我国春季沙尘暴研究

高庆先,李令军,张运刚,胡 铭（国家环境保护总局气候变化影响研究中心,北京 100012）

摘要：利用 GMS 卫星遥感资料,结合地面气象观测资料和中尺度每小时数值模拟,对 1998 年 4 月和 2000 年 4 月发生的强沙尘天气演变过程进行了详细的分析,初步确定了影响我国的沙尘暴起始源地,并将我国的沙尘暴天气划分为日变化型(停滞型)和移动型(锋面气旋型等).详细分析了低涡型沙尘暴和东北低涡型沙尘暴的发生、发展的宏观机制.

关键词：沙尘暴；中尺度数值模拟；静止气象卫星(GMS)；沙尘源地

中图分类号：X131.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000–6923(2000)06–0495–06

Studies on the springtime dust storm of China.GAO Qing-xian, LI Ling-jun, ZHANG Yun-gang, HU Ming (Center for Climate Impact Research of the State Environmental Protection Administration, Beijing 100012). *China Environmental Science.* 2000,20(6)：495~500

Abstract：Using the satellite remote sensing data of GMS and the observational ground meteorological data as well as the hourly simulation results from MM5, we analyzed carefully the synoptic evolution of strong dust storm occurred in April 1998 and April 2000. We determined also the initial sources of dust storm influencing China; and classified them into daily variation (stagnancy)type and moving (frontal cyclone) type. The macro mechanism of occurrence and development of low eddy cyclone and northeast low eddy cyclone dust storms was analyzed in detail.

Key words：dust storm；mesoscale meteorological model (MM5)；GMS；sources of dust

沙尘暴是指强风从地面卷起大量沙尘,使空气浑浊,水平能见度小于 1000m 的灾害性天气现象.2000 年 3~4 月间,我国共出现了 10 多次大范围的沙尘暴、扬沙或浮尘天气,引起广大科学工作者和政府部门的高度重视.沙尘暴是自然天气现象和人类活动对生态系统扰动结合的结果.国内外在沙尘暴方面已有一些研究[1-5],并得到初步的结论.从我国的土地利用状况和沙漠戈壁分布状况看,我国的沙尘暴潜在源地主要分布在我国的西北干旱、半干旱地区,我国的华北地区也分布有一些小的沙漠、裸露地和开垦的农田,这些地区均是沙尘暴的潜在源地.已有的研究指出,不同的地表类型产生的沙尘砾大小不同,只有粒径在 70μm 以下的沙砾能够发生悬浮、漂移,形成长距离传输的沙尘暴天气[6].

沙尘暴天气的形成首先要有足够强的和持久的大风区,并具有强烈的阵性特征,该大风区受天气系统、冷暖空气活动频率以及地形地貌等方面的影响;第二是大气边界层的温度垂直分布处于极不稳定状态,在边界层中储存有大量不稳定能量;第三是在强冷空气经过的路径上或锋面气旋经过的路径上,地表为沙尘暴的潜在沙源地即沙漠戈壁、流沙地区、裸露地、植被稀疏和干燥疏松的地表、新开垦的农田等.

本文利用 GMS 卫星逐日、逐时的遥感监测资料分析了 1998 年 4 月和 2000 年 4 月沙尘暴天气,然后结合地面气象站观测、天气图分析和中尺度数值模拟等资料对蒙古低涡、低槽和华北气旋以及东北气旋等过程进行了详细的分析.通过分析对我国沙尘暴的源地、传输路径、影响范围和沙尘的宏观发生、发展和输送机制等有了进一步的了解.分析的结果对制定我国沙尘暴的减缓、控制对策,确定大周边和小周边沙

收稿日期：2000-10-16

基金项目：国家基础研究项目(973G1999043505)

万方数据

尘源的影响范围和强度等提供了一定科学基础.

