

王益柏,费建芳,张根生,等.2014.几种起沙方案对东亚风蚀起沙模拟的比较[J].大气科学学报,37(4):385-394. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20120331001.

Wang Yi-bai, Fei Jian-fang, Zhang Gen-sheng, et al. 2014. Comparison of dust emission by wind erosion in East Asia simulated by several dust emission schemes[J]. Trans Atmos Sci, 37(4):385-394. (in Chinese)

## 几种起沙方案对东亚风蚀起沙模拟的比较

王益柏<sup>1</sup>, 费建芳<sup>2</sup>, 张根生<sup>1</sup>, 包赞<sup>1</sup>, 彭志法<sup>3</sup>, 王彦东<sup>3</sup>

(1.61741 部队,北京 100094;2.解放军理工大学 气象海洋学院,江苏 南京 211101;3.61828 部队,新疆 喀什 844200)

**摘要:**针对源区起沙的不确定性,整理并选取了国际上最具代表性的几种起沙方案,结合中尺度气象模式 MM5V3.7 输出的高分辨率气象资料,将其应用于东亚地区一次强沙尘暴天气过程的源区起沙模拟研究,利用地面观测实况和卫星监测图像资料,比较了它们对东亚起沙源的模拟效果和差异。结果表明,两种起沙方案的模拟效果较好且性能稳定。

**关键词:**起沙方案;风蚀强度;沙尘暴;起沙通量

文章编号:1674-7097(2014)04-0385-10 中图分类号:P425.55 文献标志码:A

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20120331001

## Comparison of dust emission by wind erosion in East Asia simulated by several dust emission schemes

WANG Yi-bai<sup>1</sup>, FEI Jian-fang<sup>2</sup>, ZHANG Gen-sheng<sup>1</sup>,  
BAO Yun<sup>1</sup>, PENG Zhi-fa<sup>3</sup>, WANG Yan-dong<sup>3</sup>

(1.61741 Troops of PLA, Beijing 100094, China;

2. Institute of Meteorology and Oceanology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

3. 61828 Troops of PLA, Kashi 844200, China)

**Abstract:** In view of the uncertainty of dust emission in source regions, several representative dust-emission schemes are applied to simulate the dust emission by wind erosion during a strong dust storm weather process in East Asia, using the high-resolution output from MM5V3.7. The simulated results are compared with the surface observations and the satellite images, and the differences among these simulated schemes are also compared. Results show that two schemes have better simulation effect and steadier performance.

**Key words:** dust emission scheme; wind erosion intensity; dust storm; dust emission flux

## 0 引言

风蚀起沙通量估算是一项相当困难的议题。自 20 世纪 90 年代以来,关于风蚀起沙的数值研究取得了很大的进展,已有学者利用区域化学传输模式(Uno et al., 2003)、区域气候模式(Zakey et al., 2006)以及数值天气预报模式(Perez et al., 2006)研究风蚀起沙与沉降过程。由于采用不同的起沙方

案、地表数据、土壤湿度和陆地使用数据以及不同的大气模式,他们的研究对源区起沙通量的估算还存在很大偏差(Uno et al., 2006)。在源区起沙方面,很多学者通过风洞试验和野外观测提出了一些风蚀起沙的经验方案。这些起沙方案大多认为风蚀起沙通量是地面风速(Ginoux et al., 2001; Barnum et al., 2004)或者摩擦速度(Westphal et al., 1987; Nickling and Gillies, 1993; Wang et al., 2000; Uno et al.,

2003)的幂函数,它们的区别主要在于幂指数的高低。

本文着眼于源区起沙的不确定性,整理并选取目前国际上最具代表性的几种起沙方案,结合中尺度气象模式 MM5V3.7,将其应用于东亚沙尘源区的起沙模拟研究,利用地面观测实况、卫星监测图像等资料,比较分析它们对东亚起沙源的模拟效果和差异,以期找到既适合于东亚地区,且模拟效果较好、性能稳定的起沙方案,为东亚沙尘暴的数值模拟研究提供参考和借鉴。为便于叙述,本文均采用世界时。

## 1 几种起沙方案介绍

### 1.1 理想状态下地表起沙通量计算

地表起沙通量主要与两个因素有关:一个是地表土壤的结构与状态(临界摩擦速度),另一个是地表大气的湍流状态(摩擦速度)。不同学者对此进行了很多外场观测和风洞试验,也提出了多个起沙通量的经验估算公式。这些经验公式一致认为起沙通量是摩擦速度的幂函数,它们的主要区别在于幂指数的高低。

黄美元和王自发(1998)认为起沙通量可近似为摩擦速度的二次幂函数(记为方案1):

$$F = \begin{cases} C_1 \cdot u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*}\right), & u_* \geq u_{*t}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $F$ 为起沙通量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $u_*$ 为摩擦速度; $u_{*t}$ 为临界摩擦速度。当 $u_* < u_{*t}$ 时,没有风蚀起沙发生。

Shao et al.(1993)在风洞试验的基础上,提出了另一个计算地表起沙通量的函数关系(记为方案2):

$$F = \begin{cases} C_2 \cdot u_*^3 \cdot \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right), & u_* \geq u_{*t}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

Westphal et al.(1987)基于外场观测数据提出的起沙公式,将起沙通量描述为摩擦速度的四次幂函数(记为方案3):

$$F = \begin{cases} C_3 \cdot u_*^4, & u_* \geq u_{*t}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

Gillette and Passi(1988)提出的估算公式被广泛应用于国外起沙源区模拟(记为方案4):

$$F = \begin{cases} C_4 \cdot u_*^4 \cdot \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*}\right), & u_* \geq u_{*t}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (4)$$

上述式中, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 为控制参数,用于确保计算值与观测值在量级上保持一致,分别取为 $1.25 \times 10^{-6}$ 、 $1.5 \times 10^{-6}$ 、 $1.3 \times 10^{-6}$ 、 $1.5 \times 10^{-6}$ 。

### 1.2 临界摩擦速度计算

理想状态下(平坦裸露干燥的松软地表),均一颗粒的临界摩擦速度 $u_{*t0}(d)$ (Shao and Lu, 2000)为:

$$u_{*t0}(d) = \sqrt{A_N \cdot \left(\sigma \cdot g \cdot d + \frac{\varepsilon}{\rho_a \cdot d}\right)}. \quad (5)$$

