一次局地大暴雨过程的数值模拟和诊断分析

王巍巍[1], 张艳玲[2], 寿绍文[1]
(1. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南通市气象局, 江苏 南通 226006)

摘要: 采用中尺度数值模式 MM5(V3)对 2002年 8月 15—16日发生在江苏启东附近的一次局地大暴雨过程进行了数值模拟, 较好地模拟出了本次过程的暴雨中心落区和降水量, 以及相关的中尺度系统的发生、发展过程。探讨了中尺度涡旋、局地环流对这次暴雨过程的影响, 结果表明, 中尺度涡旋对暴雨的发生起了至关重要的作用, 局地环流的存在, 也有利于降水的发生。

关键词: 暴雨; 数值模拟; 中尺度涡旋; 局地环流
中图分类号: P456.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-2022(2007)03-0411-06

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of a Local Rainstorm Process

WANG Wei-wei[1], ZHANG Yan-ling[2], SHOU Shao-wen[1]
(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China;
2. Nantong Meteorological Bureau, Nantong 226006, China)

Abstract Mesoscale numerical model MM5(V3) is used to simulate the heavy rain process in Qidong Jiangsu Province during 15th to 16th August 2002. Simulated results show that the genesis, development and rain gush of the mesoscale system are well described. The mesoscale vortex and local circulation are analyzed, and the analysis results demonstrate that the mesoscale vortex played an import role in the occurrence of the heavy rain, and the presence of local circulation also favored the heavy rain.

Key words rainstorm; numerical simulation; mesoscale cyclone; local circulation

0 引言

暴雨是各种尺度天气系统相互作用的产物, 中尺度天气系统直接造成暴雨[1-2]。随着观测手段的增加和数值模式的发展, 从较小时空尺度上来研究暴雨和强对流等中、小尺度天气系统的发生、发展规律和机制成为可能。李玉兰等[3]用增强红外云图等资料讨论暴雨过程中 β-中尺度对流云团的演变。程麟生等[4-5]采用 MM5模式模拟了“98.7”暴雨, 发现特大暴雨与 700 hPa上一个 β-中尺度低涡的生成和强烈发展直接关联。徐亚梅等[6]认为, 1998年 7月二度梅期间的两个中尺度低涡对 7月 22日鄂东沿江的暴雨有重要作用, 由于中尺度低涡稳定少动, 产生了局地大暴雨; 同时由于中尺度低涡是局地形成的, 使得暴雨具有显著的突发性。王迎春等[7]利用卫星云图资料对发生在北京东北部密云县的一次小范围、短时间、特大暴雨进行了研究, 发现这次暴雨是由一个 β-中尺度对流系统在北京北部山区停留造成的。地面中尺度分析表明, 中尺度低压和辐合线是对流的触发系统, 北京地区北部处于中尺度低压东部暖湿气流的辐合区中, 在有利的地形条件下密云县西部山区产生了局地特大暴雨。

局地暴雨的发生具有突发性, 易造成大的灾害, 研究局地暴雨的发生发展机制对实际预报有很好的参考作用。本文对 2002年 8月发生在江苏启东地区的一次局地大暴雨过程进行了模拟分析, 在模拟结果较为理想的基础上, 对此次暴雨发生的机制进行了探讨。

收稿日期: 2005-03-03; 改回日期: 2005-06-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40405009, 40075009, 40205008); 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418301); 江苏省气象局科技开发项目(200406)
作者简介: 王巍巍(1979-), 女, 黑龙江绥化人, 硕士, 研究方向: 中尺度天气动力, wangweiwei@nuist.edu.cn.

