

东亚沙尘暴研究进展及问题

庞华基^{1,2} 盛立芳¹ 丁锋² 邱明燕³

(1. 中国海洋大学, 青岛, 266003; 2. 青岛市气象局, 青岛, 266003; 3. 安徽省气象局, 合肥, 230061)

摘要

文中简要概括了东亚沙尘暴数值模拟研究的最新进展, 从沙尘暴源地、产生沙尘暴的天气过程和起沙过程三个方面指出了应该注意的一些关键问题。沙尘暴产生具有很强的地域性, 在沙尘的长距离输运研究中, 应注意有效起沙面积的选取和特殊天气过程的模拟, 特别是涉及到塔克拉玛干沙漠地区的研究。今后的研究应重视对沙尘暴具有触发和加强作用的中小尺度天气过程, 加强实验观测, 建立适合东亚地表特征的起沙模式和沙尘输运模式; 加强沙尘暴数值模拟与诊断分析的结合, 建立中国沙尘暴的预警系统。

关键词 东亚沙尘暴 起沙 沙尘源地 天气过程

引言

沙尘暴是指强风把地面大量沙尘卷入空中, 使空气特别浑浊, 水平能见度小于 1km 的天气现象, 它是干旱和荒漠区特有的灾害性天气, 在中亚、北非、美国西南部、澳大利亚等地时有发生。我国已发生荒漠化的面积达 262.2 万平方公里, 占陆地国土面积的 27.3%, 仅西北五省和内蒙古自治区荒漠化面积就占全国荒漠化面积的 80%左右。在冬、春季与冷锋相伴强冷空气侵袭下, 冷锋前方附近的干对流云线、干飑线、云团等强对流中尺度系统很容易激发(强)沙尘暴天气。近年来, 我国北方地区沙尘暴灾害呈现出影响范围加大, 危害程度增强的趋势, 50-60 年代我国西北地区的沙尘暴只出现 5-8 次, 90 年代以后发展到每年一次以上^[1]。沙尘不仅影响到我国东南沿海地区, 而且越过太平洋影响到美国西海岸地区。因此东亚沙尘暴作为一种严重的气象灾害和生态环境问题, 不仅引起我国政府和社会各界的重视, 也引起国际范围的广泛关注。

国际上针对沙尘暴的研究早在 20 世纪 30 年代就开始了, 大多数研究集中在美国中南部、撒哈拉沙漠和澳大利亚, 内容包括沙尘暴形成、分布、监测和沙尘的远距离输运等。东亚沙尘暴与世界上其他地区有很大的不同, 表现在: 沙源地海拔高度较高, 起沙的风速阈值偏大, 出现的季节不同等。因此在缺乏实验资料的情况下, 国际上针对东亚沙尘暴的研究不是很多。国内学者在沙尘暴的时空分布、天气成因分析、卫星遥感监测、数值模拟研究等方面做了大量工作, 但是由于不确定性因素很多, 目前还没有一个数值模式能同时对所有关键参数进行正确描述, 包括源的位置、沙尘释放强度、气溶胶粒径谱、粒子成分等等。本文将简要总结东亚沙尘暴数值模拟研究的进展情况, 从

源地、天气过程、沙尘释放等三个方面入手,指出研究中存在的一些问题,希望对今后的研究有所帮助。

1 沙尘暴数值模拟研究进展

1997年东亚沙尘暴地面监测网投入使用后,对沙尘暴的跨界连续地面监测成为可能,也使国际上对东亚沙尘暴的研究活跃起来,研究的典型过程是1998年4月的沙尘暴过程。这次沙尘暴不仅使中国东部大部分地区受到影响,而且在随后的几天里,大量浮尘通过高层气流输送到美国西海岸地区。Uno等用即时耦合的粉尘模式和区域尺度气象模式(RAMS)模拟了切断涡旋对沙尘暴的诱发作用以及涡旋后部强烈下沉运动对沙尘传输的影响,模拟表明沙尘的长距离输运发生在3km以内的高度层中^[2]。Liu等把美国海军的业务化中尺度气象模式(COAMPS)与粉尘释放模式即时耦合研究了不同模式分辨率对地面风速、摩擦速度和粉尘产生量的影响,表明模式分辨率低时,预报的地面风速和摩擦速度过高,从而由摩擦速度计算出的沙尘通量过大。模式取80km分辨率网格时,计算的粉尘量比20km网格高80%^[3]。在沙尘释放的模拟研究方面,以Wang等提出的东亚风蚀模式为代表,它同时考虑了摩擦速度、地面湿度和主要天气系统气象因素对粉尘释放强度的影响,并结合长距离输运模式模拟了沙尘粒子的输送过程。研究发现,在粒子传输过程中,其浓度的垂直分布与粒子大小有关,细粒子浓度出现两个大值中心,一个靠近地面,另一个在对流层中层(1.5-3.5km之间)^[4]。Lin采用Wang的风蚀模式,用MM5气象模式提供的动力场模拟了沙尘长距离输运对台湾的影响,指出沙尘最大浓度层出现在高度500~1500m之间^[5]。激光雷达和光度计综合探测结果表明,沙尘远距离输送的垂直结构密切依赖于风场的垂直结构。例如,1988年4月的一次沙尘暴过程中,沙尘粒子有3个不同的输送带,其中两个输送带的高度处于2000-3000m和3000-6000m,另一个输送带的下边界高度约为200m^[6];1992年4月的沙尘暴过程中,沙尘气溶胶通过对流层下层和上层两层向下游输送。低层沙尘随冷锋移动,移速较慢;高层主要通过西风气流输送,速度较快^[7]。

