

文章编号: 1000-0534(2007)05-1013-10

地形对沙尘暴的影响及敏感 试验研究

沈建国¹⁻², 姜学恭³, 孙照渤¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044; 2. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古呼和浩特 010051;
3. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 在初步探讨地形影响沙尘扬升、传输、沉降等动力过程可能机制的基础上, 利用沙尘数值预报模式对一次强沙尘暴过程进行了模拟研究, 结果表明: 沙尘暴形成阶段沙尘主要来源于阿尔泰—萨彦岭及以东地区, 这部分沙尘主要向东扩展, 该区域地形对其强度具有重要影响; 内蒙古中西部、甘肃、宁夏等地的起沙主要在沙尘暴持续阶段产生影响, 之后主要向南输送, 青藏高原东侧地形绕流对其强度具有影响。地形影响可以使沙尘的扩展分为两种不同的方式, 当上下游地形落差较小时形成整体推进式传输, 此时沙尘位于对流层低层, 没有上下沙尘层的分离; 当上下游地形落差较大时形成分离式传输, 沙尘位于对流层中层且在传输过程中沉降很弱, 同时与地面附近的沙尘层分离。源于蒙古国、内蒙古等地的沙尘往往产生整体推进式传输; 而产生于青藏高原的沙尘常形成分离式传输。

关键词: 沙尘暴; 地形影响; 数值模拟

中图分类号: P445+.4 **文献标识码:** A

1 引言

中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起了世人的关注, 沙尘暴对环境的巨大危害使其成为一个严重的地球环境问题^[1]。目前, 国内外对沙尘暴的研究涉及沙尘暴的气候特征及影响因子、沙尘天气的地基和遥感监测技术、沙尘气溶胶物理、化学特征及环境、生态效应、沙尘气溶胶辐射强迫和气候效应、气候变化和人类活动对沙尘气溶胶的影响、沙尘起动、输送、沉降等动力学问题、沙尘天气的预测技术等诸多方面^[1-12]。

尽管人们早在 20 世纪 20 年代就开始研究沙尘暴, 但直到 70 年代才开始利用现代科学技术监测、模拟、研究、预测沙尘天气^[2]。因此, 一些对沙尘暴具有重要影响因素的研究尚不多见。沙尘暴不同于降水等发生在整个对流层的天气过程, 而基本上是发生在行星边界层中, 地形高度常常可能大于行星边界层的高度, 因此沙尘暴将受到地形更大的影响。

2 地形影响沙尘暴的几种方式

2.1 地形对沙尘扬升的影响

沙尘被大风吹离地面后, 进一步上扬的过程可以分为两个阶段, 即从地面扬升至边界层以及从边界层顶扬升至自由大气^[11]。前一阶段导致沙尘扬升的主要动力是湍流运动及锋面环流等系统性上升运动; 后一阶段为系统性的上升运动。湍流运动存在于行星边界层中, 是行星边界层的主要动力学特征, 因此, 由湍流运动导致的沙尘上扬的高度可以视为等于边界层高度, 即地面以上 1500 m 左右。而边界层绝对高度, 即海平面以上的高度, 则具有重要的天气学意义: 绝对高度越高, 则风速越强, 沙尘水平输送能够到达的距离越远。因此, 在同样的大气环境下, 高原地形的存在显然会抬高行星边界层的绝对高度。

地形对沙尘上扬高度的影响可以从一些沙尘天气的观测事实得到验证。如塔克拉玛干沙漠和蒙古国、内蒙古西部是两个重要的沙尘源地^[12], 但它们

收稿日期: 2006-09-19; 改回日期: 2007-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40565003); 科技部社会公益研究专项(2005DIB3J108)共同资助

作者简介: 沈建国(1955—), 男, 河北蠡县人, 正研高工, 主要从事天气气候研究。E-mail: shenjianguo@China.com

产生的沙尘暴的影响范围有明显差异。形成于南疆盆地的沙尘暴尽管有时很强，但其影响范围往往只局限在西北地区；而形成于蒙古国及内蒙古中西部的沙尘暴不仅较强，且常能扩展至我国东北、华北、长江流域及东亚其它国家，甚至横跨太平洋影响美洲西部^[13]。其形成原因可能是多方面的，在天气影响系统之外，蒙古国及内蒙古中西部为高原地区，向东地形开阔，而塔克拉玛干沙漠位于南疆盆地，向东受到山脉阻挡，也是两地沙尘扩展范围差异的原因之一。

地形对沙尘上扬的影响还在于在山地迎风坡将产生爬坡气流，从而产生强迫抬升。由于地形强迫抬升不需要天气系统配置、上下游配合等条件，只要水平风速达到一定的强度，在遇到地形阻挡时就会形成较强的强迫抬升，从而导致沙尘的上扬。而我国北方广泛分布着众多的山脉、山地，而且有海拔很高、尺度很大的青藏高原，因此，我国北方地形客观上提供了产生沙尘强迫抬升的条件。

2.2 地形对沙尘传输的影响

沙尘暴发生时沙尘粒子主要集中在行星边界层中，而我国北方地形高度常常可能大于边界层高度，因此，携带沙尘的气流在遇到地形阻挡时，当地形高度小于边界层高度且地形坡度较缓，则气流将沿坡地爬升，部分沙尘可以翻越地形到达背风坡，此时地形将减弱沙尘扩展的强度。如果地形高度大于边界层高度且地形坡度较陡，则气流将产生

明显的绕流，从而改变沙尘扩展的方向。反之，如果沙尘暴发生在高原地区，则其向下游平原地区的扩展不仅不受阻挡，而且下坡地形将加强沙尘的扩展。我国地形分布特点总体为西高东低、西北高东低南低，沙尘天气发生在西部和北部高原地区，因此，地形影响将加剧沙尘暴向东部和南部地区的扩展。

