

文章编号: 1000-694X(2007)05-0851-08

内蒙古中西部沙源地影响沙尘暴 扩展过程的数值模拟研究

李彭俊^{1,2}, 姜学恭², 程从兰³

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏南京 210044; 2. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古呼和浩特, 010051; 3. 北京城市气象研究所, 北京 100875)

摘要: 通过对 2002 年 3 月 18—22 日沙尘暴过程进行的数值模拟及针对内蒙古中西部沙尘源地影响的敏感性试验研究, 结果表明, 内蒙古中西部荒漠化草原生态的迅速恶化是 2001 年前后沙尘天气的频繁发生的主要原因之一。由于沙源地海拔高度的不同和风速随高度的变化, 在沙尘远距离输送过程中可能出现两个不同高度而相互孤立的优势沙尘输送带, 分别位于对流层和地面附近。其传输距离、传输速度、影响地区、影响时间存在巨大差异。内蒙古中西部沙源地的起沙主要通过地面附近的沙尘输送带向东、向南传输。其通过对流层的传输随沙尘区的不断扩展而越来越弱, 进而被其他更高海拔高度的沙源地起沙所取代。

关键词: 沙尘暴; 沙源地; 沙尘传输; 数值模拟

中图分类号: P445.4

文献标识码: A

沙尘暴是一种发生在干旱、半干旱地区的剧烈的灾害性天气。沙尘暴对工农业生产、交通运输、人民生活和身体健康等方面具有重大的危害, 同时, 沙尘暴也通过影响地气系统的辐射平衡影响气候变化。近些年, 由于沙尘暴的发生出现增多的趋势, 吸引人们更加关注沙尘暴, 而研究者也对沙尘暴的形成及其影响进行了深入和广泛的研究。

人们对沙尘暴的研究一方面着眼于沙尘暴不同于其他天气现象的物质基础—沙尘气溶胶的物理化学特征、光学特征及其在沙尘暴过程中的强度演变特征等^[1—5]。另外, 沙尘暴是一种联系岩石圈、大气圈、生物圈层的复杂动力过程, 其形成机制较为复杂, 在理论上有关沙尘暴形成的一些关键问题还没有被完全揭示, 因此, 一些研究者更着眼于导致沙尘暴形成的一些动力学原因研究沙尘暴发生的物理本质^[6—10]。而沙尘暴的发生需要三个基本的条件, 即沙源、地面大风、层结条件。其中, 沙源因素是形成沙尘暴的物质条件。内蒙古地区中西部沙漠和荒漠化地区是我国沙尘暴的一个重要的沙源地。特别是近些年一些地区片面追求经济发展, 忽视环境和生态保护, 使得内蒙古地区生态恶化趋势长期得不到有效控制。这可能也是近些年沙尘暴肆虐的部分原因。尽管人们对内蒙古中西部下垫面对沙尘暴的影响问题进行了一些研究, 但利用数值模拟方法研究

对我国沙尘暴的影响问题目前还不多见。因此, 针对 2002 年 3 月 18—20 日影响我国北方大部分地区的强沙尘暴过程进行了数值模拟和敏感性试验研究, 探讨内蒙古中西部荒漠化地表对我国沙尘暴过程的影响程度。

1 植被状况及其演变

内蒙古中西部地表特征主要有两种类型, 其一为沙漠。在内蒙古中西部分布着巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地等多个沙漠或沙地(图 1)。另外, 除了沙漠和沙地之外, 还分布着广阔的荒漠化草原, 一些研究表明, 这些地区同样具有非常大的供尘能力^[6]。内蒙古中部的中温型荒漠化草原东起苏尼特(属于锡林郭勒), 西至乌拉特(属于巴彦淖尔), 北部与蒙古国的荒漠草原相接, 南至阴山北麓, 隔山为鄂尔多斯高原的暖温型荒漠化草原。荒漠草原的年均降水量 150~200 mm, 季节和日温差大, 全年多风^[11]。荒漠草原的植物种类贫乏, 多为针茅、冷蒿等, 生产力仅为典型草原的 40%~50%, 草群高度约 15 cm, 平均覆盖度 15%。近些年, 由于超载过牧、滥垦乱挖以及气候原因, 荒漠化草原出现大面积的退化和沙化(荒漠化草原的总面积 $2.3179 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 退化面积 $1.9256 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占 82%, 1999 年统计)^[12], 这也是荒漠化草原巨大

收稿日期: 2006-09-06; 改回日期: 2006-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40565003); 中国气象局气候变化专项(CCSF2006-17); 内蒙古科技厅项目(20020703)资助

作者简介: 李彭俊(1959—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 在读博士, 高级工程师, 主要从事大气科学及区域自然灾害研究。

