

台风 Wipha 云微物理特征数值模拟

杨文霞^{1,2,3}, 冉令坤¹, 洪延超¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
2. 河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021
3. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

摘要 借助非静力中尺度模式 ARPS, 利用美国国家环境预报中心(NCEP)全球逐 6h 最终分析资料(FNL)与中国气象局 MICAPS 系统地面资料和探空资料进行四维同化作为初始场和侧边界, 每 6h 利用实测雨带反插调整模式初始水汽场, 进行三重嵌套细网格模拟, 利用模式结果研究 0713 号台风 Wipha 不同阶段暴雨云微物理过程水平和垂直特征, 对了解台风暴雨不同发展阶段云结构和强降水形成机制具有科学意义。

关键词 台风; 云微物理; 特征

中图分类号 P458.1*24

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)23-0034-06

Numerical Study of the Characters of Typhoon Wipha Cloud Microphysical Processes

YANG Wenxia^{1,2,3}, RAN Lingkun¹, HONG Yanchao¹

1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. Hebei Provincial Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021, China
3. Hebei Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment, Shijiazhuang 050021, China

Abstract With the non-static mesoscale model ARPS (Advanced Regional Prediction System), by using the NCEP/NCAR global final analysis data, and the global surface and sounding data under MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System) assimilated in 4 dimensions as the initial field and lateral boundary conditions, the initial moisture field is adjusted according to the surface accumulated rain of each 6h, and the triple nested simulation is conducted to produce 3 dimensional high time-spatial resolution data including cloud microphysical process data. Then the main horizontal and vertical microphysical characters of the Typhoon (Wipha) are analysed. The results are significant for understanding the cloud structure and the precipitation forming mechanisms of the Typhoon storm. It is found that the ice phase microphysical processes are the key storm mechanisms in different periods. The melting graupel confirms that the rain is the most important mechanism. The intensity of the production of graupel varies in accordance with the Typhoon.

Keywords Typhoon; microphysics; characters

0 引言

受观测资料稀少的限制, 20 世纪中后期, 把台风涡旋近似当质点处理。随着卫星和雷达资料反演技术、资料同化技术的发展, 能构造出优质的初始场, 与先进的数值模式结合, 为台风的研究和预报打开一个崭新局面, 20 世纪 80—90 年代, 开始使用完全三维模式模拟台风非对称结构, 并逐渐走向深入^[1]。真正使用带有复杂微物理过程的、完善的中尺度模

式对飓风进行模拟始于 20 世纪 90 年代后期^[2], 较早对热带气旋进行的细致模拟大多采用轴对称暖雨过程云模式^[3-4], 现在则使用带有三相冰云微物理方案的 1.5~6km 的细网格模式进行模拟^[5]。相比大量针对中尺度对流系统的观测和数值研究, 对热带气旋云微物理过程的研究显得有些薄弱, 并且主要集中在云内微物理过程方案对台风强度^[6]、移动^[7-8]、强降水分布和内部结构的影响上。

收稿日期: 2010-10-30; 修回日期: 2010-11-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421505); 国家自然科学基金面上项目(40875032, 40875002)

作者简介: 杨文霞, 博士研究生, 研究方向为大气物理学, 电子信箱: ywx@mail.iap.ac.cn

相对于大量针对北方层状云微物理结构和微观降水机制的观测和研究^[9-13],中国关于台风、梅雨锋等强对流天气微物理过程的研究仍显不足,对台风暴雨不同阶段云结构和降水形成机制的数值模拟研究还较少见。

本文借助非静力中尺度模式 ARPS (Advanced Regional Prediction System),利用美国国家环境预报中心(NCEP)逐 6h 全球最终分析资料(FNL)与中国气象局 MICAPS 系统全球地面资料和探空资料进行四维同化作为初始场和侧边界,每 6h 利用实测雨带反插调整模式初始水汽场,进行三重嵌套细网格模拟,获取三维高时空分辨率模式结果,分析 0713 号台风 Wipha 不同阶段暴雨云微物理过程的水平和垂直特征,对了解台风暴雨不同发展阶段云结构和强降水形成机制具有科学意义。

