

文章编号: 1004- 4574(2011) 02- 0014- 06

东亚沙尘暴形成机制概念模型的理论分析

王 炜

(南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要: 根据观测事实概括了东亚沙尘暴的形成机理的概念模型, 用数学模型对抽象的概念模型进行了理论建模, 并用数学模型的数值解讨论了东亚沙尘暴概念模型的有效性。结果表明, 从观测事实得到的东亚沙尘暴形成机理的概念模型与用气象学原理建立的沙尘暴数学模型的结果一致, 从而证明了沙尘暴形成机理概念模型的有效性。

关键词: 沙尘暴; 概念模型; 形成机制

中图分类号: P425.5+5

文献标志码: A

Theoretic analyses of conceptual model of East Asia dust storm formation mechanism

WANG Wei

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract An East Asia dust-storm conceptual model based on the dust storm observation data was ever built by author in order to understand the mechanism of dust-storm generation. This paper tries to discuss the effectiveness of the conceptual model through a mathematical model. The results of the mathematical modelling show that the conception model based on the observation data is correct and helpful to understanding the dust-storm generation.

Key words dust-storm; conceptual model; formation mechanism

沙尘暴是一种突发性强、影响区域大的灾害性天气。因此, 为了减轻沙尘暴的危害, 政府部门加强了沙尘暴的研究工作, 试图探索沙尘暴的形成机理。

东亚地区的沙尘暴的发生和演变受到了国内外的气象与环境科学家的重视。中日韩以及中美的科学工作者曾开展过联合研究。中国科学工作者从 20 世纪 70 年代就开展了沙尘暴的研究^[1]。国内的气象工作者从天气学角度、气候角度和环境角度分别对沙尘暴的演变和成因等进行了研究^[2-8]。研究结果表明, 沙尘暴活动具有大尺度环流系统变化导致的群发性气候特征。

但是, 以前的沙尘暴研究都侧重于沙尘暴的个案研究或化学成份研究, 缺乏对沙尘暴形成机理的概括和总结。笔者曾通过对沙尘暴的观测研究, 提出了东亚沙尘暴形成机理的概念模型。模型结合天气形势高度概括了东亚沙尘暴的起沙和输送机制。然而, 这个模型只是基于观测资料的推测, 需要从理论上进行论证。因此, 作者首次尝试利用数学建模的方法, 论证东亚沙尘暴形成机理的概念模型的正确性。然后, 用沙尘暴概念模型解释沙尘暴的成灾的机制。

收稿日期: 2010- 05- 11; 修回日期: 2010- 12- 16

基金项目: 国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目资助

作者简介: 王炜 (1965-), 男, 副教授, 博士后, 主要从事大气环境数值模拟研究。E-mail: ww ei356@ nank ai. edu. cn

1 沙尘暴形成机理的概念模型的假设

一个高度概括的概念模型,可以简洁、明确地反映事物的形成机理。东亚沙尘暴形成机理的概念模型,就是基于东亚春季沙尘暴天气的分析和研究的事实,总结了东亚沙尘暴生成与发展的规律。这个概念模型对东亚沙尘的生成和输送的特点做了以下概括:

(1)有利于生成沙尘暴发展的高空系统呈现出高度槽从 850hPa到 500hPa向西倾斜,而且高空天气系统的温度槽要明显落后于高度槽。大气环境具有明显的斜压性。高空槽后冷平流的强弱对沙尘暴形成有很大的促进作用。

(2)高空槽位于地面高压和低压之间的中间地带。天气系统的波长对沙尘暴天气的持续时间有很大影响。波长在 3 100~ 6 000 km之间的天气系统非常有利于沙尘暴长时间维持和大范围输送。

(3)在地面层,最有利于沙尘暴发生发展的区域位于冷锋后,地面低压的西侧和西南侧。同时,沙尘的生成区也位于冷锋的后部,而且是地面气压梯度的高值区。

但是,并不是这一区域的所有的天气系统都能产生沙尘暴,产生沙尘暴的天气系统还应该同时满足以下条件:

(i)无降水或降水很小的天气系统位于中国的主要沙漠区和蒙古国境内。

(ii)当地面产生 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风速时,在沙物质丰富的干燥地区就会产生沙尘暴。