1 降水实况和环流形势

此次降水过程从 8月 15日凌晨开始, 至 16日下午结束, 过程总降水量为 183 mm。15日 08时至 16日 08时启东 24 h降水量为 150.1 mm, 1 h最大降水量为 56.6 mm, 达到了大暴雨的标准。但强降水仅限于启东附近的小范围地区内(约在 121.3°E ~ 121.7°E, 31.6°N ~ 32.0°N 之间, 面积约占 200 km^2), 是一个典型的 β-中尺度暴雨系统。启东降水量与同期南通地区其他气象台站的 24 h降水量(通州 29 mm, 海门 78 mm, 如东 43 mm, 如皋 28 mm, 南通市 35 mm, 吕泗 111 mm)相比明显要高得多。

本次暴雨发生前启东地区在高空 500 hPa槽前暖湿气流控制下, 长江流域有西风带小槽东移, 西北太平洋副热带高压在日本以东的洋面上, 0213号台风位于副高东南侧, 中心在(150°E, 20°N)附近(图 1a)。同时刻的 850 hPa上存在一条明显的切变线(图 1b), 该切变线南北摆动, 15日 14时位于吕泗、衢州、南昌到郴州一线, 启东地区一直处在切变线附近。切交线北侧的偏东气流和南侧的偏南气流都从海上带来大量的水汽, 累积在启东附近地区, 相对湿度出现明显的高值区(图略)。在这次暴雨发生前, 850 hPa上长江流域为辐合区, 200 hPa上为辐散区, 这种高低空散度场的配置形势有利于产生较强的垂直速度(图略), 对降水的发生发展起着重要作用。从观测资料来看, 暴雨发生时启东地区上空并无明显的中尺度系统活动, 因此采用数值模式对这次过程进行模拟。

2 数值模式及试验方案设计

本文使用了由美国 PSU/NCAR开发的非静力平衡中尺度模式 MM5(V3)[8], 模拟使用两重嵌套网格, 水平范围以 116°E、32°N为中心。水平格距分别为 36 km和 12 km, 垂直方向都是 20层。模拟起始时间为 02年 8月 14日 20时(本文均采用北京时), 积分 48 h, 积分步长 100 s和 33 s, 每 1 h输出一次模拟结果。动力学过程采用流体非静力平衡方案, 模式粗网格采用 Anthes-Kuo积云对流参数化方案, 细网格采用 Grell积云对流参数化方案, 两重网格均采用 MRF高分辨率边界层参数化方案和 RRTM辐射方案。模式的初始场和侧边界条件由 NCEP/NCAR再分析资料(分辨率 1°×1°)和常规观测资料提供。

3 模拟结果分析

将 8月 15日 08时实况资料和粗网格模拟输出的 500 hPa的高度场和温度场进行对比可见, 高度场和温度场都模拟得比较好(图略)。受 500 hPa槽前气流的影响, 降水范围比较大, 形成一条东北—西南走向的雨带(图 2a), 但降水中心比较分散, 启东和贵州兴义附近分别为两个较强的暴雨中心。与同时段模式粗网格模拟的 48 h降水量相比(图略), 总体来看, 与实况对应较好。启东地区有一明显的局地降水中心, 中心最大值为 112.6 mm, 与实况比较接近, 但浙江部分地区雨量偏大, 出现虚假中心。

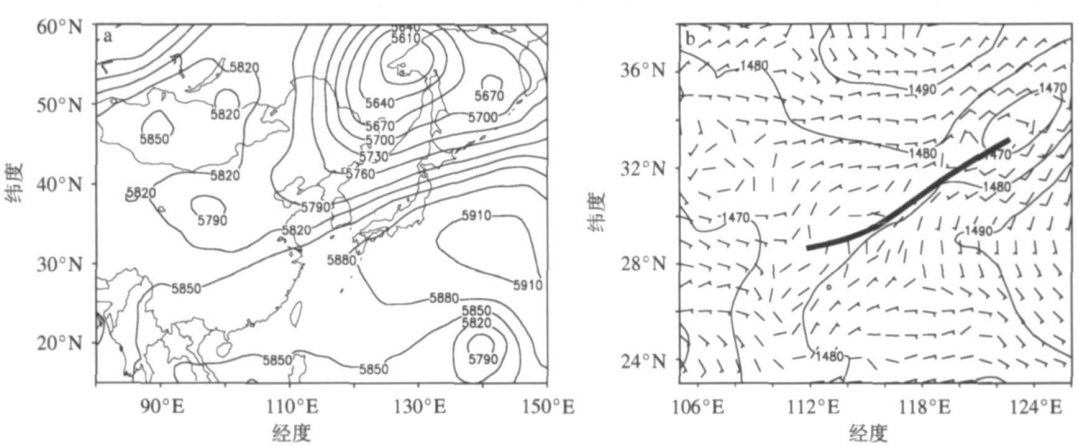

图 1 2002年 8月 14日 20时分析资料的 500 hPa高度场(a, 单位: gpm)和 850 hPa高度场(单位: gpm)及风场(b, 黑斜线为切变线)

