

2006年春季最强沙尘暴过程的数值分析

赵琳娜¹ 孙建华² 王超¹ 赵思雄²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 对2006年春季最强的一次沙尘暴过程(4月9~11日)的影响系统和天气概况进行了分析之后, 利用包含较先进的陆面过程方案, 具有清晰物理概念的沙尘数值预报系统对该次强沙尘暴过程的地面沙尘浓度、起沙量的空间分布和时间演变进行模拟和分析。该系统能较好复制出这次沙尘天气过程的时间和空间演变特征, 沙尘发生、结束的时间以及(在较大范围的)强度变化, 也能较好再现沙尘天气的日变化特征。该次大范围强沙尘天气模拟的起沙源在塔里木盆地、吐鲁番盆地、甘肃西北、蒙古南部、内蒙古阿拉善和浑善达克沙地及其毗邻地区。在不同地区起沙过程中贡献最大的粒子粒径在不同的地区有所不同, 但主要是粒径为2~22 μm 。研究表明, 具有风蚀物理学基础的该沙尘数值预报系统, 不但物理图像清楚, 而且效果也比较好。

关键词 沙尘暴 风蚀物理 数值模拟 沙尘源

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0309-11 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

The Numerical Characteristics of a Severe Dust Storm over North China in the Spring of 2006

ZHAO Lin-Na¹, SUN Jian-Hua², WANG Chao¹, and ZHAO Si-Xiong²

1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The case of the most severe dust storm in the spring of 2006 (i.e., 9–11 April) over north part of China is studied. Firstly, the weather pattern and its influencing system are diagnosed. Then, an integrated dust storm modeling system with advanced land surface scheme (Noah) and complete physical processes of wind erosion is employed for the simulation of the severe dust storm. The results show that the modeling system is capable for better describing the main characteristics of the dust events, such as, diurnal of dust, and so on. It can also provide the important information of the whole process, including origination, development and weakening of the dust event in comparison with meteorological observations. The main dust emission area is Tarim Basin, Turpan Basin, the northern part of Gansu, the southern part of Mongolia and boundary between Mongolia Gobi Desert and the north part of China, including Hunsandake Sandy Land and surrounding area. The particle size which contributes significantly to the dust emission is different due to the variety of land surface and soil moisture, however, the quantities of particles with diameter from 2–22 μm is predominated.

Key words dust storm, wind erosion physics, numerical simulation, dust source

收稿日期 2007-03-10 收到, 2007-04-06 收到修定稿

资助项目 科技部科研院所社会公益研究专项 2004DIB1J031 和国家财政部“西北地区土壤水份、沙尘暴监测预测研究”项目 (Y0101)

作者简介 赵琳娜, 女, 1966年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事沙尘暴天气机理、预测及数值模式研究。

E-mail: zhaoln@cma.gov.cn

1 引言

自 20 世纪 50 年代以来,我国北方地区的风沙天气活动频繁。在 20 世纪 60 年代之后,以北京等 6 个代表站为例,发生在中国北方的沙尘天气事件经历了一个逐渐增加的过程,到 80 年代后期开始逐渐减少。但是,在本世纪初,特别是 2000 年沙尘天气的发生有明显增多的趋势^[1]。2006 年春天,我国北方又连续多次出现沙尘天气,据中央气象台统计共有 18 次沙尘天气过程发生,其中强沙尘暴过程 5 次,沙尘暴过程 6 次,扬沙过程 7 次,是 2000 年以来沙尘暴天气过程最多的一年。4 月 9~11 日,我国出现了 2006 年范围最大、强度最强的一次强沙尘暴天气过程。新疆吐鲁番地区遭遇了 22 年来最强的沙尘暴袭击,全地区受灾人口达 13.9 万人,1 人死亡,直接经济损失 1.39 亿元。4 月 9~10 日,新疆北疆风口和三十里风区出现 10~11 级大风天气,百里风区的风力超过 12 级,十三间房的最大风速达 $51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,9 日 23 时沿线火车停运,其中一列列车车窗的玻璃被大风卷起的沙石打碎。因大风和沙尘暴,吐鲁番地区 312 国道于 4 月 9 日 16 时起到 10 日实行了交通管制。9 日下午,甘肃省酒泉地区正在铁道上施工的 6 名民工被风沙吹散迷失方向,造成 2 人死亡。10 日 18 时至 23 时,内蒙古丹拉高速公路包头段由于能见度低发生 11 起交通事故,造成 6 人死亡。东亚沙尘天气事件再次引起国内外的广泛关注^[2]。

为了研究和实时预报沙尘天气的起沙和输送过程,赵琳娜等发展了耦合精度较高的地理信息数据、具有风蚀物理学基础的起沙模式^[3,4]与中尺度气象模式 MM5 的沙尘暴数值预报模式系统 (IAPSL.0)^[5,6]。雷航等^[7]在 IAPSL.0 的基础上选用了更为先进的陆面模式 (Noah LSM),发展了新的中国科学院大气物理研究所沙尘 (暴) 数值预测系统 (IAPS2.0)。孙建华等^[8]利用该系统对 2006 年春季一次在华北地区发生强沉降的强沙尘暴过程进行了模拟研究,结果表明该沙尘天气预测系统对此次强沙尘暴过程的起沙和输送过程有较好的模拟能力,基本模拟出了这次强沙尘暴的

发生和移动,并且模拟出了沙尘受对流层中低层偏西风的作用输送到华北地区沉降的过程。

本文在简要分析气象背景场的基础上,利用雷航等^[7]发展的集成沙尘暴数值预报系统 (IAPS2.0),对 2006 年 4 月 9~11 日中国北方强沙尘暴天气的沙尘通量和沙尘浓度进行了模拟和较为细致的数值分析,并对比了该次强沙尘暴过程新疆地区和蒙古国-内蒙古戈壁地区的不同特征。

