

文章编号: 1000-2022(2002) 04-0548-07

## 对华北中尺度低压个例的数值模拟及敏感性试验

连志鸾

(石家庄市气象局, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 选取典型个例, 用 MM4 模式对华北中尺度低压进行模拟分析及敏感性试验。检验了 MM4 模式对行星边界层中尺度系统的预报能力。通过调整风场、温度场、气压场与地形的配置关系, 设计多种试验方案。并讨论了气流与山脉交角大小、冷暖平流对华北中低压的影响。结果表明, 气流与山脉交角大、低层暖平流或弱冷平流, 对华北中低压形成是有利的。反之, 则不利于华北中低压出现。通过对天气观测事实和模拟试验结果进行分析, 提出对华北中低压有重要作用的大尺度背景条件。

**关键词:** 中尺度低压; 数值模拟; 敏感性试验

**中图分类号:** P437      **文献标识码:** A

华北中尺度低压是由于华北特殊地形所引起的较大范围的动力、热力效应, 而形成于华北平原行星边界层内的中尺度低压系统。它是造成华北秋、冬季大范围恶劣能见度的天气系统之一。它的出现频率很高, 是华北地区的预报员在大雾、能见度、空气污染预报中经常需要考虑的中尺度天气系统之一。地形是定常的, 而华北中低压只在特定的环流背景下出现。因此进一步认识其发生、发展规律, 对准确作好预报是有益的。

文献[1-3]曾利用 60 至 70 年代华北地区加密的地面观测资料, 对华北中低压做过普查、分析。进入 90 年代, 对华北中低压的研究很少。与此同时, 国内外对地形强迫下的中尺度环流系统的数值模拟出现了很多, 如: Avissar<sup>[4]</sup>、Chrastine<sup>[5]</sup>、石春娥等<sup>[6]</sup>对复杂地形上局地环流形成、演变过程及其主要特征从不同角度进行了模拟研究。取得了一些很有意义的研究成果。前人的研究点主要集中于山脉、河谷强迫下的中小尺度天气系统上。对类似于华北中低压这种受山脉影响而出现于平原上的中尺度系统研究不多。就华北中低压而言, 有许多问题仍需要进一步认识。因此, 本文从天气实例出发, 对典型个例进行模拟分析及敏感性试验, 进一步探讨地形、背景气流在华北中低压形成中的影响和作用。

### 1 模式简介

本文用 PSU/NCAR 研制的 MM4 模式<sup>[7]</sup>。其动力学预报是采用一个三维、静力平衡、斜

收稿日期: 2001-09-21; 改回日期: 2002-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 49775259; 国家自然科学基金项目 40075009

作者简介: 连志鸾(1967-), 女, 河北平山人, 硕士, 高级工程师, 从事中、短期天气预报工作, 研究方向: 中尺度天气动力学。

压原始方程组, 坐标系为兰勃脱保角投影图上的直角坐标系, 垂直方向为仿地形  $\sigma$  坐标,  $\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} = \frac{p - p_t}{p^*}$ 。其中  $p_t$  为模式顶气压, 取为 100 hPa,  $p_s$  为地面气压。模式的主要物理过程: 水平扩散为次网格水平扩散方案; 行星边界层过程选择了 Blackadar 高分辨方案; 边界利用海绵边界条件等。本试验中模式区域中心为(110 E, 39 N)。差分网格结构是水平网格取  $41 \times 41$ , 垂直取 10 层, 网格距取为 30 km。

## 2 个例选取与资料

实测资料表明, 中低压出现的一般天气形势为: 当两次冷空气活动间隔时间较长, 低层大气回暖。华北地区上空气流西风分量较大(一般为 WNW 风)。在这种形势下最有利于形成华北平原的中低压。用 1999 年 10 月 9 日至 24 日 08 时 850 hPa 资料, 沿张家口、北京、邢台, 做高空风和气温的时间剖面图(图 1), 可以看出华北中低压过程与低层的温度场、风场变化有较好的对应关系。其具体特点是: 1) 中低压产生于气温回暖阶段, 低层存在暖平流, 而冷空气入侵和冷锋过境, 会导致中低压过程结束; 2) 华北中低压出现于低层西风分量较大的情况下; 3) 华北中低压的出现常伴随烟尘、大雾等低能见度天气。

