

文章编号:1000-694X(2008)05-0927-04

蒙古气旋天气过程中的沙尘传输特征

李 彬 俊^{1,2}, 孙 照 涌¹, 姜 学 恭³

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 基于沙尘数值预报模式针对不同区域地面起沙的敏感性试验结果, 分析讨论了蒙古气旋沙尘暴过程中沙尘传输的特点及形成原因。结果表明: 蒙古气旋沙尘暴过程的沙尘传输表现为: 沙源区纬度越高, 沙尘向东传输越强, 纬度越低, 向南传输越强; 同时, 高度越高, 沙尘向东传输越强, 高度越低, 向南传输越强。其形成原因是萨彦岭山地背风坡效应、青藏高原东北侧地形强迫绕流等自然地理因素和蒙古气旋的动力、热力结构共同造成的, 具有一定普遍性。

关键词: 蒙古气旋; 沙尘暴; 沙尘传输

中图分类号: P445.4 **文献标识码:** A

沙尘暴是形成于荒漠化的沙尘源区的灾害性天气过程, 随着天气系统的移动沙尘天气能够向下游地区扩展, 或者扬起的沙尘到达自由大气之后, 随着强大的高空气流被输送至更远的下游地区, 从而使沙尘暴的影响范围和影响地区明显扩大。因此, 沙尘传输问题是人们了解沙尘暴、研究沙尘暴危害必须把握的重要问题。近些年, 随着人们对于环境问题关注度的提高, 研究者也针对沙尘传输问题开展了研究。韩永翔等利用我国近 40 a 沙尘暴历史资料研究了我国的沙尘暴分布及远距离传输特征^[1]。张志刚等利用沙尘暴历史资料研究了影响北京地区沙尘暴的沙尘源及沙尘传输规律^[2]。

蒙古国和我国内蒙古地区是影响我国沙尘暴天气的一个重要的沙尘源地, 形成于这一地区的沙尘暴天气过程往往能够对我国北方及东部地区产生较大的影响^[3~5]。而蒙古气旋是导致该地区沙尘暴天气过程的重要天气系统, 特别是 20 世纪末以来, 蒙古气旋导致的沙尘暴天气过程明显增多, 根据张小曳^[6]等对 2006 年影响我国的沙尘天气过程的统计, 在 17 次形成于蒙古国和我国内蒙古地区的系统性沙尘暴天气过程中, 有 16 次都是由蒙古气旋引发的。而针对蒙古气旋沙尘暴过程传输问题的研究目前还不是很多, 笔者等通过对蒙古气旋沙尘暴过程的研究发现, 在沙尘向南传输过程中, 至少形成两个优势传输带, 分别位于行星边界层中和 700 hPa 附近^[7]。但针对蒙古气旋沙尘暴过程的传输方向、强度特点的有关研究还不够系统。因此, 笔者将针对

影响我国北方的一次蒙古气旋强沙尘暴过程, 研究沙尘传输的高度、强度、方向等特点, 以期初步揭示蒙古气旋沙尘暴过程中的一些基本沙尘传输规律。

1 天气过程及研究方法

天气过程为 2002 年 3 月 18—22 日蒙古气旋型强沙尘暴过程。影响地区包括西北、华北、东北及山东、河南、湖南、湖北及四川省部分地区。本次过程中, 蒙古气旋于 19 日 08 时在蒙古东部萨彦岭山地背风坡形成, 同时扬沙和沙尘暴开始出现在该地区。19 日 20 时, 蒙古气旋加强并略有东移, 沙尘暴开始扩展至我国内蒙古西部及西北地区。20 日, 蒙古气旋继续东移并迅速增强, 气旋冷锋扫过我国北方大部地区, 并引发大范围强烈沙尘天气。21 日, 气旋东移加快, 沙尘暴区也推进至东北地区。之后, 气旋逐渐减弱, 沙尘暴也随之逐渐结束。

为了揭示蒙古气旋过程中沙尘传输的强度和演变特点, 采用了高时空分辨率的数值模拟输出结果, 模式为程丛兰等开发的沙尘数值预报模式^[8], 其中, 天气模式为中尺度模式 MM5V3, 与之耦合的沙尘模块包含起沙、传输、沉降等动力过程, 该模式目前在北京城市气象研究所开展业务化运行。

