

中国西北地区 1993 年 5 月 5 日黑风暴的机理探讨*

刘景涛 杨耀芳 李运锦 吴学宏

(内蒙古气象台, 呼和浩特市 010051)

郑明倩

(内蒙古气象学校, 呼和浩特市 010051)

提 要

该文用天气学、诊断分析方法对 1993 年 5 月 5 日我国西部地区黑风暴天气过程的发生发展及形成机理进行研究. 结果表明, 这次黑风暴是由强寒潮爆发, 在特定季节(春季)和裸露、疏松的下垫面(沙漠、戈壁)条件下形成的中尺度现象. 在对流层中低层垂直方向上存在很强的风切变, 利于湍流发展; 非地转强迫作用对次级环流贡献大于地转强迫作用; 黑风暴前后显著的辐射加热不均匀分布所形成的热力正反馈作用, 造成近地层局地锋生, 并使热力正环流大大加强.

关键词: 黑风暴; 物理机制; 诊断分析.

1 黑风暴时空演变特征

1993 年 5 月 5 日, 我国西北地区出现了一次历史罕见的强烈沙尘暴天气. 据目前气象台站网观测到的资料分析, 位于内蒙古北部的额济纳旗 5 日 08 时, 风和日丽, 风速只有 1~2 m/s, 10 时 20 分突然西北风狂风大作, 11 时 04 分形成黑风暴(14 时瞬时风力加大到 20 m/s). 然后, 大风带及几乎同时形成的黑风暴自西北很有规律的向东南方向移动, 横扫巴丹吉林沙漠, 风速和沙尘含量不断加大, 能见度不断恶化, 20 时风力和黑风暴达到最强. 阿拉善左旗巴彦诺尔公站出现 29 m/s 瞬时西北大风, 阿拉善左旗能见度减小到 0 m, 此后减弱. 图 1、图 2 分别是各站黑风暴出现时间和最小能见度的等时线图, 由图上可以粗略地估算出, 黑风暴移动速度平均为 70 多公里每小时.

西北大风引起气温剧烈下降, 一般日平均气温下降 8~10℃, 最低气温降至 -4℃, 因黑风暴所经地区多为沙漠、戈壁和山地丘陵, 空气干燥(相对湿度 10%~30%), 几乎没有产生降水, 只在西北部的额济纳旗下了 0.2 mm 的小阵雨.

* 1995-05-08 收到, 1995-07-18 收到修改稿.

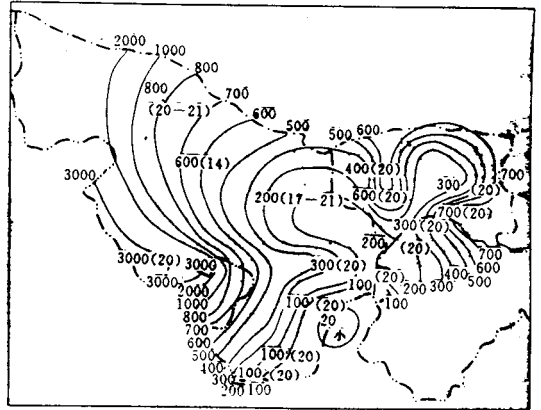
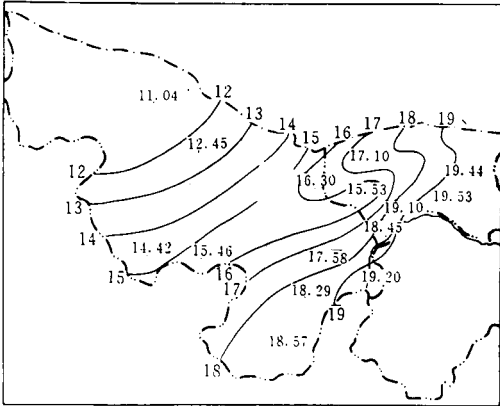


图1 1993年5月5日沙尘暴开始时间等时线图

图2 1993年5月5日各站最小能见度(单位:m)等值线图(括号内数字为出现时间(时))

