

华北秋季大暴雨的天气分析与数值模拟

陈 艳^{1,2} 宿海良¹ 寿绍文²

(1. 河北省唐山市气象局, 063000; 2. 南京信息工程大学大气科学系)

提 要: 利用常规资料和MM5模拟结果分析了2003年10月10—12日华北地区大暴雨物理成因。分析表明, 高层稳定持续的经向环流是大暴雨产生的大环流背景。低空暖切变线和低空急流的直接影响, 以及西南涡的加强和日本海高压的阻挡起了重要作用。强烈的上升运动、能量的积累和充沛的水汽输送是大暴雨发生的必要条件。对流层中下层偏南急流、低层的偏东气流和高空的西南急流提供了充足的水汽和能量输送。强涡度柱与强散度区、强上升运动与饱和气柱的互耦, 是大暴雨产生的重要机制。强冷空气与强暖湿空气在切变线附近长时间对峙, 使大降水持续。这些是形成这次华北地区秋季大暴雨的重要原因。

关键词: 秋季 大暴雨 天气分析 数值模拟

Numerical Simulation and Analysis of Heavy Rain in Autumn in North China

Chen Yan^{1,2} Su Hailiang¹ Shou Shaowen²

(1. Tangshan Meteorological Office, Hebei Province, 063000;
2. Nanjing University of Information Science & Technology)

Abstract: Based on meteorological observational data and mesoscale numerical model products, the physical mechanism of a heavy rain is analyzed. The analysis shows that sustaining meridional circulation at upper levels, low level warm shear line and jets, the strengthening of Southwest vortex and the obstruction from the high pressure on Japanese sea are the important reasons of the heavy rain. The main mechanisms are long-time transfer of vapor and

资助项目: 国家自然科学基金项目 40405009 及 40075009, 40205008 资助

收稿日期: 2005年4月20日; 修定稿日期: 2005年11月15日

energy by various jet streams, and the coupling among the strong vorticity column, violent convergence ascending motion and saturated air column.

Key Words: heavy rain synoptic analysis numerical simulation

引 言

2003 年 10 月 10—12 日, 华北东部环渤海地区出现狂风暴雨及强降温天气, 渤海西部沿海出现风暴潮。这次天气过程持续时间之长, 影响范围之广, 降水量、风力、降温幅度之强, 均为近 50 年历史同期罕见。降水连续且稳定, 过程降水量冀东鲁北部分站超过 200mm (见图 1), 冀鲁交界处雨量最大, 宁津站降水量最大 254mm。华北东部地区 24 小时降温幅度普遍达到 10~12℃。10 日下午开始渤海西部偏东风增大到 9 级、阵风 10~11 级, 内陆地区阵风 8 级。11 日转为偏北风, 风力 10 级、阵风 11~12 级, 海上平台测站 11 日中午最大瞬时风力达 $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。暴雨和风暴潮成灾严重, 仅风暴潮就造成河北、山东、天津直接经济损失 13.10 亿元。

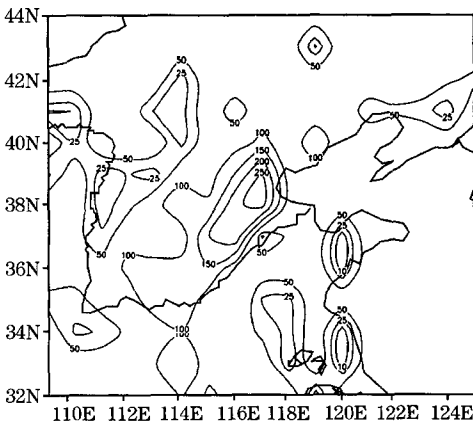


图 1 2003 年 10 月 10 日 08 时—12 日 08 时
降雨总量 (单位: mm)

华北地区的降水主要集中在盛夏, 以往

对夏季暴雨的研究较多, 对本次大暴雨过程许多人只对当地暴雨作了分析^[1-3], 而对华北地区这次秋季罕见大暴雨过程分析研究甚少。本文采用双向嵌套的非静力 MM5 模式^[4]对这次过程进行了模拟, 利用其产品和其它资料对这次大暴雨的物理成因进行初步分析, 得到了秋季暴雨的一些启示。