式中: $d$ 为粒径大小; $A_N$ 为近似常数,取为0.0123; $\sigma$ 为土壤微粒密度和空气密度的比值; $\varepsilon$ 为微粒所受内部结合力与抬升力的比值,近似取为 $3 \times 10^{-4}$ 。

实际地表有各种植被和较大颗粒的砾石等粗糙元覆盖,它们对地表粗糙度的改变会影响沙尘微粒的临界摩擦速度。考虑地表粗糙元影响,临界摩擦速度 $u_{*t}(d)$ 写为:

$$u_{*t}(d) = R(\lambda) \cdot u_{*t0}(d). \quad (6)$$

式中: $R(\lambda)$ 表示粗糙元密集度对风蚀起沙的阻碍作用。其计算公式参见Raupach et al.(1993)。

因此,对所有粒径土壤颗粒而言,最小临界摩擦速度表示为 $u_{*t} = \min(u_{*t}(d))$ 。

### 1.3 影响因子引入

#### 1) 源强因子( $S$ )

源区起尘强度主要考虑两方面因素的影响。

其一是长期地质构造过程中形成的可被风蚀的冲积层比率。可被风蚀的冲积层比率越大,风蚀起沙量越多,强度越强;反之亦然。其对地表风蚀强度的贡献由下式(Ginoux et al., 2001)计算:

$$S' = \frac{z_{\max} - z_i}{z_{\max} - z_{\min}}. \quad (7)$$

式中: $z_i$ 为地形高度; $z_{\min}$ 、 $z_{\max}$ 分别为 $10 \times 10$ 格距范围内地形高度的极小、极大值。

其二是地表植被覆盖率。地表植被覆盖会抑制起沙通量,这种抑制作用可用植被标志因子( $\alpha$ )来表示。Olson(1992)认为,只有4类含有显著裸露土壤的植被可发生风蚀(表1),包括两类沙漠地表和两类半沙漠地表;对于沙漠地表,由于植被稀疏, $\alpha$ 设为1.0;对于半沙漠地表,由于灌木和草原广泛分布, $\alpha$ 设为0.5;对于其他地表类型, $\alpha$ 均设为0。实际应用中取网格内所有植被分类的面积加权平均( $\bar{\alpha}$ ),由(8)式计算:

$$\bar{\alpha} = \sum_1^4 f_i \alpha_i. \quad (8)$$

式中: $f_i$ 为第 $i$ 类Olson植被的面积分数。

表 1 Olson 植被分类及对应的  $\alpha$  值 (Olson, 1992)

Table 1 Olson's vegetation classification and factor  $\alpha$  (Olson, 1992)

序号	Olson 植被分类描述	植被标志因子 $\alpha$
1	沙漠、砾石地表、沙土地表	1.0
2	沙地、沙丘	1.0
3	半沙漠、稀疏草地	0.5
4	灌木、草原	0.5

综合(7)、(8)式,源强因子设置为:

$$S = \frac{S'}{2} + \frac{\bar{\alpha}}{2}. \quad (9)$$

2)湿度因子(W)

近地层相对湿度与实际起沙通量密切相关,其影响因子(W)可用下式(Wang et al., 2000)计算:

$$W = \begin{cases} \left(1 - \frac{H_R}{H_{R0}}\right), & H_R < H_{R0}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $H_R$ 为近地层相对湿度; $H_{R0}$ 为控制起沙与否的相对湿度阈值,取为40%。

综合(9)、(10)式,最终地表起沙通量写为:

$$F' = S \cdot W \cdot F. \quad (11)$$

## 2 模式参数与起沙源区

采用中尺度气象模式 MM5V3.7,模式初始场取自 NCEP/NCAR 每日 4 次的  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,中心经纬度为  $102^\circ\text{E}$ 、 $42^\circ\text{N}$ ,水平分辨率为 45 km,水平格点数为  $95 \times 130$ ,垂直方向分为不等距的 23 层。地表特征资料为  $10'$ 分辨率的地形高度和陆地使用等数据。相关模式物理参数为:辐射上边界条

件、张弛侧边界条件、Pleim-Xiu 高分辨率边界层模式、Pleim-Xiu 多层土壤温度模式、KF 积云对流参数化方案、简冰水汽方案和大气辐射冷却方案。模拟时段为 2002 年 3 月 19 日 00 时—22 日 00 时 (UTC),积分 72 h。

起沙源区需满足条件:1)经纬度范围在  $70 \sim 130^\circ\text{E}$ 、 $30 \sim 55^\circ\text{N}$  之间;2)水陆标志为陆地;3)地表植被为沙漠、黄土高原、草地或灌木地、耕地及落叶林等。

## 3 结果分析

### 3.1 强沙尘暴过程概况

2002 年 3 月 19—22 日,受西伯利亚强冷空气东移南下影响,我国北方地区出现了近年来影响最为严重的强沙尘暴天气(图略)。3 月 19 日 00—09 时,甘肃河西、内蒙古西部和宁夏等地出现大范围沙尘暴和强沙尘暴天气。青海北部、甘肃中部也出现了沙尘暴,扬沙影响新疆大部。19 日 12—21 时,沙尘天气继续向东向南发展,甘肃中部、内蒙古中部东部等地区出现大范围沙尘暴和强沙尘暴天气,扬沙继续影响新疆大部。20 日 00—09 时,沙尘天气继续向东向南扩展,我国华北、西北地区东部、东北部分地区出现大范围的扬沙、沙尘暴和强沙尘暴天气。20 日 12—21 时,沙尘天气继续影响我国华北、东北等地区。沙尘暴和强沙尘暴出现在华北北部。21 日 00 时,沙尘天气继续向东向南扩展并有所减弱。我国华北东部南部、东北地区东部等地出现大片扬沙天气(王益柏等,2009)。