万方数据

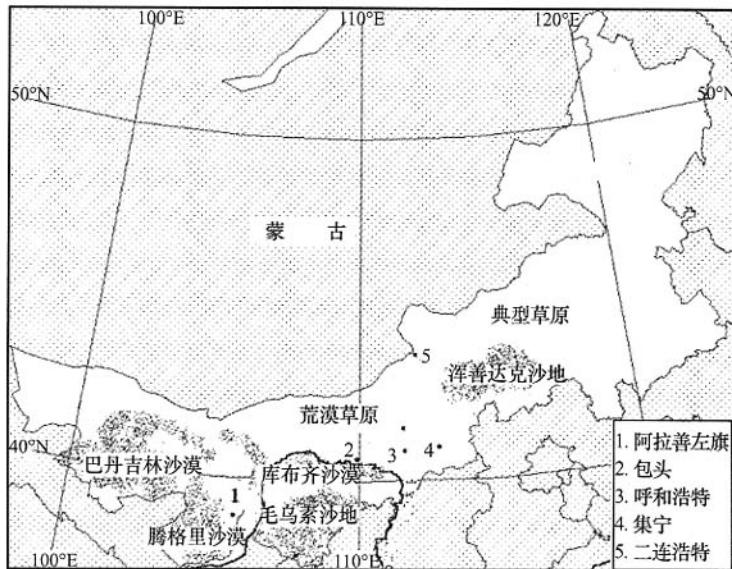


图 1 内蒙古中西部地表类型分布

Fig. 1 The surface types in central and west of Inner Mongolia

供尘能力的一个形成原因。表 1 为内蒙古荒漠化草原退化面积及生产力衰减情况(表 1 中部分数据引自文献[7])。可以看出,荒漠化草原Ⅱ度退化最为显著,退化导致植株高度下降、植物盖度降低、轻质土壤侵蚀加剧等。这也反映了一个趋势,即当荒漠草原变为完全的戈壁沙漠后,其供尘能力反而是减小的。这与一些研究的观点是一致的^[6]。

表 1 内蒙古荒漠化草原退化面积及生产力衰减情况

Tab. 1 Status of grassland degradation and productivity decrease in Inner Mongolia

项目	I 度退化 (轻度)	II 度退化 (中度)	III 度退化 (重度)
面积/(万 hm ²)	495.2	849.8	580.6
占总面积/%	25.1	44.1	30.8
株丛高度下降率/%	20~30	31~50	51~70
植物群落盖度下降率/%	20~30	31~45	46~60
轻质土壤侵蚀程度/%	10~20	21~30	31~40
中、重质土壤容重、硬度增高/%	5~10	11~15	16~20
可恢复年限/a	2~5	5~10	10~15

上面分析仅仅是从供尘能力这一角度来讲。地表特征对沙尘暴的影响不光体现在为沙尘暴提供沙尘源这一个方面。沙尘暴的发生还需要地面大风和适宜的层结条件^[9]。地表特征主要从以下几个方面影响沙尘暴。首先,地面加热是干旱和半干旱地区影响层结稳定度的主要因素。太阳辐射在地面上时地面就如同一个热容体。当地表植物覆盖度较高时,地面热容量很大,其吸收太阳辐射后升温不明

显,其自身发射的长波辐射对低层大气的加热也不强,此时大气层结往往相对稳定。而当地表植物覆盖度较小时,地面热容量很小,其吸收太阳辐射后升温很快并加热大气,形成热对流(或形成深厚混合层)。不言而喻,这样更有利于沙尘暴的形成。其次,对于地面风强度来说,地表植物覆盖度越小,其对大气的摩擦拖曳力越小,形成的地面风越强。而深厚混合层则有利于对流层高层的地面动量下传,同样利于地面大风形成,即有利于沙尘暴形成。另外,从更广的意义上讲,地表植被覆盖度减小,使地面“热容量”减小,这将使地—气相互作用过程的响应时间缩短,导致天气要素的日变化以及天气过程中天气系统强度的变化幅度加剧,也将使伴随天气系统发生的沙尘暴加强。因此,荒漠化客观上有利于沙尘暴的发生。

2 模式简介

研究采用的模式为北京城市气象科学研究所开发的耦合的沙尘预报模式^[13]。天气模式为中尺度模式 MM5 V3^[14]。与之耦合的沙尘传输和沉降模式采用与 MM5 相同的 σ 坐标,沙尘粒子的水平扩散、垂直扩散及差分方案与 MM5 相同。为了精确反映沙尘粒子的尺度特征,将沙尘粒径分为 16 档。模式的起沙过程利用参数化方法,与地表类型、植被覆盖度、土壤湿度等因素有关。是否产生起沙则由摩擦速度和土壤湿度决定。摩擦速度为:

$$u_* = \frac{V_* k}{[\ln \frac{z_s}{z_0} - \varphi_m (\frac{z_s}{L})]}$$

式中: V_* 为地表风速; k 为 Karman 常数; z_0 为地表粗糙度; L 为 Monin-Obukhov 常数; φ_m 为动力稳定性参数。起沙通量由下式决定:

$$F = K\beta S\alpha \times U^3.$$

式中: F 为起沙通量; K 为比例系数(与沙尘谱宽有关); β 为摩擦速度的非线性影响系数; S 为起沙系数(与土壤类型、植被盖度有关); α 为地表湿度系数; U 为摩擦速度。