1 环流特征和影响系统

这次大暴雨过程是在欧亚中高纬度为稳定的经向环流, 呈两脊一槽的形势下产生的。从 10 月 7 日 08 时起, 500hPa 在 60°N、100°E 附近有冷涡形成, 10 日 08 时 (图略) 冷涡南压至贝加尔湖附近, 此时乌拉尔山阻塞高压形成, 脊前到蒙古国中部为一宽阔的低压槽, 同时, 蒙古国东部到我国东北为高压脊。贝加尔湖低涡中心强度为 5400gpm, 配合冷中心强度为 -40℃, 冷空气从冷涡底部不断南下, 华北地区处于槽前明显的西南暖湿气流中, 10 日上午开始冷暖气流交汇, 河北省出现降水天气。在这次降水过程中, 500hPa 两脊一槽环流形势相对稳定, 一直持续到 12 日 08 时, 冷暖空气在华北地区持续交汇, 为强降水天气提供了丰富的水汽和有利的环流背景。

850hPa 的低涡中心位于贝加尔湖东部, 冷空气在低涡后部东移南下, 低涡在东移过程中受日本海高压的阻挡, 低涡槽线 10 日 08 时在我国东北地区转变成东北—西南向的切变线, 冷空气在切变线后部从东北回流南下影响华北地区。由于南方暖湿气流较强, 700~850hPa 在四川盆地生成深厚而广大的西南涡, 西南倒槽从四川向东北伸展,

与东北地区的切变线在渤海湾相衔接, 11日08时西南涡中心移入河南(图略)。西南涡前部的强暖湿气流与北方强冷空气在华北南部交绥对峙, 造成华北地区这次强降水。

2 模拟试验设计

MM5 是美国宾西法尼亚大学 (PSU) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合开发的第五代中尺度气象模式。MM5 除了具有非流体静力平衡外, 在描述降水和辐射等物理过程方面更加合理周密, 大大提高了预报和模拟效果。本文采用 MM5.6 版, 模式设计的主要技术要点如下:

①采用双向嵌套网格域, 模拟区域中心位于 (38°N 、 117°E), 母域和子域是同一中心。粗、细网格的水平分辨率分别为 60 公里、20 公里, 网格点数均为 61×61 。模拟中采用了 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的地形资料, 初始资料场为 NCEP/NCAR 全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 资料。垂直方向分为不等距 26 层。初始时刻为 10 月 10 日 08 时, 积分 48 小时, 积分步长为

180s。

②物理过程采用 Grell 积云对流参数化方案及简单冰相显示水汽方案, 侧边界条件采用时变流入流出方案, 行星边界层过程用高分辨率 blackadar 参数化方案。

3 模拟结果分析

3.1 降水的模拟

图 2 是模式预报的 48 小时累积降水量分布图, 可以看出, 粗网格与细网格均较好地模拟出大范围降水走势和强降雨中心 (38°N 、 117°E) 位置, 但位于内蒙中部、江苏东部及潍坊的 3 个 50mm 的降雨中心都未能模拟出来。粗网格模拟 (图 2a) 的最大降水量为 240mm, 与降水实况 252mm 相差 12mm。细网格模拟 (图 2b) 的最大降水量为 320mm, 与降水实况 252mm 相差 68mm, 偏强太多。由以上分析可知: 粗网格模拟的降水与实况更接近, 效果远好于细网格, 以下分析如无说明均采用粗网格。

