

锋面结构的 MM5 数值模拟

孟晓婧¹, 田林生²

(1. 南京气象学院大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 胜利油田气象台, 山东 东营 257027)

摘要: 利用美国 PSU/NCAR 具有嵌套功能的非静力中尺度大气模式 MM5, 对发生在 2000 年 4 月 8~9 日的一次强冷锋进行数值模拟。分析模拟结果发现, 锋面结构的演变与适应锋生理论相一致, 并且具有一种不连续结构。

关键词: 锋面结构; 非静力中尺度大气模式; 适应锋生理论

中图分类号: P441⁺1.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-6372(2003)03-0014-03

引言

目前, 我国对锋面的研究主要有两个分支: 一是着重于理论研究, 一是实际天气个例分析。由于观测资料的缺乏, 这类天气学分析仅能局限于天气尺度的分析, 而现在的理论研究往往偏向于解释锋面的中小尺度特征。国外在对于锋面中小尺度结构的观测分析研究方面已做了很多工作, 相对而言我国目前对于锋面的研究是非常不够的, 虽然有一些新理论, 但缺乏高质量的事实来验证, 同时由于资料缺乏, 无法仔细分析锋面附近的一些中小尺度特征。鉴于这种情况, 本文希望能通过数值模拟方法, 尽可能再现 2000 年 4 月 8~9 日冷锋个例, 并在此基础上对模式结果进行分析。

1 理论

锋生和锋消是天气分析中两个重要天气概念。从锋面的基本定义出发, 锋生是指温度(或位温)不连续形成的一种过程, 或指已有锋面温度(或位温)水平梯度加大的过程; 锋消是指作用相反的过程。锋的形成、加强或减弱、消失, 导致了天气的急剧变化。因此, 了解和正确预报锋的生、消活动, 不仅是作好天气预报的重要环节, 亦关系到其它一些天气系统形成和发展的预报。

地转适应过程是地球流体力学中的一个基本概念, 在大气和海洋学科中有很多应用, 近年来, 一些学者又将地转适应过程与大气和海洋锋生联系起来, 提出了适应锋生机制。

所谓适应锋生机制, 就是在没有大尺度平衡场的形变和切变作用下, 初始处于非地转平衡状态的中尺度扰动会向地转平衡状态调整, 在调整过程中, 非地转环流在一些区域产生辐合, 导致那里的温度水平梯度增加, 在合适的条件下, 初始非地转场通过地转调整后, 可以形成气象要素场的不连续^[1]。

2 数值模式介绍和实验设计

2.1 模式介绍

本文选用 PSU/NCAR MM5 中尺度数值模式。MM5 是一个静力、非静力可选择的有限区域原始方程模式, 最早由 Anthes 和 Warner(1978)建立, 后来被许多人改进。经过 20 年的

发展, PSU/NCAR 中尺度模式已相当成熟, 被广泛地用于研究中小尺度, 甚至区域气候问题^[2]。

2.1.1 空间差分格式和时间积分方案

MM5 水平网格采用“Arakawa B”型跳点网格, 动量与热力学量定义在不同点上, 这种格式可以比较精确地计算气压梯度力与水平散度。垂直方向也是跳点网格, 垂直速度定义在整 σ 面上, 而其它变量放在半 σ 面上。本文在垂直方向上取 24 层非均匀的 σ 面, 对应 σ 值为 1, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00。模式底部分层最密, 以细致地描述低层大气的运动特征^[3]。

MM5 时间积分方案包括蛙跳格式和 Asselin 时间滤波器 (Asselin, 1972)。时间滤波器的作用是降低高频快波的能量, 避免蛙跳方案中出现解的分裂。为了提高计算效率, MM5 使用了时间分离技术, 将快、慢波分开计算, 针对模式中包含的不同快慢波, 分别选用显式和半隐式时间分离方案。

2.1.2 边界条件

本文非静力模拟都是用辐射上边界条件, 侧边界处全部选择时变及流入流出条件, 这种边界条件可以允许波的能量向上传播而不被反射下来, 以修正垂直速度。

2.1.3 嵌套网格技术

MM5 模式为提高模式分辨率, 模拟中小尺度系统的细微结构提供了嵌套网格方案。在粗网格大区域内嵌套细网格小区域, 与整个区域选用细网格相比, 减少了计算量。同时允许网格多重嵌套、相互覆盖和移动, 可以更好地模拟研究锋面这样的移动性天气系统。

