



第五届全国中尺度气象学论坛

台风快速增强过程中的云降水微物理 特征观测与模式应用研究

张云 吴祖航 张立凤 郑鹤鹏

2023.08 银川



□ 台风快速增强过程中的云动力和微物理相互作用

□ 台风数值模拟的微物理参数化方案改进方法研究



台风快速增强的定义

台风快速增强指的是台风登陆前的强度突然变化，是导致台风强度预报困难的重要原因。目前比较常用的台风快速增强的定义有两种：

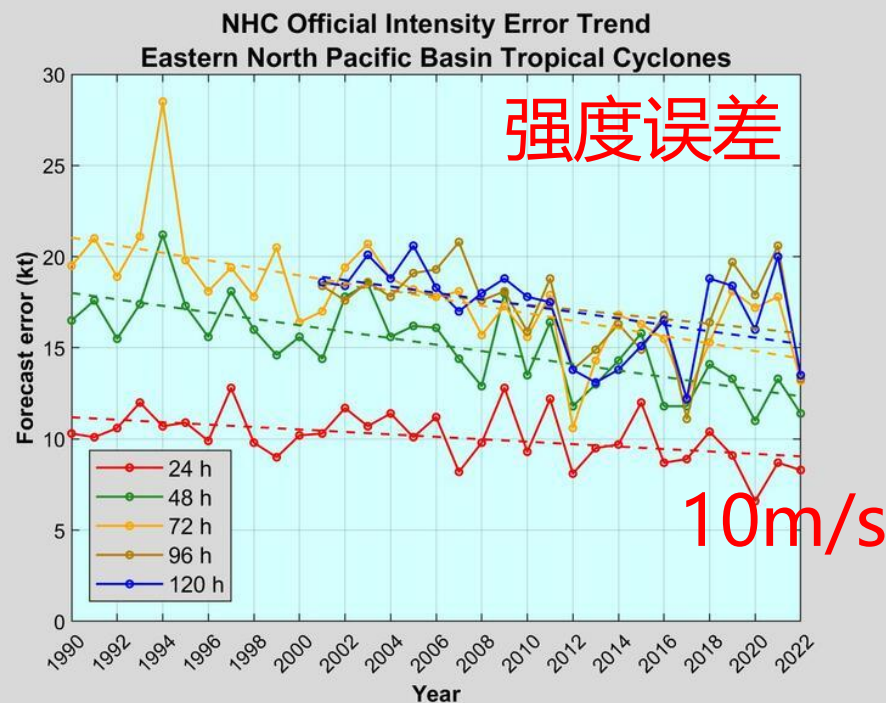
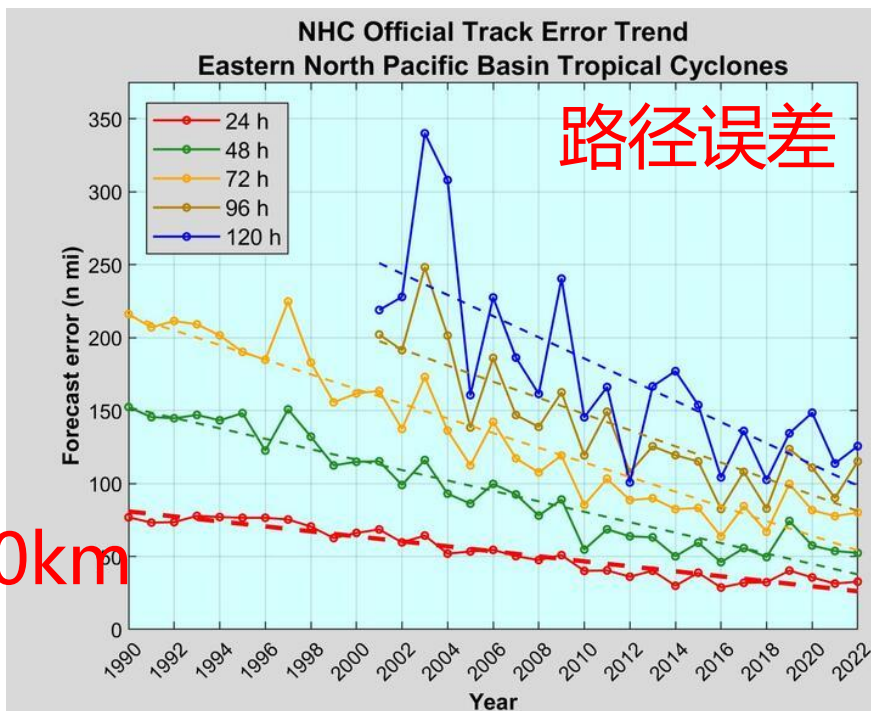
- 第一种是指台风的中心最低海平面气压在24小时内至少下降42hPa (Holliday and Thompson, 1986)
- 第二种是指台风的最大持续风速在24小时内至少增加15 m s⁻¹ (Kaplan and DeMaria, 2003)

- ✓ Holliday, C. R., and A. H. Thompson, 1986: An unusual near equatorial typhoon. *Monthly Weather Review*, 114, 2674–2677.
- ✓ Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Weather and Forecasting*, 18, 1093–1108.



