

# 山东一次春季暴雨过程的水汽收支和降水转化数值分析

龚佃利 王庆 刘诗军

山东省气象科学研究所, 济南 250031

**摘要** 利用中尺度数值模式(MM5 v3.5)对2003年4月17~18日山东春季大暴雨过程进行了数值模拟。在较为准确的模拟基础上,分析了该暴雨过程的形势演变和水汽条件,计算了暴雨发生过程中山东省范围水汽输送、水汽收支和空中各相态水物质的量值大小及其转化关系。初步揭示了具体降水天气系统中的水循环过程和云水资源转化特征。

**关键词** 数值模拟 水汽收支 云水资源 暴雨

**文章编号** 1006-9585 (2006) 01-0109-10 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## The Numerical Analysis About Water Vapor Budget and Transform During a Spring Heavy Rain Process in Shandong Region

GONG Dian-Li, WANG Qing, and LIU Shi-Jun

Shandong Meteorology Institute, Jinan 250031

**Abstract** By using non-hydrostatic model MM5 v3.5, a heavy rain occurred on 17 April 2003 in Shandong province was investigated. The evolutionary process, development mechanism and the water vapor condition of this case were analyzed. The amount of import, export and income of the water vapor in Shandong region were calculated, the content of various state of water and the transform relations among them in cloud were analyzed. The results are helpful for explaining the characteristics of the water vapor cycle in a rainfall process.

**Key words** numerical simulation, water vapor cycle, water vapor resource, heavy rain

## 1 引言

大气水汽收支和水分循环在全球水分、能量和地球化学物质的迁移、转换过程中发挥着重要作用,是全球地气系统水循环的重要部分,包含着云辐射作用、陆面水文过程、旱涝气候异常等许多科学问题,一直是气候研究的重点。许多旨在进一步认识大气-陆地-海洋水分和热量交换及循

环过程的国际合作试验计划,如全球能量与水循环试验计划(GEWEX, 1989~2005年)、地球前沿研究系统计划(FRONTIER, 1999~2008年)等都是围绕上述问题实施的<sup>[1]</sup>。我国在大气水分循环方面开展了大量的研究,淮河流域能量与水分循环试验和研究(HUBEX, 1997~2001年)、中日合作“青藏高原能量水分循环试验”是GEWEX计划之亚洲季风试验(GAME)的重要部分,该试验已对江淮梅雨锋云系多尺度特征及

**收稿日期** 2004-06-15收到, 2005-02-01收到修定稿

**资助项目** 山东省科技攻关项目“中尺度模式业务系统及高性能计算环境应用研究”和山东省气象局2004年重点课题“人工增雨飞机空中积冰预报方法研究与应用”

**作者简介** 龚佃利,男,1969年出生,高级工程师,主要从事中尺度数值模拟和人工影响天气技术研究。E-mail: gdlj@sohu.com

其与东亚季风的关系有了许多新的认识<sup>[2, 3]</sup>。丁一汇等<sup>[4]</sup>、胡国权等<sup>[5]</sup>也分别对 1998、1991 年我国江淮等地持续暴雨期的水汽收支、循环特征进行了定量计算和分析。随着全球水资源的紧张和生态环境的恶化, 研究区域大气水分的收支循环规律, 对于准确把握区域气候状况和演变趋势、提高对灾害性天气物理成因的认识、开发利用空中云水资源具有重要意义。对多年高空观测和 NCEP 再分析资料的诊断分析表明<sup>[6~8]</sup>, 山东常年为水汽净散失区, 只有全省日平均雨量超过 16 mm 时, 才可出现净水汽输入, 这也是决定山东“十年九旱”气候特征的客观原因。但就一次具体的降水过程而言, 山东地区降水云系的水汽如何收支演变和各相态水物质转化关系等问题需待进一步揭示。本文以 2003 年 4 月 17~18 日山东春季大范围暴雨过程为例, 利用 PSU/NCAR 中尺度数值模式 (MM5 v3.5), 在成功模拟了整个暴雨演变过程的基础上, 对上述问题进行了定量分析, 以期对具体降水天气系统的水汽收支和降水转化规律有新的认识。

## 2 暴雨过程天气分析

### 2.1 过程概述

2003 年 4 月 17~18 日, 受西南暖湿气流和冷空气的共同影响, 山东出现了一次大范围春季大暴雨过程, 全省过程平均降水量 45.9 mm。47 个站出现暴雨, 其中 6 个站出现大暴雨, 泰山站过程降雨量最大, 为 145 mm。

### 2.2 天气形势和雷达回波分析

图 1 是由 NCEP 再分析资料 (每天 4 次, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ) 绘制的 2003 年 4 月 16 日 1200 UTC 500、850 hPa 天气形势。由图 1a 可见, 西太平洋副热带高压异常偏北, 我国长江、黄河下游地区为暖脊控制, 山东处于地面高压后部, 地面气温较高, 16 日 0600 UTC 山东部分地区气温达到  $32^\circ\text{C}$ 。同时, 南支槽发展, 河套地区有低涡系统生成, 850 hPa 图上自两广到东北地区为一致的西南气流; 中纬度地区锋区明显, 其南界抵达华北北部, 冷暖气流主要在东北中部到河套北部一带交汇, 但由于湿度条件较差, 并无降水出现。17 日 0000 UTC, 低层冷暖气流辐合区