2.2 试验设计

2.2.1 网格嵌套

本文采用网格嵌套, 粗网格格点数为 $172 \times 334 \times 24$, 格距为 30 km, 时间步长取 90 s。细网格格点数为 $334 \times 334 \times 24$, 格距为 10 km, 时间步长为 30 s。

积分时, 细网格与粗网格同时启动。

2.2.2 物理过程

本文中物理过程的选择为暖云降水微物理过程、Grell 对流参数化方案、Blackadar 行星边界层参数化方案、简单大气辐射冷却方案。

2.2.3 模式初始化

以 NCEP 的 2.5×2.5 的一天 4 个时次的资料作为大尺度背景场, 以常规的探空和地面资料与第一猜测场做为初始

收稿日期: 2002-03-12

作者简介: 孟晓婧(1973-), 女, 吉林大安人, 硕士, 工程师, 从事天气预报工作。

条件,积分时间从2000年4月8日08时开始,2000年4月9日20时截止。

3 模拟结果分析

3.1 冷锋的结构和演变

利用与锋面垂直的垂直剖面,分析锋面的二维结构。

8日08时,锋面主体在太行山以西,地面附近锋面较弱,等温线比较稀疏,锋区后盛行西北风,前侧有显著的西南风,锋区附近有明显辐合,这将导致锋生。500 hPa上有一等位温线密集区(图1),在温度分布图(图2)上有一冷区与等位温线密集区对应,在位势涡度分布图(图3)上,这里对应一个位涡的相对大值区。到14时,地面附近和高空锋区都有所加强。位势涡度图出现了一个有趣的现象:在锋区后面即高空锋区上方,对流层顶的位涡下传,并与前一时次出现在对流层中部的位涡相对大值区合并,表明有对流层顶的冷空气下沉,下沉的冷空气与周围较暖的空气之间形成了明显的温度对比,从而使高空锋区加强。在地面附近,锋区两侧反向的辐合风使锋面进一步加强。一般来说,这时的地转偏向力远远不足以平衡气压梯度力,因而在气压梯度力的驱动下,西北风将进一步加强,因而锋区处的辐合将进一步增强。这与伍荣生和 Blumen (1995) 的研究结果相一致,即一定的热力对比会引起显著的地转适应过程,在这过程中,锋面将会得到加强^[4]。从位涡图中还可以看出,地形附近存在显著的位涡扰动,这些扰动都是由于地形与摩擦作用所造成,其对锋面的影响有待进一步讨论。

8日20时,锋面向东南方向移动,且强度和坡度不断增加,在近地面处近乎垂直于地面,这主要是地面摩擦的影响,在锋面前有明显上升运动,后侧有一定下沉运动。正是由于这种垂直运动的水平分布不均匀,使高空锋区有所减弱,这可通过锋生函数计算得到证明。

9日11时,冷锋前缘已越过太行山到达华北平原,强度明显减弱。这一方面是由于冷空气翻山后下沉增温,另一方面是由于更冷的空气被阻挡在山的迎风侧,不能及时补充,致使锋区两侧温度对比减弱。尽管锋面强度有所减弱,但其后还是有一显著的大风区,最大风速达10 m/s。这个大风区的形成有两个原因:一个是直接与锋面相联系的非地转环流,由于锋面附近垂直于锋面的科氏力远远不足以平衡气压梯度力,因而空气将在气压梯度力作用下加速运动;另一个是冷空气翻山后,一方面在气压梯度力驱动下运动,另一方面在重力作用下加速下沉。在两者共同作用下,在锋后形成明显的大风天气。在这过程中,对流层顶的位涡不断下传,到9日11时,位涡为4的等位涡线已下降至500 hPa左右,温度的垂直剖面上,冷区继续向前移动,冷舌伸至700 hPa以下。