Fig 1 (a) The reanalyzed field of 500 hPa geopotential height(gpm) and (b) 850 hPa geopotential height(gpm) and wind at 2000BST 14th August 2002 (The thick black line in Fig 1b is a shear line)

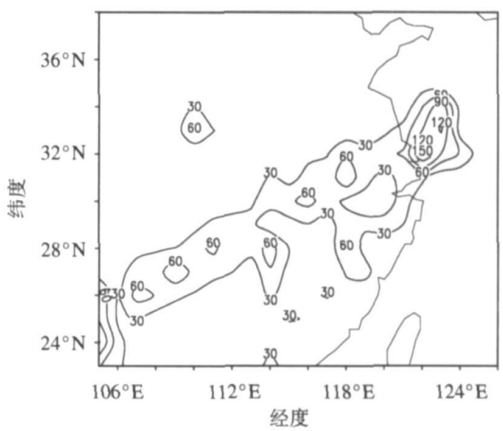

图 2　2002年 8月 14日 20时－16日 20时
48 h实测累积降水量 (单位: mm)
Fig 2　Observed 48 h accumulative precipitation
from 2000 BST 14th to 2000 BST 16th
August 2002(units mm)

为进一步研究启东地区的局地环流和本次暴雨的成因, 采用细网格输出的资料 (以下均采用细网格资料模拟结果)进行分析。首先给出细网格模拟的 48 h累积降水量 (图 3a), 模式模拟出启东地区的降水量达 166 mm, 与实测总降水量十分接近, 南通地区其他各站的降水量也模拟得较好。图 3b给出了启东市 (121. 7°E, 31. 8°N)的每小时降水量, 降水主要集中在 15日 22时到 16日 01时左右, 每小时最大降水发生在 23时, 降水量为 63. 9 mm, 比实测的量稍多。

4　β-中尺度气旋及湿位涡分析

受低层切变线影响, 浙江省北部不断生成小的中尺度涡旋, 到 15日 18时有一较强的涡旋沿着切变线向西北推移, 21时经过长江口到达启东地区, 22时发展加深 (图略), 同时对应着对流层中低层 850 hPa从浙江有一东北西南向狭长的相当位温高值带 (图 4a)移动到江苏启东地区。根据郑秀雅等[9]提出的理论 ——中低层的相当位温高值区是大气层结最不稳定的地方, 暴雨往往与相当位温的高能舌 (区)相联系, 启东地区正对应高能带的中心, 为大暴雨的发生累积了大量的不稳定能量。 23时在 950 hPa的流场上生成一明显的 β-中尺度的气旋型涡旋, 结构如图 4b, 4c, 4d所示, 涡旋产生在等温线密集带上, 西北来的冷空气绕到西南侧伸向涡旋, 有弱的冷暖平流交汇于此, 东侧有一个 14 m• s^{-1}强风速带, 西侧是一中心为 2 m• s^{-1}的弱风速带, 水平风速、风向切变明显。暴雨过程中的强上升速度最大值出现在 15日 22时的 450 hPa 中心值为 6 m• s^{-1} (图 5)。强上升运动存在于一狭长的区域, 导致了启东地区强降水的局地性

一般而言, 干位涡[10-11]对许多中高纬天气系统的移动和发展具有指示性[12-14], 但在对流层低层, 尤其是在低纬, 干位涡很弱, 再者, 干位涡不包括水汽分布。因此, 在考虑降水特别是暴雨降水的生成机制时, 必须考虑水汽的作用, 从而出现了湿位涡[15-16]的概念。等压面湿位涡可以简单表示为:

$$\zeta_{mpv} = -g(\xi+f)\frac{\partial\theta_e}{\partial p} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial y}\right)。$$

