

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,2011,37(6):1481-1488.

台风眼壁的云结构与降水形成机制分析^{*1}

杨文霞^{1,2} 赵利品^{1,2} 邓育鹏^{1,2} 胡向峰^{1,2}

1 河北省人工影响天气办公室,石家庄 050021

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

提 要: 使用带有详细微物理过程的 ARPS 模式,对台风韦帕(Wipha)进行三重嵌套细网格模拟,利用模式结果,对台风眼壁强降水中心的云结构和降水形成机制进行分析,结果表明:冰相微物理过程是启动和形成台风眼壁暴雨的主要降水形成机制。在 9000~14000 m 高空,云水在很低的温度下经均质核化产生冰晶,或经非均质核化形成云冰;冰晶通过凝华增长(psfi,贝吉龙过程)、雨水收集云冰产生雪(praci)和冰晶粘附雨水成雪(piacr)过程生长为雪;霰产生主要包括 4 个过程:冰晶接触雨水使其成霰(piacr)、雪撞冻云水使其成霰(psacr)、雨水收集云冰转化成霰(praci)或雨水冻结为霰(pgfr);霰粒子通过收集云冰干增长(dgaci)、霰撞冻云滴增长(dgacw)等过程生长;霰融化(pgm1t)和雪融化(psm1t)成雨水后再通过碰并云水等暖云生长过程,最后形成雨水。霰过程的强弱在雨水形成机制中很重要。(29.5°N,121.8°E)和(28.3°N,120.4°E)强降水中心冰晶转化率没有太大差别,但是(29.5°N,121.8°E)强降水中心上空冰晶通过贝吉龙过程快速成长为雪和霰,霰粒子增长过程远远强于(28.3°N,120.4°E)强降水中心,低空又有较高的云水转化率,使降水粒子在暖云中继续快速生长,冷暖云过程的有利配置使(29.5°N,121.8°E)出现较强雨水转化率。

关键词: 台风眼壁,云结构,降水机制

Study on the Cloud Structure and Precipitation Forming Mechanisms of the Storm near Typhoon Eyewall

YANG Wenxia^{1,2} ZHAO Lipin^{1,2} DENG Yupeng^{1,2} HU Xiangfeng^{1,2}

1 Hebei Provincial Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021

2 Hebei Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment, Shijiazhuang 050021

Abstract: The non-static mesoscale model ARPS (Advanced Regional Prediction System) with detailed microphysical processes is used to simulate typhoon Wipha (2007), and the data of numerical simulation are used to analyze the microphysical structures and the precipitation forming mechanisms of the storm near typhoon eyewall. It is found that the ice phase microphysical processes are the main mechanism that initiates and produces the storm rain. Ice crystals can be produced by cloud water homogeneous nucleation, or cloud ices are produced by cloud water non-homogeneous nucleation at heights 9000—14000 m. The ice grows into snow in 3 main microphysical processes (psfi, praci and piacr, which are defined in body text). The graupel is produced in 4 main microphysical processes (piacr, psacr, praci and pgfr). The graupel grows mainly in 2 main microphysical processes (dgaci and dgacw). The melting graupel and snow produce rain through accretion with cloud water in warm cloud. The production and growth microphysical processes of graupel play important roles in the precipitation forming mechanisms. There is not obvious difference of ice conversion ratios between two precipitation centers at (29.5°N, 121.8°E) and (28.3°N, 120.4°E). But the ice grows more quickly into snow and graupel in terms of Bergeron process at (29.5°N, 121.8°E) than at (28.3°N, 120.4°E). Then the precipitation particle can grow more quickly at (29.5°N, 121.8°E) than at (28.3°N, 120.4°E) due to higher cloud water conversion ratios at low altitudes. There

* 国家重点基础研究发展计划(2009CB421505)和河北省气象局科研项目(11ky23)共同资助

2011 年 3 月 26 日收稿; 2011 年 5 月 22 日收修定稿

第一作者: 杨文霞, 主要从事云和降水学研究. Email: ywx@mail. iap. ac. cn

fore the rain conversion ratios are higher at (29.5°N, 121.8°E) due to better configuration of cloud and warm cloud processes.

Key words: typhoon eyewall, cloud structure, precipitation mechanism

引言

台风是具有暖心结构的强烈涡旋,台风眼壁对流发展旺盛,常常形成耸立的云壁,并出现强降水中心。Heymsfield 等^[1]对飓风 Humberto 云微物理特征进行了观测研究,研究结果表明,由于强烈的上升运动,在高空低于-35℃的温度下冰晶的均质核化过程很活跃。黄小玲^[2]使用 MM5 模式研究了 Nari(2001)台风的微物理过程,发现台风登陆前凝结及凝固潜热释放主要发生在台风眼壁的中至高层大气,冰相粒子(雪花和软雹)和雨水转化率大值区集中在台风眼壁及螺旋雨带;台风登陆后,凝结及凝固潜热释放主要发生在台风眼壁的低至中层大气,冰相粒子和雨水转化率大值区集中在台风眼壁。