过去几年我国利用PSU/NCAR中尺度数值模式MM4,发展了沙尘暴传输扩散模式。例如纪飞等模拟了副冷锋影响下沙尘的传输,并选用大小两个尺度段粒子模拟了不同大小粒子的传输特征^[8];刘春涛等模拟了1993年“55黑风暴”过程^[9]。MM4的更新版本MM5采用了非静力假定,考虑的物理过程更加全面,适合于复杂地形、强对流系统等研究,在我国业务和科研单位被广泛应用,基于MM5的沙尘暴研究正在起步。孙军等建立了一个沙尘暴产生的天气学概念模型,用MM5提供的摩擦速度和大气边界层稳定度状况来预测沙尘暴的发展过程^[10]。李令军等利用GMS卫星资料、地面气象观测资料、中尺度数值模式MM5输出资料等对2000年4月形成沙尘暴的3次东北气旋过程进行了研究^[11]。赵琳娜等利用高精度的GIS资料提供的陆面信息,将具有清晰物理概念的新南威尔

士大学的起沙数值模式与 MM5 及陆面过程模式耦合,对 2002 年 4 月 6 日华北和北京地区的沙尘(暴)天气过程起沙率的空间分布和时间演化进行模拟^[12]。然而到目前为止,我国还没有建立基于 MM5 的沙尘运输模式或我国自己的模式。

2 数值模拟研究中存在的几个问题

2.1 沙尘暴源地

对源地的确认是数值模拟的关键,但是通常很难获取详细的源地资料。在东亚沙尘长距离运输研究中,有的取塔克拉玛干沙漠和戈壁为源区^[2, 13],有的将中国的黄土高原作为源区^[3]。长期的天气观测表明,我国的沙尘暴主要集中在两大区域,一个位于南疆的塔克拉玛干沙漠,另一个是从巴丹吉林沙漠东部到甘肃河西走廊、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙地和毛乌素沙地,这也是西北地区涉及范围最大的沙尘暴多发区^[14]。结合风蚀气候指数和地表物质特征可以将沙尘暴多发区划分为五大中心,即塔里木盆地、阿拉善高原、鄂尔多斯高原、内蒙古高原东南部和华北平原北部^[15]。沙尘暴的形成和移动主要取决于气象、地形和地面条件等,它的发生源地和传输路线并非每次都一样,所以在区域模式研究中,受分辨率的限制,将输送沙尘的源地范围扩大,对正确估计沙尘的输送量是不利的。元素示踪系统给出的结果表明黄土高原是粉尘的最大沉降地^[16],长期的气候统计资料也没有给出此处沙尘暴多发的证据。塔克拉玛干沙漠虽然是我国第一大沙漠,也是沙尘暴多发区,但是观测表明这里的沙尘暴多为局地性爆发,在沙漠中央的爆发频率大于沙漠边缘。因此,在沙尘运输研究中如何计算塔克拉玛干沙漠的有效起沙面积值得进一步讨论。对长距离输送,应重点注意河西走廊及其以北的地区。这里不仅是沙尘暴多发区,而且经常是各路冷空气必经之地。