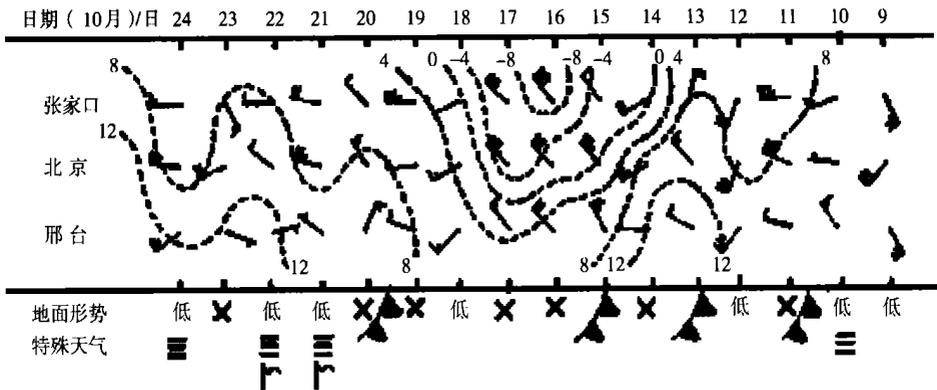


图 1 1999-10-9—24T08 850 hPa 张家口、北京、邢台高空风、温度时间剖面图  
(虚线为等温线, “低”表示有中低压出现)

Fig. 1 Time cross-section of wind and temperature at 850 hPa 0800h for the period of 9—24 Oct. 1999 over Zhangjiakou, Beijing and Xingtai

(Dashed lines indicate isotherm, "low" denotes the appearance of low pressure)

从天气形势看, 10 月 23 至 24 日华北地区中低层均为暖平流, 850 hPa 为暖温脊控制, 地面气压场较弱。24 日 08 时华北平原中部出现了非常明显的低压环流(见图 2a)。本文就以 10 月 24 日华北中低压的生消过程为例进行模拟分析, 以 10 月 23 日 20 时的实测资料作为原始资料输入模式。并着重对各试验方案模拟出的地面流场及气压场与实况进行对比分析。

## 3 试验及结果分析

### 3.1 控制试验结果与实况的对比检验

CTRL 试验所用资料为 1999 年 10 月 23 日高空、地面报报文资料, 最大预报时效取 18 h, 将资料输入模式。间隔 3 h 得到各预报时效的地面流场和气压场。比较各个时效的结果可以看出, 模式模拟 3 h 之后, 地面流场图上在华北平原西、北侧沿山一带风向开始发生顺时针偏转

(图略)。模拟 6、9 h 之后,中低压环流开始形成并维持(图 3)。从整个流场看,气流分布比较光滑,中低压环流形成较为完整、明显。

在所有预报时效的输出结果中,9 h 时中低压环流表现得最强,其次为 12 h。这两个时效分别对应着 24 日 05、08 时。根据以往的加密观测资料统计和多年的天气分析经验,05 至 08 时是华北中低压一日中最强的时候,这样的模拟结果与观测事实较一致。由于 05 时大量的一般站和辅助站不发地面报,拿非常稀少的资料做客观分析,中低压表现不出来。因此将 9 h 的模拟结果(图 4),与 24 日 08 时华北平原实况地面风场(图 2)进行比较表明,模拟出的华北中低压环流与实况风场较接近。继续模拟,15 h 之后中低压环流减弱并趋于消失。