2 结果分析

2.1 沙尘传输随纬度和高度的变化

模式对本次过程进行了较成功的模拟, 这在文

收稿日期:2008-05-06; 改回日期:2008-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40565003)资助

作者简介:李彬俊(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,在读博士,正研级高级工程师,主要从事大气科学及区域自然灾害研究。Email:

献[7]中有着较详细的描述,在此不在赘述。由于42°N大约为蒙古国和我国内蒙古的交界区,为了分析沙尘传输特点随纬度的变化,设计了地面起沙敏

感试验。图1A为控制试验地面起沙系数,整个蒙古国、我国内蒙古地区均能够起沙;图1B则去掉我境内内蒙古及其以西宁夏、陕西等地的地面起沙。

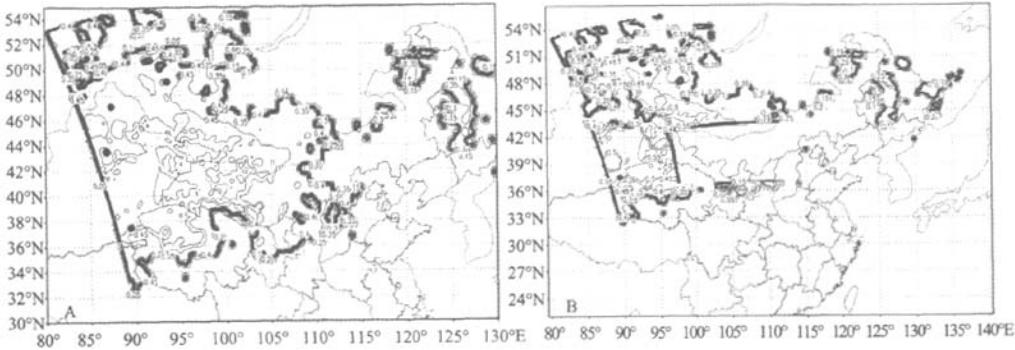


图1 模拟区域起沙系数分布
(A:控制试验,CT; B:地面起沙敏感试验,ST)
Fig. 1 Dust rising coefficient in control test (A) and sensitive test (B)

图2(见图版Ⅲ)分别给出了地面起沙敏感试验和两试验差值地面沙尘浓度的演变,其中,地面起沙敏感试验主要反映了萨彦岭山地及蒙古地区的起沙的传输情况(青藏高原一带的起沙的传输相对孤立);而两试验差值则反映了内蒙古西部等地起沙的传输情况。从图中可以看到,19日20时(图2A)沙尘区局限在萨彦岭山地及蒙古地区,而图2B则局限在内蒙古中西部及以南地区,沙尘区与沙尘源区吻合,表明该阶段处于沙尘暴形成阶段。20日08时,可以看到(图2C)沙尘主体向东扩展,到达内蒙古中东部偏南地区,而向南的分支明显较弱。而图2D中,沙尘区明显分为强度相当的两个分支,向东的分支同样到达内蒙古中东部偏南地区,而向南的分支明显强于图2C,并到达青藏高原东北侧至黄土高原一带,表明源于内蒙古西部地区的起沙向南的传输明显增强。至20日20时,可以看到(图2E)源于萨彦岭山地和蒙古地区的起沙减弱明显,且仍然局限在40°N以北内蒙古中东部偏南地区一带;而图2F中,沙尘区主体产生更明显的向南扩展,到达华北北部地区,沙尘区前沿更是到达了长江以北地区。可见,源于内蒙古西部地区的起沙能够产生更强的向南的扩展,而源于萨彦岭山地、蒙古地区的起沙则局限在40°N以北地区。之后的沙尘传输延续了这一特征(图略),至21日20时,源于萨彦岭山地、蒙古地区的起沙仍然局限在40°N以北地区并逐渐减弱,而源于内蒙古西部地区的起沙在减弱的同时进一步扩展至四川等地。

