关注^[11]。张德二^[12, 13]曾根据历史文献的记载，对我国从唐朝以来的沙尘暴事件进行了系统分析，并给出了公元 3 世纪以来的“雨土”年表。

然而，我国真正采用近代科学技术监测、模拟、研究和预测沙尘暴，却相对起步较晚。上世纪 70 年代，我国对沙尘暴的研究大多集中在沙尘（暴）事件活动时间和空间分布的统计分析及气候学研究方面，对沙尘天气学的研究主要是分析造成沙尘暴的影响系统。有关数值预报的研究，也多数集中于模拟造成沙尘暴的天气系统。此外，也开展了一些沙尘输送的模拟研究。石广玉^[14]曾对 20 世纪 80 年代的中国黄沙研究做过简短评述。

目前，我国在沙尘（暴）气溶胶的物理化学特性研究等方面已取得了进展。周明煜等^[15]曾研究了 1980 年 4 月 18 日袭击北京的一次沙尘暴的黄沙粒子的浓度和粒径分布，特别是他们发现了铕、钆和钕等元素只存在于黄沙粒子中。曲绍厚等^[16]则讨论了这次强沙尘暴的来源，结果表明这次沙尘来源比较复杂，它不止来源于某一单一地区。石广玉等^[17]报道了利用太阳华盖辐射计对 1991 年春夏之交的北京地区大气气溶胶光学特性的测量结果，发现当沙尘暴袭击北京时，整层大气气溶胶的光学厚度、大粒子浓度以及粒子散射相函数等均有大幅度增加。邱金桓等^[18~20]采用激光雷达和光度计对 1988 年 4 月北京地区的三次沙尘暴天气过程进行了综合测定。张仁健等^[21]对 2000 年 4 月 6 日北京地区发生的特大沙尘暴化学元素成分的分析表明，北京春季沙尘污染极为严重。方宗义等^[22]根据卫星探测的特点，针对 2000 年 4 月 6~7 日华北地区大范围沙尘天气，具体探讨了用星载扫描辐射仪监测沙尘暴的原理和方法。最近，岩坂等^[23]报告了亚洲大陆沙漠地区自由大气中的沙尘粒子数浓度及谱分布的气球观测结果。

另一方面，我们不能不看到，尽管国内外已经对亚洲沙尘暴进行了大量的观测和研究，但是迄今为止，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。近年来，比较系统的国际大气气溶胶研究计划是已于 2001 年结束加强观测（IOP）的亚洲气溶胶特征试验（ACE-Asia），其中曾将矿物（沙尘）气溶胶作为其主要研究内容之一^[24]；而于 2001 年开始的中国科学院—日本文部科学省的“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境影响的研究（ADEC）”的合作项目^[25]，可能是系统性地研究亚洲沙尘暴的第一个科学计划，目前正在顺利执行。其目标是：阐明亚洲风送沙尘的发生、输送实况及其模式化；评价过去半个世纪以来沙尘向大气与海洋中的输送量；并在全球规模上，将亚洲沙尘对气候系统的影响定量化。与以往的

国内外沙尘(暴)研究相比,这一研究项目将: (1)三维地、综合地、系统地进行大陆尺度的沙尘发生、长距离输送的观测分析; (2)提供定量评价风送沙尘对气候系统影响的各种数据; (3)定量评价过去半个世纪以来的气候变化与风送沙尘的关系。

为了执行该项目的观测计划,目前已经在中国的阿克苏、策勒、敦煌、沙坡头、银川、长武、榆林、北京、合肥和青岛以及日本的那霸、福冈、名古屋和筑波等地建立了野外测站,形成了从西到东、跨越 60 个经度、距离超过 5000 km 的观测网,涵盖了亚洲沙尘的主要发生源地及沉降区。这些站点上的观测项目包括气象条件,特别是垂直风速的观测;下垫面条件,包括地表粗糙度、土壤粒度及含水量的观测;地面沙尘粒子取样的物理、化学特性观测;垂直分布观测,数浓度与化学组成等。观测仪器主要有:自动气象观测系统 (AWS)、天空辐射计 (太阳光度计)、激光雷达、气球 (携带光学粒子计数器 OPC 及取样膜)、无人驾驶遥控小飞机 (携带 OPC 及取样膜)、安德森撞击取样仪及大流量粒子取样仪、沙尘粒子流量及粒度仪、能见度仪与观测塔等。为了取得大范围的沙尘输送路径、光学特性等数据,卫星遥感探测在该项目中占有重要地位(见图 1、2)。

总之,到目前为止,在沙尘暴的观测和研究方面仍有大量的问题有待解决。特别需要指出的是,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。无论是在沙尘暴的发生机制,还是在其输送过程中所发生的物理和化学特征的变化方面,我们仍然知之甚少。至于沙尘粒子的气候、环境效应,特别是对海洋生物的影响,直到最近才开始受到重视。