南移到天津及河北中部地区, 山东南部出现风速辐合, 湿度急剧增加, 同时地面倒槽从西南地区延伸到山东, 为本次暴雨过程的发展提供了有利的动力抬升和水汽输送条件。

分析雷达回波和逐时降水的演变, 可将本次过程分为两个阶段。图 2a 给出了 4 月 17 日 0330 UTC 时滨州雷达 (CINRAD/CS) 观测的造成第一阶段降水的弧状对流云带回波强度。该云带自鲁西南地区向鲁北方向移动, 中心回波强度大于 50 dBZ, 致使济南 0400 UTC 降水强度达到  $12.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 并伴有短时雷雨大风, 表现为较强的对流降水性质。第二阶段强降水开始于 17 日傍晚, 是第一阶段降水减弱后, 其西侧的对流单体再度发展形成的。1206 UTC 时 (图 2b), 回波中心强度大于 45 dBZ, 与第一阶段对流云带不同, 强回波带呈东北—西南走向, 系由向北移动的西南气流与南下的偏北气流辐合造成的, 其东南侧为西南气流, 西北侧为东北气流。此后, 随着该冷暖气流辐合带向东南、东北方向移动, 造成鲁北、鲁中、辽东半岛等地强降水。18 日上午全省降水结束。

## 3 数值模拟方案和结果分析

### 3.1 模式方案

采用双向 2 层嵌套网格, 粗网格中心点定位于 ( $36.0^\circ\text{N}$ ,  $115.9^\circ\text{E}$ ), 格点数为  $82 \times 61$ , 格距 54 km; 子域左下角位于母域的 (35, 23), 格点数为  $67 \times 55$ , 格距 18 km。采用 NCAR 的  $10'$ 、 $5'$  地形及 25 类植被资料形成模式所需的地形和下垫面数据。垂直方向  $\sigma$  坐标分 27 层, 模式层顶取 100 hPa。

以 2003 年 4 月 16 日 1200 UTC 国家气象中心 T213 中期数值预报产品为模式初始场, 并用 4 月 16 日 1200 UTC 时至 18 日 1200 UTC 的全部高空、地面观测资料对背景场进行订正, 形成模式的初边值条件。采用张弛的流入/流出侧边界条件, MRF 行星边界层参数化方案, 云辐射处理方案。2 层网格均考虑了霰和冰相过程, 选用 Reissner 霰方案; 另外, 对流参数化方案第一层网格选用 Betts-Miller 方案, 第二层网格选用 Grell 方案, 以反映次网格尺度的对流过程。模式运行时, 第 2

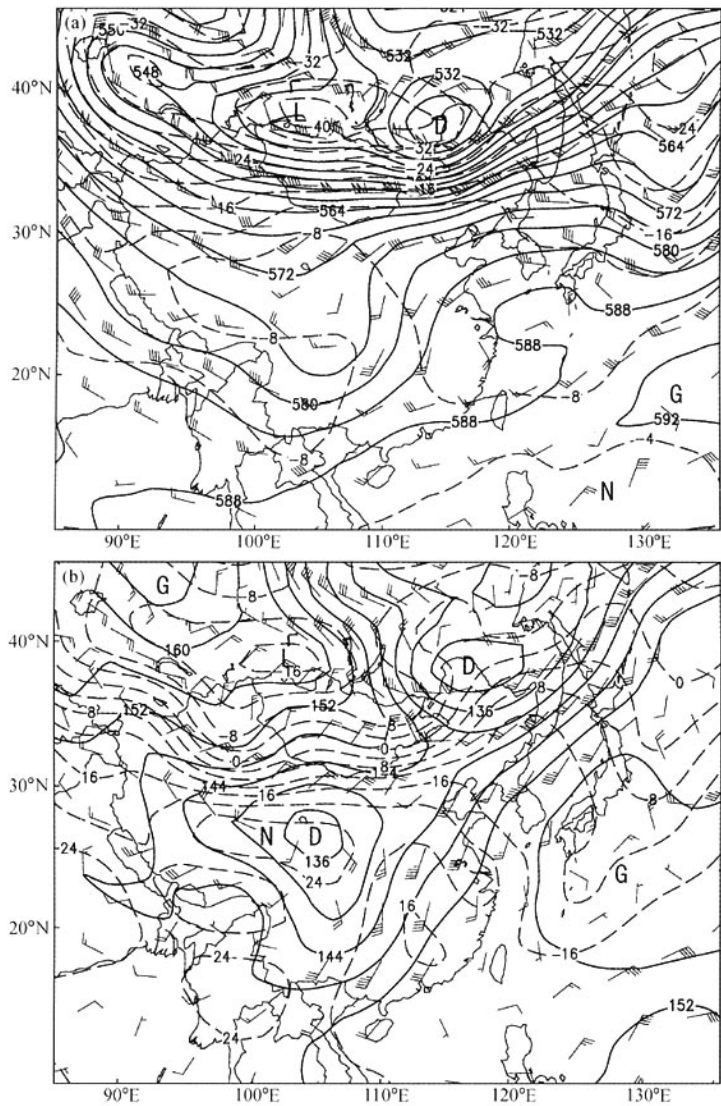


图1 2003年4月16日1200 UTC 500 hPa (a) 和850 hPa (b) 天气形势。等高线(实线)间隔4 dagpm, 等温线(虚线)间隔4℃, G、D、L、N分别表示高、低、冷、暖中心