2 沙尘天气概况和影响天气系统

根据中央气象台的分析,2006 年 4 月 9~11 日强沙尘暴过程是在蒙古气旋和地面冷锋强烈发展和共同作用下,气旋南部的偏西大风和冷锋后部的西北大风卷挟着地面尘土造成的。其影响范围包括西北地区大部、华北大部、辽宁南部和河南西北部等 13 个省 (区、直辖市),上述地区的平均风力有 6~7 级,阵风 8 级,并出现了 8~14 $^{\circ}\text{C}$ 的强降温。其中新疆南部、青海西北部、甘肃大部、宁夏中北部、内蒙古中部和西部等地出现了能见度低于 1 000 m 的沙尘暴,部分地区出现了能见度低于 500 m 的强沙尘暴^[9]。

前面已经指出,这次沙尘暴过程受新疆冷锋和蒙古气旋共同影响。早在 9 日 08 时 (北京时,下同),巴尔克什湖附近有一冷锋压境,在蒙古国西部有一低压活动,首先在蒙古国境内出现了大风、扬沙天气甚至沙尘暴。14 时冷锋南压至新疆北部,与此同时蒙古气旋东移至蒙古国中部,受气旋后部西北大风影响,20 时我国新疆、甘肃、内蒙古开始出现扬沙天气 (图略)。10 日 02 时新疆冷锋后部高压闭合中心的强度达 1 040.0 hPa 以上,蒙古气旋的中心强度达 990.0 hPa 以上 (图 1a)。由于天山的阻挡作用,新疆冷锋移动较慢,10 日 08 时新疆冷锋后侧冷空气堆积在天山北坡,等压线非常密集,造成气压梯度很大,引发地面大风,气流绕过山东缘,从东北角流入南疆盆地,形成东北风 (俗称“东灌天气”),新疆、甘肃、内蒙古、宁夏和陕西地区出现沙尘天气。此后,蒙古气旋迅速东移,其南部的偏西大风引发了甘肃、内蒙古等地的沙尘天气 (图 1b)。到 14

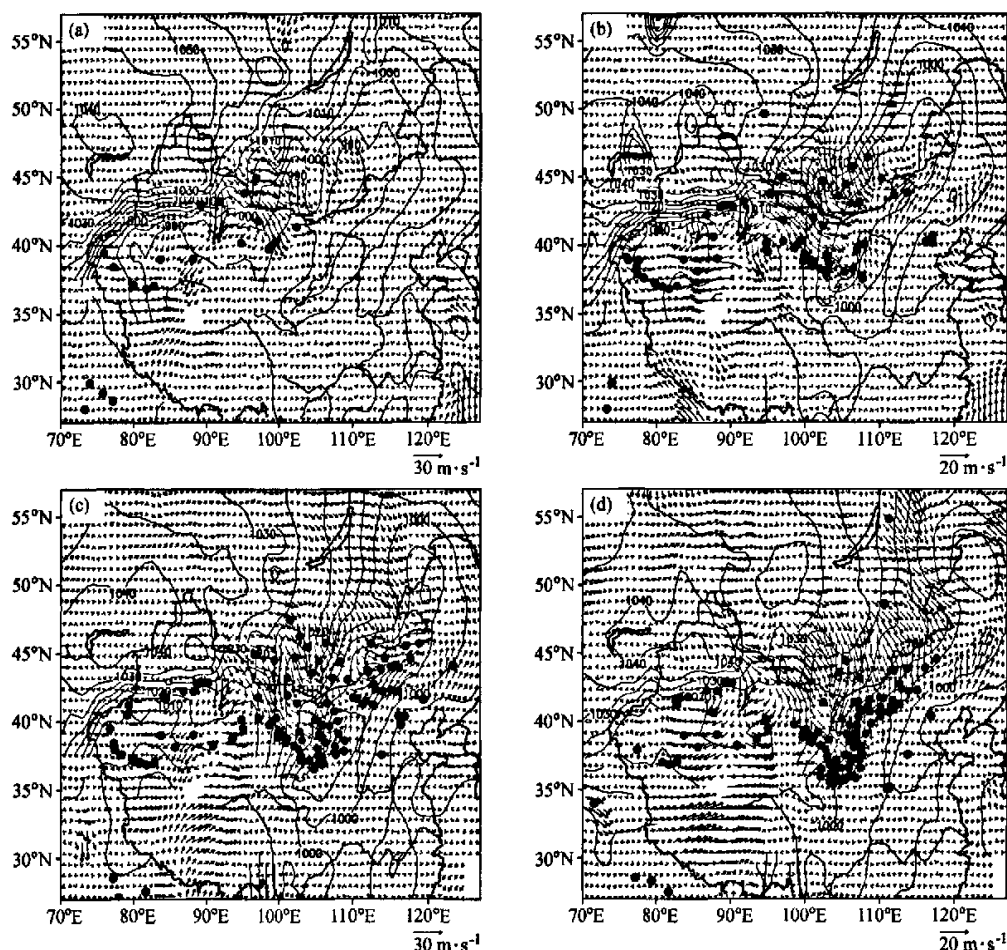


图1 2006年4月10日2~20时海平面气压演变(单位:hPa)和地面风场:(a)10日2时;(b)10日8时;(c)10日14时;(d)10日20时。圆点为沙尘天气(浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)出现的测站

Fig.1 Sea level pressure (hPa), observed dust storm records (full circles) and surface wind in 0200—2000 LST 10 Apr 2006; (a) 0200 LST; (b) 0800 LST; (c) 1400 LST; (d) 2000 LST

时,新疆冷锋有所减弱,此后该地区的沙尘天气强度不再增强;蒙古气旋也快速东移,其后部西北和偏西大风造成蒙古国和我国大范围的沙尘天气(图1c和1d),此时,我国北方大部地区沙尘强度达到最强。由于引发沙尘暴的蒙古气旋的发生发展机理已有研究^[10],因此这里主要利用沙尘暴数值模式,讨论该次大范围强沙尘暴过程的起沙在新疆地区和戈壁地区的不同特征。

为了较为客观地分析这次沙尘暴天气的范围和强度,我们采用了统计观测到沙尘天气的站点数来表征沙尘暴影响范围的相对大小。当然,由于地面观测站的分布并不均匀,这种方法只能定