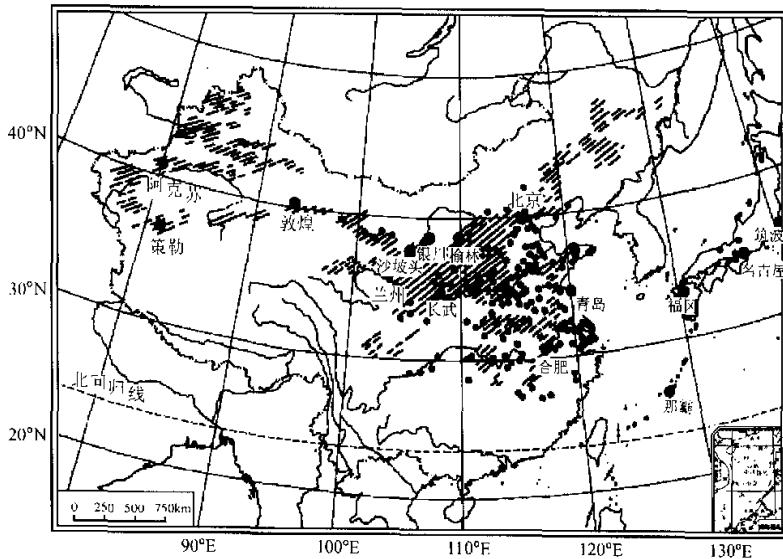


图 1 中日 ADEC 项目野外观测站点示意图

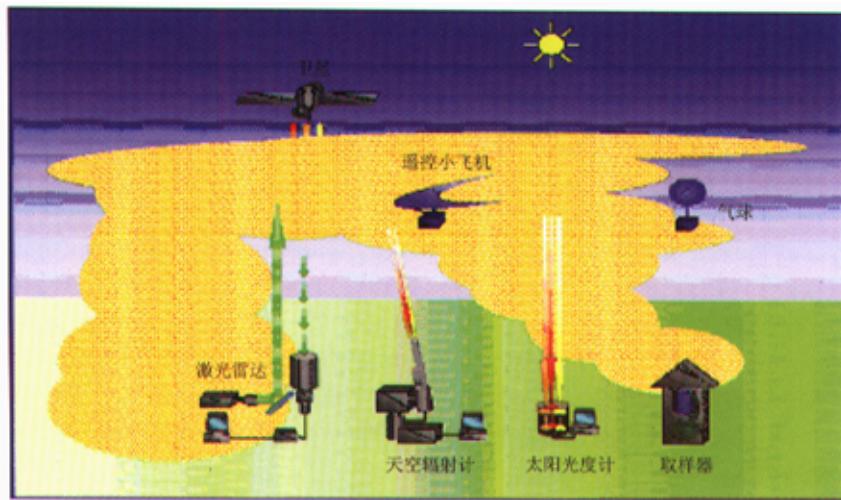


图 2 中日 ADEC 项目野外观测仪器示意图¹⁾

2 沙尘暴的发生与输送

从本质上来说，沙尘暴是一种自然现象，古已有之。

由于全球大气环流以及地形等因素的影响，在以南、北回归线为中心的南、北大约 15 个纬度的范围内，在地球表面形成了大面积的干旱与半干旱地区^[26]，其典型代表就是大片沙漠的出现，由此形成了沙尘暴产生的物质基础；加上一定的气象和下垫面条件，就会形成沙尘暴。全球最大的沙尘暴源区为撒哈拉大沙漠及其南部和亚洲中纬度干旱区。亚洲中纬度干旱区西起里海，东到大兴安岭，南达青藏高原和黄土高原，北抵蒙古国中部，其面积大致同中国领土相当。

早在人类文明出现之前的地质历史时期，沙尘暴就已经在地球上存在。黄土高原可能是一个典型的例子。目前，大多数科学家认为黄土高原是“风成黄土”，也就是说，它是在地质历史时期由其西北部输送来的沙尘形成的。第二个例子是，在格陵兰冰芯中发现的大量气溶胶颗粒物沉积，据信来源于欧亚大陆。另一方面，如前所述，在中国、韩国的史书、地方志及诗稿中，早就有“风霾大作”、“土雾满天”、“雨土”和“尘雨”，甚至“边风猎猎卷晴沙”的诗句等沙尘暴现象的描述。

近百年来，随着人口的急剧增加以及人类社会经济活动的急速发展，人类对地球环境的影响力愈来愈大。特别是近年来，滥垦、滥牧、滥伐、滥采以及滥用水资源等掠夺性的人类活动使得地表植被大面积减少和退化，加剧了沙尘暴灾害。再加上全球变暖引起的中国北方的气候干旱，致使沙尘暴发生频繁。因此，沙尘暴的发生已不再

1) 安井 元昭, 2002, 私人通信。

仅仅是一种自然过程, 而成为自然过程与人文过程共同作用的结果。人类活动已成为沙尘暴形成和演变的重要驱动因子之一。反过来, 沙尘暴也对地球气候和环境以及人类的社会、经济和政治生活产生着巨大的影响。

为了全面把握沙尘暴的产生和输送过程, 以下几方面的研究是必不可少的。

2.1 沙尘源区

沙尘源区虽然主要是沙漠、干枯的湖床以及半干旱的沙漠边缘, 但是在植被覆盖减少的较干旱地区或者土壤表面受到人类活动干扰的地区, 也会成为沙尘暴的源区。沙尘暴的源区主要分布在北半球的沙漠地区, 而南半球的沙尘释放则相对较少。因此, 对于亚洲沙尘暴的研究来说, 主要的源区应当包括: (1) 原始沙漠、荒漠类型区: 其中有中国境内的塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌苏沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠以及库布齐沙漠等, 还包括蒙古的戈壁沙漠和哈萨克斯坦等国的沙漠地区; (2) 河湖干枯土壤类型区: 主要有我国境内的塔里木河下游区(台台玛湖地区)、叶尔羌河下游区、艾比湖区、玛纳斯湖区、苏格淖、嘎顺淖等, 以及蒙古的戈壁沙漠和哈萨克斯坦等国的类似地区; (3) 绿洲内农田: 主要有不同土壤质地、不同利用和耕作方式下的农田; (4) 胡杨林土壤区: 主要是南疆胡杨林分布区和黑河下游的额济纳旗地区; (5) 土壤表面受到人类活动干扰的地区: 主要是地县、乡级城镇居民人为活动影响的无覆盖土壤区^[27]。

对沙尘源区的观测与研究内容应当包括: 地面特征以及沙尘粒子的物理、化学特性。特别是地表粗糙度、土壤含水量、土壤粒子的谱分布, 以及不同粒径的沙尘粒子的化学组成和随波长而变的复折射指数。这些资料将为沙尘起沙模式以及沙尘气候强迫的参数化研究及其验证提供最基础的观测资料。其中, 复折射指数是估算沙尘气溶胶诸多光学特性的最重要的因子之一。它的细微差别可以导致辐射强迫估算的明显偏差。在撒哈拉沙漠测量的复折射指数常用于估计全球尺度的沙尘辐射强迫。即便如此, 不同作者所使用的数值仍有很大差别(见表1)^[28~33]。

表1 不同作者所使用的撒哈拉沙漠等地沙尘气溶胶的复折射指数

作者	波长/nm	复折射率 实部	复折射率 虚部	作者	波长/nm	复折射率 实部	复折射率 虚部
Kaufman	可见光 波段平均	1.53	-0.001	Leven	可见光 波段平均	1.53~1.46	-0.003~-0.04(WMO)
Costa	400	1.48	-0.006	Torres	331	1.58	-0.0207
	480	1.48	-0.0065		340	1.58	0.0196
	694	1.48	-0.002		380	1.57	0.015
	860	1.48	-0.002		550	1.56	-0.006
Penner 等	350	1.58	-0.0176	Higurashi 等		1.50	(0.005±0.002)
	380	1.58	-0.015				