Fig.1 The synoptic situation at 1200 UTC 16 April 2003. (a) The geopotential height (solid lines, interval: 4 dagpm), temperature (dashed lines, interval: 4℃), and winds (long barb = 4 m · s<sup>-1</sup>) at 500 hPa. The characters of G, D, L, N denote the centers of high pressure, low pressure, cold and warm; (b) Same as (a) but for 850 hPa

层网格于16日1300 UTC启动,模式积分至18日1200 UTC结束。

3.2 模拟降水与实况比较

图3给出了4月17日00时至18日00时24 h 实况雨量和模式54 km 网格区域预报的雨量分布。可见,模式准确地预报出了济南、德州、滨州、

济宁等地的暴雨落区,同时对辽东半岛、山西、淮河上游地区的大暴雨中心预报结果与实况一致。积云参数化方案产生的降水约占鲁南及江淮地区模式总降水量的50%左右(图3c),而山东大部 and 北方地区的降水主要由模式显式过程产生(图3d)。

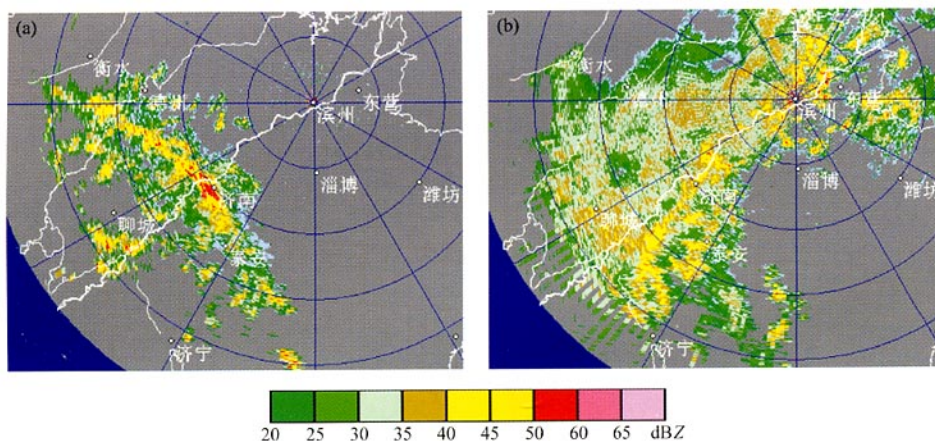


图2 滨州多普勒雷达观测两个阶段降水云系典型回波强度。(a) 0330 UTC; (b) 1206 UTC。仰角均为 $0.5^\circ$ ，每圈间距为60 km

Fig. 2 Base scan ( $0.5^\circ$  elevation angle, 300 km range) PPI display radar reflectivity from Binzhou CINRAD/SC radar at (a) 0330 UTC and (b) 1206 UTC 17 April