性的表征沙尘暴影响范围的相对大小。图2给出了2006年4月新疆地区(35~45°N, 80~100°E)和戈壁地区(35~45°N, 100~115°E)逐日的沙尘天气总和及沙尘暴以上强度(包括沙尘暴和强沙尘暴)天气的站点数。从图2可知,4月9~11日是2006年春季持续时间最长,影响范围最大的沙尘暴过程。从发生沙尘天气的总站点数(图2a和2c)看,新疆发生沙尘天气的站点较多。但是如果仅仅比较这两个区域沙尘暴以上强度的站点(图2b和2d),新疆地区发生沙尘暴以上强度的站点少于蒙古国—内蒙古戈壁地区,说明这次过程新疆地区以扬沙和浮尘为主,蒙古国—内蒙古戈

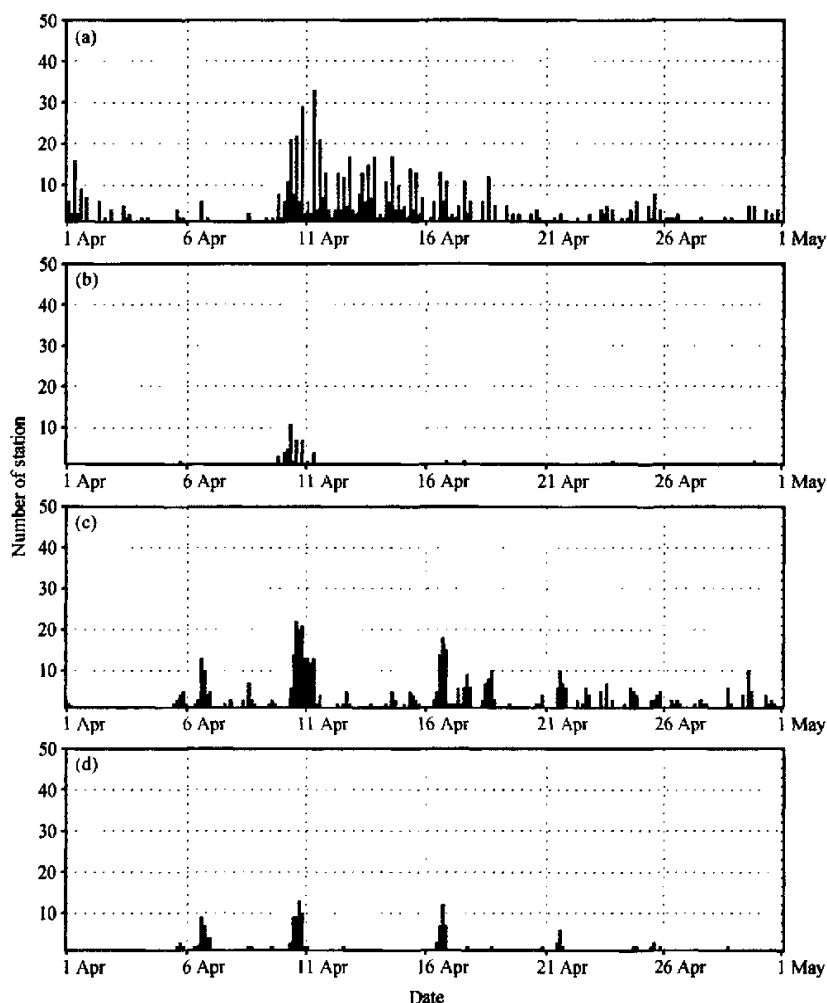


图2 2006年4月我国和蒙古国观测的逐日沙尘天气站点数: (a) 新疆地区(35~45°N, 80~100°E)的沙尘天气总站点数; (b) 新疆地区(35~45°N, 80~100°E)的沙尘暴强度以上天气; (c) 蒙古戈壁(35~45°N, 100~115°E)的沙尘天气总站点数; (d) 戈壁地区(35~45°N, 100~115°E)的沙尘暴强度以上天气

Fig. 2 The daily amounts of station at which dust storm are reported in Xinjiang (35—45°N, 80—100°E) and Gobi region (35—45°N, 100—115°E) at Apr 2006: (a) total dust weather in Xinjiang region; (b) dust storm and severe dust storm in Xinjiang region (35—45°N, 100—115°E); (c) dust weather in Gobi region; (d) dust storm and severe dust storm in Gobi region (35—45°N, 100—115°E)

壁地区以沙尘暴为主。上述结果也表明: 不同地区受到的主要影响系统不同, 发生的沙尘(暴)天气强度不同。

Shao 和 Wang^[11]对 2000~2002 年的地面观测资料分析后指出, 由于塔里木盆地和戈壁地区沙尘天气的影响系统不同, 造成这两个地区沙尘天气强度和移动路径的特征不同。图 3 给出了沙尘暴最强时新疆和内蒙古地区天气要素的变化情况。

比较图 3a 和 3b 可以看出, 这次过程在新疆地区造成的天气比较复杂, 有降水也有大风和沙尘暴, 能见度较低的站点对应的风速比较大(图 3a), 说明主要是大风引起的沙尘暴造成能见度降低。相对来讲, 内蒙古地区主要发生的是沙尘暴天气, 统计的站点能见度普遍较低, 风速没有新疆地区那么大, 表明发生在新疆和内蒙古地区的天气明显不同, 这与图 2 的分析结果是一致的。