在其他有关台风微物理过程和动力过程的研究中^[3-8],台风眼壁也常常被做为研究的重点区域,但是关于台风眼壁云结构和降水形成机制的研究还不是很。研究云结构和降水形成机制,对于了解台风强降水的形成,提高降水定点、定量预报具有重要意义。

本文使用带有详细微物理过程的 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式,对台风韦帕进行三重嵌套细网格模拟,利用模式结果,对台风眼壁强降水中心的云结构和降水形成机制进行分析。

1 “韦帕”登陆活动简介

0713 号热带风暴韦帕于 2007 年 9 月 16 日 00 UTC 在西北太平洋洋面上生成,生成后向西北方向移动,16 日 18 UTC 加强为台风,17 日 10 UTC 加强为强台风。17 日 18 UTC 在台湾以东洋面加强为超强台风,中心附近最大风力 16 级(55 m·s⁻¹),并逐渐向浙江沿海靠近。18 日 12 UTC 减弱为强台风并于 18 日 18:30 UTC 在浙江省苍南县霞关镇登陆,登陆时中心附近最大风力 14 级(45 m·s⁻¹)。登陆后,强度迅速减弱。18 日 21 UTC 进入福建减弱为台风,23 UTC 减弱为强热带风暴。19 日 00 UTC 进入浙江并于 03 UTC 减弱为热带风暴,“韦帕”在浙江滞留约 15 小时 30 分钟之后,先后经过安徽、江苏,于 19 日 23 UTC 时前进入黄海。“韦帕”北上穿过山东半岛东部后,在黄海北部变性为温带气旋。

2 模式、模拟方案

2.1 模式、模拟方案简介

使用 ARPS 模式进行三重嵌套模拟,模拟区域和模拟的台风移动路径如图 1 所示。三层网格格距分别为 27 km×9 km×5 km,第三层区域关闭了积云参数化方案,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°N、120°E),垂直 31 层,垂直格距 500 m。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 6 h 全球最终分析资料(FNL)与 MICAPS 系统下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 6 小时利用实测雨带反插调整模式初始水汽场。

2.2 利用实测雨带反插调整模式初始水汽场方法简介

对台风过程进行数值模拟,一般采用两种方案,一种没有人工干预,即采用 Bogus 技术,将模式起报时台风中心位置、中心气压订正到初始场^[9],Bogus 技术在一定程度上弥补了台风内部资料的缺乏。另一种方法是采用人工干预,每隔一定时间对模式初始场进行调整,以确保模拟结果与观测结果尽可能一致。

本文采用人工干预方法对台风过程进行模拟,即每 6 小时利用实测雨带反插调整模式初始水汽场。公式如下:

$$\Delta q(i, j, k) = \max\{0, q(i, j, k) + \Delta t \times [E_s(i, j, k) - q(i, j, k)] \times [0.1 + R(i, j, 1)/R_{\max} \cdot a]\} \quad (1)$$

式中 $\Delta q(i, j, k)$ 为格点人工调整过的水汽变量, Δt 为调整的时间步长, $E_s(i, j, k)$ 为模式格点饱和水汽压, $R(i, j, 1)$ 为地面雨带降水量, $R_{\max}$ 同一时间步长内最大降水量, a 为一个可以调整的系数,用来调整不同大小降水量对模式水汽场的影响程度。当模式水汽场与实测地面降水不符合时,可以通过调整系数 a , 使模式水汽变量 $\Delta q(i, j, k)$ 增加或减少,直到模式计

算结果与观测资料尽可能接近。通过 ARPS 模式的 nudg 模块,每 6 小时对模式初始水汽场进行调整。

2.3 数值模拟结果检验

经与国家气象中心客观定位路径比较,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。模式海平面台风中心强度和实况对比显示,模式海平面台风中心强度比实况稍偏弱,最大相差 11.6 hPa。模式 6 小时累积降水量与实况对比显示,ARPS 模式成功地模拟出 6 小时累积雨带的范围、强度及结构,模拟的台风 6 小时强降水中心的强度和位置与实况比较一致,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,可以用模式结果分析台风云微物理过程及动力、热力过程。详细检验过程见文献[10]。图 2 为 2007 年 9 月 19 日 00 UTC 模式 6 小时累积降水量与实况对比,围绕台风眼有两个强降水中心,东