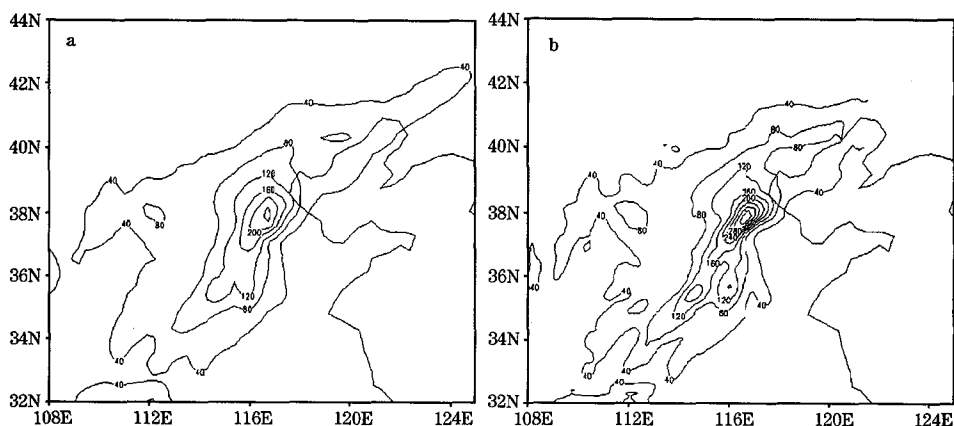


图 2 模拟的 2003 年 10 月 10 日 08 时—12 日 08 时降雨分布图 (单位: mm)

(a. 粗网格 b. 细网格)

3.2 能量场及稳定度的模拟

分析 10—12 日相当位温 θ_e 的变化^[5] (图 3), 华北环渤海地区 10—11 日处于高能量区, 说明降水前期、初期能量积累充分, 为强降水和大风的发生奠定了能量基础。10 日 14 时 (图 3a) 在 39°N 以北有等 θ_e 线密集区即锋区, 10 日 23 时 (图 3b) 能

量锋区前沿到达 38°N 即大暴雨区, 随着冷空气向南推进, 等 θ_e 线变得更加密集, 能量锋迅速加强, 导致 10 日夜间降水强度加大, 风力加强; 11 日 20 时 (图 3c) 能量锋区缓慢推移到 37°N, 随着能量的释放, 锋区逐渐减弱; 12 日 08 时 (图 3d) 能量锋区前沿到达 36°N, 冷锋移出华北地区, 降水逐渐减小。

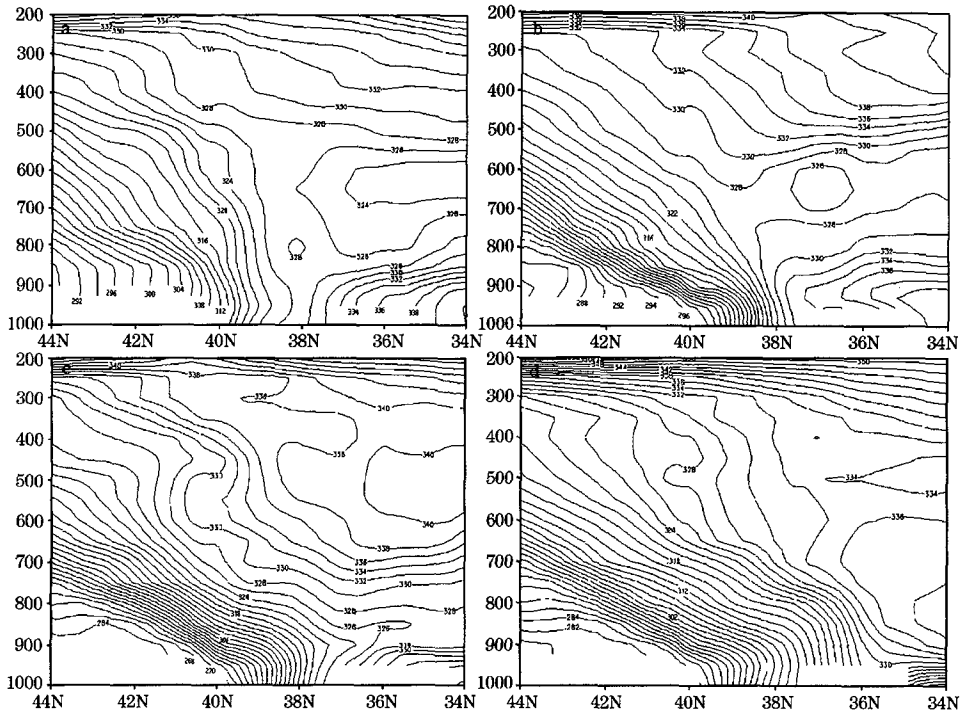


图 3 模拟的 2003 年 10 月 10—12 日 θ_e 场沿 117°E 垂直剖面图 (单位: K)
a. 10 日 14 时; b. 10 日 23 时; c. 11 日 20 时; d. 12 日 08 时