起沙后, 网格可分辨的沙尘的上扬由上升运动和沙尘粒子的沉降速度决定。对次网格则由对流调整决定。沙尘沉降分为干沉降和湿沉降, 大粒子的干沉降主要为重力沉降, 小粒子沉降由湍流扩散和重力沉降共同决定。显式湿沉降由降水粒子对沙尘粒子的冲刷决定, 隐式湿沉降由降水量决定。

3 天气过程概述

2002 年 3 月 18—22 日的沙尘暴过程是近些年影响我国的一次较强的沙尘暴过程, 影响地区包括西北、华北、东北及山东、河南、湖南、湖北及四川省部分地区。其中, 除了甘肃、宁夏、内蒙古外, 河北、北京、吉林等地也出现了强沙尘暴。其强度和影响范围是近些年罕见的。给这些地区带来了巨大的经济和财产损失。

本次过程是一次较典型的蒙古气旋型沙尘暴过程。18 日 08 时, 对流层中层(500 hPa)有一低槽形成于中亚地区, 之后, 低槽东移加深, 19 日 08 时到达我国新疆东部(95° E), 受其影响, 在(地面)蒙古国东部阿尔泰—萨彦岭山地背风坡产生蒙古气旋,

扬沙和沙尘暴天气开始出现在蒙古国中部。19 日 20 时, 低槽进一步东移加深, 冷平流加大, 同时, 地面蒙古气旋进一步加强, 气旋冷锋后冷空气强度大、范围广。沙尘暴出现在内蒙古西部及我国西北地区。20 日, 高空锋区迅速增强并推进至河套一带, 受其影响, 地面气旋随之东移并迅速增强, 气旋冷锋东北—西南方向一直延伸至长江上游并扫过我国华北、华中的大部分地区, 带来强烈的沙尘天气。21 日, 气旋东移, 气旋冷锋扫过东北地区, 沙尘暴区也推进至吉林、辽宁等地。之后, 气旋减弱东移, 影响我国大部地区的沙尘暴过程也逐渐结束。

4 模拟结果分析

对本次过程的模拟时段为 2002 年 3 月 19 日 08 时至 21 日 08 时。在控制试验较好再现本次沙尘暴过程基础上, 针对内蒙古中西部下垫面的影响进行了敏感性试验, 即去掉内蒙古中西部荒漠化地区对于沙尘暴的贡献进行研究。

4.1 模拟与实况的对比

图 2 为 2002 年 3 月 20 日 17 时遥感监测的沙尘区及模拟的地面沙尘浓度 TSP, 图中可见, 遥感监测到的内蒙古、山西等地的强沙尘区在模式模拟中具有较好的反映。另外, 模拟显示上述地区以东有大范围沙尘区, 而由于此时高空有云层覆盖, 故遥感未能监测出沙尘区。从呼和浩特、北京等地能见度的演变与沙尘浓度的变化也是较为一致的(图略)。总体上看, 模式对本次过程进行了较成功的模拟。

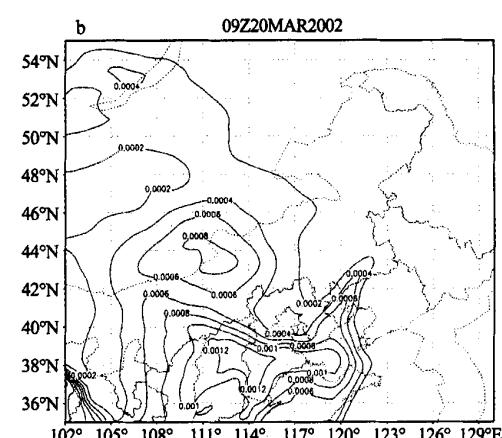
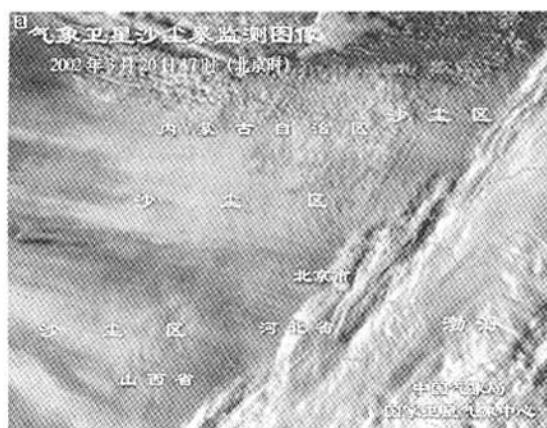


图 2 2002 年 3 月 20 日 17 时遥感监测(a)及模拟沙尘浓度(b)分布(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 2 Sand-dust concentration in remote sensing image (a) and by simulation