中日 ADEC 项目为我们提供了最新的塔克拉玛干沙漠及其附近地区沙尘粒子的复折射指数(表2), 这使获得更为精确的该地区沙尘气溶胶的光学特性诸如质量吸收系数、单次散射反照率、光学厚度以至辐射强迫成为可能。但我们仍然缺乏2.1节所述的其他地区的资料。

2.2 沙尘暴产生的天气、气候条件

当地面风速超过某一临界值时, 就会发生沙尘风蚀。但是, 这一临界值与地表粗

糙度、土壤粒子大小以及土壤湿度等因子有关，这就是为什么要加强沙尘源区观测研究的原因。

表 2 塔克拉玛干沙漠及其附近地区沙尘粒子的复折射指数¹⁾

波长/ μm	复折射率实部	复折射率虚部	波长/ μm	复折射率实部	复折射率虚部
3.00×10^{-1}	1.51	1.29×10^{-2}	5.25×10^{-1}	1.50	3.56×10^{-3}
3.25×10^{-1}	1.51	1.10×10^{-2}	5.50×10^{-1}	1.50	3.00×10^{-3}
3.50×10^{-1}	1.51	9.04×10^{-3}	5.75×10^{-1}	1.50	2.69×10^{-3}
3.75×10^{-1}	1.51	7.83×10^{-3}	6.00×10^{-1}	1.50	2.47×10^{-3}
4.00×10^{-1}	1.51	6.80×10^{-3}	6.25×10^{-1}	1.50	2.44×10^{-3}
4.25×10^{-1}	1.51	5.67×10^{-3}	6.50×10^{-1}	1.50	2.48×10^{-3}
4.50×10^{-1}	1.51	4.67×10^{-3}	6.75×10^{-1}	1.50	2.43×10^{-3}
4.75×10^{-1}	1.51	4.36×10^{-3}	7.00×10^{-1}	1.50	2.34×10^{-3}
5.00×10^{-1}	1.51	4.11×10^{-3}			

近年来，对于沙尘暴产生环境的多样性进行了研究。赵琳娜^[34]对华北和北京沙尘暴产生的有利环境场进行了研究。与我国西部地区沙尘暴起因的冷空气活动及冷锋锋生作用，以及偏东风“倒灌”等不同（更有甚者像1993年5月5日黑风暴还有飑线过境），赵琳娜等^[35]注意到，近年来发生于我国东部地区的沙尘暴却多与快速气旋的发生发展有关，其中又主要是蒙古气旋。他们的分析表明，这类气旋有其特殊性，它们与夏季降水期的江淮气旋不同，斜压强迫是主要的影响因子，而又与海上爆发性发展的海带气旋不同，凝结潜热的作用不很明显，属于“干气旋”一类。但是，对流层低层和高层位势涡度的大值区的分布却很明显，甚至出现对流层顶“下陷”，涡柱上下贯通，连成一体的结构。为了了解该类气旋发生发展的过程，他们采用中尺度非静力模式，对该类气旋进行了数值模拟，模式可复制出该类气旋从无到有发生发展的过程，特别是位涡涡柱的演变特征，证明了大气动力因子起主导作用，解释了沙尘暴大风来源于有效位能向动能的转换。这从另一角度表明，引发华北沙尘暴的系统与我国西部的系统似乎存在着显著的不同。这对于我们进一步认识沙尘（暴）气象环境场的多样性提供了帮助。

最近，周秀骥等^[36]综合分析研究了2000年春季影响北京地区的沙尘暴天气过程，揭示了沙尘暴天气在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中的关键动力学问题。他们的研究结果表明，影响北京地区沙尘暴过程起沙的动力条件与春季冷空气活动等气候因素有关，并与北方土壤干土层面积、地面风场摩擦速度呈异常显著相关，而且沙尘暴活动特征可用一个综合物理模型来描述。这些研究结果为我国沙尘暴预报理论和治理决策提供了科学依据。

2.3 人类活动与沙尘暴

人类活动对土壤表面的干扰也可以极大地增强或减少沙尘粒子的移动。1978年，Gillette^[37]曾经指出，用硬壳覆盖土壤表面、减少可被风吹起的颗粒物可以减少源区的沙尘释放。Tegen和Fung^[38]认为目前大气中多达50%的沙尘气溶胶是来自于扰动过的土壤表层，所以应当看作是人为起源的。但这种估计具有很大的不确定性。而且，

1) 青木 振大, 2003, 私人通信。

自然出现的气候模态也可以改变沙尘释放。例如，在厄尔尼诺年，从撒哈拉沙漠输送到巴巴多斯岛的沙尘增多^[39]，而输送到地中海和北大西洋的沙尘与北大西洋涛动有关^[40]。通过对沙尘暴纪录的分析，可以找出过去几十年沙尘暴发生次数增多或减少的地区^[41]。

如何合理、精确地区分沙尘暴发生的自然原因和人为因素是一个亟待研究的问题。

2.4 沙尘粒子的输送

沙尘在大气中的寿命决定于沙尘粒子的大小；由于重力作用，大粒子被很快从大气中移走，而亚微米大小的粒子则有长达几周的生命期。目前，国际上已经有大量从区域模式到全球模式的沙尘输送模式^[42~44]。

黄美元和王自发^[45]在比较国内外起沙机制模型的基础上，结合我国北方大量气象台站的有关起沙过程的观测资料，提出了一个适合我国北方地区用于黄沙长距离输送模拟与预报的起沙模型。模式中尽可能地考虑了微物理过程和粒子分谱。另外，在输送过程中还考虑沉降和降水清除过程的参数化，得到了令人鼓舞的结果。

