

付丹红, 郭学良. 2016. 南海季风区冰相相变潜热对中尺度对流云和降水影响作用的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 687–699. Fu Danhong, Guo Xueliang. 2016. Numerical studies of influences of ice-phase change induced diabatic heating on mesoscale convective clouds and precipitation over the South China Sea monsoon region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 687–699, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15280.

南海季风区冰相相变潜热对中尺度对流云和降水影响作用的数值模拟研究

付丹红¹ 郭学良²

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 利用可分辨云模式及中国南海北部试验区加密探空的平均水平风场、位温场和水汽场模拟分析了 1998 年 5 月 15 日至 6 月 11 日中国南海北部地区中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 中冰相相变潜热对云和降水、辐射传输以及大尺度环境场的影响作用。研究表明, 冰相相变潜热总体上不会引起明显的大气辐射通量的变化, 但会引起较明显的下垫面热通量的变化。凝华潜热释放显著地增加了大气稳定度, 造成对流和下垫面热通量的减弱, 从而导致地面降水减小 10.11%。碰冻潜热释放也使得大气稳定度增加, 不利于中尺度对流系统对流的发展, 区域累积降水量减小 2.2%。融化潜热的冷却效应, 使得融化层以下的大气降温, 从而增加了低层大气的不稳定性, 有利于海面热通量的输送, 导致 MCS 降水增加 4.1%。因此, 冰相相变潜热对降水的影响主要是通过影响大气环境稳定, 进而影响洋面感热通量和潜热通量的垂直输送和对流的发展, 导致区域降水改变。

关键词 南海季风试验 (SCSMEX) 中尺度对流系统 相变潜热 降水

文章编号 1006-9585 (2016) 06-0687-13

中图分类号 P426.5⁺1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15280

Numerical Studies of Influences of Ice-Phase Change Induced Diabatic Heating on Mesoscale Convective Clouds and Precipitation over the South China Sea Monsoon Region

FU Danhong¹ and GUO Xueliang²

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract A cloud-resolving model (CRM) and sounding data observed in the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) from 15 May to 11 June 1998 are used in this study to explore the effects of diabatic heating induced by the ice-phase change on mesoscale convective system (MCS), precipitation, radiation, and the large scale environment. The results show that the effects of the latent heat released by the ice-phase change on the net cloud radiation can be neglected, but the diabatic heating leads to obvious changes in heat fluxes at the ocean surface. The latent heat released during the sublimation and deposition processes has a heating effect on the large-scale environment, and the atmospheric stratification becomes more stable. As a result, latent and sensible heat fluxes at the ocean surface both decrease, convective activities become weak, and precipitation decreases by about 10.11% over the northern South China Sea

收稿日期 2015-12-23; **网络预出版日期** 2016-06-30

作者简介 付丹红, 女, 1977 年出生, 副研究员, 主要从事云降水物理研究。E-mail: fudanhong@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375005、41005072、40575003

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375005, 41005072, and 40575003)

(SCS). The freezing process can also result in a more stable atmosphere, which is not favorable for the development of mesoscale convective system and thereby leads to a decrease in the accumulated rainfall over the northern SCS by about 2.2%. The melting process can lead to an increase in accumulated rainfall over the northern SCS, which is mainly attributed to its cooling effect on large-scale environment below the melting level. This cooling effect produces an unstable atmosphere at the lower levels, and increases the sensible heat flux transfer from the ocean surface to the atmosphere. Precipitation increases subsequently. The melting process can increase the accumulated rainfall by about 4.1%. Therefore, the diabatic heating influences precipitation mainly by directly influences the atmospheric stability, which affects vertical transport of latent and sensible heat fluxes at the ocean surface and mesoscale convective system development. Precipitation over the northern SCS changes correspondingly.

Keywords South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX), Mesoscale convective systems, Diabatic heating due to the ice-phase change, Precipitation

1 引言

亚洲夏季风最初爆发于中国南海地区,随后不断向北和向西推进,最终导致亚洲季风全面爆发和建立(Tao and Chen, 1987; 丁一汇和李崇银, 1999; 梁建茵和吴尚森, 2000; 徐国强等, 2002)。南海季风的爆发和活跃总是伴随着强对流天气现象,在我国梅雨季节(6、7月)到来一个月前,中国南部和南海北部云量骤然增加,形成对流系统,造成该地区强降水的发生(Hirasawa et al., 1995; Hoskins and Rodwell, 1995; Rodwell and Hoskins, 1995, 1996; Lau and Yang, 1997; 阎俊岳, 1997; Lau et al., 1998; Ding and Liu, 2001; Ding et al., 2004)。南海对流云系的形成与发展是与大气环流动力结构和热力状况密切相关,同时对流云系的发展伴随着水汽相变和潜热释放,直接影响到对流的结构和组织,进一步影响较大范围的大气环流结构和降水系统(Luo and Yanai, 1984; Yanai and Tomita, 1998),而较长时间潜热释放产生的大气热源可以对大气环流的异常产生很大影响进而影响东亚季风系统及东亚区域天气或气候系统。

1998年5~8月在我国南海季风区域进行了国际综合观测试验(South China Sea Monsoon Experiment, 简称 SCSMEX)(Lau et al., 2000; Ding and Liu, 2001; Ding et al., 2004),国内外利用此次试验资料和数值模式分析研究了南海季风爆发的大尺度环流结构和演变和中尺度对流云系及降水特征,南海季风爆发期伴随的风速、云量、降水、湿度、太阳辐射和海面温度等物理量的迅速转化,而季风爆发后的季风环流等大尺度环境对中尺度对流系统的形成和发展则有着重要的影响(Chan

et al., 2000; 柳艳菊和丁一汇, 2000, 2005; Ding and Liu, 2001; 丁一汇等, 2002; Johnson and Ciesielski, 2002; Tao et al., 2003; Wang, 2004; 柳艳菊等, 2005a, 2005b; Wang and Carey, 2005; Wang et al., 2007; 李香淑等, 2008, 2011; Fu et al., 2011; Li et al., 2013)。随着南海季风区中尺度对流系统的形成和发展,对流云微物理过程对区域降水、辐射能量传输平衡以及中尺度对流系统发展演变过程也产生了重要的影响,其中冷云过程有利于南海季风区降水增加以及中尺度对流系统发展增强,而冷云过程与辐射过程的相互作用则导致区域降水减小和中尺度对流系统发展的减弱(Tao et al., 2003; Gao et al., 2006; Wang et al., 2007; Fu et al., 2011)。为了更好的了解冷云过程中冰相相变潜热对中尺度对流系统和降水的影响,本文利用加入大尺度强迫项影响的可分辨云模式模拟研究了南海季风区中尺度对流系统冰相相变潜热过程对中尺度对流云和区域降水的影响和作用。

2 资料、模式设计及验证

本文的资料采用在一个略大于南海季风北部加强观测区($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)的长方形区域内通过客观多尺度差值方法(Nuss and Titley, 1994)得到的代表南海北部加强观测区的加密探空资料(李香淑等, 2008, 2011; Fu et al., 2011),其垂直40个等压面($1000\text{ hPa}\sim 25\text{ hPa}$),分辨率为 25 hPa ,每6 h [00:00(协调世界时,下同)、06:00、12:00和18:00]一次。

