

# 2000年春季沙尘暴动力学特征\*

周秀骥 徐祥德 颜鹏 翁永辉 王建林 P4 A

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要** 综合分析研究2000年春季影响北京地区沙尘暴天气过程, 揭示了沙尘暴天气在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中关键动力学问题。研究结果表明, 2000年3~4月份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, 沙尘暴活动特征可用起沙-扬沙-远距离输送综合物理模型来描述。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。

**关键词** 沙尘暴 起沙 扬沙 气溶胶 摩擦速度

由于植被破坏、土壤风蚀, 在一定的气候背景和天气形势下, 冷锋伴随的大风将土壤尘粒卷入空中而导致沙尘暴天气爆发, 沙尘暴的形成既是沙粒运动力学问题, 也与不同尺度天气、气候背景的动力结构有关。

图1为1993年5月5日沙尘暴到达金昌市以及沙尘笼罩都市上空的情景。Sahara沙尘暴期间沙尘流顶高一般在1.5~6 km之间<sup>[1]</sup>, 1983年6月沙尘暴期间游来光等<sup>[2]</sup>在阿拉善附近地区进行的飞机观测表明, 在2~3.3 km高度层内有一高沙尘含量层, 其中沙尘含量大部分是2~32 μm大小的粒子(图2)。此次还在银川3000 m上空发现最大尘粒直径为350 μm的粒子(其重力



图1 1993年5月5日沙尘暴到达金昌市的情景

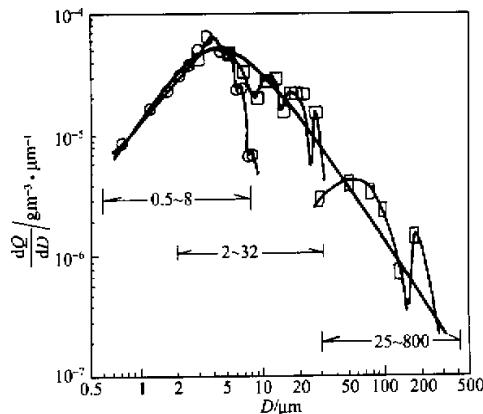


图2 1983年6月10日飞机探测和测得的大气中沙尘质量密度谱<sup>[2]</sup>

2001-07-21 收稿, 2001-10-18 收修改稿

\* 国家重点基础研究发展计划项目(编号: G1999045700)

沉降速度大约 2 m/s), 这些观测事实表明, 将如此大的尘粒带到 3000 m 高空, 必须有很强的上升气流。研究在沙源区边界层湍流运动和锋面附近垂直环流, 以及有多少粒子被扬起、多大粒径的粒子能抬升到多高等诸多问题, 是进一步解决沙尘气溶胶远距离输送问题的理论基础。对于沙尘暴期间沙尘粒子的长距离输送, 刘东生等较早提出了黄土堆积源于中国沙漠贡献的论点<sup>[3]</sup>; 张德二通过历史时期中国降尘的天气气候学分析, 指出中国降尘来自沙漠, 而不是黄土高原<sup>[4]</sup>。张小曳等通过对“近源”中国沙漠与“远源”高空西风粉尘的元素示踪分析, 证明晚第四纪以来输入黄土高原的粉尘其源地主要是中国沙漠<sup>[5]</sup>。Iwasaka<sup>[6]</sup>对 1979 年 4 月一次沙尘暴的轨迹分析认为, 到达日本上空的沙尘主要源于 40°~50°N, 100°~110°E 地区, 即我国戈壁、黄土高原、内蒙古等地区。更有甚者, 在夏威夷群岛的 Mauna Loa 观测站也发现有来自亚洲沙尘气溶胶的个例<sup>[7]</sup>。