1 模式和模拟方案

ARPS 模式是美国 Oklahoma 大学研发的非静力高分辨率区域预报系统,主要针对风暴尺度预报^[14]。ARPS 模式提供 4 种积云参数化方案和 3 种显式微物理参数化方案,显式微物理方案包括 6 种水物质,即水汽(q_v)、云水(q_c)、雨(q_r)、冰晶(q_i)、雪(q_s)和霰/雹(q_h),其中 Lin-Tao 冰相微物理方案包含复杂冰相过程,考虑了 39 项微物理过程转化,在多个微物理过程处理上最具有优势。本文根据需要,增加了 Lin-Tao 冰相微物理方案中水质粒相互转化的微物理过程产生量和潜热的输出。受计算能力限制,三层网格格距分别为 $27\text{km} \times 9\text{km} \times 5\text{km}$,第三层区域关闭积云参数化方案,仅采用了 Lin-Tao 冰相微物理显式方案,并输出云微物理过程产生量;网格区域中心为 ($31^\circ\text{N}, 120^\circ\text{E}$),垂直 31 层,垂直格距 500m。边界层参数化方案采用 Blackadar 方案;侧边界采用时间可变结合 Radiation 侧边界方案。

模拟利用 NCEP 逐 6h 全球最终分析资料与 MICAPS 系统全球地面资料和探空资料进行四维同化做为初始场和侧边界,每 6h 利用实测雨带反插调整模式初始水汽场^[15]。

2 数值模拟结果分析

2.1 台风路径与强度检验

图 1 为模拟的 0713 号台风路径和国家气象中心客观定位路径对比图,模拟的台风中心由海平面台风气压场低压中心确定,模拟的台风中心登陆地点稍偏南,但台风中心移动情况与客观定位非常接近,ARPS 模式成功地模拟出 0713 号台风的登陆与登陆后的北移。图 2 为 ARPS 模拟的海平面台风中心强度变化与实况的对比。实况资料由 ADAS 模块将 FNL 资料与 MICAPS 系统全球地面资料和探空资料进行客观同化得到,模拟的海平面台风中心强度比实况偏弱,最大时相差为 11.6hPa,发生在台风登陆前,登陆后模式与实况更接近。

2.2 台风 6h 累积降水的模拟检验

图 3 仅给出部分时次的模式 6h 累积降水量与实况资料对比,实测 6h 累积雨带是中国气象局 MICAPS 系统全球地面观测资料结果。

计算结果显示,0713 号台风登陆前,2007 年 9 月 18 日

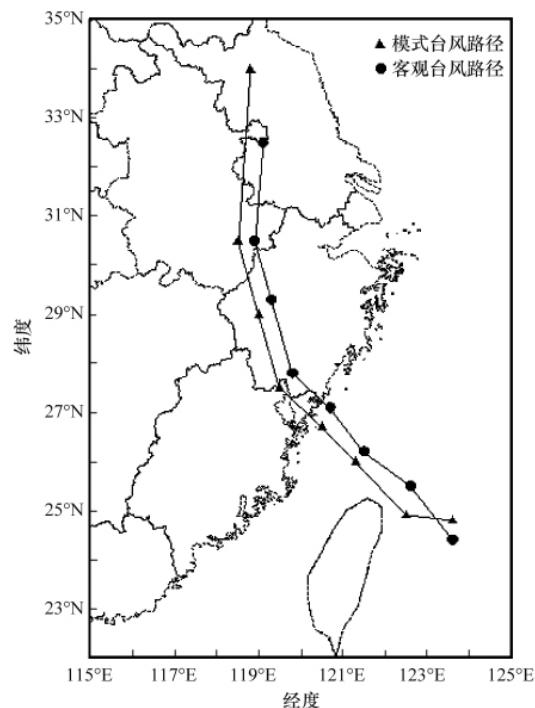


图 1 模式台风路径和国家气象中心客观定位路径
Fig. 1 Track of typhoon Wipha simulated (triangle) and observational track analysed by NMC (solid circle)

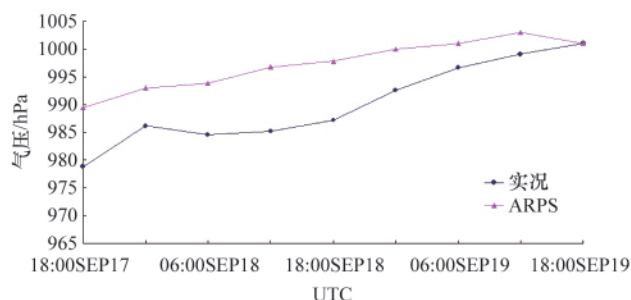


图 2 模拟的海平面台风气压中心强度和实况
Fig. 2 Center intensity variation (triangle) and observation (solid circle)