以上分析了地面沙尘浓度的演变特点,为了分析不同高度的沙尘传输情况,图3(见图版Ⅳ)类似

于图2给出了700 hPa的沙尘传输情况。可以看到,与地面类似,在19日20时(图3A),萨彦岭、蒙古等地起沙沿42°N向东传输,而图3B中内蒙古西部起沙其中一支向东传输,另外明显出现向南方向的分支。到20日20时(图3C,D),沙尘区明显减弱,但向东的传输距离明显增大,已经输送至东北地区。比较图2和图3,可以看到不论是萨彦岭、蒙古等地起沙还是内蒙古地区起沙,700 hPa沙尘向东的传输强度(图3)均明显强于地面,特别是在20日02时。可见,700 hPa沙尘向南的传输明显减弱,而向东的传输明显增强,传输的距离明显增大。

为了进一步分析沙尘传输在不同高度的特点,图4(见图版Ⅴ)类似图2、图3给出了沿43°N和113°E的纬向和经向剖面图。首先,对比图4A,B纬向剖面图可以看到,源于蒙古国的沙尘主体在19日20时出现在108°E以西,而源于内蒙古西部地区的沙尘则到达112°E附近,表明后者向东扩展较为明显。另外,从图4B可以看到,随着高度的增加,沙尘区向东的扩展明显增强,在700 hPa到达117°E附近,而图4A在同样高度仅仅到达114°E附近。可见,源于内蒙古地区的沙尘向东的扩展强度明显强于来自蒙古国的沙尘,同时,高度越高,向东的扩展越强。

对比图4C,D经向剖面图可以看到,首先,源于蒙古国的沙尘主体($>0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)位于37.5°N—43.5°N一带,而来自内蒙古西部的沙尘主体则位于34.5°N~42°N。另外,从图4C,D可以看出,随纬度的降低沙尘浓度 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 0.2

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 等值线的高度呈现逐渐下降的趋势,表明来自蒙古国和我国内蒙古的起沙具有一个共同的特点,即高度越低,其向南传输的强度越强,这进一步验证了前文所得出的结论。

综上可见,在蒙古气旋沙尘暴过程中,沙尘传输的方向、距离随纬度、高度的改变表现出明显的变化,即:纬度越高(越偏北),则沙尘向东的传输越强,纬度越低(越偏南),则向南(东南)的传输越强;同时,高度越高,沙尘向东的传输越强,距离越远,高度越低,向南(东南)的传输越强。

2.2 形成原因分析

本次过程中蒙古气旋形成于萨彦岭山地背风坡,形成之后基本上向东移动,因此,气旋中心大约在 48°N 附近(图5),并沿 105°E — 125°E 一线移动。在这种情况下, 42°N 基本上是蒙古气旋的底部区域, 42°N 以北属于气旋区,因此该区域对流层中低层为气旋式旋转的气流,即自西向东逐渐从西北气流变为偏西气流直至西南气流。因此源于 42°N 以北萨彦岭山地的起沙必然首先沿山地下坡方向(西北—东南)扩展,在大约到达气旋底部区域 42°N 附近之后,转为向东传输,而到达内蒙古中东部之后再转为向东北方向传输。而同样源于 42°N 以北蒙古地区的起沙由于其位置偏东,因此其传输方向首先是向东传输,然后逐渐转为向东北方向传输。因此,总的来说萨彦岭山地和蒙古地区的起沙都受到气旋式气流控制,向东传输较强。对于内蒙古西部的起沙,由于其位置基本上在 42°N 以南,因此受气旋区

气旋式气流控制较弱,同时随着纬度降低逐渐脱离气旋区控制,因此,该区域沙尘传输方向基本上受到地形影响。需要指出,由于在青藏高原东北侧对流层中低层存在强大的西北—东南方向的地形强迫绕流(图5),因此能够导致 40°N 以南的沙尘产生较强的向东南方向传输的趋势,从而导致前文内蒙古地区起沙向南传输较强的结果。可见,蒙古气旋的位置特点及在青藏高原东北侧的地形强迫导致纬度越高,沙尘向东传输越强,纬度越低,向南传输越强。

需要指出,由于蒙古气旋为萨彦岭山地背风坡气旋,因此本次过程中气旋中心的出现位置及移动方向具有一定的普遍性。从图5可以看到,萨彦岭山地纬度范围在 45°N — 52°N ,因此,气旋中心基本上出现在 48°N 附近,同时,由于受到西风气流的引导,其移动方向也基本上是自西向东移动。而导致上述结果的根本原因是自然地理因素,因此上述结论具有较大的普遍性。