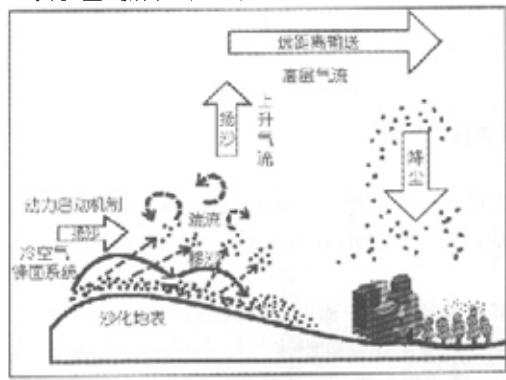


图 3 沙尘暴过程示意图

根据 1983 年 6 月 10 日发生在阿拉善沙漠及附近地区一次沙尘暴过程的飞机探测资料, 估算了沙尘区下游不同距离处大气沙尘质量沉降的百分比<sup>[2]</sup>, 计算中取沙尘高度约 3000 m, 水平风速 10 m/s, 粒子落速并按 Stokes 公式计算, 则大约有 25% 的沙尘量沉降在下游 250 km 范围内, 50% 的沙尘量沉降在 1000 km 范围内, 有 20% 的沙尘量可输送至 10000 km 以远的地区。

因此, 研究沙尘暴发生、远距离输送及其影响的关键问题是研究沙尘暴粒子的起动、搬运过程及其动力条件(图 3)。

## 1 沙尘暴形成的天气、气候背景

一般情况下, 我国沙尘暴天气均由春季强冷空气活动所造成。2000 年 3 月以来, 我国上空维持着一支强劲的西北气流, 地面冷空气不断向东南方向移动, 并影响我国。在蒙古共和国到我国北方地区生成 13 个温带低气压, 比年平均多了近 1 倍<sup>[1]</sup>(图 4)。春季这类活跃的冷空气活动

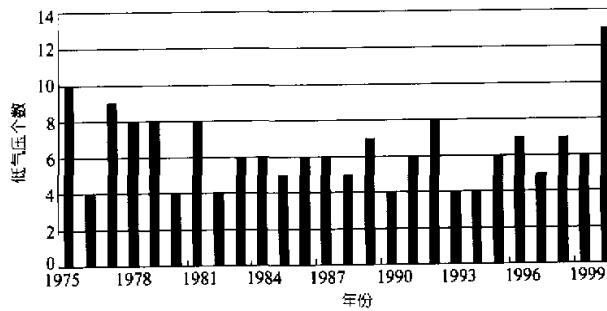


图 4 蒙古共和国到我国北方地区 3~4 月出现的温带低气压个数<sup>[1]</sup>

1) 中国气象局, 今年我国北方地区沙尘天气概况、成因及对策建议, 2000 年 5 月 18 日

可能是沙尘天气频繁的直接原因。对比近40年4月份北京等6个代表站下午平均风速大于6 m/s的日数与沙尘暴和扬沙总日数的逐年变化可发现,两者的振荡和多年变化趋势相当一致<sup>[1]</sup>,由此可见,春季冷空气活动异常可能是提供沙尘暴发生、发展的重要动力条件。

## 2 起沙与传输的动力机制

沙尘的吹扬与地表土壤特征、植被和地表风应力有关。Gillette<sup>[8]</sup>通过粒子质量通量(粒子半径小于10 μm)与地面摩擦速度的测量发现,只有当摩擦速度超过某个临界数值(定义为扬沙起动临界摩擦速度 $U_c^*$ )时,粒子才可能起动。

即,当

$$U \geq U_c^*, \text{ 则沙粒起动.}$$

其中摩擦速度 $U^* = \sqrt{(U'W')}$ , 可由近地层风廓线计算:

$$U = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (1)$$

$U$ 为 $z$ 处风速,  $k$ 为Von Karman常数( $k=0.4$ ),  $z_0$ 为地面粗糙度(对沙土取0.1 cm)。

沙粒起动后,随着风力加大,产生沙粒群跳跃、滚动等非常复杂的运动(图3),形成近地面沙粒群的水平移动。扬起的沙粒在边界层通过湍流扩散和锋面附近的上升气流向空中输送,而在边界层顶以上,则主要靠上升气流带向高空。

沙尘向上的输送量:

$$F(z) = (W - V_g(r))N(r) - K_a \frac{\partial N(r)}{\partial Z}. \quad (2)$$

对细小粒子,  $V_g(r)$ 可由 Stokes 公式算出:

$$V_g(r) = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho - \rho_a)}{\eta} \cdot gr^2. \quad (3)$$