00:00—18:00UTC,雨带主要集中在江浙沿海一带,雨带中存在 2~3 个强中心,随着台风中心移近大陆,台风雨带向北延伸;台风于 2007 年 9 月 18 日 18:30UTC 在浙江沿海登陆后,台风雨带变宽,强降水中心逐渐北移,19 日 06:00UTC 图上台风眼结构清晰,受外蒙境内冷锋东移影响,19 日 18:00UTC 图上台风雨带开始向东北方向延伸。伴随台风登陆后强度迅速减弱,6h 强降水中心在 18 日 18:00UTC 迅速减弱为 40mm,之后有所加强,19 日 12:00UTC 再次加强到 70mm。ARPS 模式成功地模拟出 6h 累积雨带的范围、强度及结构,不同时段图上,模拟的台风 6h 强降水中心的强度和位置与实况比较接近,说明采用实测雨带反插调整模式初始水汽场方法提高了模拟结果的准确性,模式结果能够反映大气的基本状况和规律,可以采用 ARPS 模式结果分析台风云微物理过程和动、热力过程。

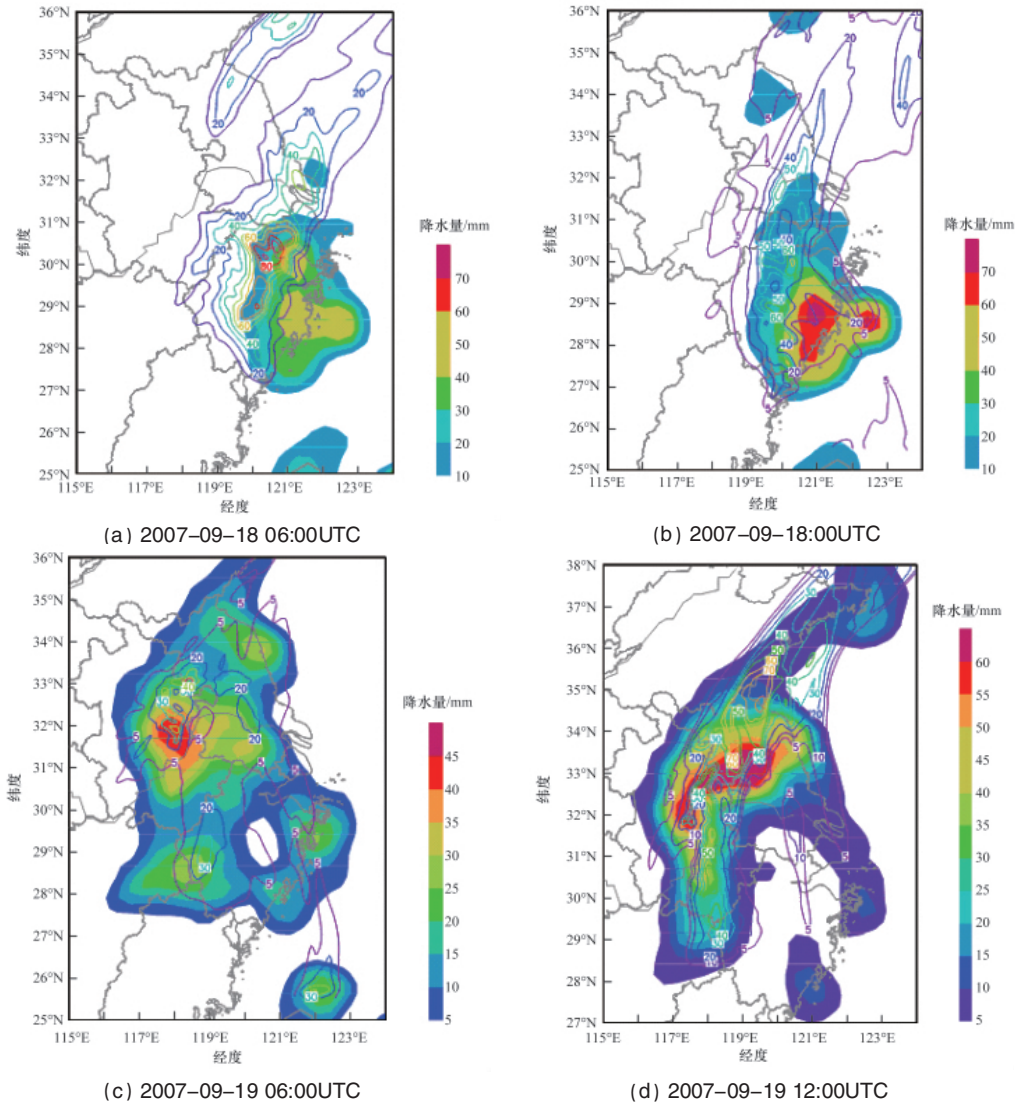


图3 模式6h累积降水量(等值线图)与实况(填色图)对比

Fig. 3 The 6h accumulated precipitation simulated by ARPS model (contour) and rainfall observed (areas filled with colors shaded)