在区域模式计算中通常将沙尘源地简化为沙漠或戈壁,没有考虑不同类型土壤的侵蚀度。针对东亚地区设计的起沙模式中,细粒子含量估计偏高^[4, 5]。沙尘暴发生区的地形、地表比较复杂,土壤成分也多样化。塔克拉玛干沙漠是以沙地为主,而在其他沙尘暴多发区却是戈壁、沙漠、草地等共存。戈壁区土壤为灰棕漠土,其次是棕钙土、灰漠土。灰棕漠土母质以粗骨质沙砾石为主,1-0.1mm 的粒子占比例较大,植被覆盖不足 5%。棕钙土属温带草原向荒漠的过渡类型,0.05-0.01mm 的粒子占最大比例。灰漠土成土母质多为黄土状物质,以粉砂为主,0.05-0.01mm 粒子居多,植被覆盖在 10-20%^[17]。下垫面的湿度状况对于能否起沙非常重要,东亚起沙模式中采用临界相对湿度为 40%^[4, 5, 18],而我国北方灰棕漠土、风沙土和灰漠土在 0-50cm 范围内的含水量一般低于 5%,40% 的临界值对于我国北方大多数干旱区应该是偏高的。

2.2 天气过程

春季东亚天气特点是高、低压天气系统的周期性交替,如果地表干燥,在低压系统和冷锋后部经常有大量沙尘被卷入空中,形成沙尘暴天气。观测表明,我国西北和内蒙的沙尘暴多由冷锋东移

所引起,冷空气入侵路径大概可分为西路、西北路和北路。因此在东亚沙尘长距离运输的数值模拟中把冷锋天气作为沙尘暴天气出现的重要因子和沙尘运输的基本途径。但是塔克拉玛干沙漠的沙尘暴有其特殊性,它多由偏东大风引起,在沙漠中部局地性爆发,且主要通过高纬西风气流输送到太平洋北部^[19]。这与当地的地形和影响我国的天气形势有关,影响新疆的冷空气多由阿拉山口或阿勒泰的额尔齐斯河谷方向入境,受天山的阻挡在北疆堆积,随后翻越天山或由天山山脉东部进入南疆。因此塔克拉玛干沙漠的沙尘暴多由东风引起,受四周高山的阻挡,沙尘暴或在源地徘徊,或被卷入5000m以上的高向北或西北移动,在50°N由西风急流输送到北太平洋地区。所以如果在我国的其他地区可以根据气候资料,选取温度、湿度、大风等因子组成沙尘暴爆发的判别因子,在塔克拉玛干地区不一定适用。

中小尺度天气过程虽然不是沙尘暴天气的直接影响系统,但是它对沙尘暴的触发和加强起着重要作用。中尺度对流系统多表现为冷锋前方附近的干对流云线、干飑线、云团等,这些在卫星云图上均有清晰的反应。在云图上表现为冷锋云带前部的中小尺度对流单体群,在冷锋云带向东南推进的过程中,不断与冷锋相遇合并,为冷锋的发展提供热力不稳定能量。例如1993年5月5日的黑风暴过程是由于冷锋南端中尺度对流云团组织在一起形成干飑线,当飑线移到高地表温度区时,由于局地大气处于绝热不稳定而得到发展并进而触发黑风^[20]。中小尺度系统强度受高低空急流相互配置形势影响很大,高低空急流配置不同,中小尺度系统强度不同,沙尘暴强度也不同^[21]。沙尘暴多发生在高空急流出口区的正涡度区与低空急流大风核左前方相叠加的部位。

观测发现:沙尘云墙还在千米以外时,就能听到云墙内小石子和粗沙粒的滚动,以及空气中间和沙尘空气间摩擦发出的可怕轰隆声^[22],在银川上空还发现了 $350\mu\text{m}$ 的沙尘粒子。这表明需要很强的湍流和上升运动才能将大量沙尘扬起,并将大沙粒吹向高空,因此有必要研究清楚沙尘源区湍流运动特点和锋区附近垂直环流特点。国外研究早就表明,在非大尺度盛行风方向沙尘的输送和抬升强度除了依赖于沙尘暴发生的强度、天气类型,各类因子强迫产生的次级环流有重要的作用。而在次级环流的产生和变化中,沙尘辐射引起的正负反馈机制非常重要。沙尘气溶胶与太阳辐射之间的关系非常复杂,粉尘粒子既影响长波辐射又影响短波辐射。在能谱的可见光部分,沙尘气溶胶反射太阳辐射,造成降温效应;在红外部分,沙尘气溶胶吸收太阳辐射,引起地球增温。1993年“5.5黑风暴”期间的辐射观测资料反映出,黑风暴过境时,入射短波辐射和地表长波辐射迅速下降,而入射长波辐射增加,由此造成了冷锋前后辐射温度的差异,加大了冷锋前后的温度梯度^[19]。所以沙尘的辐射效应影响了大气温度廓线,从而影响到大气的动力结构,对局地锋生和次级环流的发展具有重要作用。数值实验也初步揭示了沙尘辐射强迫作用对大气层结的影响^[23, 24]。因此就沙尘输运动力学研究而言,对沙尘气溶胶辐射加热率的研究起着决定性作用。但是国内针对沙尘气溶胶辐射