$K_a$ 为沙尘物质的湍流扩散系数,它与湍流强度、湍谱结构以及粒子物理特性有关;  $V_g$ 为粒子的重力沉降速度,由粒子性质决定,  $W$ 为垂直运动速度,  $N(r)$ 为沙尘粒子浓度,  $r$ 为粒子半径,  $\rho$ ,  $\rho_a$ 为粒子和空气密度,  $\eta$ 为空气粘滞系数。

野外风洞实验<sup>[9]</sup>表明,起动临界摩擦速度 $U_c^*$ 与下垫面土壤特性有很大关系,对不同土壤特性和下垫面特征,起动摩擦速度可在20~150 cm/s之间变化。表1表明Sahara沙漠地表特征和起沙临界摩擦速度的关系。从表1可见,松土层性质下垫面的临界摩擦速度 $U_c^*$ 明显小于紧土层下垫面,即 $U_c^*$ 松土 <  $U_c^*$ 紧土。

表1 Sahara沙漠地表特征与临界摩擦速度<sup>[10]</sup>

地面类型	$U_c^*/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	
	紧土	松土
Sebkas chotte(dry lake)干盐湖	150	35~150
Regs(desert flat)平坦沙漠	60~100	25
Desert dunes 起伏沙漠	100~150	60~100
Sand dunes 沙丘	20~40	20~40

1) 中国气象局, 今年我国北方地区沙尘天气概况, 成因及对策建议, 2000年5月18日

2000 年春季沙尘暴发生与特定的气候背景有关。我国历史时期降尘的天气气候分析表明<sup>[4]</sup>, 降尘频繁期对应于冷、干气候期。到 1999 年冬之前, 我国持续 13 年暖冬, 而 2000 年冬季气温突降, 成为自 1987 年以来的最寒冷冬季, 特别是西北地区东部、华北大部和东北地区西部, 2000 年 1 月的平均气温是 1977 年以来的最低值, 比常年同期偏低 2℃<sup>[1]</sup>。加之 1999 年夏季以来, 我国北方大部分地区除 1 月份降水量较常年偏多外, 其余各月均偏少。2000 年 2 月以来北方大部地区气温急剧回升, 又致使土壤解冻时间提前, 土壤干燥疏松, 干土层较厚。这种疏松干燥的沙尘土壤极易被大风扬起形成沙尘天气。图 5 是 1995~2000 年 2 月下旬至 4 月上旬华北和西北(包括山东、河南、河北、山西、内蒙古、甘肃、陕西、青海、宁夏、新疆)土壤墒情观测点(约 70 个点)干土层大于 3 cm 的站点数分布, 由此可见 2000 年 3 月上旬至 4 月上旬我国北方干土区域比历年范围明显扩大, 这些干土区的临界起动摩擦速度  $U_c^*$  值明显下降, 为沙尘暴发生提供了重要有利的下垫面特征条件。

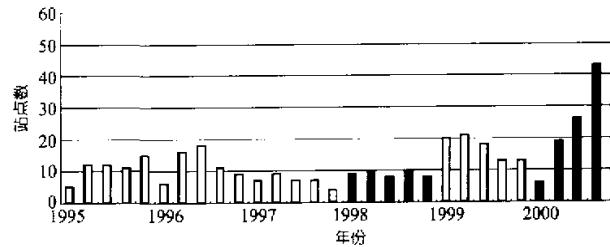


图 5 1995~2000 年 2 月下旬至 4 月上旬华北和西北地区干土层大于 3 cm 的站点数

采用卫星反演 TOVS 温度、湿度场资料, 并用实测探空温度、湿度场资料作变分订正, 获取空间高分辨率的温、湿场结构。进一步将上述卫星变分订正的高分辨率的温、湿场输入 MM5 模式, 经 MM5 模式初始化处理, 求取卫星变分订正后的高分辨率的温、湿场与模式初始化相协调的高分辨率的风场结构, 进一步用公式(1)计算了摩擦速度  $U_c^*$  的分布。