但是，为了研究沙尘暴的气候和环境效应（特别是它对海洋环境的影响），我们不但需要知道沙尘粒子在输送过程中所发生的物理特性变化，还需要知道它们所发生的化学特性变化。研究工作已经表明，沙尘粒子在输送过程中，特别是在它们经过高污染的工业地区或大城市上空以及海洋上空时，有可能吸附某些污染物质及海盐粒子，使其物理和化学特性发生明显变化。例如，庄国顺等^[46]对我国北方2000年发生的沙尘暴的化学物质组成、来源及粒径分布等作了研究，他们发现：（1）沙尘暴中所增加的污染物主要来自于沙尘暴所经过地区的二次扬尘，以及二次形成的硫酸盐气溶胶、有机物气溶胶以及在其表面上发生的多相反应，包括对微量污染元素的表面吸附或液相络合；（2）沙尘暴气溶胶在其长距离输送过程中，既输送比普通气溶胶高达数十倍的微量污染元素，同时又输送比普通气溶胶高得多的Fe(II)，以及高出数十倍的尚未被还原的Fe(III)。显然，将一个描述这种变化的化学模块嵌入到输送模式中是完全必要的。

2.5 沙尘天气预测系统的建立

在沙尘（暴）数值模拟中，关键问题是起沙源的数值模拟，而沙尘源的范围、地表特征、起动的粒子通量以及粒子的尺度分布等都涉及到非常复杂的过程。国内对沙尘输送的模拟已有不少工作，而对沙尘源的模拟，尚不太多。且在沙源的处理上，一般也多采用参数化的方法，因而，难于满足实际应用的需要。赵琳娜^[34]采用了非参数化方案来模拟起沙过程，该方案既考虑起沙机制中宏观物理过程，又顾及其微物理机制的起沙模型，而不是经验的起沙模型。

Wang等^[47]采用天气类型、摩擦速度和土壤湿度三个控制因子设计了东亚地区起沙机制模型，通过分析蒙古和我国北部气象台站的观测资料，获得这些因子临界值，并以此为基础发展了沙尘数值预报模式。目前，此机制已经应用于我国台湾地区以及韩国、日本等国有关空气质量的模式中，估计沙尘的发生及产生的沙尘释放量。

为了比较合理、定量地进行起沙天气的数值预测，一个完整的沙尘天气预测系统应包括5个部分^[48]：天气模式、陆面模式、起沙模式、输送模式以及GIS数据集。目前建立的沙尘天气预测系统（图3）包括：GIS数据，起沙模式前处理，有限区域中尺

度模式（包含有陆面过程），起沙模式和输送模式。图 3 中虚线框内的天气模式、起沙模式和输送模式耦合在一起，同步进行积分。边界层模式（MRF）和陆面模式（OSU/Eta）分别提供摩擦速度、表层土壤湿度给起沙模式，起沙模式计算起沙率。起沙模式提供垂直沙通量给输送模式，输送模式还需要天气模式的水平风场、温度、垂直运动以及位势高度等变量的驱动，输送模式计算每个格点的瞬时平均沙尘浓度。在该沙尘天气预测系统完成后，完成了对 2002 年三次沙尘暴过程的起沙和输送试验研究^[48]，图 4 为采用该系统对 2002 年一次强沙尘天气过程的预测试验结果。利用模拟结果对起沙源地和机制进行了分析，表明影响我国东部的沙尘天气的沙源，除了蒙古国中东部外，我国境内的沙源则主要是内蒙古地区的沙地。该模式系统不仅对沙尘天气的起沙机制有较好复制能力，对于输送过程也有较好的模拟能力。

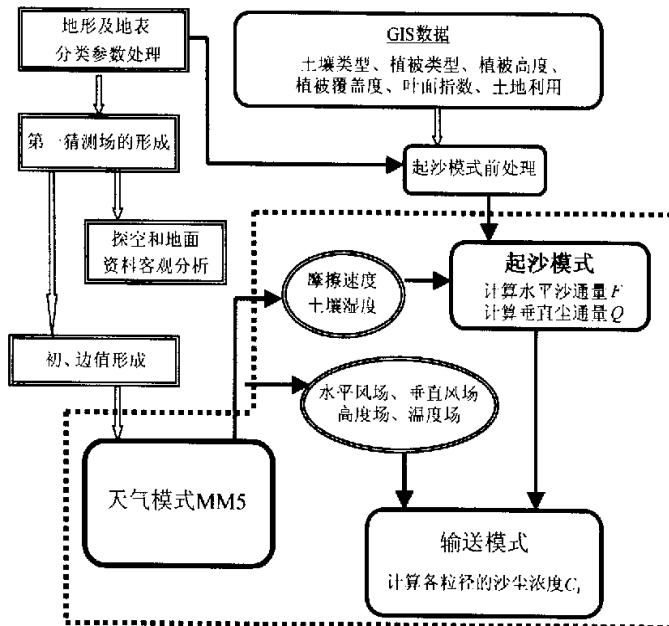


图 3 沙尘暴天气预测系统

3 沙尘粒子的气候效应

频繁发生的沙尘暴对人类生存的地球环境的第一个影响是其气候效应。实际上，当沙尘暴发生时，最初可能是沙漠地区的沙尘粒子首先注入大气；但在其随着大风的输送过程中，会有大量的并非沙漠地区的土壤尘埃粒子卷入其中。在下面的论述中，我们将不对土壤尘埃粒子或沙尘粒子进行区分，有时也通称它们为矿物气溶胶。它们是大气气溶胶含量和光学厚度的主要贡献者，特别是在亚热带和热带地区。研究工作表明，各种规模的沙尘暴虽然主要发生在春季，但在夏、秋及冬季也时有发生；其扩