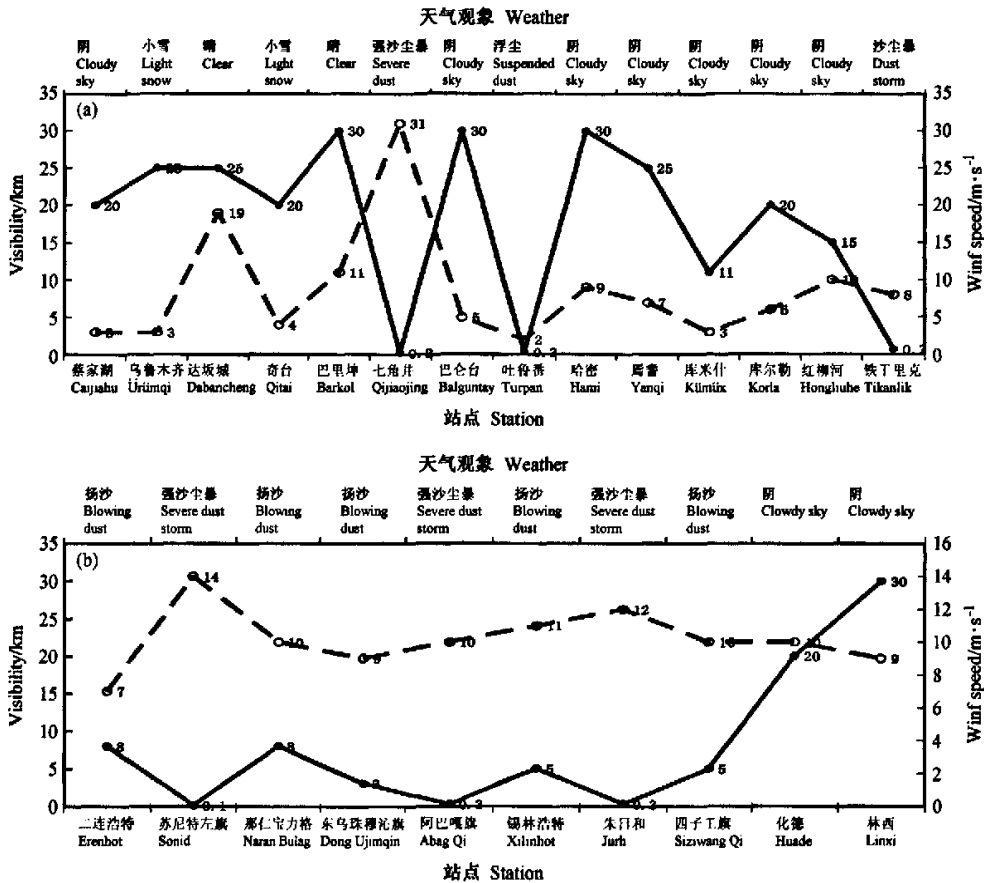


图3 2006年4月强沙尘暴过程新疆地区和内蒙古地区的能见度、风速和天气现象 (a) 新疆东部地区4月10日8时; (b) 内蒙古中东部4月10日14时
Fig. 3 Variability and wind speed in Xinjiang and Inner Mongolia on 10 Apr 2006, (a) Xinjiang region at 0800 LST; (b) Inner Mongolia at 1400 LST

3 模拟结果分析

3.1 计算方案

沙尘暴的物理过程是一个包含大气、土壤和陆面相互作用的复杂过程,涉及到气象学、流体力学、土壤物理学等多学科。沙尘颗粒大小不一,它们在空气中的运动与粒径有关,粒子是否脱离地面进入空中,可以由摩擦速度 u_* 和临界摩擦速度 u_{*c} 之间的关系来确定。摩擦速度是与大气环流条件和近地面层空气运动性质有关的量。临界摩擦速度是一个表示土壤表面基本性质的物理量,临界摩擦速度与土壤粒子的粒径、地表性质和土壤含水率等多种因素有关。

基于上述分析,为了提高集成沙尘预报系统^[5,6]对中国北方春季沙尘暴天气的模拟效果和预报能力,尤其是要改善土壤水分的预报效果,雷航等^[7]选用了包含有更为先进的陆面模式(Noah LSM)的MM5系统与邵亚平^[3]发展的起沙模式和输送模式进行耦合,进一步发展出了新的中国科学院大气物理研究所沙尘(暴)数值预测系统IAPS2.0。本文采用该模式,选择模拟区域大致为(25~60°N, 80~140°E),中心点取为(40°N, 115°E)。这里水平格距采用45 km;垂直分31层(σ 坐标)。模拟时的初值采用每隔6 h的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP (National Center for Environmental Prediction)分析场;模拟时间为2006年4月9日8时~11日8时,共积分48 h。模式中将

起沙模式中的粒径(d)分为6组: $d \leq 2 \mu\text{m}$ (黏土), $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$ (细粉土), $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$ (中粉土), $22 \mu\text{m} < d \leq 52 \mu\text{m}$ (大粉土), $52 \mu\text{m} < d \leq 90 \mu\text{m}$ (细沙), $90 \mu\text{m} < d \leq 125 \mu\text{m}$ (中沙)。

3.2 地面沙尘浓度与观测的比较

在大尺度范围内,限于缺乏地面沙尘浓度和垂直沙尘通量的观测资料,本文采用地面天气现象观测与模拟的地面沙尘浓度做定性比较,用以检验模式在范围、强度上对沙尘过程的模拟效果。图4是2006年4月10日2~17时每3h输出的沙尘地面浓度与同时刻地面沙尘天气现象对比。定性地说,无论就地面沙尘浓度的时间演变还是空间分布而言,模式均较好地模拟出了这次沙尘过程的发生和发展演变。从地面沙尘记录看,该次沙尘暴是4月9日17时在蒙古国南部戈壁与我国内蒙古地区交界处爆发(图略),然后东移南下移到我国新疆地区和甘肃、内蒙古地区。从图4a和图4b可以看出,到10日2~8时,沙尘范围扩大到我国新疆、甘肃、内蒙古中西部、宁夏以及陕西西部,模拟的沙尘浓度的范围与强度与地面天气现象的实况观测较为一致,也与地面冷锋和气旋的发生发展相一致,地面冷锋和气旋强烈发展引发地面大风(图1),使土壤粒子脱离地表释放到大气中,10日5~8时塔克拉玛干地区地面沙尘浓度最强达 $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,戈壁地区的沙尘浓度则在 $1 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图4)。随着气旋向东移动,沙尘范围大面积扩散,影响了我国新疆、内蒙古大部、甘肃、宁夏、陕西、山西和河北等省,受沙尘影响最强的地区是内蒙古西部。模拟结果和地面天气现象观测都表明:新疆到辽宁东部有一个3500 km长的沙尘“云”带,这一现象也可以从卫星监测云图上很清晰地看到(图5)。到11日11时随着冷锋的减弱和气旋的减弱东移,沙尘强度和范围开始减弱,该次沙尘过程逐渐结束。