沙尘传输方向随高度的变化也是由于蒙古气旋的特点导致的。蒙古气旋过程中沙尘区主要出现在气旋冷锋区域。就对流层低层气旋冷锋锋区的结构来看,冷空气嵌入暖空气的下方:在锋区上方,气流沿锋面爬升;锋区下方,气流沿锋面下沉(锋面正环流)。而蒙古气旋冷锋锋区下方沿锋面下沉的气流常表现为图5西北—东南向的特点(锋后冷空气爆发方向)。其形成原因在于:由于萨彦岭山地的背风坡效应,蒙古气旋形成初期气旋中心往往位于 45°N — 48°N 附近,同时由于萨彦岭山地对低层冷空气的阻塞使其经历从缓慢堆积到剧烈爆发的过程,这就决定了低层冷空气的爆发方向必然是沿着西北—东南方向(从萨彦岭山地沿西北—东南方向到达内蒙古西部为下坡地形,也加剧了冷空气爆发的强度),即气旋冷锋为东北—西南走向(图5),这样在气旋冷锋扫过蒙古南部、内蒙古中西部时必然沿着西北—东南方向。由于这一冷空气爆发的特定路径,以及由于在气旋冷锋附近冷空气嵌入暖空气下方,因此高度越低,冷空气范围越大,沙尘向南(东南)传输越强。

对于冷锋锋区上方沿锋面爬升的气流而言,在其爬升过程中将遭遇环境气流并逐渐被环境气流改变。对于蒙古气旋冷锋而言,这支爬升气流所遇到的环境气流为气旋区气旋式旋转的气流,因此,这支携带沙尘的次天气尺度爬升气流将逐渐汇入天气尺度的气旋区气流中,最终的归宿是沿着气旋区气流的运行方向进行传输,即逐渐变为东西向直到西南—

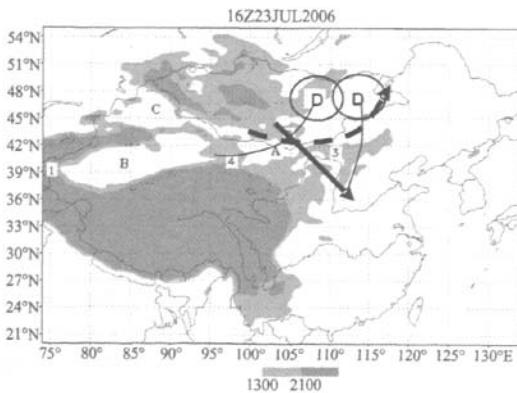


图5 蒙古气旋及演变示意图

(粗实线箭头表示冷锋后西北气流,粗虚线箭头表示气旋区螺旋上升气流,细实线表示气旋冷锋)

Fig. 5 The sketch map of Mongolia cyclone and its evolvement

东北向。由于高度越高,暖空气范围越大,因此沙尘传输特点必然是高度越高,向东(东北)传输越强。

以上的分析也可以进行如下的简单解释,在气旋冷锋所在的区域为明显的冷平流,根据热成风原理,地转风的方向随高度逆转,因此,当地面风向为偏北风时,则随着高度升高逐渐变为偏西风或西南风,因此沙尘传输方向由向南传输变为向东和东北传输。即高度越高,向东和东北传输越强,反之,向南传输越强。那么,什么位置是一个明显的分界区呢?从锋面的特点来看,由于锋面为空气密度的不连续面,因而客观上制约了沙尘粒子穿越锋面的运动,锋面上、下方气流只能沿着锋面进行爬升或下沉,因此并没有明显的穿过穿越锋面的气流,锋面基本上作为一个分界区,其上方沙尘传输最终转为向东或东北传输,而其下方则基本上向南或东南传输。

3 小结

本文基于沙尘数值预报模式针对不同区域地面起沙的敏感性试验结果,分析并讨论了蒙古气旋沙尘暴过程中沙尘传输的特点及形成原因,结果表明:

1)蒙古气旋沙尘暴过程的沙尘传输特点之一为:沙源区纬度越高(越偏北),沙尘向东传输越强,纬度越低,向南传输越强。其形成原因是萨彦岭山地背风坡效应、青藏高原东北侧地形强迫绕流等自然地理因素造成的,因此这一特点具有普遍性。说