9日14时,冷锋继续东移南压,并在随后1 h内在渤海海域造成大风天气。

9日17时,锋面开始减弱,坡度减小。至20时,由于无冷空气补充以及地形的摩擦作用,锋区减弱。

总的来说,这次锋面的形成主要是冷高压内强烈的下沉运动不断把对流层中上层的冷空气向下输送,从而在对流层中下层形成了一个冷区。该冷区与高压前方的弱低压所控制的地区存在明显的冷暖对比,形成很大的垂直于锋面的气压

梯度力。这种气压梯度力不能被科氏力所平衡,非地转效应很强,因此气块将在气压梯度力的驱动下不断加速,从而在高压前沿形成很强的温度梯度,形成锋面并导致锋面不断加强,这与伍荣生等提出的适应锋生理论非常一致。

另外,从剖面图上可看出,等值线上有许多小扰动,这主要是由于地形波造成的,这些扰动对锋面的影响有待探讨。

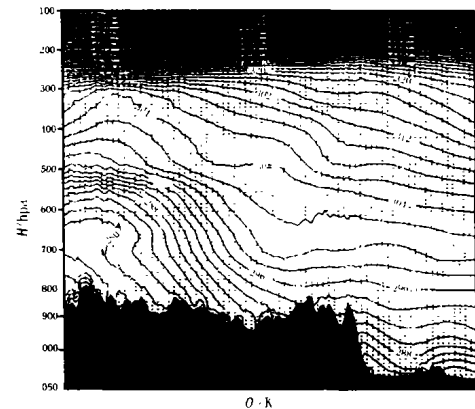


图1 4月8日08时垂直于锋面的垂直剖面图位温模拟分布图

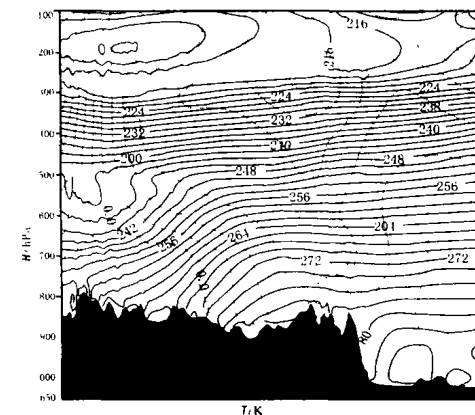


图2 4月8日08时垂直于锋面的垂直剖面图温度模拟分布图

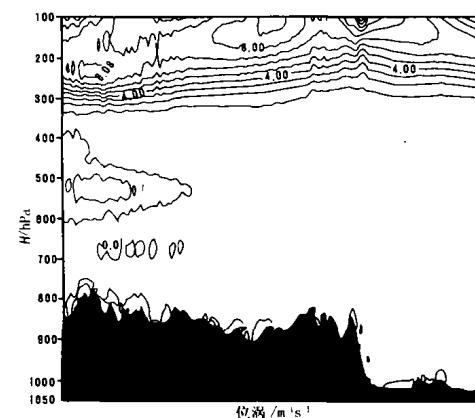


图3 4月8日08时垂直于锋面的垂直剖面图位涡模拟分布图

3.2 冷锋的不连续结构

利用10 km 格距的细网格计算了54823站附近地面气温和气压随时间的变化。结果表明,从8日14时开始,在1500分钟内气温和气压均发生急剧变化:大约在30分钟里,气温下降了9℃,气压上升了6 hPa。一般认为华北地区锋面移速为30~40 km/h,那就意味着,经过54823站的冷锋宽度大约

地面辐合线与强对流天气落区

刘跃红, 司福意

(焦作市气象局, 河南 焦作 454003)

摘要: 通过对 1993~2002 年焦作辖区 20 余次强对流天气过程的统计分析发现, 在天气尺度条件下, 地面气压场上中尺度辐合线对强对流天气的维持时间和落区有很好的指示性。

关键词: 中尺度辐合线; 强对流天气; 落区

中图分类号: P456.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-6372(2003)03-0016-02

焦作市区及所辖 6 县(市)呈东西向排列在太行山南麓到黄河北岸滩区。受特殊地理位置影响, 夏季强降水、冰雹、大风等灾害性天气发生的时间、强度和分布极不均匀, 给预报和服务工作带来了诸多困难。

