

“93.5”黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验*

程麟生 马艳

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

提 要

1993年5月4~6日在我国西北地区发生了一次“黑风暴”。用改进的MM1和高分辨PBL参数化及40 km细网格控制试验能基本上模拟出“93.5”黑风暴的结构和演变。模拟结果表明,黑风暴发展时段,在PBL内与一个中尺度气旋性强涡旋相伴,在对流层内与一个垂直涡柱相伴。这个伸展至对流层顶的涡柱下(上)半部是与低(高)空强烈辐合(辐散)入(外)流相伴的气旋(反气旋)性涡柱。该黑风暴结构不同于一般锋面结构,其主要差别是:界面坡度陡, θ_e 水平梯度大,斜压性强,PBL内暖心明显。该暖心结构与下垫面剧烈热力强迫有关。不同PBL参数化和模式空间分辨率的对比试验结果指出,提高中尺度数值模式的空间分辨率和采用较好的PBL参数化方案对改进黑风暴发展结构及其演变的模拟是十分必要的。

关键词: 黑风暴; 数值模拟; PBL 参数化; 模式分辨率。

引 言

沙尘暴在世界许多地方都有巨大危害,所以,国内外学者对此甚为关注。徐国昌等^[1]曾对甘肃1977-04-22特大沙尘暴作过分析;杨东贞等^[2]和申绍华等^[3]都分析过华北黄沙天气过程和沙尘暴辐射强迫的锋生过程;Iwasaka等^[4]对我国1979年4月沙尘暴在亚洲的远距离输送及空间尺度进行了个例研究;Karyampudi等^[5]曾对撒哈拉沙尘气层作过分析研究。然而,至今对我国沙尘暴,特别是西北地区黑风暴的发生、发展及其演变结构却研究的很少。这类黑风暴的一个典型实例就是“93.5”(1993年5月4~6日)黑风暴^[6~8]。从预报黑风暴的角度考虑,深入了解这类风暴发生、发展的机制和演变结构是十分必要的。为此,本文将在我们已有工作的基础上^[8],进一步通过中尺度数值模拟来探讨“93.5”黑风暴的发展结构及模式分辨率对其模拟结果的影响。

* 国家自然科学基金资助项目:49475268。还得到西部环境科学研究中心和甘肃省自然科学基金资助。1995-07-31收到,1996-01-30收到修改稿。

1 主要观测资料和黑风暴过程分析

1.1 主要观测资料

除常规大尺度天气分析资料外,我们能搜集到的资料还有:

- (1) 西北区域地面天气分析图: 1993-05-05 06UTC 和 09UTC.
- (2) 1993-05-05 张掖、山丹、金昌、永昌、武威、民勤的温度和湿度自记曲线资料,以及金昌的气压、风速自记曲线资料.
- (3) 1993-05-05 甘肃省河西地区各站能见度分布和瞬时大风及其开始时间资料.
- (4) 临泽沙漠微气象塔站冷锋过境前后要素变化资料.
- (5) 日本 GMS-4 卫星伪彩色地面温度图: 1993-05-05 06UTC 和 07UTC.

1.2 高空强锋区下的大风形势

1993-05-04 00UTC, 在 500 hPa 的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 h 后冷槽分为两段,北段收缩移向东北,南段迅速东移南压,致使位于西伯利亚的强冷空气迅速由西北向东南爆发;地面中心为 1034 hPa 的冷高压位于新疆北部,冷锋在老东庙—酒泉—敦煌一线,锋后已出现大风天气.这种强风天气的高空形势特点是高空锋区特别强,在槽底部的等温线尤其密集^[8].

1.3 地面强变压相伴的强风和中高压与中低压

该过程另一特点是冷锋前后的变压梯度特别大,06UTC 冷锋后 Δp_3 达 4.3 hPa,冷锋前的一 Δp_{-3} 中心为 -4.7 hPa (图 1 a). 这样强的锋区和变压梯度,不仅表明在正负变压梯度之间会产生强烈的辐合以及中尺度系统生成,而且会使东移强冷锋继续加强,风力增大,同时还预示该强冷锋后部的中高压及其前部的中低压将发展.实际上,在 5 日 09 UTC 的区域地面图(图 1 b)上也确实如此.与该强冷锋过境相伴,相应站地面瞬间最大风速在永昌达 28 ms^{-1} (08 UTC) (图 2).

