

甘肃“5·5”黑风暴小波分析¹⁾

戴新刚 丑纪范

(兰州大学大气科学系, 730000)

朱 姝

(兰州中心气象台)

提 要

用小波变换理论对1993年春季甘肃省河西走廊地区一场特大黑风暴进行了分析。结果表明,小波分析能比较客观地将时间序列中不同时间尺度的振动分离开,使我们能清楚地看到黑风暴中的中尺度扰动。

关键词: 小波分析 中尺度 沙尘暴

引 言

黑风暴是一种非常特殊的天气过程,主要发生在我国西北部的一些地区,如新疆的塔里木盆地西端及甘肃的河西走廊等。由于黑风暴多发生在我国西北内陆的干旱或沙漠地区,所以风暴中夹带着大量的砂石,风暴到时往往能见度瞬时就变为零,白天也会变得如同黑夜一般,故称为黑风暴。一般黑风暴的风力很强,破坏力亦很大。

1993年5月5日,一场特大的黑风暴袭击了甘肃省河西走廊的金昌、武威、白银以及民勤等地区,给当地的工业、农业和畜牧业生产造成了很大的损失。据目击者说,当时看到一个巨大黑色的蘑菇状云压过来,立刻狂风四起飞沙走石,能见度一下子就变为零。5月5日金昌气象观测站的自记气象要素(包括温、压、湿、风)记录显示出剧烈的变化或跳跃等现象。例如,气压自凌晨2点开始缓慢下降,11点后下降速度加快,到15点30分左右降至最低点,16点开始陡升(见图1A)。气

温从早晨6点起开始逐渐上升,至15时30分达到最大值,随后迅速下跌,18时后又转为缓升,23时后又再次下降(见图3A)。在风暴来临之前风速的起伏变化不大,一直是微风。在16时风速出现了一个大的跳跃,骤然间达到了最大值。最强风速持续了约一个多小时后才开始逐渐衰减。此外,水汽压的自记记录曲线在16时附近出现不连续(中断)跳跃(图略)。从这些气象要素的变化中我们立即就能知道黑风暴到达金昌站的时间大约是在16时前后。

从常规天气图上可以看到,这次黑风暴过程的冷空气来源于新地岛,环流形势的演变是大尺度天气过程。然而,从金昌站单站气象要素自记记录中似乎能发现有中小尺度系统活动。为了进一步确定时间序列中各种尺度系统的强弱,也为了检验小波分析方法的客观性和有效性,我们用小波分析的方法分析了金昌站几个单站气象要素的时间序列并指出了进一步研究的方向。

