

“93.5”黑风暴发展期中尺度热量和水汽收支诊断¹⁾

冯 霞 程麟生

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

提 要

1993年5月4—6日(“93.5”)在我国西北地区发生了一次极具破坏力的“黑风暴”。为了诊断这次黑风暴发展期的热量和水汽收支,使用了具有高分辨PBL参数化及40km细网格的MM4对该例控制模拟的输出资料和热量与水汽收支方程。对视热源(Q_1)和视水汽汇(Q_2)的诊断结果指出, Q_1 的垂直积分在黑风暴的前部和后部分别呈现一条显著的加热带和冷却带。在黑风暴区, Q_1 和 Q_2 的区域平均垂直廓线揭示,黑风暴的 Q_1 加热主要发生在对流层的上部,而其中部加热主要出现在发展初期;与 Q_1 相应, Q_2 在低空和中空分别发生明显的增湿变冷和变干加热。这些结果不仅与因黑风暴过程而观测到的急剧强降温率一致,而且也为改进和发展用于模拟和预报黑风暴的中尺度数值模式提供了一些物理依据。

关键词: 黑风暴 诊断分析 热量和水汽收支

引 言

1993年5月4—6日(“93.5”),我国西北地区发生了一次历史上罕见的特强沙尘暴,先后侵袭了新疆、甘肃河西走廊、内蒙古阿拉善巴丹吉林沙漠、宁夏平原以及河东沙区和沙黄土地区,涉及总面积约110万 km^2 ,其中,5月5日下午尤以甘肃河西地区最为严重。平均风力7—8级($15.5\text{—}19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),最大风力12级($33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),金昌市瞬时最大风速达 $34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,能见度降为零。这种瞬时极大风速 $>25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、能见度 $<50\text{m}$,并挟带巨量沙尘的特强风暴通常称为黑风暴^[1]。与黑风暴相伴,还出现了泥雨和降雪以及强降温和霜冻。因而给工农业生产和人民群众

的生命财产造成了巨大的损失。国内外学者对这类极严重的灾害性天气过程和系统均极为关注^[2—7]。

为了对这次黑风暴的形成和发展结构及演变规律有进一步认识,程麟生等^[6—7]曾对该例进行了中尺度数值模拟研究。从预报和理论研究角度考虑,深入了解这类风暴发生、发展过程中的一些机理和物理本质也是十分必要的。为此,我们对“93.5”黑风暴发展期的中尺度热量和水汽收支进行诊断,从而能对一些观测事实予以合理的解释,并进而为黑风暴的数值预报提供某些物理依据。

1 黑风暴天气过程

1993年5月4日08时,在500hPa的

1) 国家自然科学基金资助项目:49475268

乌拉尔山及其以西地区有高压脊生成,脊前在蒙古西部至新疆北部有一低压槽。由于脊的发展,使脊前槽后的偏北气流加强,24小时后,即5日08时,冷槽分裂为两段,北段收缩移向东北,南段迅速东移南压(图略),致使位于西西伯利亚的强冷空气迅速向东南爆发,地面中心为1034hPa的冷高压位于新疆北部,冷锋在老东庙—酒泉—敦煌一线,锋后出现大风天气。这种强风天气的高空形势特点是:高空锋区特别强^[6-7],且冷锋前后的3小时变压梯度特别大,与其相伴,冷锋后部的中高压及其前部的中低压在发展(图1)^[6-7];与此同时,在该强冷锋过境前后,温、压、湿、风均有急剧变化(图2)^[1]。由此可见,与巨量沙尘相伴的这段特强冷锋具有飚线性质^[6-7],或称“黑风飚线”。