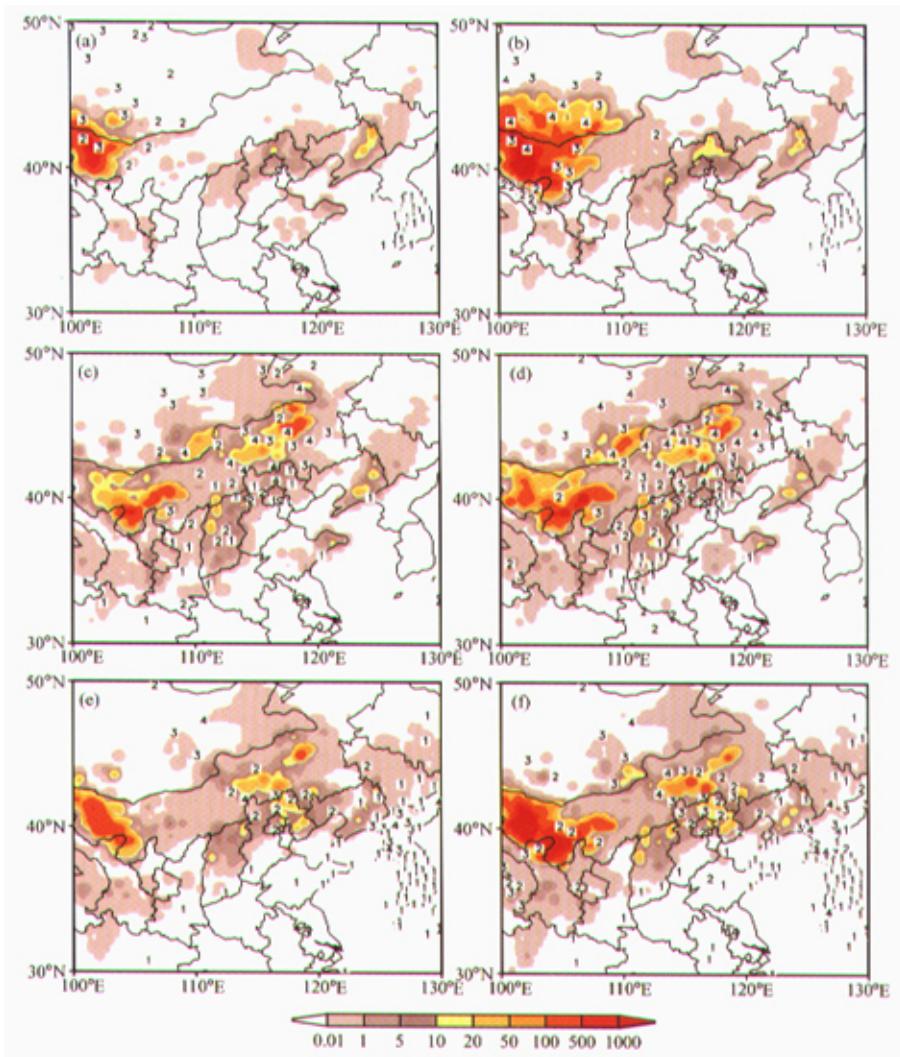


图4 2002年3月19~21日模拟的地面沙尘浓度(阴影, 单位: mg m^{-3})和地面观测天气现象
 (a) 19日11时; (b) 19日11时; (c) 20日11时; (d) 20日14时; (e) 21日11时; (f) 21日14时
 图中数字: 1: 浮尘; 2: 扬沙; 3: 沙尘暴; 4: 强沙尘暴

散和影响的范围也不限于中国以及东亚地区, 它还可以越过太平洋到达北美。这样一种时空规模的矿物气溶胶粒子, 必将对全球气候产生重大影响。它们通过对太阳短波辐射和地球长波辐射的散射和吸收, 可以产生重要的直接气候强迫。但是, 由于问题本身的复杂性, 目前有关沙尘气溶胶气候强迫的估计存在很大的不确定性。2001年出版的政府间气候变化委员会第三次科学评估报告(IPCC TAR)指出, 工业革命以来,

矿物（主要是沙尘）气溶胶产生的气候强迫在 $-0.6 \sim 0.4 \text{ W m}^{-2}$ 之间^[49]。换句话说，迄今为止，连这一强迫的正（使气候变暖）负（使气候变冷）号也没有确定。沙尘粒子还可以作为云凝结核（CCN）影响云的形成、云的辐射特性和降水，产生间接的气候效应。沙尘粒子所携带的营养物输送到海洋之后，将对海洋的初级生产力产生影响，并进而影响海洋碳循环，造成大气二氧化碳浓度的变化。这是沙尘气溶胶可能影响地球气候的第三种途径。最后，与沙尘暴有关的土地利用与土地覆盖的变化（LUCC）也将以间接方式影响地球气候。目前，对沙尘间接气候效应估计的不确定性更大。这些沙尘气候强迫的不确定性直接影响对过去气候变化成因的判定以及对未来气候变化的预测。

为了研究沙尘气溶胶的气候变化的辐射强迫，首先需要知道注入大气中的沙尘气溶胶含量。据估算，每年约有 $1.0 \sim 3.0 \text{ Gt}$ 的沙尘粒子注入大气^[50]（Duce 1995 年的估计更高达 $1.0 \sim 5.0 \text{ Gt a}^{-1}$ ^[51]），不确定性因子为 3~5，而且具有高度的时空可变性。就中国的情况而言，至今对我国北方过去 50 年来沙尘暴活动的变化情况（次数）仍然存在不同看法^[1, 52, 53]。例如，方宗义等^[54]给出的每 10 年发生的强和特强沙尘暴次数分别为 5、8、13、14、23 次，但据最新资料统计，上述数字分别变为 48、68、89、47、36 次^[1]。如果我们连强和特强沙尘暴发生的次数都无法得到一个科学的结论，那么，在每次沙尘暴的规模（注入大气中的沙尘量）及其影响范围方面，则更无法得到一种科学的估计。这就给研究沙尘气溶胶的气候变化的辐射强迫带来极大的困难。

为了估计沙尘气溶胶的辐射效应，我们还需要知道沙尘粒子的粒径、复折射指数，以及沙尘中的矿物成分是外部混合的还是一些聚合体。典型的沙尘粒子的体积中值半径的数量级是 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。由于沙尘粒子的单次散射反照率明显小于 1，而且由于太阳辐射和热辐射强迫的部分抵消，以及不同地理区域的正负强迫的抵消，所以沙尘粒子的总的辐射强迫的数值较小。然而，来自不同地区沙尘的复折射指数不同（见前），以及地面反照率的区域性差别，使得大气顶的沙尘强迫存在很大的不确定性^[50]。

4 沙尘粒子的环境、生态效应

沙尘暴所携带的沙尘粒子具有明显的环境、生态效应，中国北方的二氧化硫排放并不少于南方，但北方却少有酸雨发生。据信，这与碱性沙尘粒子的中和作用有关。Wang 等^[55]利用所发展的区域沙尘输送模式及酸雨数值首次量化了沙尘输送对于东亚酸雨分布的影响，结果表明沙尘及其土壤粒子的碱化（中和）作用可使得中国北方降水的 pH 值增加 $0.8 \sim 2.5$ ，韩国增加 $0.5 \sim 0.8$ ，日本增加 $0.2 \sim 0.5$ 。