台风快速增强的重要性

过去30年里，相比于台风路径预报，强度预报提升更缓慢



(<https://www.nhc.noaa.gov/verification/verify5.shtml>)

特别是24小时强度预报，面临巨大挑战！
尤其强度快速变化时，难度更大。



台风快速增强的研究进展



热带气旋快速增强计划 (Tropical Cyclone Rapid Intensification, TCRI)

美国海军研究办公室 (ONR) 于2020年提出TCRI计划, 通过3-5年的努力, 以推进对环境主题的基本科学理解, 开发有助于理解RI过程的物理概念框架, 重点关注**微观物理**和**边界层**。

观测策略: 与计划中的外场试验 (NOAA IFEX, NASA和其他项目) 合作, 以增加更多的案例和数据

模拟策略: 协调COAMPS-TC的研究和分析, 结合LES仿真, 研究物理和参数化能力



方法手段

考虑RI通常发生在海上，卫星观测成为首选。从GPM、CloudSat等卫星可以获得RI期间的云降水微物理信息，然而极地轨道卫星的重访频率低，FY-4、Himawari-8等地球静止卫星可以克服这一困难，并提供高时空分辨率的云宏观物理信息。结合GPM、CloudSat、FY-4、Himawari-8等多源卫星资料，拟解决以下问题：

1. 利用多源卫星观测的粒子相态、谱分布及含水量的变化，分析台风快速增强期间的云降水特征演变规律，给出台风快速增强的云微物理指标 (Indicator) 或预报因子 (predictor) 。
2. 结合动力场、环境场要素分析，揭示云降水微物理结构的成因，分析宏微观过程的关联性，加深对云降水粒子形成过程的理解。

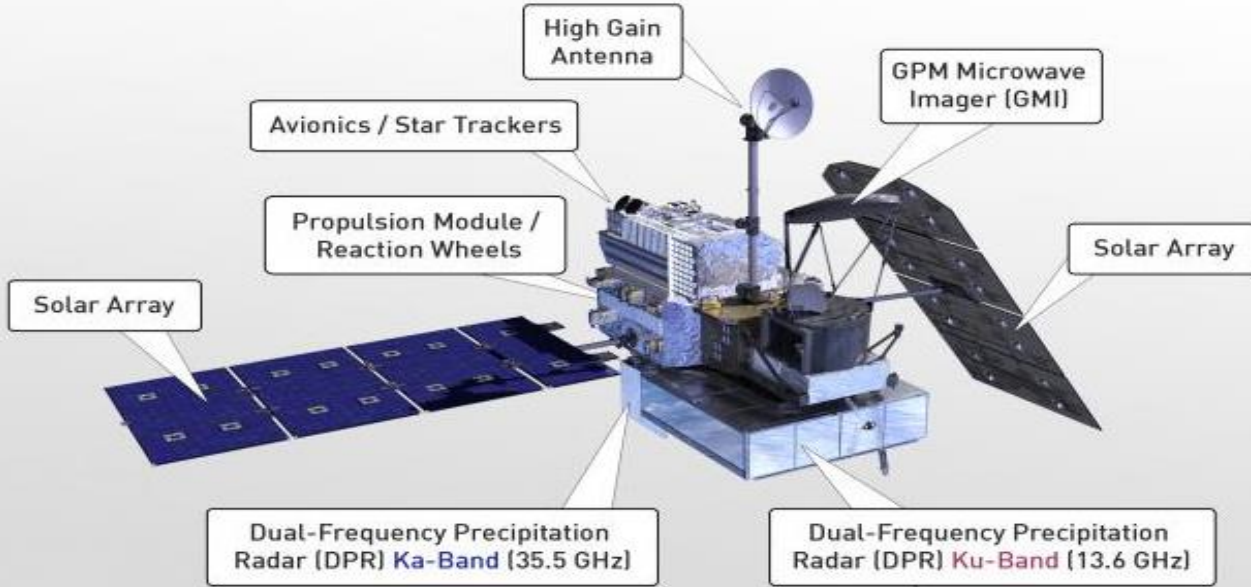


观测仪器

Global Precipitation Measurement (GPM)

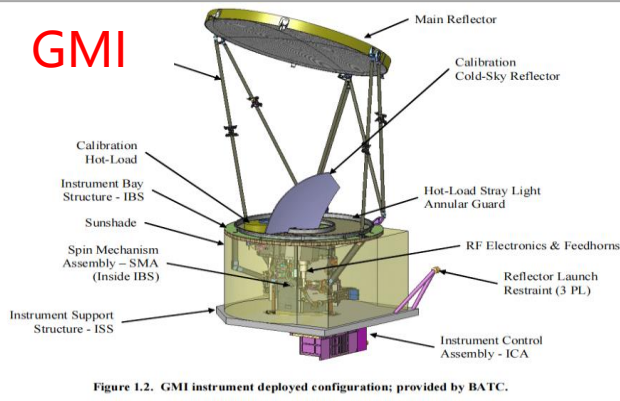
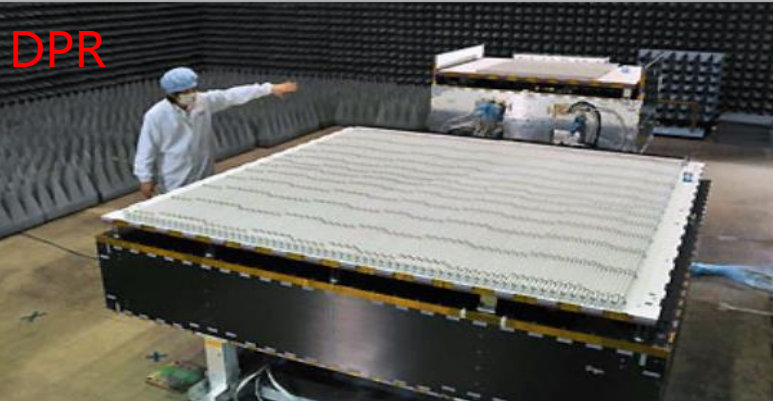
Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) & Microwave Imager (GMI)