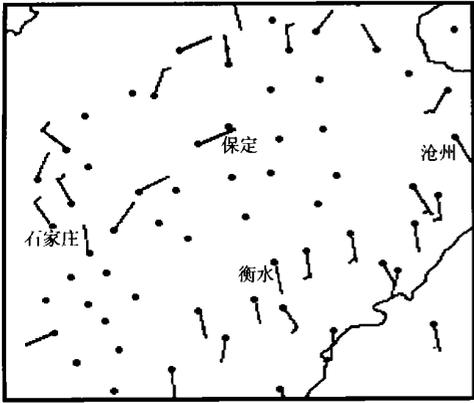


图 2 1999-10-24T 08 华北平原地面风场

Fig. 2 Surface wind field at 0800, Oct. 24 1999 over the North-China Plains

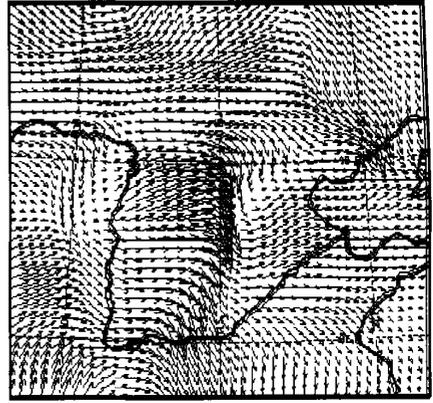


图 3 CTRL 试验模拟 9 h 后的地面流场

Fig. 3 Surface wind field simulated after 9 hrs in CTRL experiment

与地面中低压环流相对应,模式模拟 9 h 后输出的气压场上,华北平原出现了一很明显的低压中心(图 5),模拟 15 h 后低压消失。将图 5 与实况气压场的客观分析(图 4)相比较,可以看出模拟结果与实况基本一致。

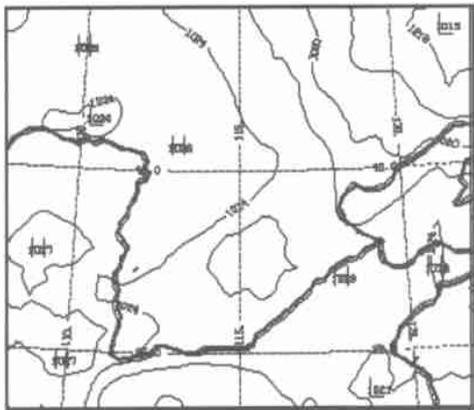


图 4 1999-10-24T 08 模式区地面气压场实况  
(等压线间隔: 1.5 hPa)

Fig. 4 Observed surface pressure at 0800 BST, Oct. 24 1999 (isobaric interval: 1.5 hPa)

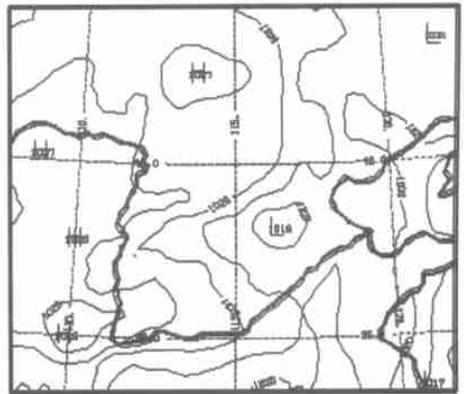


图 5 CTRL 试验模拟 9 h 后的地面气压场  
(等压线间隔: 1.5 hPa)

Fig. 5 Surface pressure simulated after 9 hrs in CTRL experiment (isobaric interval: 1.5 hPa)

通过上述对模拟出的地面流场、地面气压场与实况的对比分析可知,模式模拟出的中低压的出现时间及出现位置与实况都较一致。这说明 MM4 模式比较准确地模拟出了华北中低压整个生消过程。

### 3.2 气流与山脉交角对中低压形成的敏感性试验

将 1999 年 10 月 23 日 20 时高空和地面实测资料,经 Cressman 逐步订正方案进行客观分析后,形成了  $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ ,垂直 10 层的客观分析场。将这些分析场作为初值再输入 MM4 模式,进行各种敏感性试验。

依据理论分析<sup>[8]</sup>及前人的研究成果<sup>[1]</sup>,当基本气流与地形等高线交角大时,有利于中低压形成。本文在 A 试验中做了三个分试验(A11、A21、A31)来证明这一点。三个试验重点将模式区域中太行山及以西、燕山及以北(以下简称:风向敏感区)的低层风场分别做了不同的处理。

#### 3.2.1 偏西气流试验(A11)

将风向敏感区中的地面、850 hPa、700 hPa、500 hPa 流场的  $u$  分量依次乘以 0.5、0.7、0.8、0.9,其他区域和层次的  $u$  分量初值不变。四个层次的  $v$  分量则都乘以 0.1,其它要素的初值不做改变。处理后风向发生了改变,风速变化不大。由于太行山近似南北走向;而燕山近似于东西走向,这样改变后,基本气流与太行山正交,而与燕山山脉则近乎平行。将资料整理输入模式,模拟 9 h 后在华北平原出现了中低压环流(图 6)。