北方向 50 mm 强降水中心位于(29.5°N、121.8°E),西南方向 70 mm 强降水中心位于(28.3°N、120.4°E)。

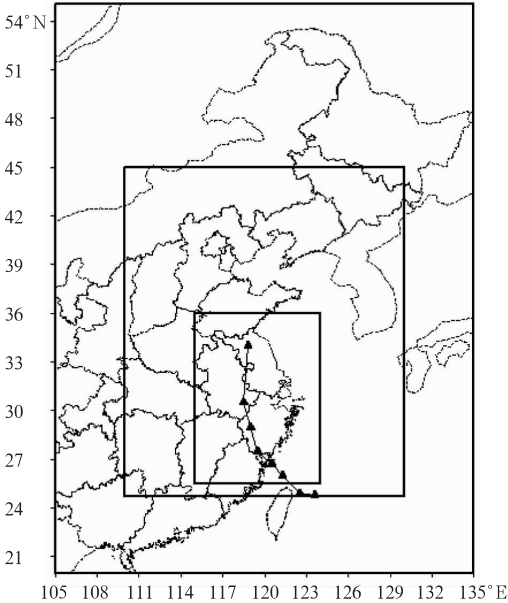


图 1 模拟区域和模拟的台风移动路径
Fig. 1 The domains and the simulated track of Wipha

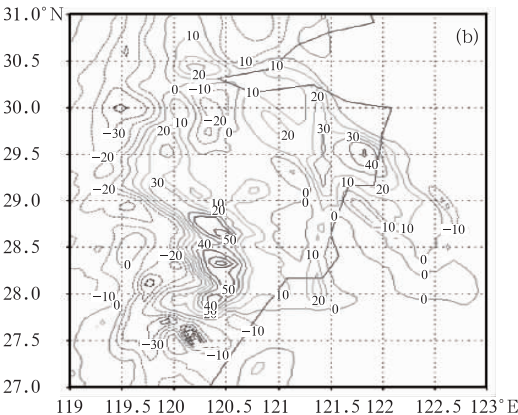
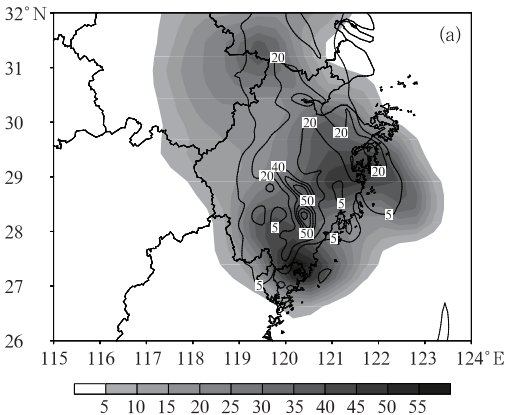


图 2 2007 年 9 月 19 日 00 UTC 模式 6 小时累积降水量与实况对比 (单位:mm)
(a)模式和观测结果对比,等值线为模式结果,阴影区为观测结果,(b)放大的台风眼附近强降水中心
Fig. 2 The 6 h accumulated precipitation simulated by ARPS model (contours) and rainfall observed (shaded area) at 00 UTC 19 September 2007 (unit: mm)

3 台风眼水物质垂直平均值水平分布

ARPS 模式 Lin-Tao 冰相微物理方案包括 6 种水物质,即水汽(qv)、云水(qc)、雨(qr)、冰晶(qi)、雪(qs)、霰/雹(qh),将 6 种水物质的格点比含量进行垂直平均(简称水物质垂直平均值),得到 2007 年 9 月 19 日 00:00 UTC 台风眼水物质垂直平均值水平分布情况(图 3)。图中可见,台风眼结构清晰,台风中心位于(27.5°N、120.5°E)。

台风眼周围水物质比含量都比较大,与 50 mm

强降水中心(29.5°N、121.8°E)对应的冰晶、雪和霰比含量均较大,云水和雨水比含量也较大,水汽含量丰富。与 70 mm 强降水中心(28.3°N、120.4°E)对应的霰和雪比含量较大,但是云水和冰晶比含量较低,云水转化率几乎为零。雨水(qr)垂直平均值水平分布显示,(29.5°N、121.8°E)点雨水比含量较大,而(28.3°N、120.4°E)点则较小。