通过分析还发现, 10 日 14 时 38°N 以南山东地区上空到 600hPa 附近为不稳定层结大气 ($\partial \theta_e / \partial p > 0$)^[6], 造成山东地区对流性降水, 而 38°N 以北的河北等地始终是稳定性降水; 10 日 23 时能量锋区到达 38°N 即大暴雨区, 与南部 θ_e 大值区即暖区对峙, 大暴雨区上空不稳定能量急剧加大, 导致 10 日夜间降水强度加大; 随着不稳定能量的释放, 11 日 08 时 (图略) 山东上空大气

稳定度变为中性 ($\partial \theta_e / \partial p \approx 0$), 降水也逐渐转为稳定性降水; 11 日夜间强冷空气入侵山东, 大气中能量急剧下降, 稳定度猛升, 12 日 08 时变为强烈稳定大气 ($\partial \theta_e / \partial p < 0$)。

以上分析可知降水前期、初期能量积累充分, 为强降水和大风的发生提供了能量基础; 38°N 以北的河北等地始终是稳定性降水, 而山东地区由对流性降水逐渐转为稳定

性降水。

3.3 风场的模拟

图4是模拟的850hPa风场结果。由图4a可见,10日20时在辽宁经渤海至河北南部有一条切变线,在华南有一支西南风急流直达30°N,30°N以北的华东沿海有一支东南风急流,在切变线北侧有一支偏东风中尺度急流,三支急流汇合区与暴雨区相对应(见图1)。西南急流携带孟加拉湾水汽,东南急流携带东海水汽,偏东急流携带渤海的大量水汽,源源不断地向华北输送;三支急流在低空形成强的风向辐合,使来自不同方向的大量水汽汇聚于华北地区,大大促进了上升运动和水汽的向上输送,为暴雨的形成

提供了有利的水汽条件,使10日夜间降水增强。11日8时(图4b)四川到河北有倒槽,在河南一带有低涡中心,与实况接近。低涡南部大尺度西南风急流加强,东移北上到辽东半岛;切变线北侧中尺度偏东急流也明显加强,降水在10日20时—11日8时这个时段增至最强。可见,低涡中心、切变线及其两侧的大尺度、中尺度急流与暴雨关系密切。

模拟的700hPa风场10日08时在云贵高原东部有一支西南风急流,携来自孟加拉湾的丰沛水汽,10日20时东移北伸到了渤海(图4c),11日8时直达到辽东半岛。急流的移动与华北强降水中心和雨带的分布基本一致。

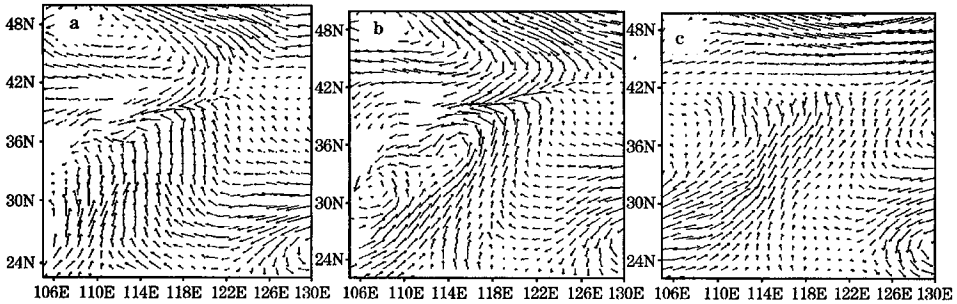


图4 粗网格模拟的2003年10月10—11日高低空风场
a. 10日20时850hPa; b. 11日08时850hPa; c. 10日20时700hPa

从水汽通量场和相当位温 θ_e 场(图略)的分布看,850hPa、700hPa的急流与本层水汽通量大值轴、能量大值轴对应较好。从10日20时到11日08时,由云贵高原伸向华北的高能舌向东北方向发展,暴雨区上空维持 $\geq 322\text{K}$ 的相对高能区。700hPa的西南急流与850hPa上三支急流相互叠加,向暴雨区源源不断地输送了大量的水汽和能量,使暴雨得以维持和发展。

