

一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟

刘毅¹⁾ 张华¹⁾ 周明煜²⁾

(1) 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029, 2) 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要 运用 MM4 中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式, 模拟分析了 1992 年 4 月 22 日发生的一次沙尘暴天气及沙尘输送过程。得出蒙古气旋冷锋后的大风是沙尘扬起的主要动力, 锋区强烈的上升气流将沙尘输送到高层, 沙尘的水平输送主要随冷锋一起向下游扩散。蒙古气旋的生成与发展主要取决于南下冷空气的强度、中纬度锋区条件以及温压场所形成的斜压不稳定条件。

关键词 沙尘输送过程, 沙尘暴天气, 数值模拟

分类号 P435

沙尘气溶胶是大气气溶胶的主要成分。在春季沙尘暴多发期间, 大量沙尘气溶胶通过大气输送到下游地区, 对陆地和海洋的生态环境和地球生物化学循环有着重要影响。沙尘气溶胶还可以通过辐射过程改变地气系统的能量平衡, 从而对区域气候产生重要影响^[1]。由于沙尘暴天气过程出现的频率较低, 每次尘暴过程形成的天气条件、发生的位置和起沙强度各不相同, 对下游地区的环境有着不同的影响, 因而有必要加强对沙尘暴天气的形成条件和沙尘输送过程的研究。

随着气溶胶观测资料的不断积累, 一些学者从 80 年代开始采用数值模拟的方法来研究沙尘气溶胶的长距离输送问题, 其中最具有代表性的是 Westphal 等^[2]所做的工作。他们利用撒哈拉沙漠的观测资料建立了一个比较完善的二维沙尘气溶胶模式, 并对沙尘气溶胶长距离输送过程进行了研究。我国学者利用所处的有利环境对亚洲沙尘暴的形成和输送过程也进行了比较全面的分析研究^[3-6]。根据 Parungo 等^[7]近两年的观测研究, 中等强度的尘暴几乎年年出现, 影响我国的尘暴不仅来自我国西北地区, 而且来自蒙古戈壁沙漠地区。本文利用 MM4 中尺度模式结合沙尘气溶胶输送模式, 对 1992 年 4 月 22~23 日发生在蒙古及我国内蒙等地的一次中等强度的沙尘暴天气过程及其沙尘长距离输送规律进行了研究, 并同实测沙尘气溶胶资料进行了比较。

1 模式简介和模拟设计

采用 MM4 中尺度动力学模式, 取 Lambert 地图投影方式, 同时考虑地形和积云对流参数化、大气边界层参数化以及次网格扩散过程等物理过程, 详见文献 [8]。

1.1 沙尘输送模式简介

1.1.1 沙尘气溶胶输送方程

沙尘气溶胶输送方程采用与 MM4 模式相同的地形坐标, 在水平方向将沙尘气溶胶浓度场定义在交叉网格点上, 在垂直方向, 将其定义在半 SIGMA 层, 其方程形式为

$$\frac{p^* c(r)}{t} = -m^2 \left(\frac{p^* uc(r)/m}{x} + \frac{p^* vc(r)/m}{y} \right) - \left. \frac{p^* c(r)}{t} \right|_{\text{drop}} + F_{\text{HC}}(r) + F_{\text{VC}}(r) + S_a \quad (1)$$

式中, r 为沙尘气溶胶粒子的半径; $c(r)$ 为半径为 r 的沙尘粒子的质量浓度; u, v, p^*, m 为 MM4 中尺度模式中的风场、气压场、地图投影因子和垂直速度; 下标 drop 表示由于沉降作用而引起的浓度变化; S_a 表示沙尘气溶胶源汇项; $F_{\text{HC}}(r)$ 为沙尘浓度水平扩散项; $F_{\text{VC}}(r)$ 为沙尘浓度垂直扩散项。