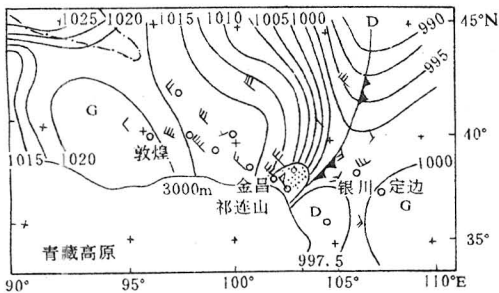


图1 1993年5月5日17时地面区域天气图分析

此外,从5日14时的GMS-4伪彩色地面温度素描图上还发现^[7],在以民勤为中心的一大片沙漠区地面温度高达40℃,而金昌和永昌正处在该地面高温区的西南边缘,但当黑风暴侵袭永昌不到10分钟,气温就降低6℃,整个过程降温达15℃,并伴有阵雨雪。

以上观测事实向我们提出了许多有待回答和解决的问题。有些问题我们已在有关文章中作了论述^[6-7]。但这里有两个重要问题

需要回答:其一是什么该黑风暴过程降温如此之大? 其二是为什么黑风飚线和黑风暴仅伴有弱的阵雨雪? 显然这两个问题都与热量和水汽收支有关。为此,需首先给出热量和水汽收支的诊断方程。

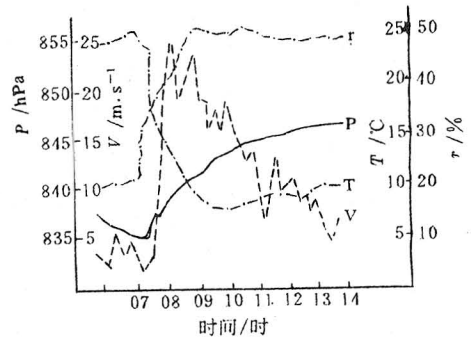


图2 1993年5月5日金昌P(气压)、T(温度)、r(相对湿度)、V(风速)时间变化曲线

2 热量和水汽收支方程

对于本研究,视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 的诊断方程是采用Kuo、Cheng和Anthes^[8]在 σ 坐标中给出的如下形式:

$$\begin{aligned} \overline{P^*} Q_1 &= \frac{\partial \overline{P^* T}}{\partial t} + m^2 \nabla \cdot \frac{\overline{P^* T} \overline{V}}{m} \\ &+ \frac{\partial \overline{P^* T} \overline{\sigma}}{\partial \sigma} - \frac{R \overline{T} \overline{\omega}}{C_p (\sigma + P_1 / \overline{P^*})} \\ &= \frac{L}{C_p} \overline{P^*} \overline{C^*} - \frac{\partial \overline{P^* T} \overline{\sigma'}}{\partial \sigma} \\ &+ \frac{R \overline{T} \overline{\omega}}{C_p (\sigma + P_1 / \overline{P^*})} + \overline{p^*} Q_R \\ \overline{P^*} Q_2 &= - \frac{L}{C_p} \left(\frac{\partial \overline{P^*} \overline{q}}{\partial t} + m^2 \nabla \cdot \frac{\overline{P^*} \overline{V} \overline{q}}{m} + \frac{\partial \overline{P^*} \overline{\sigma' q}}{\partial \sigma} \right) \\ &= \frac{L}{C_p} \overline{P^*} \overline{C^*} + \frac{L}{C_p} \frac{\partial \overline{P^*} \overline{\sigma' q}}{\partial \sigma} \end{aligned}$$

式中, m 为地图投影因子; C^* 是一网格平均的净凝结;带“-”和“'”的量分别为网格尺度平均的大尺度变数和次网格尺度变数; V 是

风矢量; Q_1 和 Q_2 分别是由于积云对流和层云降雨、雪产生的视热源和视水汽汇, Q_1 为正(负)值表示凝结加热(蒸发或融化冷却), Q_2 为正(负)值表示凝结变干(蒸发或升华变湿); Q_R 是大气辐射冷却,该项通常为 $1-2\text{K/d}$,与 Q_1 和 Q_2 相比,一般在此可不单独计算。其余变量为气象上通用。

为了诊断“93.5”黑风暴发展时段的热量和水汽收支,用常规气象观测资料无法作到,因该黑风暴主要突发于5月5日下午,但根据程麟生等^[6-7]用经过改进的MM4对该黑风暴完成的较成功的24小时控制模拟结果及输出资料,则可实现各种诊断。为了进一步了解模式模拟结果,这里对其控制模拟设计和部分模拟结果予以简要说明。