大气层结状态对沙尘暴的发生和维持具有重要的影响。如沙尘暴发生时边界层往往形成混合层。而特定的地形上下游配置可以形成混合层的平流。在图1中，A区为高原上形成的深厚混合层，当上下游地形落差较小时（图1a），A区混合层空气被平流到平原的上空B区，而此时B区与平原的地面混合层C区之间的位温差异很小，因此，B区和C区很容易相互连通，形成了更为深厚的混合层。这种情况下显然有利于高原A区的沙尘暴向下游平原地区的扩展，也将导致下游平原地区沙尘暴的强度加强，而这种传输的特点可以称为整体推进式的传输。当上下游地形落差较大时（图1b），A区混合层空气被平流到平原的上空B1区，此时B1区与平原的地面混合层C1区之间的位温差异则较大，B1区和C1区之间被隔断，B1区的沙尘要形成沉降必须通过一定的系统性下沉运动。因此，不利于高原的沙尘进入C1区，这样C1区沙尘暴强度将相对较弱。而B1区的沙尘却可能通过较少的沉降实现远距离的分离式传输。我国北方地形异常复杂，图

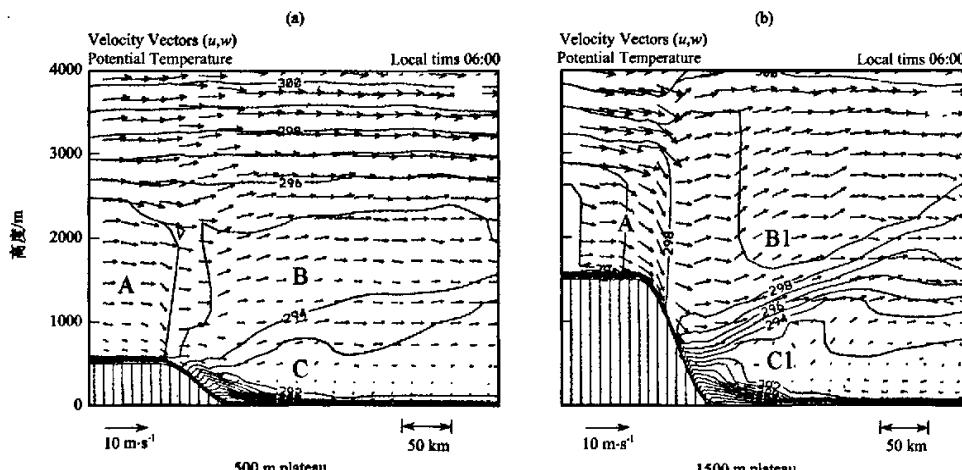


图1 地形和平流对大气层结的影响示意图(引自文献[14])

风矢为 u, w 合成，等值线为位温，阴影区为地形

Fig. 1 The concept model for the influence of topography on the atmospheric stratification (from reference [14])

la, b 两种情况有可能出现, 不同地形配置的地区对沙尘暴扩展的影响方式和程度是不同的。

2.3 地形对沙尘沉降的影响

地形对沙尘的沉降也具有一定的影响。首先对于存在于行星边界层中的沙尘, 下坡过程中地形强迫产生的下沉气流将导致沙尘在扩展的同时形成沉降, 地形坡度越大, 则地形强迫沉降越强。另外, 地形的起伏将导致地形波的形成, 地形波不仅出现在地面附近, 同时能够自下而上向对流层中扩展(在对流层中表现为上升、下沉相间的垂直速度分布形态), 地形的尺度越小, 地形波越强。因此, 在自由大气中远距离传输的沙尘将在地形波下沉支的强迫下产生沉降, 特别是在没有系统性的下沉运动形成时, 这一影响是非常明显的。

可见, 地形对沙尘扬升、传输、沉降等过程都能够产生影响。而我国北方复杂的地形条件也为这一影响提供了适宜的客观条件。因此, 本文将通过对一次大范围强沙尘暴过程进行的数值模拟研究, 探讨我国北方地形影响沙尘暴的一些基本特点。

3 天气过程概况

2002年3月18~22日沙尘暴过程是近年强度较强、范围较大的一次沙尘暴过程。图2为3月18~22日全国沙尘天气分布图。由图可以看到, 我国北方和中原大部分地区出现了沙尘天气。沙尘暴主要出现在内蒙古地区, 强沙尘暴中心位于内蒙西部及中东部偏南地区。另外, 华北北部、东北南部

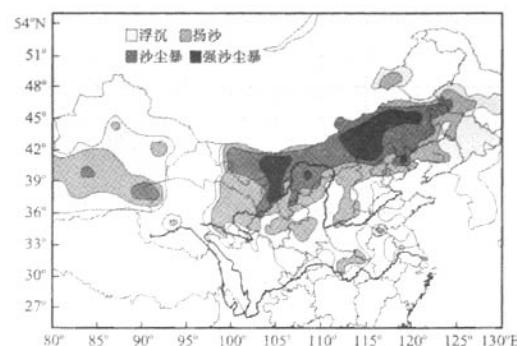


图2 2002年3月18~22日我国沙尘天气分布

Fig. 2 The distribution of dusty weather in China on 18~22 March 2002

部也出现了沙尘暴, 而浮尘和扬沙天气扩展到了中原大部分地区。

本次过程是一次由蒙古气旋引发的沙尘暴过程。18日08:00(北京时, 下同), 在中亚地区500 hPa有一低槽形成, 并逐渐东移加深; 19日08:00低槽到达我国新疆东部(95°E), 在阿尔泰—萨彦岭山地东部地面形成蒙古气旋, 在蒙古中西部引发扬沙和沙尘暴天气; 19日20:00, 高空槽进一步加深, 斜压性增强, 地面蒙古气旋加强, 气旋冷锋侵入内蒙古。沙尘暴开始出现在内蒙古西部及我国西北大部分地区。20日, 高空锋区增强并推进至河套一带, 同时, 地面气旋东移快速增强, 气旋冷锋扫过我国北方大部分地区, 带来华北地区强烈的沙尘天