1.1.2 沙尘气溶胶粒子尺度段的划分

根据沙尘气溶胶粒子的几何比来划分沙尘粒子的尺度分布, 假设任何相邻尺度段的沙尘粒子的体积之比为一常数, 所有的沙尘粒子都是规则的球形, 则根据体积与半径的关系可得到

$$\left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right)^3 = \text{const} \quad (\text{本文取值为 } 4)$$

下标 i 为尺度段; 第 i 尺度段沙尘粒子的半径为 r_i , 计算得 13 个尺度段的沙尘粒子半径值(见表 1), 可见最小粒子的半径为 0.25 m, 最大粒子半径达到 64.0 m。

表 1 不同尺度段的沙尘粒子半径值

Table 1 Radia of sand particles falling into scales

m

	尺度段												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
半径	0.25	0.40	0.63	1.00	1.59	2.52	4.00	6.35	10.10	16.00	25.40	40.30	64.00

1.1.3 源场作用

沙尘源场是沙尘输送过程中的一个相当重要的因子, 源的大小、强弱以及源场沙尘粒子的尺度谱分布等特性, 决定了沙尘浓度场以后的发展特征。但由于缺乏对源场的大量实验数据, 对其具体的微物理机制了解不足。为此, 采用参数化的方法, 将源场的总体效应用地表摩擦速度来参数化, 其过程主要包括 3 个部分。

(1) 扬沙的发生条件 野外风洞试验表明: 沙尘粒子起动的摩擦速度与下垫面土壤的特性有着很大的关系, 对不同的土壤, 摩擦速度 u^* 的变化范围可在 $20 \sim 150 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间^[1]。本文采用扬沙发生的临界摩擦速度为 $45 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 源强的估计 许多风洞试验和野外观测表明: 在任何地表形态下, 风力与扬沙通量成指数或幂函数的形式。Westphal^[2] 根据撒哈拉沙漠的实测沙尘通量, 得出沙尘粒子半径 $r < 10 \text{ m}$ 的沙尘总通量和摩擦速度 u^* 之间的定量关系为 $F_a = 10^{-14} u^{*4}$ 。式中通量的单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 摩擦速度的单位为 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。文献 [2] 根据沙尘通量与沙尘半径的指数型关系将上式推广到 $r < 64 \text{ m}$ 的范围内, 得到扬沙总量为 $F_a = 1.6 \times 10^{-13} u^{*2}$ 。沙尘源强 S 为 $S = 1.6 \times 10^{-13} u^{*4} / Z$, Z 为模式大气中最低层的厚度。

(3) 沙尘源区沙尘粒子尺度分布特征 为了得到不同尺度段气溶胶粒子在总通量中所占

的比例, 采用文献 [2] 给出的参数化方案, 半径为 r 粒子的源强分配因子 $f(r) = \frac{r^{1.5}}{r_i^{1.5}}$ 。由此

可以得到半径 r 粒子的源强 $S(r) = \frac{1.6 \times 10^{-13} u^4}{Z} \frac{r^{1.5}}{r_i^{1.5}}$, 则 (1) 式源强项 S_a 可表示为

$$S_a = p^* S(r) = \frac{1.6 \times 10^{-13} u^4}{Z} \frac{r^{1.5}}{r_i^{1.5} p^*}$$

1.1.4 干沉降参数化

由于重力、湍流运动、惯性力等过程, 沙尘在输送过程中会被地面阻留并形成持续不断地向地表的转移, 这种干沉降过程会减少空气中沙尘的浓度。一般认为干沉降通量 F_d 与低层大气中的沙尘浓度成正比, 即 $F_d = V_d \cdot C$, 其中 V_d 为干沉降速度, 采用 Slinn^[10] 给出的表达式

$$V_d = K_d + V_g(d)$$

式中, $K_d = \frac{1}{k} C_D u [S_c^{(0.6)} + 10^{(-3/S_n)}]$ 表示粒子的碰撞, 即布朗扩散对干沉降的影响; 其中 k 为卡门常数 (0.4); C_D 为阻力系数; u 为平均风速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); S_c 为粒子的斯密特数; S_n 为粒子的斯托克斯数; $V_g(d) = C d^2 g / 18$ 为由重力引起的直径为 d (m) 的粒子沉降速度; 其中 C 为计算重力下降速度时的订正系数; ρ 为粒子的密度 ($2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$); g 为重力加速度 ($981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$); η 为空气的绝对粘性 ($1.789 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。