Level 2A Product



DPR由Ku波段降水雷达 (KuPR) 和Ka波段降水雷达 (KaPR) 组成, 可提供降水的三维观测, 也将为科学界提供准确的降雨率估计

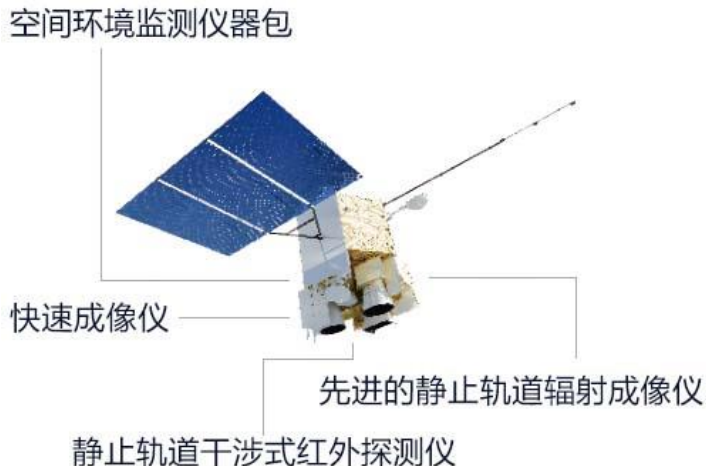
GMI是GPM核心卫星上的圆锥扫描微波辐射计, 具有13个通道, 频率分别为10.65、18.7、23.8、36.64、89、166和183.31 GHz





观测仪器

Fengyun-4 (FY-4) Advanced Geostationary Radiation Imager (AGRI) Level 1B Product



FY-4是我国新一代静止轨道气象卫星观测系统，配备了先进的辐射成像仪AGRI，可提供云和降水宏观结构的连续成像和测量

AGRI的多光谱成像可以准确反演云类型、云顶高度和云导风等。GHI更是国际首个昼夜快速成像仪，可实现1分钟间隔250米分辨率的区域观测

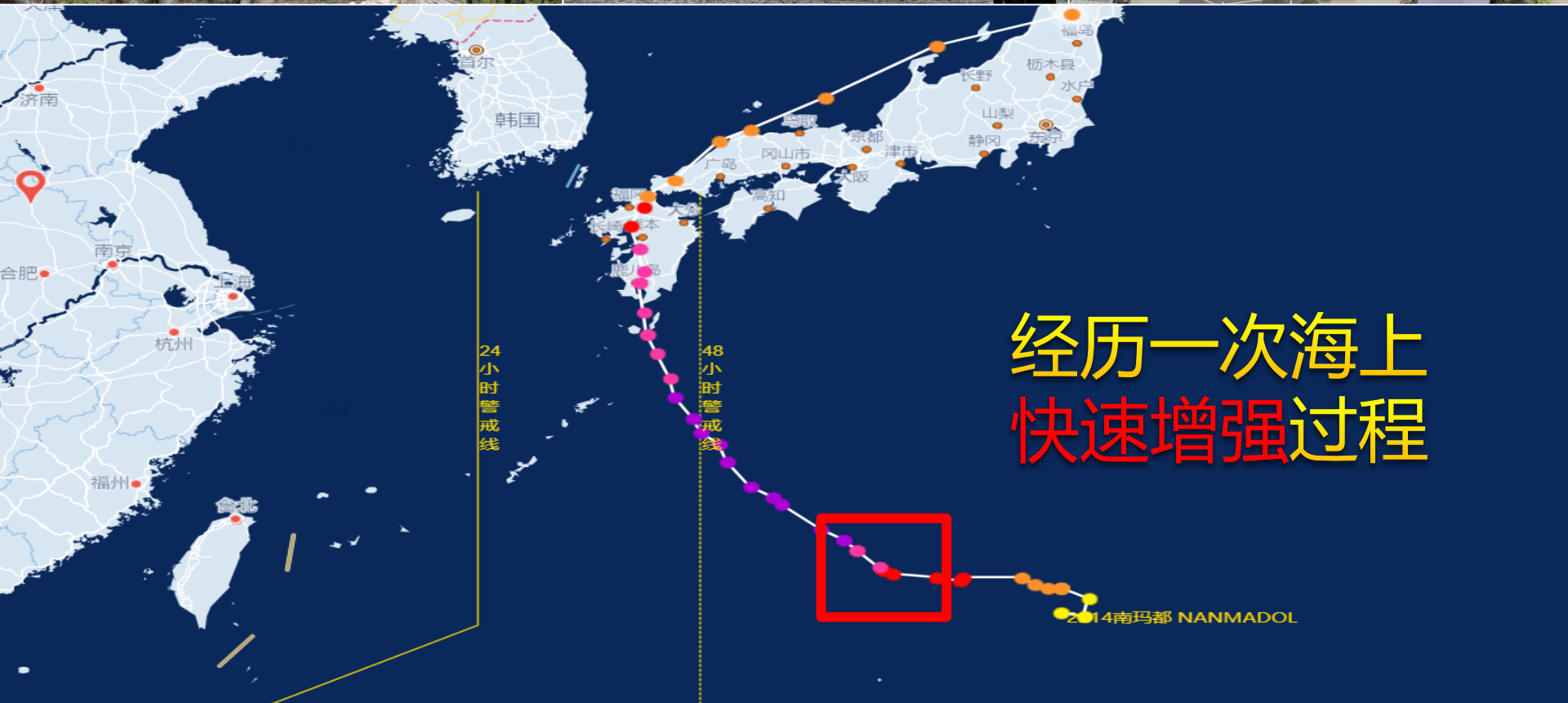
三维水平风场：红外和高空、低空水汽通道云导风资料

1分钟，250米，高时空分辨率拍照

仪器图片	仪器名称	仪器全称	英文全称
	<u>AGRI</u>	先进的静止轨道辐射成像仪	Advanced Geostationary Radiation Imager
	<u>GIIRS</u>	干涉式大气垂直探测仪	Geostationary Interferometric Infrared Sounder
	<u>GHI</u>	快速成像仪	Geo High-speed Imager
	<u>SEP</u>	空间环境监测仪器	Space Environment Monitoring Instrument Package