3 云微物理过程水平特征和演变

本文计算了台风 Wipha 2007 年 9 月 18 日 00:00—19 日 18:00UTC 的云微物理过程,将 Lin-Tao 微物理方案输出的 6 种水物质的格点比含量进行垂直平均,得到水物质垂直平均值场,对每 6h 水物质垂直平均值场进行分析,研究台风不同阶段云微物理水平分布特征。图 4~图 6 给出了 2007 年 9 月 18 日 06:00UTC(登陆前 12h)、18 日 18:00UTC(登陆时)、19 日 12:00 UTC(登陆后 18h)的水物质垂直平均值水平分布,分别代表台风登陆前、登陆中、台风北移深入内陆等阶段,其他时段图略。

台风登陆前,水汽比含量垂直平均值的大值区逐渐移近浙江沿海,18 日 12:00UTC 形成一个强度为 $0.16\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的湿舌,随着台风中心向大陆架移近,湿舌向大陆深入并形成螺旋状水汽输送通道,大量水汽向北输送,台风登陆后,受台风系统动力场影响,海上水汽继续呈螺旋状向陆地输送,直到 19 日 12:00UTC,已经没有明显的海上水汽输送。

云水比含量大值区出现在台风外围与冷空气交接处以及水汽转化率大值区,前者主要是水汽遇冷后出现凝结,后者的形成与高空出现冰晶或雪有关,说明冰晶或雪落入水汽促进了云水的凝结过程。值得注意的是,在台风发展的各个阶段,雨水比含量大值区与冰相粒子转化率大值区都比较接近,说明冷云降水过程对不同阶段台风暴雨形成起关键作用。

整个台风天气过程,产生冰相粒子水平范围中,雪的区域最大,冰晶最小,冰晶和雪的极大值中心出现的部位一致。整个过程霰转化率大值区都对应雨水转化率大值区,说明霰粒子溶化形成水滴是台风暴雨的主要雨水形成机制,霰过程的强弱对降水强度影响最大。伴随台风登陆过程,霰粒子转化率迅速减弱,最大值从 $360\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速减弱为 $120\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,19 日 06:00UTC,霰粒子过程明显减弱,从 $270\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速衰减为 $50\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,台风发展的不同阶段,霰粒子产生生长过程的强弱与台风强度的变化趋势一致。