4.2 对比试验结果分析

图 3a 为依据下垫面类型、地表植被覆盖度以及地面湿度等参数确定的起沙系数。图中可见, 沙尘

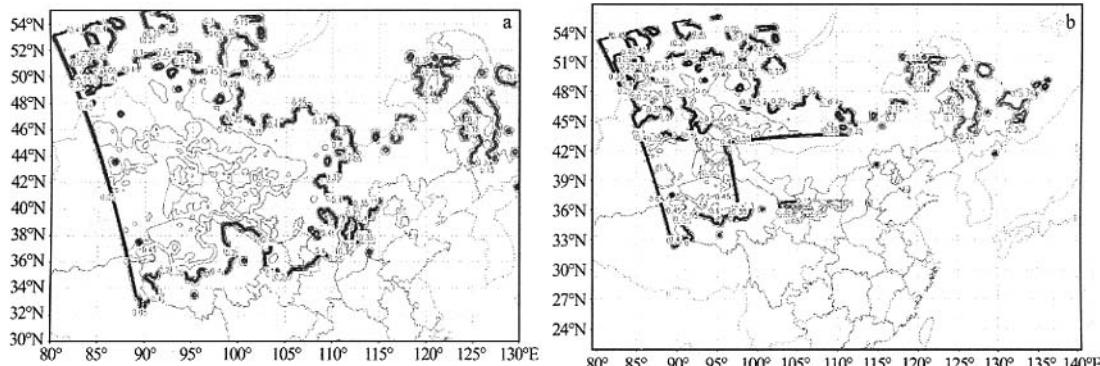


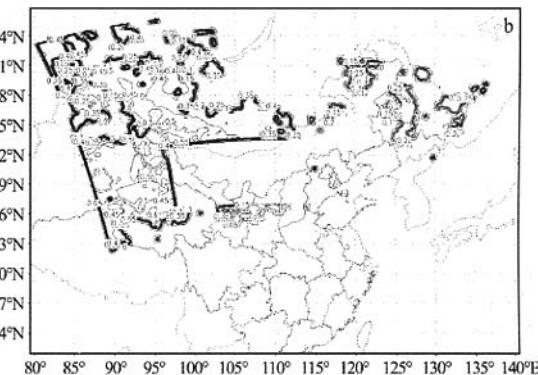
图 3 模拟区域起沙系数分布(a 为控制试验,b 为敏感性试验)

Fig. 3 The dust rising coefficient in control test (a) and sensitive test (b)

本次沙尘天气过程首先出现在内蒙古地区, 随时间推移逐渐向南、向东扩展。从模拟结果的时间演变看, 在沙尘过程初期, 即沙尘暴出现在蒙古国西部、内蒙古西部时, 控制试验与对比试验模拟的沙尘浓度差异不大。模拟的沙尘范围基本上是一致的(19 日 20 时, 图略), 中心强度略偏弱(控制试验为 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 对比试验为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。至 20 日 08 时(图略), 沙尘区扩展至河北、山西等地, 两者范围仍然较为一致, 强度差异有所增强(控制试验为 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 对比试验为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。到 20 日 20 时, 图 4 显示此时控制试验和对比试验不论沙尘区范围、强度都有明显的不同。控制试验中, 沙尘区扩展至陕西、河南、山东等地, 且这些地区具有强中心区, 浓度在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 而对比试验在这些地区的沙尘强度非常微弱, 浓度仅 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。至 21 日 08 时, 可以看到控制试验沙尘区向两个方向扩展, 一个是向东扩展至渤海湾附近, 而主体则向南扩展至河南、安徽等地。沙尘浓度中心位于河南、安徽附近。而对比试验中, 沙尘仅实现了向东的扩展, 且浓度较控制试验明显偏小。可见, 随着沙尘不断向东、向南扩展, 内蒙古中西部的起沙的贡献越来越大。

上面分析的只是地面的情况, 而沙尘上扬后在输送和沉降过程受到天气系统特征的影响, 其表现往往是较为复杂的。本次沙尘暴过程在蒙古国、内蒙古地区形成后出现了向南、向东的长距离的扩展, 为了进一步分析沙尘在高空传输的特征成因, 下面

源地主要位于蒙古国西部阿尔泰—萨彦岭山地、我国西北地区的新疆、青海及内蒙古中西部沙漠和荒漠化草原等地区。其中, 内蒙古中西部仅占较小的一部分。下面将分析控制试验和对比试验的结果(图 3b)。



在这两条路径上分别选取安徽六安(位于沙尘向南扩展的路径上, 位于控制试验的浓度中心附近)和山东济南(位于沙尘向东扩展的路径上)作为代表站进行分析。

图 5a、b 为济南站沙尘浓度的时间-高度剖面图, 可以看到控制试验和对比试验沙尘传输过程中的沙尘浓度空间分布大致是一致的。沙尘存在两个高浓度区, 一个位于对流层中层(500 hPa)左右, 另一个位于地面附近, 而浓度值在对比试验中均弱于控制试验。比较两个浓度中心的变化, 可以看到地面附近浓度中心值的变化(控制和对比试验分别为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)远大于对流层中层(控制和对比试验分别为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的变化。说明源于内蒙古中西部的沙尘的传输高度较低, 基本在地面附近(900 hPa 以下), 而对流层中层传输的沙尘则明显来源于内蒙古中西部之外的沙源地。图 5c、d 为 20 日 20 时济南站沙尘浓度的东西向空间剖面图(其中左下角浓度值上下层相等的区域表示地形高度, 从西向东为下坡过程)。图中首先可以看到, 对流层中层和地面附近的沙尘浓度分布和变化与图 5a、b 类似, 而浓度值的变化同样是地面附近(控制和对比试验分别为 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)明显强于对流层中层(控制和对比试验分别为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。另外, 必须注意的一个现象是图 5a、b 显示, 在对流层中层沙尘区到达该站的时间比地面附近早 9 h 左右。表明它们在传输过程中一定程度