由图 6 可见, 2000 年春季冷空气活动频繁的气候背景下, 4 月 8~9 日我国北方地区呈  $U_c^*$  高

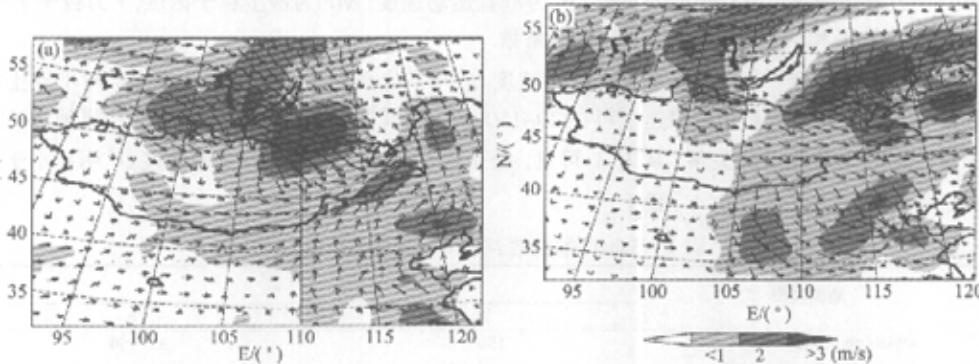


图 6 沙尘暴期间风矢  $U_c^*$  分布

阴影为摩擦速度  $U_c^*$  的高值区; (a) 2000 年 4 月 8 日 00UTC; (b) 2000 年 4 月 9 日 00UTC

1) 丁一汇, 中国气象报, 2000 年 5 月 4 日

值区分布, 即有较好的起沙的动力条件。对比北京及周边地区 8~9 日沙尘暴实况可发现, 沙尘暴均分布于计算所得摩擦速度  $U^*$  高值区前方。

### 3 沙尘暴锋面动力结构

根据卫星反演 TOVS 资料变分订正的 MM5 模式客观分析场所得 850 hPa 流场及温度场(图 7(a), (b))可知, 由于卫星反演变分分析显著提高了信息场分辨率, 在 4 月 8 日蒙古共和国中、东部有明显天气或次天气尺度的强锋面, 且锋前有次天气尺度的暖舌, 表明该次沙尘暴过程的动力结构特征不仅存在近地层强起沙动力条件, 而且存在低层天气或次天气尺度的强冷锋以及锋前伴随显著次天气尺度暖舌的热力结构。对比卫星资料变分分析所计算的 4 月 8 日与 9 日流场及温度场(图 7(a), (b))可发现, 该次沙尘暴与上述自西北向东南移动天气或次天气尺度锋面结构特征密切相关。4 月 8~9 日北京地区沙尘暴过程是该系统南下导致的起沙、扬沙及其远距离输送的综合响应。局地沙尘暴前期往往出现高空混浊或沙尘笼罩现象, 这可能与沙尘远距离高层输送有关, 而锋面临近, 起沙、扬沙动力现象更为显著。

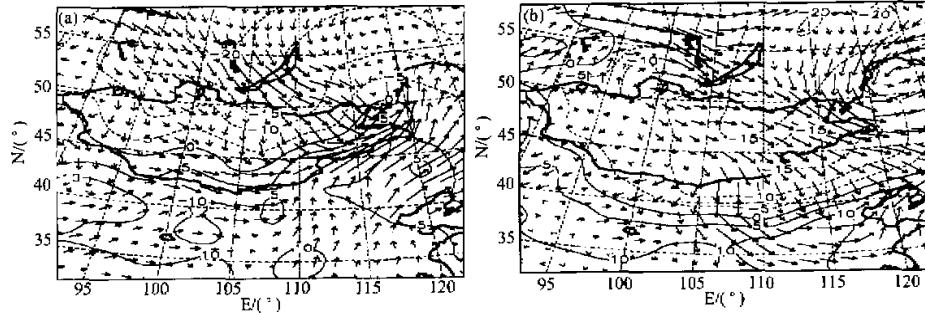


图 7 卫星 TOVS 变分分析 850 hPa 风场及温度场(等值线,  $^{\circ}\text{C}$ )