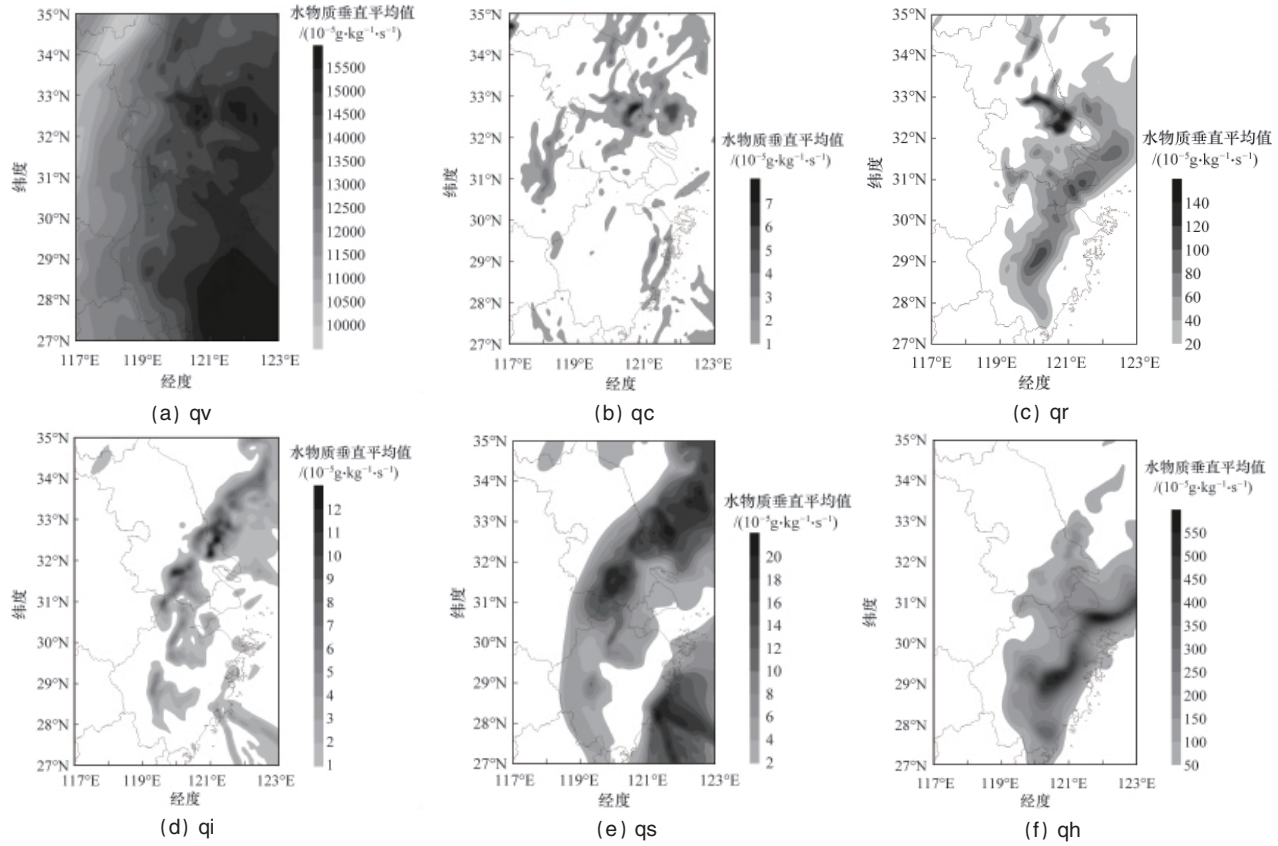


图 4 2007 年 9 月 18 日 06:00UTC 水物质垂直平均值

Fig. 4 Distribution on the vertical average of water substances at 06:00 UTC 18, Sept. 2007