1 利用卫星遥感资料解析 1998 年春季的沙尘暴源

我国沙尘暴天气多发区,主要位于河西走廊、宁夏黄河灌区、南疆和田地区和吐鲁番地区、柴达木盆地、内蒙古伊克昭盟和阿拉善高原、河套平原、鄂尔多斯高原、陕北榆林及长城沿线等地区,涉及新疆全区、甘肃河西、内蒙中西部、宁夏全境、陕西北部、青海湟水地区及西藏部分地区、蒙古高原等.这些地区不仅是沙尘暴天气多发区,而且向大气中输送的沙尘在强冷空气过境,近地层有强的垂直不稳定层结时可波及到我国东部、东南部等地区,造成大范围扬沙、浮尘、泥雨和沙尘暴天气,严重危害工农业生产,造成生态环境的破坏.

根据我国历史资料分析,沙尘暴天气具有明显的季节变化,春季是沙尘暴天气多发季节,也是沙尘暴发生强度最大、影响范围最广的季节.这是由于春季冷暖空气都异常活跃、气旋活动频繁、降雨稀少、天气干燥、地面解冻回暖、裸露地表土质疏松、地表温度明显高于低空气温,易形成干热不稳定.从天气学和土壤特性的角度分析,春季最易满足沙尘暴产生的 3 个条件是丰富的沙尘源、强风和强的垂直不稳定.

图 1 给出了 1998 年 4 月的一次典型沙尘暴天气发生、发展和消亡过程的卫星云图.受蒙古低涡、低槽和地面气旋冷锋的影响,1998 年 4 月 14 日 01 时,在巴尔喀什湖北部、哈萨克斯坦东北部、额尔齐斯河上游等地区卫星云图上都有沙尘出现.该沙尘区随着气旋向东移动,于当天 17 时移至蒙古国西部,并于 20 时沿地面冷锋云带从蒙古国西部至中部,在 48°N、87°E~105°E 附近形成一条东西向松散的点状沙尘云区,并于 4 月 15 日 09 时(图 1)移至 45°N、88°E~115°E 附近的蒙古国南部,转变为沿冷锋分布的弧状沙尘云带,在其东部为块状沙尘云(45°N,110°E).

4 月 15 日 12 时沙尘云带开始向南移入我国河套北部、内蒙古中部,并与中蒙边境的沙尘云带合并,使得沙尘云带宽度增加.与此同时,在河套西部、阿拉善左旗地区又有新生的点源沙尘群形成并向东移动.14 时蒙古国中部的沙尘云带在中蒙边境突然增强,形成宽约 3 个纬度、长约 6 个纬度的面状沙尘云,向东南方向移入河套西北部地区,形成一条西起额济纳旗,经库布齐沙漠北部边缘,至浑善达克沙漠边缘的东西向的沙尘云带.16 时,由于低涡流场的并合作用,河套西北部、巴丹吉林、乌兰布和、库布齐沙漠北部边缘形成一条沙尘云带(40°N~43°N,102°E~110°E).此时沙尘暴的强度达到最强.19 时在河套形成南北两个沙尘云带,北部位于 40°N,105°E~110°E 附近,南部云带位于 37°N,105°E~110°E 附近,南部沙尘云带来自河套西部,20 时两个云带分别东移至黄土高原.

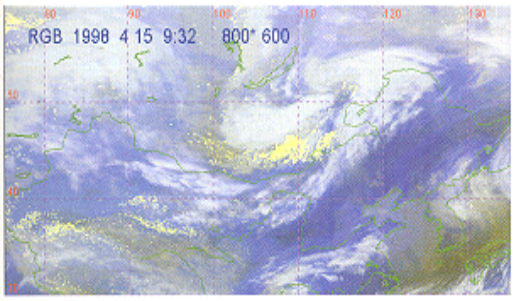
16 日 07 时在 115°E 附近两片沙尘云合并为南北向的沿太行山分布的较强沙尘云带,这与气旋在黄土高原的局地汇聚作用有关.08 时东移至河北平原,沙尘云进一步增强,09 时又分裂为南北两个沙尘云团,南部沙尘云团位于鲁西南,北部沙尘云团位于京、津和冀北地区.13 时沙尘云团达到最强阶段.17 日 04 时沙尘云随气旋东移至黄海减弱,并逐渐消失,只有少量沙尘移至韩国西部.