(a) 2000 年 4 月 8 日 00UTC; (b) 2000 年 4 月 9 日 00UTC

由图 8(a), (b)(温度场南-北向垂直剖面图)可发现上述锋面自北向南移动及斜压位能释放变化的过程, 即锋面坡度由陡变缓的能量释放过程。

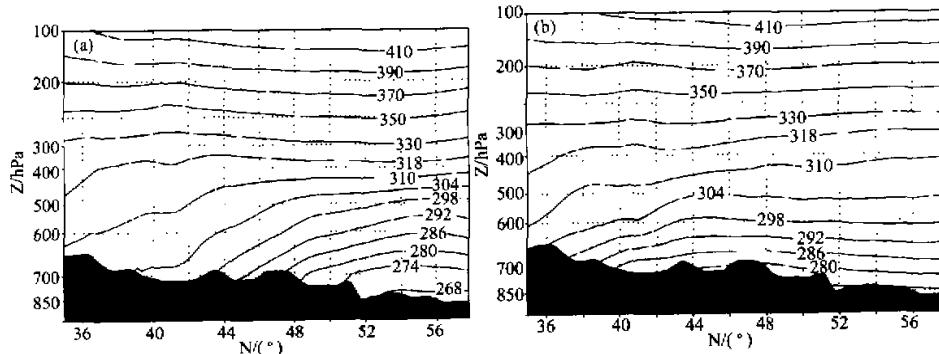


图 8 卫星 TOVS 变分分析 105°E 南北向假相当位温剖面图

(a) 2000 年 4 月 8 日 00UTC; (b) 2000 年 4 月 9 日 00UTC

图 9(a)为 4 月 8 日流线及湿度场南-北向垂直剖面图, 在 4 月 8~9 日北京地区发生沙尘暴阶段, 内蒙古中部地区有上升气流运动, 并经高空相对干区(沙尘暴沙粒高空输送带)呈南下输送流, 在北京偏西地区为下沉支, 构成显著沙尘输送“源”与“汇”动力结构特征, 上游地区水平方向流场与来自西伯利亚中部偏北气流相符合。以上计算结果描述出北京沙尘暴 4 月 8~9 日过程亦存在来自内蒙古中部沙尘的远距离输送特征。

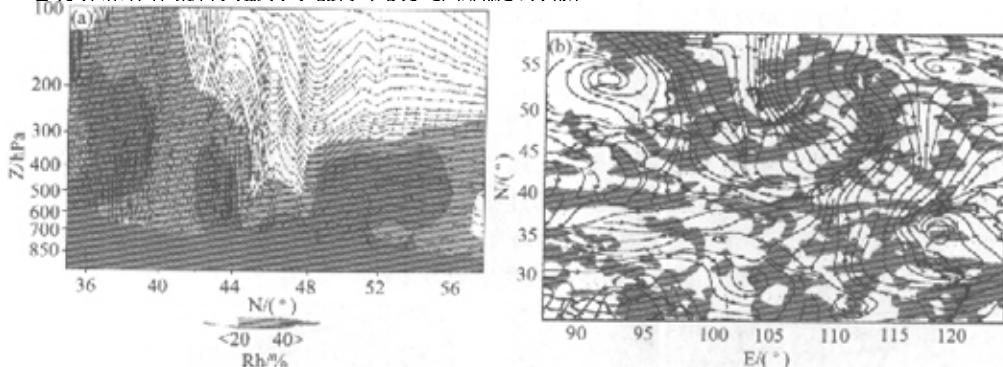


图9 2000年4月8日卫星TOVS变分分析三维结构图

850 hPa 垂直运动(阴影为上升运动区)(a)及流场(b)