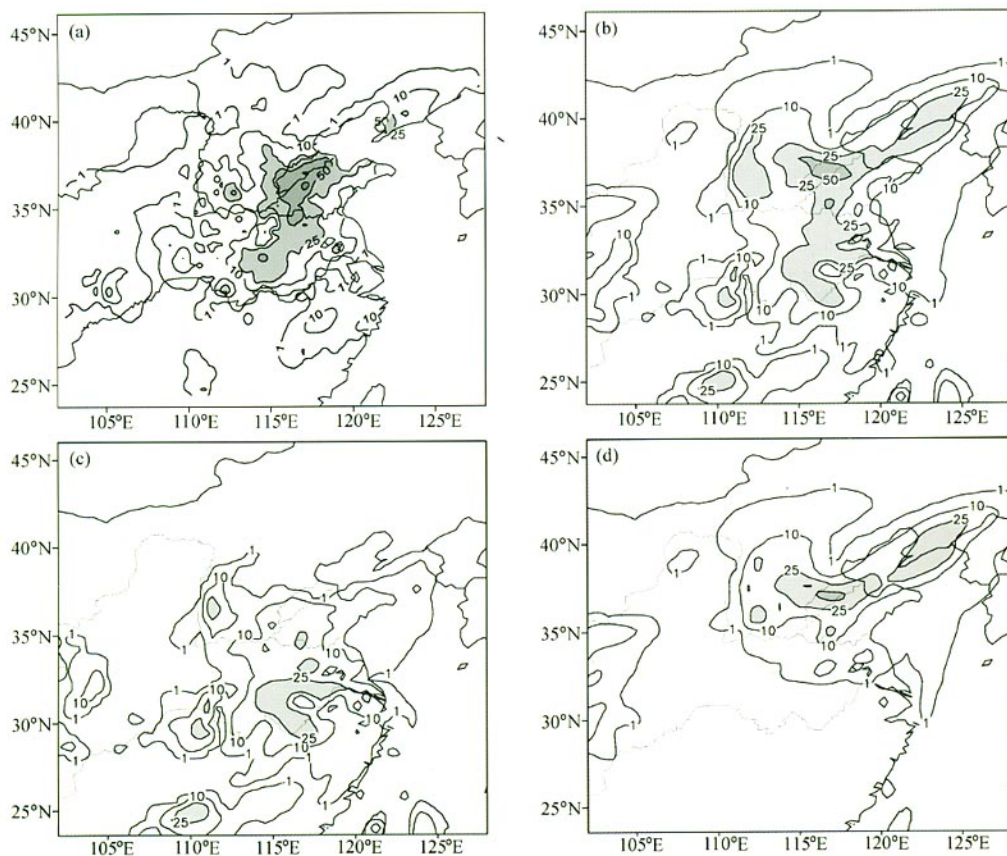


图3 4月17日0000 UTC~18日0000 UTC 24 h实况雨量 (a)、模式总降水 (b)、参数化方案 (c) 和显示方案 (d) 的降水量分布 (单位: mm)。阴影区为雨量大于25 mm区域

Fig. 3 Distribution of observed and simulation precipitation from 0000 UTC 17 April to 0000 UTC 18 April. (a) Observed, (b) simulation total precipitation, (c) simulation convective precipitation, (d) simulation explicit precipitation. units: mm, the shaded area showing the rainfall exceed 25 mm in 24 h period

### 3.3 水汽条件分析

图4给出了17日0000 UTC和0600 UTC 850 hPa水汽通量、水汽通量散度和对流有效能量(CAPE)分布。可见,两阶段降水前均有水汽通量自西南地区输向山东,且水汽输送通道所经地区CAPE中心值分别达到500、1 000  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,具有促使对流发展的潜在能量条件。但两阶段降水前水汽条件也存在差别:17日0000 UTC(图4a),山东地区低层为风速辐合区,水汽通量散度小于 $-2.0 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,结合图2a可见,第一时段降水是在西南暖湿气流中发展起来的对流性降水;而第二阶段降水开始时,鲁西和河北南部出现西南水汽流与东南、东北水汽流的切变辐合,鲁西地区出现低于 $-14 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合中心。可见,低层持续的西南暖湿气流输送和明显的冷暖气流辐合是导致第二阶段强降水的重要条件,切变辐合中心与暴雨中心具有很好的一致性。

比较图4与图3c、d可见,CAPE大值区与积云对流过程产生的降水中心对应较好,而显式过程产生的降水与冷暖气流系统性辐合相对应。可见,模式所选物理方案较好地模拟了本次暴雨的降水过程。

## 4 水汽收支及转化计算和分析

### 4.1 水汽收支计算方法

图5给出了计算山东省域范围水汽输送的边界示意图。虚线为山东实际边界,实线为计算分析边界,共有134个点组成。按双线性插值方法,将第二层区域的比湿 $q$ 、纬向风分量 $u$ 和经向风分量 $v$ 格点数据插值到各边界点上,并分别计算纬向水汽通量 $F_x$ 和经向水汽通量 $F_y$ ,计算公式为

$$F_x = \frac{1}{g} \int_{p_0}^p q u \, dp,$$

$$F_y = \frac{1}{g} \int_{p_0}^p q v \, dp,$$

式中, $p_0$ 取1 000 hPa, $p$ 取200 hPa。依据 $u$ 、 $v$ 方向,规定向东(西)的纬向水汽通量为正(负),向北(南)的经向水汽通量为正(负)。由以上公式计算边界各点整层纬向、经向水汽通量后,再进行边界积分,计算垂直于东西(南北)边界的纬向(经向)整层水汽输送通量,最后可得到流经山东的总体水汽输入、输出通量和两者的差值,即净水汽输入通量。时间积分后可得到全省范围一段时间内的累计水汽输入、输出总量和水汽净输入量。

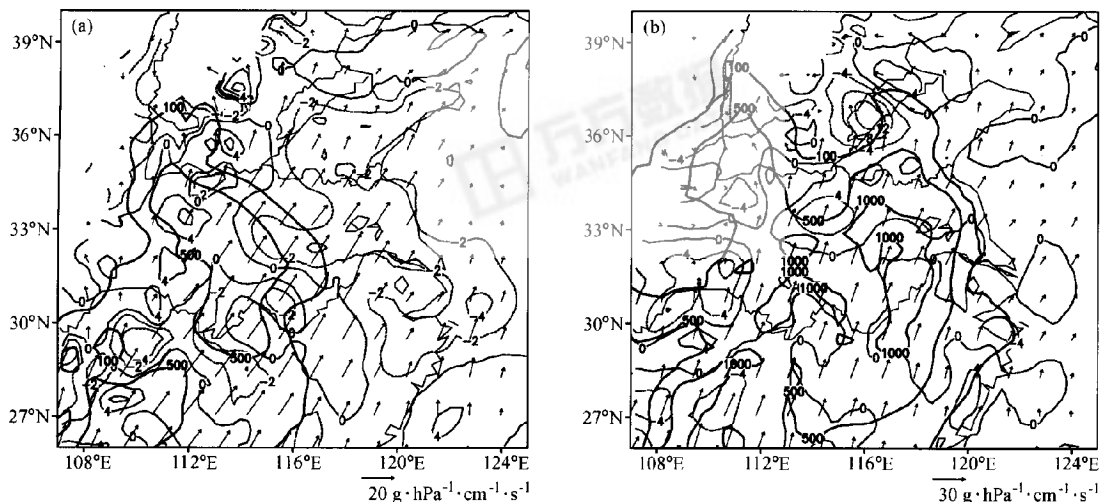


图4 4月17日0000 UTC (a)和0600 UTC (b) 850 hPa水汽通量(图中箭头)、水汽通量散度(细实(虚)线,单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和CAPE分布(粗实线,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 4 The water vapor flux (vector), divergence of water vapor flux (thin lines, units:  $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa, and convective available potential energy CAPE (thick lines, units:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) at (a) 0000 UTC and (b) 0600 UTC 17 April 2003