4 台风眼热力、动力场垂直结构

沿 27.5°N 做纬向剖面,给出台风眼热力、动力

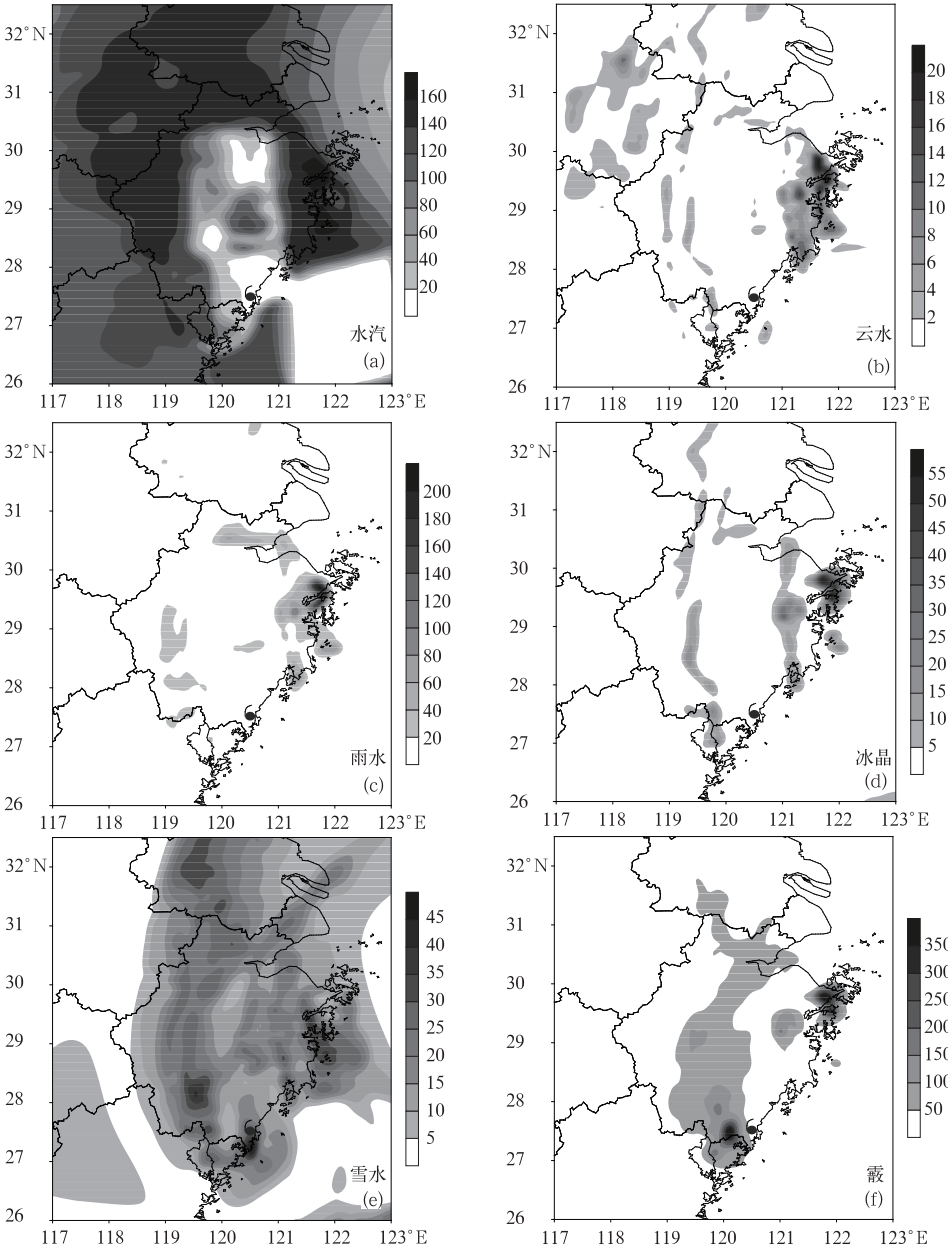


图3 2007年9月19日00 UTC水物质垂直平均值水平分布(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)~(f)分别为水汽 (qv)、云水 (qc)、雨水 (qr)、冰晶 (qi)、雪水 (qs) 和霰 (qh), 台风符号“☙”为台风中心位置

Fig.3 The distributions on the vertical average of water substance at 00 UTC 19 September 2007 (unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) qv (water vapor), (b) qc (cloud water), (c) qr (rain water), (d) qi (ice crystal), (e) qs (snow water) and (f) qh (graupel/hail)

场垂直结构(图 4)。台风眼右侧为上升气流,垂直上升速度最大达到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,左侧为下沉气流,最大达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,台风眼中为下沉气流,位温曲线显示台风眼为暖心结构。

5 台风眼壁降水机制分析

5.1 雨水形成机制

ARPS 模式考虑了 6 个雨水产生微物理过程:

云水的自动转化 (praut),雪融化 (psm1t),霰融化 (pgm1t),在云暖区中雪碰并云水转化为雨水 (qsacw)和霰碰并云水转化为雨水 (qgacw),雨水碰并云水 (pracw)增长。图 5 显示,起主要作用的有 4 个:雨水碰并云水 (pracw)增长,霰融化 (pgm1t),霰碰并云水转化为雨水 (qgacw)和雪融化 (psm1t)。

两个强降水中心主要降水机制显然不同,图 5a 中以雨水碰并云水 (pracw)为主(图 5a 中 pracw 单位比其他转化率单位大1个量级),而图5b中雨水

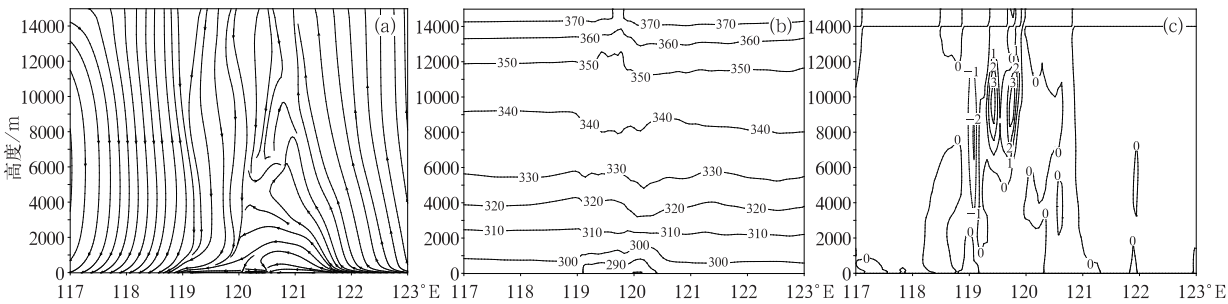


图 4 台风眼热力、动力场垂直结构(沿 27.5°N)
(a) 垂直风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 位温(单位:K), (c) 垂直上升速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 4 The height-longitude cross section (along 27.5°N) of thermodynamic and dynamic structures of the typhoon eye for (a) wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) potential temperature (unit: K), and (c) vertical velocity (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