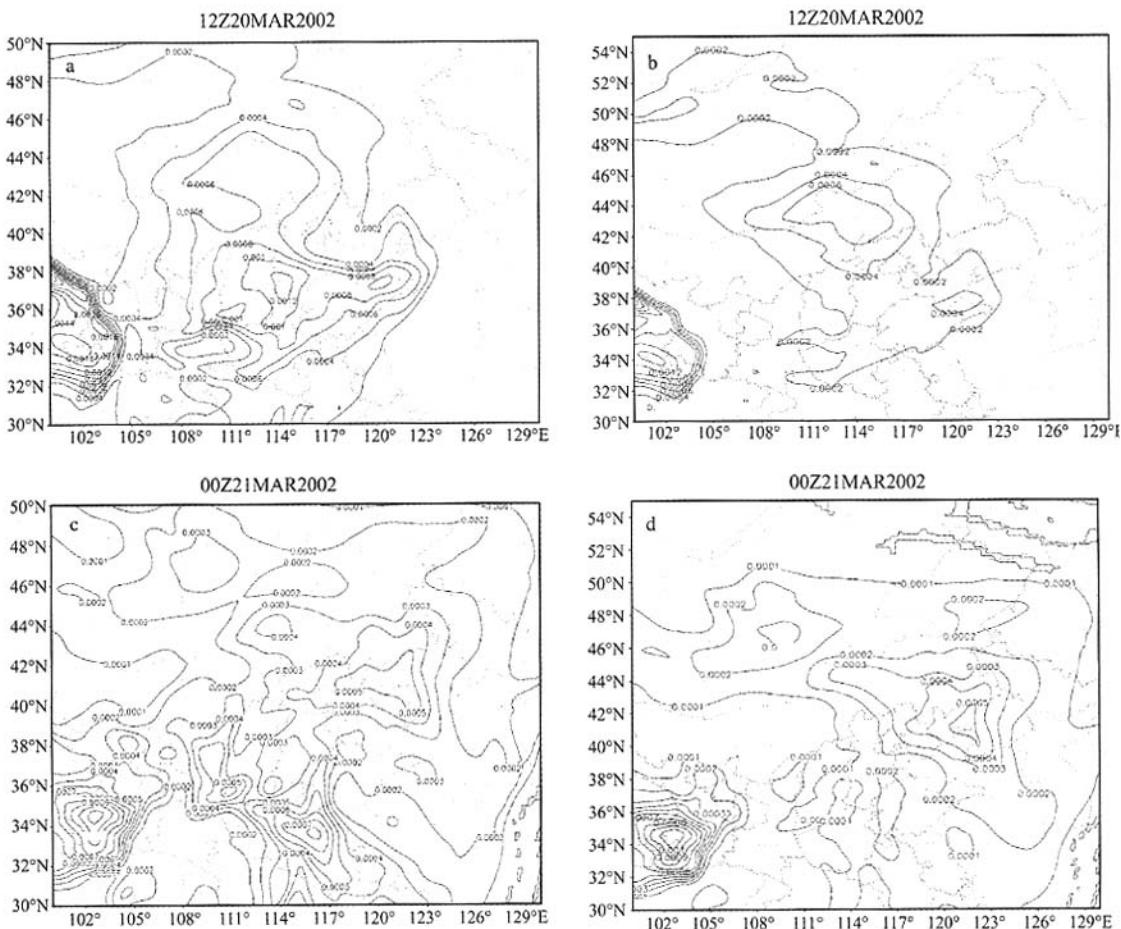


图 4 2002 年 3 月 20 日 20 时模拟(a 为控制试验,b 为对比试验)和 2002 年 3 月 21 日 08 时模拟(c 为控制试验,d 为对比试验)的地面沙尘浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 4 The modeling sand dust concentration in control test (a) and sensitive test (b) at 20:00, March 20 and in control test (c) and sensitive test (d) at 08:00, March 21

上是相对孤立的。而在对比试验中(图 5b),沙尘区的扩展已经明显分为两个相互独立的区域,一个位于对流层中层,一个位于地面附近(其结合部沙尘浓度接近 0)。这些现象表明,沙尘的传输及沙尘区在扩展时存在着两个明显的优势输送带,分别位于对流层中层及地面附近,它们一定程度是相互独立的,其传输速度、沙尘浓度可能是完全不同的。产生这一现象原因是在不同的高度风向、风速存在巨大的差异。在对流层中层风向、风速远大于地面附近风速。因此导致了沙尘传输过程中逐渐形成了两个相互独立的优势传输带。这一点在沙尘向南的传输路径上表现得更为明显。