从 1998 年和 2000 年 4 月几次强沙尘暴天气的卫星云图演变过程分析可以看出,沙尘暴的起始源地可以追溯到额尔齐斯河上游的哈萨克斯坦东北部沙化地区,蒙古国中南部戈壁地区,我国西部干旱、半干旱地区,尤其是内蒙古中部的浑善达克沙漠,西部的额济纳旗(及其周边)沙漠、戈壁地区等,我国黄土高原荒漠和裸露地区等.

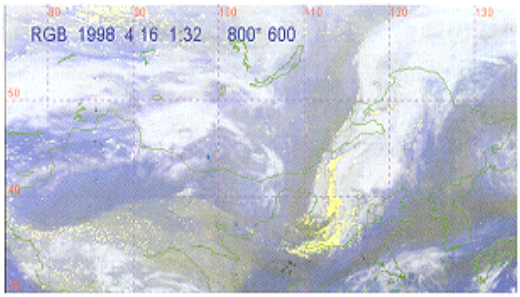
源于上述沙尘源地的沙尘在随气旋东移时,强度时强时弱,沙尘暴的强弱取决于天气条件和地表状态.通过对所收集的近 1500 张卫星云图资料分析,发现影响我国的沙尘暴类型可按起沙源地和路径归纳为境外起沙东移影响我国型;局地生、局地消型;境内起沙东移或东南移近距离

万方数据

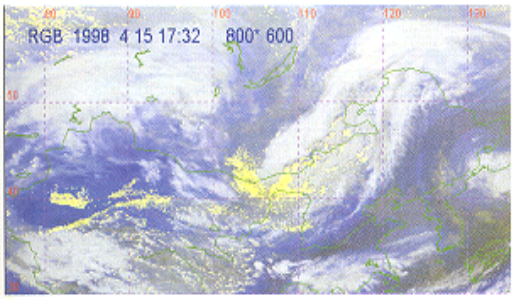
输送型;境内起沙长距离输送型.



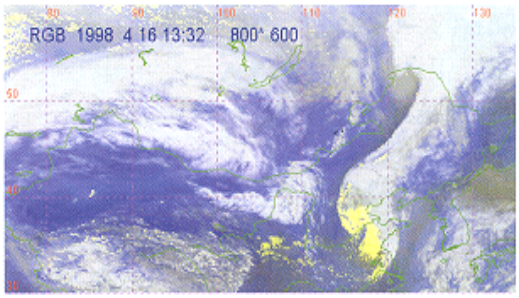
a. 4 月 15 日 09 时 32 分
a. 09:32 15, April



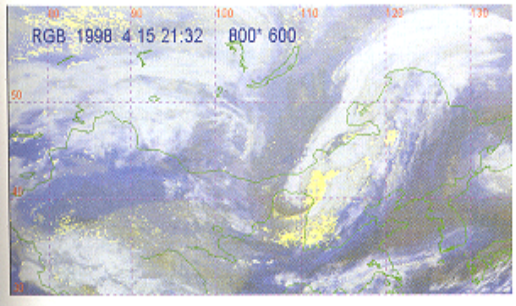
d. 4 月 16 日 01 时 32 分
d. 01:32 16, April