3 控制模拟设计及模拟结果简述

3.1 控制模拟设计^[7]

(1)模式基本参量:模式是经过修改和改进的MM4。模式顶 $p_t=100\text{hPa}$,垂直分辨率 $K_\sigma=16$,水平分辨率为 40km ,域格点数为 46×61 ,域中心在 38°N 、 103°E (金昌附近)。

(2)初始条件:T42全球分析+探空资料

(3)侧边界条件:时变海绵边界。大尺度趋势由线性时间内插12小时观测资料获得。

(4)行星边界层物理过程:高分辨PBL参数化。

(5)地面物理过程:包括有非均一地表的热通量、水汽通量和动量通量;在其参数化公式中某些不尽合理的参数值,根据HEIFE资料作了修正。

(6)地面温度:由浅层模式和有云效应的能量收支方程预报获得。

(7)积云对流参数化:采用Anthes-Kuo型方案。

(8)非对流参数化:饱和以后的凝结以降

水形式降落,而其潜热加入热力方程。

(9)模式地形:通过分析NCAR的 0.5 度地形资料以及利用中尺度客观分析方案而获得 40km 格点地形。

(10)陡坡地形气压梯度力(PGF)的计算:通过定义参考态和扰动态的场分解方法,利用静力扣除减小了青藏高原陡坡地形PGF的误差。

(11)模拟时间:24小时,即自1993年5月4日20时—5日20时。

包含上述全部条件和物理过程的模拟称控制模拟。

3.2 模拟结果简述

控制模拟的部分结果在图3—5中给出。由图3可见,该黑风暴的发生、发展与一个中尺度气旋性涡旋的发生和强烈发展密切相关,且几乎是同步的。图4是沿图3b中尺度涡旋中心作的涡度和相当位温的东西垂直剖面图。图4a揭示出黑风暴的垂直涡柱结构;图4b揭示出黑风暴的强斜压结构和形成于大气边界层内的暖心结构,这些结构的重要动力和热力学机制在引文^[7]中已有详细论述。

图5是5日下午黑风暴发展最强时段14—20时在金昌附近 3000m 以下风速和比湿的垂直廓线结构及演变,值得注意的是图5a 16时地面风速约 $27\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,这与图2中的观测结果非常接近,同样,当将图5b中的比湿换算为相对湿度时,其结果与图2中的观测值也很接近。

由以上的分析讨论可见,控制模拟结果与已有的观测结果相当一致或接近。因此,用该控制模拟输出资料进行诊断分析是很有意义的。

3.3 诊断使用资料

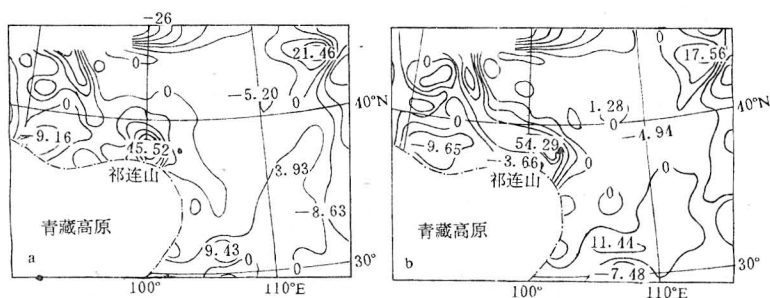


图3 控制模拟 18 时(a)和 21 时(b)的 850hPa 涡度场(分别相应 5 日 14 时和 17 时)
涡度等值线间隔为 $5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, ▲ 为金昌