作用的研究还很薄弱，日前在沙尘暴的数值模拟研究中几乎没有考虑沙尘对辐射的影响。

2.3 起沙过程研究

起沙过程是沙尘暴研究的关键问题，也是一个困难问题。因为起沙过程是非常复杂的物理过程，涉及因素多，地表植被、土壤的干燥度、密实程度、地表风应力等都是需要考虑的因子。起沙风弱时，沙物质在低层被输送，沙通量随高度里指数递减，起沙风强，沙物质向上跃迁，风沙活动的高度范围增大，沙通量随高度呈幂函数递减。但是真正有意义的起沙参数不是风速本身，而是起沙风地与局地风速之差，或临界起沙速度，即土壤表面粒子能被抬升到空中的最小风速。

2.3.1 临界起沙速度

风沙运动最早的理论研究以 Bagnold (1941) 创立的风沙物理学为标志，在不考虑土壤粒子间的粘性力时，由粒子所受的重力和风应力平衡得到了临界摩擦速度与粒径的关系。较为完善的起沙模式由 Marticorena 和 Bergametti 于 1995 年首先提出^[25]（以下简称 MB 模式），它在临界起沙速度（取临界摩擦速度）中考虑了粒径和粗糙度的影响。最近 Lu 等研制出了适用于澳洲的更为完善的风蚀模拟系统^[26]，其中考虑了土壤粒子粒径分布、土壤结皮、湿度等因素对摩擦速度阈值的影响。

目前我国对临界摩擦速度采取两种处理方法，一是参考国外的实验结果取为常数，有的取 $0.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[27]，有的取 $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[28]。二是将地表状况划分为几类分别选制相应的临界风速^[8, 16]，例如纪飞等取沙漠地区临界起沙风速为 $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，戈壁、荒原区取为 $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[6]。

2.3.2 起沙通量

粒子的运动状态与大小有关，沙漠中的细粉砂 ($<60\mu\text{m}$) 可以在湍流的作用下发生悬浮运动， $60\sim 2000\mu\text{m}$ 的土壤颗粒能在几十个厘米的高度内跳跃式向前运动，而 $2000\mu\text{m}$ 以上的大颗粒只能蠕移^[25]。大量事实表明，绝大部分风沙以近地面（通常小于 30cm ）跃移运动方式为主。大片沙地上跃移沙通量与风应力的关系已从实验和理论上有了很好的描述，但在有限沙源区和复杂地表（例如戈壁）条件下不适用，因为地表覆盖物不仅消耗部分风能，而且通过改变空气动力粗糙度来影响沙尘释放。MB 模式中考虑了粗糙度对水平输沙量的影响，然后再根据水平沙通量来计算对垂直起沙通量（跃移沙层中的细粒子在单位时间内通过水平单位面积的量）^[25]。在 Lu 的模式中也采用了类似方法计算沙通量，即由摩擦速度等参数计算水平沙通量，再以此计算垂直沙通量^[26]。通常采取两种方法计算起沙通量，一是与摩擦速度的 4 次方成正比，二是与表面风速的 3 次方成正比。Liu 对两种参数公式做了对比研究，认为用临界摩擦速度的效果好些^[3]。前面已提到除了塔克拉玛干沙漠面积较大外，我国其他地区的沙漠或沙地与戈壁、荒漠、草原等交互分布，要确定这样复杂地区的起沙量公式需要大量的实验资料，目前国内学者普遍采用的是起沙通量与地表摩擦速度的 4 次方

成正比^[8, 9, 27]。

总之,国内学者基本上是参照国外的简单模式处理起沙过程,在对起沙参数的设计方面较少考虑粒子大小、密度等。由于起沙模式是针对不同地区的地表状况和土壤侵蚀度情况设计的,只有局地代表性,所以要设计适合东亚的起沙模式而要继续开展地表物质可蚀性野外调查和风洞模拟等工作。

