

沙尘暴中的能量反馈*

于长水^{1,2,4}, 王静爱^{1,2}, 史培军³, 潘东华^{1,2}

(1. 北京师范大学 区域地理研究实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
3. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 内蒙古自治区环境科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: 沙尘暴是一种风沙灾害天气。在沙尘暴发生后, 尘暴中浓密的沙尘对系统的涡旋能量有调节作用, 从而导致沙尘暴具有区别于风暴的行为模式。从沙尘暴的微观结构及涡旋能量入手, 分析了尘暴中沙尘有效辐射效应形成的条件, 认为沙尘暴在沙尘颗粒参与下, 沙尘有效辐射效应对锋面前后涡旋能量的调整是重要的能量反馈机制, 认为辐射效应有着时间与区域的不同, 从而导致沙尘暴在白天发展、持续, 在夜间消亡, 其发生频率随纬度升高显现日期延后的现象。分析认为, 沙尘暴中类似于风暴体的结构是沙尘暴的核心所在, 其中存在的能量反馈机理有规律性, 利用这种机制可帮助调控沙尘暴, 指导制定减灾政策。

关键词: 沙尘暴; 辐射效应; 涡旋; 能量反馈

中图分类号: P425.5⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0001-05

0 引言

国外对沙尘暴的研究起步较早。20 世纪 20 年代初 Hankin^[1] 首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了研究。随后, Sutton^[2] 对“*Haboob*”型沙尘暴也进行了分析。之后, Idso^[3]、Joseph^[4] 先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场的差异, 沙尘暴的平均风速及其发生发展的地理区域和频数等作了多方面的研究。刘树华^[5] 研究了中国西北地区沙尘暴的成因后, 提出沙尘暴天气是由大、中、小 3 种不同尺度的天气系统相互作用形成的。胡隐樵等^[6] 研究了强冷锋前干飚线发展同黑风暴爆发的关系后指出, 由于强冷锋过境时锋前干飚线移至被强烈太阳辐射加热的地表以及条件不稳定大气层结地区, 干飚线进一步发展致使黑风暴爆发。叶笃正^[7] 等通过沙尘暴成因分析认为, 发生沙尘暴前, 锋前持续晴朗的高温天气, 形成能量积累, 有利于冷锋入侵时, 形成较强大的倾斜不稳定能量, 有利于对流和锋面小涡旋的形成。

国内外的最新研究认为, 沙尘暴现象与天气条件、地表条件、沙尘系统、质粒迁移输送、太阳辐射等各方面要素有关, 具有动力、热力、物

质交换、边界过程等条件^[8]。

1 涡旋与沙尘暴

沙尘暴是在大的环流尺度背景下形成的中小尺度涡旋对流体, 沙尘暴系统具有小尺度雷暴体的构造特征^[5,6]。春夏之交太阳辐射的加强, 冷暖气团交替频繁, 加上特有的地理、地貌条件, 使得近地层大气, 白天热力增温幅度很大, 大气处于不稳定状态^[6]。在极有利的大尺度环流背景, 存在干冷急流和风速切变, 这些均有利于中小尺度的飚线和雷暴体的发展, 造成锋前大气的剧烈上升, 锋后干冷空气的绝热下沉。冷锋的锋面抬升作用, 进一步加剧了锋前的垂直对流, 锋面前沿地面的沙粒物质在水平涡旋和垂直对流的作用下, 被卷挟并带入了高空, 导致空气能见度迅速下降, 便形成沙尘暴。沙尘暴系统存在着涡旋与对流特征, 这种特征如图 1 所示。图 2 反映的是蒙古气旋推进下的沙尘暴天气系统实例。从图 2 中可以看出在冷气团的推进下(A), 冷锋前形成了强烈的对流(B)。锋面前后水平风速切变很大, 浮尘在几乎与冷锋推进方向垂直的高空气流拖拽下, 形

* 收稿日期: 2008-05-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD20B02); 国家自然科学基金项目(40671003)