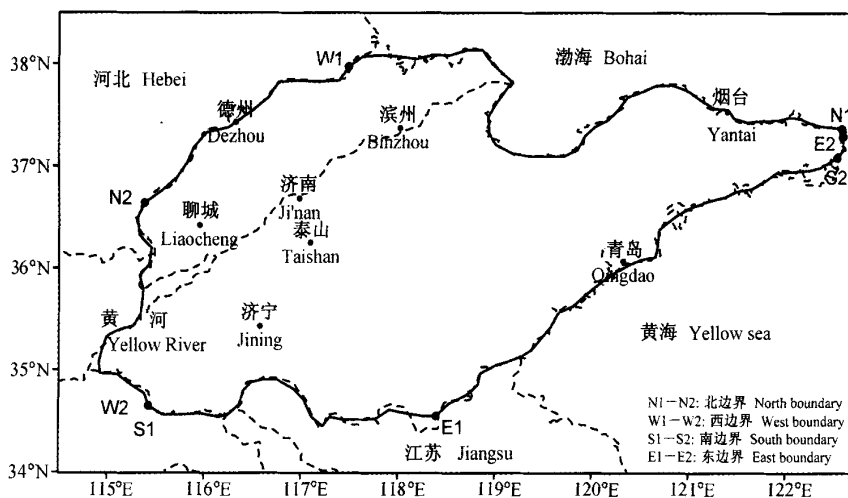


图5 山东省范围水汽输送边界示意图

Fig. 5 Depiction of boundary of water vapor transportation to Shandong province

#### 4.2 山东省域范围水汽收支量

图6给出了根据细网格(18 km)资料计算的4月16日1300 UTC~18日1200 UTC山东范围总水汽输入、输出和水汽净输入通量的逐时演变。可见,在暴雨发生前,水汽输入逐渐加强,由16日1300 UTC的 $5.22 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到17日0500 UTC的 $9.4 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,水汽输出则波动不大。水汽净输入通量在17日0200 UTC达到 $3.29 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,对应于第一阶段雷阵雨降水。此后,水汽输入通量快速增加,相应水汽输出通量和净输入通量也同步快速增长,对应于17日下午到夜间的鲁西北、鲁北大范围强降水。17日1400 UTC后,水汽输出超过水汽输入,全省出现水汽净输出。实况表明,此时鲁西北地区降水基本结束,降雨带东移到鲁中山区和半岛地区,但降水强度明显减弱。

暴雨过程的水汽收支状况,也可由垂直方向净水汽输入通量的时间-高度剖面反映(图7)。从16日1300 UTC后,950~700 hPa出现了水汽净输入,而边界层和中层水汽为弱输出;17日0200 UTC后,整层出现水汽净输入,并在强降水开始后,对流层低层出现大于 $40 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽净输入通量;17日1400 UTC后,水汽收支表现为水汽净输出。

可见,暴雨开始前,山东全省水汽表现为缓慢的净输入过程;暴雨发生时,水汽快速辐合;

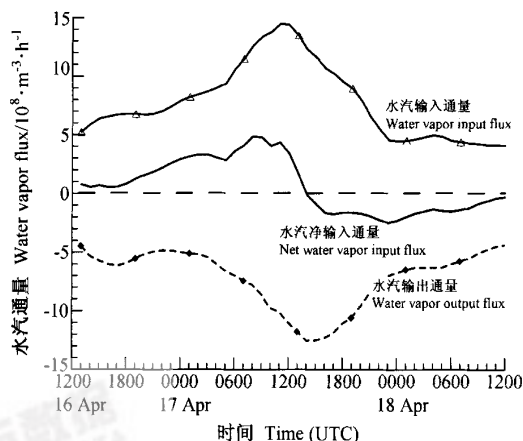


图6 山东省总水汽输入、输出和水汽净输入通量演变

Fig 6 The evolution of the input, output and net water vapor flux in the heavy rain process

而在暴雨减弱阶段,全省转为以水汽辐散为主。

#### 4.3 云中各水物质含量变化及转化特征

图8为由模式显式方案输出结果统计的山东范围各相态水物质平均含量演变。可见,17日上午时段降水云中固态(冰晶、雪、霰)水含量超过云水、雨水含量,与第一阶段的对流性降水相对应。17日午后,积分云水、过冷水和固态水含量迅速增长,相应雨水也增加,对应的是第二阶段强降水。17日1000 UTC,各相态水含量达到峰值,全省平均积分云水含量为0.877 mm,其中,过冷水占全部云水的47.95%,固态水含量