输送方程中的干沉降项在模式计算中采取如下形式

$$\text{在模式的最低一层, 考虑干沉降速度后有 } \left. \frac{p^* c(r)}{t} \right|_{\text{drop}} = - [V_d - V_g(r)] c(r) p^*$$

$$\text{在模式的非最低层, 干沉降算式为 } \frac{p^* c(r)}{t} = - [g V_g c(r)] = - g V_g \frac{c(r)}{t}$$

1.2 初始条件和模拟方案

初始资料采用国家气象中心提供的 DCD 磁带资料, 包括测站的经纬度、海拔高度、地面和高空的气压场、温度场、露点场、风向和风速场。采用 Gressman 逐步订正法将高空和地面资料内插到网格点上, 再经整层无辐散处理后作为模式的初始场, 选取 1992 年 4 月 22~23 日沙尘暴天气为模拟对象。根据地面气象观测资料和气流轨迹分析^[7], 4 月 22 日沙尘暴源区位于蒙古南部戈壁沙漠地区及我国内蒙西部沙漠, 中心位于 (44°N, 109°E), 范围如图 1 所示。根据本次沙尘暴天气过程的影响范围, 选择模拟区域的中心为 (42.0°N, 108.0°E), 水平范围为 26.3°N~56.7°N, 82.4°E~133.7°E。模式水平网格点数为 37×37 , 网格距为 90 km, 垂直方向共分 15 层, 模拟范围从地表到对流层顶。模拟的初始时间为 1992 年 4 月 22 日 08 时 (北京时), 模拟时间为 36 h, 时间步长为 3 min, 沙尘模式与动力模式同时积分。由于在沙尘暴发生期间空气中相对湿度较低, 所以在模拟中采用了干模式。

2 模拟结果分析

2.1 沙尘暴天气过程分析

4 月 21 日 20 时, 500 hPa 亚欧图上西伯利亚有一冷涡, 中心位于贝加尔湖以北地区, 中心温度达 -48 以下。我国东北至东部沿海地区上空为一南北向槽, 22 日 20 时槽东移至日本海面上空, 西伯利亚冷空气向东南方向移动, 在贝加尔湖东南部形成一个切断低压, 同时形成的小槽位于 113°E 附近, 23 日 08 时, 冷空气进一步南下, 小槽移至 120°E。槽后最大偏北风速达 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

地面上, 22 日 08 时蒙古气旋位于乌兰巴托以东地区, 中心强度为 999 hPa, 14 时, 该气旋靠近我国东北地区形成锢囚, 蒙古东部和我国东北、华北地区相继出现大风天气, 沙尘以偏北路径影响我国。23 日原蒙古气旋东移至我国东北地区, 强度增强, 中心强度达 995 hPa。我国东北和华北维持大风天气。本次天气过程的特点是, 东亚 50°N ~ 55°N 附近存在较强的锋区, 伴随的冷空气活动使蒙古气旋得到发展, 在气旋后部出现偏北大风。同时受高空槽前西南气流的引导, 气旋向东北偏东方向移动, 并维持了一定时间, 由此产生的大风对沙尘的扬起及向下游输送有重要影响。由于冷空气路径偏北, 我国西部沙漠地区沙尘活动不强。

图 1、2 分别为 1992 年 4 月 22 日和 23 日 02 时、08 时、14 时、和 20 时地面沙尘暴、扬尘和浮尘累计分布图, 图中方框为沙尘源区。22 日 08 时, 沙尘源区少数台站出现扬尘, 14 时源区内大部分台站出现沙尘暴、扬尘或浮尘现象, 沙尘开始向源区下游地区扩散。