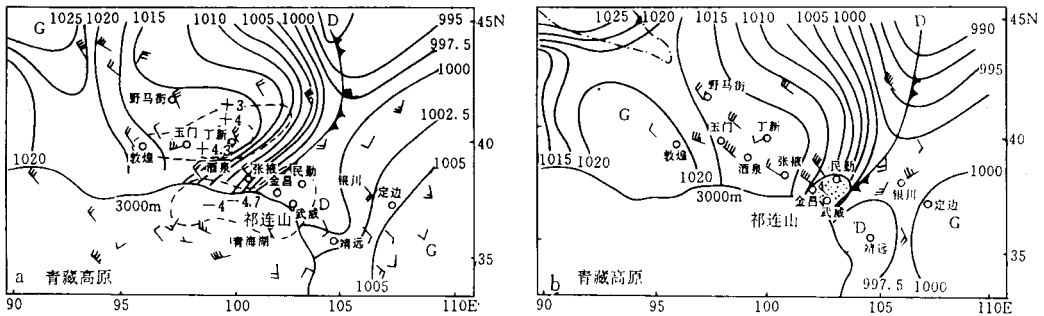


图 1 1993-05-05 06UTC(a)和 09UTC(b)地面区域天气图分析(阴影区为黑风暴区)

Fig. 1 Regional surface chart at (a) 0600 UTC and (b) 0900 UTC 5 May 1993(shadow: the black storm area)

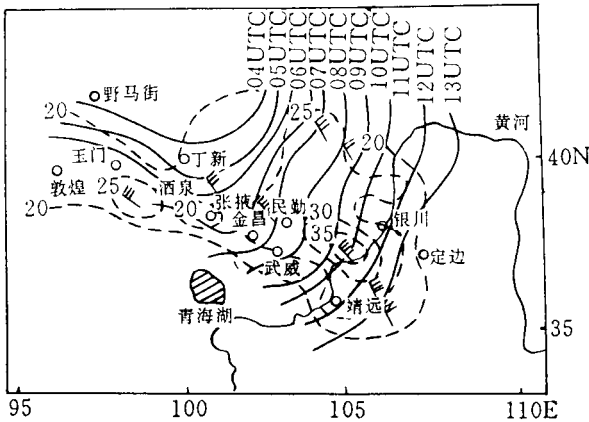


图 2 1993-05-05 各站瞬时大风及其开始时间(UTC)

Fig. 2 The instantaneous gales and their start time (UTC) at the stations on 5 May 1993

1.4 地面冷锋前后气象要素跃变和黑风飚线

由图 3 能清楚地看出, 该强冷锋过境前后的温、压、湿、风有急剧跃变. 由表 1 临泽微气象塔站可见, 06~08 UTC, 气压两小时跃增 5.4 hPa, 温度骤减 10°C, 总辐射剧减 509 W/m². 由此可见, 与巨量沙尘相伴的这条特强冷锋具有飚线性质, 或称“黑风飚线”.

表 1 5月5日下午临泽沙漠微气象塔站冷锋过境前后气象要素的变化
Table 1 Variations of meteorological elements when the cold front passed across Linze tower layer station of micrometeorology at desert area in afternoon of 5 May 1993

时间(UTC)	1 h 变压(hPa)	风速(m/s)	温度(°C)	总辐射(W/m ²)
06	0.1	6.0	21.8	747
07	4.1	16.3	18.9	589
08	5.5	17.1	11.8	238
09	0.1	11.0	8.7	50

1.5 地面强烈增温和黑风暴的发生发展

由 5 日 06 UTC GMS-4 伪彩色地面温度素描图(图 4)可见, 在以民勤为中心的一大片沙漠区地面温度高达 40°C(图 4 中黑色区), 金昌正在该地面高温区的西边缘. 从该黑风暴发生和强烈发展的时间与区域看, 该地面高温区与黑风暴的发生发展密切相关.

以上观测事实分析结果向我们提出这样一些问题: 黑风暴为什么会在这段时间和这一区域发生和发展? 它的发展结构有什么特征? 能否用常规观测资料和中尺度数值模拟方法模拟该黑风暴的发展及其结构? 这正是我们下面要讨论的问题.