(4)沙尘输送的机理是在冷锋后部,大风吹起的沙尘上升到一定高度后会进入槽前上升气流区域。在上升气流的带动下,沙尘可以继续上升到 700 hPa甚至 500 hPa以上高度,并且会随基本气流向下风方向输送。同时,上升气流对沙尘有筛选作用,沙尘在输送过程中,粒径较大的沙尘容易在沙尘生成区域附近沉降,而粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 的沙尘容易随气流做长距离输送。

另外,如果高空槽进一步发展,高度场中的等值线可能闭合,使高空槽演变为高空冷涡。因此,这里将冷涡系统归于这个沙尘暴天气学概念模型的一个特例。当高空槽演变为冷涡之后,则更容易生成大范围的强沙尘暴和有助于沙尘向东亚以东地区输送。

2 东亚沙尘暴形成机理的概念模型的数学建模

图 1 的沙尘暴形成机理的概念模型概是以观测事实为基础、通过高度概括而形成的。但是这个模型的正确性需要得到理论上的论证。因此,本小节将利用大气物理学原理和数学方法建立东亚沙尘暴概念模型的数学模型,然后求解数学模型的数值解,并讨论解的结果是否与概念模型的观点一致。

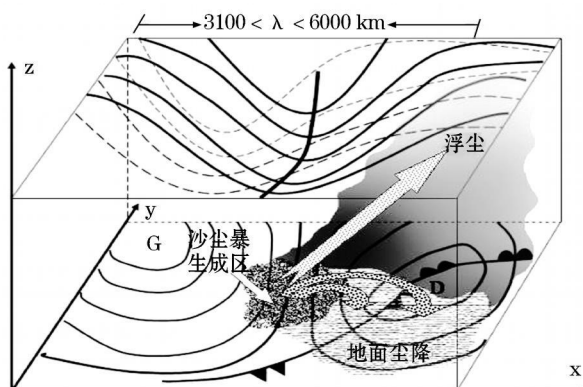
2.1 沙尘暴概念模型的高空天气形势的数学建模

沙尘暴形成过程中的高空天气形势表现为高空槽脊形式。根据气象学的原理,高空天气形势中的高度槽脊和温度槽脊可以写成波动形式。因此,沙尘暴概念模式中的高空槽和温度槽可以写成如下的数学表达式:

$$Z = H_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma t); \quad (1)$$

$$T = T_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma t + \sigma_0). \quad (2)$$

式中: H_0 和 T_0 分别表示常规等压面上的高度和温度的幅度值, k_x 和 k_y 分别为 x 和 y 方向的波数, σ 是时间相位值, σ_0 是高度槽和温度槽之间的相位差。



上层的实线是位势高度,虚线是等温线; λ 表示高空槽的波长;下层的实线是地面高低压区, G 表示高压, D 表示低压;锋后的点状区是沙尘生成区,它是当气压梯度增大到一定程度后,在近地层产生 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上风速时地面生成沙尘的位置

虚的阴影表示了地面尘降区,是高空的沙尘向地面的尘降;实的阴影区是上升气流带到高空的沙尘

图 1 沙尘暴形成机理的概念模型图

Fig 1 Conceptual model of dust storm formation mechanism

在沙尘暴概念模型中,高空槽和温度槽在高度上的倾斜性问题是形成沙尘暴的重要条件。因为,高空槽和温度槽在高度上的倾斜可以保持大气运动的斜压性。利用天气动力学的波动理论,高空槽和温度槽的倾斜性问题可以表达为槽脊在高度层之间的波长相位差。因此,可以将式(1)和(2)改写成下式:

$$Z = H_z \sin(k_x x + k_y y - \sigma t - \sigma_z n), \tag{3}$$

$$T = T_z \sin(k_x x + k_y y - \sigma t + \sigma_0 - \sigma_z n). \tag{4}$$

式(3)和(4)中, H_z 和 T_z 分别为所在高度上的高度和温度的幅度值, σ_z 是高度层之间的高空槽和温度槽的相位差, n 是高度上的大气层的分层数,其他参数与式(1)和(2)相同。通过式(3)和(4)就可以有效地构造沙尘暴模式的高空天气形势。

2.2 沙尘暴概念模型的高空形势配置下的地面气压估算方法

地面气压场形势是沙尘暴概念模型中的一个重要的要素场。因为,概念模型认为地面大风主要是由于在冷锋后的地面气压梯度增大后形成了大风区。因此,在讨论这个问题时,地面气压场与高空的高度槽和温度槽的配合问题是需要解决的关键问题之一。解决这个问题可以用压高公式计算相应的高空天气形势所产生的地面气压场。压高公式表达为

$$P_0 = P \left(\frac{T + \gamma Z}{T} \right)^{\frac{g}{R_d}}. \tag{5}$$

式中: P_0 是地面海平面气压, P 是某标准等压面的气压, T 是某标准等压面的温度, Z 是某标准等压面的位势高度, g 是重力加速度, γ 是大气温度直减率, R_d 是干空气气体常数,数值为 $287 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