2 黑风暴形成的大尺度环流过程

这次黑风暴是与寒潮爆发相联系的^[1],出现在强寒潮冷锋过境之后,紧跟地面锋线,持续时间为1~3 h,黑风暴带宽度约300~400 km. 在500 hPa 高空图上,5月2日08时,冷空气开始在西伯利亚北部堆积,冷中心强度为-40℃,冷槽位于68°N、83°E 经鄂木斯克到咸海一带,冷槽北段与乌拉尔山高脊之间等高线梯度明显加强,出现一支20 m/s以上的西北强风带. 到5日08时,强冷空气堆及其相应的冷槽向东南移动并加深,强寒潮开始袭击新疆. 此时槽底和冷槽后部,形成一支中空强劲的偏西风急流,风速在32 m/s 以上,急流核位于新疆北部,风速达48 m/s. 5日19时这支强西风急流加强到最大,额济纳旗5000 m 高空风速猛增到60 m/s,是该站建站(1957年1月)以来4月下旬到5月上旬的极大值. 6日08时,寒潮冷槽加速东移到乌兰巴托、巴彦诺尔公、民勤到青海湖一带,黑风暴减弱.

在低层850 hPa 和地面图上可以清楚地看到有一冷气团,在西伯利亚北部形成并向东南移动,不断加强,并爆发袭击我国西北地区的活动过程(图略).

图3是5日20时,垂直于冷锋的空间剖面图,由图可见:冷锋在700 hPa 以下坡度很大,等 θ_e 线几乎和地面垂直;锋前有一支混乱的西南上升气流,从850 hPa 一直上升到200 hPa,锋后和锋区有一支沿锋面的西北下沉气流,尤其是500~400 hPa 下沉气流最强,锋区附近在西南上升气流和西北下沉气流之间有明显的气流辐合;锋区和锋后的下沉气流穿越总温度线,由中空向低空输送能量,这可能是地面西北大风形成的重要能源之一.

另外,寒潮冷锋在受热不均匀的下垫面或地形作用下,可能激发出一些中小尺度涡旋,但由目前地面测站网所得到的观测资料的时空密度,难以分析出中尺度系统. 在目前所得到的大尺度资料条件下,气压梯度、变压梯度、高空动量下传的不均匀性及不均匀加热和小地形作用,所形成的大风和黑风暴强度的不均匀分布,可以认为也是一种大

尺度环流运动过程中的中尺度现象.

