

# 地形影响沙尘传输的观测和模拟研究\*

姜学恭<sup>1</sup> 陈受钧<sup>2</sup>

JIANG Xuegong<sup>1</sup> CHEN Shoujun<sup>2</sup>

1. 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特, 010051

2. 北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871

1. Inner Mongolia Autonomous Regional Meteorological Observatory, Huhhot 010051, China

2. Department of Atmospheric Science, the College of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2006-08-01 收稿, 2006-11-27 改回.

Jiang Xuegong, Chen Shoujun. 2008. An observational and numerical study on the topography influence on the dust transportation. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1):1 - 12

**Abstract** Through the observational statistic analysis and numerical simulation, a study on the influence of topography in eastern Asia on the dust transportation was conducted. The results showed that the high frequency dusty weather regions locate at the west of Inner Mongolia and southwestern Mongolia, especially at the hinterland of deserts, and also locate at the southern Xinjiang basin, especially at the south of it. The second high frequency dusty weather region is on the northeast of Qinghai-Tibet plateau. The dusty weather more frequently occurred at western Inner Mongolia and southwestern Mongolia is owing to some factors favorable for the dust storm formation besides plenty of dust particles can be provided there. Firstly, the canyon jet, which forms at south of Altai-Sayan mountain, enhanced the surface wind speed and so in favor of the buildup of dust storm. Secondly, the southwardly downslope stream carrying a mass of dust particles from Sayan mountain was obstructed by the eastwardly canyon jet and so the dust particles concentrate there and dust storm boosts up. Thirdly, most mountains and hilly lands exist there, which produce the topographical wave and boost up the dust rising. The pattern that dust particles assemble in the atmosphere (form a severe dust storm) before they transport can be say a “dust relay station” forming there.

The topography also affects the spreading of dust storm. The eastwardly canyon jet enhances the eastwardly transportation of dust particles from the “dust relay station”. The downslope stream from the Sayan mountain and the topography forcing circum-stream at the northeast of the Qinghai-Tibet plateau enhances the southwardly transportation of dust particles. Owing to the circum-stream is so strong and the occurrence of cold front is so frequent, which transport the dust particles southwardly too, that the dust transportation in northern China is mostly southwardly and concentrates at west of Huangtu plateau.

**Key words** Dust storm, Topography, Observational and numerical study

**摘要** 文中基于观测资料和数值模拟方法, 研究了东亚地形对中国沙尘传输的影响, 结果表明: 东亚地区沙尘天气多发区主要位于中国南疆盆地和内蒙古西部及蒙古南部。南疆盆地沙尘天气集中在盆地南缘; 而蒙古、内蒙古西部沙尘天气主要出现在沙漠腹地。青藏高原东北侧到黄土高原中部是沙尘天气次多发区。蒙古、内蒙古西部沙漠腹地多发区的形成不仅由于这里提供了丰富的沙源, 同时也具备了沙尘暴迅速增强的条件: 阿尔泰-萨彦岭南侧的峡谷地形强迫形成峡谷急流, 明显增强了该区域地面风速; 萨彦岭山地南坡携带大量沙尘的向南下坡气流遇到东-西向的峡谷气流时受到阻挡形成聚集; 同时, 这一地区起伏的地表产生的地形波加强了地面起沙。这种大量沙尘在大气中聚集之后再进行传输的特征可以视为在大气中形成了沙尘“中继站”。导致沙尘进一步向东输送的地形因素是阿尔泰-萨彦岭山地南侧的峡谷地形, 而萨彦岭山地南坡的下坡气流和青藏高原东北侧的地形强迫绕流是导致沙尘向南输送的原因。由于青藏高原地形绕流的强大以及冷锋过程的相对

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40565003), 科技部社会公益研究专项(2005DIB3J108)。

作者简介: 姜学恭, 主要从事沙尘暴及数值模拟研究。E-mail: jiangxuegong@yahoo.com.cn

频繁使得沙尘的向南输送更为强盛,这也是青藏高原东北侧沙尘天气多发区的形成原因。

**关键词** 沙尘暴, 地形, 数值模拟

**中图法分类号** P445<sup>+</sup>.4

## 1 引言

近年来,亚洲频繁发生的沙尘暴事件引起了世人的广泛关注,沙尘暴不仅频频出现在沙尘源地及其周边地区,同时也通过远距离传输过程到达遥远的下游地区,给这些地区的工农业生产、交通运输、人民生活和身体健康及生态环境造成巨大的危害。据有关研究估计(石广玉等,2003),每年约有1.0—3.0 Gt的沙尘粒子注入大气,而在亚洲仅春季向大气中输送的沙尘就达120 Mt。据Zhang等(2003, 2005),Zhao等(2006)基于数值模拟并结合观测资料对亚洲沙尘排放的研究表明,在春季从东亚到北美西部的中纬度对流层中绝大部分沙尘气溶胶来自亚洲,而蒙古及中国北方的沙漠区(在中国主要为塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠等)则是亚洲沙尘气溶胶的主要来源,亚洲沙尘气溶胶约70%来自这些地区。这些沙尘大约半数(51%)在沙尘源区沉降,其余部分则被气旋冷锋等天气系统扬升至自由大气(3—10 km)并主要沿40°N附近的带状区域向下游输送,其中21%在亚洲内陆沉降,9%在太平洋沿岸沉降,约16%在太平洋中沉降,另有3%跨越太平洋到达北美大陆沉降。Hacker等(2001)就曾对1998年4月形成于蒙古国西部的“越洋”沙尘暴过程进行了分析和模拟研究。

从某种角度来说,沙尘暴之所以广受关注是因为沙尘的远距离输送。且不论沙尘源区和下游地区在人口密度、生产力水平、经济发展程度等方面差异,仅就沙尘暴的影响范围而言,沙尘暴在源区形成后通过远距离传输使其影响区域呈百倍的增长,其对人们生产、生活的影响及对气候、环境及生态的危害也成百倍的增长。因此,沙尘暴事件更应该称为“风送沙尘”过程。就沙尘暴的治理而言,更应该深入了解沙尘传输规律,这样才能放眼全局而不是囿于局部,防治沙尘暴才能事半功倍。

影响沙尘传输的根本因素是天气系统(宋敏红等,2007),它决定了沙尘输送的距离、方向、影响的

范围等。更直接的影响因素是沙尘层的主导气流,这在地形较为平坦的地区往往表现的非常明显,如撒哈拉沙漠的沙尘往往在赤道东风的作用下向大西洋传输。但在地形高度较高和地形起伏较大的地区,沙尘的传输很大程度受到地形的影响(姜学恭等,2003)。亚洲沙尘往往上扬至对流层中上层,是与亚洲沙尘源区多为海拔较高的高原、山地有密切的关系(姜学恭等,2003)。另外,从沙尘源区到下游总的地形特点是西高东低、西北高东南低(上游高,下游低),因此,发生在沙尘源区的沙尘天气很容易沿向东、向南方向向下游扩展,到达东亚广大平原地区及太平洋沿岸,甚至能够跨越太平洋影响美洲西部。然而,对于东亚地形影响沙尘传输的问题,国内外还较少专门的研究。因此,本文拟通过历史统计、观测分析、个例研究与数值模拟等方法初步探讨东亚地形对沙尘暴传输过程的影响。