研究内容-台风“南玛都”





研究内容

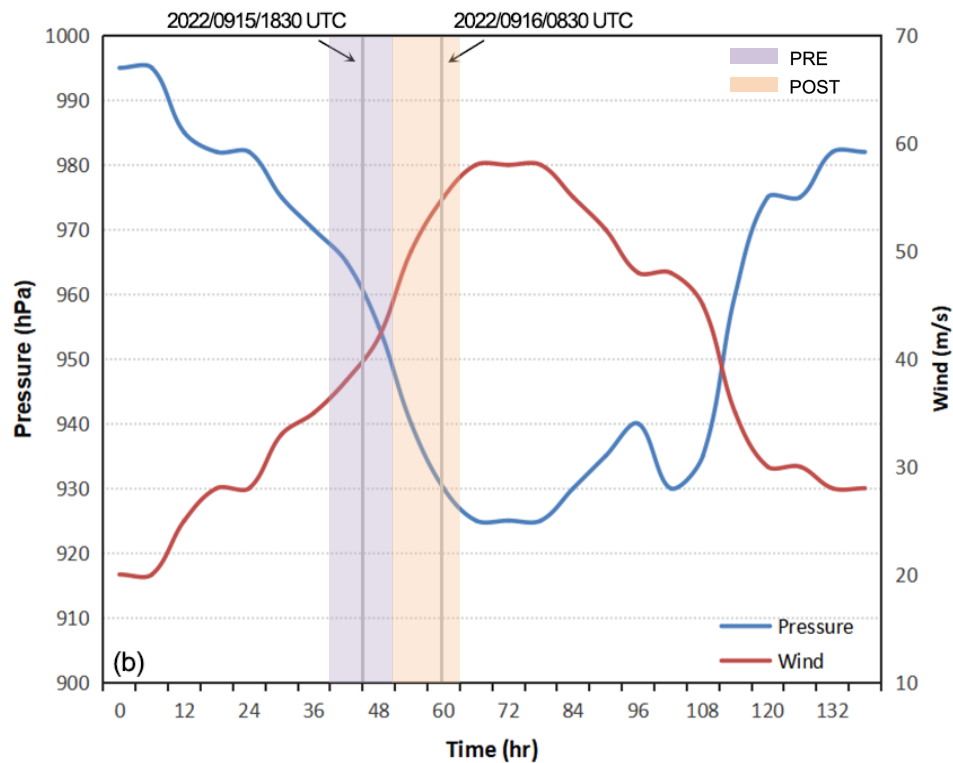
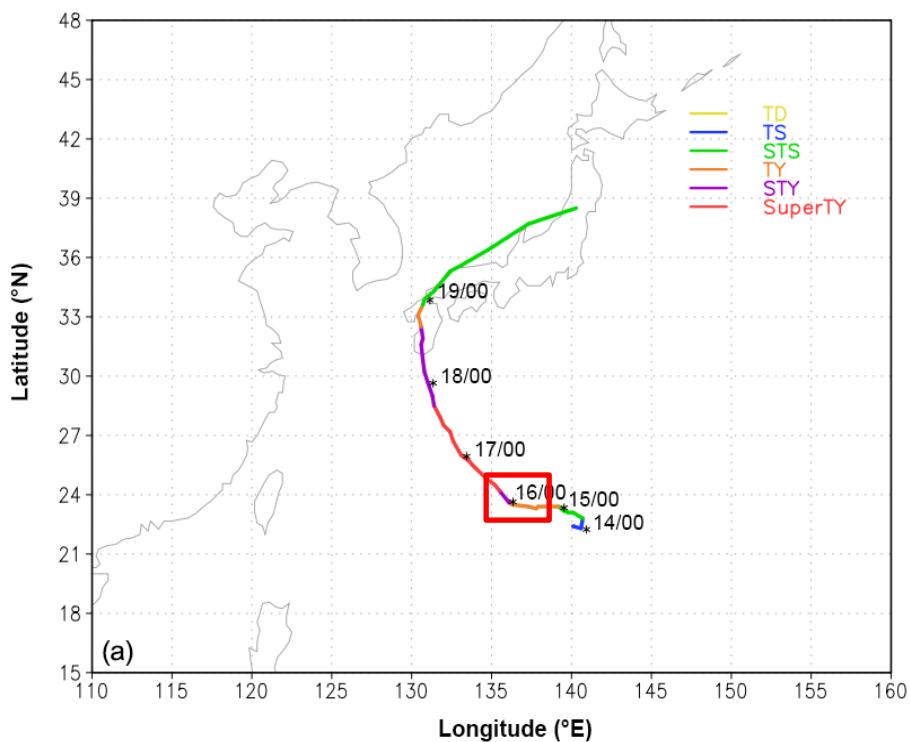
» 选取快速增强的时间段