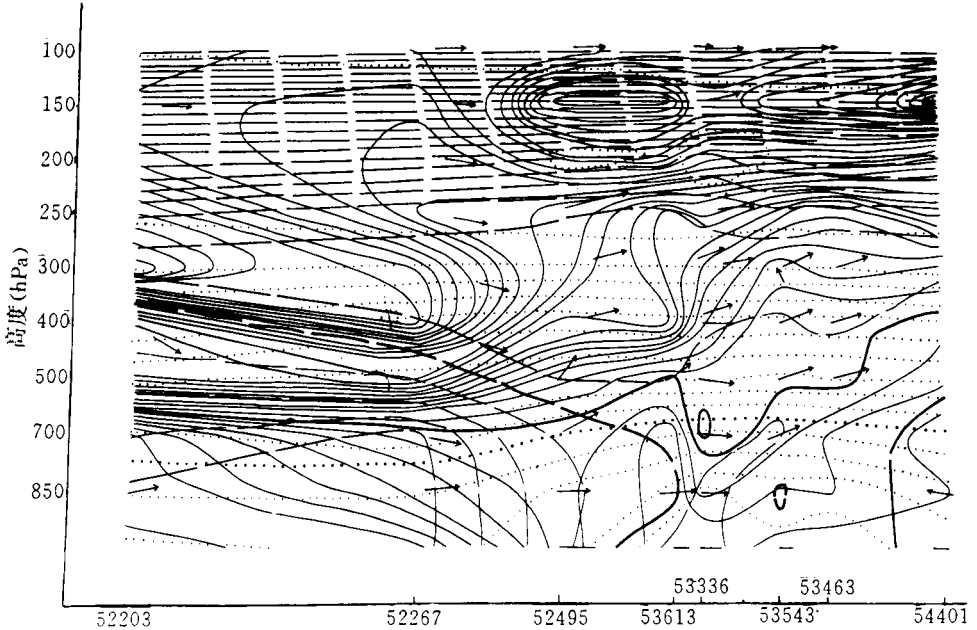


图 3 1993 年 5 月 5 日 20 时冷锋垂直剖面图 (虚线为等 θ_e 线, 粗虚线为 315 K 线 (间隔 5 K), 实线为等总温度线, 粗实线为 60°C 线 (间隔 5°C), 点线为等湿线, 矢线为剖面上的二维矢量)

3 诊断分析

3.1 资料及客观分析方法

本文选取 1993 年 5 月 5 日 08 时、20 时的探空资料, 范围取为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $95^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$, 分成 23×21 的正方形网格, 格距为 80 km, 垂直分层 10 个等压面层, 利用 Barnes 改进的客观分析方法进行分析. 得到 2 个时次初始场.

3.2 诊断分析结果

(1) 里查逊数 Ri 的分析:

计算 08 时和 20 时 700~500 hPa 间的 Ri 值^[2](图略), 结果指出: 除在内蒙古巴盟北部有一个 0.4 中心外, 其余地区均小于 0.1. 说明从 08 时到 20 时, 对流层大气存在着强烈的湍流运动, 在大尺度强冷锋触发作用下, 造成有组织的中小尺度系统性对流运动发展, 导致大量沙尘被气流卷夹上下翻滚. 另外, 强烈的湍流运动使高空动量下传, 是形成地面西北大风的重要机制.

(2) Q 矢量的计算:

我们用 500 hPa 等压面实测风和温度资料计算 Q 矢量^[2], 得到 20 时 Q 矢量散度图 (图 4). 从图上可以看出: 在 20 时, 内蒙古西部地区有一较强的辐合中心达 $-106\times 10^{-16}/\text{hPa}\cdot\text{s}$. 宁夏也有一个比较强的辐合中心, 中心值为 $-41.6\times 10^{-16}/\text{hPa}\cdot\text{s}$. 这两个辐合区之间是一个自东北伸向西南的狭窄的辐散带. 对照此时冷锋位置 (48°N 、

110°E, 42°N, 109°E, 38°N, 107°E, 36°N, 100°E)可以认为, 在冷锋附近垂直方向上存在一个西北、东南向强的正环流, 其水平尺度约为 200~500 km. 另外, 我们注意到, 伴随大尺度的冷锋活动过程, 在其冷锋附近中尺度辐合辐散系统是非常活跃的, 且排列是相同的.

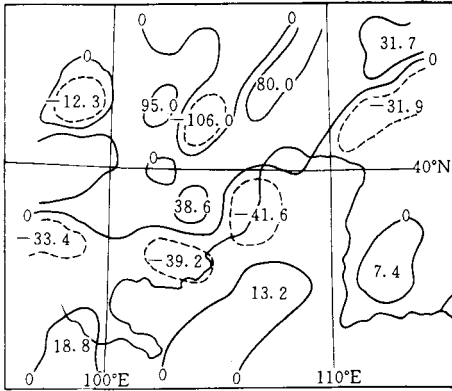


图4 1993年5月5日20时500 hPa Q 矢量散度图 (单位: $10^{-16}/\text{hPa} \cdot \text{s}$)

(3) Sawyer-Eliassen 锋面横向次级环流方程计算结果分析:

Sawyer-Eliassen 锋面横向次级环流方程为:

为:

$$-\gamma \frac{\partial u_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial p} - \frac{\partial M}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial p^2} = Q_g + Q_{ag} + Q_h$$

其中: $Q_g = -2J(u_g, v_g) = -2J_{xy}(u_g, Q)$

$$Q_{ag} = \frac{\partial u_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_a}{\partial p} + 2\gamma \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y}$$

$$Q_h = -\gamma \frac{\partial H}{\partial y}$$

$$\gamma = \frac{R}{p_0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_p/c_v}$$

θ 为位温, ψ 为流函数, M 为动量, 其它为常用符号.