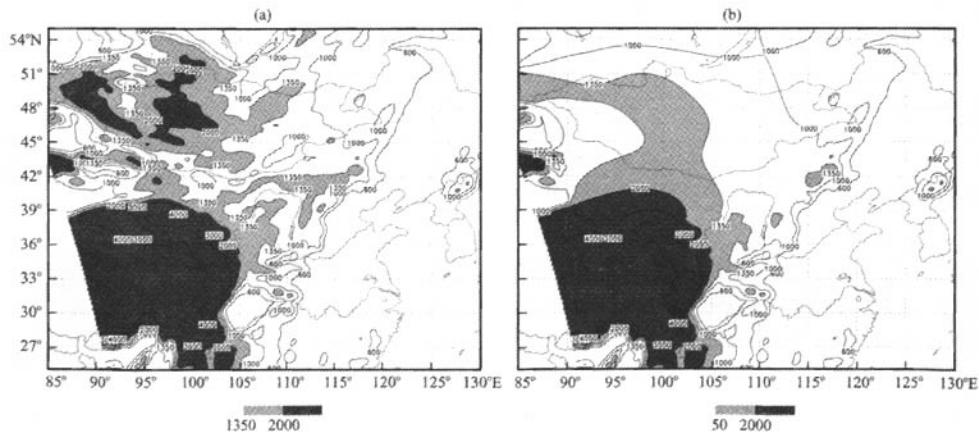


图3 控制试验(a)和地形敏感试验(b)模拟的地形高度(单位: m, 间隔: 400)

Fig. 3 The topography elevation simulated in control experiment (a) and terrain sensitive experiment (b). Unit: m, interval: 400

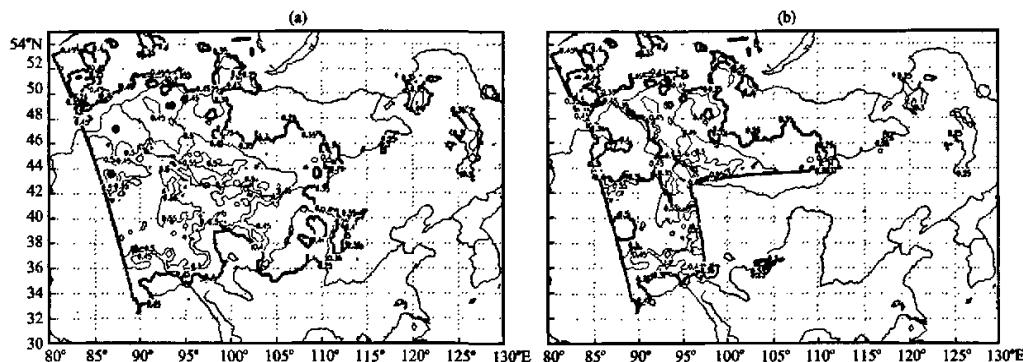


图 4 控制试验(a)和下垫面影响试验(b)起沙系数分布

Fig. 4 The distribution of dust rising coefficient in control experiment (a)
and underlying surface effect experiment (b)

气。21日，气旋东移，气旋冷锋进入东北地区，沙尘暴区向东、向南扩展，强度减弱；22日，影响我国大部分地区的沙尘暴过程逐渐结束。

4 模式简介和模拟方案

模式采用中国气象局北京城市气象研究所开发的区域沙尘数值预报模式^[15]，天气模式为MM5V3^[16]。与之耦合的沙尘传输、沉降模式采用与MM5模式相同的 σ 坐标，沙尘粒子水平扩散、垂直扩散及差分方案与MM5模式相同。沙尘粒径分为16档。模式的起沙过程采用参数化方法，由地表类型、植被覆盖度、土壤湿度等因素决定。

模拟采用T213分析和预报场作为初始场和侧边界。模式格距为30 km，格点数为 131×121 ，模拟起始时间为3月19日08:00，模拟时间48 h。控制试验采用实际地形(图3a)。由于本次过程主要沙尘源地——蒙古国、内蒙古西部周边的主要特殊地形是阿尔泰—萨彦岭山地，它对地面大风和沙尘暴可能有重要的影响。因此，地形敏感试验将 $85^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内1000 m以上地形高度降低200 m，然后进行平滑，使这一区域总体地形高度降低后峰值变为1400 m左右(图3b)。而内蒙古西部是本次过程我国境内一个主要沙尘源地，为了分析该区域起沙对本次沙尘暴过程的影响，下垫面影响试验是在地形调整的基础上将内蒙古中西部及甘肃、宁夏部分地区(约 $97^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$, $36^{\circ} \sim 44^{\circ}\text{N}$ 范围内)地面起沙系数取为零(图4)。以下将对模式输出结果进行分析和讨论。