上述检验表明,模式模拟沙尘的范围和强度(定性)的时间和空间变化与实况较为一致,模式结果有较高的合理和可用性。

3.3 模拟地面沙尘PM10浓度与观测的比较

上一节在大尺度范围内对地面沙尘浓度的模拟(定性)效果进行了检查,说明模式的大尺度

模拟结果可行。本节利用获得的几个站地面3h平均的PM10沙尘浓度与模式模拟的粒径在 $11 \mu\text{m}$ 以下的沙尘浓度(图6)进行单点检验的对比分析,用以检查模式的定量模拟能力。在这次沙尘发生的影响区域各取一个代表站,哈密代表新疆东部,酒泉代表西北地区,朱日和代表内蒙古中东部。从图6a可以看出,模式较好地模拟出哈密PM10随时间演变的情况,且在量级上和观测吻合较好,只是PM10高峰出现的时间模拟偏早6h。另外,酒泉9日模式虽然在开始阶段模拟的PM10浓度偏高,而在9日20时以后模拟的量级与观测大体相当,但PM10高峰出现的时间模拟偏早(图6b)。在朱日和PM10的模拟效果比酒泉好,但也存在开始阶段PM10的模拟偏高,在10日8时以后的时段内模拟效果较好,PM10高峰出现的时间模拟和观测也较为吻合,只是持续时间不如观测的长。以上模拟结果与单点观测资料的对比表明,模式能较好地定量模拟地面沙尘浓度的演变。

其次,从图6可以看出,模式也较好地复制出了该地区沙尘天气明显的日变化特征。从模拟的单站地面沙尘浓度时间演变可以看出,模拟的沙尘浓度日变化与实际比较接近,沙尘天气观测最强出现在8~17时左右,模拟的沙尘强度最强也是出现在同样的时段。这说明模式能够再现沙尘强度的演变特征。从图6还可以看出,哈密(代表新疆东部)、酒泉(代表西北地区)和朱日和(代表内蒙中东部)的沙尘浓度PM10的量级是不同的:新疆东部的沙尘PM10最小,西北地区的PM10浓度最大。这也许是因为沙尘的影响系统和地表状况的差异所造成。

此外,模式对地表的考虑较为简单,对于下垫面的众多类型没有细分:一方面各个部分复杂多样的下垫面的热力学性质存在很大差异,如热容量、短波反照率、长波辐射的吸收与反射、热传导系数和表面蒸发能力等。另一方面,因为下垫面中分布着不同种类的植被,如高大的树木、低矮的灌木、城市绿地和郊区的农作物和草地,这些植被因其不同的叶面指数导致的蒸发率不同而存在不同的潜热通量;另外还存在部分的裸土和水面,这些地表类型的热力学性质也存在很大差异。如果没有考虑下垫面对粗糙度的影响,则

