

李江南,庞思敏.热带气旋云微物理过程的研究进展[J].气象研究与应用,2021,42(3):01-06.

Li Jiangnan,Pang Simin.Research progress on the microphysical process of tropical cyclone clouds[J].Journal of Meteorological Research and Application,2021,42(3):01-06.

热带气旋云微物理过程的研究进展

李江南, 庞思敏

(中山大学大气科学学院/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082)

摘要: 云微物理过程是影响热带气旋(TC)强度、结构和降水变化的重要因子。本文主要对近几十年有关 TC 云微物理过程的观测分析和数值模拟研究进展进行了回顾和评述。由于观测资料的增多和数值模式精细化程度的提高,对 TC 的云微物理结构和特征有了较深的认知,但云微物理过程如何影响 TC 路径、强度和降水还有很多不同观点,反映在云微物理过程对 TC 数值预报的影响还有很大的不确定性。云微物理过程的季节性和局地性特征不清楚。云微物理方案和模式分辨率以及其它物理方案之间如何协调匹配,业务预报如何选择云微物理方案等问题还有待更多的研究。

关键词: 热带气旋;云微物理过程;综述

中图分类号: P444

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.3.01

OSID:



引言

云微物理过程影响热带气旋(TC)的每个阶段^[1],能够直接或间接的调节包括 TC 大小、最大风速半径和其他因子在内的涡旋特性^[2],也可以显著的影响粒子下落速度,从而影响 TC 风场^[3]。云微物理过程的潜热释放对 TC 强度、结构和降水的影响较大,潜热与对流的反馈作用影响 TC 的强度^[4]。近几十年来,尽管在 TC 路径预报上有较大提高,但对 TC 强度和降水的预报能力还是非常的有限^[5-7]。云微物理过程是影响 TC 强度、结构和降水变化的重要因子^[8-10]。受观测资料限制,相对于 TC 动力学过程,目前对 TC 云微物理过程的研究十分有限。随着卫星、雷达等遥感观测资料的日益增多和数值模式的不断发展,TC 云微物理过程的研究有了一定的进展。这些进展主要表现在两个方面:一是观测资料分析,二是数值模拟研究。从这两个方面对近几十年来 TC 云微物理过程研究现状作简单的回顾与评述。

1 观测资料分析

近几十年,基于卫星雷达等观测资料的诊断分析较多,如基于 TRMM 卫星资料对 TC 云和降水结构进行的研究^[11-13],基于 CloudSat 卫星资料对不同强度的 TC 云宏微观结构和降水特征进行的诊断分析^[14],以及垂直风切变大小对台风结构和强度的影响^[15]等方面。此外的研究还包括,利用 GPM/DPR 卫星资料揭示 TC 个例两侧眼壁粒子谱的不均匀性^[16],利用 COSMIC/RO 卫星资料对多个台风的热力结构进行合成分析^[17],使用 AMUS 卫星资料深入分析台风对流层中上层热力异常结构^[18],以及基于我国风云气象卫星资料探究台风云系内部演变^[19]等方面。在对偏振雷达的观测分析表明,暖云过程在内雨带(云墙)是主要的,冰云过程在外雨带(离 TC 中心 150km 以上)则更重要^[20]。还有研究基于多种观测数据,结合网格再分析资料,分析台风登陆过程中的动、热力结构特征^[21-22]。

这些结果表明,利用新的卫星、雷达等探测手段,

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(42075064)

作者简介: 李江南(1968—),男,湖南新宁人,博士,副教授,博士生导师。主要从事台风暴雨的研究。E-mail:essljin@mail.sysu.edu.cn

可以揭示 TC 降水和云微物理的一些结构特征^[23,24],也可以对数值模拟结果进行验证或评估^[1,25-29]。但静止卫星难以探测云下的资料,极轨卫星又不能时空上连续探测^[17],雷达也很难探测海上 TC 的连续变化过程。因此,还需要更多更好的探测技术方法对 TC 云微物理过程进行连续的加密观测。但目前 TC 的直接观测仍然是 TC 研究和业务的短板^[30],大力推进 TC 飞机观测系统建设是有必要的。如:无人机和平流层飞艇等新型观测平台^[31]。中国气象局于 2018 年启动的“海燕计划”就是基于无人机下投探空系统对 TC 外围云系进行了 CT 式立体“扫描”。这些探测结果有望揭示 TC 云微物理精细结构的演变规律,据此改进数值模式的微物理参数化方案,提升预报能力^[31]。