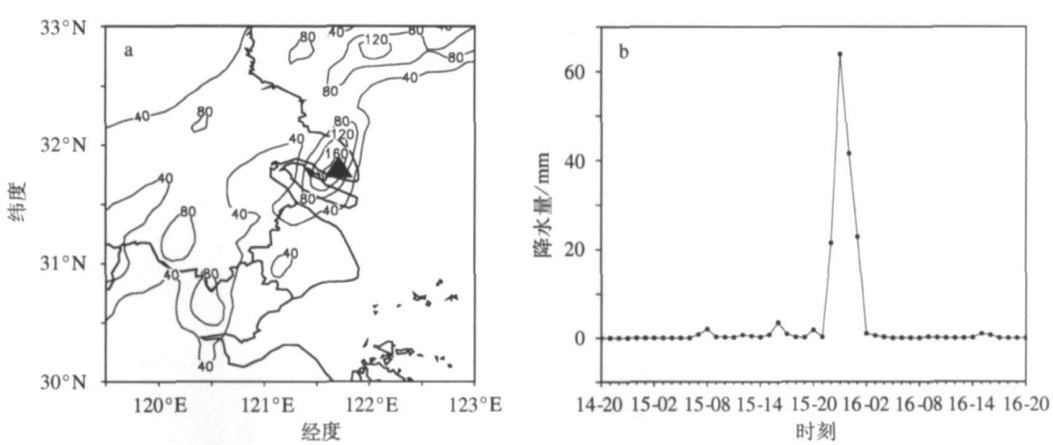

图 3　细网格输出的 48 h累积降水量 (a, ▲为启东市, 单位: mm)和
启东市 (121. 7°E, 31. 8°N) 14日 20时－16日 20时的逐时降水量 (b)
Fig 3　(a) 48 h accumulative precipitation of the fine grid simulation(units: mm; ▲: Qidong City) and
(b) hourly precipitation at Qidong City(121. 7°E, 31. 8°N) of the fine grid simulation