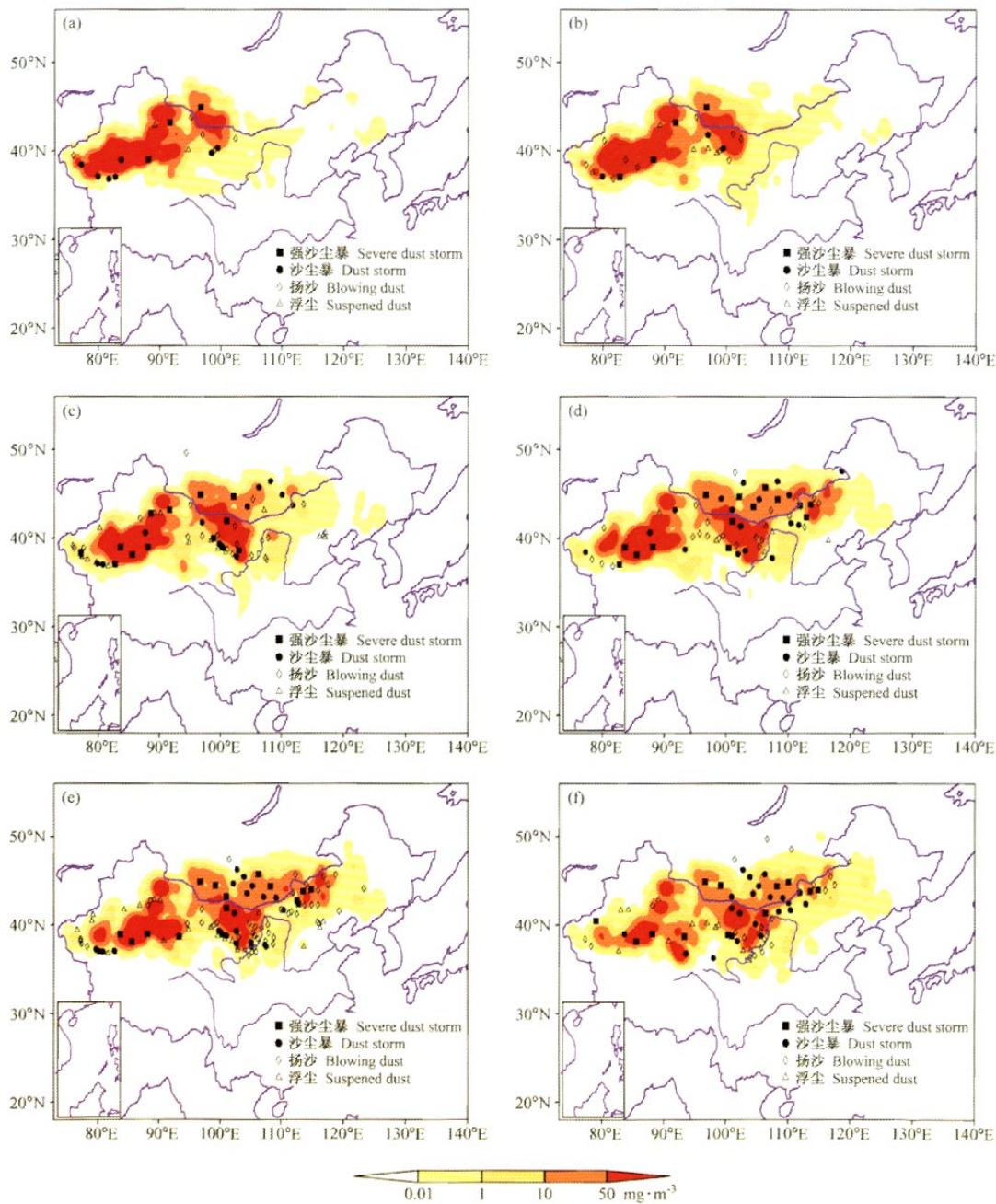


图4 2006年4月10日2~17时模拟的地面沙尘浓度(阴影)和地面观测天气现象:(a)2时;(b)5时;(c)8时;(d)11时;(e)14时;(f)17时

Fig. 4 A comparison of the simulated surface dust concentration (shaded) and meteorological records for (a) 0200 LST, (b) 0500 LST, (c) 0800 LST, (d) 1100 LST, (e) 1400 LST and (f) 1700 LST 10 Apr 2006.

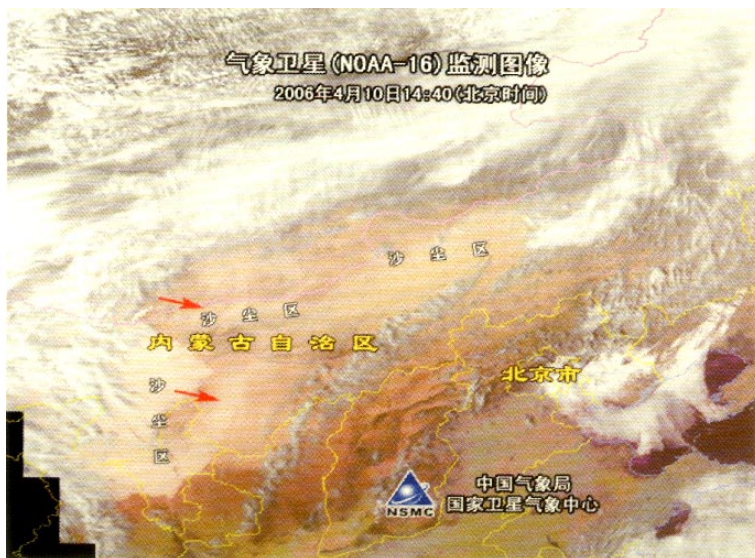


图5 2006年4月10日 NOAA 监测图(引自国家卫星气象中心)

Fig. 5 The NOAA satellite images on 10 April 2006 (from National Satellite Meteorological Center)

造成地面风速模拟偏大,起沙量模拟有偏差。

尽管如此,以上分析表明,模拟的2006年4月9~11日过程的沙尘范围与观测的沙尘天气范围比较一致,本文所用的沙尘预测系统可较好地反映起沙和输送过程,较准确地模拟该次过程的影响区域、时间和强度演变,模拟的结果大体符合实际,是合理可信的。因此,可以在此基础上,利用模拟结果对这次过程的沙尘源地和起沙特征进行更多的分析。

3.4 起沙分析和起沙源地

前面提到,这次沙尘天气发生在新疆地区和甘肃、内蒙古等地强沙尘暴的影响系统不同,造成在新疆地区和戈壁地区的沙尘分布特点(图6)不同,不同地区沙尘浓度是不同的。新疆地区和蒙古-内蒙古戈壁地区的沙尘天气除了受不同的天气系统影响外,还受不同的地表状况影响。在这样的情况下,不同的地区起沙量和起沙的特征也是不同的。图7为2006年4月9日8时~11日8时新疆地区(35~45°N, 80~100°E)和蒙古戈壁(35~45°N, 100~115°E)各粒径沙尘的起沙量随时间的演变。从图7我们看到:无论粒径多大的沙尘,新疆地区的起沙率都比戈壁地区的大;各种粒径的沙尘在新疆地区的起沙时间比戈壁地区

的要早,反映出天气系统影响的先后次序和起沙量的日变化特征;另一特点是,无论在新疆地区还是在戈壁地区,起沙量最大的是粒径为2~11 μm的沙尘粒子。

图8是4月9日8时~11日8时的总起沙量,可以看到这次大范围沙尘过程的起沙中心有3个,分别是新疆东部、南疆盆地、蒙古南部和内蒙古西部的戈壁地区。从起沙量来看,塔里木南疆盆地的起沙量较大,数值超过50 mg·m⁻²的面积较大;在内蒙古西部的阿拉善地区也有一个超过50 mg·m⁻²的小中心,戈壁其他地区的起沙量在10~50 mg·m⁻²(图8d);比较图8a~c,明显地看出起沙量贡献最大的是粒径在2~11 μm的沙尘粒子。

4 结论及讨论

本文对2006年春季最强的一次沙尘暴过程(4月9~11日)的影响系统和天气概况进行了分析之后,利用引入较先进的陆面过程方案(Noah方案),基于高精度GIS资料提供的陆面信息和具有清晰物理概念的起沙模式与高分辨率的中尺度气象模式耦合的沙尘数值预报系统,对该次强沙