1998年5月15日至6月11日在南海北部试验区的高层为强西风带,中低层也表现为相对较强的西风带(图1a)。同时,在南海北部试验区的高层

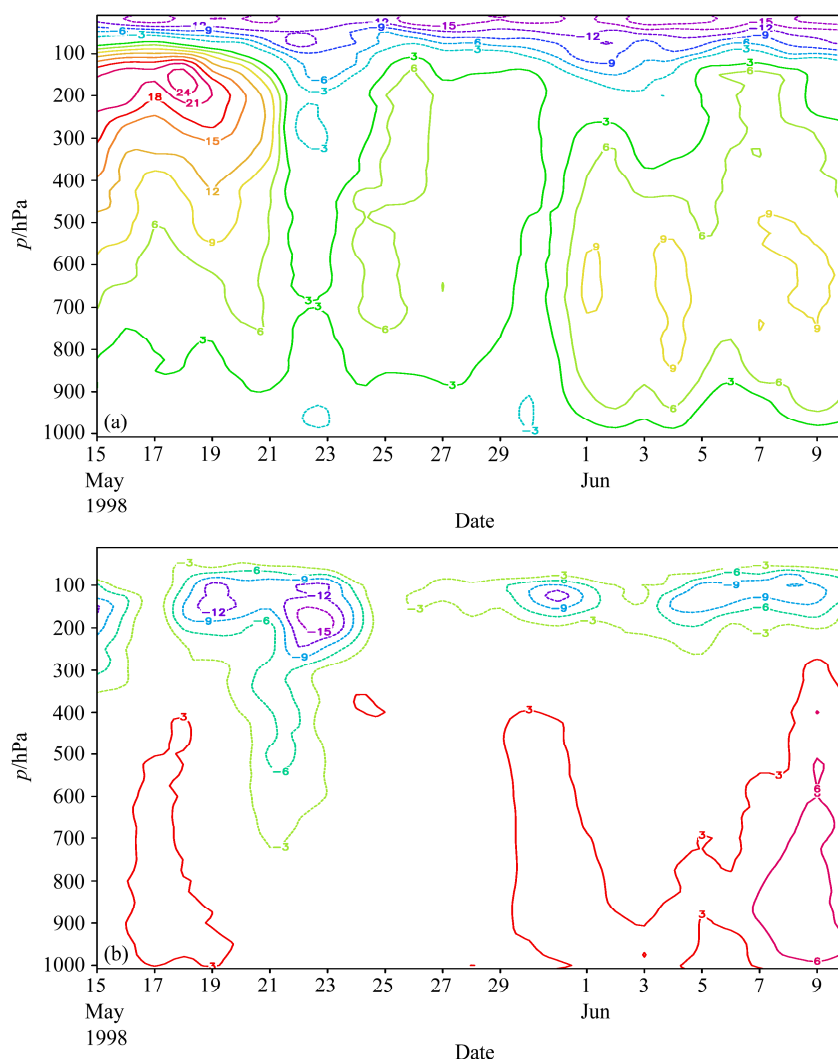


图1 南海季风北部试验区平均动力场的垂直分布随时间的变化: (a) 纬向风速 (单位: m s^{-1}); (b) 经向风速 (单位: m s^{-1})

Fig. 1 Temporal evolutions of the averaged dynamic fields in the NESA (Northern Enhanced Sounding Array): (a) u wind (m s^{-1}); (b) v wind (m s^{-1})

也存在较强北风带,而在中低层的南风气流相对较弱(图1b)。

利用可分辨云模式(WRFV2.2)对南海季风北部试验区中尺度对流系统分别进行了三维($x-y-z$)和二维($x-z$)的数值模拟,其 x 方向为纬向方向, y 方向为经向方向, z 方向为垂直方向。三维和二维数值模拟试验的水平格点数为150,水平分辨率为2 km,模拟区域为300 km,垂直方向为 σ 坐标为80层,模式顶高22 km,下垫面为水面,采用MYJ(Mellor-Yamada-Janjic scheme)行星边界层方案;长波和短波辐射方案为包含气溶胶的CAM方案;侧边界采用周期边界条件,以确保没有额外的热量和水汽进入模拟区域。降水过程为包含水汽、云水、雨水、冰晶、雪和霰的WMS6显式方案。模式的初始资料是由观测实验资料经过客观分析得到的

1998年05月15日00:00大尺度水平风场、温度场和水汽场,同时利用SCSMEX加密观测南海北部试验区6 h一次区域的大尺度水平风场、温度场和水汽平流场作为模式控制方程中的大尺度强迫项,计算方程如下(Grabowski et al., 1996):

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{ls}} = -\frac{\bar{u} - \bar{u}_{\text{obs}}}{\tau}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{ls}} = -\frac{\bar{v} - \bar{v}_{\text{obs}}}{\tau}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t}\right)_{\text{ls}} = -\bar{V} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t}\right)_{\text{ls}} = -\bar{V} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z}, \quad (4)$$

其中, $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 分别表示模式模拟的平均纬向和经向

风速, $\bar{u}_{\text{obs}}$ 和 $\bar{v}_{\text{obs}}$ 分别表示观测的大尺度纬向和经向风速, τ 是张弛时间尺度 ($\tau=2$ h), $\bar{v}$ 是观测的平均水平风矢量, $\bar{w}$ 是模式模拟的平均垂直风速, $\bar{\theta}$ 和 $\bar{q}_v$ 分别是观测的平均位温和水汽混合比。模拟时间为 1998 年 05 月 15 日 00:00 至 06 月 11 日 00:00, 时间步长为 10 s, 利用平均 SST 的进行扰动, 触发降水过程的发生发展。

1998 年 5 月 15 日至 6 月 11 日期间, 中国南海北部地区出现两次较强的降水过程, 分别发生在 5 月 15~24 日的季风爆发期间和 5 月 30 日至 6 月 8 日的季风爆发后, 可分辨云模式很好地再现了中国南海北部地区降水的变化 (Fu et al., 2011)。

图 2 为模拟和 TRMM 观测的区域—时间平均水成物含量的垂直分布。观测采用的 TRMM 微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, 简称 TMI) 资

料 (2A12) 是利用辐射计数据和云模式混合的廓线算法得到的数据资料, 其提供了水汽凝结体的垂直廓线, 分别为在垂直方向 14 个高度层上的可降水量、可降水冰量及云水、云冰和相应潜热的空间分布, 还包括瞬时地面降水强度和对流性降水强度。可以看到, 模拟的云水含量大于 TRMM 观测的云水含量, 模拟的云水含量高值区分别位于 2 km 和 5.5 km, 零度层以上有过冷水云存在 (图 2a)。模拟的雨水含量垂直分布与 TRMM 卫星观测的结果较为一致, 最大雨水含量位于 2 km 处, 零度层 (5.8 km) 以上存在一定量的过冷雨水含量 (图 2b)。模拟的冰晶含量也大于 TRMM 的观测, 模拟和观测的云中冰晶高值区均位于 10 km 层附近 (图 2c)。模拟的冰相降水粒子小于观测值, 冰相降水粒子主要位于零度层以上的 6~10 km 处 (图 2d)。可以看