5 模拟结果分析

5.1 沙尘天气过程的模拟

图5为3月19日14:00~21日02:00模拟沙尘浓度和观测天气强度的对比。由图5可看到，19日14:00，沙尘天气主要出现在蒙古国南部及内蒙古西部地区，模拟的沙尘高浓度区与观测较为一致。20日02:00，沙尘天气主要向东扩展，到达内蒙古中部地区，同时，沙尘区向南的扩展也有所增强，模拟的沙尘高浓度区与观测较为一致，也能够看出沙尘高浓度区具有明显的向东、向南不同方向扩展的趋势；14:00，沙尘向东的缓慢扩展进一步维持，同时向南扩展的强度明显加强，而模拟的沙尘高浓度区同样出现明显的向南扩展。21日02:00，观测的沙尘天气强度迅速减弱，而模拟的沙尘高浓度区也出现减小，减小的程度稍弱于实况。另外，可以看到，在青藏高原模拟结果有大范围沙尘区出现，尽管在常规天气图上(图5沙尘天气站点)由于观测时间密度和空间精度的限制，并未捕捉到这些沙尘天气，但从沙尘天气分布图(图2)上可以看到高原东部有沙尘天气出现。因此，总的来说，模式模拟出了本次过程沙尘天气形成及向下游扩展的整个过程。

5.2 地形对沙尘暴的影响

5.2.1 沙尘暴形成和扩展阶段

图6为沙尘暴形成、扩展阶段控制试验、地形影响及下垫面影响试验模拟沙尘浓度分布。在沙尘暴形成阶段(图6a~c)可以看到，沙尘高浓度区主要集中在蒙古国南部和内蒙古西部交界地区，在地

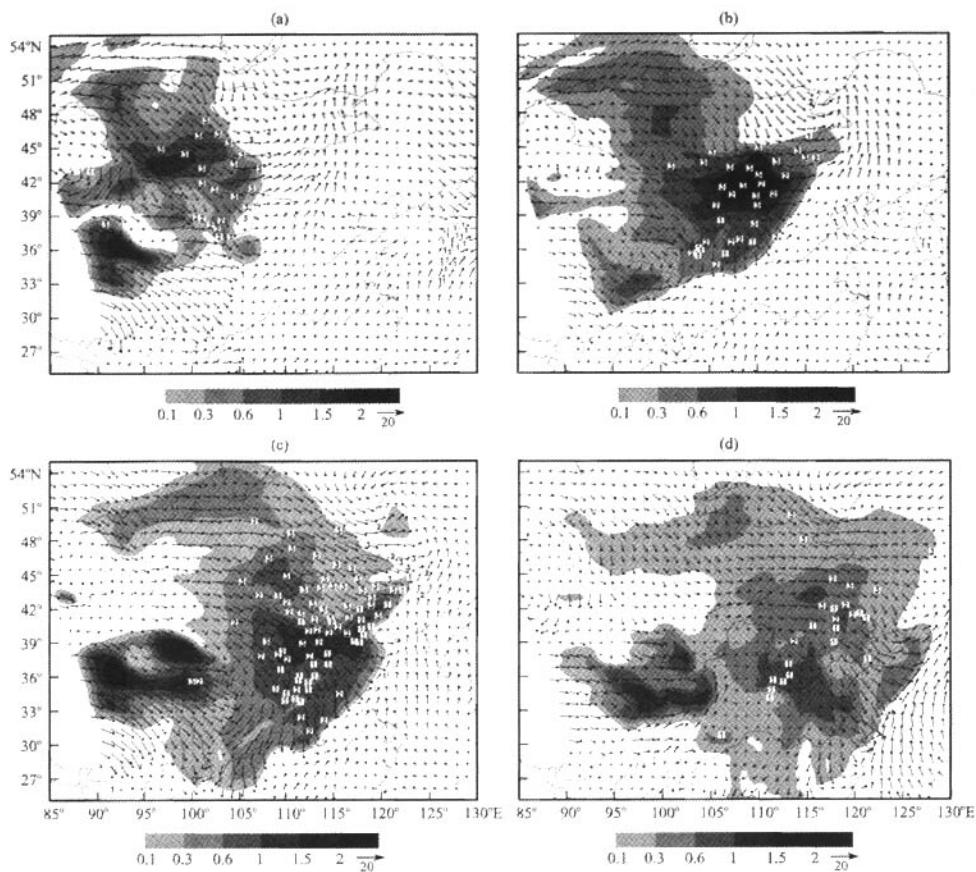


图 5 控制试验 3月 19 日 14:00(a), 20 日 02:00(b), 20 日 14:00 和(c)21 日 02:00(d)
模拟地面沙尘浓度(阴影区)和地面观测沙尘天气强度

1 为浮尘, 2 为扬沙, 3 为沙尘暴, 单位: mg/m^3

Fig. 5 The observational dust weather and simulated surface dust concentration (shading)

and 10 m surface wind field in control experiment at 14:00 on 19 (a), 20:02

20 (b), 14:00 on 20, (c) and 02:00 on 21 (d) March. Unit: mg/m^3 .

1 for floating dust, 2 for blowing dust, 3 for dust storm

形敏感试验中, 该区域沙尘浓度出现非常明显的减小, 中心值只是控制试验的不足 $1/2$ 。可见, 敏感区地形对本次过程沙尘暴起始阶段的强度具有决定性的影响。进一步去除下垫面敏感区的起沙作用之后, 比较图 6b, c 可以看到对沙尘浓度的影响并不明显。因此, 在本次过程沙尘暴形成阶段, 沙尘主要来源于我国境外的蒙古国等地, 而国内下垫面敏感区的起沙并不是主要的。