图 6 类似于图 5,区别是位于沙尘向南传输路径上的安徽六安站。首先可以看到与济南情况相似的地方。沙尘传输存在两个优势输送带,分别位于对流层中层(700 hPa 附近,较图 5 略低)和地面附近

近。较图 5 更为明显的是这两个优势输送带在图 6b、d 中已经完全被割裂并独立起来。而这两个优势输送带的传输速度在图 6 的表现是地面附近的沙尘传输速度明显快于对流层约 6~8 h。这是与图 5 完全相反的现象。这一现象的形成原因是在对流层中层,风的方向是准东西向的,其东西分量远大于南北分量。因此,济南附近在对流层中沙尘向东传输的速度大于其下方地面附近的传输速度(接近地面冷锋的扩展速度)。而在六安,由于是向南传输,因此对流层中的传输速度反而小于地面附近地面冷锋的扩展速度。

从两个优势沙尘传输带的浓度对比看,地面附近沙尘浓度的变化同样非常明显(控制和对比试验分别为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),而在对流层中,两试验的沙尘浓度相差非常微小(图 6d)。可见,起源于内蒙古中西部与该地区之外两个沙源地

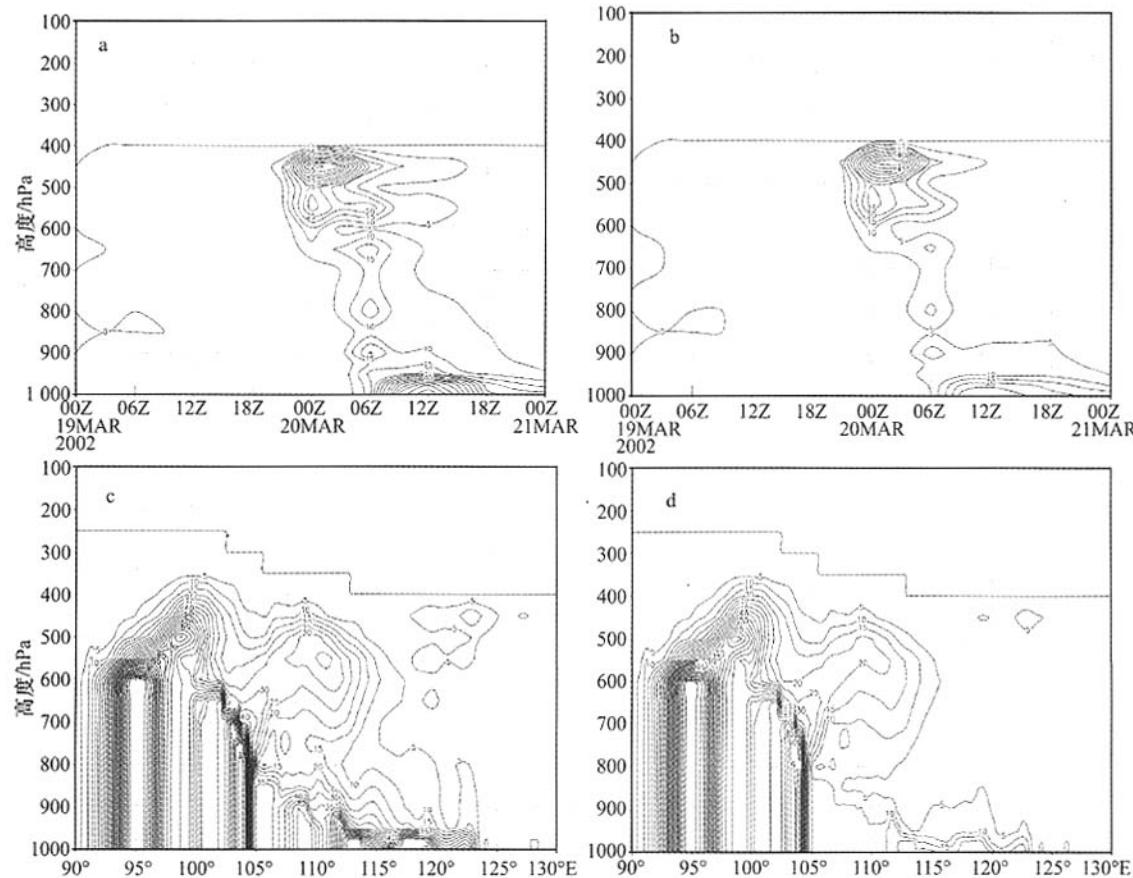


图 5 济南站($36.41^{\circ}\text{N}, 117.00^{\circ}\text{E}$)3月19日08时至21日08时沙尘浓度时间—高度剖面图(a为控制试验,b为对比试验)及3月20日20时穿过济南的沙尘浓度东西向空间剖面图(c为控制试验,d为对比试验)(单位: $10^{-5}\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 5 The time-height cross section of sand dust concentration in control test (a) and sensitive test (b) from 08:00 to 21:00, March 19 and the west-east cross section of sand dust concentration in control test (c) and sensitive test (d) at 20:00, March 19 in Jinan station