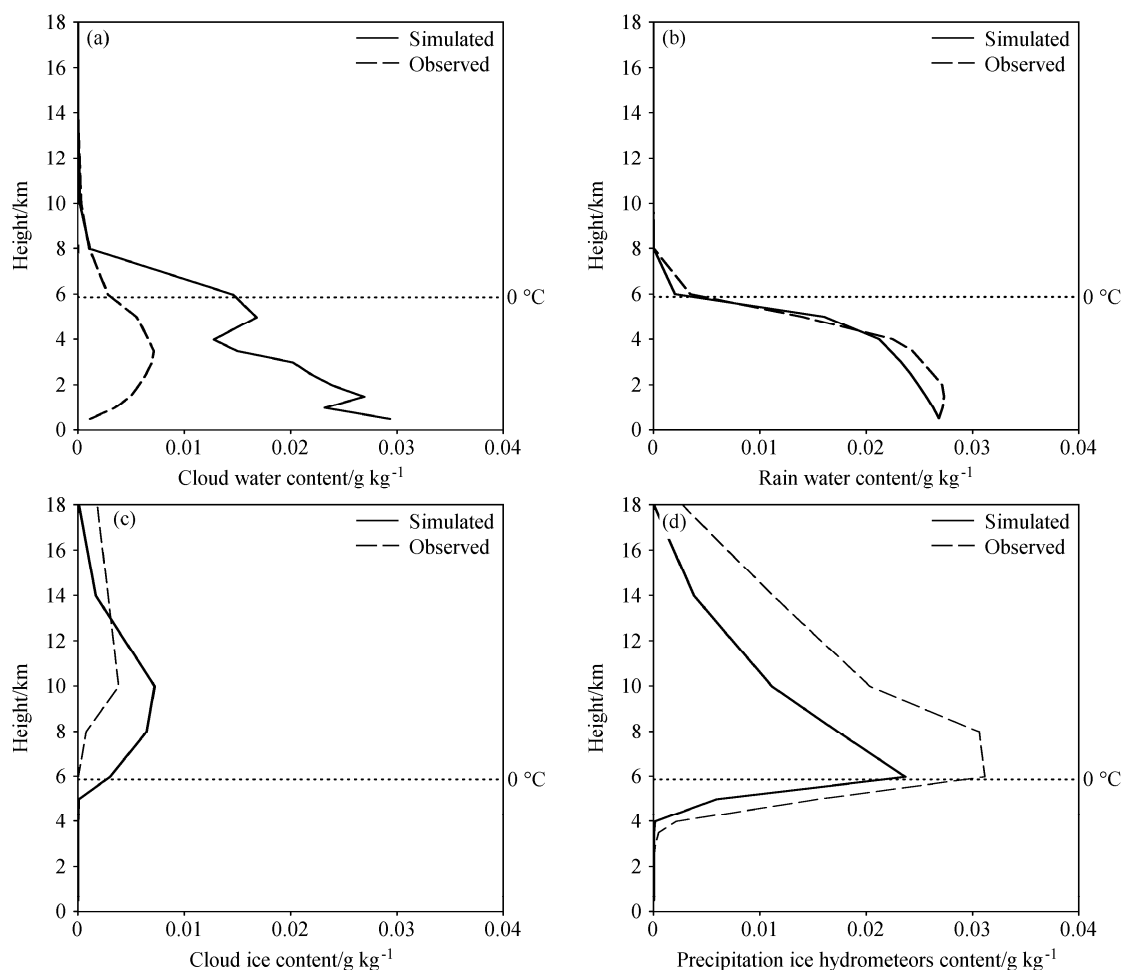


图 2 二维数值模拟和 TRMM TMI 观测的区域—时间平均水成物的垂直分布: (a) 云水; (b) 雨水; (c) 冰晶; (d) 冰相降水粒子。图中水平点线表示 0 °C 温度层

Fig. 2 Vertical profiles of domain- and time-averaged contents of hydrometeors: (a) Cloud water; (b) rain water; (c) ice crystals; (d) ice-phase precipitation particles simulated by the 2D model and from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) TMI (TRMM Microwave Imager), respectively. The short dashed line indicates the melting level simulated by the WRF (Weather Research and Forecasting) model

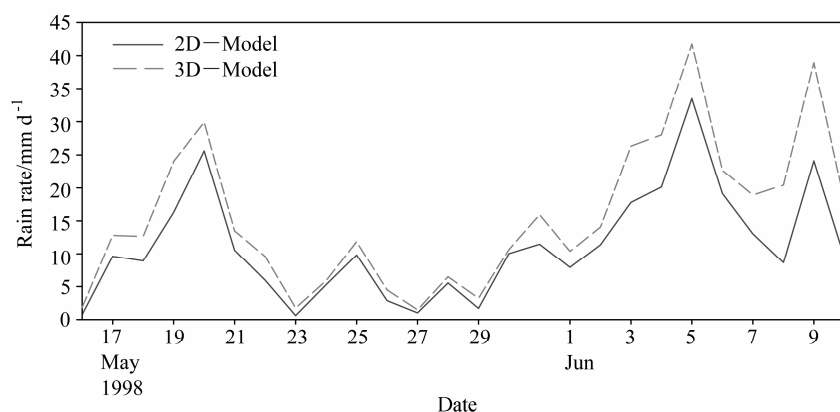


图3 二维与三维数值模拟的区域平均降水强度随时间的变化
Fig. 3 Temporal changes in the domain-averaged rainfall rate simulated by the 2D and 3D models

出，模拟的水成物垂直分布基本再现了南海北部季风试验区中尺度对流云系的垂直结构特征。

图3为二维与三维数值模拟区域平均降水强度随时间的变化。可以看到，二维和三维模拟结果的演变趋势较为一致，其中三维模拟结果在季风爆发期和季风期最大平均降水强度分别为 30 mm d^{-1} 和 40 mm d^{-1} ，日平均降水强度达到 15.5 mm d^{-1} ，而二维模拟结果最大平均降水强度分别为 25 mm d^{-1} 和 32 mm d^{-1} ，日平均降水强度为 12.2 mm d^{-1} 。由此可见，三维模拟的最大降水强度和日平均降水强度值较高。

图4为二维与三维数值模拟区域平均水成物含量的垂直分布，可以看到，三维模拟的云中云水含量在低层明显大于二维模拟结果，而在零度层附近三维和二维的模拟结果较为相似（图4a）。云中冰晶含量（图4b）在中低层三维和二维的模拟结果比较一致，而三维模拟结果在高层出现大量冰晶。雪含量在中层，三维模拟结果相对较小，而三维和二维对霰的模拟基本一致。雨水含量的三维模拟结果明显大于二维模拟结果，这主要是云水转化和雪融化过程增强导致的。可以看到，二维和三维模拟的水成物垂直分布均能较好地再现南海北部季风试验区（NESA）中尺度对流云系的垂直结构特征。

可以看到，由于三维数值模拟环境风的影响，中尺度对流系统和降水强度增强，但二维和三维模拟的云和降水的发展演变趋势较为一致，这表明二维和三维模拟均能很好的再现云系和降水特征，这与之前的一些研究结果基本一致(Lipps and Hemler, 1986; Tao and Soong, 1986; Tao et al., 1989;

Grabowski et al., 1998)。

因此，为了分析南海北部地区中尺度降水云系发展过程中冰相相变潜热对中尺度对流云和降水产生影响，针对冰相非绝热过程作用进行了一系列的二维数值模式的敏感性试验（见表1）。

表1 敏感性试验设计方案
Table 1 Sensitivity experiments design

方案名称	方案描述
混合云 (Ice run)	混合云过程, WMS6 方案(暖云+冷云)
无碰冻过程 (No-freezing)	混合云过程, 但不包括碰冻潜热释放
无凝华过程 (No-deposition/sublimation)	混合云过程, 但不包括凝华/升华潜热释放
无融化过程 (No-melting)	混合云过程, 但不包含雪/霰融化潜热吸收