1) 本研究得到中国科学院大气物理研究所国家重点实验室LASG的资助。

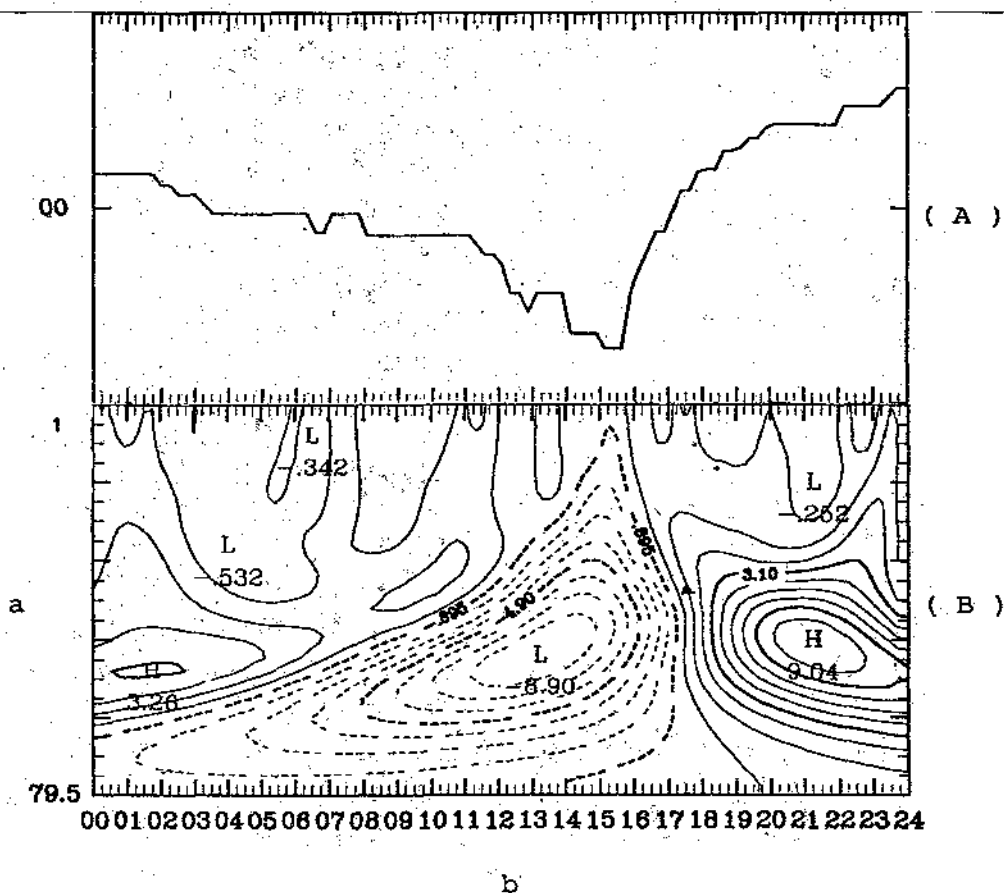


图1 1993年5月5日金昌站气压变化曲线(A)和气压的小波变换(B)

(A)取样间隔为15分钟 (B)横坐标只标出整点时刻

1 资料和小波变换

本文分析所用资料取自甘肃省金昌气象站1993年5月5日地面气压、气温和风速的自记记录。取样范围从00—24点,气压、气温都是每隔15分钟取一次样;风速取样间隔为10分钟。所读取的数据都已经过了仪器差订正。

小波分析是一种新的数学方法,是付里叶分析的里程碑式的进展^[1]。它既保持了付氏分析的一些优点,又弥补了某些不足。例如,小波分析具有局域分析的能力,因此可以对函数的局部性质进行分析,同时也可以分析与函数定义域尺度(或时间序列长度)相当的结构。另外,付里叶分析的分辨率是固定的,而小波分析的分辨率却是可调的,利用这个性质,可以对所感兴趣的函数部分进行“放大”分析,从而可了解更细致的函数局部结

构。一个函数经付里叶变换后展现在我们面前的仅是频率、周期、波数等量,无法再看到原函数的定义域,因而不能直观地考查原函数定义域上的某些所关心的点附近的振荡特性。造成这种结果的另一个原因是付氏分析是非局域分析,分析结果只表示函数或序列在整个定义域上的平均状况。既使可以通过位相分析定出不同波的振幅位相与原函数定义域的关系,它也不是客观的。换句话说就是原函数定义域上任一点附近的函数振荡特性的付氏分析结果都会受到整个函数定义域上其它点上函数性质的干扰。而小波变换不仅有局域分析的优点,而且从小波变换空间向函数的定义域开了一扇“窗口”,透过这个“窗口”我们就能窥见到定义域上任一点附近函数的振荡特性。此外,小波分析中的小波函数不是固定不变的,可以根据所研究问题的特

点进行选取或重新构造,也就是说对具体问题进行分析。

由小波分析理论可知^[1],如果一个函数 $g(t)$ 满足

$$c_g = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{g}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则对定义在实数域上的平方可积函数 $f(x)$, 即 $f(x) \in L^2(R)$, 可以定义其小波变换为

$$(\phi_g f)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_g}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

而由小波变换(2)可以重构函数 $f(x)$, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{c_g}} \int \int (\phi_g f)(a, b) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

式(1)–(3)中 ψ^* 是 ψ 的复共轭, ψ 是小波函数, 其定义为

$$\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (4)$$

$\hat{g}(\omega)$ 是 $g(t)$ 的付里叶变换; a 是伸缩尺度, b 是平移因子(也就是窗口); $g(t)$ 是基本小波函数, 通过自变量的伸缩(a)和平移(b), 可以构造出一簇正交基底; R 是实数空间; $L^2(R)$ 是平方可积空间。常用的基本小波函数有: 墨西哥帽、法国帽、双峰帽和框架帽, 本文的分析选用墨西哥帽:

$$g(t) = (1 - t^2) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (5)$$

在具体计算温、压、风的小波变换时利用了公式(3)的离散化形式。

2 黑风暴小波分析

首先, 我们计算了气压时间序列的小波变换(图1B)。从图中可以看到小波变换值有正(用“H”标明中心), 亦有负(用“L”标明中心)。比较图1中A和B; 我们会发现, 气压随时间变化的不同尺度的起伏几乎都能在小波变换图(图1B)中得到反映。随着伸缩尺度 a 的增大(即分辨率的减小)不同尺度振荡的小波变换部分被分离开了。从最大时间尺度(24小时)来看(图1A), 在16时前为低压部分, 18时后为高压部分, 对高于图1B中底框线

附近的小波变换值在18时前为负, 18时后转为正值。同样不难看出其它较小时间尺度的气压振荡与小波变换之间也有基本相同的对应关系。即对于一个特定的时间尺度振荡曲线中的波峰与波谷与相应尺度小波变换的正值与负值相对应。可以说小波变换是将序列中不同尺度的结构进行了比较客观的分离。这主要是由小波函数的振荡性与局域性质决定的。从小波变换图1B可以看出, 存在几种时间尺度结构, 其中唯有时间尺度10小时的中尺度部分最为强盛。注意到在靠近图(图1B)左边边框附近有一个标有“H/3.26”的正值中心, 这可能是气压日变化留下的痕迹。

为了形象起见, 我们特制作了图2以表示各种时间尺度成分的相对强弱。

气温的小波变换结构比较简单(图3B),

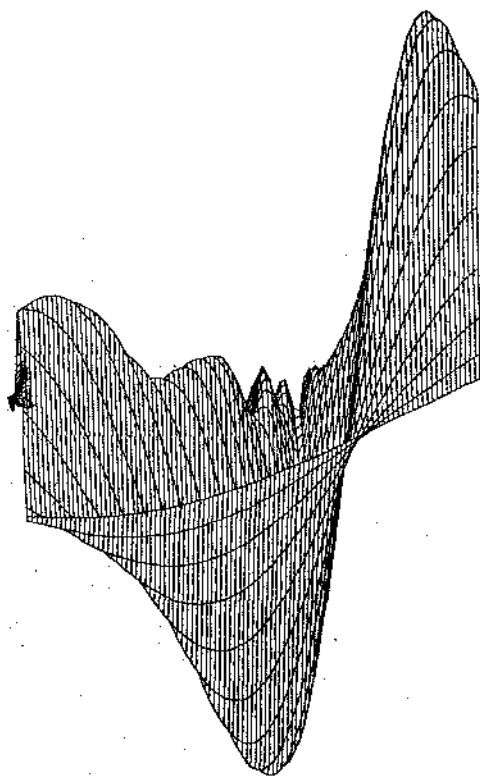


图2 气压小波变换(对应于图1B)的二维曲面

除了与气压分析有同样强的中尺度结构外,气温日变化中凌晨低温段在图上更清楚(其中心标着“L/-3.62”)。很显然,与中尺度部分的高温段(09:00—16:00)相重合的气温日变化部分也应是高温段,即日变化中的高温部分与中尺度结构的高温部分叠加在一起,这无疑加强了黑风暴的威力。对照气温变化曲线中小的波动与气温小波变换中的短波部分(图3),可以清楚地看到曲线下凹的部分对应于小波变换中的负值区,如03、06、08时附近气温变化的短波部分的下凹部分都对应于小波变换的负值区(由虚线包围的区域),反之亦然。更有趣的是,在小波变换短波

部分靠近左右边框的部位都是负的,它们正好对应着气温变化曲线中在零时和24时附近的下凹部分。这说明小波变换能正确地反映函数边缘附近的状况,这更进一步说明了小波分析的客观性和合理性。

边界层风速随时间的变化比较复杂,因此采样间隔比气压、气温短(仅为10分钟)。从风速随时间的变化曲线可以看出存在较多的小尺度扰动。例如,有时间尺度为20、30分钟的,也有几个小时的(图4A),这些小尺度扰动在小波变换图中(图4B),随着伸缩尺度 a 从1—79.5逐渐增大的过程中都被分离和刻画出来。当然中尺度部分仍然是最强的。