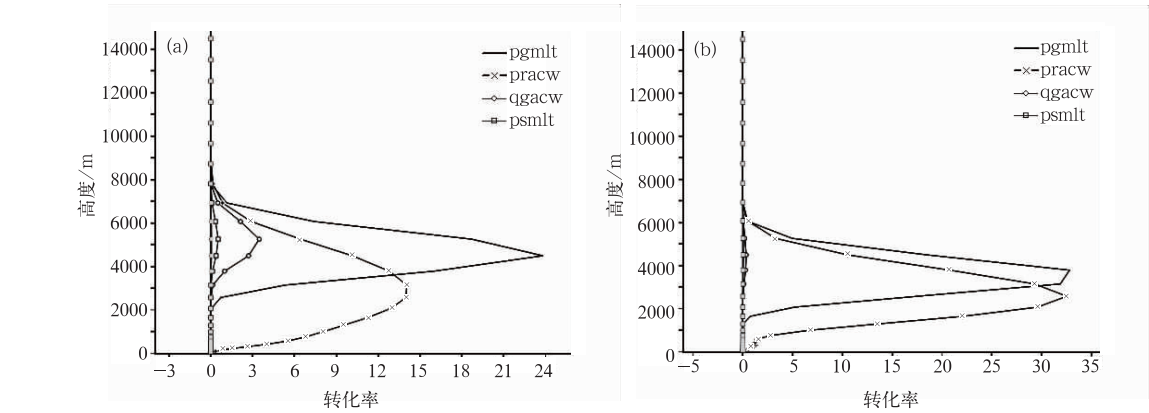


图 5 强降水中心雨水形成机制 (a)(29.5°N, 121.8°E)点结果, (b)(28.3°N, 120.4°E)点结果
图 5a 中 pracw 单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 其他微物理过程转化率单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 5 The rain water forming mechanism of two precipitation centers
(a) the result of center at (29.5°N, 121.8°E), and (b) the result of center at (28.3°N, 120.4°E)
The unit of “pracw” in (a): $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the other unit: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

碰并云水(pracw)和霰融化(pgmlt)两个过程起到相同的作用。水物质垂直平均值水平分布情况显示(图 3), (29.5°N、121.8°E)点雨水转化率很高, 高空存在冰晶和雪转化率的大值区, 一部分雪融化成雨水; 但是(28.3°N、120.4°E)点高空却位于霰的转化率大值区, 低空位于水汽和云水比含量大值区, 所以雨水产生机制以霰融化和霰融化后雨水碰并云水为主, 由于所处的高低空冷云过程和暖云过程不同, 使二者雨水形成机制不同。

4 个起主要作用的雨水形成机制中, 3 个和霰过程有关, 霰融化成雨水(pgmlt), 雨水再碰并云水(pracw), 或霰碰并云水成雨水(qgacw), 因此霰过程的强弱在雨水形成机制中很重要。

5.2 霰形成机制

数值模式中考虑了 14 个霰的形成和增长微物理过程: 冰晶接触雨水使其成霰(piacr), 雨水冻结为霰(pgfr), 雪自动转化为霰(pgaut), 雨水收集云

冰转化成霰(praci), 霰收集云冰干增长(dgaci)和湿增长(wgaci), 霰撞冻云滴增长(dgacw), 霰撞冻雨水干增长(dgacr)和湿增长(wgacr), 雪撞冻云水使其成霰(psacr), 霰收集雪增长(pgacs), 霰收集雪干增长(dgacs)和湿增长(wgacs), 雨水接触雪使其成霰(pracs)。图 6 分别给出两个强降水中心的霰形成机制, 以分析哪些微物理过程对霰/雹产生和增长过程作用较大。

图 6 显示, 冰晶接触雨水使其成霰(piacr)、雪撞冻云水使其成霰(psacr)和雨水收集云冰转化成霰(praci)和雨水冻结为霰(pgfr)是霰的主要产生过程。

霰产生后, 霰收集云冰干增长(dgaci), 其次是霰撞冻云滴增长(dgacw), 冰晶接触雨水使其成霰(piacr)和雪撞冻云水使其成霰(psacr), 是其主要生长过程, 雨水收集云冰转化成霰(praci)、霰收集雪增长(pgacs)也起到一定作用, (29.5°N、121.8°E)的霰形成过程明显高于(28.3°N、120.4°E), (28.3°N、