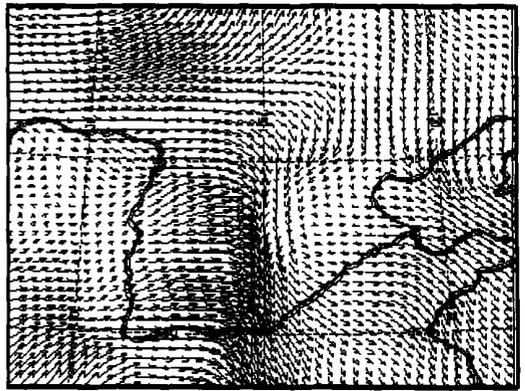


图 6 偏西气流试验积分 9 h 后的地面流场

Fig. 6 Surface wind field simulated after 9 hrs in A11 experiment

#### 3.2.2 西—西北气流试验(A21)

A21 试验对太行山以西气流的处理与 A11 相同。所不同之处是,将燕山及以北的地面、850 hPa 风场的  $v$  分量各格点赋值为  $u$  分量再乘以 -1。700 hPa、500 hPa 风场  $v$  分量则赋值为  $u$  分量乘以 -0.5。这样低层气流与燕山山脉的交角接近,加大了背景气流与山脉的交角。经计算,模式积分 6 h 后华北平原中低压环流即基本形成(图 7),9 h 后中低压完整形成(图略),与 A11 试验结果比较,华北中低压提前约 3 h 形成。

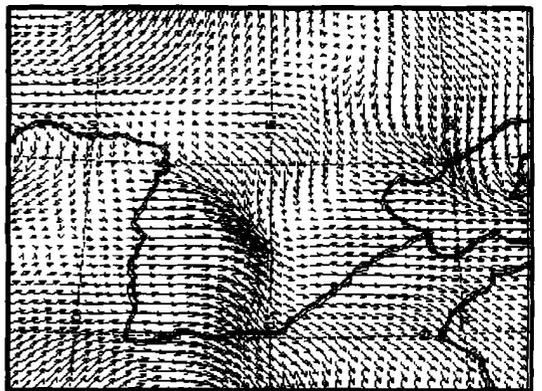


图 7 西—西北气流试验积分 6 h 后的地面流场

Fig. 7 Surface wind field simulated after 6 hrs in A21 experiment

#### 3.2.3 西—偏北气流试验(A31)

将风向敏感区的  $u$  分量从地面、850 hPa、700 hPa、500 hPa 依次乘以 0.3、0.5、0.8、0.9。对  $v$  分量的处理则再分区进行:太行山及以西地面至 500 hPa 4 层  $v$  分量均乘以 0.1。燕山及以北区域  $v$  分量等于

各格点  $u$  分量乘以  $-1.5$ 。与 A 21 试验中资料的前处理相比较,  $u$  风量所乘系数减小, 是为了避免基本气流中冷平流过强。这样处理后的低层流场, 气流与山脉的交角进一步加大了。

将所有资料输入模式计算, 结果表明, 模拟 3 h 后华北平原即出现较明显的弱风风向辐合, 这可能与初始流场气流本身存在的交角较大有关。6 h 后华北平原即出现了明显低压环流(图 8), 模拟 9 h 后中低压环流明显减弱。分析模拟结果认为, A 31 试验中, 气流本身在华北平原西北部交角很大, 对华北中低压的形成贡献较大。中低压环流形成快, 可能与此有很大关系。另外, 将燕山及以北的初始场气流改为偏北风, 虽然加大了气流与山脉的交角, 但同时也使低层的冷平流有所加强。冷平流加强将不利于华北中低压形成。模拟结果中低压环流减弱消失得快可能与此有关。