3 结果分析

3.1 冰相相变潜热对云和降水的影响

冷云（冰相）过程中的碰冻、凝华/升华以及融化过程是重要的非绝热过程，其通过对大尺度环境场反馈作用以及中尺度对流系统发展的影响进而影响区域降水。敏感性试验结果表明，碰冻和凝华/升华潜热对区域累积降水量表现为减小作用，累积减雨量分别为2.2%和10.11%，而融化潜热则表现为增加作用，累积增雨量为4.1%（图5a）。南海季风爆发期间，融化潜热对最大降水强度表现为减弱作用，凝华潜热对强降水的影响相对较小，碰冻潜热对最大降水强度表现为增强作用，季风爆发后，凝华潜热对最大降水强度表现明显的抑制作用，碰冻和融化潜热对最大降水强度也有一定的减弱作用（图5b）。一些相关研究也表明，在陆地和海洋

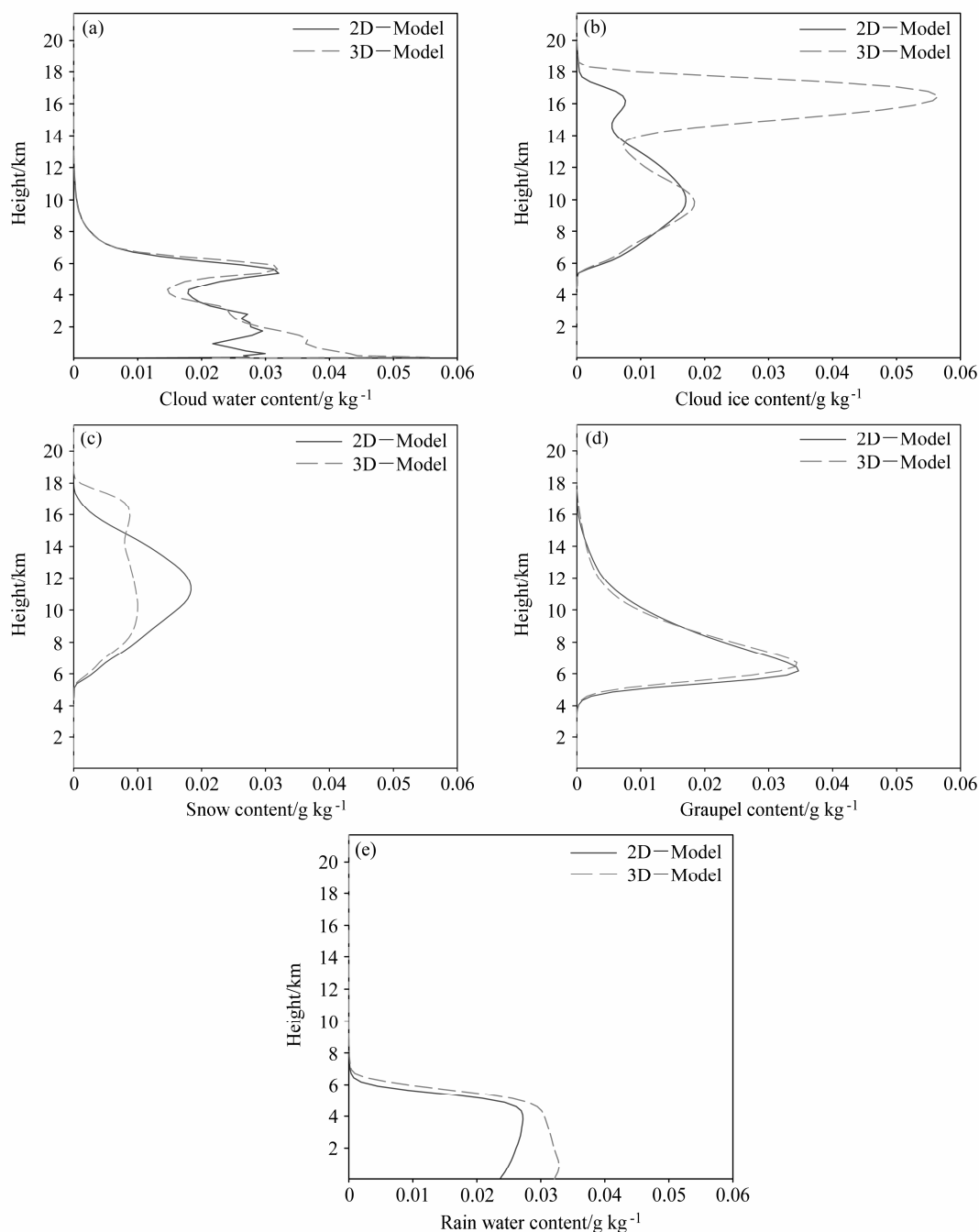


图4 二维与三维数值模拟的区域—时间平均水成物含量(单位: g kg^{-1})的垂直分布: (a) 云水; (b) 冰晶; (c) 雪; (d) 霰; (e) 雨水

Fig. 4 Vertical profiles of domain- and time-averaged contents of hydrometeors (g kg^{-3}): (a) Cloud water; (b) cloud ice; (c) snow; (d) graupel; (e) rain water simulated by 2D and 3D models, respectively

地区冰相过程对强降水过程有减弱作用(Fovell and Ogura, 1989; Tao and Simpson, 1989; McCumber et al., 1991; Tao et al., 2003)。

3.2 冰相相变潜热对云强迫辐射效应的影响分析

大气辐射过程是大气中的重要物理过程,其中云—辐射相互作用会影响大气中的热力状况,进而影响动力过程以及冻结、凝结、核化等云微物理过

程,改变云的结构,其又将改变辐射过程,改变到达地面的辐射能量,这都会对地面降水产生重要的影响作用(Chin et al., 1995; Fu and Liou, 1993; Xu and Randall, 1995a, 1995b; Tao et al., 1996; Dharssi et al., 1997; Fu et al., 2011)。