我们沿 40.5°N 附近做一个纬向剖面, 计算 θ_g 、 θ_{ag} . 图(5a)为 5 日 08 时地转强迫作用产生的次级环流, 从图(5a)上发现, 106°E 以西为反环流, 中心约在 250 hPa 附近, 以东为正环流, 中心约在 400 hPa 附近. 在 106°E 附近存在宽约 200 多公里下沉气流. 图(5b)为非地转强迫作用产生的次级环流图, 从图上发现, 整个范围内由于非地转强迫的作用为一个正环流控制, 最大中心为 $-40.1 \times 10^2 \text{m} \cdot \text{hPa/s}$, 位于 107°E 500 hPa 附近, 其伸展高度为 200 hPa, 在 90°~98°E 有一个宽约 200 多公里下沉区.

图(6a)为 5 日 20 时地转强迫作用产生的次级环流, 从图上可以看出: 在 103°E 附近, 850 hPa 层以下近地面层有一个正环流中心; 在 97°E 附近有一条零线, 说明下沉气流在该地很强, 其宽度约 400 多公里. 从图(6b)上可以看到: 整个剖面内为一个正环流控制, 中心值为 $-69.5 \times 10^2 \text{m} \cdot \text{hPa/s}$, 位于 110°E, 850 hPa 层附近, 环流外围线已超过 150 hPa 层. 从 08 时到 20 时, 次级环流中心从 500 hPa 附近下降到 850 hPa 以下近地面层. 如前所述, 这正是我国西北地区黑风暴最强盛时期.

需要强调的是, 沙尘暴在强风作用下一旦形成, 在运动过程中自身会形成一种加强发展的正反馈机制. 沙尘暴区即黑风墙中被卷挟的浓密沙尘, 使短波辐射能一部分被沙尘微粒散射, 一部分被吸收, 只有很少一部分到达地面. 而尚未受袭击的地区, 天空晴朗, 太阳辐射能极易被裸露的地表吸收, 加大了冷锋前后的温度梯度, 无疑会造成强烈的局地锋生和锋面次级环流, 使地面风不断加大, 被卷挟的沙尘量不断增加, 能见度越来越恶化. 事实上, 由图 1 和图 2 可以看出, 正是在 20 时风力达到最强, 能见度最恶劣, 黑风暴发展到鼎盛期, 而后随着夜幕降临, 黑风暴开始减弱.

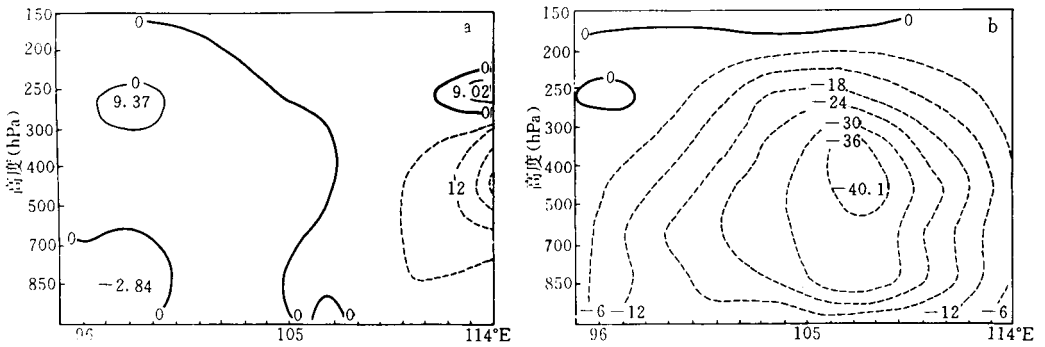


图 5 1993 年 5 月 5 日 08 时沿 40.5°N 纬向锋面横向地转(a)和非地转(b)强迫产生的次级环流图(单位: $\times 10^2 \text{ m} \cdot \text{hPa/s}$)