### 3.2 各起沙方案特征分析

图 1 为各方案估算的不同临界摩擦速度时起沙

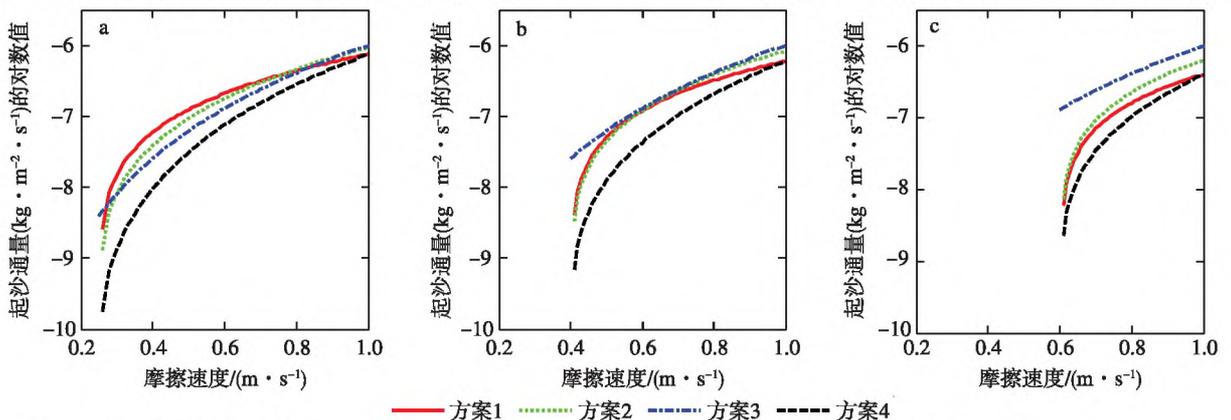


图 1 起沙通量和摩擦速度的关系 a.  $u_{*t} = 0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; b.  $u_{*t} = 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; c.  $u_{*t} = 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig.1 Relationship between dust emission flux and friction velocity a.  $u_{*t} = 0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; b.  $u_{*t} = 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

c.  $u_{*t} = 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

万方数据

通量随摩擦速度的变化。可知,各方案计算的起沙通量差异明显:1) 风蚀强度较弱时(摩擦速度刚达到或超过临界摩擦速度),各方案差别最大,风蚀强度增大时,各方案结果渐趋一致;2) 方案 4 描述的风蚀启动较慢,当弱风蚀时,其估算的起沙通量很小,当风蚀增强时,起沙通量迅速增大,且临界摩擦速度越大时,起沙通量的增长速度越快;3) 方案 3 对临界摩擦速度最为敏感,其估算的起沙通量随着

临界摩擦速度的增大波动很大,当临界摩擦速度较大时,其估算结果远超过其他 3 个方案(图 1c);4) 方案 1 与方案 2 比较接近,在较易风蚀的条件下尤其如此(图 1a、b),但随着临界摩擦速度增大,方案 2 估算的起沙通量逐渐超过了方案 1(图 1c)。

### 3.3 起沙通量模拟分析

图 2 是 2002 年 3 月 19 日 06 时模拟的起沙通量分布与观测实况的比较。总体而言,各方案模拟

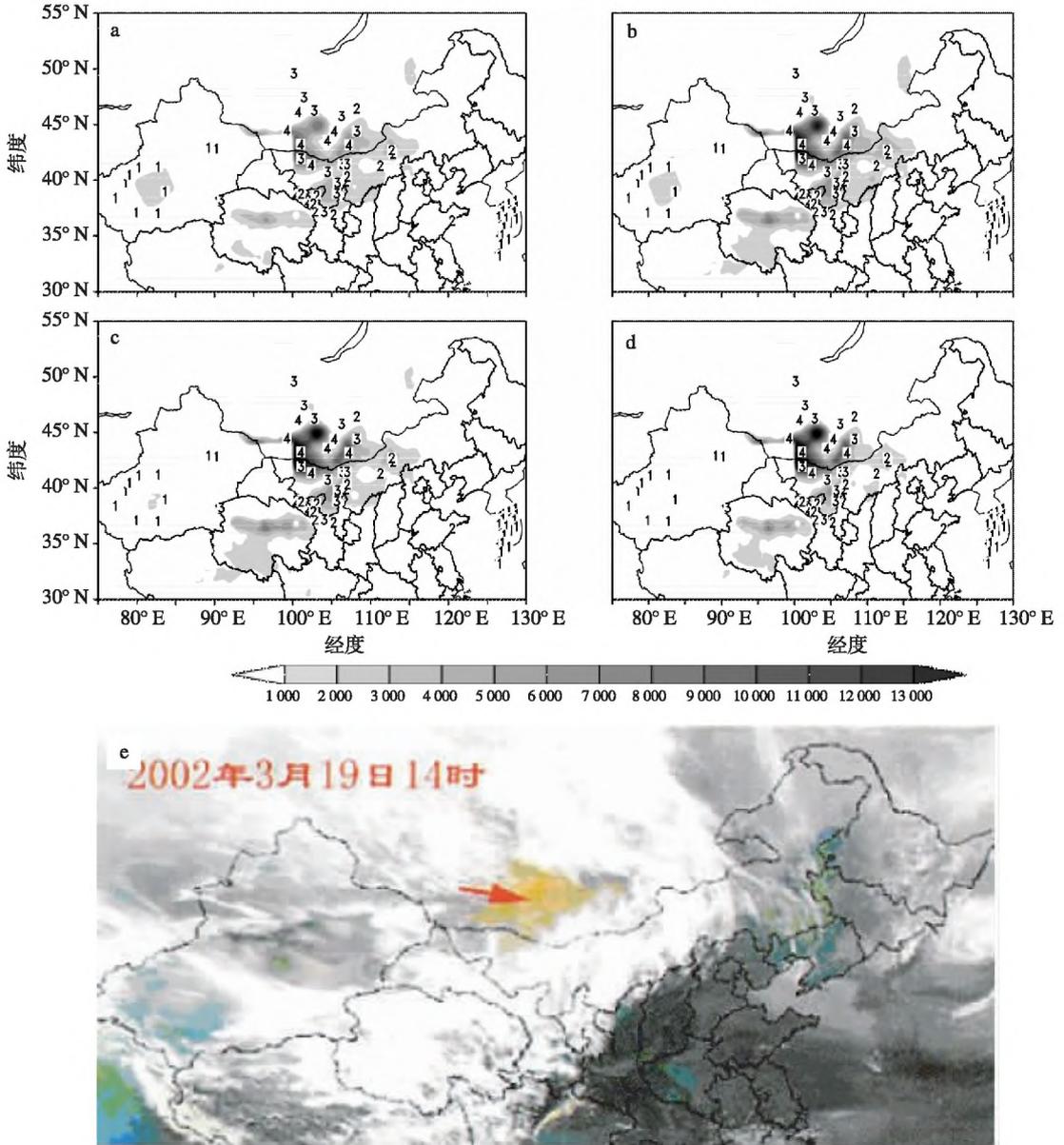


图 2 2002 年 3 月 19 日 06 时模拟的地表起沙通量( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )与观测实况对比(数字含义:1 浮尘;2 扬沙;3 沙尘暴;4 强沙尘暴) a.方案 1;b.方案 2;c.方案 3;d.方案 4;e.3 月 19 日 06 时卫星图像(方翔等,2002)