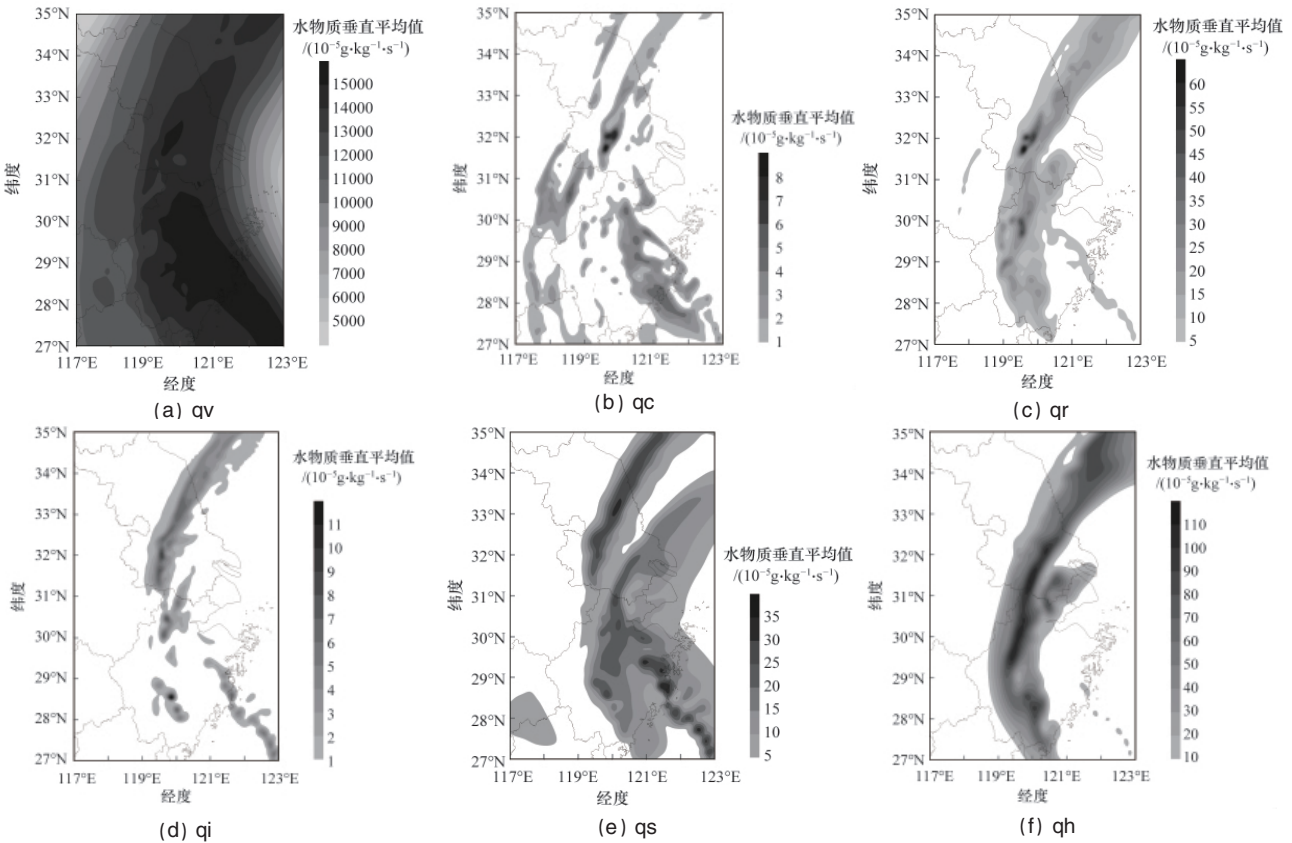


图 5 2007 年 9 月 18 日 18:00UTC 水物质垂直平均值

Fig. 5 Distribution on the vertical average of water substances at 18:00UTC 18, Sept. 2007