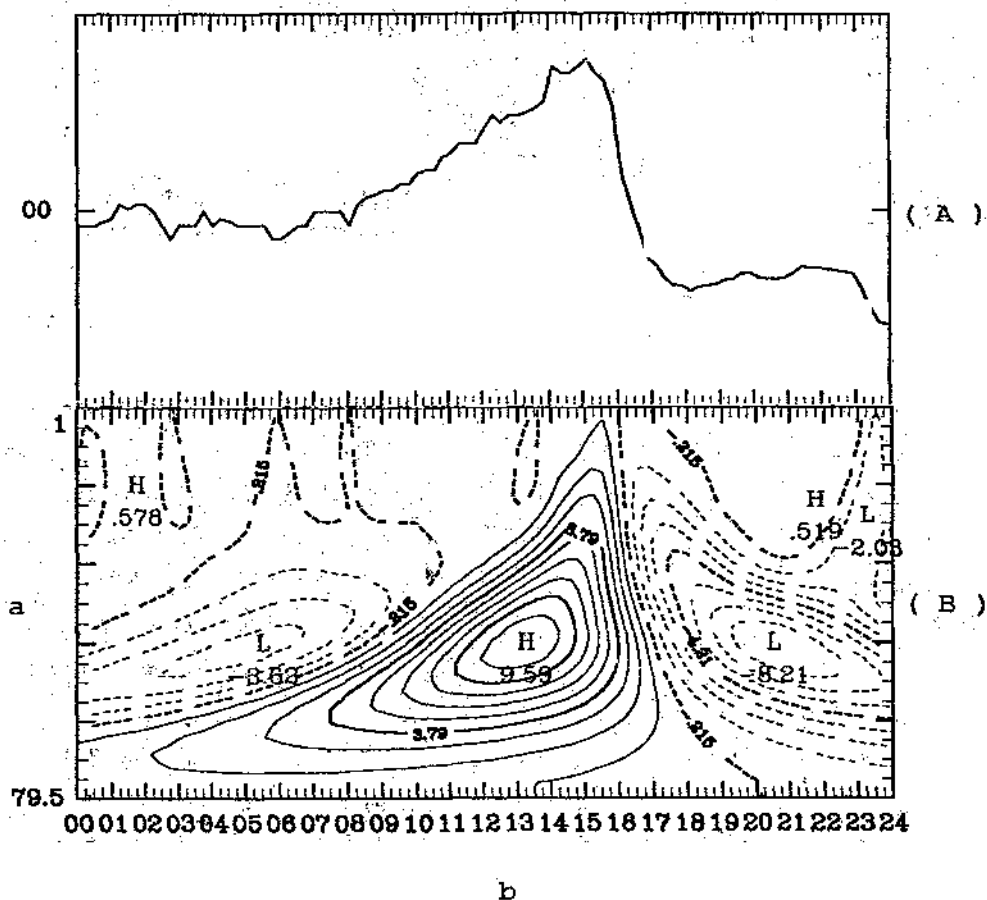


图3 1993年5月5日金昌站气温变化曲线(A)和气温的小波变换(B)