## 2 东亚地形特点及对沙尘天气的可能影响

沙尘天气包括浮尘、扬沙、沙尘暴。使用资料为中国气象局国家气象信息中心整编的全球沙尘天气地面观测资料,时段为1980年1月1日至1999年12月31日(由于2000年后该资料仅包括沙尘暴资料,而有无该资料对本研究影响不大,故本文未采用),每日02、08、14、20时4次观测。统计的频数为沙尘天气发生日数,即每天只要有一个时次出现沙尘天气,则计为一个沙尘天气日(统计沙尘天气日数对研究沙尘天气的影响和危害更为适宜,一些研究对沙尘天气过程的次数进行统计,但更有利进行天气学分析)。

对比图1、图2可以看到,在东亚有两个明显的沙尘天气多发区,一个位于蒙古南部、内蒙古西部,年平均沙尘天气次数20—50次,明显高于周围其他地区。另外一个在南疆盆地,年发生次数在30次以上,盆地南部边缘达到100次以上。它们也是影响东亚的主要沙尘源区。但是,这两个地区沙尘天气的影响是不同的。发生在南疆盆地的沙尘天气尽管

非常频繁,但较少能够移出盆地,或移出盆地但造成的影响范围较小。而发生在蒙古南部、内蒙古西部的沙尘天气几乎每次都能够完成向东、向南的输送,正如前文提到的,其影响甚至到达太平洋东岸。分析它们的地形特点,也许能够发现一些端倪。首先,这两个地区有一些共同的地形特点,南疆盆地位于天山山脉和青藏高原(昆仑山、阿尔金山)之间的低洼地带(图2);而蒙古南部和内蒙古西部沙漠区则位于萨彦岭山地与祁连山之间广阔的低洼地带。不同的是南疆盆地西侧为帕米尔高原,因此三面环山,向东的出口被天山西北—东南向的支脉与西南—东北走向的阿尔金山脉强迫形成向东的倒喇叭口地形。因此,春季由北向南(或沿西北—东南方向)推进的天气系统在越过天山到达盆地之后,相对难以越过盆地四周山地的阻挡(因为沙尘天气主要发生在边界层中),形成沙尘天气的扩展,当然,极小部分的沙尘能够进入狭窄的河西走廊向东传播,但影响范围很小。而蒙古南部、内蒙古西部沙漠区的北侧

为西南—东北走向的萨彦岭东部支脉,南侧为西北—东南走向的青藏高原东北坡(阿尔金山脉),西部人口则是准噶尔盆地(阿尔泰山与天山之间)的出口,因此形成与南疆盆地正好相反的正喇叭口地形。蒙古、内蒙古西部沙漠区正好位于“喇叭”的中段。因此,在这一区域形成的沙尘天气无疑有利于向东、向南的扩展。更为重要的是,尽管蒙古、内蒙古西部处于相对低洼地带,但从萨彦岭山地沿西北—东南方向到蒙古高原直至黄土高原和华北平原,基本维持一个缓慢的下坡过程。而春季夹带大量沙尘的冷空气南下爆发路径往往就是沿西北—东南方向。这样发生在边界层中的沙尘天气很容易沿西北—东南方向扩展。

可见,从萨彦岭沿东南方向的下坡地形为沙尘天气的扩展提供了有利条件。因此,基于一次影响中国的大范围沙尘天气过程,利用数值模拟和地形敏感性试验,进一步研究上述地形对沙尘天气发生和扩展的影响。