RI: 0915/1000-0916/1000



PRE: 0915/1000-0915/2200

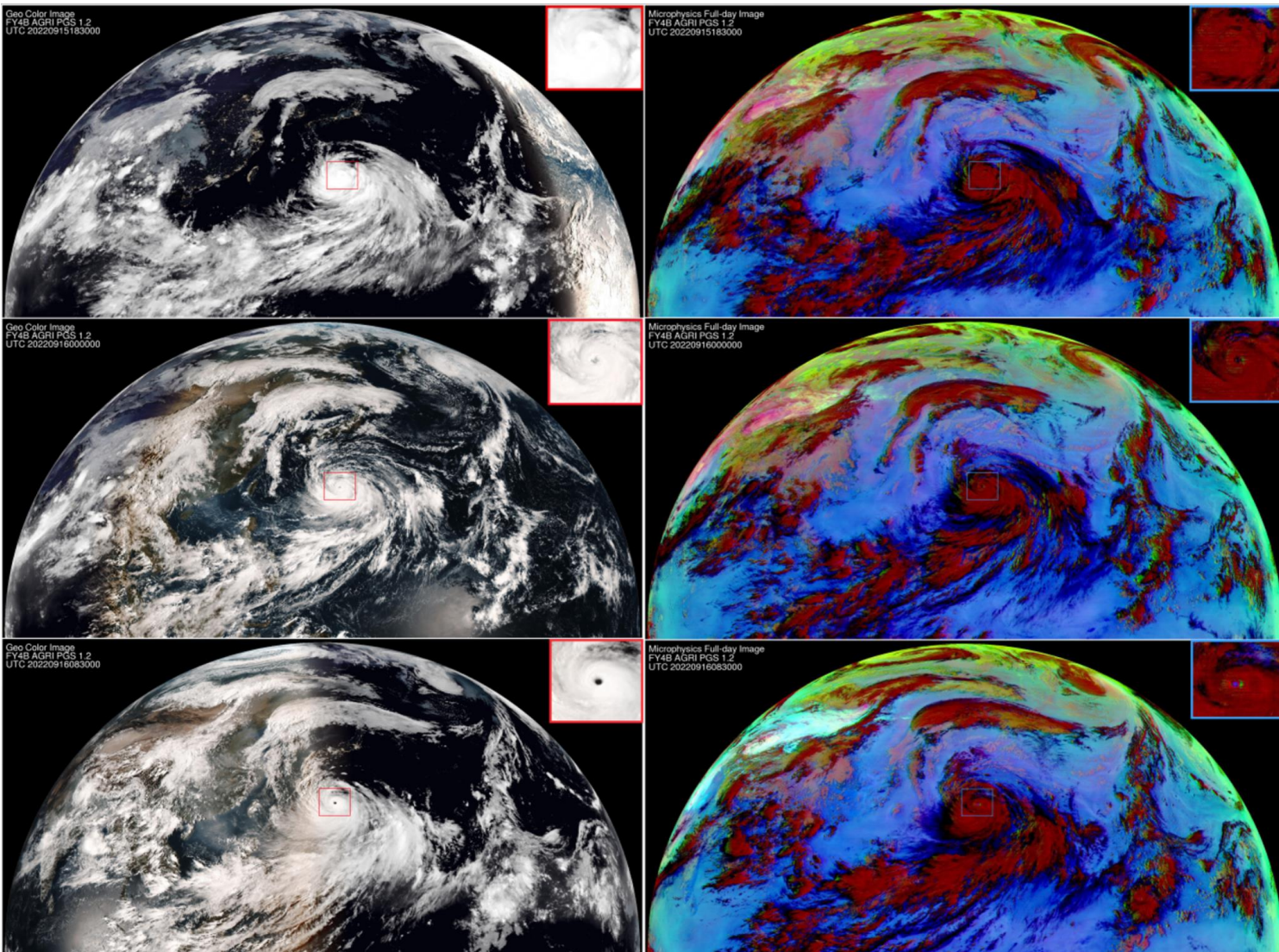
POST: 0915/2200-0916/1000





研究内容

快速增强期间眼的形态变化



①



风眼清晰

②



风眼圆润

③

①



云层消散

②



水云卷入

③



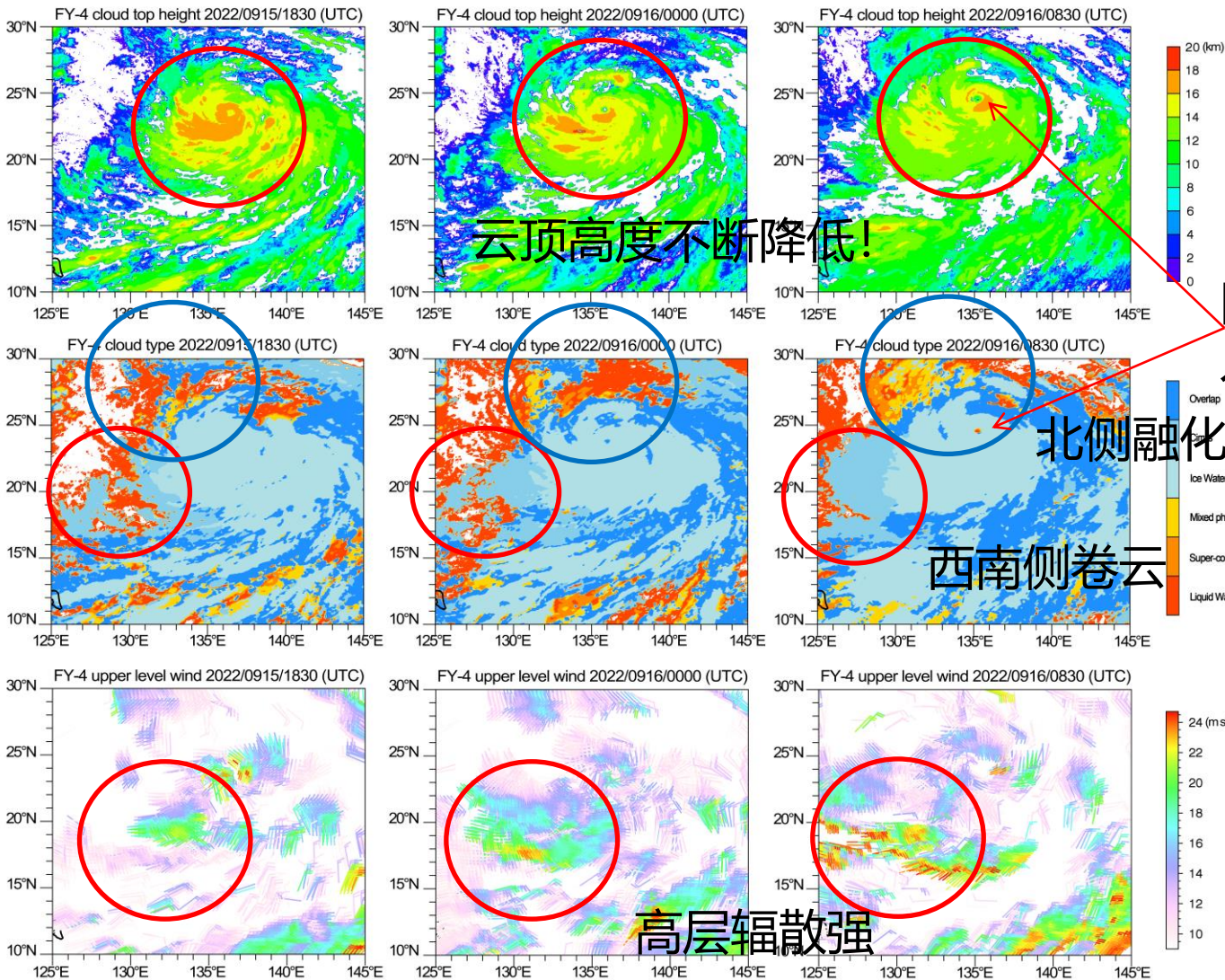
研究内容

快速增强期间的云宏观特征

外围卷云增多

高层辐散增强