另一方面，沉降的沙尘粒子会改变土壤的酸碱度及养分供给，对农作物及其他植物产生影响。沙尘暴最直接的环境效应是导致发生源地的地表风蚀、植被破坏；沙尘暴还造成下游地区严重的环境污染，导致空气质量下降，增加可吸入颗粒物的浓度，可能引起呼吸道及心血管等多种疾病，影响人类健康。另外，沙尘暴给交通运输、需要高洁净环境的高科技产业及其他经济部门带来的影响也是显而易见的。

但是，到目前为止，在所有这些方面，我们仍然缺乏全球性的定量评估研究。

1) 钱正安、蔡英、刘涛等，中国北方沙尘暴研究若干问题，2002（待发表）。

5 沙尘粒子对海洋环境的影响

很久以来,人们一致认为径流(入海河流)是海洋中各种营养物质的主要来源。但是,已有证据表明,中亚、蒙古和中国西、北部产生的沙尘,不但可以随着西风带输送、沉降在中国中部和东部(如上所述,黄土高原的形成就是一个最好的例证),而且可以沉降在渤海、黄海、东海等中国近海以及日本海和太平洋的广大海域。太平洋上空的海气交换研究项目(The Sea-Air Exchange, SEAREX)^[56]和大西洋上空的大气海洋化学实验(The Atmosphere-Ocean Chemistry Experiment, AEROCE)^[57],提供了两个大洋上空大气沙尘气溶胶的浓度、沉降速率及其时空分布的观测数据,试验发现:海洋中的许多元素,如Pb、Al、V、Mn、Zn以及某些碳氢化合物和某些有机合成化合物,经由大气远距离的输送是比河流入海更为重要的来源。这些尘埃携带了来自工业活动和土壤风化的风成铁、铝等微量元素,直接影响海洋生物的营养盐供应,为浮游植物的生长“施肥”,控制海洋的初级生产力。它不但影响渔业生产,而且增加海洋上空大气的二甲基硫和云量,影响海洋对人为CO₂的吸收,从而间接地对气候产生显著影响。

沙尘气溶胶粒子主要通过干、湿沉降输入大洋。一般而言,湿沉降的效率远高于干沉降,据估计,全球约80%的沙尘气溶胶系由湿沉降进入大洋。由于中、高纬度地区雨量较少,而低纬度赤道区域雨量虽高但大气中的气溶胶含量低,这就使得气溶胶在整个大洋沉降的空间分布比较均匀。一个值得注意的现象是,太平洋上的沙尘气溶胶浓度及雨量时间分布均具有极大的脉冲事件特性,沙尘气溶胶的年沉积量的很大部分常常是在很短的时间内由几个重大沙尘暴事件所完成¹⁾。数据表明,中途岛上年沙尘沉降量大约有一半发生于两星期内。由于取样是以一个星期为周期,若每天取样,那么在中途岛和太平洋其他岛屿上,则每年的沙尘粒子沉降高峰将只有2~4天。这就意味着,尽管大规模的亚洲沙尘暴每年只发生几次,每次持续的时间也只有几天,但它对太平洋的沙尘沉降总量以至全球海洋生态变化却有着至关重要的影响¹⁾。其中,特别重要的是Fe。为了研究铁限制的问题,世界上已经进行过几个大的加铁试验。

Uematsu等^[58]使用区域沙尘长距离输送模式估计了年时间尺度的亚洲大陆沙尘气溶胶向海洋地区的输送与沉降通量。他们发现,沙尘入海通量从沿海的 $21\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 递减到远海的 $0.8\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

但是,如前所述,目前我们对每年注入大气的沙尘粒子的估计存在很大的不确定性,在估计沉降到大洋中的沙尘粒子方面的不确定性可能更大。另外,对于沙尘粒子输送过程中所发生的物理、化学特性的变化,由于空中直接取样等观测手段的不足,有关的信息仍然是不完备的。对沙尘粒子沉降到表层海水中以后,所发生的物理、化学以及生物化学过程的研究,急需在不同的海域深入进行。因此,在能定量评估沙尘暴对海洋生态环境的影响之前,我们仍然有一段很长的路要走。

1) 庄国顺, 2003, 私人通讯。

6 结语

沙尘暴已经成为国际社会共同关心的环境问题。世人关心沙尘暴，反映了环境意识的提高。沙尘暴袭来时，黄沙遮天蔽日，人们首先想到的是它对空气质量的影响，可吸入颗粒物大幅度增加，从而影响人类健康；能见度的降低，则影响交通与人们的正常生活。

但是，在这些浅层面的影响背后，沙尘暴具有更广泛、更深刻的气候和环境效应。目前虽然对沙尘暴的形成机制、输送过程及其气候环境效应已经有了不少的研究，但仍有许多重要的问题有待解决。例如，形成沙尘暴的气象和下垫面条件究竟是什么？如何辨识全球气候变暖的大背景与人类活动在沙尘暴形成中所起的作用？沙尘暴在输送过程中，其物理和化学特性究竟将发生何种变化？沙尘气溶胶的直接气候效应特别是其间接气候效应究竟如何？卫星遥感无疑将在沙尘暴的研究中发挥重要作用，但如何更为定量化？亚洲沙尘与气候环境变化的相互作用是什么？沙尘暴的环境（特别是对海洋环境的影响）、生态效应及其对人类健康和社会、经济的影响是什么？如何全面评价沙尘暴的“罪”与“功”等等。

我国也正致力于发展新的沙尘天气预测系统。但是在有关的科学问题解决之前，要做出准确的预测是很困难的。例如，沙尘（暴）天气的发生主要取决于两个方面的因素：一是足够强劲持久的风力，一是地表丰富的松散干燥的沙尘。如前所述，前者取决于冷空气的活动，常常涉及锋生或气旋发生发展的过程，而后者多与地表特征、