Fig.2 Comparison between simulated dust emission flux( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and observations at 0600 UTC 19 March 2002(the numbers 1, 2, 3 and 4 denote the fugitive dust, wind-blow dust, dust storm and strong dust storm in Fig.2a—d, respectively) a.scheme 1;b.scheme 2;c.scheme 3;d.scheme 4;e.satellite image of 0600 UTC 19 March(Fang et al.,2002)

的起沙通量极值范围、强度基本一致,且与观测实况对应较好。模拟的起沙源区主要位于中国内蒙古中西部 and 蒙古国南部(100~110°E,40~45°N)。该时次地面实况显示,上述区域都观测到沙尘暴甚至强沙尘暴现象(图中数字所示)。同时次卫星监测图像(图 2e)也表明,蒙古国南部的沙尘云团与高起沙通量范围非常一致;内蒙古中西部由于高层云系覆盖,未能监测到低层沙尘现象(根据地面观测实况

可以推断,该区域低空沙尘云团是存在的)。

图 3 为 2002 年 3 月 20 日 03 时模拟结果与观测实况的对比。各方案模拟结果表明:内蒙古中东部、陕西北部、河北北部以及蒙古国南部等地区起沙通量较大,其中内蒙古东部的浑善达克沙地、陕西与内蒙古交界处的乌兰布和沙地以及蒙古国南部的戈壁为三个极值区。对比该时次地面观测实况,上述地区均观测到大范围沙尘天气,局部地区观测到沙

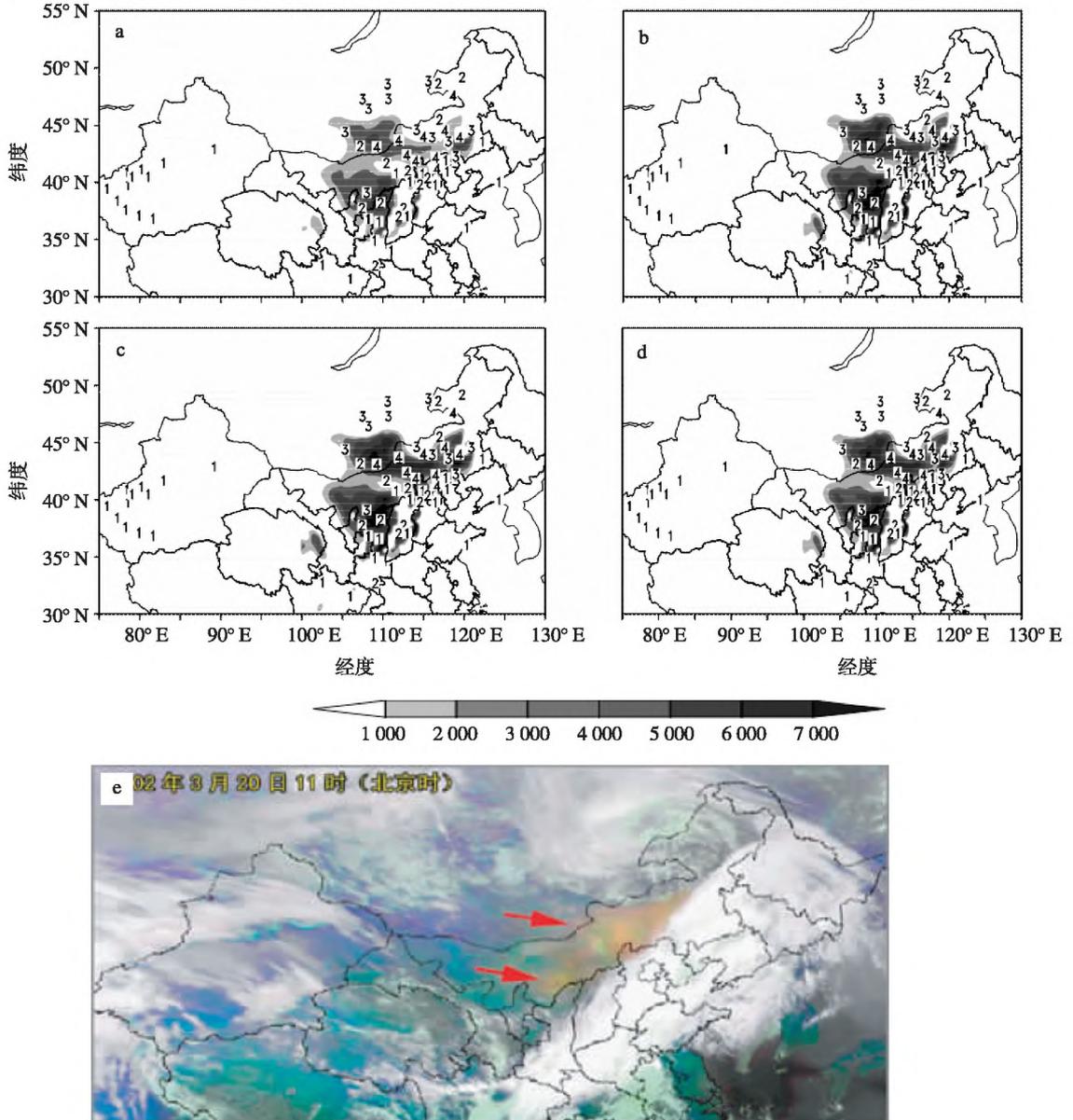


图 3 2002 年 3 月 20 日 03 时模拟的地表起沙通量( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )与观测实况的对比(数字含义:1 浮尘;2 扬沙;3 沙尘暴;4 强沙尘暴) a.方案 1;b.方案 2;c.方案 3;d.方案 4;e.3 月 20 日 03 时卫星图像 (<http://www.jnqx.gov.cn/kepu/k453.html>)