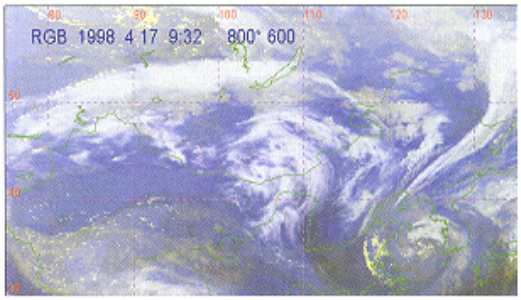
b. 4 月 15 日 17 时 32 分
b. 17:32 15, April



e. 4 月 16 日 13 时 32 分
e. 13:32 16, April



c. 4 月 15 日 21 时 32 分
c. 21:32 15, April



f. 4 月 17 日 09 时 32 分
f. 09:32 17, April

图 1　1998 年 4 月 15~17 日典型沙尘暴的卫星云图演变过程

Fig.1　A typical evolvement process of dust storm from GMS satellite data of 15~17, April 1998

通过对卫星资料的分析,还发现沙尘暴有明　显的日变化.一般沙尘暴最初发生在上午 9~10

万方数据

时,与沙漠、戈壁等沙尘源地的地气温差大,容易形成对流不稳定有关.沙尘天气一般于当日下午或傍晚消失.只有当强大的冷空气持续 2~3d 时,可以形成大范围沙尘暴天气.

2 沙尘暴发生的天气背景分析

春季沙尘暴与气旋活动有关,根据地面天气图分析,按冷空气移动路径可分为北路、西北路和西路 3 种.在气旋移动过程中,沙尘暴的形成演变和沙尘的输送与气旋流场的结构有密切关系.以大尺度的气象分析场作为初始场和边界场,结合天气观测,利用 MM5 中尺度数值模拟系统对 1998 年 4 月和 2000 年 4 月发生沙尘暴、扬尘和浮尘天气现象逐日进行了数值模拟,得到了与 GMS 卫星遥感同步的逐时气象场.通过对上述模拟结果的分析,对沙尘暴的形成演变特征有了进一步的认识.

2.1 低涡型沙尘暴

1998 年 4 月 15 日的沙尘暴属于西北路径.此次沙尘暴的源地在蒙古国的中戈壁省和南戈壁省.大的天气背景是该日蒙古国有一个热低压系统,在该系统中,有众多的局地性沙尘云,并一直持续到蒙古气旋冷锋侵入.显然这次强冷空气经蒙古国中部向东南移动,由于槽的经向度很强,1998 年 4 月 16 日 17 时在渤海湾西部有一个强的低涡系统(见图 2),对应在云图上表现为两个强沙尘云团,这表明低涡流场将大量沙尘卷入气旋云系中,这时气旋中心的垂直输送高度可达 10km,图 3 为沿贝加尔湖至北京方向的垂直剖面图,可以看出北京恰好位于气旋中心的垂直上升区(图 3 中☆为北京).

在这次沙尘暴天气过程中,初始沙尘暴形成在蒙古高原、贝加尔湖东南部的蒙古低涡的南缘.在沙尘暴源地配合的低空流场,正处于喇叭口型辐合流场的入口处(见图 4).对应高空 6.9km 高度处(见图 5),初始沙尘暴群位于高空急流分支下风向靠近出口附近的高空强辐散区,由于高空的强辐散,低空的强辐合,对流单体群强烈发展,因此急流与强对流的发展有明显的相关.这种类型的沙尘暴可以归纳为低涡型沙尘暴天气.