作者简介: 于长水(1970-), 男, 内蒙古巴彦淖尔市人, 高级工程师, 主要从事大气气溶胶领域的研究。

E-mail: yushouzhi@163.com

成了很宽的浮尘带(C)。

涡旋对流体就是沙尘暴的核心,是形成上下能量传输、风速切变,颗粒物质卷扬的关键所在。为此,

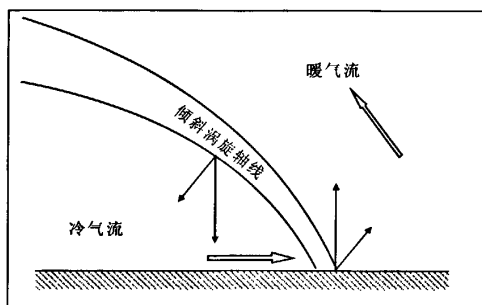


图1 沙尘暴锋面前后涡旋与对流剖析图

借鉴气象学中雷暴体模型,根据沙尘暴的特征与环境边界条件,构造出沙尘暴对流体的微观剖析结构作为分析沙尘暴能量的基础。其物理抽象如图3所示。

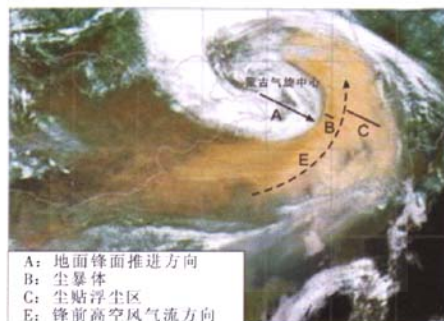


图2 卫星影像中的沙尘暴结构特征^[9]

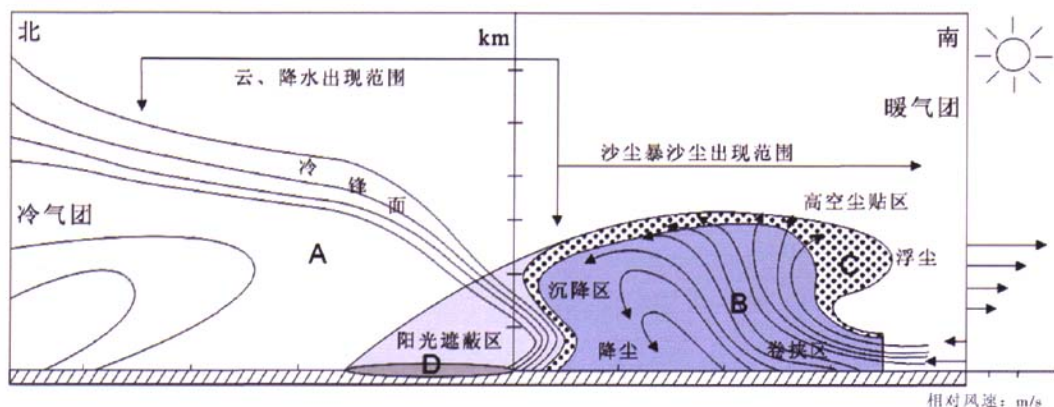


图3 沙尘暴的微观结构剖析

2 沙尘暴中的涡旋能量

沙尘暴的微观结构剖析图中(见图3)所示的沙尘暴对流体是一个倾斜的涡旋系统,旋转轴与冷锋面平行,呈倾斜状,锋前地面风向与冷锋推进方向相切。倾斜涡旋可以分解成水平涡旋与垂直涡旋。水平轴的涡旋由锋面前的暖空气上升与锋后冷空气下沉形成;垂直轴的涡旋由锋面前后不同风向的大风切变形成。

从图3可以看出,锋前的暖空气加热和锋面后地面冷空气变冷,均会促使沙尘暴水平涡旋能量的增加,会促发沙尘暴加强;反之,就会导致沙尘暴强度减弱。

沙尘暴爆发后,沙尘暴中悬浮大量的沙尘颗粒物质。沙尘颗粒物进入高空后,沙尘暴冷锋前直接接受辐照加热与锋后蔽光区冷却形成辐射效应,可以直接影响沙尘暴系统中的涡旋能量。沙

尘的削光作用,除与环境条件有关外,还与沙尘颗粒的浓度有关;沙尘浓度低时,削光作用也弱。

3 能量反馈特征

根据沙尘暴生成的条件,一方面锋面前的太阳辐射要有一定的强度,这样才会存在锋面前的大气条件不稳定性;其次锋面前后的辐射差异应该有显著差别,这样才能促发涡旋能量的累积。如果沙尘暴的蔽光区还足够大的话,在上述几个条件的基础上,便可能产生明显影响沙尘暴发展的有效效应。