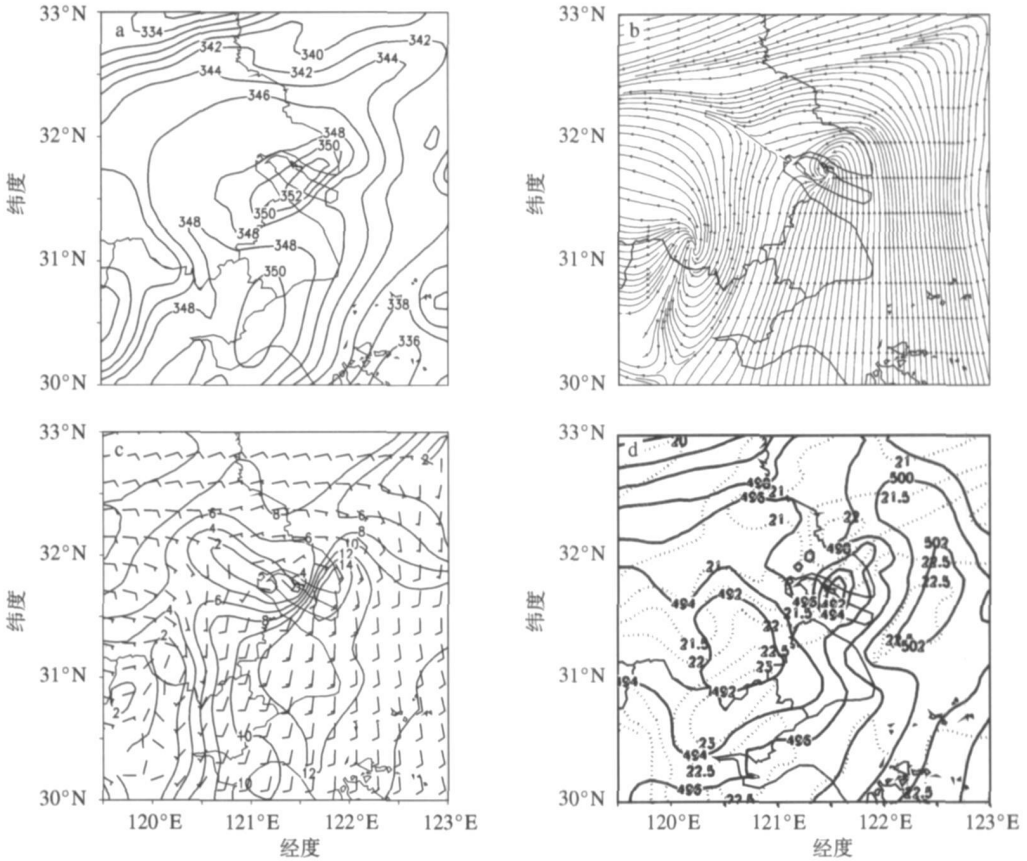

图 4 数值模拟的 2002年 8月 15日 22时 850 hPa相当位温 (a, 单位: K)、
15日 23时 950 hPa流线 (b)、风场和全风速线 (c, 单位: m• s^{-1})
以及温压场 (d 虚线: 温度场, 单位: ℃; 实线: 高度场, 单位: gpm)

Fig 4 Simulated (a) 850 hPa equivalent potential temperature(K) field at 2200 BST,
(b) 950 hPa eddy stream line, (c) wind speed(m• s^{-1}) and direction filed,
(c) temperature(dash line, ℃) and geopotential height(solid line, gpm) field at 2300 BST 15th August 2002

湿位涡包含水汽变化, 可分写为 $\zeta_{mpv} = \zeta_{mpv1} + \zeta_{mpv2}$, 其中湿正压项 ζ_{mpv1}表示惯性稳定性 (ξ+ f)和对流稳定性$\left(-g\frac{\partial\theta_e}{\partial p}\right)$的作用, 湿斜压项 ζ_{mpv2}包含了湿斜压性和水平切变的贡献。

沿 121.7°E作湿位涡的经向高度剖面, 在湿位涡的逐时变化中, 强降水发生前 700 hPa启东上空的湿位涡的绝对值开始增大, 到 15日 21时 (图 6a), 湿位涡负值中心为 -2×10^{-6} m^2• s^{-1}• K• kg^{-1}, 有较强的对称不稳定存在, 绝对值达到最大。随着强降水的发生, 湿位涡的负值绝对值开始减小, 到 16日 02时, 强降水停止后, 700 hPa的湿位涡转为正值 (图 6b)。

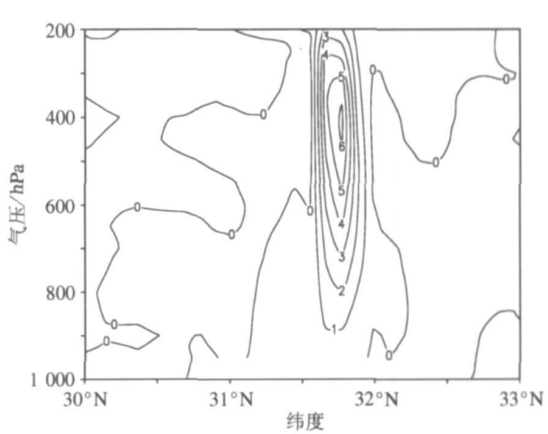

图 5 2002年 8月 15日 22时垂直速度
沿 121.7°E的经向垂直剖面 (单位: m• s^{-1})

Fig 5 Longitudinal vertical section of vertical speed
along 121.7°E at 2200BST 15th Aug 2002(units: m• s^{-1})