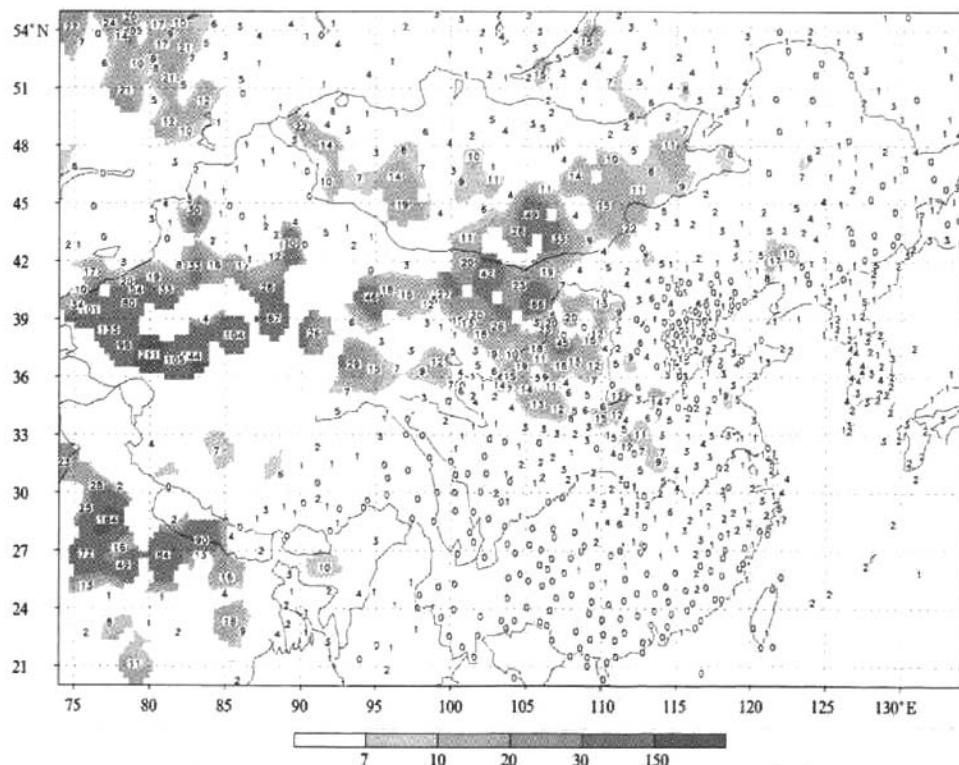


图1 东亚地区沙尘天气年平均日数分布

Fig. 1 The distribution of annual times of dusty weather in eastern Asia

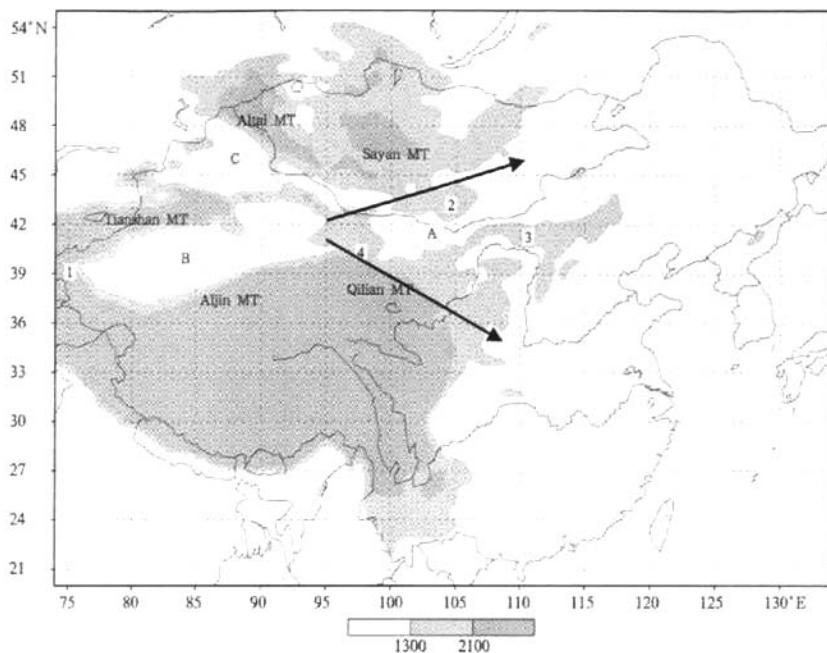


图 2 东亚地形分布

(1 为帕米尔高原, 2 为蒙古境内的戈壁阿尔泰山, 3 为内蒙古中部阴山山脉, 4 为河西走廊人口; A 为蒙古南部、内蒙古西部沙漠区, B 为塔里木盆地, C 为准噶尔盆地)

Fig. 2 The distribution of topography in eastern Asia  
(The number 1 as Pamir plateau, 2 as Gobi Altai Mountain, 3 as Yinshan Mountain,  
4 as the entrance of Hexi corridor, A as the desert area at western Mongolia and  
Inner Mongolia, B as the Tarim basin, C as the Jungar basin)

### 3 天气过程概述

2002 年 3 月 18—22 日沙尘暴过程是近些年影响我国的一次较强沙尘暴过程, 从这次过程东亚地区沙尘天气分布(图 3, 资料来自常规地面观测)可以看到, 在长江以北中国北方大部分地区均出现了沙尘天气, 而国外沙尘天气区主要分布在蒙古及太平洋西岸韩国、日本及中国台湾等地。强沙尘暴主要出现在蒙古及中国内蒙古地区, 其中, 在内蒙古地区存在两个明显的强沙尘暴中心, 一个位于内蒙古西部沙漠区, 另外一个位于内蒙古中部、东部偏南地区。这两个强沙尘暴区占到全国沙尘暴区的 90% 以上。值得注意, 在本次过程中, 河北、北京、吉林等地也出现了沙尘暴, 另外, 整个沙尘暴区的空间分布呈现明显的涡旋形状, 表现出蒙古气旋的重要影响。

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)有一低槽在中亚地区生成, 之后, 低槽东移加深, 19 日 08 时到达中国新疆东部( $95^{\circ}\text{E}$ ), 受其影响, 在阿尔泰-萨彦岭山地东部产生蒙古气旋, 扬沙和沙尘暴天气开始出现在蒙古国中西部。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, 气旋冷锋开始侵入内蒙古。沙尘暴出现在内蒙古西部及中国西北地区。20 日, 高空锋区迅速增强并推进至河套一带, 同时, 地面气旋东移并迅速增强, 气旋冷锋扫过中国北方大部分地区, 带来强烈的沙尘天气。21 日, 气旋东移, 气旋冷锋进入东北地区, 沙尘暴区也推进至吉林、辽宁等地。之后, 气旋减弱东移, 影响中国大部分地区的沙尘暴过程也逐渐结束。而浮尘天气继续东移入海, 影响更广阔的地区。

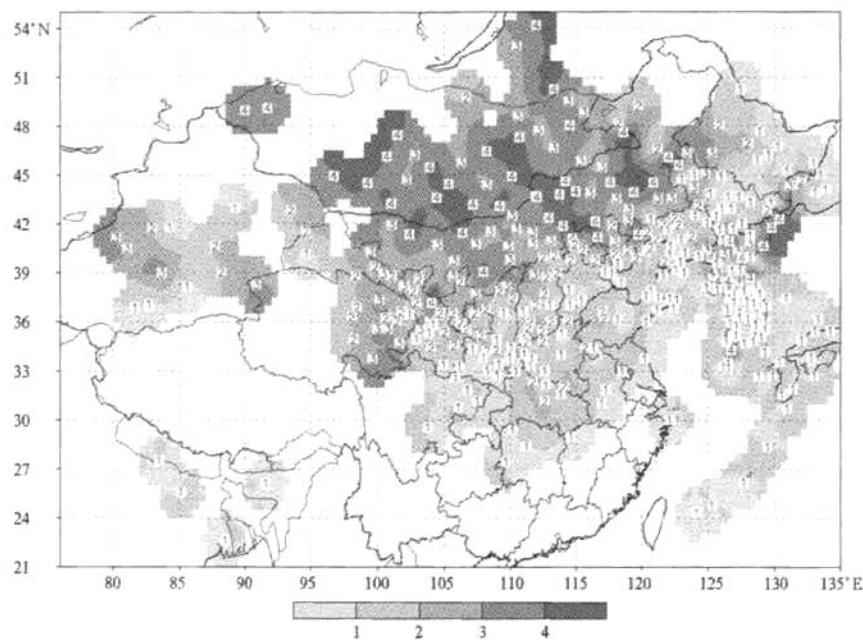


图 3 2002 年 3 月 18—22 日东亚沙尘天气的分布

(1、2、3、4 及不同灰度分别代表浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)

Fig. 3 The distribution of dusty weather in East Asia from Mar 18 to 22, 2002

(1,2,3,4 and different darkness as floating dust, blowing dust, dust storm and severe dust storm respectively)

#### 4 模式简介和模拟方案设计

研究采用的模式为北京城市气象科学研究所开发的沙尘预报模式(程丛兰等,2004)。天气模式为中尺度模式 MM5V3(Authes et al., 1978)。与之耦合的沙尘传输和沉降模式采用与 MM5 相同的  $\sigma$  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决定。起沙后,网格可分辨的沙尘上扬由上升运动和沙尘粒子的沉降速度决定,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。

本文模拟采用 T213 分析和预报场分别作为初始场和侧边界。模式格距 30 km,格点数  $131 \times 121$ ,模拟起始时间 3 月 19 日 08 时(北京时,下同),模拟

时间 48 h。控制试验采用实际地形(图 4a)。地形敏感性试验中,对阿尔泰—萨彦岭山地及其南坡地形高度进行了降低(图 4b)。调整方法为对上述地区的地形高度进行平滑,使地形峰值从 2500 m 左右调整到 1500 m 左右。以下将利用模式输出结果对地形影响沙尘暴的主要阶段(19 日 08 时—20 日 08 时)进行进一步的分析。