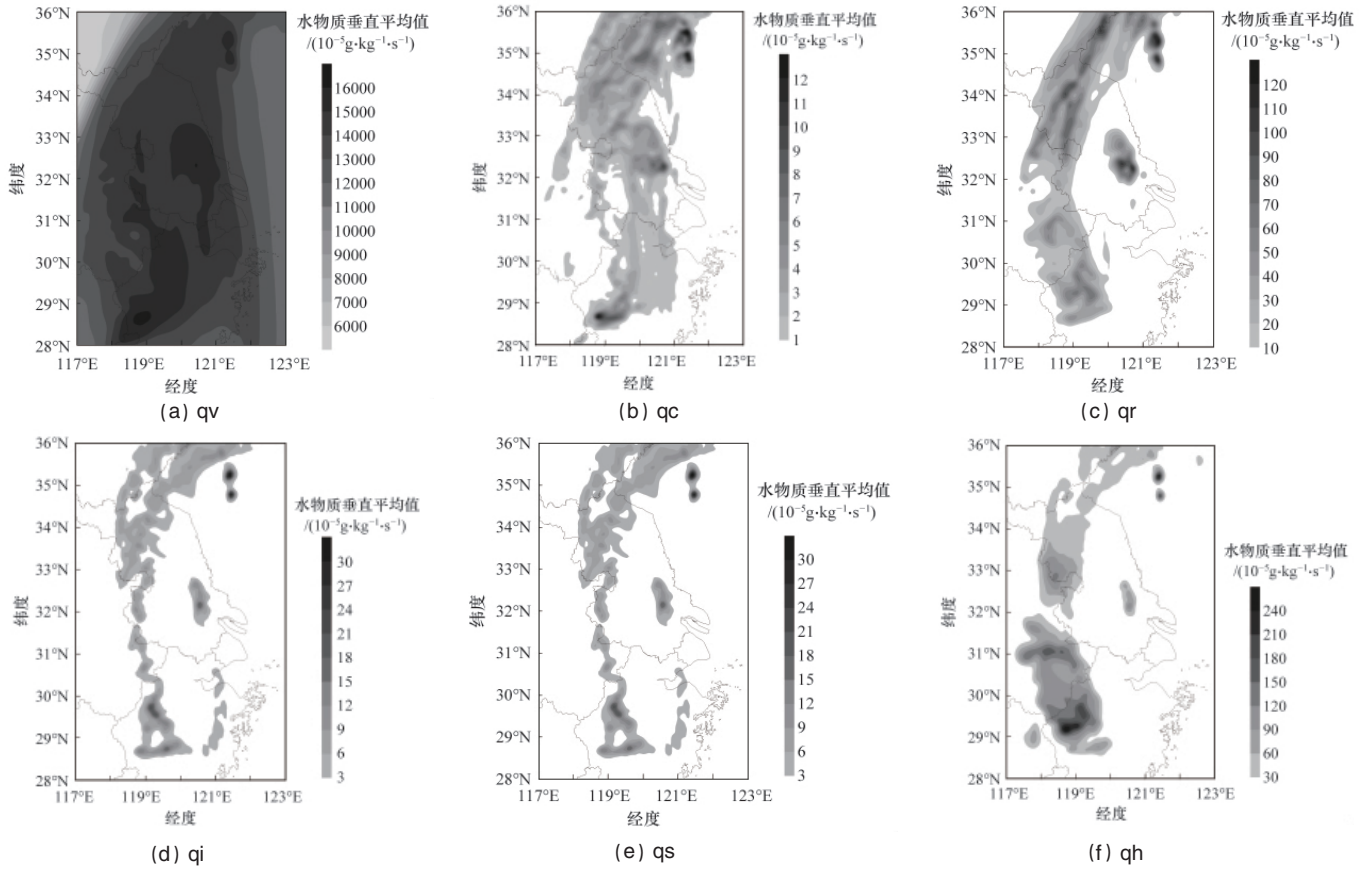


图6 2007年9月19日12:00UTC水物质垂直平均值

Fig. 6 Distribution on the vertical average of water substances at 12:00UTC 19, Sept. 2007

4 云微物理过程垂直特征与降水机制

图7为18日06UTC霰转化率大值中心(29.4°N,120.4°E)的经向剖面图,图中再现了各种水物质比含量和微物理热量转化率的垂直分布情况。

由于对流发展旺盛,云顶到达对流层顶附近,霰和雪的转化率大值中心位于对流层顶附近,冰晶转化率大值中心较低,位于10000m左右,周围出现潜热释放大值区,说明贝吉龙过程较强;云水凝结主要位于2000~4000m,云水凝结释放潜热;雨水主要由霰溶化产生,霰在5000m以下开始快速溶化,并吸收大量热量,在1000~5000m形成两个强的微物理热量转化的负大值中心。霰过程的强弱对台风各阶段降水强度的影响最大,图8给出了(29.4°N,120.4°E)点霰的主要源项微物理过程产生率随高度的垂直分布。

模式中霰的形成和增长考虑了14个微物理过程,图8显示了5种质量转化率较大的源项微物理过程,对霰产生和生长贡献最大的5种微物理过程依次为:霰收集雪干增长(dgacs),霰撞冻云滴增长(dgacw),霰收集云冰干增长(dgaci),雪撞冻云水使其成霰(psacr),冰晶接触雨水使其成霰(piacr)。霰收集雪干增长最大值出现在11000m,霰撞冻云滴增长最大值出现在8000m,霰收集云冰干增长最大值出现在10000m,雪撞冻云水使其成霰最大值出现在5500m,冰晶

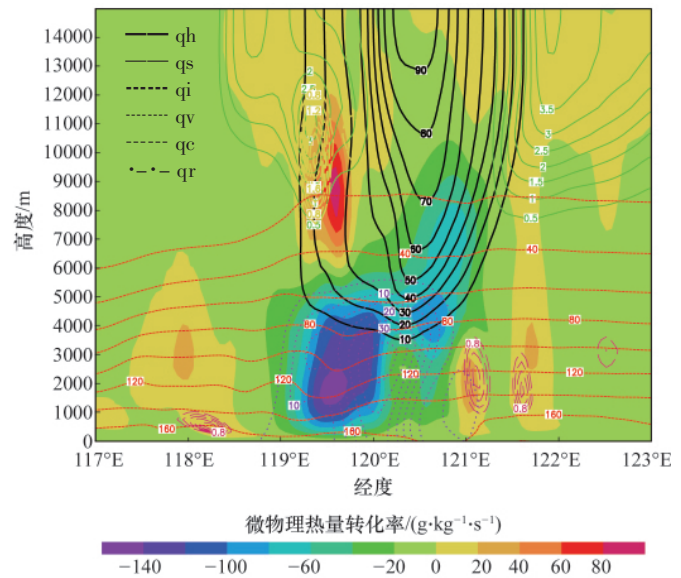


图7 2007年9月18日06:00UTC霰转化率大值中心水物质比含量和微物理热量转化率垂直分布(沿29.4°N)

Fig. 7 Distribution on the vertical-latitude cross section (along 29.0°N) of microphysical process production conversion ratios and the latent conversion ratio (the areas filled with colors) on 06:00UTC 18, Sept. 2007

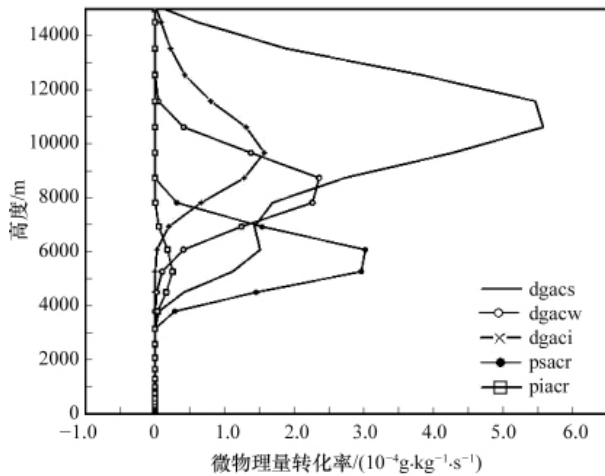


图 8 2007 年 9 月 18 日 06:00UTC 通过 (29.4°N, 120.4°E) 的霰的源项微物理量转化率的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of the source microphysical process production conversion ratios of hail through (29.0°N, 120.4°E) on 06:00UTC 18, Sept. 2007