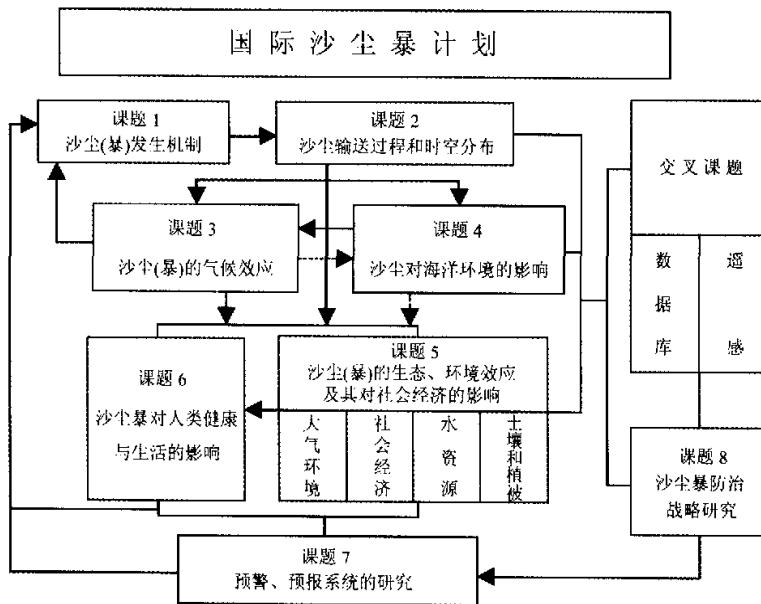


图 5 (中国科学院) 国际沙尘暴科学计划 (DUST) 示意图

前期降水等条件有关。因而仅有气象环境条件的了解是不够的,更重要的是要弄清沙尘(暴)的起沙机制。包括,在什么地区起沙?何时起沙?起沙量有多少?当然,目前要回答这些问题是很困难的。

至于沙尘暴的防治,则不仅是一个亟待解决的科学问题,它更涉及到社会、经济及政策决策等实际问题。

最近,中国科学院决定发起一个国际沙尘暴科学计划。2002年10月31日到11月2日在北京召开了国际沙尘暴研讨会,共有来自中国、日本、韩国、蒙古、俄罗斯、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦以及美国和法国等9个国家的60几名科学家参加。会议讨论并初步通过了国际沙尘暴科学计划(DUST),发表了北京宣言^[59],呼吁有关国家的政府和科学家进一步关心沙尘暴问题。该计划的重点放在沙尘暴的科学研究上,共分为8个课题:(1)沙尘暴发生机制的研究;(2)沙尘输送过程的研究,特别是输送过程中沙尘粒子所发生的物理、化学特性变化;(3)沙尘暴气候效应的研究;(4)沙尘气溶胶对海洋环境的影响;(5)沙尘气溶胶的生态-环境效应及其对社会-经济的影响;(6)沙尘暴对人类健康和生活的影响;(7)预警和预报系统的研究;(8)沙尘暴防治战略的研究。此外,还有两个交叉课题:(1)沙尘暴监测及源区生态环境评估的遥感研究;(2)沙尘暴数据库的建立。这些研究课题不是孤立的,它们之间将形成紧密的有机联系(图5)^[60]。我们期待这一计划能够实施,并取得预期成果。

致谢:本文参考了中国 SOLAS 计划建议书以及中国科学院国际沙尘暴科学计划书,在此一并向有关作者致谢。另外,丁守国、刘玉芝绘制了部分插图,王宏协助收集了沙尘粒子的复折射指数。

参 考 文 献

- 1 叶笃正、杜纪范、刘纪远等,关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策,地理学报,2000,55(5),513~521.
- 2 Hankin, E. H., On dust raising wind and descending currents, *J. India Met. Memoirs*, 1921, 22, Part VI.
- 3 Idso, S. B., R. S. Ingram, and J. M. Pritchard, An American Haboob, *Bull. AMS.*, 1972, 50, 930~935.
- 4 Joscp, P. V., D. K. Raipal, and S. N. Deka, "Andhi", the convective dust storms of Northwest India, *J. Mausam*, 1980, 31, 431~442.
- 5 Brazel, A. J., and W. C. Nickling, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, *J. Climatology*, 1986, 6(3), 255~275.
- 6 Jauregui E., The dust storm of Mexico City, *J. Climatology*, 1989, 9(2), 169~180.
- 7 Ott, S. T., and A. Ott, Analysis of a trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, 119(8), 1832~1850.
- 8 Shao, Y. P., M. Raupach, and D. Short, Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin, *Aust. J. Soil Res.*, 1994, 34, 309~342.
- 9 Shao, Y. P., and L. M. Leslie, Wind erosion prediction over the Australian continent, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D25), 30091~30105.
- 10 Marticorena, R., G. Bergametti et al., Modeling the atmospheric dust cycle, Part 2: Simulation of Saharan dust sources, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D4), 4387~4404.
- 11 孟昭华,中国灾荒史记,中国社会出版社,1999,980pp.
- 12 张德二,历史时期“雨土”现象剖析,科学通报,1982,27,294~297.
- 13 张德二,我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析,中国科学(B),1984,27,278~288.