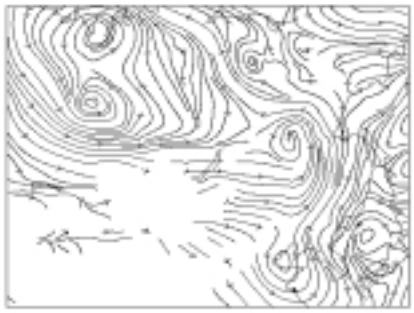


图 2 1998 年 4 月 16 日 17 时 1.5km 流场

Fig.2 The streamline fields of 1.5km on 17:00 16, April 1998

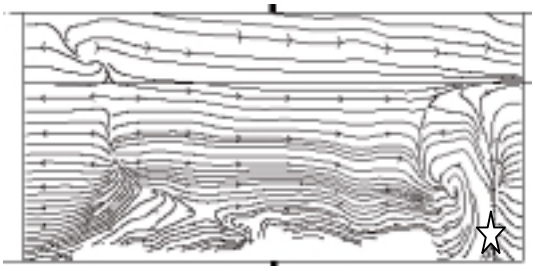


图 3 1998 年 4 月 16 日 17 时流场垂直剖面

Fig.3 The streamline fields of on 17:00 16, April 1998

图 4 1998 年 4 月 16 日 17 时 2.0km 流场

Fig.4 The streamline fields of 2.0 km on 17: 16, April 1998

万方数据

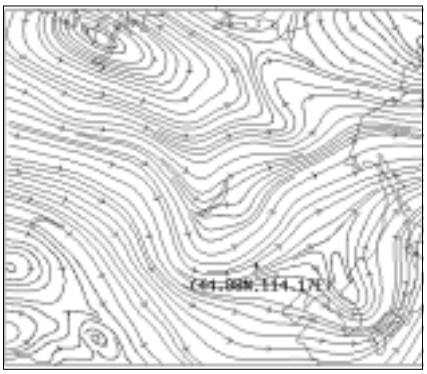


图 5　1998 年 4 月 16 日 17 时 6.9km 流场

Fig.5　The streamline fields of 6.9km on 17:00 16, April 1998

+标志沙尘暴沙尘源地

2.2　东北低涡型沙尘暴

2000 年 4 月 3 日至 9 日有 3 次连续的东北低涡型沙尘暴天气过程.造成这 3 次沙尘暴过程的冷空气主要来自贝加尔湖北部,其移动路径属北路型.在冷空气经过的地区(蒙古高原、我国内蒙古中西部地区、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北等省和京、津地区)先后出现强沙尘暴天气,其中尤以 5~6 日影响我国面积最大.从卫星云图估算 2000 年 4 月 5 日上午沙尘暴影响我国瞬时最大面积约为 55.8km^2.此次沙尘暴的沙尘源在蒙古国中南部的戈壁地区和我国内蒙古的浑善达克沙漠西北区.

由于东北低涡后部冷空气分支,小股冷空气向西倒灌进入我国内蒙古西部,造成河套西部(额济纳旗、阿拉善地区和榆林地区)形成沙尘暴天气,此类沙尘暴大多属于局地生、局地消型.东北低涡后部冷空气分支倒灌现象是河西走廊沙尘暴形成的另一个特征.

3　低涡控制下的沙尘输送

通过对实际气象观测资料和中尺度 MM5 模型模拟结果分析以及对气旋不同部位的垂直流场和水平流场结构的分析,发现沙尘发生时的水平辐合和垂直抬升,最活跃的地区位于锋面附近.低涡气旋不同部位的输送特征亦不同,在低涡中心垂直输送的高度最高,有时可高达 10km 左右;但沿锋面离低涡气旋中心越远,其垂直输送高度越低.由于受地形和大气稳定度的影响,输送高度有一定的起伏.从北京沿东北辐合线的剖面图中(图略)可以看出,输送路径上经过北京的沙尘垂直输送进入边界层后,继续沿锋面辐合带卷入气旋中心进入对流层上层,再随气旋的移动进行远距离输送,使沿途地区形成浮尘、泥雨和沙尘暴等天气现象.由水平流场图可以看出,在冷锋附近有一个风速约为 5~6m/s 区域尺度的大风辐合区.该辐合区可以形成局地扬沙.起沙的面积与垂直环流和大风范围密切相关.沙尘暴沿着系统性大风辐合区移动.