综合 A 11、A 21、A 31 三个试验, 可以初步得出以下结论: (1) 基本气流与山脉交角越大, 由于地形的动力作用, 华北中低压形成得越快, 低压环流也越完整。由于计算区域内太行山、燕山山脉走向不同。当气流过太行山和燕山所产生的正涡度叠加在一起时, 对中低压生成的效应最大。(2) 当太行山东侧、燕山南侧背景气流本身存在交角, 即有气旋性弯曲时, 动力作用即可形成中低压。而且这种气旋性弯曲曲率越大, 形成的中低压越强。(3) 华北地区为西北风或为偏北气流控制时, 往往伴随着冷平流, 这将不利于华北中低压形成或使中低压消失。

### 3.2.4 无山脉试验

为了进一步弄清不同的气流背景下, 山脉在华北中低压生成中的作用, 本文将模式区陆面的海拔高度全部赋值为 10 m, 又做了三个均匀地形试验 A 12、A 22、A 32, 这三个试验除地形高度变了之外, 其他资料分别与 A 11、A 21、A 31 试验相同。

试验结果: 在预报时效为 3 h 时, A 22、A 32 试验的地面流场上, 华北北部 40°N 附近有风向辐合(这主要与背景气流本身交角大有关)。除此之外, 三试验的其它时效输出结果均无明显的中低压环流出现(图略)。由此说明, 气流与山脉交角加大, 在中低压形成中起主要作用; 背景气流本身的气旋性弯曲起次要作用。

### 3.3 冷暖平流对中低压作用的敏感性试验

初始时刻(1999 年 10 月 23 日 20 时) 850 hPa 华北地区被暖平流所控制(图 1), 即处于回暖阶段。为了检验冷暖平流在中低压形成中的作用, 本文设计了两个方案:

#### 3.3.1 暖平流减弱试验(B1)

试验 B 1 将中低层温度场用下式作九点平滑<sup>[9]</sup>,

$$\bar{f}_{ij} = f_{ij} + \frac{s}{2}(1-s) \cdot (f_{i,j} + f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1} + f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j-1} - 4f_{ij})$$

其中平滑系数  $s$  取为 0.5。地面、850 hPa、700 hPa、500 hPa 的平滑次数依次为 50、30、20、10 次。这样处理后, 等温线散开, 温度梯度大大减小, 由于风场不变, 因此华北上空的暖平流也大

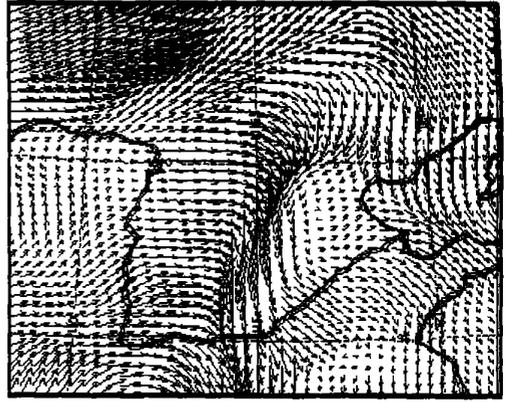


图 8 西—偏北气流试验积分 6 h 后的地面流场

Fig. 8 Surface wind field simulated after 6 hrs in A 31 experiment

大减弱了。为了与改变后的温度场、风场相适应,本试验将模式区气压场做了相应的平滑 10 次的处理。

试验结果,9 h 之后中低压环流依然能够形成,低压位置与 CTRL 试验结果较一致。只是环流范围偏小,环流的东北象限风场建立的不太完整,且风速较小(图 9)。

### 3.3.2 冷平流加强试验(B2)

将地面、850 hPa、700 hPa 风速扩大为原风速的 1.4 倍,风向改为西北风。由于 850 hPa、700 hPa 模式区中真实温度梯度较小,而地面温度梯度相对较大,而且锋区等温线走向为东北—西南向。为了将中低层初始场设计为冷平流,本文用九点平滑公式将地面模式区温度场平滑 5 次后,再将各格点温度值乘以 0.5,赋值为 850 hPa 温度值。将新得到的 850 hPa 各格点温度再减去 7.0,赋值为 700 hPa 温度。这样处理后的 850 hPa、700 hPa 温度场,在华北中部一带与真实场的温度值相比较变化不大,而温度梯度却增加了。由于风向为西北风,因此,冷平流被大大加强了。