有云存在的情况下,与晴空相比,云反射太阳短波(为负辐射强迫)并吸收长波辐射(为正辐射

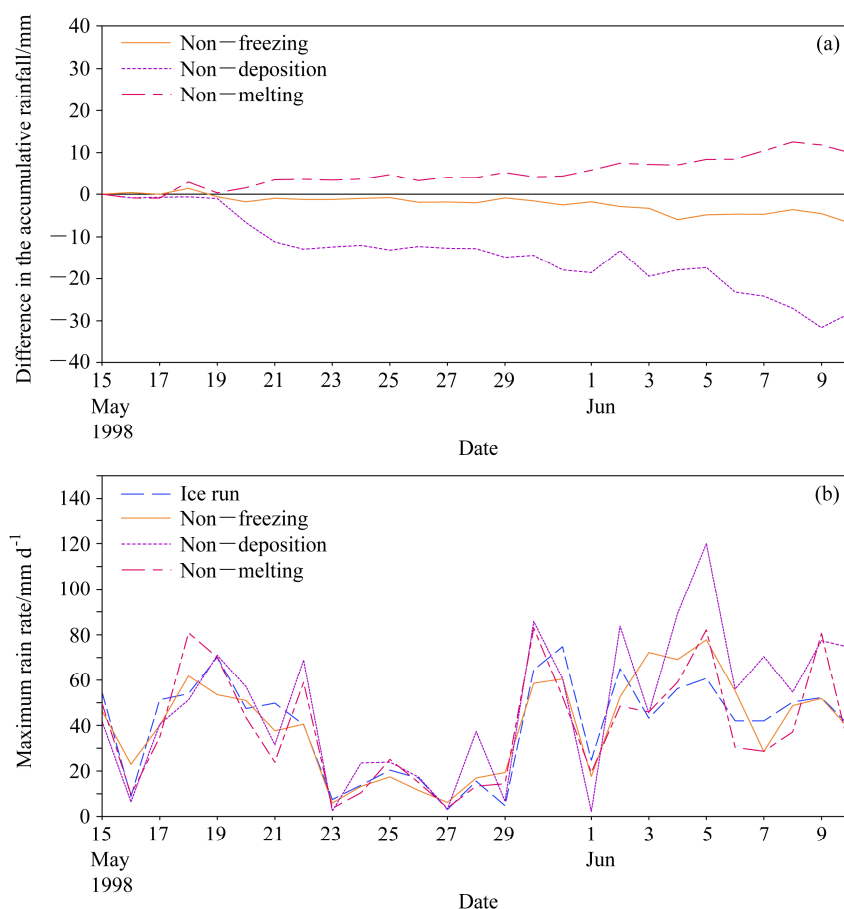


图5 南海季风北部试验区混合云过程与敏感性试验过程中 (a) 区域平均降水量差值和 (b) 最大降水强度随时间的变化

Fig. 5 Temporal evolutions of (a) the differences in domain-averaged accumulative rainfall between ice run and that based on the sensitivity experiments, and (b) the maximum rain rate in the WRF domain of simulation

强迫), 发生在大气层顶的正的云辐射强迫效应说明云对大气系统起到了加热的作用, 负的云的辐射强迫效应将对大气具有冷却作用。

云顶长波辐射强迫是指晴空时的下垫面大气顶射出长波辐射通量密度减去有云覆盖时的大气顶射出长波辐射通量密度表示了云对长波辐射的阻止作用。从云顶处长波辐射强迫(LWCF)的演变可以看到(图 6a), 冰相相变潜热过程对云长波辐射强迫的影响相对较小, 季风爆发后, 凝华/升华潜热加热/冷却作用使得云顶长波辐射强迫略有减弱。

云顶短波辐射强迫(SWCF)是晴空反射回的太阳通量与有云时反射回的太阳通量之差, 从云顶短波辐射强迫作用来看(图 6b), 相变潜热过程也对云短波辐射强迫的影响作用较小, 季风爆发后, 凝华/升华潜热加热/冷却作用使得云顶短波辐射强迫略有增强。

云顶长波辐射强迫和短波辐射强迫的共同作用, 表现为云对地气辐射的收支的影响, 从云顶净辐射强迫效应看(图 6c), 相变潜热对大气顶云辐射强迫效应的影响相对较小。总的来说, 冰相相变潜热过程对云顶辐射强迫效应的影响相对较小。

图 7 为冰相相变潜热敏感性试验中平均向下短波辐射通量和向下长波辐射通量随时间的变化。可以看到, 冰相相变潜热过程对向下短波辐射通量的影响相对较小(图 7a), 碰冻和凝华潜热对向下短波辐射通量略有减弱作用, 日平均向下短波辐射通量分别减小 1.8%和 5.9%左右, 而融化潜热对向下短波辐射通量略有增强作用, 日平均向下短波辐射通量增加 2.7%。从向下长波辐射通量随时间的变化可以看到(图 7b), 冰相相变潜热对向下长波辐射通量的影响也相对较小, 其中考虑凝华/升华和碰冻潜热过程中, 向下长波辐射通量略有增加, 而融化过程中向下长波辐射略有减小, 但总的影响较小。

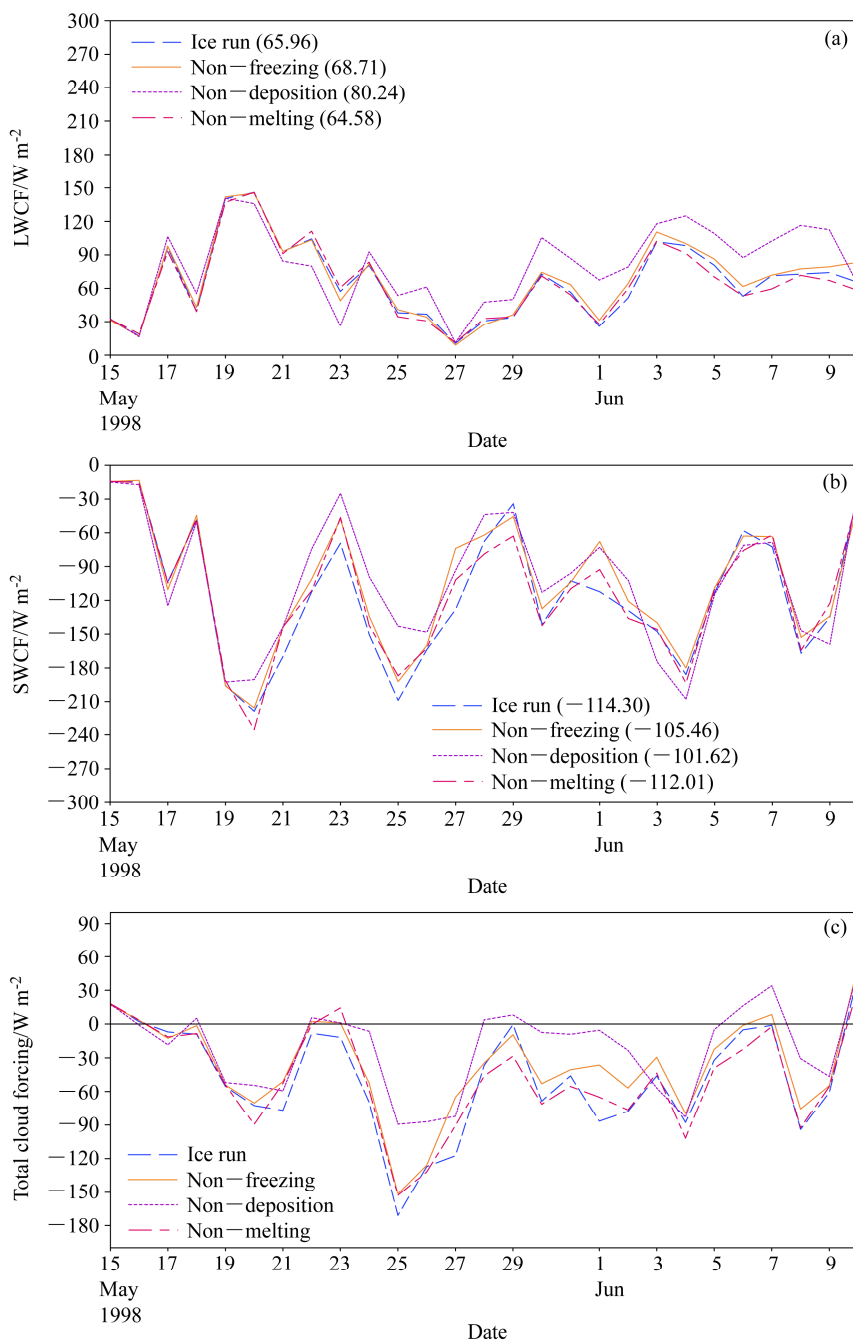


图 6 南海季风北部试验区混合云过程和敏感性试验过程中区域平均 (a) 云顶长波辐射强迫 (LWCF)、(b) 云顶短波辐射强迫 (SWCF)、(c) 云顶总辐射强迫随时间的演变