在沙尘暴扩展阶段(图 6d~f), 三个试验沙尘区的扩展方向均表现为向南和向东两个方向, 向东扩展至华北东部, 向南主要到达华北南部及中原地

区。对比图 6d~f 可以发现, 地形的改变加剧了沙尘扩展方向的这种分裂程度。由于气旋成熟阶段气旋冷锋后部为强盛的偏西气流, 因此将导致沙尘区向东扩展。同时, 气旋冷锋后部冷空气侵入我国境内之后, 尽管其中一部分受气旋冷锋引导而向东扩展, 但另一部分受到下坡地形引导产生向南的扩展, 由于青藏高原的存在, 使这一向南的扩展变得非常强盛。其原因就是青藏高原大地形产生的强迫绕流。从图 6 中可以看到, 高原绕流的宽度几乎可以达到 5~10 个纬距, 绕流沿西北、偏北、东北方向改变, 形成了圆弧状的沙尘输送带。

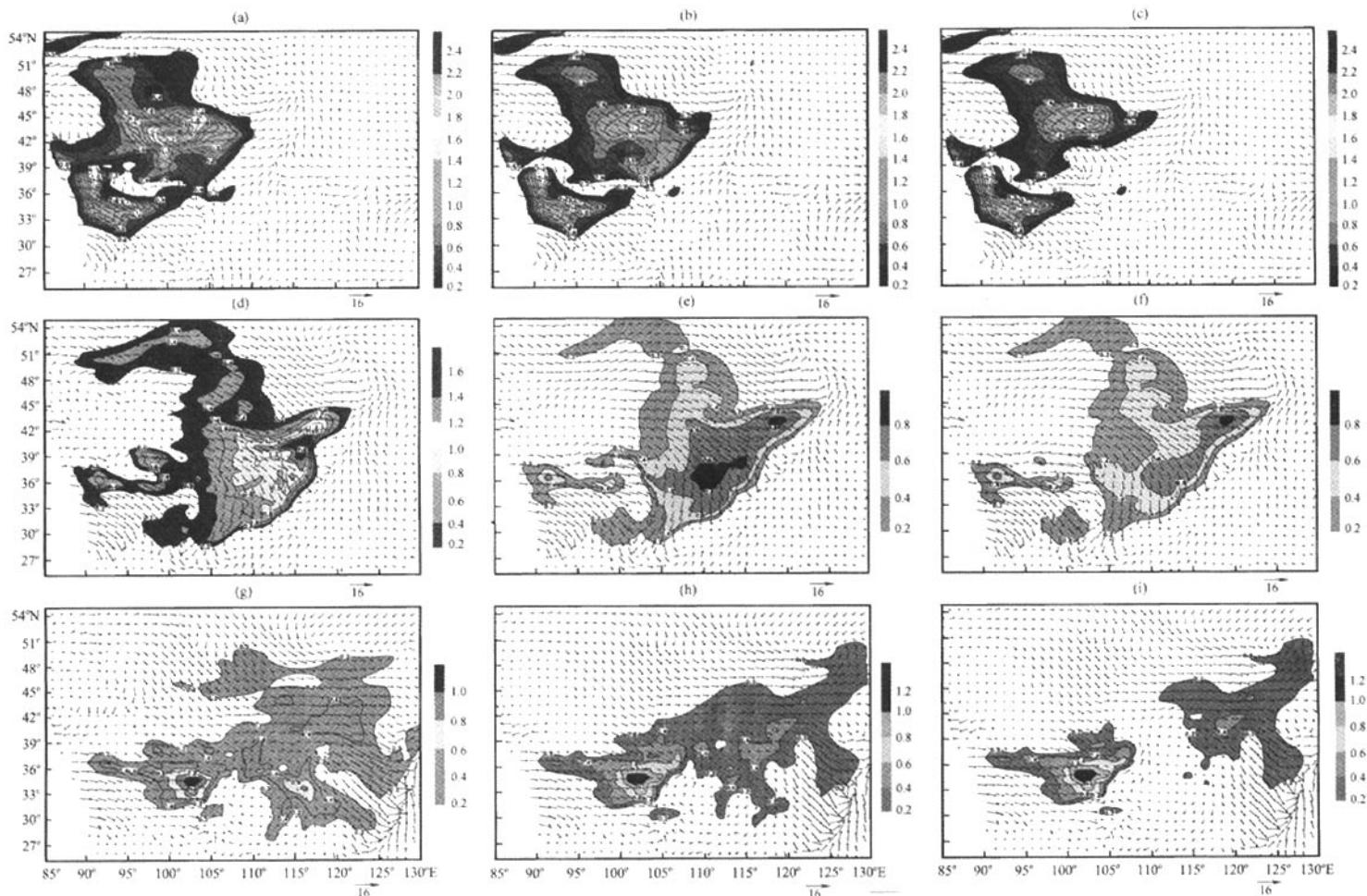


图 6 3月19日17:00(a, b, c), 20日11:00(d, e, f)和21日08:00(g, h, i), 控制试验(a, d, g)、地形敏感试验(b, e, h)和下垫面影响试验(c, f, i)模拟的地面沙尘浓度和地面10 m风场(单位: mg/m³)

Fig. 6 The surface dust concentration and 10 m surface wind field in control experiment(a, d, g), topography sensitive experiment (b, e, h) and underlying surface sensitive

experiment (c, f, i) at 17:00 on 19 (a, b, c), 11:00 on 20 (d, e, f) and 08:00 on 21 (g, h, i) March. Unit: mg/m³

对比图 6d, e 可以看到, 地形改变之后, 向南输送的沙尘强度并没有明显改变, 而向东输送的沙尘强度明显减小。对比图 6e, f 可以看到, 去掉敏感区下垫面起沙之后, 沙尘向南的输送明显减弱, 而向东的输送几乎没有变化。因此, 敏感区下垫面的起沙主要产生向南的输送。