云顶高度降低



云顶高度不断降低!

(2km) 眼内低层卷入液态水!

北侧融化区

西南侧卷云

高层辐散强



研究内容

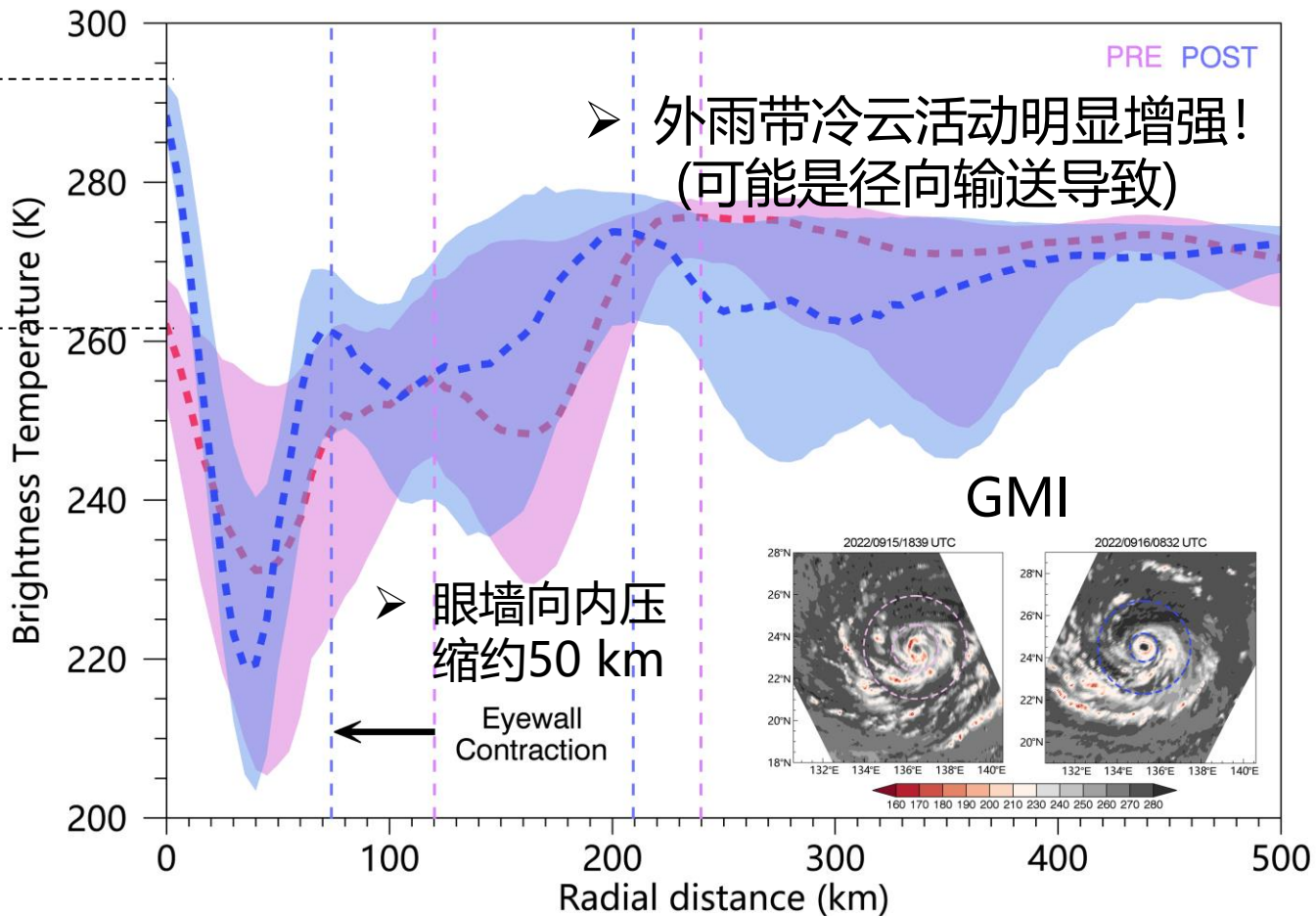
亮温径向分布特征

涡旋Rossby波沿径向向外传播，波峰位置与雨带分界线对应，波谷位置与各雨带位置对应

➤ 台风眼变清晰圆润

TB增加，冰云减少，眼变清晰

TB下降速率光滑，眼变圆润

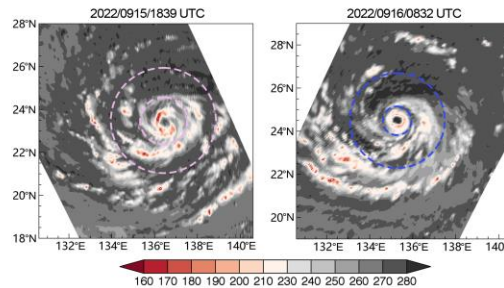


➤ 外雨带冷云活动明显增强!
(可能是径向输送导致)