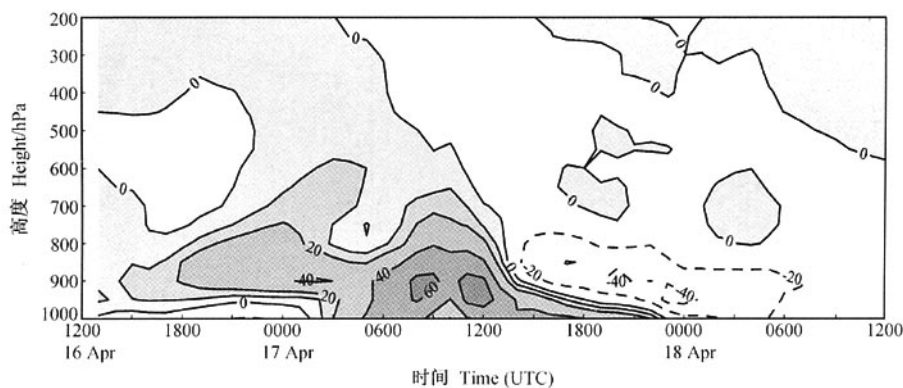


图7 垂直方向水汽净输入通量的时间-高度剖面(单位:  $10^4 \text{ kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 The time-height section of net water vapor import rate (units:  $10^4 \text{ kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in Shandong area

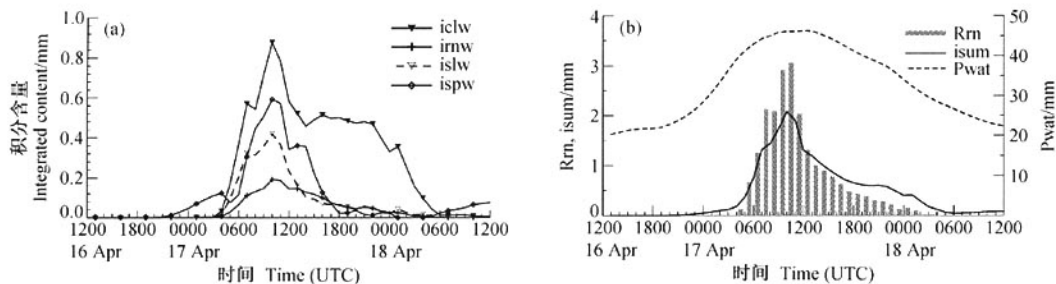


图8 山东省范围内平均积分云水 (iclw)、雨水 (irnw)、过冷水 (islw) 和固态水 (ispw) 含量 (a) 以及平均积分气态水 (pwat)、显式过程降水 (Rrn) 和云中水物质总量 (isum) 演变 (b)

Fig. 8 (a) The evolution of integrated cloud water (iclw), integrated rain water (irnw), integrated super-cooled cloud water (islw) and integrated solid state water (ispw) for Shandong province from 1200 UTC 16 April to 1200 UTC 18 April. (b) The evolution of precipitable water, simulation explicit accumulated precipitation (Rrn) and the total integrated liquid and solid state water content (isum) in the same time

丰富, 约占全部水成物的 28.5 %, 是过冷水含量的 1.41 倍。同时, 积分气态水 (图 8b) 的演变与云水的演变基本一致, 但在暴雨前早于云水开始增加, 暴雨发生时的数值约是暴雨前的 2 倍。

图 8b 给出了全部水物质总量 (isum) 和模式显式过程产生降水量 (Rrn) 的时间演变, 前者为模式计算的各时刻数值, 后者为此后 1 h 的模拟雨量。定义  $Rrn/isum$  为空中水资源更新系数, 即假设空中全部水物质完全降至地面为更新一次, 用来表明 1 h 内空中水资源的更新次数, 数值越大, 空中水资源转化为地面降水的效率越高。计算表明, 17 日 0500 UTC 至 1300 UTC 暴雨集中阶段, 更新系数均大于 1.0, 其中 05~11 时超过 1.4。可见, 在暴雨初期到强盛阶段, 由于产生暴

雨的动力条件好, 水汽输送充沛, 大气水分循环较快、空中各相态水资源的量值和降水转化效率最高; 而在降水后期, 随着水汽输送和动力辐合条件的减弱, 空中水资源的降水转化速度减小。

#### 4.4 空中云水资源分布和降水机制

云中水汽抬升后凝结为液态云水, 其中零度层以上, 常因缺少足够的冰晶数量, 仍有大量云水保持为液态, 成为过冷水。严格的云水资源应指空中的过冷却云水, 通过人工催化可望使之转化为地面降水, 从而达到开发空中水资源、增加降水的目的<sup>[9]</sup>。

图 9a~c 给出了 4 月 17 日 0700 UTC 模拟暴雨发生初期空中总水物质含量、850 hPa 水汽通量散度及此后 1 h 显式方案产生的降水量空间分布。