- 14 石广玉, 中国——黄沙的大陆, 《黄砂》(日文, 合著), 日本名古屋大学水圈科学研究所编, 古今书院出版, 1991, 9~16.
- 15 周明煜、曲绍厚、宋锡铭等, 北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征, 环境科学学报, 1981, 1, 207~218.
- 16 曲绍厚等, 北京地区一次沙尘暴过程的来源, 环境科学学报, 1984, 4, 80~85.
- 17 石广玉、许黎、陈继平等, 北京地区1991年春夏之交的大气气溶胶光学特性测量, 第四届全国气溶胶学术会议论文集, 合肥, 1992, 33~37.
- 18 邱金桓、赵燕增、汪宏七, 激光探测沙暴过程中的气溶胶消光系数分布, 大气科学, 1984, 8 (2), 205~210.
- 19 邱金桓、孙金辉, 沙尘暴的光学遥感及分析, 大气科学, 1994, 18 (1), 1~10.
- 20 Qiu Jinhuan, and Yang Liquan, Lidar monitoring of Aerosol and Yellow sand in Beijing, *IEEE*, 1999, 37, 1056 ~1057.
- 21 张仁健、王明星、浦一芬, 2000年春季背景特大沙尘暴物理化学性的分析, 气候与环境研究, 2000, 5, 259~266.
- 22 方宗义等, 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果, 第四纪研究, 2001, 21, 48~55.
- 23 IWASAKA, Y., Shi Guangyu et al., Number concentration and size distribution of aerosols in the free atmosphere over the desert areas in the asian continent: Balloon-borne measurements in summer and fall, *Journal of Arid Land Studies*, 2002, 11, 347~353.
- 24 Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell et al., An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, ACE-Asia Special Issue A, 2003 (in press).
- 25 Mikami, M., O. Abe, M. Du et al., The impact of aeolian dust on climate: Sino-Japanese cooperative project ADEC, *Journal of Arid Land Studies*, 2002, 11, 211~222.
- 26 Strahler, A. N., and A. H. Strahler, *Modern Physical Geography*, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1987, 544 pp.
- 27 石广玉、张小曳、王黎明等, 国际沙尘暴研究计划科学计划书, 北京, 2002, 46pp.
- 28 Costa, M. J., Aerosol optical thickness determination and classification; use of Meteosat GOME and modeled data, Proceedings of " The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, EUMETSAT", 420~427.
- 29 Higurashi, A. et al., A study of global aerosol optical climatology with two-channel AVHRR remote sensing, *J. Climate*, 2000, 13, 2011~2027.
- 30 Kaufman, Y. J., Tanre, Didier et al., Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground based remote sensing, *geophysical research Letters*, 2001, 28, 1479.
- 31 Torres, O., P. K. Bhartia, J. R. Herman et al., A long term record of aerosol optical thickness from TOMS observations and comparison to AFRONET measurements, *J. Atmos. Sci.*, 2002, 59, 398~413.
- 32 Levin, Z., J. H. Joseph, and Y. Mekler, Properties of Sharav (Khamsin) dust — comparison of optical and direct sampling data, 1980, *J. Atmos. Sci.*, 1980, 37, 882~891.
- 33 Penner J. E., and S. Y. Zhang, Comparison of the TOMS AL and model results for biomass burning, AGU 2002 Fall Meeting, F191, 2002.
- 34 赵琳娜, 2002, 沙尘(暴)发生发展的机理及起沙机制的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1~170.
- 35 赵琳娜、孙建华、赵思雄, 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, 气候与环境研究, 2002, 7, 279~294.
- 36 周秀骥、徐祥德、颜鹏等, 2000年春季沙尘暴动力学特征, 中国科学 (D辑), 2002, 32, 327~334.
- 37 Gillette, D., Wind-tunnel simulation of erosion of soil; Effect of soil texture, sandblasting, wind speed and soil consolidation on dust production, *Atmos. Environ.*, 1978, 12, 1735~1743.
- 38 Tegen, I., and I. Fung, Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification, *J. Geophys. Res.*, 1995, 100, 18707~18726.

- 39 Prospero, J. M. , and R. T. Nees, Impact of the North African drought and El Nino on mineral dust in the Barbados trade winds, *Nature*, 1986, **320**, 735~738.
- 40 Moulin, C. , C. E. Lambert, F. Dulac et al. , Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic oscillation, *Nature*, 1997, **387**, 691~694.
- 41 Goudie, A. S. , and N. J. Middleton, The changing frequency of dust storms through time, *Climate Change*, 1992, **20**, 197~225.
- 42 Marticorena, B. , G. Bergametti, B. Aumont et al. , Modeling the atmospheric dust cycle, 2. Simulation of Saharan dust sources, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 4387~4404.
- 43 Miller, R. L. , and I. Tegen, Climate response to soil dust aerosols, *J. Climate*, 1998, **11**, 3247~3267.
- 44 Tegen, I. , and R. Miller, A general circulation model study of the inter-annual variability of soil dust aerosol, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 25975~25995.
- 45 黄美元、王自发, 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计, 大气科学, 1998, **22**, 625~637.
- 46 庄国顺、郭敬华、袁慧等, 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, 科学通报, 2001, **46** (3), 191~197.
- 47 Wang Z. , H. Ueda, and M. Huang, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D22), 26947~26960.
- 48 孙建华、赵琳娜、赵思雄, 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验, 气候与环境研究, 2003, **8** (2), 125~143.
- 49 Ra Amaswamy, V. , O. Boucher, J. Haigh et al. , Radiative forcing of climate change, in IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T. , et al. , (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- 50 Penner, J. E. , M. Andreae, H. Annegarn et al. , Aerosols, their Direct and Indirect Effects, in IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T. , et al. , (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- 51 Duce, R. , Distributions and fluxes of mineral aerosol, In *Aerosol Forcing of Climate*, R. J. Charlson and J. Heintzenberg (eds.), John Wiley, Chichester, UK, 1995, 43~72.
- 52 王涛, 走向世界的中国沙漠化防治与实践, 中国沙漠, 2001, **21** (1), 1~3.
- 53 钱正安、贺麟霞、瞿章等, 我国西北地区沙尘暴的分级标准、个例谱及其统计特征, 中国沙尘暴研究, 方宗义等编, 北京: 气象出版社, 1997, 1~10.
- 54 方宗义、朱福康、江吉甫等, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 158pp.
- 55 Wang, Z. , H. Akimoto, and I. Uno, Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: observations and model results, *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (10, 1029/2001JD001040).
- 56 Prospero, J. M. et al. , Mineral aerosol transport to the Pacific Ocean, p188-218, In J. P. Riley et al. (eds.), *Chemical Oceanography*, Academic Press, 1989, 10.
- 57 Arimoto, R. et al. , Trace elements in aerosol particles from Bermuda and Barbados: concentrations, sources and relationships to aerosol sulfate, *J. Atmos. Chem.*, 1992, **14**, 439~457.
- 58 Uematsu, M. , Z. Wang, and I. Uno, Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurements and a regional chemical transport model, *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (6), 1312 (10, 1029/2002GL016645).
- 59 Cyranoski, D. , China plans clean sweep on dust storms, *Nature*, 2003, **421**, 9 Jan. 2003, P101.
- 60 International Dust Storm Program (DUST), Chinese Academy of Sciences, October 2002, Beijing China, 1~46.

Several Scientific Issues of Studies on the Dust Storms

Shi Guangyu, and Zhao Sixiong

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract During the recent years much more dust storm events occurred in Northern China. This has aroused general concern. In fact, dust storms do not only have effects on the air quality, traffic etc., and cause soil erosion and damages of human being and domestic animals, but as a special species of atmospheric aerosols dust (or soil) particles also have significant climate and environment effects. This paper will briefly review the studies on the dust storms and some scientific issues which need to be investigated will be emphasized.

Key words: dust storm; dust aerosols; climate effect; environment effect