通过对 1993~2002 年焦作辖区 3 h 降水量 > 20 mm 的强对流天气过程的统计分析发现, 在天气尺度影响系统具备的条件下, 地面中尺度辐合线的产生、发展以及强度和位移对强对流天气的发生时段、落区有很好的指示性。

1 气压场与中尺度辐合线

1.1 热低压或暖倒槽与中尺度辐合线

焦作地面处于热低压、暖倒槽中。如果低压或倒槽轴线呈南北向, 当贝加尔湖南侧有冷高压脊伸到 40°N 附近时, 冷空气将从热低压、暖倒槽的西侧或东西两侧向热低压侵袭, 在

已有明显南北风向切变的热低压或暖倒槽中形成南北向中尺度辐合线, 这种形势下强对流天气将于次日后出现; 当冷高压前沿沿冷锋到达河套附近, 接近热低压或暖倒槽时, 形成的中尺度辐合线所伴的强对流天气将出现在当天夜间, 辐合线随系统东西向移动。如果热低压或暖倒槽轴线呈东西向, 当 40°N 附近有冷高压活动, 冷锋从中路南下, 12 h 前后锋区到达河套中部, 出现锋消, 再过 12 h 后侵入热低压或暖倒槽中, 形成东北至西南向的中尺度辐合线, 产生强对流天气。临近预报时, 应多注意山西南部不稳定天气的出现、发展和移动。

1.2 入海高压与中尺度辐合线

焦作处于入海高压后部, 冷高压脊线在 $38^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 。当沿贝湖偏北东移的另一个较弱的冷高压到达蒙古东部和我国东北地区后, 冷空气开始南下, 在 $40^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ 间产生明显正变高或两高间的风切变线, 其前后易出现对流天气。辐合线 12 h 内南压到晋冀交界, 再过 12 h 将并入处于偏南风场切变中的焦作, 触发强对流天气。临近预报时, 应多注意豫

收稿日期: 2002-11-08

作者简介: 刘跃红(1962-), 河南鄢城人, 工程师, 从事管理工作。

为 $15\sim 20$ km, 这表明锋面宽度非常窄, 近似于一种不连续。这一结果是基于格距为 10 km 的情况, 如果格距再取小, 结果是否会更小, 还有待进一步试验。但从这个结果可以猜测实际大气中的强冷锋面有可能具有一种不连续结构。

该站在急剧降温、增压后, 气温依然逐渐下降, 气压仍在继续上升, 这是由于不断有冷空气越过太行山影响该站的原因。这也进一步证实了前面的分析结果。

4 结 论

① MM5 模式能够很好地模拟锋面结构, 将其应用于锋面预报是可行的。

② 模拟要素场与实况较为吻合, 但强度有偏差, 这会导致预报结论与实际的差距。

③ 非地转效应使高压前沿形成很强的温度梯度, 从而形成锋面并导致锋面不断加强, 与适应锋生理论相一致。

④ 从模拟中发现实际大气中的强冷锋的确具有一种不连续结构。

参考文献:

- [1] 伍荣生. 现代天气学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 114.
- [2] 陈永盛. 地形对低层大气位涡结构的影响[D]. 南京大学大气科学系, 1998.
- [3] 高山红. 台风影响下渤海及邻域海面风场演变过程的 MM5 分析[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(3): 325-331.
- [4] Wu, R and W Blumen, 1995: Geostrophic adjustment of a zero potential vorticity flow initiated by a mass imbalance J. Phys. Oceanogr., 25, 439-458.

A MM5 Numerical Simulation and Analysis about the Cold Front

MENG Xiao-jing¹, TIAN Lin-sheng²

(1. Department of Atmosphere Sciences, NIM, Nanjing 210044, China; 2. Shengli Oilfield Meteorological Observatory, Dongying 257027)

Abstract: The high cold front on April 8-9, 2000 was successfully simulated by using the nonhydrostatic mesoscale atmospheric model (MM5). We make a diagnostic analysis about the simulant fields and conclude that the evolution of the high cold front accords with the mechanism of frontogenesis. In addition, we also find that the high cold front has a discontinuity structure.

Key Words: Cold front Structure; Nonhydrostatic mesoscale atmospheric model (MM5); The mechanism of frontogenesis