按锋前辐照区与锋后蔽光区太阳辐射等级相差4级,蔽光区至少大于800 m的条件,根据图3沙尘暴对应的形态结构,计算辐射效应与季节及纬度的关系,有效辐射的计算中,太阳高度角使用式(1)计算:

$$h_0 = \arcsin [\sin \varphi \sin \sigma + \cos \varphi \cos \sigma \cos (15t + \lambda - 300)] \quad (1)$$

太阳方位角的计算式为(2):

$$A = \arccos[(\sin(h_0)\sin\varphi - \sin\delta)/\cos(h_0)\cos\varphi]。$$

(2)

太阳照射下沙尘暴的阴影长度: $L_1 = H \tan(\pi/2 - h_0)$, H 为沙尘暴体高度。

阴影在冷锋推进方向的蔽光区尺度为阴影长度在推进方向上的投影长度(图 3 中的 D 区)。

计算的站点选择内蒙古中部沙尘暴的频发区域的气象站所在区域。有效辐射筛选根据设定的浓密沙尘形成的蔽光区尺度、太阳辐射等级及锋面前后辐射强度的差异进行。辐射等级按表 1 进行核定。

表 1 辐射等级 PASQUILL 分级表

夜间, 多尘	晴, 无 辐射	$h_0 \leq 15^\circ$	$15^\circ < h_0 \leq 35^\circ$	$35^\circ < h_0 \leq 65^\circ$	$h_0 > 65^\circ$
0	-2	-1	+1	+2	+3

计算分析发现(表 2), 4 月份, 沙尘的辐射效应最具有明显地促发沙尘暴继续发展的正能量反馈特征。从 09:00 ~ 15:00, 沙尘暴均可形成大范围蔽光区, 致使锋面前后的辐射级差至少在 4 级。3~5 月份, 也存在上述条件, 但只有在 12:00 及

前后 1h 的时段内有此特性。这种能量的反馈, 可以促使沙尘暴爆发后, 涡旋能量的加强。9~10 月份存在类似有效辐射效应的条件, 但秋季多数沙尘暴中尘浓度低, 因此辐射效应不如春季。

表 2 一年中有效辐射效应出现的时段

月份	* 高度角 /°	显著效应 时刻	** 无辐射区 /m	锋面前后 辐射级差
3	40	11:00 ~ 13:00	1 926	4
4	45	9:00 ~ 15:00	1 234	4
5	62	11:00 ~ 13:00	823	4
9	50	9:00 ~ 15:00	969	4
10	43	10:00 ~ 14:00	1 568	4
11	36	12:00	2 316	4

注: * 12:00 前后的太阳高度角平均(°);

** 以沙尘暴一般高度 1 700 m 计算。

对比分析的此区域沙尘暴的发生频率特征, 沙尘暴一般出现在 3~5 月份, 以 4 月份为最多。每年强沙尘暴天气发生时间集中、频率高、强度大的时期为春季 4 月 1 日至 5 月 30 日; 沙尘暴夏末秋初出现较少, 7~10 月份出现最少。内蒙古地区沙尘暴发生频率的月变化曲线见图 4。