Fig. 6 Temporal evolutions of domain-averaged (a) longwave cloud forcing (LWCF), (b) shortwave cloud forcing (SWCF), and (c) total cloud forcing at the top of the atmosphere in the ice run and the sensitivity experiments

因此,冰相相变潜热过程总体对于向下辐射通量的影响较小。从云顶辐射强迫及向下辐射通量可以看到,冰相相变潜热对辐射传输过程的影响相对较小。

3.3 冰相相变潜热过程对大尺度环境场的影响

中尺度对流系统中的冰相相变潜热过程对大

尺度环境会产生重要的反馈作用,大尺度环境热力结构特征的改变会对大气不稳定层结产生影响,进而又对中尺度对流系统产生影响。为了解冰相相变潜热对大尺度稳定度的影响,这里给出了对流有效位能 (Convective Available Potential Energy, CAPE) 的变化情况。CAPE 的计算方程如下:

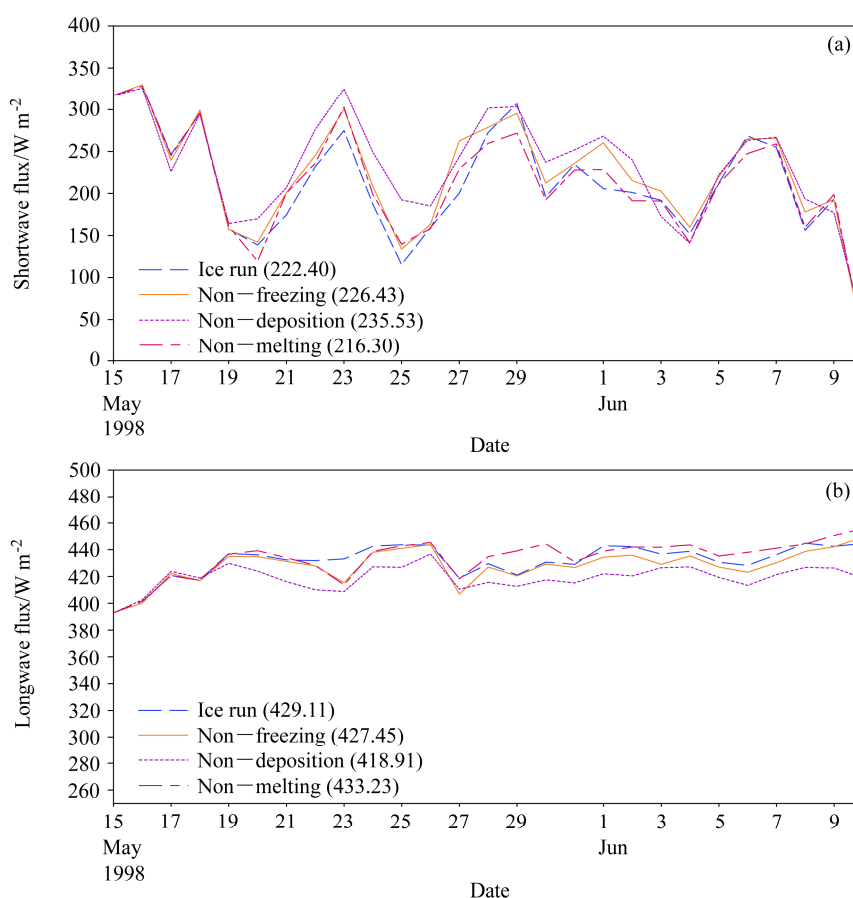


图7 南海季风北部试验区混合云过程与敏感性试验过程中平均 (a) 向下短波辐射通量和 (b) 向下长波辐射通量随时间的变化

Fig. 7 Temporal evolutions of domain-averaged (a) downward shortwave flux and (b) downward longwave flux at the ocean surface in the ice run and the sensitivity experiments

$$C_{APE} = g \int_{L_{FC}}^{E_L} \frac{T_{VP} - T_{VE}}{T_{VE}} dz, \quad (5)$$

其中, E_L (Equilibrium Level) 为平衡高度, L_{FC} (Level of Free Convection) 为自由对流高度, T_{VP} 为气块虚温, T_{VE} 为 3000 m 以下最大环境虚温。

从 CAPE 随时间的演变可以看到 (图 8), 碰冻和凝华潜热对大气环境的反馈作用使得对流有效位能 (CAPE) 减小, 大气层结变得相对稳定, 其中凝华潜热对大气环境场的影响最大, 不利于中尺度对流系统的发展加强。融化过程在季风爆发期间使得大气变得更加稳定, 在季风爆发后, 对流有效位能 CAPE 增加, 融化过程使得低层大气不稳定层结增加, 融化层下云内最大上升气流增加, 这有利于洋面水汽和热通量的垂直输送。

3.4 冰相相变潜热对降水的影响机制

一般而言, 凝华和冻结潜热释放可以促进云向高层发展, 云体变大导致向下的短波辐射减小, 使

地面的感热通量减小。而融化过程是吸收热量的过程, 不利于云的发展, 向下的短波辐射增加, 同时融化层以下冷却降温, 地面感热通量也会增加。从南海季风北部试验区的区域平均热通量随时间的变化可以看到 (图 9), 碰冻和融化相变潜热对洋面感热、潜热通量的影响不明显, 但凝华/升华潜热释放/吸收导致下垫面热通量明显减小, 同时凝华过程对辐射通量的影响相对较小, 这说明凝华过程并不是完全通过辐射传输过程影响下垫面热通量的。从相变潜热对大尺度环境场和大气稳定度的影响分析可以看到, MCS 云中潜热释放的加热作用使中高层大气温度更高, 导致大气的稳定性增加, 凝华过程的加热作用会导致大气层结更加稳定, 不利于 MCS 对流的发展, 从而使下垫面的热量、水汽输送减弱, 而相变潜热的吸收 (如融化过程) 作用有利于增加低层大气的不稳定性和对流的发展, 促进低层热量和水汽的垂直输送。同时, 模拟区域采用周期边界条件, 没有额外的水汽流进/流出, 水汽主要

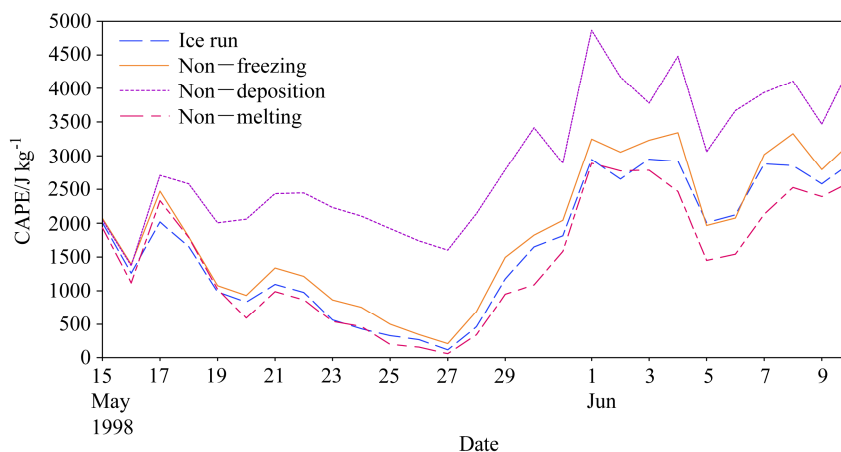


图 8 南海北部地区混合云过程和敏感性试验过程中区域平均对流有效位能 (CAPE) 随时间的变化

Fig. 8 Temporal evolutions of the domain-averaged convective available potential energy (CAPE) in the ice run and the sensitivity experiments over the northern South China Sea