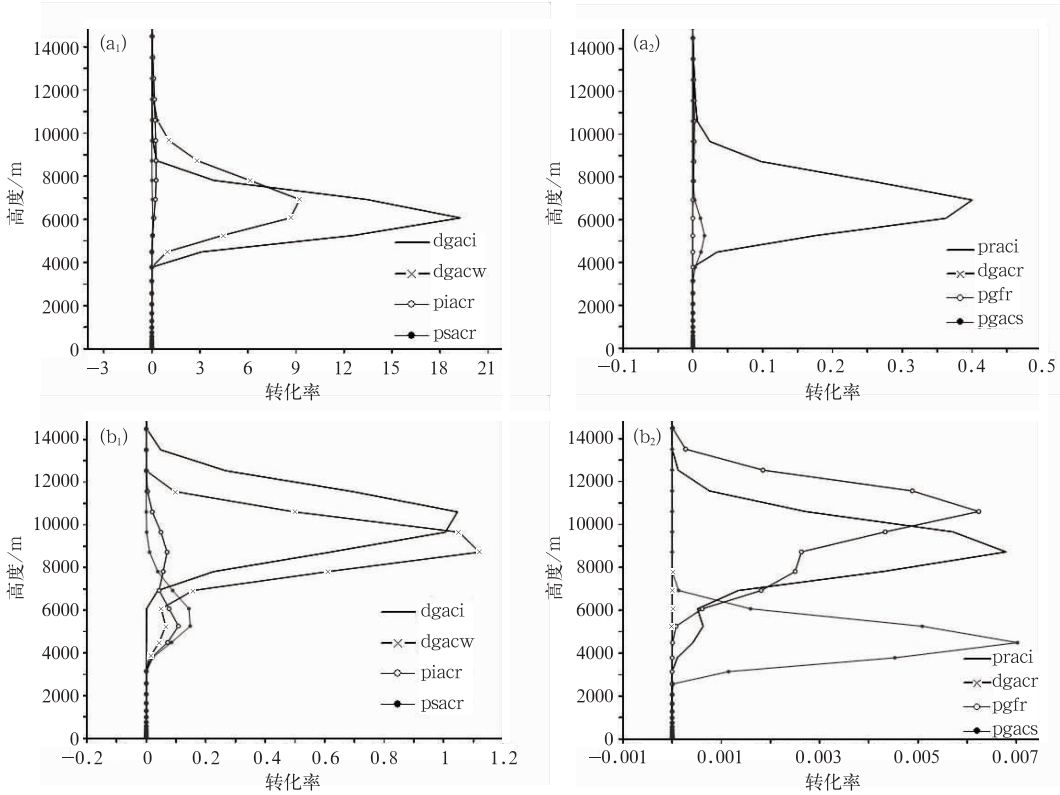


图 6 强降水中心霰形成机制 (单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) (29.5°N、121.8°E)点结果, (b) (28.3°N、120.4°E)点结果

Fig. 6 The graupel forming mechanism of two precipitation centers (unit: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) the result of center at (29.5°N, 121.8°E), and (b) the result of center at (28.3°N, 120.4°E)

120.4°E)处有一部分霰由雨水冻结产生(pgfr)。

5.3 雪形成机制

上述分析表明冰晶和雪在霰的产生过程中起着重要作用。模式中雪的形成和增长主要有 9 个过程:冰晶向雪的自动转化(psaut),冰晶通过贝吉龙过程凝华增长成雪(psfi)、云水通过贝吉龙过程凝华繁生形成雪(psfw),冰晶接触雨水转化为雪(piacr),雨水收集冰晶产生雪(praci),雪的凝华增长(psdep),雪收集冰晶增长(psaci),雪撞冻雨水增长(psacr)和雪撞冻云水增长(psacw)。图 7 为两个强降水中心点的雪形成机制。

由图 7 可见,冰晶通过贝吉龙过程凝华增长成雪(psfi),云水通过贝吉龙过程凝华繁生形成雪(psfw)在雪的形成中占有很大比例,雨水收集冰晶产生雪(praci)和冰晶接触雨水转化为雪(piacr)的比例较小。雪产生后,通过雪的凝华增长(psdep)、雪收集冰晶增长(psaci)、雪撞冻雨水增长(psacr)和雪撞冻云水增长(psacw)长大,雪收集冰晶增长(psaci)和雪撞冻云水增长(psacw)是两个重要的增长过

程。(29.5°N、121.8°E)雪的凝华增长(psdep)过程远远强于(28.3°N、120.4°E)处。

5.4 冰晶的形成机制

冷云过程是从冰晶开始的,冰晶的出现对于降水产生具有非常重要的作用。模式中冰晶的形成和增长主要有 3 个:云水均质核化(pihom)、云冰凝华增长同时消耗云水(pidw)和云冰初生(pint)。图 8 为两个强降水中心冰晶形成机制垂直剖面图。

由图 8 中可见,云冰初生(pint)和云水均质核化(pihom)是产生冰晶的主要机制,两个强降水中心云水均质核化过程(pihom)发生的高度位于 9000 ~ 13000 m;非均质核化过程(pint)最大值出现在 9000 m 左右,两个强降水中心冰晶转化率最大值和产生高度近似。

5.5 云水形成机制

云水形成的强弱,关系到降水的暖云过程。模式中云水的形成主要有 2 个过程:水汽凝结(蒸发)(cnd, >0 时为凝结, <0 时为蒸发),冰晶融化(pimlt)。图 9