通过这样的处理,利用高空形势中的位势高度、气温和等压面等信息,就可以确定相应形势下的地面气压场。

2.3 沙尘暴形成机理概念模型中气流场估算模型建立

2.2.1 概念模型的地面风速的估算方法

根据高空的天气形势确定了地面的气压场的计算方法后,可以使用梯度风的计算方法估算地面气压场中高低气压间的气压差产生的风。为了讨论这个问题,首先要建立气压梯度与地面风速之间的理论关系。利用大气动力学原理,地面的地转风速的估算方法如下:

$$V_g = \frac{1}{f\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}. \tag{6}$$

式中: ρ 是空气的密度; Δp 是等压线之间的气压差,以 hPa 为单位; Δn 是等压线间的截距,以纬度为单位; f 为地转参数, $f = 2\omega \sin\phi$ 。

2.2.2 概念模型中上升速度的估算方法

沙尘暴中上升气流是地面沙尘上升到高空的主要动力源。对沙尘暴概念模型中的上升气流区的估算,可以解释沙尘暴概念模型中沙尘输送问题。沙尘暴概念模型主要讨论大尺度天气系统下沙尘暴的形成问题。因此,这里主要以天气尺度系统的观点讨论沙尘暴概念模型中的上升气流问题。由于大尺度的天气过程在较短的时间内的温度变化可以视作绝热过程。这样,可以利用温度和上升速度之间的关系式估算大尺度气流的上升速度:

$$\frac{dT}{dt} = -w \gamma_d. \tag{7}$$

上式中的 w 是天气系统中气流的垂直速度, T 是大气的温度, γ_d 是空气的干空气温度直减率。将式(7)展开后得到下式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T + w \frac{\partial T}{\partial Z} = -w \gamma_d. \tag{8}$$

在式(8)中,引入大气的实际温度的直减率 $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z}$ 然后对方程(8)进行整理,就得到天气尺度系统的垂直速度估算方程:

$$w = \frac{\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T}{\gamma - \gamma_d}. \tag{9}$$

式(9)表明了地面的局地温度变化、高空槽脊形成的温度平流和大气温度的垂直递减率 3 个因素决定了沙尘暴天气系统中的上升气流大小。

3 沙尘暴形成机理的概念模型的数值分析

上面第 2 小节的讨论确定了沙尘暴概念模型的数学模型。求解这个数学模型可以定量地分析沙尘暴概念模型的合理性。

3.1 沙尘暴概念模型的数值求解

(1) 沙尘暴天气的大气数据分析

本世纪初是沙尘暴发生的高发期。为了使观测资料具有沙尘天气的代表性, 本文收集了 2001 年到 2004 年的高空探空资料、地面观测资料和 NCEP 同化资料。并且统计分析了从地面到 500hPa 的气象要素值。表 1 给出的气象要素值是强沙尘暴天气的平均值。这些数值是构造沙尘暴概念模型的参照值。

从观测资料分析, 沙尘暴发生时的大气温度直减率在 $0.39 \sim 0.64^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 间变化。气压密集区的气压梯度约在 $1\text{hPa}/\text{纬度}$ 左右, 地面风速在 $6 \sim 12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 沙尘暴概念模型的数值求解过程

以观测数据为基础, 使用式 (3) 至 (5) 建立的沙尘暴天气学的数学模型构建沙尘暴概念模型的天气形势要素场。在数学模型的求解过程中, 将数学模型在垂直方向上分成地面, 850hPa, 700hPa 和 500hPa 共 4 层; 水平方向上分成 101×101 个网格, 每个网格的格距代表 50km 的实际距离。

高度场和温度场中的槽脊波长设定为 4000km, 这个数值位于天气动力学已证明的有利于天气系统发展的 $3100 \sim 6000\text{km}$ 的波长范围内。在同一等压面上的温度槽落后高度槽的相位差为 $2\pi/5$ 。在垂直高度上, 上下层之间的高度槽和温度槽都相差 $\pi/6$ 使得高度槽和温度槽能够呈现出从地面到高空向西倾斜的形势。这样, 数学模型的表达与天气学概念模型中的描述一致。