的沙尘随着沙尘区的扩展已经完全割裂开来。在地面附近影响安徽地区的沙尘几乎全部来源于内蒙古中西部,而在其上空传输影响其下游(测站以南)的沙尘则几乎全部来源于其他沙尘源地。

以上结果表明,首先,在沙尘远距离传输过程中,至少可以分为两个相互孤立的优势沙尘传输带,一个位于地面附近,另一个位于对流层700—500 hPa间。它们在传输速度、传输距离、影响地区及沙尘来源方面都有明显的差异。另外,在一个大的沙尘源地中,不同的小区域的起沙可以有完全不同的归宿,即这些扬起的沙尘的传输距离、传输速度、影响地区、影响时间可能出现很大的差异。其形成原因则很大程度受到地形高度的影响。最普遍的意义来讲,沙尘能够达到的上扬高度是对流达到的高度,而同样的天气系统,在海拔较高的地区,其上扬的高度则明显要高于平原地区。而沙尘扬升越高,对应的地转风越大,其传输的速度越快,传输的距离越

远。就本次过程而言,显而易见的是内蒙古中西部之外的一个主要沙源地是蒙古国西部山地及阿尔泰-萨彦岭山地,其平均海拔高度明显高于内蒙古中西部荒漠化地区(内蒙古中西部海拔高度在1 000 m或以下,而阿尔泰-萨彦岭山地在2 000~3 000 m)。因此,扬升的沙尘应该具有更高的上扬高度,也能够有更快的传输速度和传输距离。而这与在山东济南及安徽六安出现的情况是吻合的,也足以解释这两个地区对流层及地面附近沙尘优势输送层的特征。

以上分析还可说明,不同高度沙尘优势输送带的形成不仅源于风向、风速随高度的巨大差异,同时,地形高度的不同导致不同沙源地的沙尘上扬高度不同,也是其形成的另一个重要原因。研究表明,沙尘暴形成之后的扩展过程并不是一个混沌的整体,基于地形分布特点、沙源地特征及天气系统固有的规律,完全可以对其内在的组织规律和运转机制