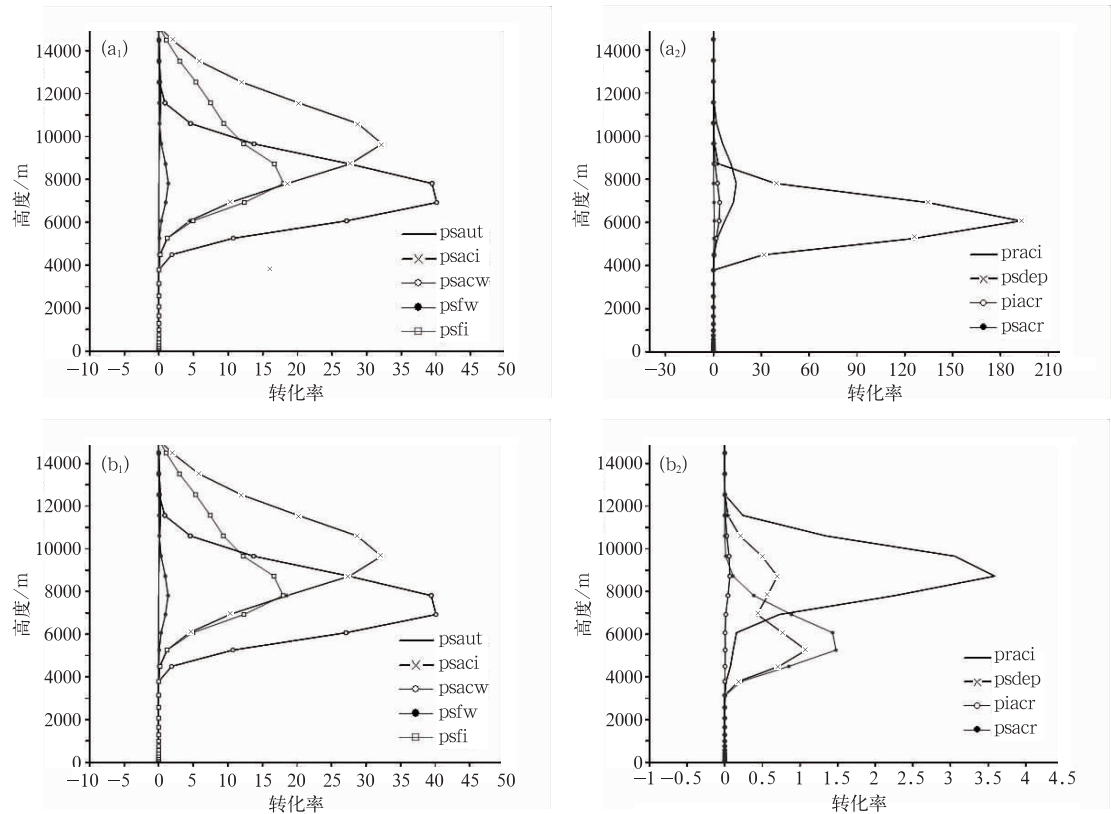


图 7 强降水中心雪形成机制(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)(29.5°N、121.8°E)点结果,(b)(28.3°N、120.4°E)点结果
Fig. 7 The snow forming mechanism of two precipitation centers (unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) the result of center at (29.5°N,121.8°E), and (b) the result of center at (28.3°N,120.4°E)

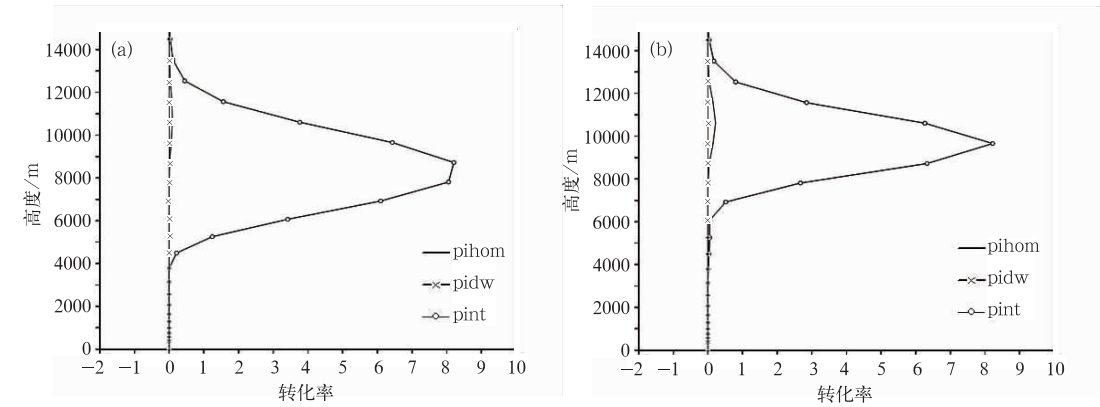


图 8 强降水中心冰晶形成机制(单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)(29.5°N、121.8°E)点结果,(b)(28.3°N、120.4°E)点结果
Fig. 8 The ice crystals forming mechanism of two precipitation centers (unit: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) the result of center at (29.5°N,121.8°E), and (b) the result of center at (28.3°N,120.4°E)