将处理过的温度场、风场与其它资料(采用真实场)输入模式。结果表明,积分 6 h 华北平流北部 40°N 附近流场略有气旋性弯曲。9 h 之后华北全部转为北风,均无中低压出现(图略)。

由 B1、B2 两试验说明,低层一定强度的暖平流或弱冷平流对华北中低压形成是有利的。冷平流太强,中低压不出现,并可使已有的中低压消失。这与大量的天气观测事实分析得出的结论是一致的。

## 4 主要结论

(1) 当基本气流与地形等高线交角大时,地形的动力作用,最有利于中低压生成。若基本气流本身在太行山东侧有明显的气旋性弯曲时,华北中低压生成快,且较强。

(2) 当低层的背景流场存在一定强度的暖平流或弱冷平流时,华北中低压易于出现。冷平流很强时,中低压则不会出现。

(3) 华北中低压的形成还有赖于有利的大尺度背景条件。它常出现于冷空气变性回暖,华北上空盛行偏西气流的条件下。新的较强冷空气入侵,则会使中低压过程结束。

(4) 地形在华北中低压形成中起着决定性作用。若没有地形的作用,华北中低压便不能形成。

致谢:本文得到南京气象学院寿绍文教授和河北省气象局张书余研究员指导,在此表示感谢!

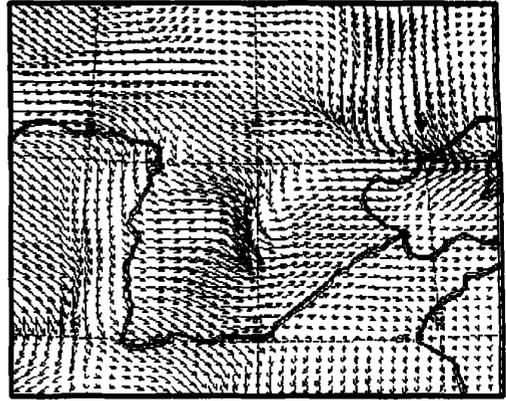


图 9 暖平流减弱试验积分 9 h 后的地面流场

Fig. 9 Surface wind field simulated after 9 hrs in B1 experiment

## 参考文献:

- [1] 刘瑞晨, 扈忠慈, 李人和. 华北平原中尺度低气压的若干事实[J]. 大气科学, 1983, 7(1): 78-87.
- [2] 李鸿洲. 华北地区中尺度地面分析业务化中常见的中尺度系统[J]. 气象, 1991, 17(7): 40-43.
- [3] 刘瑞晨, 李鸿洲. 北京地区的烟雾与天气条件的联系[J]. 大气科学, 1980, 4(1): 69-78.
- [4] Avissar R, Mahrer Y. Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical model[J]. J Appl Meteor, 1988, 27(4): 400-413.
- [5] Chrastine A. A mass-consistent model for wind fields complex terrain[J]. J Appl Meteor, 1978, 17(3): 312-319.
- [6] 石春娥, 曹必铭, 李子华, 等. 复杂地形上三维局地环流的模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 1996, 19(3): 320-328.
- [7] 郑维忠, 苏炳凯, 潘益农. 中尺度数值模式 MM4 模拟系统介绍[M]. 南京: 南京大学出版社, 1992: 8-37.
- [8] 连志鸾. 华北地形对中尺度低压影响的数值实验研究[D]. 南京: 南京气象学院大气科学系, 2000.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 851-852.

# A Numerical Simulation and Sensitivity Tests of the Meso-scale Low in North China

LIAN Zhi-luan

(Shijiazhuang Meteorological Office, Hebei Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** A simulation of typical weather event about meso-scale lows occurred in PBL over the North-China Plains and a series of its sensitivity experiments are carried out by using PSU/NCAR's MM4 mesoscale model, which examines the MM4's forecast capability for the meso-scale systems in PBL. It analyzes the impact of angles between airflow direction, mountain axis, and warm(cold) advection on the mesolow in North China by adjusting the matched patterns of terrain with wind, temperature and pressure fields. The result shows that the bigger the angle with a warm (or weak cold) advection in the lower layer, the more favourable for the generation of the macro-scale circulation, which play an important role in generating the mesolow, are put forward in line with the observed weather facts and the result of modelling tests.

**Key words:** meso-scale low; numerical simulation; sensitivity experiments