#### 5 结果分析

##### 5.1 对沙尘天气的模拟

图 5 分别给出了 3 月 19 日 14 时、20 时及 20 日 02 时、08 时地面观测的沙尘暴强度和控制试验模拟的地面沙尘浓度。可以看到模式对整个沙尘暴发生和扩展过程进行了较好的模拟。19 日 14 时,观测显示大范围的沙尘暴出现在内蒙古与蒙古交界的荒漠化地区,模拟沙尘浓度也在这一地区出现大值区,与实况有着较好的对应。19 日 20 时,观测的沙尘暴增强,站数增加,同时向东有所扩展,而模拟的沙尘浓度也明显增强,从位置上看向东有所推进。20 日 02 时,沙尘区继续向东推进,而模拟的沙尘高浓

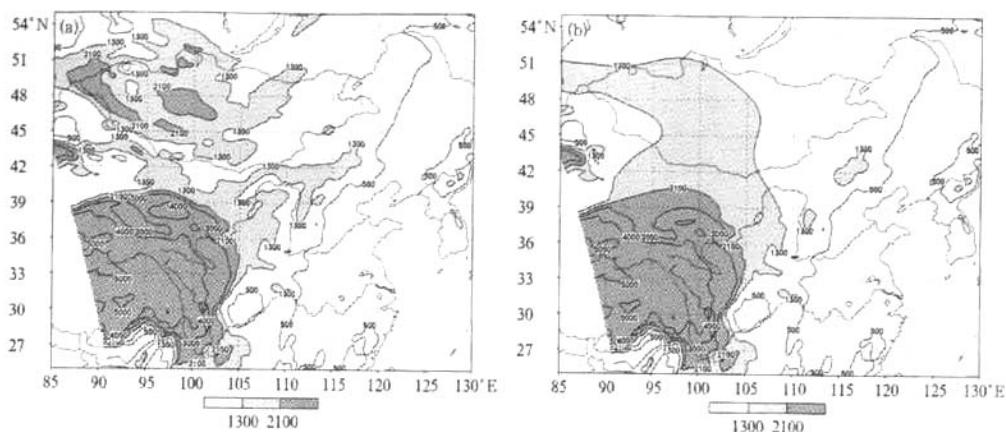


图 4 控制试验(a)和地形敏感试验(b)模式地形高度(单位:m,间隔:400)

Fig. 4 The topography elevation in control experiment (a) and terrain sensitive experiment (b) (unit: m, interval in 400)

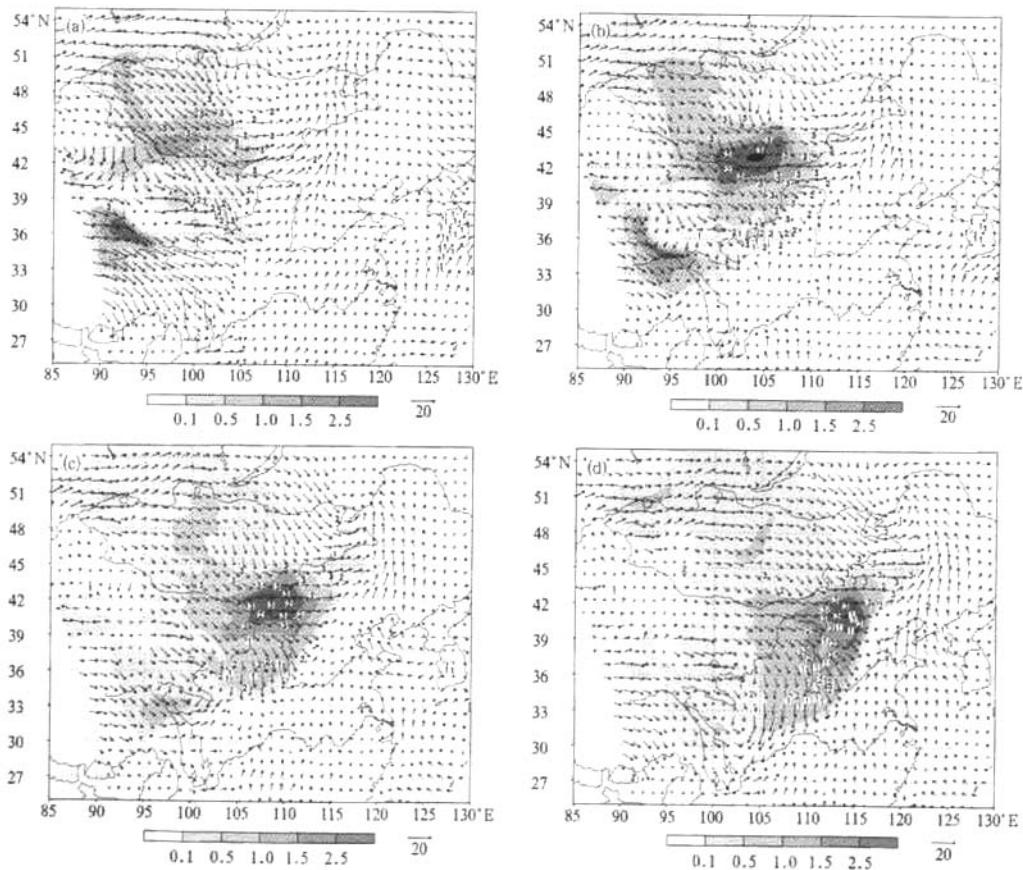


图 5 控制试验 3月 19 日 14 时(a)19 日 20 时(b)20 日 02 时(c)20 日 08 时(d)模拟地面沙尘浓度  
(阴影区,  $\text{mg}/\text{m}^3$ )、地面 10 m 风场和地面观测沙尘天气强度(1 为浮尘, 2 为扬沙, 3 为沙尘暴)

Fig. 5 The observational dusty weather (label, 1, 2, 3 as floating dust, blowing dust and dust storm) and simulant surface dust concentration (shaded,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) and wind field at 10 m above surface in control experiment at 14:00 BST 19 Mar(a), 20:00 BST 19 Ma (b), 02:00 BST 20 Mar(c) and 08:00 BST 20 Mar(d)

度区与之有着很好的对应。至 20 日 08 时,观测显示沙尘区的移动出现了明显的分支,向东已经推进至内蒙古中部和东部偏南地区,强度较强,而向南也出现了一个明显的输送带,到达了陕西和山西的大部分地区。而模拟的沙尘高浓度区也分别向东和向南扩展至上述两地,其中,内蒙古中东部偏南地区强度较强,陕西和山西等地稍弱。可见,模式较好地模拟出了本次过程沙尘暴的发生和扩展过程。

图 5 也显示模拟结果存在一些不足,19 日 14 时,模拟沙尘浓度较地面观测沙尘暴强度略偏弱,因为此时积分仅 6 h,因此模式的 spin-up 效应对沙尘强度具有一定的影响。