4　沙尘暴形成的宏观机理和源地分析

我国大范围移动性沙尘暴主要与春季频繁的气旋活动及其后部强冷空气有关.沙尘经过的路径上,在不同类型沙尘潜在源地形成沙尘的辐合抬升.沙尘暴初始形成时,沙尘云系中多为点源沙尘暴群,通过对地面植被分布情况和土地利用状态以及沙漠类型的分析,发现这些地区大多处于大的沙漠边缘.在这些沙漠的边缘分布着许多的小型沙地、沙化严重的耕地和干旱草原等破坏严重的土地覆盖类型.由于干旱少雨、植被稀疏、土壤疏松,遇 2~3d 持续高温,边界层结构十分不均匀,热力和动力湍流、对流垂直输送都十分活跃,在低空形成众多的局部高温、低湿、低压区和低空不稳定层结,具备了中小尺度对流及热低压对流形成和发展的有利条件.在有利的天气系统配合下,形成了低空沙尘天气.云图上的沙尘点源群,遇到强冷锋移近并配合有地形辐合或冷空气入侵时,便可形成更大尺度的沙尘暴.

分析结果表明我国沙尘暴形成的主要初始源区位于蒙古国和我国几个大的沙漠边缘以及沙地、裸露地等地面热力、动力不均匀的地区.从沙尘暴的移动情况看,我国的沙尘暴天气可以归纳为日变化型和移动型沙尘暴,前者具有停滞性的特点,多发生于蒙古高原、塔里木盆地、河

万方数据

套西部,一般属于热低压型沙尘暴;后者始终伴随冷锋辐合带移动,这类沙尘暴最初多发生于蒙古国中部和南部沙漠、戈壁地区.在移动过程中沙尘暴的强度变化受地形、地面植被、地质地貌及天气系统变化的影响,具有沿辐合带向下游移动的特征,该类型沙尘暴的多发区一般位于荒漠化地区下游.地面植被分布与沙尘暴多发区并不一致,地面植被状况好的地区,如果近周边是严重沙化区,同样会受到沙尘暴的危害,例如兰州、银川等地区.

5 结论

5.1 我国春季多风沙天气,与我国北方气旋活动频繁、大风天数多、冷暖空气十分活跃、降水稀少、土地荒漠化严重、干热的生态边界层及气候变化有关.

5.2 蒙古高原及我国大沙漠边缘是影响我国沙尘暴形成的主要源地,这里位于干旱和半干旱地区,春季降水少、湿度小、回暖快、气温高、增温强烈、容易形成低空不稳定层结,边界层热力和动力湍流、对流和垂直交换活跃,大风具有强烈的阵性特征,具备沙尘暴形成的有利条件.

5.3 我国沙尘暴天气可分为日变化型(停滞型)和移动型(锋面气旋型).日变化型沙尘暴多发生于西部和北部大沙漠区或沙漠边缘及蒙古高原等热低压区;移动型与气旋及强冷空气活动有关,多发生于荒漠化地区下游.

5.4 东北气旋后部冷空气在我国西部多有分支现象.小股冷空气倒灌向西侵入我国西部地区,在有利的条件下,可以形成区域性沙尘暴天气.

5.5 影响我国的沙尘暴按其起源和路径归纳为:境外起沙东移影响我国型;局地生、局地消型;境内起沙东移或东南移近距离输送型; 境内起沙长距离输送型.

参考文献:

[1] 名谷屋大学水研究所.全 浩译.黄沙 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1995.

[2] 夏训诚,杨根生.中国西北地区沙尘暴灾害及防治 [M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.

[3] 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.

[4] Biscaye P E. Asian provenance of glacial dust (stage2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland [J]. J. Geophys. Res., 1997,102(C12):26765–26781.

[5] Merrill J T, Uematsu M, Bleck R. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific [J]. J. Geophys. Res., 1989,94: 8584–8598.

[6] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by saltation bombardment [J]. J. Geophys. Res., 1999,104: 16827–16842.

作者简介: 高庆先(1962-),男,山西太原人,中国科学院大气物理所在读博士生,现在国家环境保护总局气候变化影响研究中心从事气候变化影响研究和大气环境方面的研究工作.发表论文 20 余篇.

致谢: 本文得到任阵海院士和苏福庆教授的指导,在此表示感谢.

万方数据