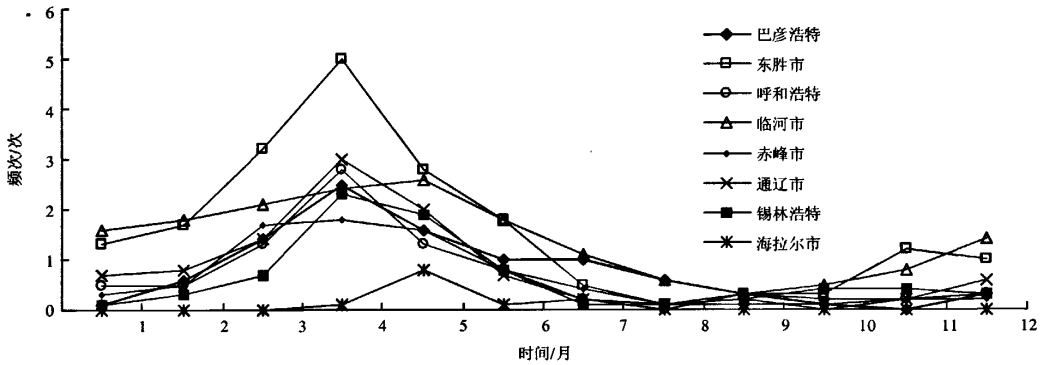


图 4 内蒙古沙尘暴发生频率的月变化曲线图

沙尘暴的高发期与有效辐射效应出现条件相吻合, 说明了有效辐射效应对沙尘暴发生发展起重要作用, 会影响涡旋能量, 影响沙尘暴的发展, 形成了沙尘暴爆发后能量的反馈。

统计中国沙尘暴的爆发时间发现^[10], 一日中沙尘暴主要出现于每天的 13:00 ~ 18:00, 这一时

段, 是沙尘暴天气爆发高峰期。分析浓密沙尘在一天中各时段的有效辐射效应发现(表 3), 4 月中旬每日从日出后 09:00 ~ 15:00, 都有优良的辐射效应条件会促进沙尘暴发展; 而晚上锋面前后的辐射级差反而为负值。沙尘的辐射效应在日落后减少了沙尘暴的涡旋能量, 促使其消亡。

表 3 4 月份 1 d 内沙尘暴辐射效应分析表

时间	白天												夜间	
太阳高度角/°	8	14	25	36	44	51	53	51	44	36	25	14	8	
时刻/T	06:30	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
无辐照区/m	341	789	1 084	1 189	1 237	1 260	1 268	1 260	1 237	1 189	1 084	789	341	
辐射级差	1	1	3	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	-2

上述数据说明辐射效应存在着日变化,有效辐射效应在白天促进了沙尘暴的发展,日落后,辐射效应使沙尘暴抑制。统计也发现^[10],持续或发生于上午的沙尘暴占 19%~25%,持续或发生在下午的沙尘暴占 50%~70%,持续在夜间的沙尘暴占 11%~26%,白天发生的沙尘暴在晚上削弱消失。

计算 30°N、40°N、50°N 各月中旬正午 12:00 的由北向南推进的冷锋前后的沙尘辐射效应特征,分析结果见表 4。从表 4 可以看出,辐射效应特性

有着纬度的差别。

30°N 的区域,各季度锋面前后都会出现显著的辐射级差别,只是在 5~9 月份,由于锋后蔽光区尺度小,不利于形成有效辐射效应,其它时间,从 1 月份起,就具有形成有效辐射效应的条件。50°N,却只在 4~10 月份存在明显的锋面前后辐射级差,具有有效辐射效应条件;其它季节的辐射效应不显著。分析发现辐射效应随纬度的变化,存在着随着纬度的升高有效辐射效应在月份上延后的特点。

表 4		沙尘暴辐射效应的纬度差别											
内容	纬度	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
蔽光区 /m	30°N	2 251	1 856	1 301	819	461	245	201	338	628	1 045	1 570	2 089
	40°N	3 476	2 774	1 916	1 268	835	592	544	695	1 033	1 562	2 316	3 177
	50°N	5 536	4 104	2 660	1 742	1 197	911	857	1 031	1 440	2 143	3 296	4 895
辐射级差	30°N	4	4	4	4	5	5	5	5	5	4	4	4
	40°N	3	3	4	4	4	5	5	5	4	4	4	3
	50°N	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3

分析中国内蒙古地区各气象站点沙尘暴月出现次数与年总次数的比值(图 5)。可以看出;随着纬度的升高,在 43°N 以北,3 月份沙尘暴的相对频率在减少,而 5 月的相对频率却在升高,存在随纬度升高,沙尘暴出现频率有季节相位延迟的现象。

上述分析说明沙尘暴中沙尘产生的辐射效应通过改变沙尘暴中的涡旋能量,影响了沙尘暴在时间空间上的变化特性。

4 结论与讨论

沙尘暴是气旋系统,存在着涡旋能量特征。

沙尘暴系统中的涡旋对流体就是沙尘暴的能量核心。沙尘暴的发展与涡旋能量有关,辐射效应产生了对沙尘暴涡旋能量反馈。沙尘暴促发后在沙尘颗粒参与下,形成白天与夜间不同的能量反馈模式,对锋面前后涡旋能量产生了调整,形成了沙尘暴区别于风暴的特有的行为发展模式。