2.2 数值模拟结果及分析

模拟初始时刻地面气压场上, 蒙古东部为一低压系统, 中心强度为 999 hPa, 对应的东西向冷锋位于中蒙边界附近。500 hPa 高度场和温度场上, 贝加尔湖附近有一冷性低压, 冷舌的最低温度达 -35.2 。从初始气象要素场上看, 产生沙尘的天气系统即将进入我们选定的模拟区域。

模拟 6 小时, 高空槽的槽线位于 113°E。模拟 24 小时, 高空冷槽加深, 槽线移至渤海海域, 我国北方大部分地区位于高空槽后偏西气流控制范围内。500 hPa 温度场上, 温度槽基本上随高度槽同步移动。槽后(前)的冷(暖)平流较弱, 不利于蒙古气旋进一步发展。

模式中沙尘浓度高低同近地层中摩擦速度的大小密切相关。模拟 6 小时(图略), 地面冷锋后大风区内出现一片摩擦速度的高值区, 最大值超过 $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 该极值区南部已进入沙尘源区, 源区内最大摩擦速度值达到 $73.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时沙尘已经扬起。沙尘源区上空 500 hPa 高度上存在较强的上升气流(图略), 为沙尘的远距离输送起到关键作用。模拟到 12 小时和 18 小时正值夜晚, 边界层处于稳定层结条件下, 摩擦速度值相对较小, 因而产生的沙尘也较少。到模拟 24 小时, 沙尘源区东部的摩擦速度超过临界值, 沙尘继续产生。

2.3 沙尘输送过程的数值模拟

图 3、4 为模拟 6 小时和 24 小时地面沙尘浓度分布图。模拟 6 小时的沙尘主要位于源区附

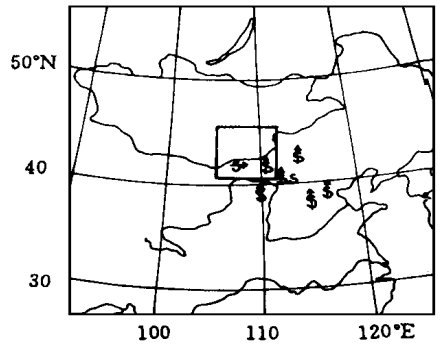


图 1 1992 年 4 月 22 日 02 ~ 20 时地面沙尘暴 (S)、扬尘 (S) 和浮尘 (S) 累计分布图
方框代表沙尘源区

Fig. 1 Plots of surface sandstorm (S), sand raising (S) and sand floating (S) in accumulation observed for 0200 ~ 2000 BST, April 22, 1992, with sand source delineated in a box

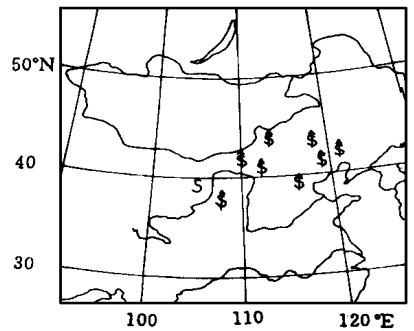


图 2 1992 年 4 月 23 日 02 ~ 20 时地面沙尘暴 (S)、扬尘 (S) 和浮尘 (S) 累计分布图

Fig. 2 Plots of surface sandstorm (S), sand raising (S) and sand floating (S) in accumulation observed for 0200 ~ 2000 BST, April 23, 1992, with sand source delineated in a box