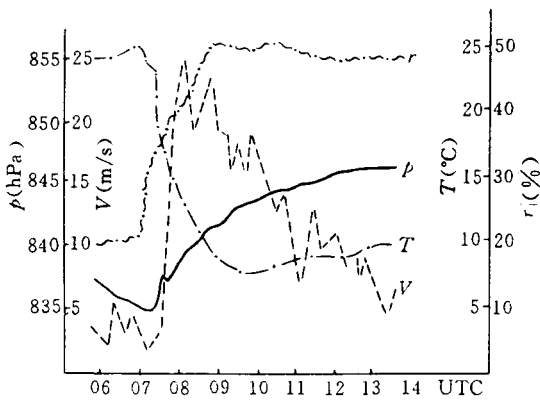


图 3 1993-05-05 金昌 p (气压)、 T (温度)、 r (湿度)、 V (风速)时间变化曲线
 Fig. 3 The jumping of the pressure p , temperature T , wind speed V and relative humidity r when the black storm passed across Jinchang station

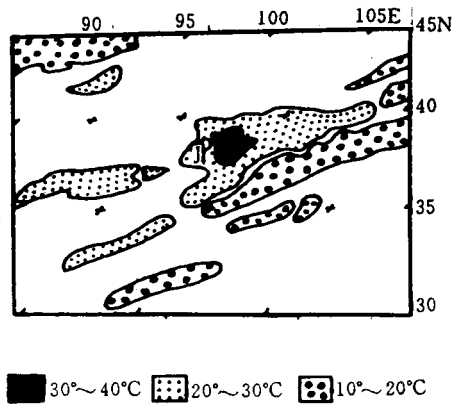


图 4 1993-05-05 06 UTC GMS-4 伪彩色地面温度素描图(○为金昌, 以 J 表示)
 Fig. 4 The sketch of surface temperature with pseudo-color from GMS-4 at 06 UTC 5 May 1993

2 中尺度数值模拟设计和控制模拟

2.1 数值模拟设计

为了比较不同模式空间分辨率和行星边界层(PBL)参数化对黑风暴发展结构及其演变的影响, 我们设计了 3 个数值试验(表 2).

表 2 数值模拟设计
 Table 2 Designing of numerical simulation

试验编号	高分辨 PBL, $K_p=16$	全物理过程	格距 $d=40$ km	说明
1	是	是	是	控制模拟
2	否	是	是	总体 PBL, $K_p=11$
3	是	是	否	$d=80$ km

2.2 控制模拟

(1) 模式基本参量: 模式是经修改和改进的 MM4. 模式顶 $p_t=100$ hPa, 垂直分辨率 $K_p=16$, 水平分辨率 $d=40$ km, 模拟域格点: 46×61 , 水平域中心: 38°N , 103°E .

(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 h 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，而其潜热加入热力学方程，在未饱和层内无蒸发。

(9) 模式地形：通过分析 NCAR 的 0.5° 地形资料以及利用中尺度客观分析方案获得 40 km 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 h，即 1993 年 5 月 4 日 12 UTC~5 日 12 UTC。

包括上述全部条件和物理过程的模拟称控制模拟。计算域和分析域及青藏高原地形在图 5 中给出。

3 控制模拟结果和讨论

控制模拟域是图 5 中 B 域。该域水平格距是 40 km，垂直向分 15 层，其中有 7 层在 1500 m 厚的行星边界层内。这样的高分辨 PBL 对描写与 PBL 物理过程密切相关的黑风暴的发生发展及其结构演变是必要的。

3.1 PBL 中尺度涡旋的突发和黑风暴的发展

由控制模拟结果揭示，自 5 日 06 UTC(模拟 18 h)，一个中尺度涡旋开始在金昌附近边界层内突然发生发展(图略)。其位置基本在相应时间地面强正、负变压中心(图 1a)之间，其中心涡度强度在 850 hPa(基本和地面接近)和 700 hPa 分别达到 $45.52 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $48.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。3 h 后(09 UTC)，该中尺度涡旋在东移的同时继续强烈发展(图 6a, b)，其中尺度涡旋的强度在 850 hPa 和 700 hPa 分别达 $54.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $62.20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ；与其相伴的黑风暴也强烈发展，黑风暴区(图 1b)与该强烈发展的中尺度涡旋区(图 6a)大体一致。值得注意的是，黑风暴后(前)部的中尺度高(低)压在涡度场上也表现出明显的发展(图 6a, b)，在 700 hPa 上中尺度高压中心强度为 $-10.38 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。至 5 日 12 UTC(模拟 24 h)，该中尺度涡旋强度在东移过程中仍继续维持，只是近地层强度略有减弱(图略)，这也与该黑风暴的发展演变一致。