2 数值模拟研究

2.1 云微物理过程对 TC 路径的影响

很多研究表明了云微物理方案对 TC 路径影响不大^[4,28,32-37]。也有些研究表明了云微物理过程可以影响 TC 路径。如:程锐等^[38]的研究表明云微物理过程可以通过对台风强度的改变从而对路径产生影响。花丛和刘奇俊^[39]在对 2007 年秋季台风“罗莎”的模拟研究中表明,云微物理过程及潜热的改变对 TC 路径有明显的影响。周昊等^[26]模拟结果表明,微物理方案对台风路径的影响较大,并认为是不同微物理方案在模拟副热带高压和东亚长波槽的演变特征上不同,导致了对 TC 路径模拟的差异。

2.2 云微物理过程对 TC 强度的影响

Ming 等^[40]对 TC“桑美”(2006)进行不同云微物理参数化的对比研究,发现模式中不同的云微物理方案对 TC 路径影响较小,对 TC 强度和内核结构影响较大,潜热的释放决定了 TC 的强度和内核结构,对 TC 的强度有正反馈作用。TC 强度的预报很依赖于云微物理方案的选择^[41]。但 Wang^[42]通过理想试验研究指出,TC 的增强速率和最终强度对云微物理参数化方案并不敏感。早期用二维模式研究^[43-44]表明冰相过程比没有冰相过程可以产生更低的海平面气压,使得 TC 加强。Zhu and Zhang^[35]对台风个例模拟研究表明,微物理过程对台风强度和结构有明显的影响。不考虑冰或霰,水平平流增强,云水分布广泛,台风减弱。Zhao 等^[45]模拟研究表明,台风内核区霰和雪的显著增加与 TC 快速增强(RI)阶段相吻合。

很多的研究表明眼壁内核区的潜热加热更有利

于 TC 加强^[33,46-47]。Li 等^[48]发现单参数和双参数云微物理方案主要是影响 TC 结构,从而影响 TC 强度。单参数方案模拟的 TC 眼区更小,最大风速半径更小,云墙区的潜热加热离 TC 中心更近,TC 的暖心正偏差更大,使得 TC 更强。使 TC 加强的主要加热过程是水汽凝结成云水、雪的凝华增长和云冰的凝华增长;使 TC 减弱的主要冷却过程是雨水的蒸发、雪的升华和霰的融化^[4]。凝结和凝华潜热分别在对流层中低层和高层对 TC 快速加强起主要作用^[49]。

外围雨带的微物理过程对 TC 强度也有很大影响。Wang^[50]指出外围螺旋雨带中凝结加热的分布和变化影响了 TC 强度和结构。非绝热加热(冷却)通过影响外围雨带和内核结构,导致 TC 增强(减弱)^[51];眼壁内核区的蒸发冷却对 TC 强度影响有限,主要是外围雨带的蒸发冷却抑制了 TC 加强^[52]。Chan and Chan^[34]也认为眼壁外雨带中的潜热释放可以使 TC 增强增大,霰过程对 TC 没有明显的影响。但 Mukhopadhyay 等^[53]的研究表明,内核区的潜热加热主要是霰过程控制。

2.3 云微物理过程对 TC 降水的影响

云微物理过程对于成云致雨是非常重要的。TC 暴雨增幅主要是通过雨水对云水的碰并收集和霰粒子融化成雨水^[54],冰相过程对地面降水的贡献明显加大。霰粒子融化成雨水在弱降水中更为重要^[55]。对流降水和层云降水的云微物理特征和过程有明显差异^[56]。冰相过程对不同阶段台风暴雨形成起关键作用,霰粒子融化是台风暴雨的主要雨水源项^[57]。霰和雪的融化是台风螺旋雨带中雨滴增长的主要机制之一^[58]。冰相粒子的减少以及霰粒子的转化,是台风登陆后降水维持和增幅的直接原因^[59]。霰在台风对流性和层云降水区都是最重要的凝结水物质^[60]。云冰和雪对降水的辐射效应明显强于云水和雨滴^[61]。有些研究表明暖云过程在 TC 降水中更重要。如:冰相过程对台风“莫拉克”(2009)降水的影响并不是主要的,暖雨更重要^[62]。暖云微物理参数化产生更强的降水率,但是降水面积较小^[42]。如果不考虑云冰、雪和霰的融化,降水量增加显著^[63]。液相水凝物辐合对 TC 降水云系快速发展贡献明显,固相水凝物辐合贡献不显著^[64]。对流降水区以暖云微物理为主,层状降水区以冰云微物理为主^[65]。