以上试验结果可以使我们大致勾勒出不同区域起沙及地形对其扩展的影响。首先, 沙尘暴形成阶段沙尘主要来源于地形试验敏感区(阿尔泰—萨彦岭及周边地区), 敏感区地形对其强度具有决定性的影响, 且这部分沙尘主要向东扩展, 图 6d, e 向东路径两试验沙尘强度的明显差异表明, 敏感区地形对这一扩展方向上沙尘强度产生巨大的影响, 而图 6e, f 表明, 我国境内的起沙对这一向东的输送影响不大; 其次, 下垫面敏感区(我国境内)的起沙

在沙尘暴形成阶段并不是主要的, 在冷空气扩展至我国境内时其对沙尘暴的贡献开始增强, 这一区域的起沙主要产生向南的输送, 影响其扩展的地形因素是青藏高原东侧强大的地形绕流。当去掉这一区域起沙之后, 图 6f 显示向南输送的沙尘强度明显减小。而图 6d, e 表明, 我国境外的起沙对这一向南的输送影响不大。

5.2.2 地形对沙尘传输方式的影响

在沙尘区的进一步扩展阶段, 对比图 6h, i 可以看到, 去掉内蒙古西部的起沙之后, 内蒙古西部到黄土高原一带的沙尘区基本上消失, 青藏高原沙尘区与我国东部地区的沙尘区出现隔断, 显示到达我国东部地区有可能来自某种分离式传输。需要指出, 在本次沙尘暴过程中青藏高原东部一直有沙尘区出现, 由于青藏高原海拔较高, 以上分析结果并

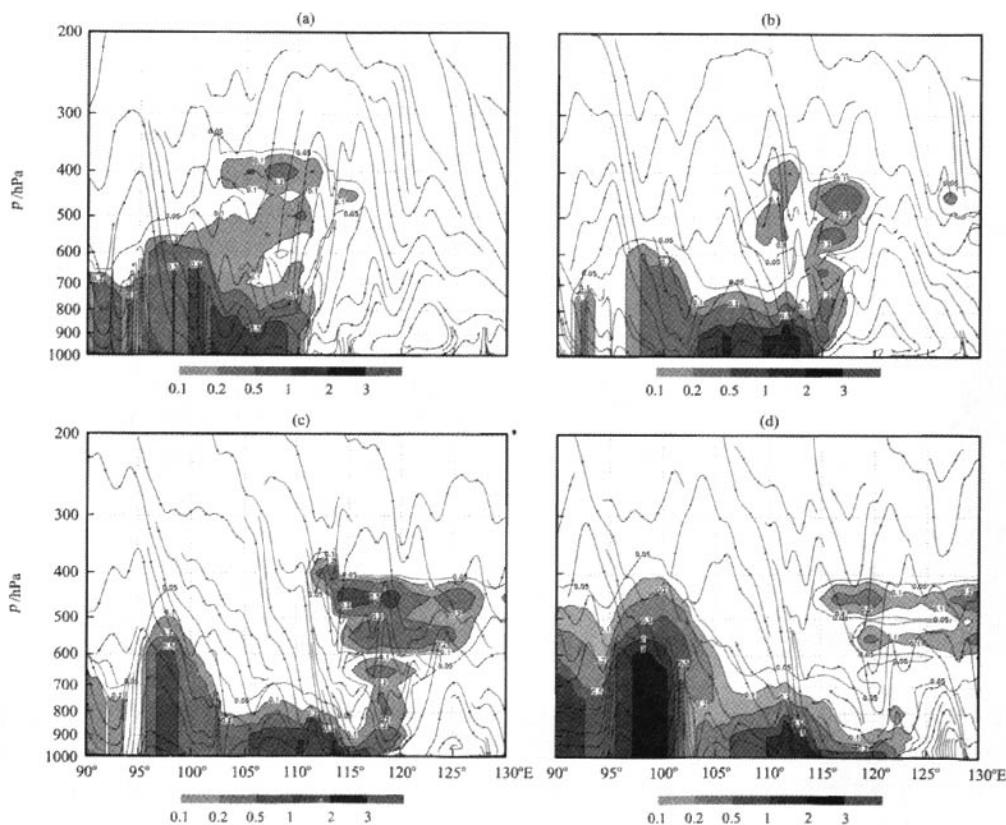


图 7 控制试验模拟的 19 日 23:00(a)、20 日 05:00(b)、20 日 11:00(c) 及 20 日 17:00(d)

沿 38°N 纬向剖面

等值线为沙尘浓度, 单位 mg/m^3 , 流线利用 $u, w \times 50$ 合成

Fig. 7 The cross-section of modeling dust concentration (shading) along 38°N in control experiment at 23:00 on 19 (a), 05:00 on 20 (b), 11:00 on 20 (c) and 17:00 on 20 (d) March. Unit: mg/m^3 .

Contour is dust concentration, stream line is the composited wind with u and $w \times 50$

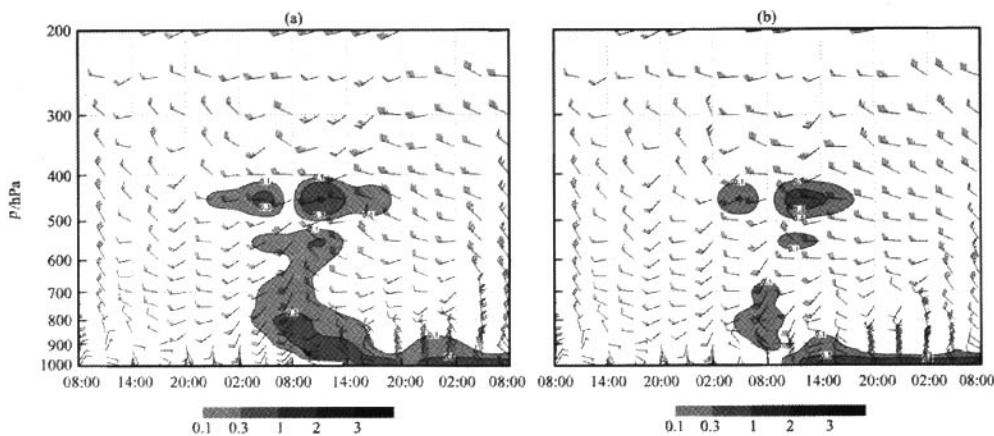


图 8 2002年3月19日08:00~21日08:00沿119°E, 40°N控制试验(a)和下垫面影响试验(b)
模拟不同高度沙尘浓度时间变化(单位: mg/m³)