3.2 高空大气环流形势和地面气压的配置问题讨论

本文建立的高空天气形势数学模型能否重构沙尘暴概念模型中的天气形势, 是本项研究的一个核心问题。

在用式 (3) 和 (4) 构建沙尘暴概念模型的高度场和温度场时, 每一层的高度槽和温度槽的数值参考了沙尘暴天气时的平均值。

计算地面气压时的大气直减率是使用了构建的各层高度场和温度场数据的计算值。然后, 利用式 (3) 至 (5) 计算出数学模型构建的高空天气形势与地面气压场的配置图。从图 2 看出, 数学模型计算出的地面气压场形势同概念模型中的地面气压场形势 (见图 1) 相吻合。这说明用式 (3) - (5) 建立的高空天气形势的数学模型, 较好地反映了沙尘暴概念模型的天气形势。数学模型的模拟结果表明沙尘暴天气学概念模型天气形势配置可以采用理想的数学模型表达。

通过式 (3) - (5) 构建的沙尘暴天气的数学模型进行数值试验。试验结果表明斜压性较强并向西倾斜的高度槽, 因槽后的冷平流会使地面高压加强, 而槽前的暖平流使地面低压加深。这说明了沙尘暴天气中的地面高低压间的气压梯度增大的主因是高空的冷暖平流的活动。这也证明了沙尘暴概念模型中的高空形势和地面形势的配置符合气象学的理论基础。

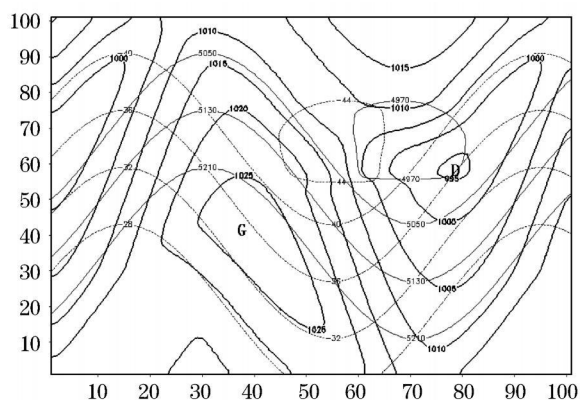
3.3 沙尘暴概念模型中的气流场问题讨论

风速是沙尘暴的沙尘生成和输送的动力源, 对风速的计算可以有效地分析沙尘暴的生成问题。本文使用式 (6) 和式 (9) 估算东亚沙尘暴形成机制的概念模型中水平风速和垂直速度。

表 1 沙尘暴天气中的大气要素值

Table 1 Values of main atmospheric factors in dust-storm weather

气压层 /hPa	500	700	850	地面
位势高度高值 /10m	564	304	144	0
位势高度低值 /10m	516	278	123	0
气温高值 / $^{\circ}\text{C}$	-16	-4	0	6
气温低值 / $^{\circ}\text{C}$	-41	-16	-12	-8



粗实线是等压线, 细实线是等高线, 虚线是等温线

图 2 模拟的高空高度槽和温度槽与地面气压的配置

Fig 2 Simulated configuration of contour and temperature in high altitude and surface air pressure

3.3.1 沙尘暴概念模型中的地面地转风场的模拟

在沙尘暴的概念模型的天气形势配置下,地面气压梯度能产生多大的风速以及相应的地面大风区发生位置成为地面气流场讨论的关键问题。地面气压梯度的计算采用图 2 中的地面气压数据。然后,使用式 (6) 估算地面的地转风速。在地面地转风速的计算中,将沙尘暴概念模型的数学模型的纬度中心点选在北纬 45°,地转参数 f 取为 $1.0312E-4 \cdot s^{-1}$ 。

数学模型模拟的地面地转风场的结果表明,在地面高压和地面低压之间的等压线密集区域存在 $20 m \cdot s^{-1}$ 以上的地面大风区,而且大风区的风速高值可以达到 $30 m \cdot s^{-1}$ 以上。同时,大风区能够延伸到地面低压的西南侧(见图 3)。这个模拟的地面大风区域基本上符合实际观测沙尘暴天气系统中的地面大风的出现区域。而且,地转风速的大小也符合沙尘暴事件中的大风观测事实。例如,2010年 4月 24日 19时左右发生在甘肃的沙尘暴过程,在甘肃民勤县观测到的最大风速达 $18.4 m \cdot s^{-1}$,瞬时极大风速 $28 m \cdot s^{-1}$ 。2001年 4月 6~7日发生在中国北方的一次强沙尘暴过程,在内蒙古的巴彦淖尔盟乌拉特后旗定时风速 $24 m \cdot s^{-1}$,包头市的满都拉庙定时风速 $22 m \cdot s^{-1}$ 。观测资料证明,沙尘暴事件中的地面大风可达到 $20 m \cdot s^{-1}$ 以上。这进一步证明了沙尘暴概念模型中的高空天气系统的斜压性造成的地面气压梯度的增大,完全可以产生形成沙尘暴的大风区。因此,沙尘暴事件中的大风形成主要因素是地面气压梯度的增加而形成的气压梯度风。