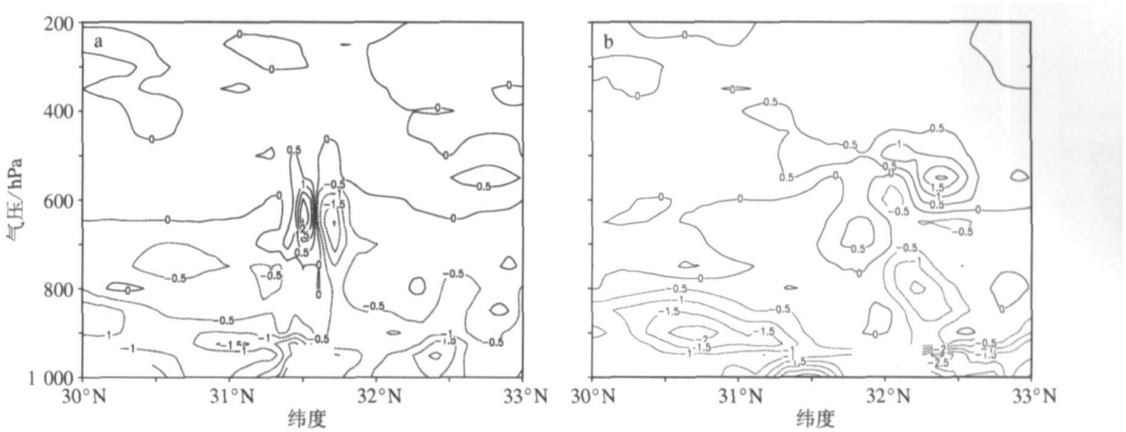

图 6　2002年 8月湿位涡沿 121. 7°E的垂直剖面(单位: $10^{-6}m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$)

a 15日 21时; b 16日 02时

Fig 6　Longitudinal vertical sections of ζ_{mpv} ($10^{-6}m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) along 121. 7°E in August 2002

a 2100 BST 15th; b 0200 BST 16th

5　风场特征分析

在研究中发现, 启东地区的风随时间变化出现明显的旋转。取细网格输出的一块区域 (119. 5~ 123°E, 30. 0~ 33. 0°N)进行分析。图 7给出 14日 22时到 15日 12时的 950 hPa风场和温度场。由图

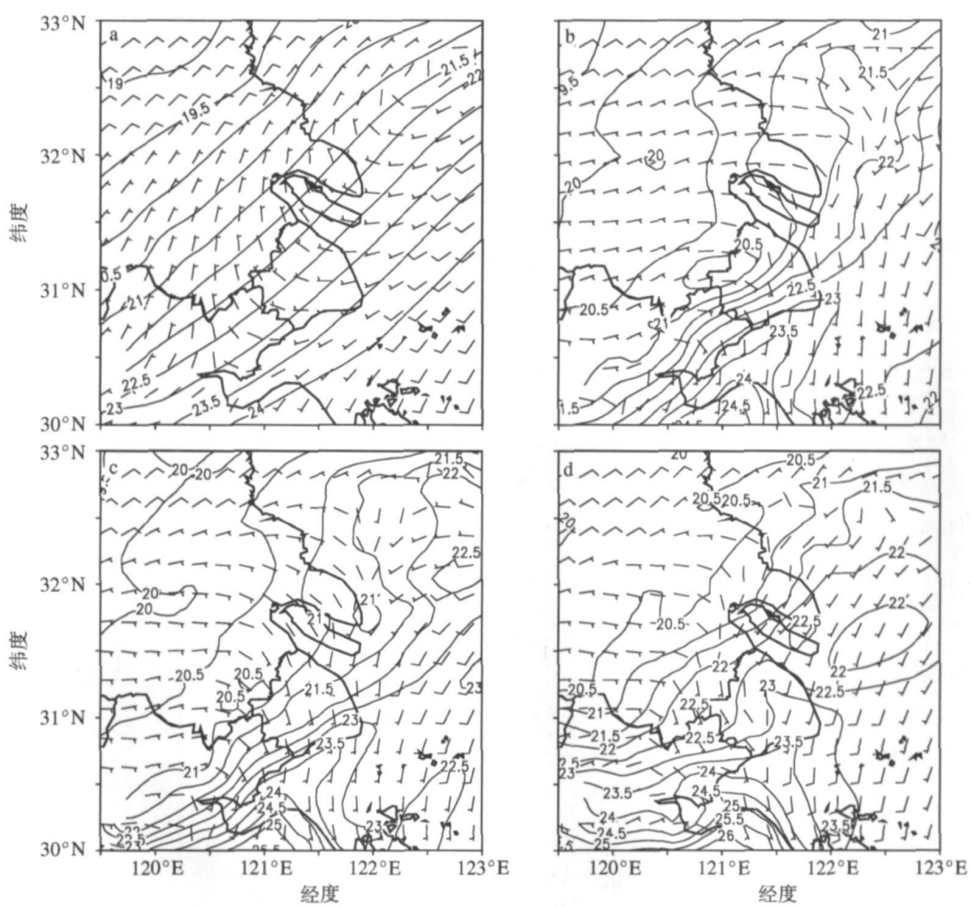

图 7　数值模拟的 8月 14日 22时 (a)、15日 09时 (b)、15日 10时 (c)和 15日 12时 (d) 950 hPa风场及温度场(单位: ℃)