由此可见，该黑风暴的发生、发展与大气边界层内一个中尺度气旋性涡旋的强烈发展密切相关。

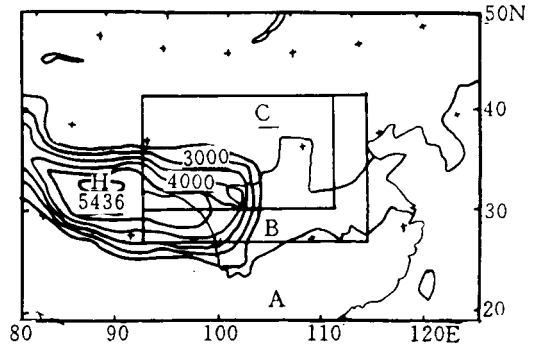


图 5 计算域 A ($d=80 \text{ km}$)、B ($d=40 \text{ km}$) 和相应地面分析域 C(图 1)以及青藏高原地形等高线

Fig. 5 Computational domain A ($d=80 \text{ km}$), B ($d=40 \text{ km}$) and correspondent surface analyses domain C. (Fig. 1). Terrain isohypse of Qinghai-Xizang plateau in meters

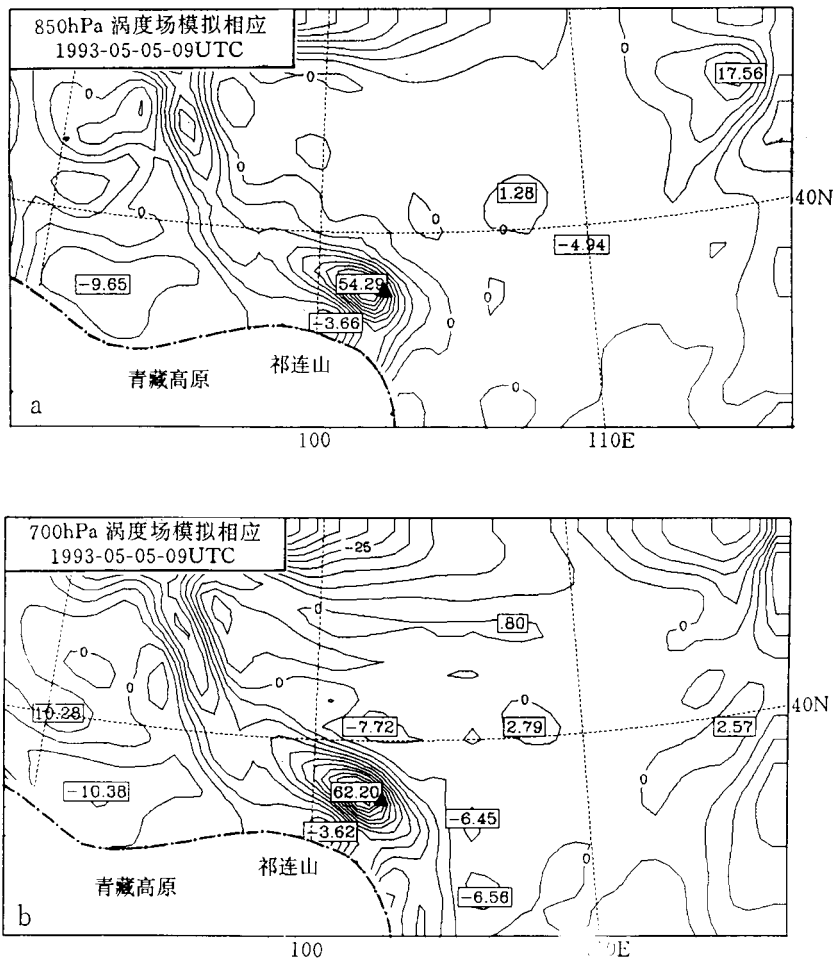


图 6 控制模拟涡度场(a) 850 hPa (b) 700 hPa (5月5日09UTC, 涡度等值线间隔为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, ▲ 为金昌)

Fig. 6 The vorticity fields of control simulation with 21 h (a) 850 hPa (b) 700 hPa at 09 UTC 5 May 1995, respectively (Contour interval is $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, ▲ represents Jin-chang)