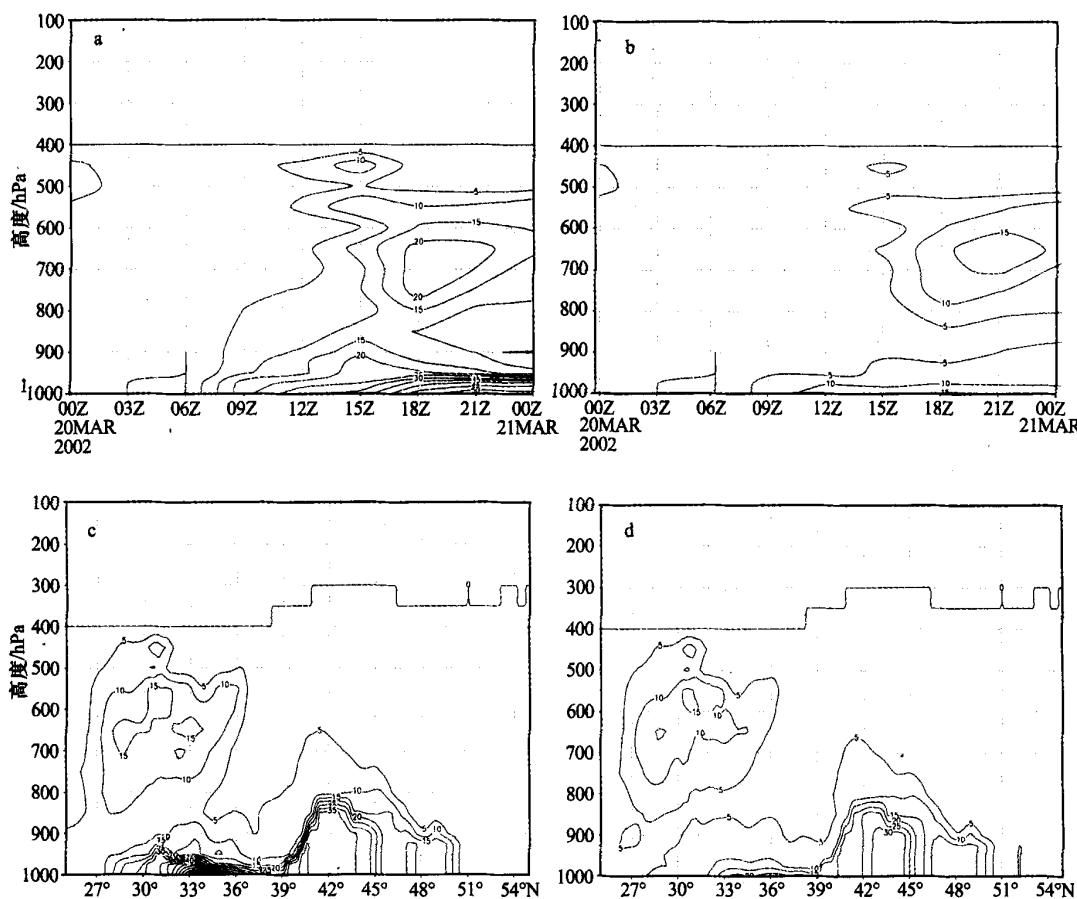


图 6 安徽六安(31.45°N, 116.30°E)3月21日08时沙尘浓度时间-高度剖面图(a为控制试验,b为对比试验)
及沙尘浓度南北向剖面图(c为控制试验,d为对比试验)(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 6 The time-height cross section of sand dust concentration in control test (a) and sensitive test (b) at 08:00, March 21 and the west-east cross section of sand dust concentration in control test (c) and sensitive test (d) in Liuan station

进行剖析,从而更深入的了解沙尘暴过程。

5 小结

通过对一些观测数据的统计分析以及利用沙尘天气数值预报系统对2002年3月18—22日沙尘暴过程进行了成功模拟和敏感试验,得出:

1) 对观测数据的统计分析表明,内蒙古中西部荒漠化草原生态的迅速恶化是2001年前后沙尘天气的频繁发生的部分原因。草原株丛高度下降及植物群落盖度下降等因素对沙尘暴天气的产生具有直接的影响。

2) 在一个范围较大且具有不同地形分布特点的沙尘源地,地形高度的不同将使这些地区扬起的沙尘在沙尘天气向下游扩展的过程中出现不同的归宿,即沙尘传输距离、传输速度、影响地区、影响时间都存在巨大差异。海拔越高,其可能扩展的地区距

离沙源地越远。

3) 沙尘在远距离输送过程中至少可以出现两个不同高度的优势沙尘输送带。一个位于对流层中层,一个位于地面附近。其形成原因是由于驱动沙尘的风速随高度的差异所致,此时,高空风和地面风的强度对比将决定它们的传输速度和传输距离。同时,沙源地海拔高度的不同也是形成不同高度沙尘优势输送带的一个重要原因。

4) 内蒙古中西部荒漠化草原是本次过程的一个重要的沙尘源地,并主要通过地面附近的沙尘输送带向东、向南传输。其通过对流层的传输随沙尘区的不断扩展而越来越弱,进而被其他更高海拔高度的沙源地起沙所取代。

参考文献(References):

- [1] 权建农,奚晓霞,王鑫,等.兰州市2001年沙尘气溶胶质量浓

- 度的特征分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 93—97.
- [2] 李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 488—495.
- [3] 牛生杰, 章澄昌. 贺兰山地区沙尘气溶胶化学组分及富集因子分析[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 264—268.
- [4] 沈建国, 刘菲, 牛生杰, 等. 一次沙尘暴过程 TSP 质量浓度的连续观测和分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 786—791.
- [5] 宁海文, 王式功, 杜继稳, 等. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 886—890.
- [6] 叶笃正, 犀纪范. 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: 513—521.
- [7] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 591—606.
- [8] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学:D 辑, 2002, 32(4): 327—334.
- [9] 王式功, 扬德保. 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.
- [10] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中国北方沙尘暴研究若干问题[C]//沙尘暴学术研讨会文集. 台湾蒙藏委员会出版, 2002: 63—76.
- [11] 赛胜宝, 智瑞年. 内蒙古北部荒漠化草原带的严重荒漠化及其治理[C]//沙尘暴成因及综合防治. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2004: 260—265.
- [12] 郝敦元, 刘仲龄. 内蒙古草原退化与生态安全[C]//沙尘暴成因及综合防治. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2004: 227—241.
- [13] 程丛兰, 王迎春, 刘伟东, 等. 与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟[J]. 科学通报, 2004, 46(19): 2007—2013.
- [14] Anthes R A, Warner T T. Development of hydrodynamics models for air pollution and mesometeorological studies[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106: 1045—1078.

A Numerical Study on Influence of Sand Source Area in Inner Mongolia on the Dust Storm Expanding Process

LI Zhang-jun^{1,2}, JIANG Xue-gong², CHENG Cong-lan³

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Regional Meteorological Bureau, Hohhot 010051, China)

Abstract: Based on a numerical study on the dust storm process occurred from March 18 to March 22, 2002, the influence of the dust source area in Inner Mongolia on the dust storm extending process was conducted. The results show that the degradation of the desert steppe in Inner Mongolia was a reason causing the frequent appearing of dust storm in northwest China. Owing to the distribution characteristic of terrain height in sand source area and the change of the geostrophic wind with height, two isolated preponderant transporting zones often appear in the dust particle transporting process. One lies in the mid-troposphere while the other closely upon the surface. The transportation speed, distance and their impact area and time are different in the process. The raising dust in Inner Mongolia was transported mainly through the zone upon the surface. Its transportation in troposphere became less and less while the dust storm extended southward and eastward.

Keywords: dust storm; dust source area; dust particle transportation; numerical simulation