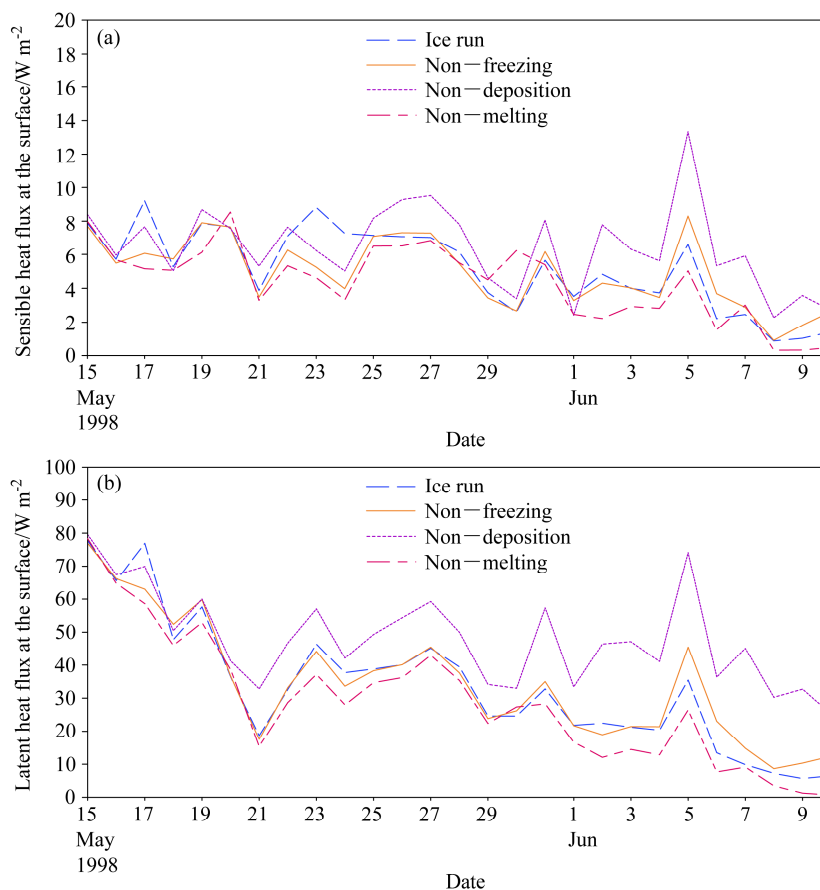


图 9 南海季风北部试验区混合云过程和敏感性试验过程中区域平均洋面热通量随时间的演变: (a) 感热通量; (b) 潜热通量

Fig. 9 Temporal evolutions of domain-averaged (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux at the ocean surface in the ice run and the sensitivity experiments

来源于大尺度水汽强迫场和海表蒸发。从日平均潜热通量可以看到, 考虑相变潜热过程的日平均潜热通量为 20.13 W m^{-2} , 而不考虑碰冻、凝华和融化潜热的日平均潜热通量分别为 20.68 W m^{-2} 、 30.50 W m^{-2} 和 17.74 W m^{-2} 。碰冻和凝华潜热释放不利于

地面潜热通量增强, 尤其是凝华潜热释放, 海面蒸发过程减弱, 对降水有一定的抑制作用。融化潜热吸收会导致地面潜热通量增加, 即海表蒸发水汽量增大, 有利于降水的增加。因此, 冰相相变潜热对区域降水的影响主要是通过对大气热力结构特征

的影响实现的, 大气的热力结构影响了大气的稳定性和对流的发展。

4 结论

利用可分辨云模式及中国南海北部试验区 (NESA) 加密探空的平均水平风场、位温场和水汽场模拟分析了 1998 年 5 月 15 日至 6 月 11 日中国南海北部地区中尺度对流系统中冰相相变潜热对云和降水、地气辐射以及大尺度反馈的影响作用。

研究表明, 凝华潜热释放不利于中尺度对流系统的发展增强, 地面降水减小 10.11%。碰冻潜热释放也不利于中尺度对流系统的发展, 区域累积降水量减小 2.2%。融化潜热的冷却效应导致 MCS 降水增加 4.1%。

冰相相变潜热总体上不会引起明显的大气辐射通量的变化, 但冰相潜热过程会引起下垫面热通量的变化, 其影响机理主要是由于冰相相变潜热释放 (凝华和碰冻过程) 增加了大气稳定度, 造成对流和下垫面热通量的减弱, 从而导致地面降水减小, 而冰相相变潜热吸收 (融化过程) 的冷却效应, 使得融化层以下的大气降温, 从而增加了低层大气的的不稳定性, 有利于对流的发展和海面热通量的输送, 地面降水增加。因此, 冰相相变潜热对降水的影响主要是通过对大气热力结构特征的影响, 进而影响洋面感热通量和潜热通量的垂直输送和对流的发展, 导致区域降水改变。

参考文献 (References)

- Chan J C L, Wang Y G, Xu J J. 2000. Dynamic and thermodynamic characteristics associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 78 (4): 367–380.
- Chin H N S, Fu Q, Bradley M M, et al. 1995. Modeling of a tropical squall line in two dimensions and its sensitivity to environmental winds and radiation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 3172–3193.
- Dharssi I, Kershaw R, Tao W K. 1997. Sensitivity of a simulated tropical squall line to long-wave radiation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123 (537): 187–206, doi: 10.1002/qj.49712353708.
- 丁一汇, 李崇银. 1999. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用[M]. 北京: 气象出版社, 423pp. Ding Yihui, Li Chongyin. 1999. Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 423pp.
- Ding Y H, Liu Y J. 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (1B): 255–276, doi: 10.2151/jmsj.79.255.
- 丁一汇, 李崇银, 柳艳菊, 等. 2002. 南海季风试验研究 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 202–208. Ding Yihui, Li Chongyin, Liu Yanju, et al. 2002. South China Sea monsoon experiment [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 202–208, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.007.
- Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (3): 343–360, doi: 10.1007/BF02915563.
- Fovell R G, Ogura Y. 1989. Effect of vertical wind shear on numerically simulated multicell storm structure [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46 (20): 3144–3176, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<3144:EOVWSO>2.0.CO;2.
- Fu D H, Guo X L, Liu C H. 2011. Effects of cloud microphysics on monsoon convective system and its formation environments over the South China Sea: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D7): D07108, doi: 10.1029/2010JD014662.
- Fu Q, Liou K N. 1993. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 50 (13): 2008–2025, doi: 10.1175/1520-0469(1993)050<2008:POTRPO>2.0.CO;2.
- Gao S T, Ran L K, Li X F. 2006. Impacts of ice microphysics on rainfall and thermodynamic processes in the tropical deep convective regime: A 2D cloud-resolving modeling study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (10): 3015–3024, doi: 10.1175/MWR3220.1.
- Grabowski W W, Moncrieff M W, Kiehl J T. 1996. Long-term behaviour of precipitating tropical cloud systems: A numerical study [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (533): 1019–1042, doi: 10.1002/qj.49712253302.
- Grabowski W W, Wu X Q, Moncrieff M W, et al. 1998. Cloud-resolving modeling of cloud systems during Phase III of GATE. Part II: Effects of resolution and the third spatial dimension [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (21): 3264–3282.
- Hirasawa N, Kato K, Takeda T. 1995. Abrupt change in the characteristics of the cloud zone in subtropical East Asia around the middle of May [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73 (2): 221–239.
- Hoskins B J, Rodwell M J. 1995. A model for the Asian summer monsoon. Part I: The global scale [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (9): 1329–1340, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<1329:AMOTAS>2.0.CO;2.
- Johnson R H, Ciesielski P E. 2002. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (4): 561–578, doi: 10.2151/jmsj.80.561.
- Lau K M, Yang S. 1997. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14 (2): 141–162, doi: 10.1007/s00376-997-0016-y.
- Lau K M, Wu H T, Yang S. 1998. Hydrologic processes associated with the first transition of the Asian summer monsoon: A pilot satellite study [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (9): 1871–1882, doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<1871:HPAWTF>2.0.CO;2.
- Lau K M, Ding Y H, Wang J T, et al. 2000. Report of the field operations and early results of the South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (6): 1261–1270, doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<1261:AROTFO>2.3.CO;2.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红. 2008. 南海季风爆发期间大气环流结构与对