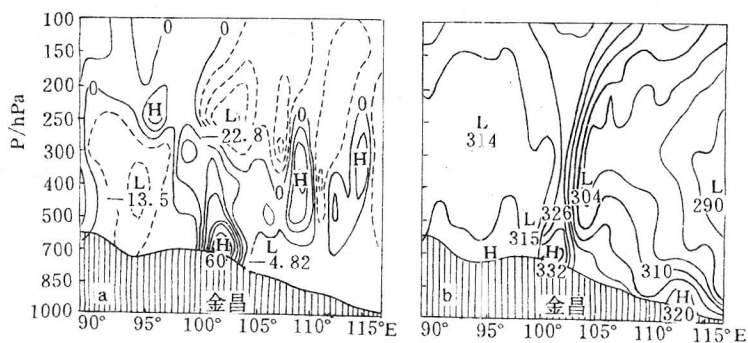


图4 通过图 3b 涡度中心的涡度(a)和相当位温 θ_e (b)的垂直剖面

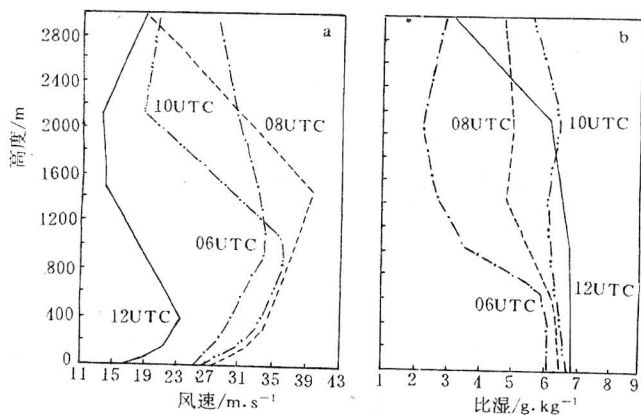


图5 1993 年 5 月 5 日 14—20 时金昌附近 3000m 以下风速(a)和比湿(b)的垂直结构和演变

由于自 5 日 08 时以后,每 3 小时在模拟域 40km 格距格点上均有 15 层等 σ 面上各预报变数的输出资料可供各种诊断分析使用。因此,我们使用的也是这种资料。

4 诊断结果讨论和分析

通过中尺度热量和水汽收支的数值诊断,我们发现黑风暴的视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 的水平分布及垂直廓线有明显的热力特征。以下我们分别讨论热量收支和水汽收支。

图 6 是视热源 Q_1 在 5 月 5 日 14 时(a)

和17时(b)的垂直积分水平分布。由图可见,在黑风暴前部有一条西北—东南向的垂直积分加热带,其加热率中心值分别为 $93.7^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 和 $98.0^{\circ}\text{C}/\text{d}$,该加热率小于强飚线前部的 $13^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的加热率^[9]。而黑风暴后部的垂直积分冷却率中心值却分别为 $-72.9^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 和 $-89.9^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。尽管这是垂直积分结果,但这对我们解释观测事实向人们提出的下列问题作出一种可能的回答,即为什么5日14时的GMS-4伪彩色地面温度素描图上以民勤为

中心的一大片沙漠区地面温度高达 40°C ?为什么黑风暴自5日下午15时54分入侵永昌县而在不到10分钟内气温就下降 6°C ,整个过程降温达 15°C ?对黑风暴侵袭的其它河西各站也有类似的结果。

比较图6a和图6b还可以发现,黑风暴前部的加热带和后部的冷却带都随黑风暴的向东推进而东移,而且加热和冷却中心均有所加强。

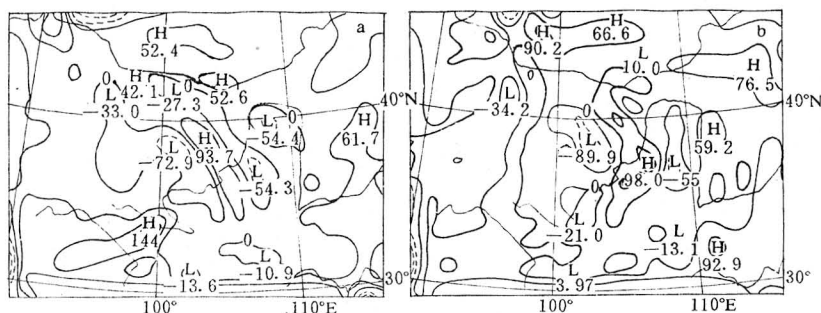


图6 1993年5月5日14时(a)和17时(b)视热源 Q_1 垂直积分的水平分布($^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