3.2 黑风暴的垂直涡柱结构

图 7 是沿图 6a 850 hPa 中尺度涡旋中心和金昌 (38.5°N) 附近作的涡度和相当位温垂直剖面. 由图 7a 所示控制模拟结果可见, 一个极强的气旋性涡柱在金昌附近从地面伸展至 400 hPa, 并略呈西倾. 该涡柱最强涡度中心值在 700 hPa 达 $60.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. 在该气旋性涡柱正上方恰有一个伸展到接近对流层顶的反气旋性涡柱, 其最强的中心值在 250 hPa 达 $-22.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. 显然, 垂直涡柱的这种配置是特别值得注意的, 因为这种黑风暴涡柱结构的物理本质是: 在低空有剧烈的辐合入流, 并伴有强上升运动. 在高空有强烈的辐散流出, 并伴有非对称下沉运动. 其结果是驱动整个黑风暴涡柱内的强上升运动不断发展, 而地面和低空水汽风速持续增强. 与此同时, 黑风暴外围下沉气流, 特

别是其后部(西侧)下沉气流将诱发地面中高压产生和发展. 事实上, 我们在黑风暴涡柱西侧看到的中心值为 $-13.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负涡柱以及在图 1b 中看到的中高压正是黑风暴这种涡度配置和环流结构的结果. 由此可见, 高空间分辨率的控制模拟涡度场对揭示黑风暴的发展结构是非常重要的.

3.3 黑风暴的强斜压结构和 PBL 暖心

图 7b 是与图 7a 对应的相当位温 θ_e 剖面. 由图 7b 可见, 黑风暴的 θ_e 东西剖面结构与一般锋面结构有明显差别, 其主要不同是: 界面坡度陡, θ_e 水平梯度大, 斜压性强, PBL 内暖心明显. 该暖心中心 θ_e 高达 337 K. 这与当日午后强烈的太阳辐射使以民勤为中心的一大片沙漠地区剧烈增温(图 4 中黑色区)直接相关. 这种下垫面上的强热力强迫及其与周围的明显热力对比导致了黑风暴内部的强斜压结构和中、下部的强对流不稳定 [$\partial\theta_e/\partial p > 0$] (图 7 b). 此外, 还应注意该黑风暴东西两侧均为极干冷的气团(图 7 b). 由此可见, 黑风暴是在低层大气, 甚至整层大气都具有极强的热力对比条件下产生和发展的; 而黑风暴下部的暖心结构是与沙漠下垫面因强烈辐射而温度骤增直接相关.

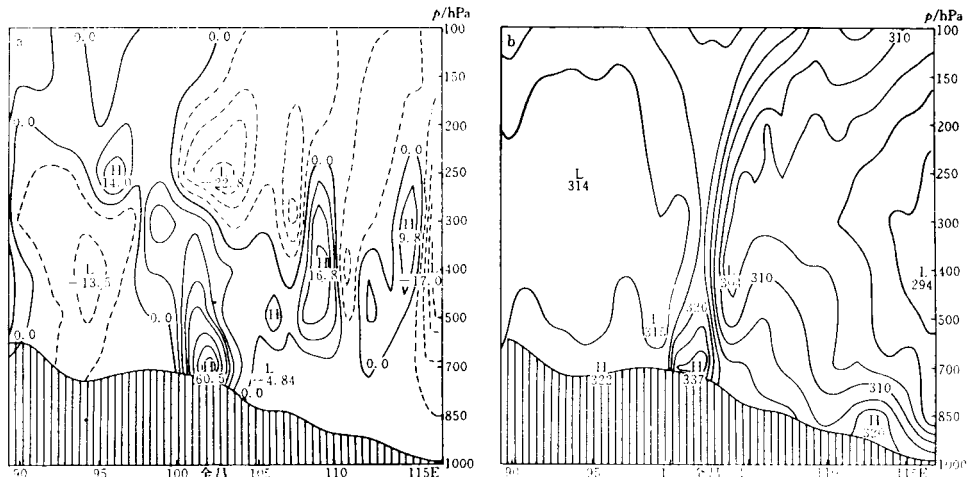


图 7 通过图 6a 金昌(38.5°N)附近涡旋中心的(a)涡度($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和(b)相当位温 θ_e (K) 的东-西垂直剖面

Fig. 7 The W-E vertical cross section of (a) vorticity ζ ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and (b) equivalent potential temperature θ_e (K) through the vortex center near Jinchang (38.5°N) in Fig. 6a

3.4 黑风暴 PBL 内平均变量的结构和演变

根据高分辨 PBL 的模拟输出资料, 在图 8 中给出风速 V 和比湿 q 在金昌附近 PBL 内的结构和演变. 由图 8a 可见, 从当日 06 UTC 开始, 风速 V 在地面附近随时间和高度递增, 至 08 UTC 达 27 ms^{-1} , 这与观测结果(图 2、图 3)相当接近; 此时, 在 1600 m 高度风速达 39 ms^{-1} ; 自 10 UTC 以后, 风速 V 随时间和高度减小, 至 12 UTC 风速在地面附近约为 15 ms^{-1} . 06~08 UTC, 风速廓线的演变特征是: 最大风层不断抬升, 直至离地 1600 m 高度; 该时段黑风暴通过金昌; 08~10 UTC, 在 1000 m 以下的强风层近乎维

持不变. 由此可见, 06~10 UTC 时段, PBL 内的风速廓线结构及其演变与黑风暴经过金昌前后的观测分析相当一致.