近,其范围同 22 日 14 时地面沙尘暴、扬尘和浮尘的分布范围基本一致,源区最大浓度达到 $83.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。模拟到 24 小时沙尘已经越过北京,北京浓度值达到 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,略高于观测值 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。浓度分布范围与图 2 中沙尘出现的区域相符。比较图 3 与图 4 可见,随着时间的推移,沙尘逐步向东南方向扩散,沙尘浓度廓线前沿与冷锋位置基本重合,说明冷锋所形成的大风天气是沙尘产生和输送的主要动力。图 5 为计算和观测得出的 23 日 08 时北京地面沙尘浓度的粒径分布,可见模拟沙尘粒径分布与观测结果较符合,计算的峰值粒径为 16 m ,观测的峰值粒径为 $10 \sim 20 \text{ m}$,表明大部分大粒子 ($d > 20 \text{ m}$) 在输送过程中由重力作用而降至地面。观测沙尘谱分布中大于 20 m 的大粒子浓度偏高可能与局地扬尘产生的大粒子有关。为研究沙尘的空间分布,图 6 给出 23 日 08 时冷锋经过北京后,北京沙尘浓度的垂直分布,可见,地面沙尘浓度为 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,随高度增加沙尘浓度迅速增大,在大气边界层中部 450 m 高度上达到最大值 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而后随高度的增加浓度渐步减小,大气边界层顶以上沙尘浓度迅速减小。说明白天大气边界层中湍流交换对沙尘垂直输送起着重要作用。沙尘输送的最大高度达 4000 m 以上。计算结果表明运用数值模式计算出的沙尘浓度同观测结果基本吻合。说明本模式能较好地描述沙尘的输送过程。

3 结 语

南下冷空气的强度,中纬度锋区条件以及高度场与温度场所形成的斜压不稳定条件是蒙古气旋生成和发展的主要因素。蒙古气旋冷锋后的大风是沙尘扬起和输送的主要动力,白天大气边界层内湍流扩散作用同锋区强烈的上升气流将沙尘输送到高层。沙尘气溶胶的中距离输送主要随冷锋一起向下游扩散,其粒径分布以直径小于 20 m 的粒子为主。大风的强度和持续时间决定了沙尘源区向大气中输送的沙尘总量。

本文运用 MM4 中尺度动力模式结合沙尘气溶胶输送模式成功地模拟了一次沙尘天气过程的主要特征。但由于缺乏相应的实际观测资料,采用的沙尘参数化方案相对比较粗糙,故今后应加强对我国沙

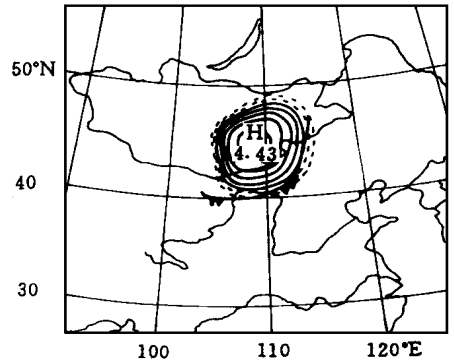


图 3 模拟 6 小时地面沙尘浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 分布图

图中曲线为地面冷锋,图中数值已取自然对数 $\ln(C)$

Fig. 3 Simulations of 6 h surface sand concentration ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) with surface cold front denoted by a curve. Figures of the concentration are given as natural logarithm $\ln(c)$

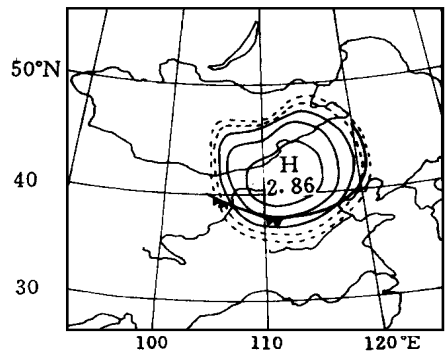


图 4 模拟 24 小时地面沙尘浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 分布图

图中曲线为地面冷锋,图中数值已取自然对数 $\ln(C)$

Fig. 4 Simulations of 24 h surface sand concentration ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) with surface cold front denoted by a curve. Figures of the concentration are given as natural logarithm $\ln(c)$