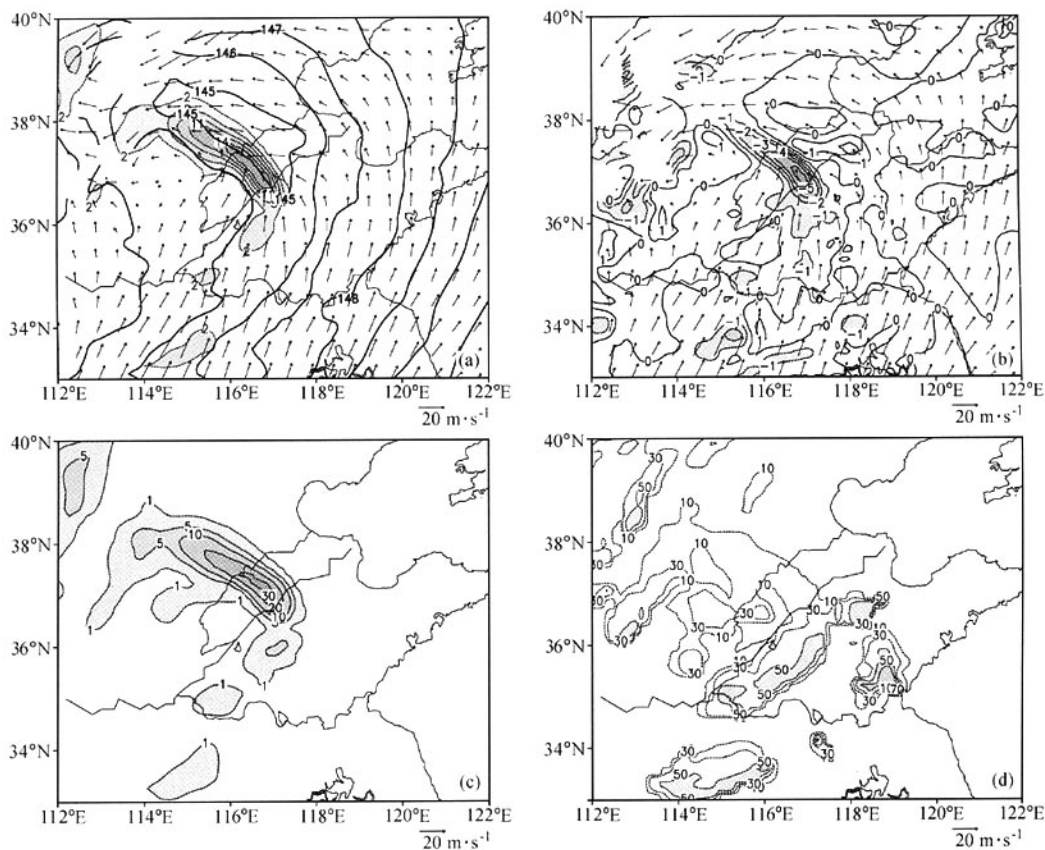


图9 4月17日0700 UTC空中整层水物质总量 (a, 虚线, 单位: mm, 阴影区数值大于2 mm)、850 hPa水汽通量散度 (b, 单位:  $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 阴影区数值小于  $-1.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、0700 UTC~0800 UTC显式方案降水 (c, 单位: mm, 阴影区数值大于1 mm) 和过冷水含量占整层水物质总量的比值 (d, 单位: %, 阴影区数值大于50%)。图a给出了850 hPa位势高度 (实线, 单位: dagpm), 图a、b给出了850 hPa风场 (箭头)

Fig. 9 The synoptic condition and the process of rainfall at 0700 UTC 17 April. (a) 850 hPa winds vector, geopotential height (solid, every 1 dagpm), Simulated total liquid and solid state water content (units: mm, shaded above 2 mm); (b) The divergence of water vapor flux (interval is  $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , shaded under  $-1.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 850 hPa winds vector; (c) Simulation explicit accumulated precipitation (units: mm, shaded above 1 mm) of 0700~0800 UTC; (d) The percentage of islw to isum (units: %, shaded above 50%)

可见, 空中总水物质含量分布与850 hPa低压系统中心和水汽辐合中心对应, 这揭示了冷暖空气辐合上升, 水汽凝结 (华) 为液 (固) 态水物质的过程。地面降水中心对应空中总水物质含量大值中心, 比较两者中心数值大小可见, 强降水中心的水资源更新系数超过1.6, 因此该区域的大气水分循环效率最高。

图9d给出的是降水系统中过冷水含量占整层水物质总量百分比的空间分布。可见, 强降水云系过冷水含量并不高, 不足30%, 而正处于发展

过程的云体过冷水含量所占的比值却较大。这表明降水云系处于发展初期时, 空中过冷水含量丰富, 而强降水出现后, 过冷水被消耗, 相对含量下降。因此, 选择宏观动力和水汽条件配合及系统处于发展初期的云层进行人工催化, 可更有效地启动降水, 进一步提高降水效率, 达到增加降水的目的。