## 5.2 沙尘暴发展阶段

从图 5 还可看出,在不同阶段沙尘天气演变过程具有不同的特点:19 日 14—20 时观测显示沙尘暴区主要局限在蒙古南部及内蒙古西部(尽管沙尘暴区向东略有扩展),同时 14 时在蒙古国西南部发生的沙尘暴到 20 时仍然在持续,而内蒙古西部出现沙尘暴的测站明显增多,因此,该阶段沙尘天气主要特点是沙尘暴增强。这一点在模拟结果中有着更明确的反映。之后特别是 20 日 02—08 时,从图 5c、5d 可以看到蒙古西部、内蒙古西部的沙尘暴强度明显减弱或停止,同时主体沙尘区向东的推进和向南的扩展明显加强(特别是向南的扩展)。因此,沙尘区的扩展成为该阶段沙尘天气演变的主要特点。

上述特点与中国北方沙尘暴的一个重要规律是吻合的,即发源于蒙古、内蒙古沙源地的沙尘暴总是在该地区迅速增强之后,才开始向东或向南扩展。其下游的沙尘天气则来源于沙尘暴的扩展。这一表述容易使人简单地理解为“这一地区是沙尘源地”。事实上同样作为沙尘源地,不同地区情况是不同的。从图 1 还可以看到在蒙古及内蒙古西部沙漠腹地沙尘天气发生次数明显要多于其南北两侧(尽管蒙古国常常出现缺测造成资料不连续,但这一特征还是非常明显)。而南疆盆地塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气次数却明显少于盆地南缘,与盆地北缘也只大致相当。尽管沙漠腹地测站较少,但接近沙漠腹地的巴楚站( $39^{\circ}48'N, 78^{\circ}34'E$ )为 33 次,铁干里克( $40^{\circ}38'N, 87^{\circ}42'E$ )为 28 次,沙漠腹地的塔中站( $39^{\circ}N, 83^{\circ}40'E$ )从 1999 年才有连续的沙尘天气观测,1999 年至 2002 年共出现沙尘天气 96 次,年均 24 次。而沙漠南缘均在 100 次以上。可见,尽管

1999 年至 2002 年为沙尘天气多发期,但塔中年均沙尘天气次数仍远小于盆地南缘。从钱正安等(2002)给出的 1952—2001 年中国北方沙尘天气分布图和 1964—1998 年中国北方、蒙古沙尘天气分布图也可看出南疆盆地南缘的沙尘暴出现次数明显高于盆地腹地,而蒙古西部、内蒙古西部沙漠腹地反而是沙尘暴日数高值区。可见这一统计事实还是准确的。对这一现象的一个合理的解释是:尽管沙尘都来源于沙漠腹地,但塔克拉玛干沙漠腹地不具备沙尘天气迅速增强的条件,因此,沙尘天气形成后并未迅速增强,而是在沙尘区向下游扩展到具备了其增强条件的地区时,才进一步增强。而盆地南缘地形强迫的抬升显然提供了使其增强的动力条件。在蒙古、内蒙古西部沙漠腹地,由于具备了使沙尘暴迅速增强的条件,因而沙尘天气总是在此迅速增强,然后进行进一步地扩展。

从控制和地形敏感试验 19 日 20 时地面沙尘浓度分布(图 6a、6b)可以看到,尽管两试验模拟的沙尘区位置和范围基本上一致,但两者强度存在巨大差异,控制试验沙尘中心强度为  $2.8 \text{ mg/m}^3$ ,而地形敏感试验仅为  $1.2 \text{ mg/m}^3$ ,且控制试验整个沙尘区的浓度明显较强。在未改变地面起沙条件的情况下,这一变化应该说是非常巨大的。由于此阶段是沙尘暴在进行扩展之前的迅速增强阶段,因此,前文提到的这一地区有利于沙尘暴增强的客观条件应该是地形因素。

图 7a、7b 为两试验地形与地面 10 m 风场分布。进一步分析该地区地形特点可以发现:在向东敞开的喇叭口地形的中部,绵延分布着两条准东西走向的山脉,一个是位于蒙古南部的戈壁阿尔泰山,一个是位于内蒙古中部的阴山山脉(图 2)。这两条山脉之间形成了明显的峡谷地形,并与阿尔泰-萨彦岭山地南侧喇叭口附近的峡谷连接,形成了绵延近 2000 km( $90^{\circ}\text{--}110^{\circ}E$ )的狭长的峡谷地带。这一峡谷地形对低层气流产生了很大的影响。从图 7a 控制试验的地面 10 m 风场可以看到,在峡谷中,气流被峡谷约束,变为与峡谷走向严格一致的准东西向的“峡谷气流”。而其南北两侧则是明显的西北气流。而在敏感试验中,这一区域气流为一致的西北气流。故峡谷地形首先改变了大气低层风场的方向。另外,峡谷地形具有的一个重要作用是导致气流遇到山壁形成绕流,从而使气流在峡谷中增强形成“峡谷

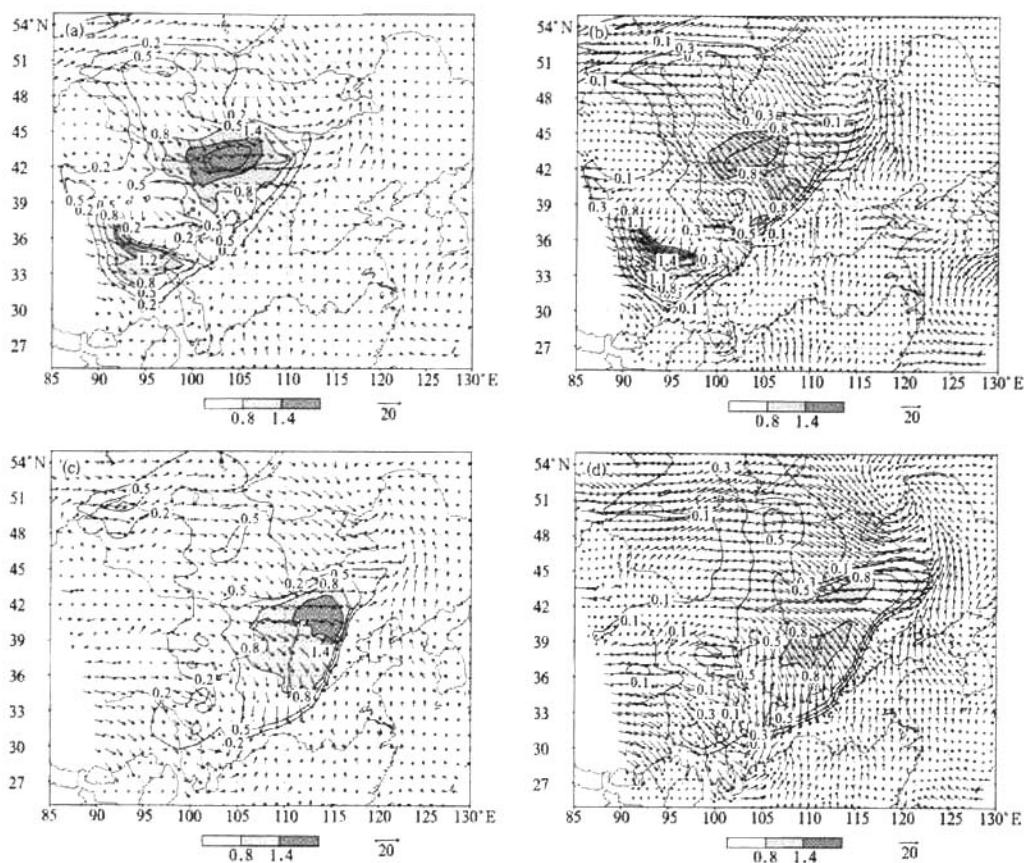


图 6 3月19日20时控制试验(a)和地形敏感试验(b)及3月20日08时控制试验(c)和地形敏感试验(d)模拟地面沙尘浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )和10 m风场