明我国境内内蒙古中西部地面起沙向南的传输相对较强;而萨彦岭山地、蒙古国等境外的起沙向东传输相对较强。

2)蒙古气旋沙尘暴过程的另一传输特点为:沙源区高度越高,沙尘向东传输越强,高度越低,向南传输越强,且对流层低层的气旋冷锋锋区可以作为一个近似的分界面。其形成是由地形及蒙古气旋的动力、热力结构共同决定的。

参考文献(References):

- [1] 韩永翔,宋连春,莫晓霞,等.中国沙尘暴月际时空特征及沙尘的远程传输[J].中国环境科学,2005,25(增刊):13—16.
- [2] 张志刚,高庆先,矫梅燕,等.影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析[J].环境科学研究,2007,20(4):21—27.
- [3] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2):106—111.
- [4] 张小玲,程丛兰,谢璞,等.连续强沙尘天气的发展和时空演变机制的数值模拟[J].中国沙漠,2007,27(1):137—146.
- [5] 张小玲,李青春,谢璞,等.近年来北京沙尘天气特征及成因分析[J].中国沙漠,2005,25(3):417—421.
- [6] 张小曳.2006年春季的东亚沙尘暴[M].北京:气象出版社,2006.
- [7] 李彰俊,姜学恭,程丛兰,等.内蒙古中西部沙源地影响沙尘暴扩展过程的数值模拟研究[J].中国沙漠,2007,27(5):851—858.
- [8] 程丛兰,王迎春,刘伟东,等.与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟[J].科学通报,2004,46(19):2007—2013.

Characteristic of Dust Transportation in Dust Storm Process Induced by Mongolia Cyclone

LI Zhang-jun^{1,2}, SUN Zhao-bo¹, JIANG Xue-gong³

(1.Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Inner Mongolia Autonomous Regional Meteorological Bureau, Huhhot 010051, China; 3.Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Huhhot 010051, China)

Abstract: By using the output data of numerical simulation based on a dusty weather numerical prediction model and sensitive test about the surface dust rising coefficient at different areas, the dust transportation characteristics and its formation causes in the dusty weather process induced by Mongolia cyclone were analyzed. The result showed that in the process the dust particles eastward transportation enhanced while the latitude of the dust resource area increased. Contrariwise, the southward transportation enhanced. Meanwhile, the eastward transportation enhanced while the altitude of dust particles increased. Contrariwise, the southward transportation enhanced. This phenomenon is caused by collective effect of the Sayan mountain's lee affection, the air stream forced by the Qinghai-Tibet plateau north-eastern boundary and the dynamic and thermodynamic structure of Mongolia cyclone. Most of these elements are natural and so these results are universal.