说明同图1

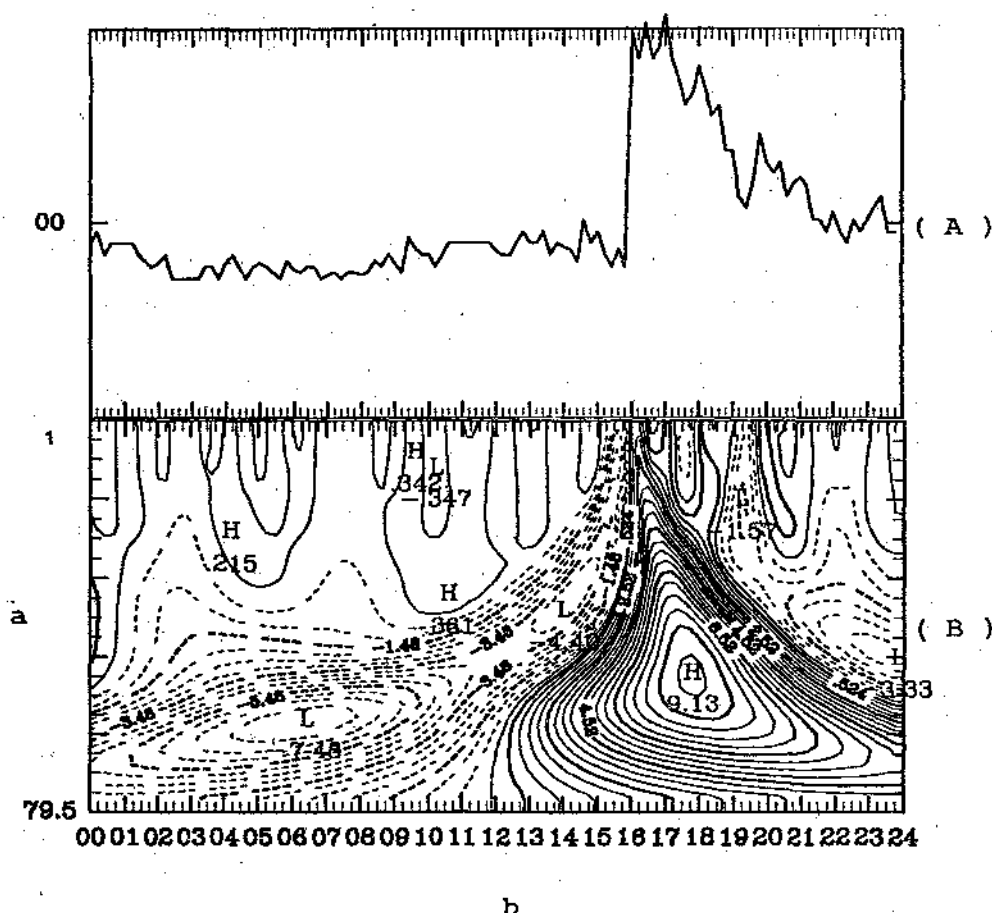


图4 1993年5月5日金昌站地面风速变化曲线(A)和风速序列小波变换(B)

(A)取样间隔为10分钟,(B)同图1

风速变化复杂性的另一个特点是在16时附近出现了一个大的跳跃(图4A),这对小波分析来说是一个挑战。众所周知,付里叶分析对这种跃变是无能为力的,但小波分析却正好具有探测和分析函数奇异性的能力^[2]。在小波变换图上(图4B)沿着14时刻度线向上可以找到一个低值中心(标有“L/-4.40”),在这个中心的右侧是等值线最密集之处,这里正好刻画了风速剧烈变化的程度。注意到尽管风速小波变换中尺度部分最强,但在锋面附近(16时)的2—6小时尺度的扰动对形成突然出现的大风的贡献也是不能忽略的,特别是在锋后有一系列较强的小尺度风速扰动。

小波分析又被称为是数学显微镜,利用这个功能,将“镜头”对准12—24时时段小波变换的小尺度部分进行放大显示(这主要是通过提高分辨,即在小尺度波段($1 < a < 9.8$)加密 a 的取值,以及利用图形本身的放大功能进行放大),由此可以看清锋面后部大风中的各种小尺度扰动的强度、位置及其关系(图5)。

在图4和图5中锋面附近的小尺度扰动部分仍然不很清楚,于是再一次将焦点对准锋面附近(12—18时)的更小尺度部分($1 < a < 5.2$)进行放大,同时缩小绘图时的等值线间隔(图6),从而可十分清楚地看到大风区(16—18时)中的20—30分钟时间尺度的扰