Fig.3 Comparison between simulated dust emission flux( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and observations at 0300 UTC 20 March 2002(the numbers 1, 2, 3 and 4 denote the fugitive dust, wind-blow dust, dust storm and strong dust storm in Fig.3a—d, respectively) a.scheme 1;b.scheme 2;c.scheme 3;d.scheme 4;e.satellite image of 0300 UTC 20 March (<http://www.jnqx.gov.cn/kepu/k453.html>)

尘暴甚至强沙尘暴现象(图中数字指示)。卫星监测云图(图 3e)也显示,沙尘云团往东南方向移至内蒙古中东部上空,呈东北—西南向分布,与模拟结果对应较好。

### 3.4 沙尘源区模拟分析

下面选取如表 2 所示的三个强沙尘源区,比较分析各方案对源区的模拟效果。图 4 为 19 日 06 时—20 日 12 时各方案估算的区域总起沙通量情况。不难看出,各方案估算的不同源区起沙相对贡献量基本一致:蒙古国东南部源区(M)是最大起沙源,其次是戈壁源区(G,巴丹吉林沙漠附近)和内蒙古东南部源区(I,浑善达克沙地附近)。需要说明的是,由于控制常数取值不同,计算结果在数值上存在差异,但仍可以反映源区的相对贡献量大小。

表 2 沙尘源区地理概况

Table 2 Geographic survey for dust source areas

研究区域	经度	纬度	地形高度/m
戈壁地区(G)	100~107°E	39~42°N	1 425
蒙古国东南部(M)	100~110°E	43~45°N	1 346
内蒙古东南部(I)	111~117°E	41~44°N	1 206

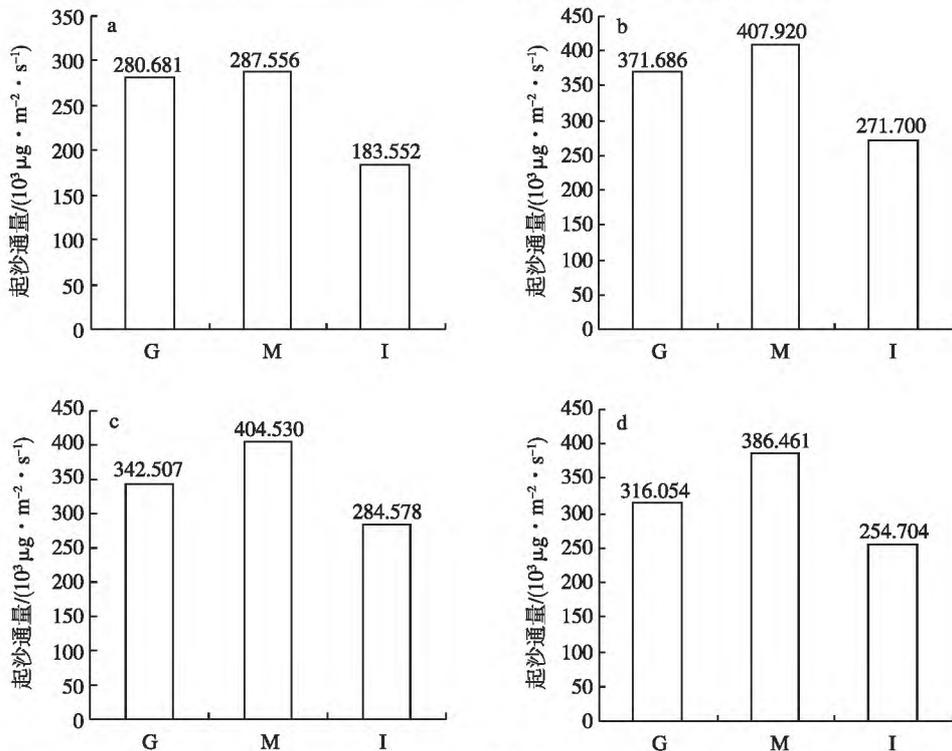


图 4 2002 年 3 月 19 日 06 时—20 日 12 时每 6 h 区域起沙通量(单位: $10^3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; I 为内蒙古东南部, M 为蒙古国东南部, G 为戈壁地区) a. 方案 1; b. 方案 2; c. 方案 3; d. 方案 4

Fig.4 Regional dust emission flux per six hours from 0600 UTC 19 to 1200 UTC 20 March 2002(units:  $10^3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; I: southeastern Inner Mongolia; M: southeastern Mongolia; G: Gobi area)

a. scheme 1; b. scheme 2; c. scheme 3; d. scheme 4

万方数据

40°N 自西向东依次经过塔里木盆地、库姆塔克沙漠、祁连山北麓、巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠以及库布齐沙漠等,因此源区起沙情况在 40°N 附近应有很好的体现。

图 5 是各方案计算的 19 日 06 时—20 日 06 时起沙通量沿 40°N 的纬向分布。可知,各方案计算的起沙通量纬向分布规律及时间演变基本一致。19 日 06 时,主要存在 3 个高值源区:1) 90°E 以西的塔克拉玛干沙漠源区;2) 100~110°E 的巴丹吉林沙漠至毛乌素沙地源区;3) 110~120°E 的浑善达克沙地源区。其中,100~110°E 源区起沙通量最大,大多在  $10^3 \sim 10^4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。19 日 08 时,沙尘天气减弱,塔克拉玛干沙漠源区和浑善达克沙地源区的起沙通量迅速减少消失,但 100~110°E 区域仍维持一定强度的起沙通量,在  $10^2 \sim 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。20 日 06 时,沙尘天气再次爆发,沿 40°N 从西往东起沙通量不断增大,最强起沙源仍为 100~110°E 源区,强度约为  $10^4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此后,起沙通量减弱消失(图略),沙尘天气结束。上述过程与地面观测实况基本一致。