Fig. 8 The temporal evolvement of the dust concentration in troposphere in control experiment (a) and underlying surface experiment(b) along 119°E, 40°N from 08:00 on 19 to 08:00 on 21 March 2002

不能很好反映这一沙尘区的传输情况。图7给出了19日23:00~20日17:00控制试验经过38°N(高原北端)的沙尘浓度纬向高度剖面图。从图中可以看到, 19日23:00在高原上空有沙尘上扬到达500 hPa左右对流层中层, 与其下方的沙尘区形成连通。至20日05:00沙尘区东移, 沙尘区后部的沙尘与600~700 hPa间的下沉运动配合, 因而该区域将发生明显的沉降, 导致沙尘区后部对流层中层与低层的沙尘区出现分离。至11:00, 600~800 hPa间下沉运动使对流层低层的沙尘浓度大为减小, 而500 hPa左右的沙尘浓度变化很小, 同时, 由于对流层中层沙尘传输速度明显快于对流层低层沙尘扩展速度, 使得对流层中层的沙尘层与地面附近的沙尘区出现整体分离的趋势。至17:00, 对流层中层沙尘传输距离已经大大超前于地面附近沙尘区的扩展距离, 同时, 两个沙尘层之间出现了较明显的分离。可见, 形成于青藏高原的沙尘能够产生接近于引言中提到的分离式传输, 即在高原形成的沙尘可以在中途很少沉降的情况下在对流层中层快速向下游传输。从沙尘层与垂直速度的配合可以进一步看出, 在整个沙尘传输和扩展过程中, 沙尘层的前上方, 即沙尘区前部对流层中层, 往往对应上升运动, 而在沙尘层的后下方, 即沙尘区后部对流层低层, 往往对应下沉运动。由于风速随高度增加而增强的原因, 这一配置必然导致沙尘层在传输过程中的分离, 即高度越高, 传输速度越快, 沉降较

弱; 高度越低, 传输速度越慢, 沉降越强。

导致上述垂直速度特征的原因首先是地形因素, 由于青藏高原的海拔高度在4000 m以上, 因此在高原东北边缘沙尘上扬很容易达到500 hPa, 而此时与沙尘区配合的是上升运动, 当其很快移出高原时, 在高原背风坡由于地形作用产生很强的强迫下沉运动, 这一点从图7中高原东侧强的下沉运动区就可以看到。因此, 这种地形导致的强迫下沉导致沙尘层出现上下分离的趋势。而在其进一步传输过程中, 由于天气系统的移动速度是高层慢于低层, 当对流层低层由于冷空气侵入已经变为冷平流下沉区时, 在对流层中层尚位于槽前上升运动区, 因此, 高层天气系统移动的滞后也将导致在沙尘层的前上方为上升运动, 后下方为下沉运动, 进而导致在沙尘层的进一步分离。

为了进一步验证这一传输方式的存在, 图8给出了119°E, 40°N沙尘浓度的时间—高度演变图。从图中可见, 沙尘浓度随高度的分布明显可以分为两层, 一层位于对流层中层500 hPa以上, 另一层位于500 hPa以下对流层低层直到地面。在控制试验中, 对流层低层的沙尘为上下连通的整体, 但与400~500 hPa间的沙尘区出现明显的分离。而在下垫面影响试验中, 这一分离更为明显, 并表现为对流层中层沙尘浓度变化不大, 而对流层低层沙尘强度大为减小。由于下垫面试验减弱了蒙古国地区及我国境内内蒙古、甘肃、宁夏等地的起沙, 同时

去掉了我国境内(内蒙古及甘肃、宁夏等地)的起沙,因此,对流层低层的沙尘应该主要来源于蒙古国和内蒙古地区,而对流层中层的沙尘可能来自青藏高原。这一点通过对比图7可以得到进一步验证。图7中500 hPa以上形成于青藏高原的沙尘在20日08:00前后应该传输至120°E附近;而图8中119°E附近500 hPa以上的沙尘区刚好也在20日08:00前后到达。说明它们是同一来源。可见,形成于青藏高原的沙尘在向东传输过程中形成了分离式传输。

从图8同样可以看出,在对流层低层来源于蒙古国及内蒙古地区的沙尘其传输方式明显类似于引言中提到的整体推进式传输,即其沙尘层上下连通而没有明显分离。这两种不同的沙尘传输方式的形成原因正如引言中给出的,当地形高度较高且坡度较大时,容易产生分离式传输,而当地形高度较低且坡度较小时,更容易产生整体推进式传输。青藏高原向东的地形分布特点类似前者,而从阿尔泰—萨彦岭山地向东南到内蒙古高原及中原地区的地形特点则与后者较吻合。