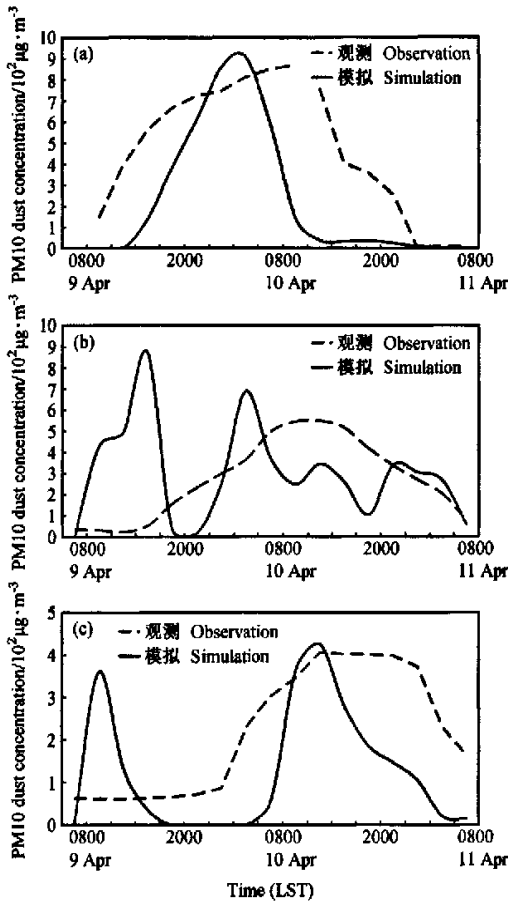


图6 2006年4月9日8时~11日8时PM10演变: (a) 哈密; (b) 酒泉; (c) 朱日和

Fig. 6 The evolution of observation and simulation of PM10 from 0800 LST 9 to 0800 LST 11 Apr 2006 at (a) Hami, (b) Jiuquan, (c) Jurh

沙尘暴过程的地面沙尘浓度、起沙量的空间分布和时间演变进行模拟和分析。

利用已有观测资料所做的模拟性能的检验表明,该系统能够较好地复制出这次沙尘天气过程的主要时间和空间演变特征。起沙强度和沙尘浓度与地面观测资料都表明,沙尘暴存在明显的日变化,模式的预测结果也很好地表现出了日变化的特征,模拟结果在沙尘暴出现的时段内基本吻合。这次大范围强沙尘天气模拟的起沙源位于塔里木盆地、吐鲁番盆地、甘肃西北、蒙古南部、内蒙古阿拉善和浑善达克沙地及其毗邻地区。在起沙过程中贡献最大的沙尘粒子粒径有所不同,

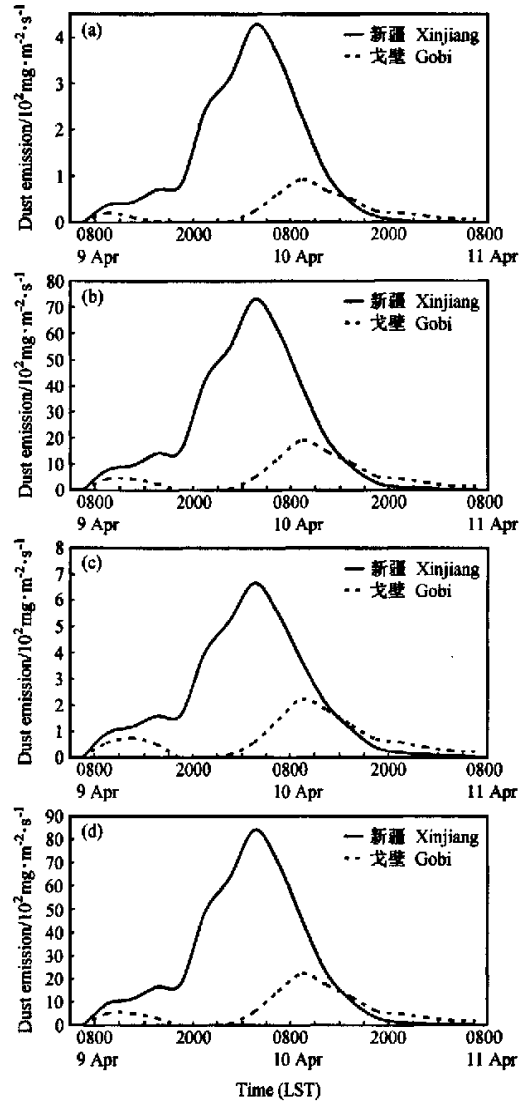


图7 2006年4月9日8时~11日8时新疆地区和戈壁地区不同粒径(d)沙尘起沙量随时间演变: (a) $d \leq 2 \mu\text{m}$; (b) $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$; (c) $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$; (d) 各粒径之和
Fig. 7 Time evolution of simulated dust emission from 0800 LST 9 Apr to 0800 LST 11 Apr 2006 for difference particle size group in Xinjiang and Gobi region, respectively: (a) $d \leq 2 \mu\text{m}$; (b) $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$; (c) $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$; (d) total

但主要是粒径为 $2 \sim 22 \mu\text{m}$ 的沙尘粒子。在此基础上,着重分析了这次强沙尘暴过程在新疆地区和戈壁地区的沙尘起沙、粒径大小等不同特征。再次表明具有风蚀物理学基础的沙尘数值预报系统,不但物理图像清楚,而且效果也比较好的。