200hPa风场10日08时南亚高压的中心位于20°N的海上,其北侧西风急流在36°N附近,10日20时(图略)南亚高压

增强,脊线北抬,对应高空西风急流加强并北抬东移到39°N附近,急流轴转为西南—东北向,急流轴上有两个急流中心:一个位于青海东部,另一个在东北地区。暴雨区位于东北高空急流中心的右后方,低空700hPa和850hPa急流的左前方。华北南部地区为明显的反气旋辐散流场,具备了产生大暴雨天气的高层动力条件^[6]。高、低空急流的耦合作用,形成有利的高层辐散、低层辐合动力场,产生深厚、强烈的上升运动,为大暴雨提供了重要的动力条件。

3.4 物理量场的模拟

3.4.1 强散度区和强涡度区的耦合发展

在整个降水过程中降水区高低层的散度

场一直存在良好的配置，750hPa 以下为强辐合区，中心在 117°E 附近，与大暴雨中心对应，强度小于 $-14 \times 10^{-5} s^{-1}$ (图 5a)。

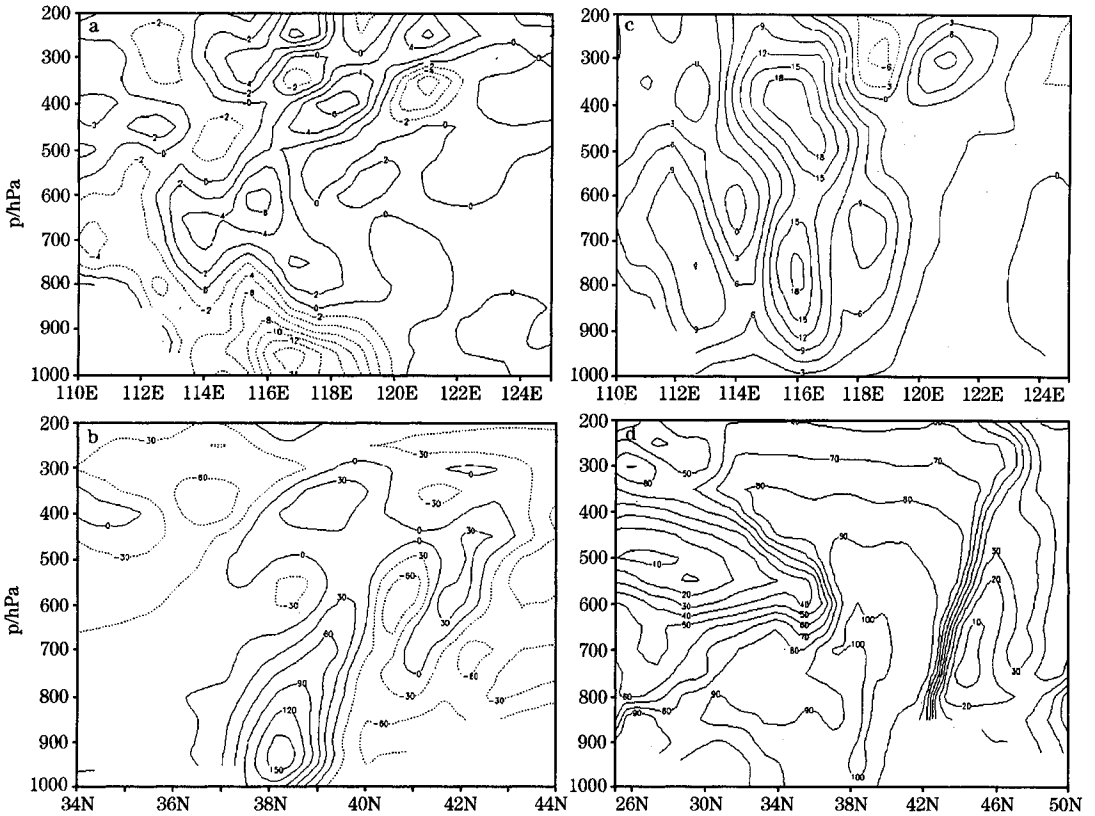


图 5 模拟的 2003 年 10 月 10 日 20 时物理量场垂直剖面图

a. 沿 38°N 散度剖面图 (单位: $10^{-5} s^{-1}$); b. 沿 116.5°E 涡度剖面图 (单位: $10^{-5} s^{-1}$); c. 沿 38°N 垂直速度剖面图 (单位: $cm \cdot s^{-1}$); d. 沿 116.5°E 相对湿度剖面图 (单位: %)