➤ 眼墙向内压缩约50 km

Eyewall Contraction

GMI

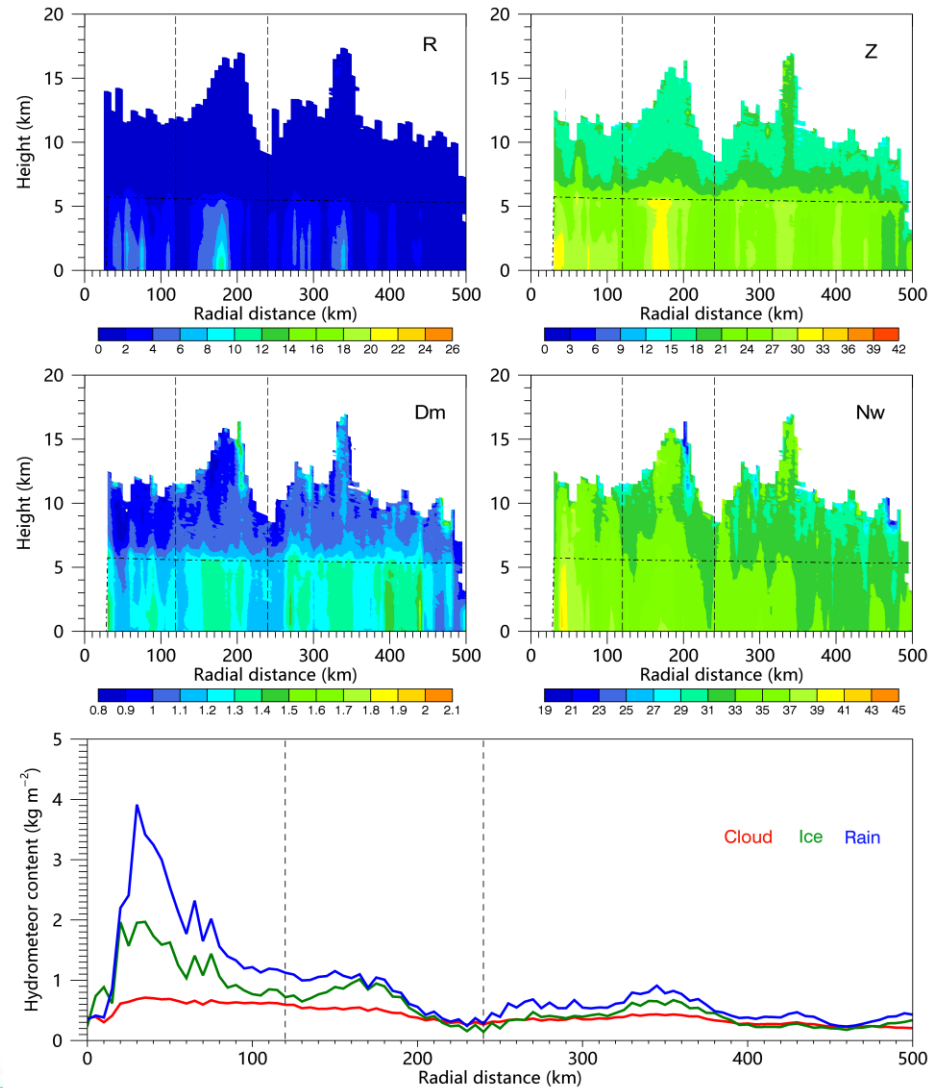




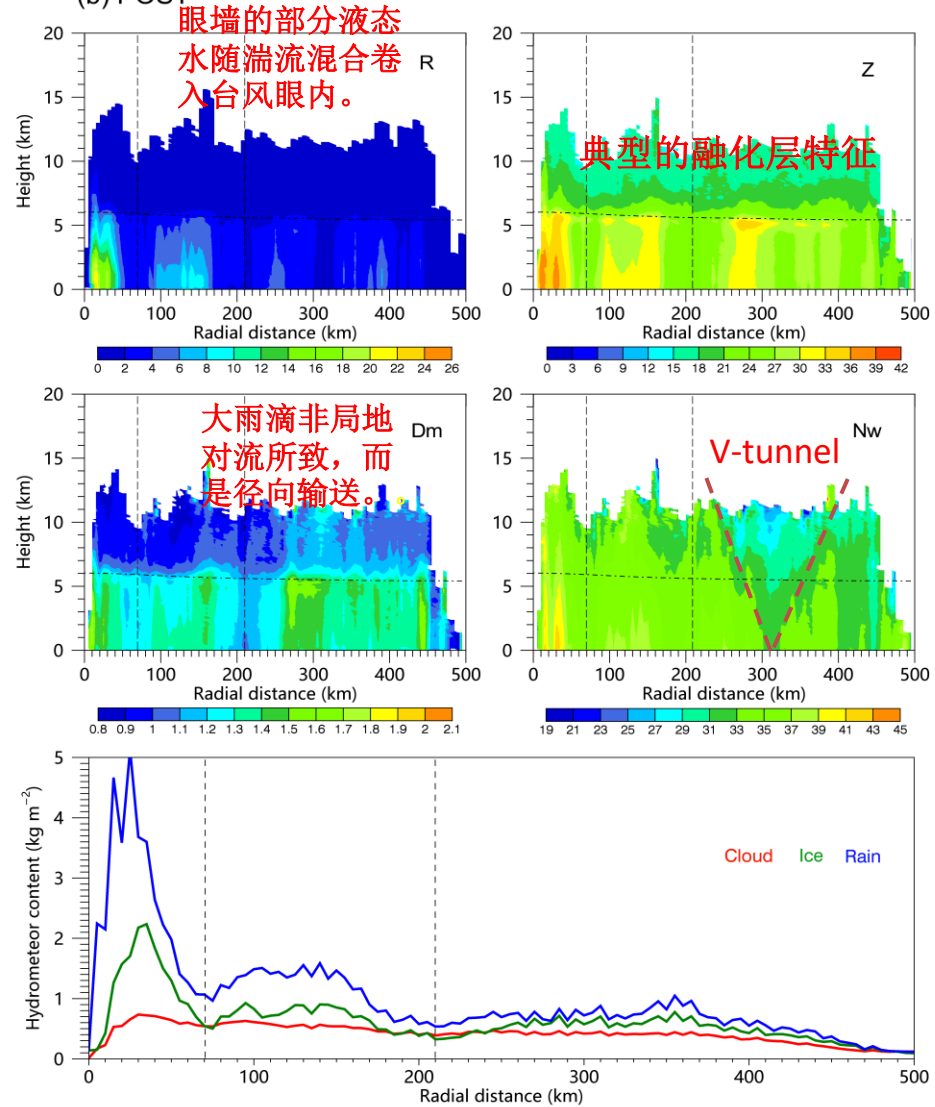
研究内容

降水垂直径向分布--微物理特征 (PRE-POST)

(a) PRE



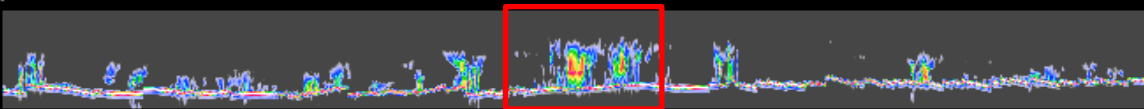