- 流热量、水汽输送特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 93–101. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong. 2008. Atmospheric structure and characteristics of convection transport of heat and moisture during monsoon onset over South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 93–101, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.12.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红, 等. 2011. 南海季风爆发期间中尺度对流云带演变特征与持续性加强的机理研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 259–271. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2011. Studies of evolution features and persistent development mechanism of mesoscale convective clouds over the northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 259–271, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.06.
- Li X S, Guo X L, Fu D H. 2013. TRMM-retrieved cloud structure and evolution of MCSs over the northern South China Sea and impacts of CAPE and vertical wind shear [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30 (1): 77–88, doi: 10.1007/s00376-012-2055-2.
- 梁建茵, 吴尚森. 2000. 南海西南季风多时间尺度变化及其与海温的相互作用 [J]. 应用气象学报, 11 (1): 95–104. Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2000. The multi-time scale variations of summer monsoon over South China Sea and its interaction with SST anomaly [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11 (1): 95–104, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2000.01.012.
- Lipps F B, Hemler R S. 1986. Numerical simulation of deep tropical convection associated with large-scale convergence [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 43 (17): 1796–1816, doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<1796:NSODTC>2.0.CO;2.
- 柳艳菊, 丁一汇. 2000. 南海季风爆发前后大气层结和混合层的演变特征 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 459–468. Liu Yanju, Ding Yihui. 2000. Evolution of the atmospheric stratification and mixed layer before and after monsoon onset over the South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 459–468, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2000.04.011.
- 柳艳菊, 丁一汇. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: II 中尺度对流系统对大尺度场的作用 [J]. 气象学报, 63 (4): 443–454. Liu Yanju, Ding Yihui. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998: II Effect of the meso-scale convective systems on large-scale fields [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 443–454, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2005.04.006.
- 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 2005a. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件 [J]. 气象学报, 63 (4): 431–442. Liu Yanju, Ding Yihui, Zhao Nan. 2005a. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998: I Analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 431–442, doi:10.11676/qxb2005.043.
- 柳艳菊, 丁一汇, 宋艳玲. 2005b. 1998 年夏季季风爆发前后南海地区的水汽输送和水汽收支 [J]. 热带气象学报, 21 (1): 55–62. Liu Yanju, Ding Yihui, Song Yanling. 2005b. The moisture transport and moisture budget over the South China Sea before and after the summer monsoon onset in 1998 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 21 (1): 55–62, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.006.
- Luo H B, Yanai M. 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979, Part II: Heat and moisture budgets [J]. Mon. Wea. Rev., 112 (5): 966–989, doi: 10.1175/1520-0493(1984)112<0966:TLSCAH>2.0.CO;2.
- McCumber M, Tao W K, Simpson J, et al. 1991. Comparison of ice-phase microphysical parameterization schemes using numerical simulations of tropical convection [J]. J. Appl. Meteor., 30 (7): 985–1004, doi: 10.1175/1520-0450-30.7.985.
- Nuss W A, Tittley D W. 1994. Use of multiquadric interpolation for meteorological objective analysis [J]. Mon. Wea. Rev., 122 (7): 1611–1631, doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<1611:UOMIFM>2.0.CO;2.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1995. A model of the Asian summer monsoon. Part II: Cross-equatorial flow and PV behavior [J]. J. Atmos. Sci., 52 (9): 1341–1356, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<1341:AMOTAS>2.0.CO;2.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1996. Monsoons and the dynamics of deserts [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 122 (534): 1385–1404, doi: 10.1002/qj.49712253408.
- Tao W K, Soong S T. 1986. A study of the response of deep tropical clouds to mesoscale processes: Three-dimensional numerical experiments [J]. J. Atmos. Sci., 43 (22): 2653–2676, doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<2653:ASOTRO>2.0.CO;2.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. New York: Oxford University Press, 60–92.
- Tao W K, Simpson J. 1989. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses [J]. J. Atmos. Sci., 46 (19): 2974–3004, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<2974:AFSOCI>2.0.CO;2.
- Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice–water saturation adjustment [J]. Mon. Wea. Rev., 117 (1): 231–235, doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<0231:AIWSA>2.0.CO;2.
- Tao W K, Lang S, Simpson J, et al. 1996. Mechanisms of cloud-radiation interaction in the tropics and midlatitudes [J]. J. Atmos. Sci., 53 (18): 2624–2651, doi: 10.1175/1520-0469(1996)053<2624:MOCRII>2.0.CO;2.
- Tao W K, Shie C L, Simpson J, et al. 2003. Convective systems over the South China Sea: Cloud-resolving model simulations [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 60 (24): 2929–2956, doi: 10.1175/1520-0469(2003)060<2929:CSOTSC>2.0.CO;2.
- Wang J J. 2004. Evolution and structure of the mesoscale convection and its environment: A case study during the early onset of the Southeast Asian summer monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (5): 1104–1120, doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<1104:EASOTM>2.0.CO;2.
- Wang J J, Carey L. 2005. Structure and evolution of an oceanic squall line during the South China Sea monsoon experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 133 (6): 1544–1561.
- Wang J J, Li X F, Carey L D. 2007. Evolution, structure, cloud microphysical, and surface rainfall processes of monsoon convection during the South China Sea monsoon experiment [J]. J. Atmos. Sci., 64

- (2): 360–380, doi: 10.1175/JAS3852.1.
- 徐国强, 朱乾根, 冉玉芳. 2002. 1998 年南海及其附近地区夏季风的爆发特征及其机制分析 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 535–549. Xu Guoqiang, Zhu Qiangen, Ran Yufang. 2002. Analyses of feature and mechanisms of summer monsoon onsets over SCS and its vicinity in 1998 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 535–549, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2002.05.003.
- Xu K M, Randall D A. 1995a. Impact of interactive radiative transfer on the macroscopic behavior of cumulus ensembles. Part I: Radiation parameterization and sensitivity test [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 52 (7): 785–799, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<0785:IOIRTO>2.0.CO;2.
- Xu K M, Randall D A. 1995b. Impact of interactive radiative transfer on the microscopic behavior of cumulus ensembles. Part II: Mechanisms for cloud-radiation interactions [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 52: 800–817.
- 阎俊岳. 1997. 南海西南季风爆发的气候特征 [J]. 气象学报, 55 (2): 174–186. Yan Junyue. 1997. Climatological characteristics on the onset of the South China Sea southwest monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1997, 55 (2): 174–186, doi: 10.11676/qxxb1997.019.
- Yanai M, Tomita T. 1998. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis [J]. J. Climate, 11 (3): 463–482, doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<0463:SAIVOA>2.0.CO;2.