Keywords: Mongolia cyclone; dust storm; dust particle transportation

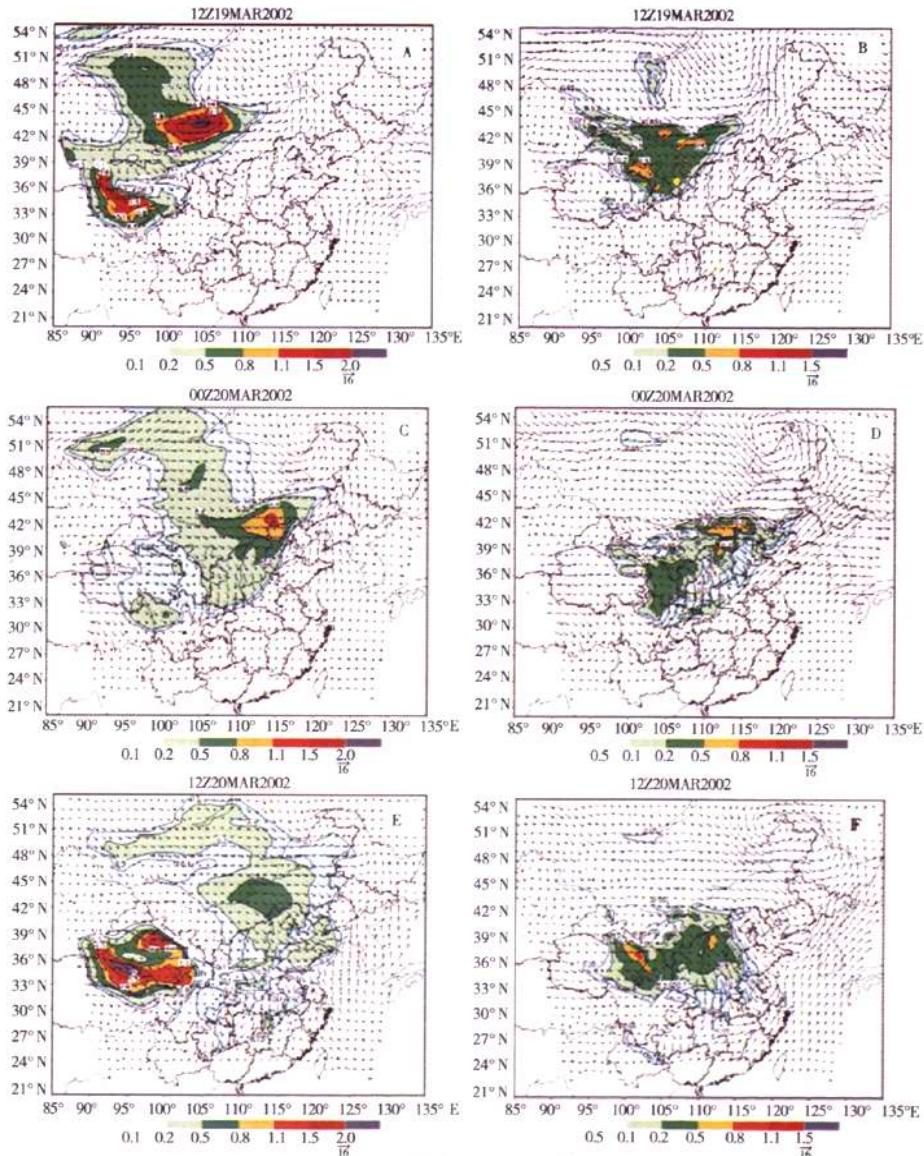


图2 地面起沙敏感试验(A,C,E)和两试验差值(CT-ST)(B,D,F)地面沙尘浓度及风场
(时间为3月19日20时至20日20时,间隔12 h, 单位 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.2 Dust concentration and wind field in ST (A,C,E) and in (CT-ST) (B,D,F) at surface
from 20:00, Mar. 19 to 20:00 Mar. 20 with interval as 12 hours