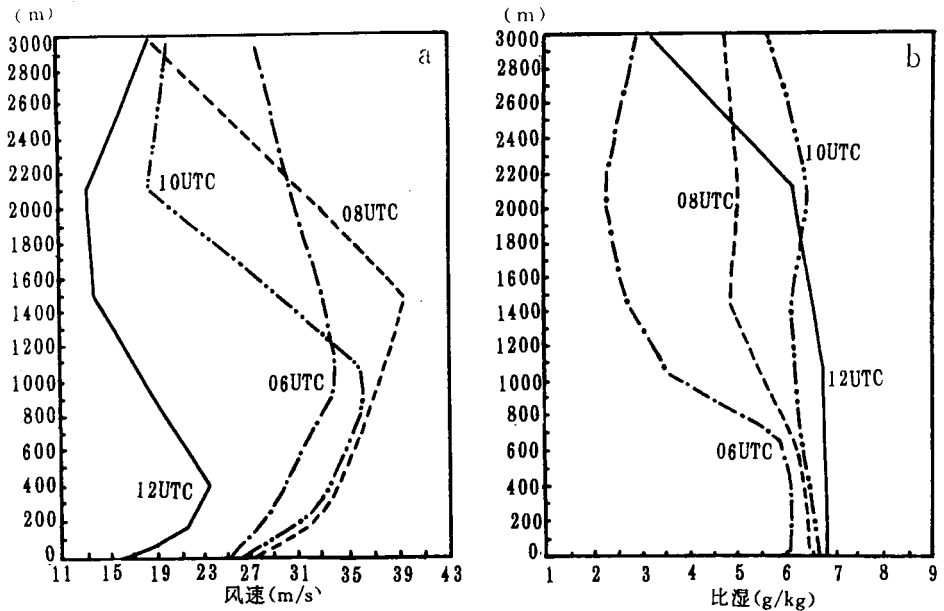


图 8 1993-05-05 06~12 UTC 金昌附近 3000 m 以下(a)风速和(b)比湿的垂直结构和演变
Fig. 8 The vertical structure and evolution of (a) wind speed and (b) specific humidity below 3000 m near Jinchang from 06 UTC to 12 UTC 5 May 1993

由图 8 b 可见, 自 5 日 06 UTC 以后比湿随时间增大, 至 10 UTC 比湿近乎增至最大. 由此时相对湿度(图 3)换算的比湿与此相当接近. 这些结果还表明, 该黑风暴相当干, 而 PBL 内的最大比湿只有 6.8 g/kg. 这正是该黑风暴过境期间几乎没有降水的原因, 尽管该风暴的对流活动极强. 比湿廓线演变的另一特征是, q 趋于均匀混合的厚度随时间增厚, 即自 06 UTC 的 600 m 至 12 UTC 的 2100 m. 这一结果也揭示, “93.5” 黑风暴具有极强的对流活动.

4 模式分辨率对黑风暴演变模拟的影响

从上述讨论可知, 在 B 域(图 5)用 15 层和高分辨 PBL 参数化以及 40 km 的细网格控制模拟, 基本上可模拟出“93.5”黑风暴的发展结构及其演变. 但我们还希望了解改变模式空间分辨率和 PBL 参数化之后会对黑风暴发展结构及其演变产生怎样的影响. 为此, 我们在表 2 中还设计了另外两个对比试验, 即试验 2 和 3.