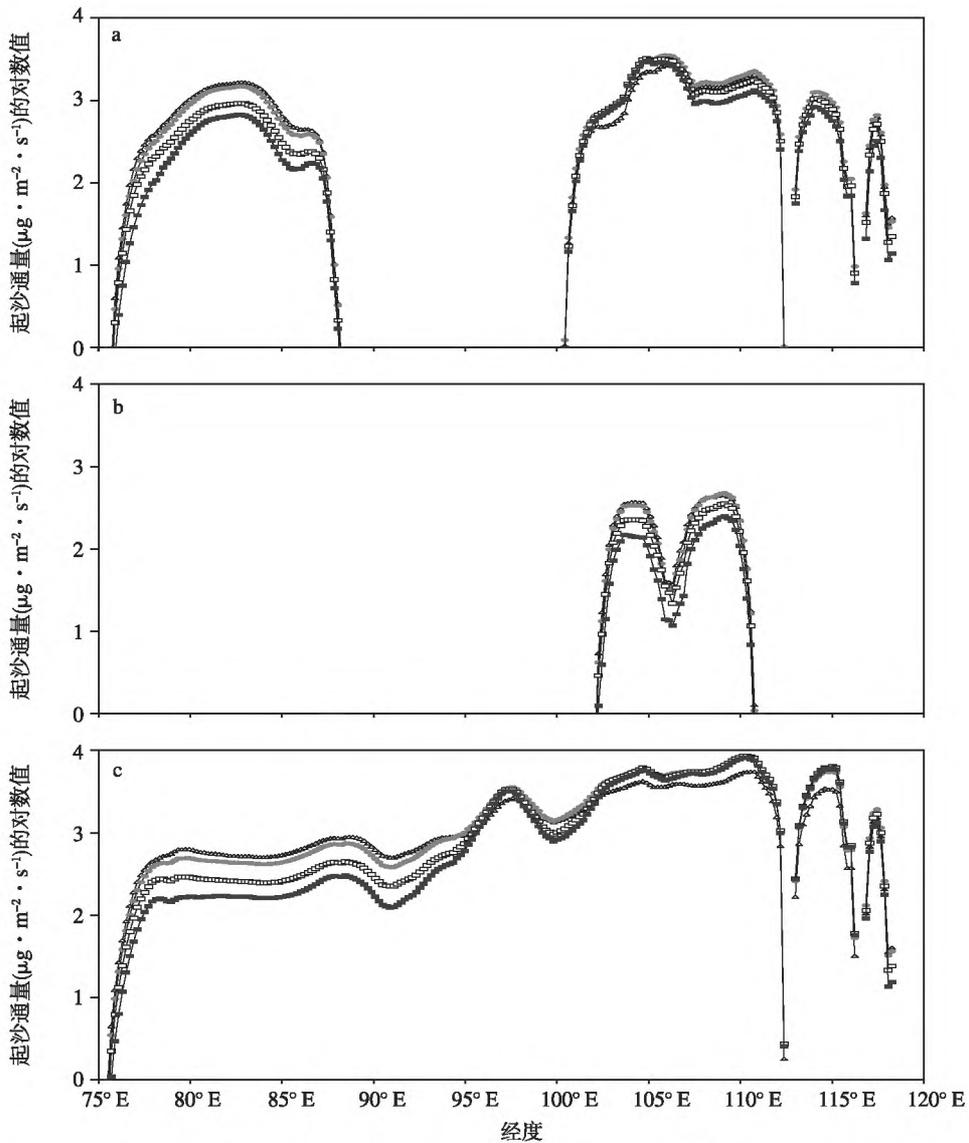


图 5 沿 40°N 附近的起沙通量比较(纵坐标取  $F$  的对数,  $\log_{10}F$ ;  $F$  的单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$ : 方案 1;  $\bullet$ : 方案 2;  $\square$ : 方案 3;  $\blacksquare$ : 方案 4) a.19 日 06 时; b.19 日 18 时; c.20 日 06 时

Fig.5 Comparison of dust emission flux along 40°N(the ordinate takes logarithm of  $F$ ,  $\log_{10}F$ ; units of  $F$ :  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$ : scheme 1;  $\bullet$ : scheme 2;  $\square$ : scheme 3;  $\blacksquare$ : scheme 4) a.0600 UTC 19; b.1800 UTC 19; c.0600 UTC 20

上述分析表明:各方案的模拟结果除估算量值上存在一些差异外,均较好地反映了源区起沙的空间分布规律和时间变化趋势,并揭示了此次沙尘过程源区起沙的特点,即 1) 纬向波动较大,局地差异与时间变化明显,2) 100~110°E 之间的巴丹吉林至毛乌素沙地是强而稳定的起沙源区。

### 3.5 区域起沙通量时间序列分析

针对此次沙尘过程的两个主要源区——内蒙古东南部(I)和戈壁(G),下面将对各方案模拟的区域起沙通量作进一步对比。

图 6 是各方案模拟的源区区域总起沙通量的时

间演变。可知:19 日 06 时,戈壁源区(G)处于强风蚀时期,区域总起沙通量超过  $10^6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应该地区摩擦速度较大(最高达 1 m/s,图 7a),相对湿度较小(低于 30%,图 7b);随着摩擦速度的迅速减小和相对湿度的上升,该源区的起沙通量迅速减少,至 20 日 00 时风蚀现象几乎消失;20 日 03—09 时,随着干冷空气的再次加强,戈壁源区(G)再次发生强风蚀,起沙通量骤升,并超过了前期最高水平。

内蒙古东南部源区(I)的风蚀情况的演变趋势基本与戈壁源区(G)类似,尤以 20 日 03—09 时强风蚀起沙的爆发表现得最为明显。两者的差异主要

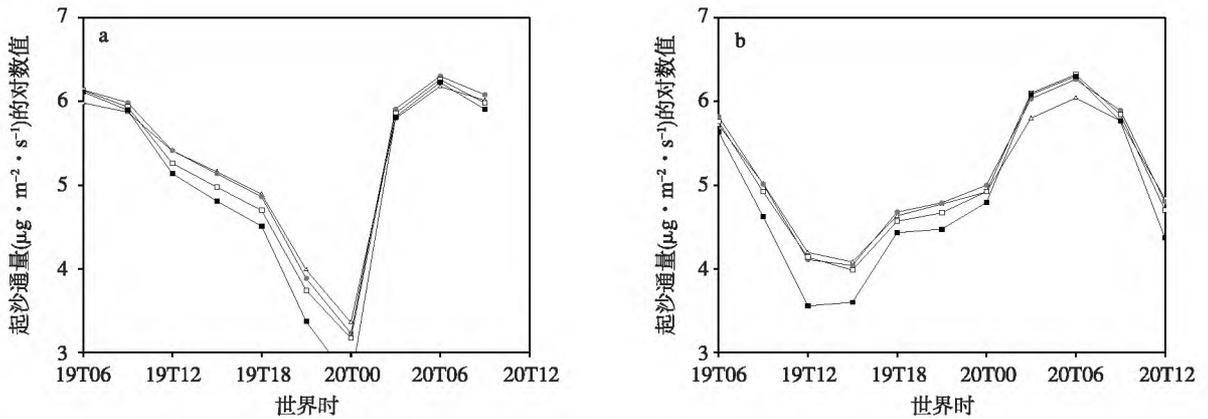


图 6 戈壁源区(a)和内蒙古东南部源区(b)总起沙通量的时间演变(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$ :方案 1;  $\bullet$ :方案 2;  $\square$ :方案 3;  $\blacksquare$ :方案 4)