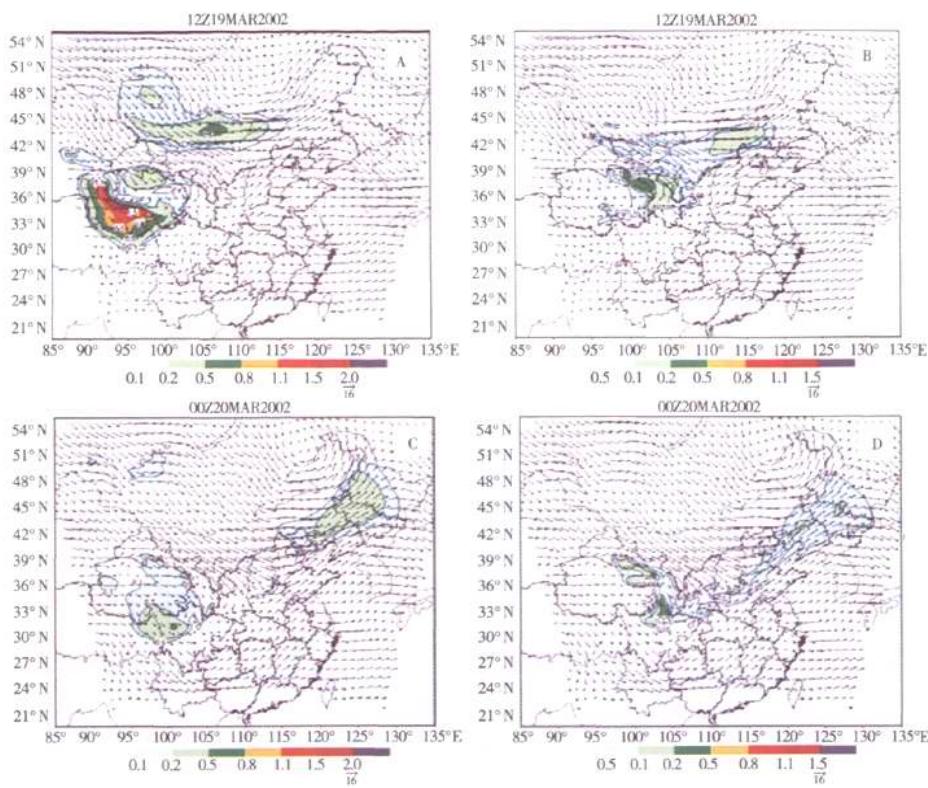


图3 地面起沙敏感试验(A,C)和两试验差值(CT-ST)(B,D)700 hPa 沙尘浓度及风场

(时间为3月19日20时至20日00时,间隔12 h, 单位 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.3 Dust concentration and wind field in ST (A,C) and in (CT-ST)(B,D) at 700 hPa from 20:00, Mar. 19 to 08:00 Mar. 20

✿ ✿ ✿ ✿ ✿

2006年中国科技期刊总被引频次总排序中前60名期刊

排名	期刊名称	总被引频次	排名	期刊名称	总被引频次
1	中国电机工程学报	8127	31	中国实用外科杂志	3245
2	物理学报	6485	32	地理学报	3164
3	科学通报	6483	33	护理学杂志	3035
4	应用生态学报	5880	34	中华内科杂志	3020
5	中华护理杂志	5805	35	中国现代医学杂志	2916
6	生态学报	5801	36	环境科学	2899
7	电网技术	5080	37	食品科学	2824
8	中华医学杂志	4763	38	植物生理学通讯	2803
9	中国实用护理杂志	4635	39	中国科学 D	2760
10	中国组织工程研究与临床康复	4623	40	软件学报	2743
11	中草药	4457	41	水土保持学报	2693
12	电力系统自动化	4402	42	土壤学报	2670
13	高等学校化学学报	4192	43	电子学报	2652
14	中华医院感染学杂志	4161	44	植物生态学报	2636
15	中国农业科学	3942	45	护理研究	2625
16	中华结核和呼吸杂志	3879	46	CHINESE PHYSICS LETTERS	2624
17	中华外科杂志	3838	47	园艺学报	2596
18	计算机工程与应用	3677	48	中华神经科杂志	2573
19	WORLD JOURNAL OF GASTROENTEROLOGY	3576	49	中国药学杂志	2552
20	作物学报	3511	50	岩土工程学报	2528
21	中华骨科杂志	3460	51	中华肿瘤杂志	2522
22	分析化学	3423	52	地球物理学报	2518
23	中华儿科杂志	3413	53	化学学报	2510
24	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3409	54	中国沙漠	2504
25	中华放射学杂志	3383	55	西北植物学报	2496
26	中华妇产科杂志	3360	56	农业工程学报	2489
27	中国中西医结合杂志	3352	57	水利学报	2487
28	岩石力学与工程学报	3344	58	中华肝脏病杂志	2455
29	中华心血管病杂志	3303	59	中华泌尿外科杂志	2450
30	中国中药杂志	3260	60	药学学报	2443