3 小结和讨论

综上所述,近几十年对于 TC 云微物理过程的

研究有了一些进展,特别是对 TC 的云微物理结构有了较深的认识,但云微物理过程如何对 TC 路径、强度和降水产生影响还有很多不同观点,这些不确定性影响了业务数值预报模式如何选择云微物理方案。要提高 TC 预报的水平还有些基础问题是值得研究的,如:TC 云、降水和潜热收支的三维结构特征是什么?影响 TC 强度和降水变化的主要云微物理过程是哪些?热力和动力过程相互作用影响 TC 强度和降水变化的物理机制是什么?秋季 TC 云微物理过程和夏季 TC 有什么主要不同?

已有的研究工作主要是基于夏季 TC 个例,对秋季 TC 的研究还不多。实际上夏季和秋季的 TC 云微物理过程可能有很大差异。比如在秋季南海,夏季风已慢慢撤退,副高减弱东移,冷空气开始活跃,季风槽多变。与夏季相比,南海秋季 TC 的“运行”环境发生了很大变化,云和降水的形成机制也发生改变。秋季 TC 的平均强度更强^[66-68],生命史更长,路径略向西北方向发展^[67]。夏季 TC 暴雨受西南季风影响较大,秋季 TC 暴雨中冷空气作用更明显。冷空气的作用是造成秋季 TC 登陆加强的重要原因^[69],而林良勋等^[70]认为,冷空气可以使 TC 减弱,也可以使 TC 加强。因此,云微物理过程对秋季 TC 强度和降水的影响机制还不清楚,夏季 TC 和秋季 TC 的云微物理过程有何不同还缺少对比研究。

当前的中小尺度数值模式正向云解析尺度发展,但由于云微物理过程发生在云滴和雨滴的尺度上,再细的网格也需要对云微物理过程进行参数化处理。根据表征粒子类型尺度分布的方式不同,参数化方法分为两类,一种是分档法(bin 方案),另一种是整体参数化(bulk 方案)。bulk 方案又可分为单参数方案和双参数方案。如果增加雷达反射率的预报方程,允许 γ 分布的形状参数独立变化,则有三参数方案^[71]。根据云的相态可分为暖云方案和混合相云方案。根据粒子类型的多少又可分为简单方案和复杂方案。还有考虑(或不考虑)气溶胶对云微物理过程影响的方案。这些不同类型的方案所包含的云微物理过程是不同的,因对 TC 的影响也是有区别^[72-75]的。在不同季节、不同区域,采用哪一种云微物理方案都是值得研究的问题。模式的分辨率或其它物理方案的配置也可能影响预报结果。总之,如何选择云微物理参数化方案,以期在 TC 路径、强度和风雨分布三个方面都得到最佳的预报效果还需要很多的研究。

当然,影响 TC 路径、强度和风雨分布的物理因子很多,云微物理过程只是其中一个方面。各种物理因子之间也有很复杂的非线性相互作用。本文总结了很多方面的不确定性,也是反映了 TC 云微物理基础理论研究薄弱,突破性的研究成果较少,制约了 TC 数值预报水平的提高,特别是 TC 强度的预报。因此,大力推进 TC 观测系统建设,大力提升 TC 理论研究水平是非常有必要的^[30]。

参考文献:

- [1] Li J, Wang G, Lin W, et al. Cloud-scale Simulation Study of Typhoon Hagupit(2008) Part I: Microphysical Processes of the Inner Core and Three-Dimensional Structure of the Latent Heat Budget[J]. Atmospheric Research, 2013, 120-121: 170-180.
- [2] Fovell R G, Su H. Impact of Cloud Microphysics on Hurricane Track Forecasts[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 24(34): 497-507.
- [3] Fovell R G, Corbosiero K L, Kuo H C. Cloud Microphysics Impact on Hurricane Track as Revealed in Idealized Experiments[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(66): 1764-1778.
- [4] Li J, Gang W, Lin W, et al. Cloud-scale Simulation Study of Typhoon Hagupit (2008) Part II: Impact of Cloud Microphysical Latent Heat Processes on Typhoon Intensity[J]. Atmospheric Research, 2013, 120-121: 202-215.
- [5] 张定媛,田晓阳,贾朋群. 热带气旋预报性能及指标综合评价述[J]. 气象, 2018, 44(12): 1628-1634.
- [6] 杨璐,费建芳,黄小刚,等. 西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 943-954.
- [7] 任福民,向纯怡. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(04): 8-18.
- [8] 庞琦烨,平凡,沈新勇,等. 不同微物理方案对台风“彩虹”(2015)降水影响的比较研究[J]. 大气科学, 2019, 43(1): 202-220.
- [9] 常婉婷,高文华,端义宏,等. 云微物理过程对台风数值模拟的影响[J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 443-455.
- [10] Xu H Y, Li X F. Sensitivity of WRF Model Simulations to Parameterizations of Depositional Growth of Ice Crystal During the Landfall of Typhoon Fitow(2013)[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2019, 145(722): 2161-2180.
- [11] 马雷鸣,端义宏. 利用 TRMM 资料对热带气旋“威马逊”结构及其降水特征的研究[J]. 海洋学报(中文版), 2005, 27(1): 36-44.

- [12] 傅云飞,刘栋,王雨,等. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征[J]. 气象学报, 2007, 65(3): 316–328.
- [13] Yokoyama C, Takayabu Y N. A Statistical Study on Rain Characteristics of Tropical Cyclones Using TRMM Satellite Data[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(10): 3848–3862.
- [14] 高洋,方翔. 基于 CloudSat 卫星分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征[J]. 气象, 2018, 44(5): 597–611.
- [15] Tourville N, Stephens G, Demaria M, et al. Remote Sensing of Tropical Cyclones: Observations from CloudSat and A-Train Profilers[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(4): 609–622.
- [16] 张晁祺,傅云飞. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. 大气科学, 2018, 42(1): 33–51.
- [17] 丁金才,郭英华,郭永润,等. 利用 COSMIC 资料对 17 个台风热力结构的合成分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 31–43.
- [18] 王瑾,江吉喜. AMSU 资料揭示的不同强度热带气旋热力结构特征[J]. 应用气象学报, 2005(2): 159–166, 267–269.
- [19] 李小青,杨虎,游然,等. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2843–2853.
- [20] Wu D, Zhao K, Kumjian M R, et al. Kinematics and Microphysics of Convection in the Outer Rainband of Typhoon Nida (2016) Revealed by Polarimetric Radar[J]. Monthly Weather Review, 2018, 146(7): 2147–2159.
- [21] 王尚宏,汤杰,雷小途. 登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析[J]. 气象, 2018, 44(5): 612–620.
- [22] 颜玲,周玉淑,刘宣飞. 1410 号台风 Matmo 登陆前后的动热力结构演变和水汽输送特征分析[J]. 2017, 41(2): 289–301.
- [23] 赵震. 2016 年台风“莫兰蒂”结构特征的多源卫星探测分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 156–164.
- [24] Zhang X, Tang J, Wu C, et al. An Observational Study of the Inner Core Structure of Typhoon Meranti (2016) near Landfall[J]. Atmospheric Science Letters, 2020, 21(4): 960–962.
- [25] 徐金霞,刘奇俊,宋振鑫. 台风“莫拉克”降水观测与云物理特征的模拟研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(3): 292–301.
- [26] 周昊,朱伟军,彭世球. 不同微物理方案和边界层方案对超强台风“鲇鱼”路径和强度模拟的影响分析[J]. 热带气象学报, 2013, 29(5): 803–812.
- [27] 朱士超,郭学良. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 370–384.
- [28] 邓琳,端义宏,高文华,等. 超强台风“威马逊”(2014)云微物理特征的模拟与对比分析[J]. 气象学报, 2016, 74(5): 697–714.
- [29] 李思聪,李昀英,孙国荣. 基于 CloudSat 观测资料对 WRF 模式的冷锋降水过程云参数模拟效果检验[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(2): 81–89.
- [30] 端义宏,方娟,程正泉,等. 热带气旋研究和业务预报进展——第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会(IWTC-9)综述[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 537–550.
- [31] 雷小途,张雪芬,段晚锁,等. 近海台风立体协同观测科学试验[J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 671–678.
- [32] Pattnaik S, Krishnamurti T N. Impact of Cloud Microphysical Processes on Hurricane Intensity, part 1: Control Run[J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2007, 97(1–4): 117–126.
- [33] Li X, Pu Z. Sensitivity of Numerical Simulation of Early Rapid Intensification of Hurricane Emily (2005) to Cloud Microphysical and Planetary Boundary Layer Parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(12): 4819–4838.
- [34] Chan K T F, Chan J C L. Sensitivity of the Simulation of Tropical Cyclone Size to Microphysics Schemes[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(9): 1024–1035.
- [35] Zhu T, Zhang D L. Numerical Simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part II: Sensitivity to Varying Cloud Microphysical Processes[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006(63): 109–126.
- [36] Tao W, Shi J J, Chen S S, et al. The Impact of Microphysical Schemes on Hurricane Intensity and Track[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 47(1): 1–16.
- [37] Li Z, Zhang Y T, Liu Q J, et al. A Study of the Influence of Microphysical Processes on Typhoon Nida (2016) Using a New Double-Moment Microphysics Scheme in the Weather Research and Forecasting Model[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 24(2): 123–130.
- [38] 程锐,宇如聪,傅云飞,等. 台风“云娜”在近海强度变化及结构特征的数值研究 I: 云微物理参数化对云结构及降水特征的影响[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 764–776.
- [39] 花丛,刘奇俊. 云微物理过程影响登陆台风结构及降水的数值试验[J]. 热带气象学报, 2013, 29(6): 924–934.
- [40] Ming J, Wang Y. Modeling Rapid Intensification of Typhoon Saomai (2006) with the Weather Research and Forecasting Model and Sensitivity to Cloud Microphysical Parameterizations[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2012, 90(5): 771–789.
- [41] Khain A, Lynn B, Shpund J. High Resolution WRF Simu-