Fig. 6 The surface dust concentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) and wind field at 10 m above surface in control experiment at 20:00 BST 19 Mar (a), 08:00 BST 20 Mar (c) and sensitive experiment at 20:00 BST 19 Mar (b), 08:00 BST 20 Mar (d)

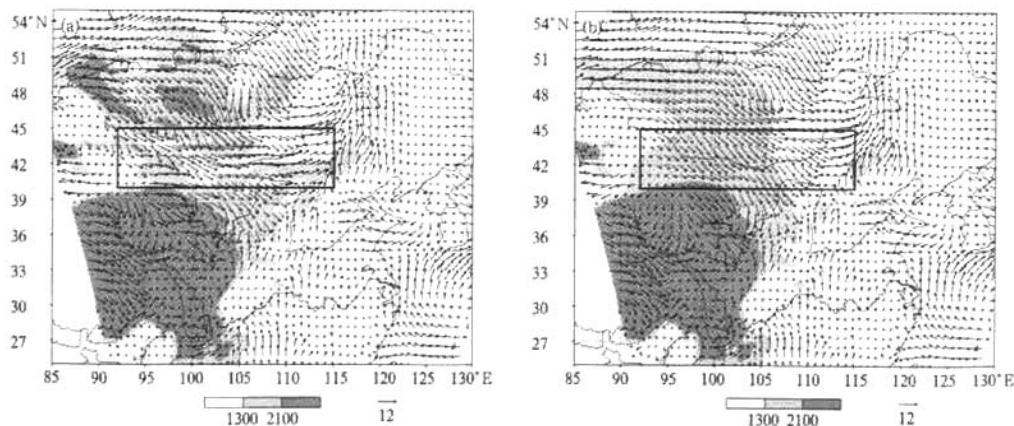


图 7 控制试验(a)和地形敏感试验(b)地形高度(阴影区大于1300 m)和19日20时10 m风场

Fig. 7 The topography elevation (shaded, above 1300 m) and surface wind field at 20:00 BST 19 Mar in control experiment (a) and sensitive experiment (b)

急流”,从图 8 控制试验与地形敏感试验地面 10 m 风速差值可以看到,就在峡谷所在区域,控制试验比地形试验风速强 2—4 m/s,而其周围风速改变很小。可见,该峡谷地形也使蒙古、内蒙古西部的地面风速明显增强。对比图 1 塔克拉玛干沙漠的情形,可以看出由于南疆盆地腹地为广阔的沙漠,明显不具备使地面风速在此增强的条件。而地面风速的大小对沙尘暴强度具有直接的影响(王小玲等,2004),因此,蒙古、内蒙古西部峡谷地形导致的地面风速增强是沙尘暴在该地区迅速增强的一个重要原因。

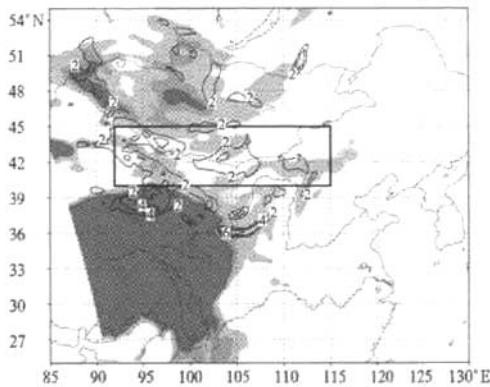


图 8 控制试验和地形敏感试验 19 日 20 时 10 m 风速差值  
(阴影区为控制试验地形高度大于 1300 m; 单位:m/s 间隔:2)

Fig. 8 The difference of wind speed at 10 m above surface at 20:00 BST 19 Mar between control and topography sensitive experiments  
(unit: m/s, interval in 2; shaded area is the topography elevation in control experiment above 1300 m)

从图 7 还可看到,在阿尔泰-萨彦岭山地南坡为一致的西北气流(位于气旋冷锋后),而在峡谷区为偏西气流,因此峡谷气流对这支下坡气流产生明显的阻挡。而图 5 中 19 日 14—20 时实况沙尘天气分布显示,此时在阿尔泰-萨彦岭山地南坡有大范围的沙尘暴产生(尽管山地上测站较少),因此这支下坡气流是携带大量沙尘的,该气流被峡谷气流阻挡势必导致沙尘在峡谷区聚集,从而导致该地区沙尘暴的增强。从图 1 的统计结果可以看到,阿尔泰-萨彦岭山地南坡也是一个明显的沙尘天气多发区,与相同海拔高度的山地相比,这一特点非常明显。而山地的沙尘在下坡向南推进过程中被峡谷气流阻挡并聚集,显然是蒙古、内蒙古西部沙尘暴得以迅速增强的另一原因。

蒙古、内蒙古西部还有一个地形特点,即:与其他地区相比分布着较多的山脉、山地(图 2),这些山地虽然地形落差不大,但散布较广,数量众多。这些山地的一个重要影响就是地形起伏导致的地形波。这些地形波在山地迎风坡形成地形强迫抬升,背风坡则产生下沉。而地形强迫抬升无疑会加剧地面起沙。地形波生成的同时也自下而上地向对流层中传播。因此,扬起的沙尘中有一部分将会被进一步上扬(参与这一过程的还有系统性的上升运动)。这一因素也将导致该地区沙尘暴增强。相对而言,较为平坦的南疆盆地显然不具备这样的条件。图 9 为两试验穿过蒙古南部的纬向剖面图,可以看到控制试验中地面有着明显的地形起伏。且这些地形起伏导致的地形波不仅出现在边界层中,同时也向上扩展到对流层。即使是非常微小的地形起伏,其导致的地形波也能够向上充分扩展,到达对流层中层。不仅如此,这些地形起伏也能够明显加大大气与地表的接触面积,从而有利于地面起沙。而敏感试验中在沙尘区上空基本上未出现波长较小的地形波。