接触雨水使其成霰最大值出现在 5000m, 霰产生和生长主要在 3000~15000m, 在 11000m 附近生长最快。

5 讨论和结论

本文借助非静力中尺度模式系统 ARPS, 取最终分析资料和全球地面资料, 加入地面雨量实测资料进行四维同化处理做为初始场和侧边界, 对 0713 号台风 Wipha 进行三重嵌套网格模拟, 利用模式结果对不同阶段台风暴雨云微物理过程的水平和垂直特征进行分析, 主要结论如下。

1) 在台风发展的各个阶段, 雨水比含量大值区与冰相粒子转化率大值区比较接近, 说明冷云降水过程对不同阶段台风暴雨形成起关键作用。产生冰相粒子的水平范围, 雪的区域最大, 冰晶的区域最小。霰转化率大值区都对应雨水转化率的大值区, 说明霰粒子溶化形成水滴是台风暴雨的主要雨水形成机制, 霰过程的强弱与台风强度的变化趋势一致。

2) 霰产生和生长贡献最大的 5 种微物理过程依次是: 霰收集雪干增长 (dgacs), 霰撞冻云滴增长 (dgacw), 霰收集云冰干增长 (dgaci), 雪撞冻云水使其成霰 (psacr), 冰晶接触雨水使其成霰 (piacr)。霰产生和生长主要在 3000~15000m, 在 11000m 附近生长最快。

3) 需要继续对模式资料进行分析处理, 选择台风不同阶段、不同位置, 采用更好更有效的方法, 深入分析台风暴雨云微物理过程特征及其与动、热力场的关系。

参考文献 (References)

[1] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 672-681.
Chen Lianshou. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 672-681.

[2] Liu Y, Zhang D L, Yau M K. A multiscale numerical study of Hurricane

Andrew (1992). I. Explicit simulation and verification [J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125: 3073-3093.

[3] Yamasaki M. A preliminary experiment of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1977, 55: 11-30.

[4] Rosenthal S L. Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat release by resolvable scales. I. Model description and preliminary results [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35: 258-271.

[5] Braun S A, Tao W K. Sensitivity of high-resolution simulations of Hurricane Bob (1991) to planetary layer parameterizations [J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128: 3941-3961.

[6] Zhu T, Zhang D L. Numerical simulation of Hurricane Bonnie (1998). II. Sensitivity to varying cloud microphysical processes [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63(1): 109-126.

[7] Fovell R G, Su H. Impact of cloud microphysics on hurricane track forecasts [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L24810, doi: 10.1029/2007GL031723.

[8] Fovell R G, Corbosiero K L, Kuo H C. Cloud microphysics impact on hurricane track as revealed in idealized experiments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 34: L24810.

[9] 洪延超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究[J]. 大气科学, 29(6): 885-896.
Hong Yanchao, Zhou Feifei. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 29(6): 885-896.

[10] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30(5): 913-926.
Hong Yanchao, Zhou Feifei. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 30(5): 913-926.

[11] 胡志晋. 层状云人工增雨机制条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 12(增刊): 10-13.
Hu Zhijin. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2001, 12(Z1): 10-13.

[12] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 425-439.
Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 31(3): 425-439.

[13] 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 84-90.
Yang Wenxia, Niu Shengjie, Wei Junguo, et al. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(1): 84-90.

[14] Xue M, Wang D, Gao J, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. *Meteor Atmos Phys*, 2003, 76: 143-165.

[15] 杨文霞, 赵利品, 邓育鹏, 等. 台风眼壁的云结构与降水形成机制分析[J]. 气象, 2010, 已录用.
Yang Wenxia, Zhao Lipin, Deng Yupeng, et al. *Meteorological Monthly*, 2010, in press.

(责任编辑 朱宇)

勘 误

2010 年 18 期“科技纵横捭阖”栏目“在创业中政府该做什么?”一文作者胡红亮身份应为: 中国科学技术信息所, 武汉大学信息管理学院博士生。特此更正, 并向读者、作者表示歉意。