Fig.6 Time evolution of total dust emission flux in (a) Gobi and (b) southeastern Inner Mongolia (units: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$ :scheme 1;  $\bullet$ :scheme 2;  $\square$ :scheme 3;  $\blacksquare$ :scheme 4)

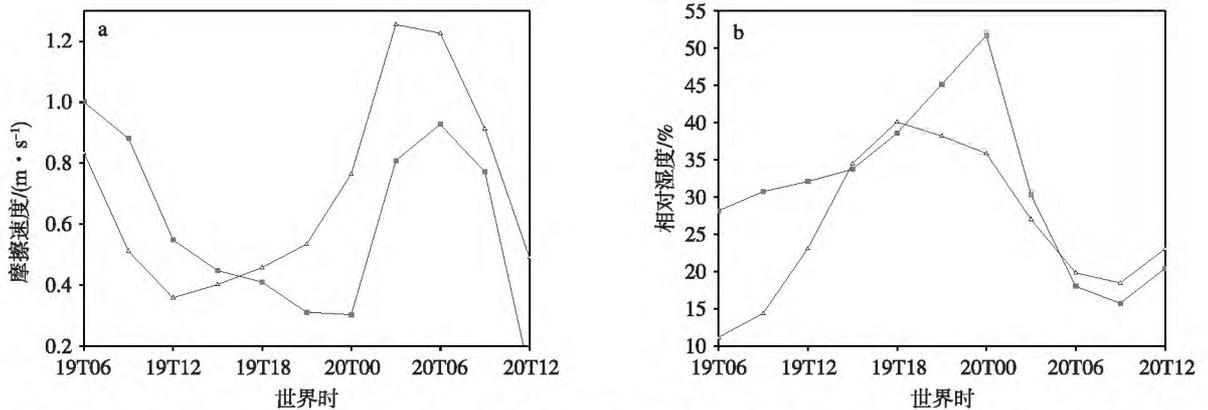


图 7 风蚀起沙影响因子的时间演变( $\blacktriangle$ :内蒙古东南部; $\blacksquare$ :戈壁) a.摩擦速度(m/s);b.相对湿度(%)

Fig.7 Time evolution of impact factors of dust emission by wind erosion( $\blacktriangle$ :southeastern Inner Mongolia; $\blacksquare$ :Gobi) a.friction velocity(m/s);b.relative humidity(%)

有:1)沙尘过程前期,内蒙古东南部源区(I)的风蚀强度较戈壁源区(G)小;2)由于处于强冷空气移向的下游,受干冷大风的持续影响,内蒙古东南部源区(I)的风蚀强度较稳定,变化较平缓。

对比 4 种方案的时间曲线(图 6)发现,方案 1、方案 2 的计算结果最为接近,表明这两种方案的性能相近;方案 3 的计算结果与前两者较接近;方案 4 的波动范围最大,沙尘过程前期,方案 4 的计算结果比其他方案明显偏低,这是因为方案 4 认为起沙通量与摩擦速度的四次方成正比,且考虑了与摩擦速度成反比的影响参数,导致摩擦速度的显著变化会引起计算的起沙通量的剧烈变化。

### 3.6 各方案相关性分析

图 8 是各方案模拟结果的散点图。由于缺乏沙尘监测资料,此处选取方案 2 作为参考态。相关分析的作法是:先将网格点的起沙通量对时间求总和

(19 日 06 时—20 日 12 时),得到各网格点的总起沙通量;再将各方案的网格总起沙通量与方案 2 作空间相关性分析。由图 8 可知,方案 1 和方案 3 的计算结果与方案 2 呈理想的线性相关,数据紧密度较大;而方案 4 与方案 2 的数据离散性较大,表明方案 4 与方案 2 存在较明显的差异。

## 4 结论

本文选取目前国际上广泛使用的几种起沙方案,结合中尺度气象模式输出的高分辨率气象资料,估算了东亚地区一次强沙尘暴天气过程的起沙通量,并利用地面观测实况和卫星监测图像,比较分析了各方案的模拟效果和性能,得到如下主要结论:

1)此次沙尘暴主要有三个强的起尘源区,其一位于蒙古国东南部至我国内蒙古境内,其二位于我国内蒙古西部巴丹吉林沙漠附近,其三位于陕西与

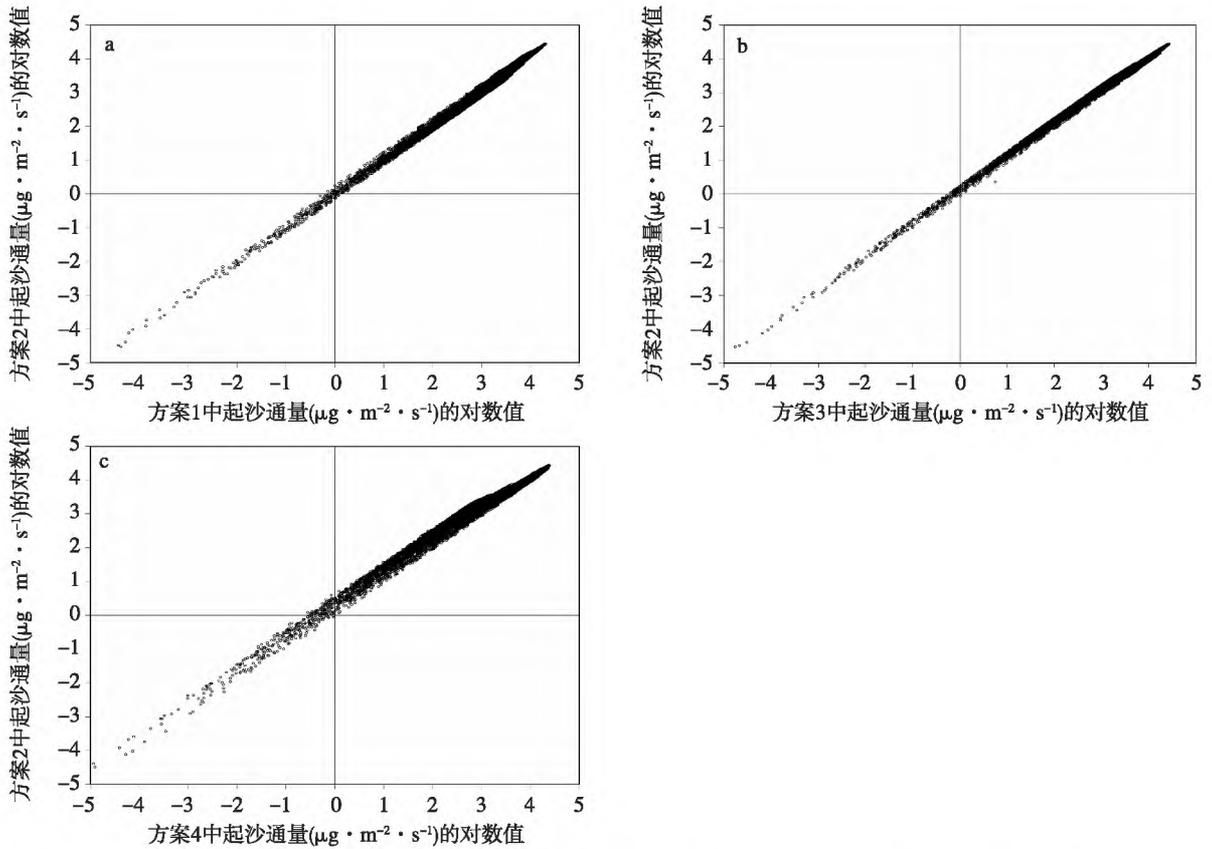


图8 各方案与方案2结果的散点图(量:  $\log_{10}F$ ;  $F$  的单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a.方案1与方案2; b.方案3与方案2; c.方案4与方案2

Fig.8 Scatter diagrams in results between scheme 2 and other schemes ( $\log_{10}F$ ; units of  $F$ :  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a. scheme 1 and scheme 2; b. scheme 3 and scheme 2; c. scheme 4 and scheme 2

内蒙古边界的毛乌素沙地附近。其中,  $100 \sim 110^\circ \text{E}$  之间的巴丹吉林至毛乌素沙地是此次沙尘过程的稳定起沙源。

2) 各方案对地表起沙通量的模拟基本成功,起沙通量的时空演变与地面观测实况及卫星监测图像均保持基本一致。

3) 风蚀强度较弱时,各方案的差异较明显;随着风蚀强度的增强,各方案渐趋一致;方案1与方案2性能相近,且稳定性好;方案3对临界摩擦速度反应最敏感;方案4描述的风蚀起沙启动较慢,在沙尘前期的模拟结果偏低,但随风蚀强度增强较快,整个沙尘过程波动较大。因此,对东亚起沙源的模拟采用方案1或方案2较好。

当然,本文的研究也存在一些不足,如文中采用的地面观测实况和卫星监测图像均为定性观测结果,用定性检验定量存在一定偏差。因此,有必要采用定量的观测资料和更多的个例对上述结论做更深入的检验。

万方数据

## 参考文献:

- 方翔,郑新江,陆钧天,等.2002.2002年春季北京沙尘天气成因及源地分析[J].国土资源遥感(4):17-22.
- 黄美元,王自发.1998.东亚地区黄沙长距离输送模式设计[J].大气科学,22(4):625-637.
- 王益柏,费建芳,黄小刚,等.2009.“2002.3”华北地区强沙尘暴天气的螺旋度分析[J].气象科学,29(3):368-374.
- Barnum B H, Winstead N S, Wesely J, et al. 2004. Forecasting dust storms using the CARMA-dust model and MM5 weather data[J]. Environmental Modelling & Software, 19(2): 129-140.
- Gillette D A, Passi R. 1988. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. J Geophys Res, 93: 14233-14242.
- Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. 2001. Sources and distributions of aerosols simulated with the GOCART model[J]. J Geophys Res, 106: 20255-20273.
- Nickling W G, Gillies J A. 1993. Dust emission and transport in Mali, West Africa[J]. Sedimentology, 40: 859-868.
- Olson J S. 1992. World ecosystems (WE1.4): Digital raster data on a 10-minute Cartesian orthonormal geodetic  $1080 \times 2160$  grid [C]// Global Ecosystems Database, Version 2.0. Boulder, Colorado.
- Perez C, Nickovic S, Baldasano J, et al. 2006. A long Saharan dust event over the western mediterranean; Lidar, sun photometer observation

- and regional dust modeling [J]. *J Geophys Res*, 111 (D15), 214. doi:10.1029/2005JD006579.
- Raupach M R, Gillette A D, Leys J F. 1993. The effect of roughness elements on wind erosion threshold [J]. *J Geophys Res*, 98; 3023-3029.
- Shao Y, Lu H. 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity [J]. *J Geophys Res*, 105; 22437-22443.
- Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. 1993. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind [J]. *J Geophys Res*, 98 (D7); 12719-12726.
- Uno I, Carmichael G R, Streets D G, et al. 2003. Regional chemical weather forecasting system CFROS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment [J]. *J Geophys Res*, 108 (D23), 8668. doi:10.1029/2002JD002845.
- Uno I, Wang Z, Chiba M, et al. 2006. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview [J]. *J Geophys Res*, 111 (D12), D12213. doi:10.1029/2005JD-006575.
- Wang Z, Ueda H, Huang M. 2000. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia [J]. *J Geophys Res*, 105; 26947-26959.
- Westphal D L, Toon O B, Carlson T N. 1987. A two-dimensional investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms [J]. *J Geophys Res*, 92; 3027-3049.
- Zakey A S, Solmon F, Giorgi F. 2006. Development and testing of a desert dust module in a regional climate model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6(2); 1749-1792.

(责任编辑:倪东鸿)