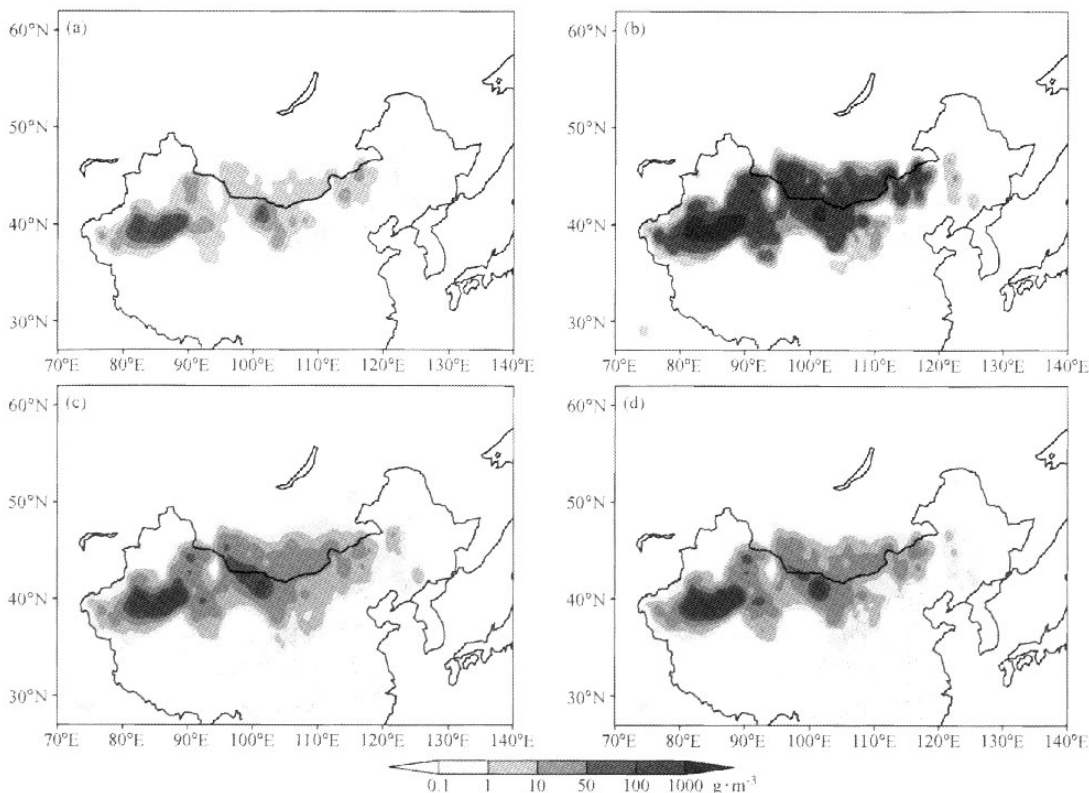


图8 模拟的2006年4月9日8时~11日8时的总起沙量: (a) $d < 2 \mu\text{m}$; (b) $2 \mu\text{m} < d < 11 \mu\text{m}$; (c) $11 \mu\text{m} < d < 22 \mu\text{m}$ (c) 总和
Fig. 8 The simulated dust emission for different particle size group form 0800 LST 9 Apr to 0800 LST 11 Apr 2006; (a) $d < 2 \mu\text{m}$; (b) $2 \mu\text{m} < d < 11 \mu\text{m}$; (c) $11 \mu\text{m} < d < 22 \mu\text{m}$; (d) total

参考文献 (References)

- [1] 周自江, 王锡稳, 牛若云. 近47年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报, 2002, 13 (2): 193~200
Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, 13 (2): 193~200
- [2] 王凌. 北方沙尘天气频繁湘赣鄂遭暴雨袭击——2006年4月. 气象, 2006, 32 (7): 126~127
Wang Ling. April 2006—Frequent Sandstorm in North China Heavy Rain and Severe Convection in Hunan, Jiangxi and Hubei Province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, 32 (7): 126~27
- [3] Shao Y, A model for mineral dust emission. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 20239~20254
- [4] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion

threshold friction velocity. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105, 22437~22443

- [5] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2002, 7 (3): 279~294
Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 2002, 7 (3): 279~294
- [6] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用实验. 气候与环境研究, 2003, 8 (2): 125~142
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated modeling system of dust storm suitable to North China and applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 2003, 8 (2): 125~142
- [7] 雷航, 林朝晖, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 669~683

- Lei Hang, Lin Zhaohui, Sun Jianhua. An improved dust storm prediction system and its simulation experiments. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (3):669~683
- [8] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2006 年春季一次引起华北地区强沉降的沙尘暴过程的模拟研究. *气候与环境研究*, 2007, 12 (3):339~349
- Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. Numerical simulation on a dust storm producing strong deposition over North China in the spring of 2006. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, 12 (3):339~349
- [9] 蔡列宁. 每月天气——2006 年 4 月, 北方风沙肆虐南方雨水丰沛. 2006, 32 (7):121~125
- April 2006—Frequent Sandstorm in North China Abundant Precipitation in South China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, 32 (7), 121~125
- [10] Zhao L N, Zhao S X. Diagnosis and simulation of a rapidly developing cyclone related to a severe dust storm in East Asia. *Glob. Planet. Change.*, 2006, 52:105~120
- [11] Shao Y, Wang J J. A climatology of Northeast Asian dust events. *Meteorologische Zeitschrift*, 2003, 12 (4): 187~196

* * * * *

新书推介

《千里黄云—东亚沙尘暴研究》一书由曾庆存、董超华、彭公炳、赵思雄和方宗义等著。该书由科学出版社出版, 2006 年 8 月第一版、第一次印刷, 定价 198 元。

该书全面阐述东亚地区沙尘天气监测、预警、预告的方法和结果分析以及灾情的评估方法。全书分十章, 共有彩图 204 幅。主要内容包括: 我国沙尘天气的长期统计特征及其气候环境背景分析, 东亚沙尘天气监测分析和沙尘特性的定量观测分析和遥感反演, 风沙动力学, 沙尘天气的数值预告和气候距平形势的动力学预测, 灾害评估方法, 以及世界沙尘天气概况; 并涉及沙尘暴防治问题。

该书体现了多学科的交叉渗透, 将应用卫星的监测系统、地面站网观测系统、地理信息系统、天气学分析和气候学统计、风沙动力学、沙尘暴天气和气候数值预报以及应用业务系统集成成为一个有机体系。

该书包含了大量的新观测事实和若干创造性研究成果, 并在实际应用中发挥了显著作用。全书写作方法独特, 内容全面、资料翔实, 图文并茂, 深入浅出, 雅俗共赏, 具有重要的科学意义和实用价值, 也兼具科学普及功能。

该书可供气象、环境和地球科学等领域的科学研究、教学及相关业务部门使用, 又可供中高层领导干部参阅, 同时也可作为科普读物。