有明显效果的有效辐射效应使得沙尘暴一旦在白天爆发,就会在此效应的反馈下加速发展,因此在沙尘暴的源区,控制沙尘暴的爆发,控制沙尘暴在源区的沙尘浓度,对抑制沙尘暴的发展,减少沙尘暴对下游的影响非常重要。

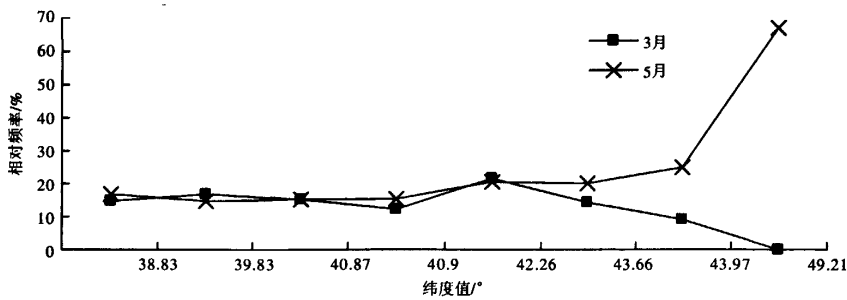


图 5 内蒙古沙尘暴的月相对频率与纬度的关系

沙尘暴在白天爆发后,能量反馈使其涡旋能量得到累积加强,因此在技术条件成熟时,可以人为干预加强锋面后的太阳辐照,干扰其涡旋能量,抑制其发展。

沙尘暴随纬度有月期延后现象,可以指导我们在不同的时期,关注不同的纬度区域尘暴灾害。不同月份,不同路径的沙尘暴发生频率也将不同。春夏季节,相对于低纬地区,月份增大,高纬度

区爆发沙尘暴的几率增大。

能量反馈可以调整沙尘暴中的涡旋能量, 通过计算分析能量反馈特性, 可预测沙尘暴的发展、持续或消亡, 预测沙尘暴灾害天气过程的时间、空间变化, 指导风沙灾害的防治减灾。

参考文献:

- [1] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents [J]. *India Met. Memoirs*, 1921, (22): 6.
- [2] Sutton L J. Haboobs [J]. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1925, (51): 25–30.
- [3] Idso S B, R S Ingram and J M Pritchard. "An American Haboob" [J]. *Bull. AMS*, 1972, (53): 930–935.
- [4] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N. "Andhi", the convective dust storms of Northwest India [J]. *Mausam*, 1980, (31): 431–442.
- [5] 刘树华, 刘新民, 高尚玉. 沙尘暴天气成因的初步分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1994, 30(5): 589–596.
- [6] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. *大气科学*, 1997, 21(5): 581–589.
- [7] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 513–521.
- [8] 徐国昌, 谢明庆. 1993. 5. 5“黑风暴”分析 [R]. 全国沙尘暴会议材料, 1997.
- [9] 史培军. 中国自然灾害系统地图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 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.

Energy Feedback in Dust-storm

Yu Changshui^{1,2,4}, Wang Jing'ai^{1,2}, Shi Peijun³ and Pan Donghua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. Inner Mongolia Environmental Science Academy, Hohhot 010010, China)

Abstract: Dust-storm is a wind sand disaster weather. After dust-storm, the dense sand dust in the storm can adjust vortex energy, which made the dust storm different from the windy weather. Based on the study on the microstructure of dust storm and vortex energy, the formative condition of effective radiation effect of dust storm is analyzed. It is thought that, with sand and dust particle in dust storm, radiation effect of dust storm is an important feedback mechanism for pre and post front vortex energy adjustment and radiation effect changes with time and region, which result the phenomena that the dust storms develop and continue during daytime and vanish at night, and the frequency increases with latitudes. The analysis shows that the storm is the kernel of the storm system and energy feedback mechanism is of some regularity. The mechanism can be used to control dust storm and make strategy for disaster reduction.

Key words: dust storm; radiation effect; vortex; energy feedback