H(L)为加热(冷却)中心,▲为金昌

为了进一步了解黑风暴区垂直积分 Q_1 的垂直分布,在金昌附近我们再对其作了黑风暴区的区域平均垂直廓线及其演变(图7)。由图可见,这些廓线的一个显著特征是,黑风暴的加热主要发生在对流层的上部,而其中部加热主要出现在发展初期(14时),且较弱。对于主要出现在低层的冷却,在黑风暴发展后期(17时),增厚至460hPa,尽管在700—460hPa之间的冷却较弱,黑风暴的这种加热分布及其演变与一般强对流中尺度系统的类似^[8],但黑风暴凝结潜热释放高度更高,这与该系统的对流上升运动更强和水汽主要来自孟加拉湾强热带风暴向北方伸至金昌附近的一条云带^[5]有关。对黑风暴在低层

出现的冷却分布,也与该云带有关,因在此云带与黑风暴后部下沉气流相伴的区域,不仅因下沉增温使云水蒸发冷却,而且还由于干旱和沙漠下垫面上空干热使这种蒸发冷却加强;此外,与黑风暴相伴冷锋后部的强冷平流^[7]及黑风暴区挟卷的巨量沙尘也使低层大气冷却率加大。实际上,当黑风暴自5日17时23分—18时41分在历经古浪县的过程中,除有泥状阵雨外,还有弱的阵雪,并且气温也急降,同样,当黑风暴自5日13—17时历经临泽县时,地面温度由 20.9°C 降到 8.7°C ,而地面总辐射由 $733\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 降至 $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可见,黑风暴区的显著冷却和弱的阵雨雪是黑风暴历经各站后气温急剧

下降的重要原因。

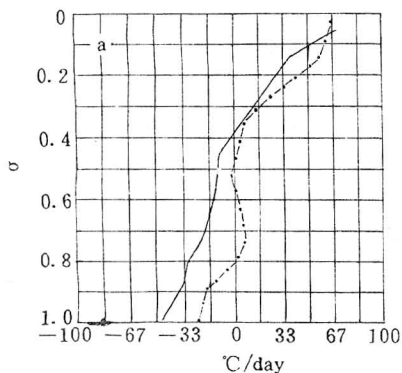


图7 1993年5月5日14时(点划线)和17时(实线)黑风暴区视热源 Q_1 的区域平均垂直廓线($^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

图8是图7相对应的视水汽汇 Q_2 的区域平均垂直廓线及其演变,由这些廓线可以看出两个主要特征:其一是在对流层中上部有与黑风暴区 Q_2 正值相对应的对流云区因上升凝结相伴随的加热和变干。这种凝结变干主要出现在黑风暴发展初期(14时)的对流层中部,但从 Q_1 廓线看,这种凝结释放的潜热主要输送至高空。其二是在对流层低空 Q_2 的负值与图7中 Q_1 在低空的负值相对应,即主要与蒸发冷却变湿和沙尘辐射致冷

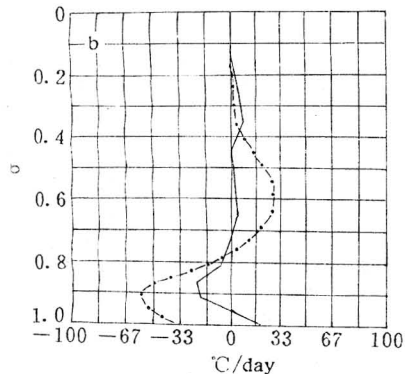


图8 1993年5月5日14时(点划线)和17时(实线)黑风暴区视水汽汇 Q_2 的区域平均垂直廓线($^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

有关。

由以上讨论和分析可知,黑风暴的视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 的垂直积分及其区域平均垂直廓线与一般暴雨低涡或暴雨飑线有显著差异,即高空加热部位较高,低空冷却层较厚较强。这对黑风暴的数值模拟或预报来说,如何在数值模式中考虑这些加热和冷却特征是一个值得注意的问题。