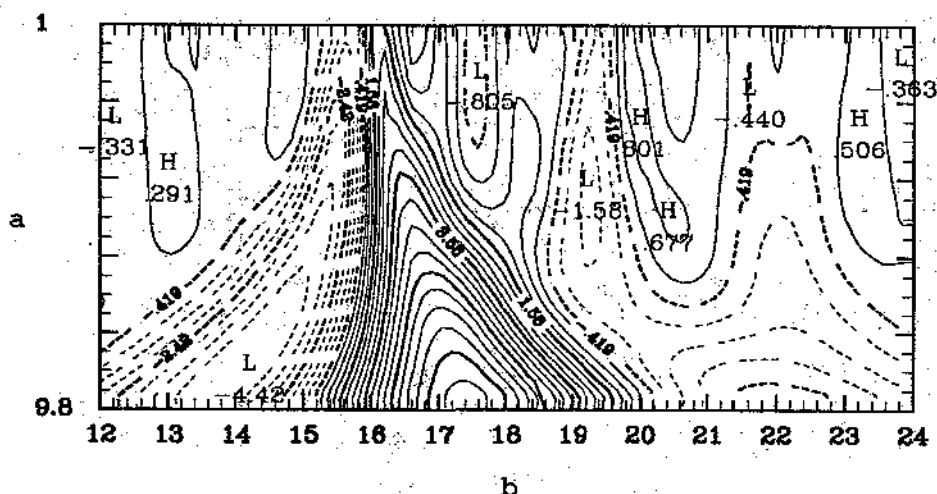


图5 放大显示

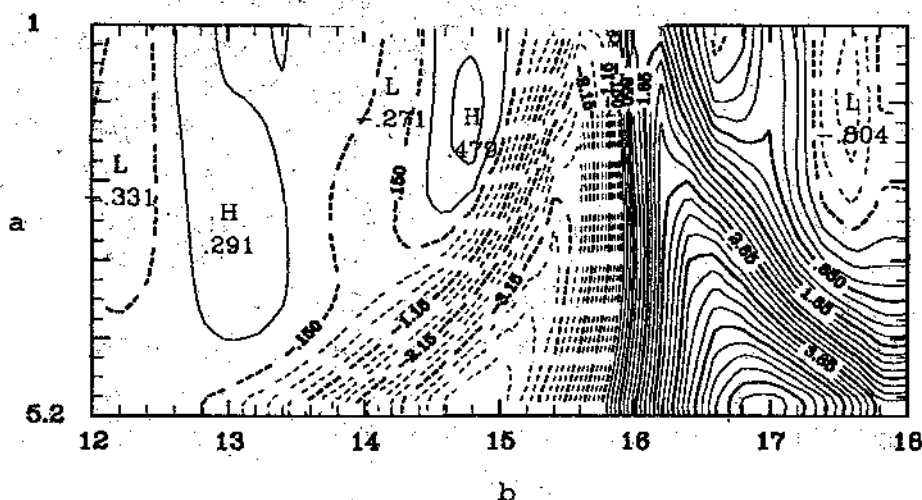
针对图4中12—24时时段小尺度扰动($1 < a < 9.8$)的部分

图6 再放大显示

针对图5中12—18时时段的更短时间扰动($1 < a < 5.2$)的部分

动。

3 总结与讨论

通过对金昌站地面气压、气温和风速等时间序列的小波分析可知,发生在1993年5月5日甘肃省河西地区的黑风暴中含有一个较强的中尺度扰动,它很可能是造成巨大破坏力的主要系统。尽管风暴过境时有一些小尺度扰动,但强度相对较弱。分析还表明,小波分析具有较为客观地分离和刻画不同尺度扰动的能力、良好地反映边缘附近函数的特

性的能力、一定的探测函数奇异性的能力以及极好的显微功能。很显然,小波分析的这些优点对于分析气候演变、气候突变、各种尺度天气系统以及边界层湍流等都是很有意义的。

本文的不足之处在于时间序列的长度太短,不能比较中尺度扰动与大尺度天气系统在黑风暴中的相对强弱。这个问题将留待在后续的研究中解决。

(下转封三)

(上接第 15 页)

致谢:本研究曾得到西安交通大学刘贵忠博士的指导,兰州大学大气科学系孟梅芝工程师的热情帮助,郑祖光教授也对本文提出了有益的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- 1 刘贵忠, 邸双亮. 小波分析及其应用. 西安电子科技大学出版社, 1992.
- 2 Stephane Mallat and Wen Liang Hwang. Singularity Detection and Processing with Wavelet IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 38, (2), March 1992.

Wavelet Analysis of the Sandstorm in Gansu Province

Dai Xingang Chou Jifan

(Dept. of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 730000)

Zhu Su

(Meteorological Observatory of Lanzhou, Gansu Province)

Abstract

The subject is to study an example of special sandstorm occurred in Gansu province with the mathematic theory of wavelet transform. Through analyzing the time-series of the pressure, temperature and momentum, a strong mesoscale structure is found, it may be the major role of causing a great damage.

Key Words: wavelet analysis mesoscale sandstorm