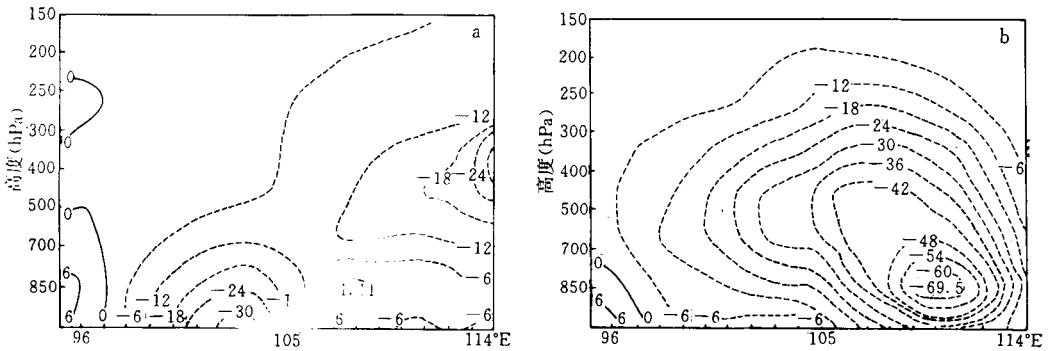


图 6 1993 年 5 月 5 日 20 时沿 40.5°N 纬向锋面横向地转(a)和非地转(b)强迫产生的次级环流(单位: $\times 10^2 \text{ m} \cdot \text{hPa/s}$)

4 结论和讨论

(1) 1993 年 5 月 5 日黑风暴是强寒潮爆发, 在裸露疏松的下垫面条件下形成的中尺度现象. 强烈的冷平流, 变压偏差风和大量高空动量下传是寒潮大风及黑风暴形成的动力机制.

(2) 沙尘暴一旦形成后即建立起自我发展的正反馈机制, 在运动过程中发展加强, 日落后开始减弱.

(3) 在黑风暴爆发过程中, 大气湍流扰动显著; 伴随冷锋活动的中尺度辐合辐散系统活跃, 且相间排列; 非地转强迫作用对次级环流的贡献大于地转强迫作用.

(4) 由沙尘暴自身造成的非绝热辐射加热建立的正反馈机制, 可能是沙尘暴在运动过程中强烈发展的重要机制. 但由于缺少沙尘微粒对太阳辐射散射、吸收及透射的数据

和地表反照率资料, 在讨论锋面次级环流时, 没能给出非绝热加热项的计算结果, 尚待以后工作.

参考文献

- 1 杨克明. “5·5”黑风暴过程初步探讨. 气象, 1993, 19(12): 23~28.
- 2 丁一汇. 现代天气学诊断分析. 北京: 科学出版社, 1989. 44~93.

A STUDY OF THE PHYSICAL MECHANISM FOR A BLACK STORM IN NORTHWEST CHINA

Liu Jingtao Yang Yaofang Li Yunjin Wu Xuehong

(*Meteorological Observatory of Inner Mongolia, Hohhot 010051*)

Zheng Mingqian

(*Inner Mongolia Meteorological School, Hohhot 010051*)

Abstract

The physical mechanism of a black storm, which burst out in Northwest China on May 5, 1993, is studied using the methods of synoptic meteorology and diagnostic analysis. The results show that the black storm is a mesoscale phenomenon which forms and develops in particular season (spring) on the bare and loose underlying surface (desert, gobi) when a strong cold wave bursts out. The results also show that there exist strong wind shears in the vertical direction of middle and lower convective layer; the wind shears are favourable to the development of turbulence; the contribution of the non-geostrophic forced function to the secondary circulation is greater than that of the geostrophic forced function. The positive thermodynamical feedback, resulting from the significant differential radiative heating before and after the appearance of the black storm, leads to the local frontogenesis of surface layer, and strengthens the positive thermodynamical circulation.

Key words: Black storm; Physical mechanism; Diagnostic analysis.