目前,关于青藏高原沙尘天气的研究及其关注都不是很多。部分原因是这种分离式传输使得这些沙尘天气对我国的影响相对较小。方小敏等^[17]对产生于青藏高原的沙尘天气进行了研究,指出青藏高原也是我国的一个重要沙尘源地,青藏高原沙尘天气常出现在冬、春季(1~3月),早于我国其它地区沙尘出现的典型季节(3~5月),但与日本等地观测到的气溶胶浓度较高的季节一致。表明高原沙尘天气形成后,进行了分离式的传输。从本文以上分析可以一定程度的验证这一观点。需要指出,我国地形特点既包含青藏高原向东等落差巨大陡峭地形,也包括从西北向东南方向延伸的平缓的下坡地形,这就为不同沙尘传输方式的出现提供了客观条件。

6 结论

本文初步分析、探讨了地形对沙尘扬升、传输、沉降等动力过程的影响,在此基础上,利用沙尘数值预报模式对一次典型蒙古气旋型沙尘暴过程的地形影响进行了模拟研究,得出以下结论:

(1) 地形通过影响沙尘扬升高度、沙尘传输方式、传输方向、传输距离以及通过强迫下沉导致沙尘沉降等对沙尘暴发生、发展和扩展过程的各环节产生影响。

(2) 在蒙古气旋型沙尘暴过程中,天气系统与地形的共同影响使沙尘暴首先在蒙古国西南部和内蒙古西部得到明显加强。之后沙尘暴的扩展方向明显分为向东和向南两个方向。天气系统的影响是导致沙尘向东扩展的一个重要因素;而青藏高原东侧形成的地形强迫绕流是沙尘大规模向南扩展的主要原因。这一特点也决定了在产生于蒙古国的沙尘主要向东输送;而产生于内蒙古西部沙漠区的沙尘则主要向南输送,到达我国中原地区的沙尘主要源于这一输送。沙尘暴形成阶段沙尘主要来源于阿尔泰—萨彦岭及以东地区,之后主要向东扩展,地形对其强度具有重要影响;内蒙古中西部、甘肃、宁夏等地的起沙主要在本次过程沙尘暴持续阶段产生影响,并主要向南输送,青藏高原东侧地形绕流对其强度具有重要影响。

(3) 地形影响使沙尘的扩展可以分为两种不同的方式,当上下游地形落差较小时形成整体推进式传输,其特点是沙尘位于对流层低层,同时,没有沙尘层的分离;当上下游地形落差较大时形成分离式传输,其特点是沙尘位于对流层中层,传输过程中沙尘沉降很弱,同时形成上下沙尘层的分离。源于蒙古国、内蒙古等地的沙尘往往产生整体推进式传输;而产生于青藏高原上的沙尘常形成分离式传输。

致谢:感谢中国气象局北京城市气象研究所程丛兰、刘伟东博士在模拟研究过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 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: 513~521
- [2] 石广玉, 赵思维. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 591~606
- [3] 郑新江, 徐建芬, 罗敬宁, 等. 1998年4月14~15日强沙尘暴过程分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 180~185
- [4] 项续康, 江吉喜. 西北地区强沙尘暴成因的中尺度分析[J]. 高原气象, 1996, 15(4): 448~455
- [5] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 540~547
- [6] 王可丽, 江灝, 吴虹. 2001年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 303~308
- [7] 张杰, 郭锐, 郝志毅. 沙尘气溶胶对西北地区植被遥感的影响分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 116~122
- [8] 康风琴, 李耀辉, 吕世华. 一次强沙尘暴过程中尺度平均动能变率诊断[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 204~211
- [9] 牛生杰, 孙熙渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 604~610

- [10] 成天海, 吕达仁, 徐永福. 阿善达克沙地沙尘气溶胶的辐射强迫[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 920—926
- [11] 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
- [12] 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: 台湾蒙藏委员会出版, 2002: 63—76
- [13] Hacker J P, I G Mckendry, R B Stull. Modeled downward transport of a passive tracer over western north America during an Asian dust event in April 1998[J]. J Appl Meteor, 2001, 42: 397—406
- [14] Arritt R W, J M Wilczak, G M Young. Observations and numerical modeling of an elevated mixed layer[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120: 2869—2880
- [15] 程从兰, 王迎春, 刘伟东, 等. 与动力场相耦合的区域沙尘分层模式及个例模拟[J]. 科学通报, 2004, 46(19): 2007—2013
- [16] Anthes R A, T T Warner. Development of hydrodynamics models for air pollution and mesometeorological studies[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106: 1045—1078
- [17] 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以2003—03—04拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报, 2004, 49: 1084—1090

The Influence of Topography on Dust Storm and Numerical Simulation

SHEN Jian-guo¹⁻², JIANG Xue-gong³, SUN Zhao-bo¹

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

Abstract: Based on the relation between the topography and dust storm and numerical simulation of a dust storm process, a primary analysis of the influence of topography on dust storm was conducted. The results shown that in the early stage of this process the dust particle mainly came from the areas around Altai-Sayan Mountain and Mongolia. The topography conducted serious influence on the intensity of dust storm. It extended eastward dominantly leaded by the cyclonic cold front. In succession, the dust particle coming from central and western of Inner Mongolia conduced a more serious influence on dust storm. It mainly extended southward leaded by the terrain-forcing rolling stream of Qinghai-Xizang Plateau. Meanwhile, the influence of topography on dust storm induced the dust transportation acted as two different manners. The dust particle raised at eastern Qinghai-Xizang Plateau was transported in the middle troposphere and as a so called Spanning manner. It means the dust particle completed the long distance transportation with little subsiding on its path and a separation of dust layers appeared. On the contrary, the dust storm formed at Mongolia and Inner Mongolia extended in the lowed troposphere down to surface and as a so called Total-Pushing manner. It means the dust layers were separated two different layers in its transporting process. One is in the middle troposphere and the other near the surface.

Key words: Dust storm; Topography influence; Numerical simulation