摘自“中国科学技术信息研究所”公布的2007年《中国科技期刊》引证报告(核心版)。

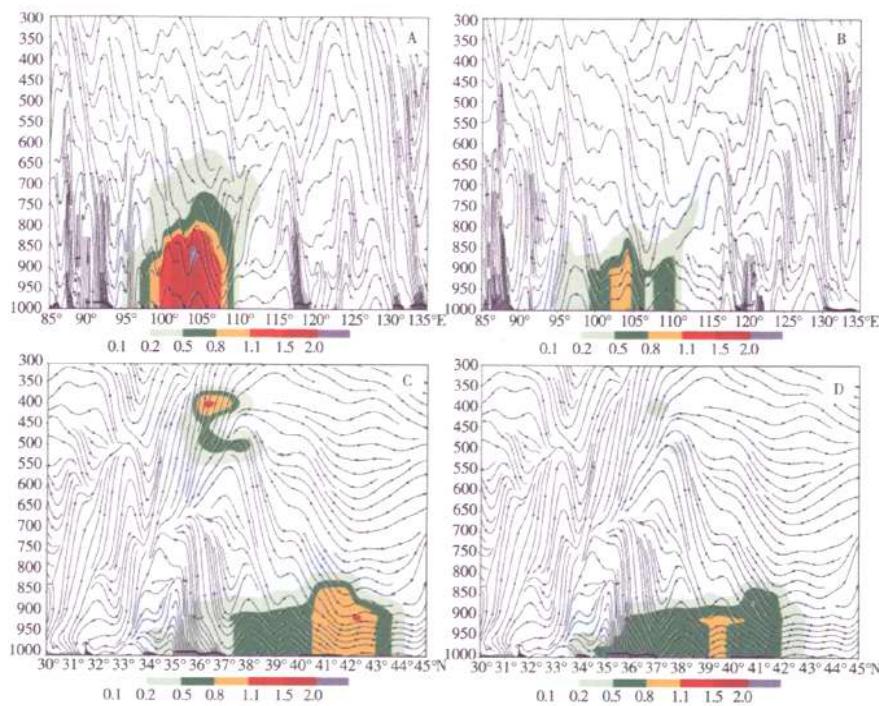


图4 地面起沙敏感试验(A,C)和两试验差值(CT-ST)(B,D)沙尘浓度垂直剖面
(A,B 表示 19 日 20 时沿 43° N 方向 C,D 表示 20 日 08 时沿 113° E 方向, 单位 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.4 Cross sections of dust concentration in ST (A,C) and in (CT-ST)(B,D)

* * * * *

2006 年中国科技期刊影响因子总排序中前 70 名期刊

排名	期刊名称	影响因子	排名	期刊名称	影响因子
1	电网技术	2.875	36	应用生态学报	1.461
2	岩石学报	2.649	37	中华医院管理杂志	1.459
3	实验技术与管理	2.587	38	地学前缘	1.447
4	中国电机工程学报	2.537	39	软件学报	1.436
5	中国沙漠	2.455	40	电力系统自动化	1.417
6	中国公路学报	2.444	41	地质通报	1.398
7	PEDOSPHERE	2.331	42	高校地质学报	1.388
8	地质学报	2.326	43	植物营养与肥料学报	1.387
9	地理学报	2.302	44	土壤	1.378
10	地质科学	2.212	45	工程地质学报	1.374
11	中国科学 D	2.062	46	中国水稻科学	1.372
12	实验室研究与探索	2.026	47	中华神经外科杂志	1.372
13	大地构造与成矿学	1.906	48	石油实验地质	1.371
14	中华护理杂志	1.861	49	中华医院感染学杂志	1.350
15	土壤学报	1.840	50	资源科学	1.350
16	高原气象	1.715	51	水土保持学报	1.328
17	新型炭材料	1.714	52	CHINESE PHYSICS	1.312
18	自然资源学报	1.675	53	古地理学报	1.311
19	中华儿科杂志	1.652	54	环境科学	1.310
20	生物多样性	1.639	55	中华心血管病杂志	1.308
21	地球物理学报	1.634	56	中华流行病学杂志	1.299
22	海洋与湖沼	1.631	57	干旱区地理	1.287
23	植物生态学报	1.590	58	经济林研究	1.286
24	中国地质	1.576	59	中国危重病急救医学	1.285
25	气象学报	1.559	60	中国糖尿病杂志	1.283
26	地理研究	1.556	61	玉米科学	1.272
27	石油勘探与开发	1.512	62	湖泊科学	1.270
28	地质论评	1.495	63	冰川冻土	1.262
29	交通运输工程学报	1.491	64	作物学报	1.253
29	生态学报	1.491	65	中国农业科学	1.247
31	地球化学	1.487	66	石油与天然气地质	1.244
32	草地学报	1.486	67	天然气地球科学	1.243
33	第四纪研究	1.478	68	中国康复	1.242
33	中华骨科杂志	1.478	69	地理科学	1.238
35	物理学报	1.462	70	中国水土保持科学	1.230

摘自“中国科学技术信息研究所”公布的 2007 年《中国科技期刊》引证报告(核心版)。