给出两个强降水中心的云水形成机制。

由图 9 可见,云水凝结是两个强降水中心云水形成的主要机制,(29.5°N、121.8°E)点云水产生率高于(28.3°N、120.4°E)点,具备较好的降水粒子暖云增长条件。(28.3°N、120.4°E)点的云水凝结过程呈现多峰型。两个强降水中心的冰晶融化(pimlt)过程峰值出现在 4500 m 左右。

6 结论和讨论

对上述分析总结如下:冰相微物理过程是启动和形成台风眼壁暴雨的主要机制。在 9000~14000 m 高空,云水在很低的温度下均质核化产生冰晶,或经非均质核化形成云冰;冰晶通过凝华增长(psfi,

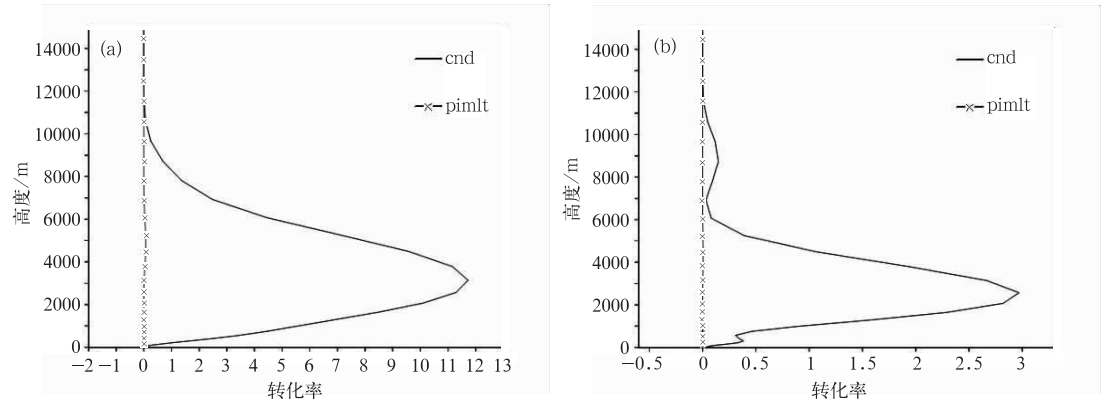


图 9 强降水中心云水形成机制
(cnd 单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, pimlt 单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)(29.5°N、121.8°E)点结果, (b)(28.3°N、120.4°E)点结果

Fig. 9 The cloud water forming mechanism of two precipitation centers
(unit of “cnd”: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, unit of “pimlt”: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) the result of center at (29.5°N,121.8°E), and (b) the result of center at (28.3°N,120.4°E)

贝吉龙过程), 雨水收集云冰产生雪(praci)和冰晶粘附雨水成雪(piacr)过程生长为雪;霰产生主要包括 4 个过程:冰晶接触雨水使其成霰(piacr),雪撞冻云水使其成霰(psacr)和雨水收集云冰转化成霰(praci)或雨水冻结为霰(pgfr);霰粒子通过收集云冰干增长(dgaci),霰撞冻云滴增长(dgacw)等过程生长;霰融化(pgmlt)和雪融化(psmlt)成雨水后再通过碰并云水等暖云生长过程,最后形成雨水。

霰过程的强弱在雨水形成机制中很重要。(29.5°N、121.8°E)和(28.3°N、120.4°E)强降水中心冰晶转化率没有太大差别,但是(29.5°N、121.8°E)强降水中心上空冰晶通过贝吉龙过程快速成长为雪和霰,霰粒子增长过程远远强于(28.3°N、120.4°E)强降水中心,低空又有较高的云水转化率,使降水粒子在暖云中继续快速生长,冷暖云过程的有效配置使位于(29.5°N、121.8°E)中心出现较强雨水转化率。

参考文献

[1] Heymsfield A J, Bansemmer A, Durden S L, et al. Ice micro-

physics observations in Hurricane Humberto: Comparison with non-hurricane-generated ice cloud layers[J]. J Atmos Sci, 2006, 63(1):288-308.
[2] 黄小玲, 纳莉(2001)台风之数值模拟研究[D]. 中国文化大学/地质研究所博士论文.
[3] 黄亿, 寿绍文, 傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(1):65-73.
[4] 孙兴池, 陈金敏, 刁秀广, 等. 一次远距离台风暴雨过程分析[J]. 气象, 2009, 35(5):34-41.
[5] 李博, 赵思雄. 用 SMAT 建立台风暴雨预报模型的试验研究[J]. 气象, 2009, 35(6):3-12.
[6] 刘学刚, 李庆宝, 张金艳, 等. 近年来引发青岛暴雨的台风特征分析[J]. 气象, 2011, 37(9):1091-1099.
[7] 袁炳, 费建芳, 王云峰, 等. 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析[J]. 气象, 2010, 36(5):12-20.
[8] 杜惠良, 黄新晴, 冯晓伟, 等. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J]. 气象, 2011, 37(7):847-856.
[9] 余贞寿, 廖胜石, 黄克慧, 等. 0414 号台风“云娜”的数值模拟[J]. 气象学报, 2005, 63(6):903-914.
[10] 杨文霞, 冉令坤, 洪延超. 台风(Wipha)云微物理特征数值模拟研究[J]. 科技导报, 2010, 28(23):34-39.