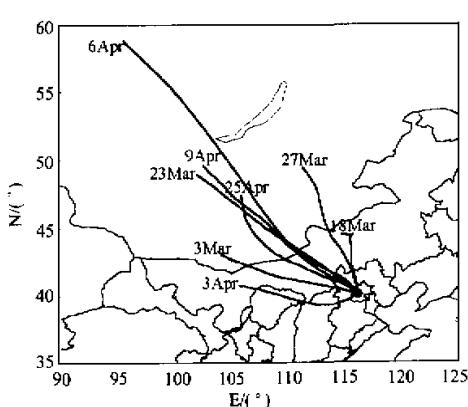


图 10 今年 3、4 月影响北京的几次沙尘暴过程的路径图

图 10 由部分为沙尘质点到达北京长 6~7 h 的后向轨迹

图 10 表明影响北京的沙尘天气在 1000 m 上空主要呈 3 个主体输送方向：第 1 条为西北偏北方向(包括 3 月 18、27 日两条路径)；第 2 条为西北方向(包括 3 月 23 日，4 月 6、9、25 日 4 条路径)；第 3 条为偏西方向(包括 3 月 3 日，4 月 3 日两条路径). 这与卫星监测结果较为一致(图略). 沿途经过地区主要有蒙古共和国中部、戈壁、黄土高原，以及内蒙古东部和河北北部. 该

#### 4 沙尘远距离输送轨迹

沙尘暴在移动中，沿途不断就地扬沙，使沙尘暴天气进一步加强。因此作好沙尘暴路径预报及改善沙尘暴路径区域地表、植被状况，对减轻沙尘暴危害有重要意义。利用卫星（气象卫星、TOMS 卫星等）监测沙尘输送路径和沙尘气溶胶含量（用气溶胶指数表示），并结合轨迹模式计算，能够较好研究沙尘暴期间沙尘暴的移动和传输。

轨迹方法是分析污染物输送与天气形势关系的一种简单直观的方法，本文后向轨迹是用 Draxler(1997 年)发展的 HYSPLIT-4 模式计算的<sup>1)</sup>。本文计算了 2000 年影响北京的 3、4 月份 8 次沙尘暴后向轨迹，计算了 24 h，

1) Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT-4 modeling system. NOAA Technical Memo ERL ARL-224, 1997.

区域沙土被大风扬起后, 可随中高空气流输送到北京, 造成北京的浮尘天气。图 11(a), (b), (c) 分别为 2000 年 4 月 8~9 日沙尘暴实况与 4 月 8 日卫星 TOMS 资料气溶胶指数分布、对比图 11(a), (b) 与(c) 可发现位于北京西北部内蒙古与河北地区沙尘暴与气溶胶分布区域重合, 说明气溶胶指

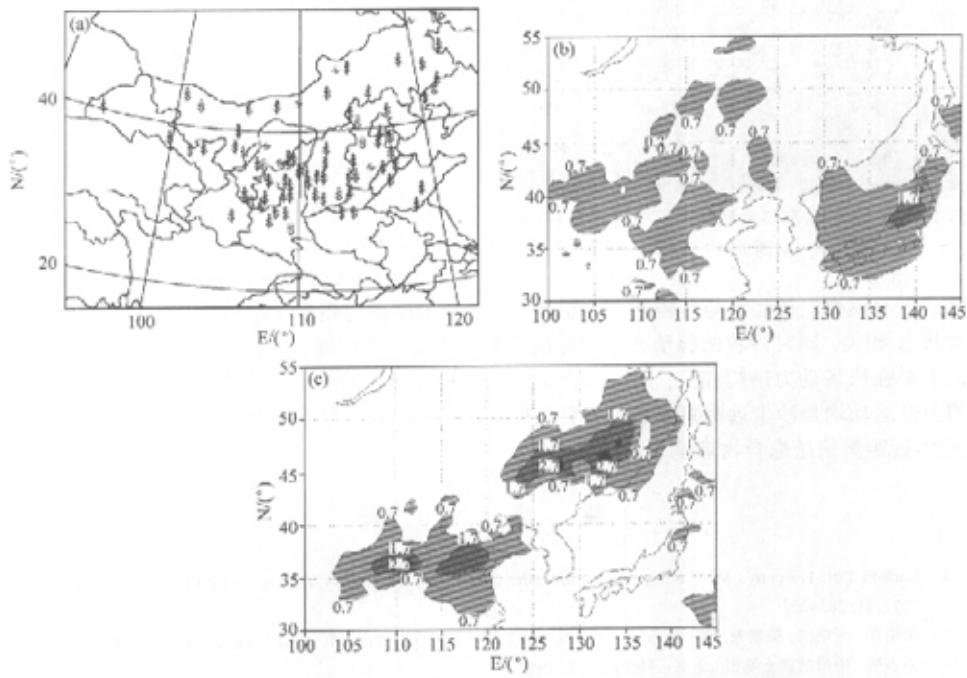


图 11 2000 年 4 月 8~9 日沙尘暴过程实况和 TOMS 卫星气溶胶指数分布  
(a) 沙尘暴实况; (b) 8 日气溶胶指数分布; (c) 9 日气溶胶指数分布