- lations of Hurricane Irene: Sensitivity to Aerosols and Choice of Microphysical Schemes[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 129–145.
- [42] Wang Y Q. An explicit Simulation of Tropical Cyclones With a Triply Nested Movable Mesh Primitive Equation Model: TCM3. Part II: Model Refinements and Sensitivity to Cloud Microphysics Parameterization[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(12): 3022–3036.
- [43] Lord S J, Willoughby H E, Piotrowicz J M. Role of a Parameterized Ice-Phase Microphysics in an Axisymmetric, Nonhydrostatic Tropical Cyclone Model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984.
- [44] Willoughby H E, Jin H L, Lord S J, et al. Hurricane Structure and Evolution as Simulated by an Axisymmetric, Nonhydrostatic Numerical Model[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1984, 41(7): 1169–1186.
- [45] Zhao D J, Yu Y B, Yin J F, et al. Effects of Microphysical Latent Heating on the Rapid Intensification of Typhoon Hato(2017)[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020 (34): 368–386.
- [46] Vigh J L, Schubert W H. Rapid Development of the Tropical Cyclone Warm Core[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66(11): 3335–3350.
- [47] Chen H, Zhang D L. On the Rapid Intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective Bursts and the Upper-Level Warm Core[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(1): 146–162.
- [48] Li J N, Ding C H, Li F Z, et al. Effects of Single- and Double-Moment Microphysics Schemes on the Intensity of Super Typhoon Sarika(2016)[J]. *Atmospheric Research*, 2020(238): 104894.
- [49] Li M X, Ping F, Tang X B, et al. Effects of Microphysical Processes on the Rapid Intensification of Super-Typhoon Meranti[J]. *Atmospheric Research*, 2019(219): 77–94.
- [50] Wang Y Q. How do Outer Spiral Rainbands Affect Tropical Cyclone Structure and Intensity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 5(66): 1250–1273.
- [51] Li Q Q, Wang Y Q, Duan Y H. Effects of Diabatic Heating and Cooling in the Rapid Filamentation Zone on Structure and Intensity of a Simulated Tropical Cyclone[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(9): 3144–3163.
- [52] Li Q Q, Wang Y Q, Duan Y H. Impacts of Evaporation of Rainwater on Tropical Cyclone Structure and Intensity—A Revisit[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72 (4): 1323–1345.
- [53] Mukhopadhyay P, Taraphdar S, Goswami B N. Influence of Moist Processes on Track and Intensity Forecast of Cyclones over the North Indian Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D5).
- [54] Ren C, Cui X. The Cloud –Microphysical Cause of Torrential Rainfall Amplification Associated with Bilis (0604) [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (9): 2100–2111.
- [55] Cui X D, Wang Y P, Yu H. Microphysical Differences with Rainfall Intensity in Severe Tropical Storm Bilis[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2015, 16(1): 27–31.
- [56] 汪亚萍, 崔晓鹏, 任晨平, 等. “碧利斯”(0604)暴雨过程不同类型降水云微物理特征分析[J]. *大气科学*, 2015, 39 (3): 548–558.
- [57] 杨文霞, 冉令坤, 洪延超. 台风 Wipha 云微物理特征数值模拟[J]. *科技导报*, 2010, 28(23): 34–39.
- [58] 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 台风“云娜”在近海强度变化及结构特征的数值研究 II: 云微物理参数化对强度和路径的影响[J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 777–786.
- [59] 刘继晨, 钟玮, 刘爽, 等. 登陆台风内降水效率变化对降水增幅影响的分析 [J]. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 193–206.
- [60] Franklin C N, Holland G J, May P T. Sensitivity of Tropical Cyclone Rainbands to Ice –Phase Microphysics [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(8): 2473–2493.
- [61] Wang B, Xu H Y, Zhai G Q, et al. The Rainfall Responses of Typhoon Soudelor (2015) to Radiative Processes of Cloud Species[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2018, 123(8): 4284–4293.
- [62] Tao W K, Shi J J, Lin P Y, et al. High-Resolution Numerical Simulation of the Extreme Rainfall Associated with Typhoon Morakot[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2011, 22(6): 673.
- [63] Zhu T, Zhang D L, Weng F Z. Numerical Simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part I: Eyewall Evolution and Intensity Changes[J]. *Monthly weather review*, 2004, 132 (1): 225–241.
- [64] 刘圣楠, 崔晓鹏. “碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析[J]. *大气科学*, 2018, 42(1): 192–208.
- [65] Xu H Y, Zhai G Q, Li X E. Convective-Stratiform Rainfall Separation of Typhoon Fitow(2013): A 3D WRF Modeling Study[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 29(3): 315–329.
- [66] 黄菲, 许士斌. 西北太平洋超强台风活动特征及其与 ENSO 的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39 (5): 883–888.
- [67] 耿焕同, 谢佩妍, 史达伟, 等. 基于 FMM 算法的夏秋季登陆中国热带气旋路径分类及特征分析[J]. *大气科学学报*, 2017, 40(3): 390–400.
- [68] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. *气象学报*, 2012, 70(4): 628–641.