试验 2 和控制模拟试验 1 的主要差别是采用总体 PBL 参数化. 由于此时把 PBL 视为均匀混合的一层, 因而, 模式垂直向也减少为 10 层, 即 $K_v=11$; 但水平格距仍然为 40 km, 即模拟域仍为 B 域. 在这种条件下的部分模拟结果在图 9 a、c 中给出. 图 9 a 是相应图 7 a 的涡度垂直剖面, 由图 9 a 和图 7 a 的比较可以发现, 10 层总体 PBL 参数化

的模拟结果与控制模拟结果有较大的差异. 我们在图 7 a 中看到的黑风暴涡柱结构在图 9 a 中看不到, 而在图 9 a 中在垂直向具有 3 个涡度中心的带区, 较图 7 a 黑风暴涡柱明显偏东, 其最强涡度中心值仅 $14.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 且位于对流层中部; 该垂直向涡度带西侧的负涡度中心也相应偏东. 从对应图 9 a 的图 9 c 看, 21 h(09 UTC) 模拟的 850 hPa 涡度场大体上能模拟出黑风暴相伴的强风辐合区(图 1), 即涡度中心为 $15.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的涡度区(图 9 c), 比图 6a 中对应涡旋的涡度中心弱的多. 由此可见, 降低 PBL 的垂直分辨率和采用总体 PBL 参数化方案, 会对黑风暴发展结构及其演变产生极大的影响.

试验 3 和控制模拟的主要差别是降低水平分辨率, 即 $d=80 \text{ km}$, 其他与控制模拟相同. 此时, 模拟域扩大为 A 域(图 5), 而原格点数不变. 在该试验条件下模拟结果的主要特征是, 大、中尺度系统模拟的较为平滑, 但中尺度涡旋强度更弱, 尽管与黑风暴相伴

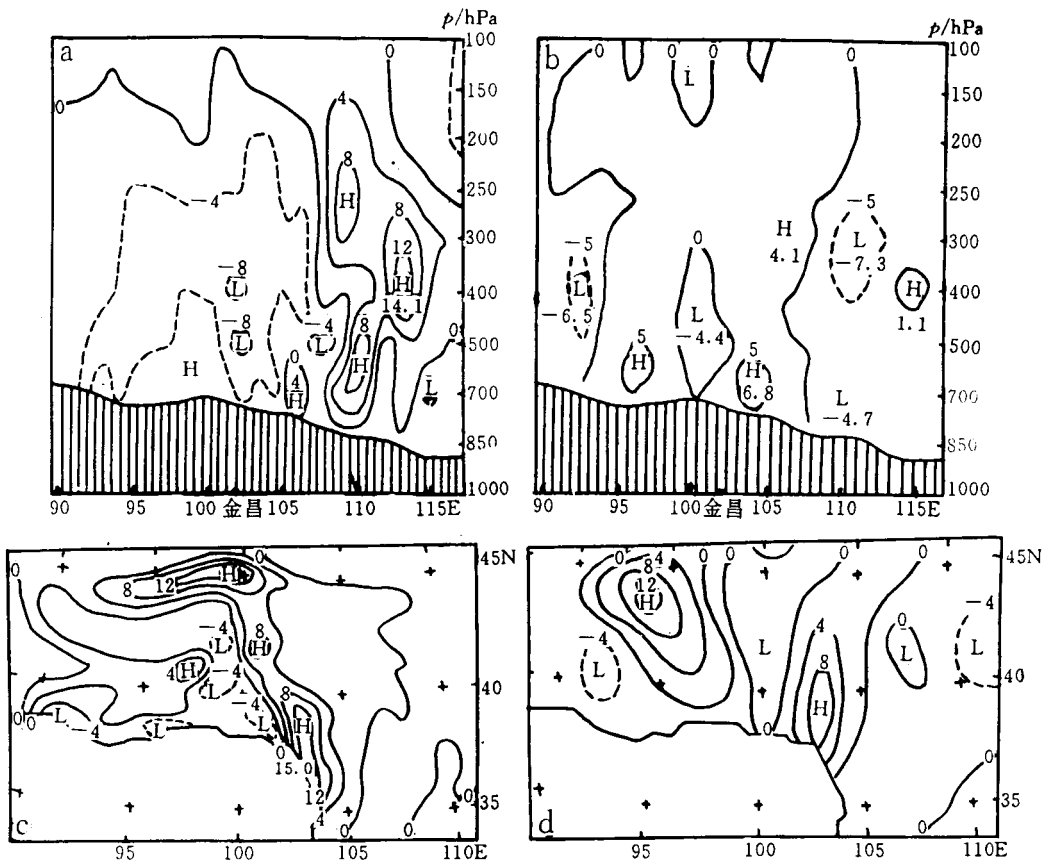


图 9 (a) 与图 7a 相同, 但 $d=40 \text{ km}$ 的总体 PBL (b) 对应图 7a, 但 $d=80 \text{ km}$ 的高分辨率, (c) 对应图 9a 的 850 hPa 涡度场. 但 $d=80 \text{ km}$ (d) 对应图 9b 的 850 hPa 涡度场