Fig 7　Simulated 950 hPa wind and temperature(℃) field in the fine grid simulation in August 2002

a 2200 BST 14th; b 0900 BST 15th; c 1000 BST 15th; d 1200 BST 15th

7可看到, 风向由 14日 22时的西北风转为东风转为东南风转为西南风, 有明显的呈顺时针方向旋转的环流。当启东上空 950 hPa风向为东风时在垂直方向上有弱的上升运动产生 (图 8), 产生强度较小的降水。

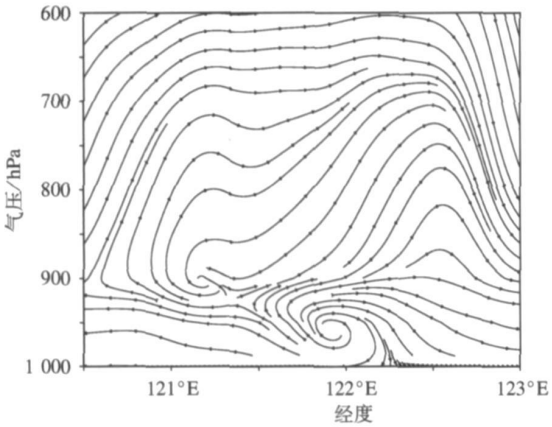

图 8 2002年 15日 09时沿 31.8°N的流场垂直剖面

Fig 8 Latitude-height cross section of stream line field along 31.8°N at 0900 BST 15th August 2002

6 结论

(1)本次暴雨过程是由 500 hPa高空槽, 以及切变线上生成的中尺度涡旋共同导致的, β中尺度涡旋的生成和维持造成了这次暴雨的强度大, 局地性强的特点。

(2)通过湿位涡分析发现, 在暴雨前, 湿位涡负值逐渐增加, 最大值出现在暴雨强盛时之前, 对暴雨预报有一定的指导意义。

(3)本次暴雨过程中, 950 hPa风场上风向随时间呈顺时针旋转的特征, 当出现东风时, 与海洋之间有弱的垂直环流圈产生, 可造成少量的降水。

参考文献:

[1] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 25-34.

[2] 期公望. 暴雨和强对流环流系统 [M]. 北京: 气象出版社, 1989: 1-3

[3] 李玉兰, 王婧嫆. 一次中-β尺度对流云团发生、发展的分析 [J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 77-81.

[4] 程麟生, 冯伍虎. "987"突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟 [J]. 大气科学, 2001, 25(4): 465-478.

[5] 程麟生, 冯伍虎. "98.7"暴雨 β中尺度低涡生成发展结构演变: 双向四层嵌套网格模拟 [J]. 气象科学, 2003, 61(4): 385-395.

[6] 徐亚梅, 高坤. 1998年 7月 22日长江中游中 β低涡的数值模拟及分析 [J]. 气象学报, 2002, 60(1): 85-95.

[7] 王迎春, 钱婷婷, 郑永光, 等. 对引发密云泥石流的局地暴雨的分析和诊断 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(3): 277-286.

[8] Grell A G, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5) [R]. NCAR Tech NoteNCAR/TN-398+ STR. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1995.

[9] 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 1992: 48-59.

[10] Etel H. Einneuer hydrodynamischer wirbelsatz [J]. Met Z, 1942, 59(9): 277-281.

[11] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1940, 66(Suppl): 68-87.

[12] 王建中, 马淑芬, 丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用 [J]. 应用气象学报, 1996, 7(2): 19-27.

[13] 吴海英, 寿绍文. 位涡扰动与气旋的发展 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 510-517.

[14] 阎凤霞, 寿绍文, 张艳玲, 等. 一次江淮暴雨过程中干空气侵入的诊断分析 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 117-124.

[15] Hoskins B J. On the role of potential vorticity in symmetric stability and instability [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1974, 100(425): 480-482.

[16] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁, 等. 湿位涡和倾斜位涡发展 [J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.