- [70] 林良勋, 张格苗, 董永春. 秋季台风为何多致风灾[N]. 中国气象报, 2014-09-16(3).
- [71] 托马斯·汤姆金斯·沃纳. 数值天气和气候预测[M]. 陈葆德, 李泓, 王晓峰, 等, 译. 北京: 气象出版社, 2017.
- [72] 罗栩羽, 夏冬, 高斯, 等. 云凝结核浓度对不同强度南海热带气旋强度影响的个例模拟研究[J]. 热带气象学报, 2020, 36(4): 518-527.
- [73] Shen X, Jiang B, Cao Q, et al. Sensitivity of Precipitation and Structure of Typhoon Hato to Bulk and Explicit Spectral Bin Microphysics Schemes[J]. *Advances in Meteorology*, 2019: 1-14.
- [74] Park J Y, Cha D H, Lee M K, et al. Impact of Cloud Microphysics Schemes on Tropical Cyclone Forecast Over the Western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(18).
- [75] Jiang B L, Huang B, Lin W S, et al. Investigation of the Effects of Anthropogenic Pollution on Typhoon Precipitation and Microphysical Processes Using WRF-Chem[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(4): 1593-1610.

Research progress on the microphysical process of tropical cyclone clouds

Li Jiangnan, Pang Simin

(School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University/ Guangdong Key Laboratory for Climate Change and Natural Disasters, Zhuhai Guangdong 519082)

Abstract: Cloud microphysical process is an important factor affecting the intensity, structure and precipitation of tropical cyclone (TC). In this paper, the research progress of observation, analysis and numerical simulation of TC cloud microphysical processes in recent decades was reviewed. Due to the increase of observation data and the improvement of numerical model refinement, the understanding of the cloud microphysical structure and characteristics of TC is deepened. However, there are still many different views on how cloud microphysical processes affect TC path, intensity and precipitation, which is reflected in the uncertainty of cloud microphysical process impacts on TC numerical prediction. The seasonal and local characteristics of cloud microphysical processes are not clear. How to coordinate and match the cloud microphysics scheme with the model resolution and other physical schemes, and how to select the cloud microphysics scheme for business forecasting need more research.

Key words: tropical cyclone; cloud microphysical process; review