5 小结

5.1 1993年5月4—6日(“93.5”),在我国西北地区发生了一次极具破坏力的“黑风暴”。用具有高分辨率PBL参数化及40km细网格的改进型MM4对该例进行控制模拟的输出资料以及热量和水汽收支方程,对该黑风暴发展期的热力特征进行了数值诊断。

5.2 诊断结果指出,视热源 Q_1 的垂直积分在黑风暴的前部和后部分别为一显著的加热带和冷却带,并随着黑风暴的发展东移而加强,在17时的中心值分别达 $98.0^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 和 $-89.9^{\circ}\text{C}/\text{d}$,由黑风暴区 Q_1 和 Q_2 的区域平均垂直廓线揭示,黑风暴的 Q_1 加热主要发生在对流层的上部,而其中部加热主要出现在发展初期,与 Q_1 相应, Q_2 在低空和中空分别发生明显的增湿变冷和变干加热。这些结果不仅与这次黑风暴过程造成的急剧强降温及阵雨雪相一致,而且也改进和发展模拟或预报黑风暴的中尺度数值模式提供了某些物理依据。

参考文献

- 1 陈敏连,郭清台,徐建芬等.黑风暴天气的研究和探讨.甘肃气象,1993,11(3):16—27.
- 2 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析.气象学报,1979,37(4):26—35.
- 3 杨根生,王一谋,赵兴梁.我国西北地区“5.5”强沙尘暴的危害状况与对策.甘肃气象,1993,11(3):43—48.

- 4 Iwasaka Y, H Minoura, K Nagoya. The transport and special scale of Asia dust-storm clouds; a case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*. 1983. 35B(3): 189—196.
- 5 江吉喜. 一次大沙尘暴成因的卫星云图分析. *应用气象学报*, 1995, 6(2): 177—184.
- 6 Cheng L, Ma Y and Liu C. Influence of mesoscale model resolution on the evolutive simulation of the “93. 5” black storm. *International Workshop on Limited-Area and Variable Resolution Models*. 1995, WMO/TD, No. 699; 323—328.
- 7 程麟生, 马艳. “93. 5”黑风暴发展结构及不同模式分辨率的数值试验. *应用气象学报*, 1996, 7(4).
- 8 Kuo Y H, L Cheng and R A Anthes. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe, 11—15 July 1981. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, 114(11): 1984—2003.
- 9 Gallus W A, R H Johnson. Heat and moisture budgets of an intense midlatitude squall line. *J. Atmo. Sci.*, 1991, 48(1): 122—146.

Diagnosis of Heat and Moisture Budgets of the “93. 5” Black Storm during its Development

Feng Xia Cheng Linsheng

(Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract

A “black storm” with severe destructibility occurred in the Northwest Region of China during 4—6 May 1993 (“93. 5”). In order to diagnose the heat and moisture budgets of the black storm during its development, here used were the output data from control simulation for this case using improved MM4 with high resolution PBL parameterization and 40km fine mesh, and the equations of heat and moisture budgets. The diagnostic results for the apparent heat source (Q_1) and apparent moisture sink (Q_2) indicated that the vertical integrations of the Q_1 exhibited marked heating and cooling bands in ahead and behind parts of the black storm, respectively. The area-averaged vertical profiles of the Q_1 and Q_2 in the black storm region revealed that heating of the Q_1 for the black storm occurred mainly upper levels of the troposphere, the heating in the midtropospheric levels occurred mainly the developing early stage of the black storm, in correspondence with Q_1 , the marked moistening-cooling and drying-heating of the Q_2 occurred the lower levels and middle levels, respectively. These results are not only consistent with observed rapid and intense detemperature rate and showery rain with snow due to the black storm event, but also provides physically basis for improving and developing mesoscale numerical models used to simulate and forecast the black storm.

Key Words: black storm diagnostic analysis heat and moisture budgets