在 400hPa 以上为强辐散区，辐散中心在 250hPa 附近，强度为 $8 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，与低层强辐合区对应的 400hPa 以上为强辐散区，中心强度高达 $8 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。高层辐散、低层辐合这种有利配置使 10 日夜间的上升运动加强，降水强度加大。

由图 5b 可见，36~39°N 之间的华北中南部地区 600hPa 以下为强的正涡柱，中心值 $150 \times 10^{-6} s^{-1}$ ，300hPa 以上是明显的负

涡度区，形成上负下正的涡度配置。在涡度方程的动力约束下，强涡度柱与强散度区互耦，这种耦合发展结构是强垂直上升运动和大暴雨产生和持续的重要动力机制。

3.4.2 强上升运动与饱和气柱的耦合作用

10 日 8 时—11 日 20 时华北中南部地区 500hPa 以下一直处于上升运动区，其中以 10 日 20 时上升运动最强 (图 5c)。在 114~118°E 范围内，从地面一直到 200hPa 均

为上升气流，最大上升速度在 300hPa 与 800hPa 之间，达 $18\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，位于 38°N 附近，与大暴雨中心的位置基本一致。如此深厚、强烈的大范围上升运动是在高空西风急流南侧的上升区与低空急流北侧的上升区相重叠，即在动力场的耦合作用下产生的，是造成本次秋季大暴雨的直接动力条件。

10 日 8 时—12 日 8 时华北中南部地区 500hPa 以下相对湿度始终超过 90%，10 日 20 时（图 5d）在暴雨区上空到 600hPa 有一饱和气柱，如此深厚饱和气柱与强上升运动互耦，才造成华北中南部地区这场罕见的大暴雨。

4 结 论

(1) 华北地区这次秋季罕见的大暴雨天气是在欧亚中高纬度为稳定的经向环流背景下，受低空暖切变线和低空急流直接影响产生的，同时西南涡的加强和日本海高压的阻挡对大暴雨天气的产生和维持也起到重要作用。

(2) 双向嵌套的非静力 MM5 模式模拟结果表明：粗网格与细网格均较好地模拟出大范围降水走势和强降雨中心位置，但粗网格模拟的降水效果远好于细网格。

(3) 降水前期、初期能量积累充分，为强降雨和大风的发生提供了能量基础； 38°N 以北的河北等地始终是稳定性降水，而山东地区由对流性降水逐渐转为稳定性降水。

(4) 850hPa 上西南风急流、东南风急流、偏东风急流这三支急流以及 700hPa 的西南急流与本层水汽通量大值轴、能量大值轴对应较好。700hPa 急流与 850hPa 上三支急流相互叠加，向暴雨区源源不断地输送了大量的水汽和能量，使暴雨得以维持和发展。暴雨产生在低空急流的左前方、高空急流的右后方。高、低空急流的耦合作用，形成有利的高层辐散、低层辐合动力场，产生深厚、强烈的上升运动，为大暴雨和大风提供了重要的动力条件。

(5) 强涡度柱与强散度区、强上升运动与饱和气柱的互耦，是大暴雨产生和持续的重要机制。

参考文献

- 1 陈艳，寿绍文，宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用 [J]. 气象, 2005, 31 (10): 56-60.
- 2 王淑云，寿绍文，刘艳钊. 2003 年 10 月河北省沧州秋季暴雨成因分析 [J]. 气象, 2005, 31 (4): 69-72.
- 3 郭立平. 一次罕见秋季暴雨天气分析 [J]. 河北气象, 2004, 23 (2): 18-22.
- 4 Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R., A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale model (MM5) [R]. NCAR Technical Note, 1994, NCAR/TN-398+STR, 138.
- 5 杨克明，张守峰，张建忠等. “0185”上海特大暴雨成因分析 [J]. 气象, 30 (3): 25-30.
- 6 寿绍文，励申申等. 中尺度气象学 [M]. 北京：气象出版社，2003：141-150.