图10进一步给出了4月17日0700 UTC风场、相当位温、比湿和云水沿117°E的经向剖面, 该图揭示了本次暴雨发生时的宏观动力、热力、

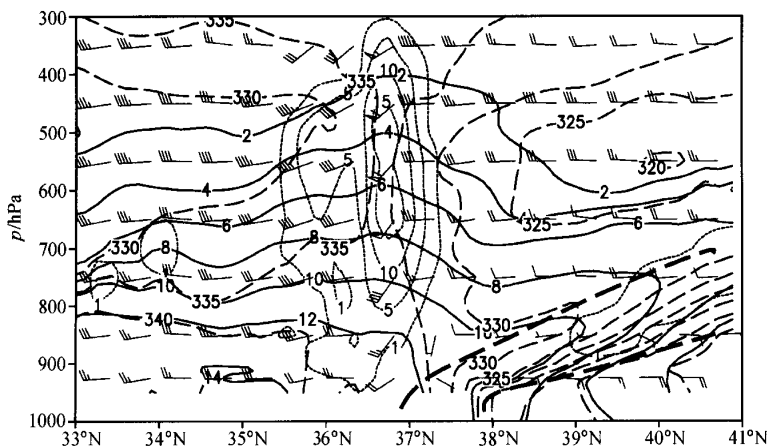


图 10 模拟的 4 月 17 日 0700 UTC 沿 117°E 相当位温 (长虚线, 单位: K)、比湿 (实线, 单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、云水比质量 (短虚线, 单位:  $10^{-4} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和风场垂直径向剖面。风场由  $v$ 、 $w$  合成,  $w$  放大 10 倍, 两条粗虚线之间为冷锋锋区

Fig. 10 Cross section of equivalent potential temperature  $\theta_e$  along 117°E (long dashed lines, interval: 5 K), specific humidity (solid lines, interval:  $2 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), cloud water mixing ratio (short dashed lines) at 0700 UTC 17 April

水汽和云水的典型配置结构。可以更清楚地看到, 低层冷暖气流在锋面附近辐合, 造成大量水汽上升转化为云水; 辐合上升造成等比湿线的凸起, 并与相当位温高值区对应。实况地面锋区前有冷锋窄雨带配合, 另外, 由于锋面抬升作用, 冷锋锋面上也有云水分布, 对应地面为冷锋宽雨带, 但降水强度明显弱于冷锋窄雨带。可见, 强的水汽输送和动力辐合是空中水汽转化为降水, 并导致暴雨产生的重要条件。

## 5 小结

(1) 根据降水实况形势演变分析, 本次暴雨过程可分为降水性质不同的两个阶段, 第一阶段降水为暖区的对流性降水, 第二阶段强降水由切变辐合造成, 充沛的水汽输送和风场辐合是暴雨产生的重要条件。

(2) 暴雨产生前, 低层大气的水汽输送和净输入有一个较长的积蓄过程, 并在强降水时段达到最强; 暴雨后期, 随着水汽辐合条件的消失, 水汽以净输出为主, 地面降水减弱。本暴雨过程反映的山东省空中水汽的输送、收支特征与相关的气候统计分析具有很好的一致性。

(3) 暴雨发展初期到强盛阶段, 水汽辐合上升形成云中各相态水物质并转化为地面降水的速度最快, 是大气水循环过程中空中云水资源转

化为地面降水最活跃阶段。水汽输送和动力辐合是实现水汽转化为空中云水资源和产生地面降水的重要条件。

## 参考文献

- [1] 张雁. 能量与水分循环—气候研究的热点. 气象, 2001, 27 (9): 9~17  
Zhang Yan. Energy and water cycle: The research focus on climatology. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, 27 (9): 9~17
- [2] 刘黎平, 楚荣忠, 宋新民, 等. GAME-TIBET 青藏高原云和降水综合观测概况及初步结果. 高原气象, 1999, 18 (3): 441~450  
Liu Liping, Chu Rongzhong, Song Xinmin, et al. Summary and preliminary results of cloud and precipitation observation in Qinghai-Xizang plateau in GAME-TIBET. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18 (3): 441~450
- [3] 刘国伟. 水文循环的大气过程. 北京: 科学出版社, 1997  
Liu Guowei. *Atmosphere Process in Hydrologic Cycle* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997
- [4] 丁一汇, 胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 2003, 61 (2): 129~145  
Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over china during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61 (2): 129~145
- [5] 胡国权, 丁一汇. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. 气象学报, 2003, 61 (2): 146~163  
Hu Guoquan, Ding Yihui. A study on the energy and water

- cycles over Changjiang-Huaihe river basins during the 1991 heavy rain periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (2): 146~163
- [6] 伊兰, 陶诗言. 东亚季风区地气系统的水平衡. 气候与环境研究, 1996, **1** (1): 63~80  
Yi Lan, Tao Shiyan. The water balance in land-atmosphere system in East Asia monsoon area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, **1** (1): 63~80
- [7] 龚佃利, 边道相. 山东省空中水汽资源的初步分析. 气候与环境研究, 2002, **7** (4): 474~482  
Gong Dianli, Bian Daoxiang. The elementary analysis about water vapor resources over Shandong region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (4): 474~482
- [8] 龚佃利, 刘诗军, 边道相. 山东省不同降水强度条件下的空中水汽资源量分析, 干旱区资源与环境, 2002, **16** (3): 57~63  
Gong Dianli, Liu Shijun, Bian Daoxiang. Analysis on water vapor resources transportation in different precipitation rate in Shandong region. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 2002, **16** (3): 57~63
- [9] 李大山. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002  
Li Dashan. *The Actuality and View of Weather Modification* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002