3 结语

我国对东亚沙尘暴的研究做了大量的卓有成效的工作,但还存在许多需要深入研究的问题,与国际上先进的国家相比存在一定的差距,主要表现在:①在沙尘暴数值模拟研究方面还存在不足,目前大多只是简单的拿来国外的现成的模式,最多只做一些简单的改动,应加强适合我国特点模式的开发研制和对国外模式的深加工。②在沙尘暴源地的调查方面做了很多工作,但由于我国沙尘源地有多处,缺乏足够的野外观测资料和风洞实验结果,对不同源地沙尘暴的起沙过程地缺乏了解。③对触发和加强沙尘暴过程的中小尺度强对流天气的研究还不多,对沙尘暴的触发机制没有完全清楚。④对大气气溶胶辐射的研究较多,而对沙尘的辐射研究却甚少。⑤数值模拟与诊断分析的结合较少,应加强数值模拟成果的业务化转化,最终建立起适合我国特点的沙尘暴预测预报系统。

可喜的是从2002年起我国沙尘暴业务化监测系统正式启动,多技术手段、立体、实时监测将为沙尘暴研究提供相关的各类气象观测数据如大气环境观测资料、雷达资料、卫星遥感监测资料等,将大大促进沙尘暴研究的进展,相信不久的将来沙尘暴的研究会有突破性进展。

参考文献

(References);

- [1] 王涛, 陈广庭, 钱正安等. 中国北方沙尘暴现状及对策. 中国科学院院刊, 2001, 5 期, 343~348.
- [2] Uno I., H. Amoo, s. Emori. Trans-pacific yellow sand transport observed in April 1998; A numerical simulation. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D16): 18331~18344.
- [3] Liu M. and D. L. Westphal. A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D16): 18099~18112.
- [4] 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): 26947~26959.
- [5] Lin Ta-Hsiung. Long-range transport of yellow sand to Taiwan in Spring 2000: observed evidence and simulation. Atmospheric Environment. 2001, 35: 5873-5882.
- [6] 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.
- [7] 刘毅, 周明煜. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究. 大气科学, 1998, 22 (6): 905~912.
- [8] 纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟: (1) 模式建立. 北京大学学报 (自科版), 1996, 32 (3): 384~392.
- [9] 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. 气象学报, 1997, 55 (8): 728-739.
- [10] 孙军, 李泽梅. 西北地区沙尘暴预报方法的初步研究. 气象, 2001, 27 (1): 19-24.
- [11] 李令军, 高庆生等. 2000 年北京沙尘暴源地解析. 环境科学研究, 2001, 14 (2): 0001-0003.
- [12] 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 (3): 279~294.
- [13] Murayama T., N. Sugimoto, I. Uno. Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D16): 18345~18359.
- [14] 王式功, 杨德保, 金炯等. 我国西北地区黑风暴的成因和对策. 中国沙漠, 1995, 15 (1): 19~30.
- [15] 董治宝. 风沙物理学: 研究风沙释放与控制的基础. 科学对社会的影响, 2000 (4): 42~44.
- [16] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. 第四纪研究, 2001, 21 (1): 29~40.
- [17] 王根绪, 程国栋. 西北干旱区土壤的生态特征与变化. 干旱区资源与环境, 1999, 13 (3): 14~22.
- [18] 黄美元, 王自发. 东亚地区沙尘长距离输送模式设计. 大气科学, 1998; 22 (4): 625~637.
- [19] Sun J., M. Zhang and T. Liu. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions,

1960-1999: Relations to source area and climate. 2001, 106 (D16): 10325~10333.

[20] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 1997, 21 (5): 581~589.

[21] 王宝鉴, 蔡玉琴, 黄玉霞. 2000年4月12日黑风与1993年5月5日黑风的对比分析. 甘肃气象, 2001 (2): 36~39.

[22] 林之光. 沙尘暴和黑风. 地理教学, 2000, (10): 1~4.

[23] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟. 气象学报, 1993, 51 (3): 283~295.

[24] 段建军, 郑用升. 对大气气溶胶的辐射效应的数值试验. 北京大学学报: 自然版, 2000, 36 (1). 95~101.

[25] Marticorena B. and G., Bergametti. Modeling the atmospheric dust cycle. Design for a soil-derived dust emission scheme. J. Geophys. Res., 1995, 100, 16415~16430.

[26] LU H. and y. shao. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. Environmental modeling & Software, 2001, 16: 233~249.

[27] 刘毅, 张华, 周明煜. 一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟. 南京气象学院学报, 1997, 20 (4): 511~517.

The Latest Study and Question of East Asian Dust Storms

Pang Huaji^{1,2} Sheng Lifang¹ Ding Feng² Qiu Mingyan³

1. Ocean University of China

2. Qingdao Meteorological Bureau

3. Anhui Meteorological Bureau

联系人: 庞华基

地址: 山东省青岛市气象局

邮编: 266003

电话: 0532-82793515, 13964288912

e-mail: ph1970@sina.com