为了衡量敏感试验地形改变之后对蒙古气旋的影响,对比了两试验气旋强度的变化,发现这一改变出乎意料的微小。19 日 20 时控制试验和地形敏感试验气旋强度分别为 1006 和 1005 hPa,而 20 日 08 时两者均为 997 hPa。另外,通过图 6 风场得出的气旋中心位置来看,两者几乎完全一致。因此,可以说两试验沙尘强度的改变应该源自地形影响。地形因素是孤立于天气系统之外的自然因素,因而具有普遍性。需要进一步说明的是:蒙古、内蒙古西部沙尘暴“先增强,再扩展”的情形类似于在该地区大气中形成了可以称之为沙尘“中继站”的沙尘聚集区。它不同于塔克拉玛干沙漠沙尘扬起后即被吹走,在遇到高原阻挡才增强的情形。其意义在于:如果沙尘是首先在大气中实现高度聚集,然后进行扩展,则其扩展过程很大程度地遵循天气过程发展、演变规律,这样我们在追踪这些沙尘时就有章可循。

### 5.3 沙尘暴扩展阶段

沙尘暴在蒙古、内蒙古西部得到迅速加强后,开始向东和南扩展,此时仍然受到地形的影响。图 6c、6d 为两试验 20 日 08 时地面沙尘浓度,可以看到由于前述的地形影响,沙尘强度已大为减弱。但撇开沙尘强度,从沙尘区扩展方向上可以看到,控制试验中沙尘主体向东扩展,而敏感试验中沙尘向南

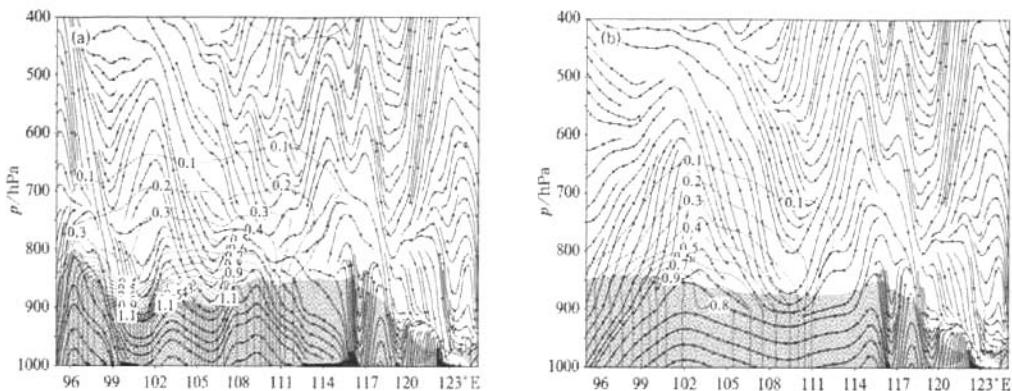


图 9 控制试验(a)和地形敏感试验(b)19 日 20 时沿 42°N 纬向剖面  
(等值线为沙尘浓度,单位  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,间隔 0.1,流线利用  $u, w \times 50$  合成)

Fig. 9 The cross section along 42°N at 20:00 BST 19 Mar in control experiment (a) and sensitive experiment (b)  
(The isolines represent dust concentration, unit in  $\text{mg}/\text{m}^3$ , interval in 0.1, The stream line is the resultant wind with  $u$  and  $w \times 50$ )

的扩展反而略强,表明地形的改变削弱了沙尘向东扩展的强度。

决定沙尘区扩展的核心因素是天气系统。对本次过程而言,该系统是蒙古气旋。由于沙尘区主要出现在气旋冷锋后部(姜学恭等,2003),因此气旋后部气流方向决定了沙尘区的扩展方向。蒙古气旋从发展到成熟(或直至锢囚)的过程中,气旋冷锋后部气流方向基本上是从西北—东南向到准东西方向最终变为西南—东北向。因而沙尘区的扩展也经历从向南到向东直至向东北方向的改变。本阶段为气旋成熟阶段,因此导致沙尘向东输送的一个因素是气

旋冷锋后的偏西气流,地形改变不会影响这一气流方向。而导致沙尘向东输送的地形因素是前文提到的峡谷气流。由于萨彦岭山地南坡向南的下坡气流被峡谷气流阻挡,沙尘完成聚集之后部分沙尘将变为向东输送(图 7)。地形改变之后,向东的峡谷气流消失,沙尘向东输送的强度随之减弱。图 10 两试验  $u$ 、 $v$  差值能够验证这一点,图中在内蒙古中西部,敏感试验西风分量明显弱于控制试验,说明向东输送减弱;而在内蒙古中部,敏感试验北风分量明显强于控制试验,表明向南输送增强。可见,敏感试验沙尘主体向东扩展的减弱是由于地形因素。

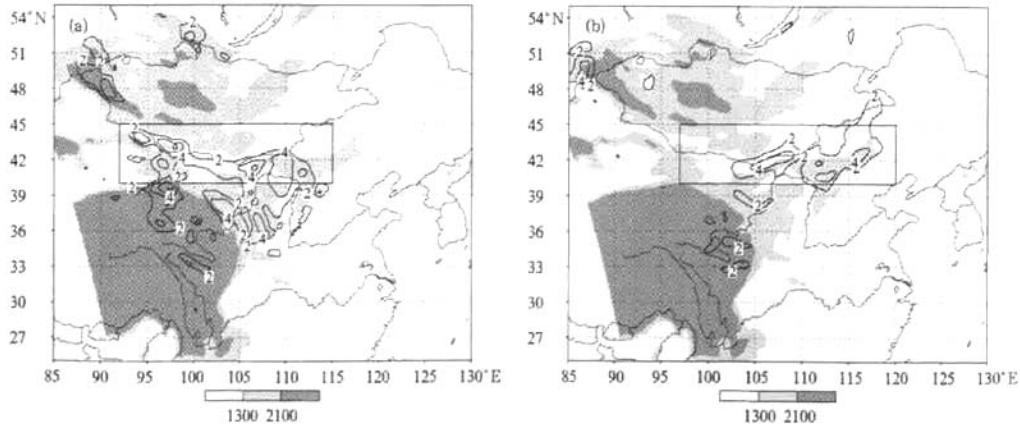


图 10 控制试验和地形敏感试验 20 日 08 时 10 m 风场  $u$  分量差值(a)和  $v$  分量差值(b)  
(阴影区为控制试验地形高度;单位:m/s,间隔 2)

Fig. 10 The difference of  $u$  component (a) and  $v$  component (b) of wind field at 10 m above surface  
at 20:00 BST 19 Mar between control and sensitive experiment  
(Unit in m/s, interval in 2;Shaded area is the topography elevation in control experiment)