Fig. 9 (a) the same as Fig. 7 a, but the bulk PBL with $d=40 \text{ km}$; (b) the same as Fig. 7a, but for the high PBL with $d=80 \text{ km}$; (c) 850 hPa vorticity field corresponding to Fig. 9 a (d) 850 hPa vorticity field corresponding to Fig. 9 b

的强风辐合区及其地面中尺度高压(图 1 b)也能较一致的从相应的涡度场中显现(图 9b、d)。由此可见,降低模式水平分辨率而仍保留高分辨 PBL,会使黑风暴系统强度显著减弱。因此,对黑风暴这样的中尺度系统,只有在垂直向和水平向都提高分辨率,并采用改进的高分辨 PBL 参数化,才有可能成功地模拟出象“93.5”黑风暴这样的结构及其演变。

5 结 论

(1) 1993 年 5 月 4~6 日(“93.5”),发生在我国西北地区的一次挟带巨量沙尘的特强风暴具有飚线性质,通常称“黑风暴”。

(2) 用改进的 MM4 和高分辨 PBL 参数化及 40 km 细网格的控制模拟,能够基本上模拟出“93.5”黑风暴发展的结构和演变。

(3) “93.5”黑风暴发展时段,在 PBL 内与一个中尺度气旋性强涡旋相伴,在对流层内与一个强垂直涡柱相伴;这个伸展至对流层顶的涡柱下(上)半部是与低(高)空强烈辐合(辐散)入(外)流相伴的气旋(反气旋)性涡柱。垂直向涡柱的这种配置是驱动黑风暴剧烈发展的一种重要动力机制。

(4) “93.5”黑风暴 θ_e 剖面结构与一般锋面结构有下列明显差异:界面坡度陡, θ_e 水平梯度大,斜压性强, PBL 内暖心明显。黑风暴下部这种暖心结构与下垫面剧烈热力强迫有关,这也是风暴产生强烈不稳定对流运动的一种重要热力机制。

(5) 为了改进象黑风暴这样具有极强破坏性的中、小尺度系统的天气预报及发展结构模拟,提高中尺度数值模式的空间分辨率、发展好的 PBL 参数化方案以及扩大模式计算域都是极其必要的。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 杨东贞,纪湘明,徐晓斌,等. 一次黄沙天气过程分析. 气象学报, 1991, 49(3): 334~343.
- 3 申绍华,陈受钧. 沙尘暴辐射强迫的锋生过程分析. 气象学报, 1993, 51(4): 425~443.
- 4 Iwasaka Y, Minoura H and Nagaya K. The transport and spacial scale of Asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*. 1983, 35B(3): 189~196.
- 5 Karyampudi V M and Carison T N. Analysis and numerical simulation of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 1988, 45(2): 3102~3136.
- 6 陈敏连,郭清台,徐建芬. 黑风暴天气的研究和探讨. 甘肃气象, 1993, 11(3): 16~27.
- 7 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.
- 8 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. WMO/TD, 1995, No. 699: 323~328.

THE DEVELOPING STRUCTURE OF A BLACK STORM AND ITS NUMERICAL EXPERIMENT OF DIFFERENT MODEL RESOLUTION

Cheng Linsheng Ma Yan

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

Abstract

The developing structure and evolution of a black storm occurred in the northwest region of China from 4 to 6 May 1993 (“93.5”) can be basically simulated by using a control experiment of the improved MM4 model with high resolution PBL parameterization and 40 km fine-mesh. The simulated results show that the black storm was associated with both a mesoscale cyclonic strong vortex in the PBL and a vertical vortex column in the troposphere during the developing stage. The lower(upper)part of this vortex column, stretching to the tropopause was cyclonic (anticyclonic)vortex column associated with intensive convergence(divergence)inflow(outflow). According to the cross section of the equivalent potential temperature, the major differences of the structure of the black storm from that of general front are: the steep slope of the boundary surfaces, the large horizontal gradient of θ_e , the quite intensive baroclinity, the obvious warm-core in the PBL. The warm-cored structure in the lower part of the black storm was related to intensive thermal forcing over underlying surface. The comparison experiments of the different PBL parameterizations and model spatial resolutions show that it would be necessary to enhance the spatial resolution of the mesoscale numerical model and to adopt a better PBL parameterized scheme in order to improve the simulation of the developing structure and evolution of black storm.

Key words: Black storm; Numerical simulation; PBL parameterization; Model resolution.