3.3.2 沙尘暴概念模型中的高空垂直气流的模拟

上升气流是沙尘暴天气将地面沙尘输送到高空的主要动力。模拟沙尘暴天气中的上升气流的分布,可以深入地了解沙尘暴事件中的沙尘输送问题。沙尘暴概念模型中的上升气流的计算,是在忽略局地的地面温度变化的情况下,采用式 (9) 模拟计算生成的。这样估算的上升和下沉气流的分布,能够反映出概念模型的天气形势配置下的垂直气流的分布。图 4 表明利用大气物理学方法建立的沙尘暴概念模型的数学模型,较好地模拟出了沙尘暴天气系统的高空槽前的上升气流区。图中的上升气流区域符合天气学中暖空气区有上升气流的原理。因此,简化的数学模型可以反映沙尘暴天气的基本规律。

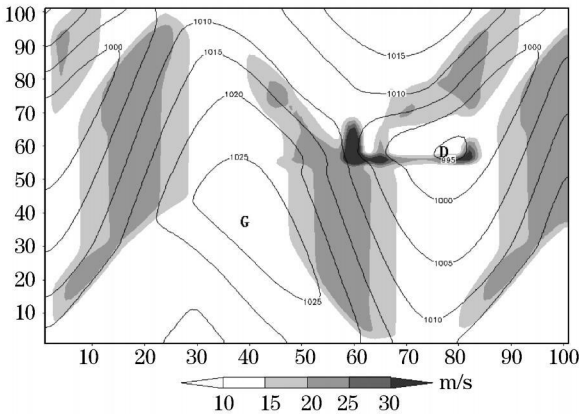


图 3 地面风速(阴影)与地面气压场(等值线)的合成图(速度单位:米/秒)

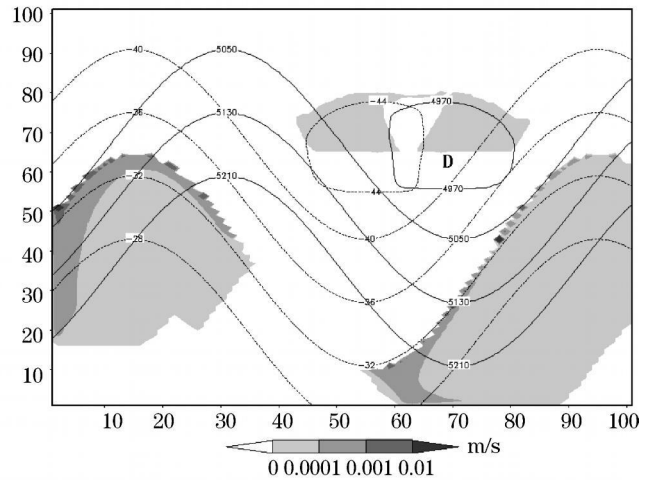


图 4 高空等温线和等高线与上升气流(阴影)的合成图(垂直速度单位:米/秒)

4 沙尘暴的起沙机制的讨论

从起沙动力学角度分析,沙尘暴天气中空中沙尘的形成主要是大风吹起沙漠地区的细沙形成的。研究成果表明,沙尘的起沙通量和摩擦速度有相应的数学关系^[13]

$$F_a = 2.3 \times 10^{-13} u_*^4, \quad u_* > u_{*c}$$

$$F_a = 0, \quad u_* < u_{*c}$$

根据上式的关系,只要在沙漠区域的风速达到临界摩擦速度就可以起沙,而且起沙量的大小同摩擦速度的 4 次方成正比。因此,地面风速越大时,沙尘暴中的起沙量也会急剧地增大。然而,沙尘暴概念模型的理论计算风速是否可以达到沙尘暴起沙的要求呢? Gillette等^[14-15]的研究成果表明,在没有人工干扰的沙丘,临界摩擦速度为 $60 \sim 150 cm \cdot s^{-1}$,在有人工干扰的沙丘,临界摩擦速度为 $20 \sim 100 cm \cdot s^{-1}$ 。根据中性边界层的