图 1 中,中国沙尘天气的次多发区(也是沙尘源区之外发生沙尘天气最多的地区)位于青藏高原东北边缘到黄土高原中部一带。由于不是沙尘源区,因此这一多发区的形成显然是由于沙尘输送。解释这一现象需要综合分析中国北方沙尘输送的特点。如图 11,导致沙尘向南输送的地形强迫因素有两个,一个是前文得出的萨彦岭山地南坡的下坡气流,强度相对稍弱,另一个是青藏高原产生的地形强迫绕流,从图 7 可以直观地看到,由于青藏高原水平和垂直尺度很大,青藏高原东北边缘西北—东南向的地形强迫绕流非常强大,从高原东北边缘一直到黄土高原中部,垂直方向可以达到对流层中层。而导致沙尘向东输送的地形因素仅仅是峡谷强迫的峡谷气流。因此向南输送的强度明显要强于向东输送。从天气系统角度考虑,总体上蒙古气旋导致沙尘向东输送,冷锋导致沙尘向南输送。近些年蒙古气旋引发的沙尘暴相对频繁,使研究者更多的关注蒙古气旋,但从历史统计来看刘景涛等(2004),导致中国北方强沙尘暴的天气系统中,冷锋占 76%,而蒙古气旋仅为 12%。因此,天气系统主要导致沙尘向南输送。综合地形和天气系统因素,也就是沙尘主要向南输送并集中在青藏高原东北边缘到黄土高原中部的原因。

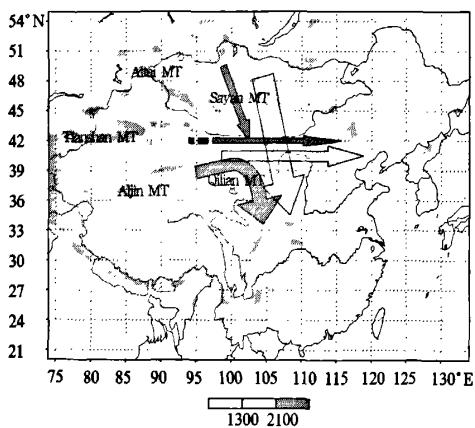


图 11 影响中国北方的沙尘输送示意图  
(黑色箭头代表地形强迫因素,向东表示峡谷气流,向南表示下坡气流,高原东侧为地形绕流。白色箭头代表天气系统因素,向南代表冷锋,向东代表蒙古气旋)  
Fig. 11 The concept model of dust transportation in northern China  
(the black arrow as factors induced by the topography, white arrows as factors induced by the weather systems)

## 6 讨论

本文基于观测资料探讨了东亚地形对沙尘输送的可能影响,同时,结合沙尘天气过程并利用数值模拟方法,初步研究了东亚地形对中国北方沙尘传输的影响。发现:东亚地区的两个主要的沙尘天气多发区一个位于中国南疆盆地,另一个位于中国内蒙古西部及蒙古南部。其中,南疆盆地的沙尘天气更多集中在盆地南缘;蒙古、内蒙古西部沙尘天气更多的集中在沙漠腹地。另外,青藏高原东北侧到黄土高原中部也是沙尘天气发生次数相对较多的地区。

沙尘天气多发区出现在蒙古、内蒙古西部沙漠腹地是由于这里具备了沙尘暴迅速增强的条件,首先是阿尔泰-萨彦岭南侧的峡谷地形强迫形成峡谷急流,明显增强了该区域地面风速。同时,萨彦岭山地南坡携带大量沙尘的向南下坡气流遇到东西向的峡谷气流时受到阻挡形成沙尘的聚集。另外,这一地区起伏的地表产生的地形波加强了地面起沙。这种大量沙尘在大气中聚集之后再进行传输的特征可以视为在大气中形成了沙尘“中继站”。

导致沙尘从“中继站”进一步向东输送的地形因素是阿尔泰—萨彦岭山地南侧的峡谷地形,而萨彦岭山地南坡的下坡气流和青藏高原东北侧的地形强迫绕流是导致沙尘向南输送的原因。在天气系统角度,冷锋基本上导致沙尘向南输送,蒙古气旋成熟阶段冷锋后部偏西气流则产生向东的输送。由于青藏高原地形绕流的强大以及冷锋过程的相对频繁使得沙尘更多地向南输送,这也是沙尘输送主要集中在青藏高原东北侧到黄土高原中部的原因。

## References

- Anthes R A, Warner T T. 1978. Development of hydrodynamics models for air pollution and mesometeorological studies. Mon Wea Rev, 106(1): 1045-1078
- Cheng Conglan, Wang Yingchun, Liu Weidong. 2004. Study and case simulation of a regional dust model coupled with a nonhydrostatic dynamics model. Chinese Science Bulletin, 46(19):2007-2013
- Hacker J P, Mckendry I G, Stull R B. 2001. Modeled downward transport of a passive tracer over western north America during an Asian dust event in April 1998. Jour App Meteor, 40(9):1617-1628
- Jiang Xuegong, Shen Jianguo, Liu Jingtao, et al. 2003. Observational and numerical simulation study of some weather factors leading a

- severe dust storm. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 61 (5):606-620
- Liu Jingtao, Qian zhengan, Jiang Xuegong, et al. 2004. A study on weather types of super severe dust storms in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (8):540-548
- Qian Zhengan, Cai Ying, Liu Jingtao. 2002. Some questions in dust storm research in northern China// *The Workshop Corpus on Dust Storm Research* (in Chinese). The Taiwan Mongolia-Tibet Committee Press, 63-76
- Shi Guangyu, Zhao Sixiong. 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 27 (4) :591-606
- Song Minhong, Qian Zhengan, Cai Ying. 2007. Analyses of spring mean circulations for strong and weak dust-stormactivity years in China-Mongolia area. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65 (1): 94-104
- Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2004. The spatial nand temporal variations of spring dust storms in China and its associations with Surface winds and sea level pressures. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (1):96-103
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophys Res Lett*, 30 ( 24 ): 2272 doi: 10. 1029/2003GL018206
- Zhang X Y, Wang YG, Wang D, et. al. 2005. Characterization and sources of regional-scale transported carbonaceous and dust aerosols from different pathways in coastal and sandy land areas of China *Geophys Res*, 110: D15301, doi:10.1029/2004JD005457
- Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. 2006. A simulated climatology of asian dust aerosol and its trans-pacific transport. Part I : Mean climate and validation. *J Climat*, 19 (1):88-103

### 附中文参考文献

- 程从兰,王迎春,刘伟东等. 2004. 与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟. *科学通报*, 46 (19):2007-2013
- 姜学恭,沈建国,刘景涛等.2003. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究. *气象学报*, 61(5):606-620
- 刘景涛,钱正安,姜学恭等. 2004. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究. *高原气象*,23(8):540-548
- 钱正安,蔡英,刘景涛等. 2002. 中国北方沙尘暴研究若干问题// *沙尘暴学术研讨会文集*. 台湾蒙藏委员会出版:63-76
- 石广玉,赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题. *大气科学*, 27(4):591-606
- 宋敏红,钱正安,蔡英等. 2007. 中蒙强、弱沙尘暴年春季平均环流及沙尘活动变化分析. *气象学报*, 65(1):94-104
- 王小玲,翟盘茂. 2004. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. *气象学报*, 62(1):96-103