数增强区可以描述出沙尘暴分布特征。另外, 若进一步对照图 10 与图 11 4 月 8~9 日卫星 TOMS 气溶胶指数分布亦可发现, 4 月 8~9 日气溶胶指数增强区呈西北向移动特征, 其移动路径为 4 月 9 日轨迹模式计算结果(图 11)较一致。

图 12 是计算的 4 月 6 日沙尘暴路径与该时间卫星监测沙尘暴移动趋势, 二者颇为一致。此结果进一步揭示出今年春季沙尘暴源地及其主体路径特征。

从上述北京 2000 年 3, 4 月份沙尘暴主体路径分析(图 10), 影响北京沙尘暴过程的路径中, 西北路径为历史高频数轨迹路径。经调研亦可发现, 北京周边地区位于西北方向 77 km 的天漠沙丘为离北京最近的沙尘源地之一(图 13)。

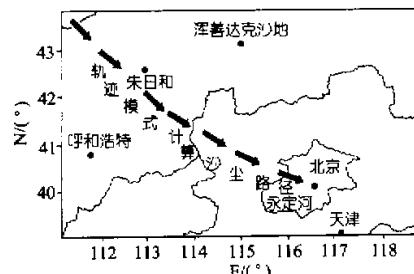


图 12 2000 年 4 月 6 日轨迹模式计算的沙尘暴路径与卫星监测的沙尘暴实况



图 13 2000 年张家口地区怀来县天漠沙丘(位于北京西北 77 km)

暴动力学模型包括起沙与传输的动力机制, 即沙尘的吹扬与地表土壤特征, 植被(如干土层异常状态)相关, 同时沙粒的起动亦与边界层湍流运动及其类似冷空气锋面附近动力抬升及其地面水平强风场动力结构相关, 天气或次天气尺度锋面伴随着斜压位能释放过程, 锋面附近强烈上升运动均是沙尘远距离输送的重要条件, 因此 2000 年春季沙尘暴的活动特征可用起沙-扬沙-远距离输送综合物理模型来描述.

## 5 结论

2000 年 3~4 月影响北京地区沙尘暴天气过程动力学特征如下:

(1) 春季北方地区土壤干土层面积、冷空气相关的气旋活动以及地面风场摩擦速度特点分布均为沙尘暴天气发生的重要起沙动力条件.

(2) 沙尘暴的移动轨迹的重要路径为以沙尘暴源地沿西北偏北及偏西移动路径影响北京地区.

(3) 本文有关沙尘暴个例分析表明, 沙尘

## 参 考 文 献

- 1 Carlson T N, Prespero J M. The large scale movement of Sahara air Outbreaks over the North Equatorial Atlantic. *J A M*, 1972, 11: 283~297
- 2 游来光, 马培民, 陈君寒, 等. 沙暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特征及其微结构. *应用气象学报*, 1991, 2(1): 13~21
- 3 刘东生. 中国的黄土堆积. 北京: 科学出版社, 1965
- 4 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 辑*, 1984, (3): 278~288
- 5 张小曳, 沈志宝, 张光宇, 等. 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(2): 147~153
- 6 Iwasaka Y, Minoura H, Nagaya K. The transport and spacial scale of Asian dust storm clouds. A case study of the dust storm event of April 1979. *Tellus B*, 1983, 35: 189~196
- 7 Shaw G E. Transport of Asian desert to the Hawian islands. *J Appl Meteor*, 1980, 19: 1254~1259
- 8 Gillette D A. Production of dust that may be carried great distances. *Spec Pap Geol Soc Am*, 1981, 196: 11~26
- 9 Gillette D A, Adams J, Endo A, et al. Threshold velocities for input of soil particles into air by desert soils. *J Geophys Res*, 1980, 85: 5621~5630
- 10 Westphal D L, Toon O B, Carlson T N. A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms. *J Geophys Res*, 1987, 92: 3027~3049