风廓线方程可以将临界摩擦速度换算成 10 m 高度的风速:

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

上式中 k 为 Vonkam an 常数, 通常取 0.4, 沙漠地区的粗糙度取 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。

通过上面的公式, 把摩擦速度表示的临界值转换成 10m 高度的观测风速 (见表 2)。从表中看出, 在无人干扰地区的最低起沙风速在 $17.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右; 在有人干扰地区的最低起沙风速在 $5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

这个结果说明, 在有人干扰的沙漠地区, 地面高低压之间的 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风区能够成为沙尘暴的形成区。对于无人干扰沙漠地区, 概念模型的数学模型估算的 $20 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风速区域, 也满足沙尘暴天气的起沙条件。

5 从沙尘暴概念模型的观点分析沙尘暴的成灾机制

(1) 沙尘暴事件的致灾因子

从沙尘暴形成机制的概念模型的数学计算结果可以看出, 冷空气活动产生的地面气压梯度大风是沙尘暴灾害生成的首要致灾因子。其次, 能大范围成灾的致灾因子是高空的垂直上升气流, 它是维持沙尘远距离输送的动力。气压等值线密集的地面低压的西侧和西南侧是沙尘暴事件的主要风沙形成区。

(2) 沙尘暴事件的承灾体

沙尘暴的承灾体主要是地面的土地和人类社会系统。土地中的细土壤被沙尘暴中的大风吹蚀, 土壤的营养物质流失, 地表植被生长环境遭到破坏。据统计, 一次沙尘暴事件的风蚀深度可达 $1 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$ 。同时, 吹到空中的大量沙尘通过高空的上升气流输送到远距离, 成为城市空气颗粒物污染的主要来源之一。例如, 1993 年“5.5”特强沙尘暴, 造成甘肃省金昌市的室外空气的 TSP 浓度达到 $1.016 \text{ mg}/\text{m}^3$, 室内为 $80 \text{ mg}/\text{m}^3$, 超过国家标准的 40 倍。沙尘暴产生的城市颗粒物不仅严重影响人类健康, 还威胁着航空和交通运输业的安全运营。

虽然, 人类无法改变沙尘暴的致灾因子的大风, 无法从成因上消灭沙尘暴。但是, 人类可以通过改变沙尘暴的承灾体——土地上的植被覆盖, 利用植被覆盖减弱大风对地表土壤细颗粒的侵蚀动力, 达到有效抑制沙尘暴的灾害事件的目的。

6 结束语

文章通过对东亚沙尘暴形成机理的概念模型的数学建模以及模拟分析, 证明了东亚沙尘暴形成机理的概念模型的正确性。数学模型的模拟结果表明, 概念模型对沙尘暴的形成和沙尘的输送的描述符合气象学和大气物理学理论。首次利用沙尘暴概念模型的观点讨论了沙尘暴的成灾机制问题。从沙尘暴概念模型的角度能够更加清晰地确定沙尘暴的防灾对象。

这次的沙尘暴概念模型的数学模型只考虑了天气形势的高空槽与地面气压场的配置问题, 没有建立高空冷暖锋的影响。这方面的问题需要在今后的研究工作中加以探讨。

参考文献:

- [1] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1997, 1-47.
- [2] 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.
- [3] 周自江, 章国材. 中国北方的典型沙尘暴事件 (1954~2002) [J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1224-1228.
- [4] 赵翠光, 刘还珠. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析 [J]. 应用气象学报, 2004, 15: 245-250.
- [5] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征 [J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
- [6] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云——东亚沙尘暴研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006, 132-176.
- [7] 方宗义, 王炜. 2002 年我国沙尘暴的若干特征分析 [J]. 应用气象学报, 2003, 14: 513-521.
- [8] 宋敏红, 钱正安, 蔡英, 等. 中蒙强、弱沙尘暴春季平均环流及沙尘活动变化分析 [J]. 气象学报, 2007, 65(1): 94-104.

表 2 起沙临界速度的转换表

Table 2 Transfer of critical velocity for dust-storm rising

风速值类型	无人干扰地区		人工干扰地区	
	低值	高值	低值	高值
摩擦速度值 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	60	150	20	100
10 m 风速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	17.3	43.2	5.8	28