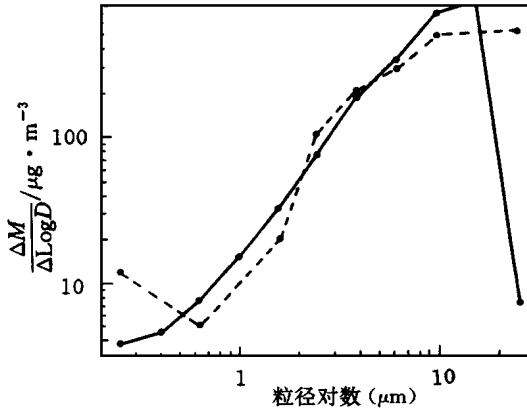


图5 模拟24小时观测和计算的北京地面沙尘浓度($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)—粒径对数分布
实线为观测值

Fig. 5 24 h simulations of the sand concentration ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in comparison to the observed (solid line) in Beijing particle radius is in units of $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

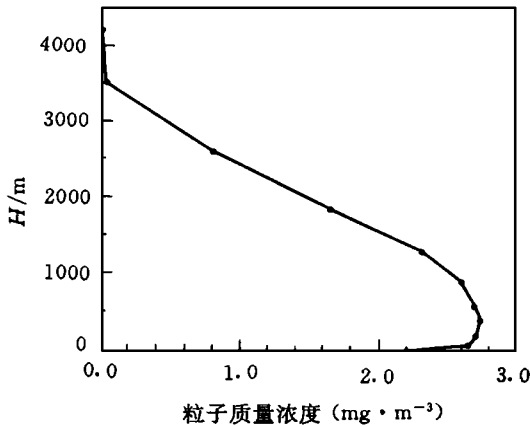


图6 模拟24小时北京沙尘浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的垂直分布

Fig. 6 Simulated vertical distribution of sand concentration ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) for 24 hrs in Beijing
H(m) and particle mass concentration ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

尘的观测研究,以能更精确有效地改进沙尘参数化方案。

参 考 文 献

- 1 Penner J E, Charlson R J, Hales J M, et al. Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. Technical Report of U. S. Department of Energy, DOE/NBB- 0092F, 1993. 25 ~ 27
- 2 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(D3), 3027 ~ 3049
- 3 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4. 22”特大沙尘暴分析, 气象学报, 1979, 37(4): 26 ~ 35
- 4 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭, 等. 北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征. 环境科学学报, 1981, 1(3): 207 ~ 218

- 5 游来光. 沙尘天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构. 应用气象学报, 1991, 2(1): 1~13
- 6 杨东贞, 王 超, 温玉璞, 等. 1990年春季两次沙尘暴特征分析. 应用气象学报, 1995, 6(1): 18~26
- 7 Parungo F, Kim Y, Zhu C J, et al. Asian duststorms and their effects on radiation and climate, STC Technical Report, 1995
- 8 Anthes R A, Kuo Y H, Hsie E Y. Description of the penn state/NCAR mesoscale model version 4(MM4). NCAR Technical note. 1987
- 9 Gillette D A, Adams J, Endo A, et al. Threshold velocities for input of soil particles in the air by desert soils. J Geophys Res, 1980, 85(C15): 5621~5630
- 10 Slinn S A, Slinn W G N. Modeling of atmospheric particulate deposition to natural waters, in Atmospheric Pollutants in Natural Waters. Edited by Eisenreich S J et al. Michigan: Ann Arbor Science, 1981. 23~53

NUMERICAL STUDY ON SANDSTORM EVENT WITH SAND TRANSPORT

Liu Yi Zhang Hua

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing 100029)

Zhou Mingyu

(China National Oceanic Environment Forecasting Center, Beijing 100081)

Abstract In the context of the meso-scale dynamic model MM4 and dust-aerosol transportation model in combination, simulation was undertaken of a sandstorm weather event and sand transfer on April 22, 1992. Evidence suggests that gale behind the cold front of Mogolian cyclone was the main factor for raising sand, which went into upper levels due to strong updraft in the frontal zone and diffused downstream mainly with the front moving; genesis and development of Mogolian cyclone was dependent on the strength of southward going cold air, midlatitude frontal zone characteristics and baroclinic instability produced by temperature and pressure distributions.

Keywords sand transportation, sandstorm weather, numerical simulation