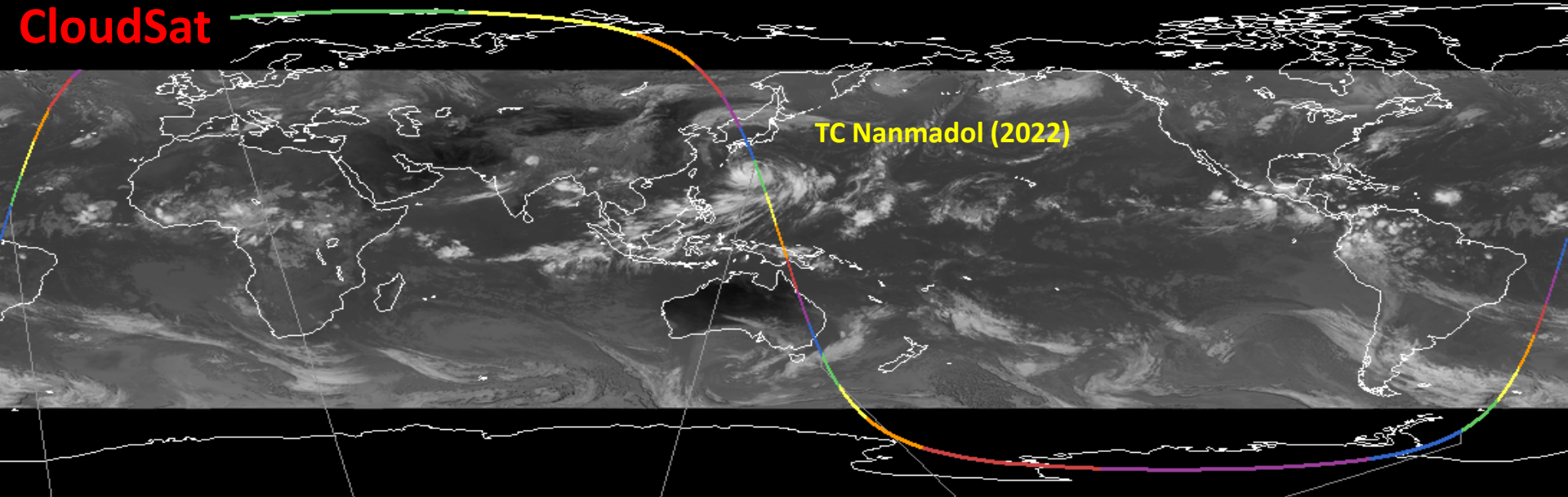
(b) POST



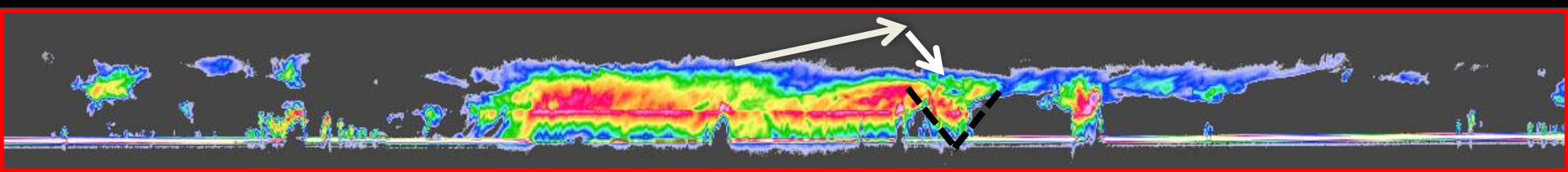


研究内容

CloudSat



2022 Sep 16 (259) 04:38:39 UTC | 1A-AUX | Granule 87320 Reflectivity: Low High CIRA CloudSat DPC
05:35 05:34 05:33



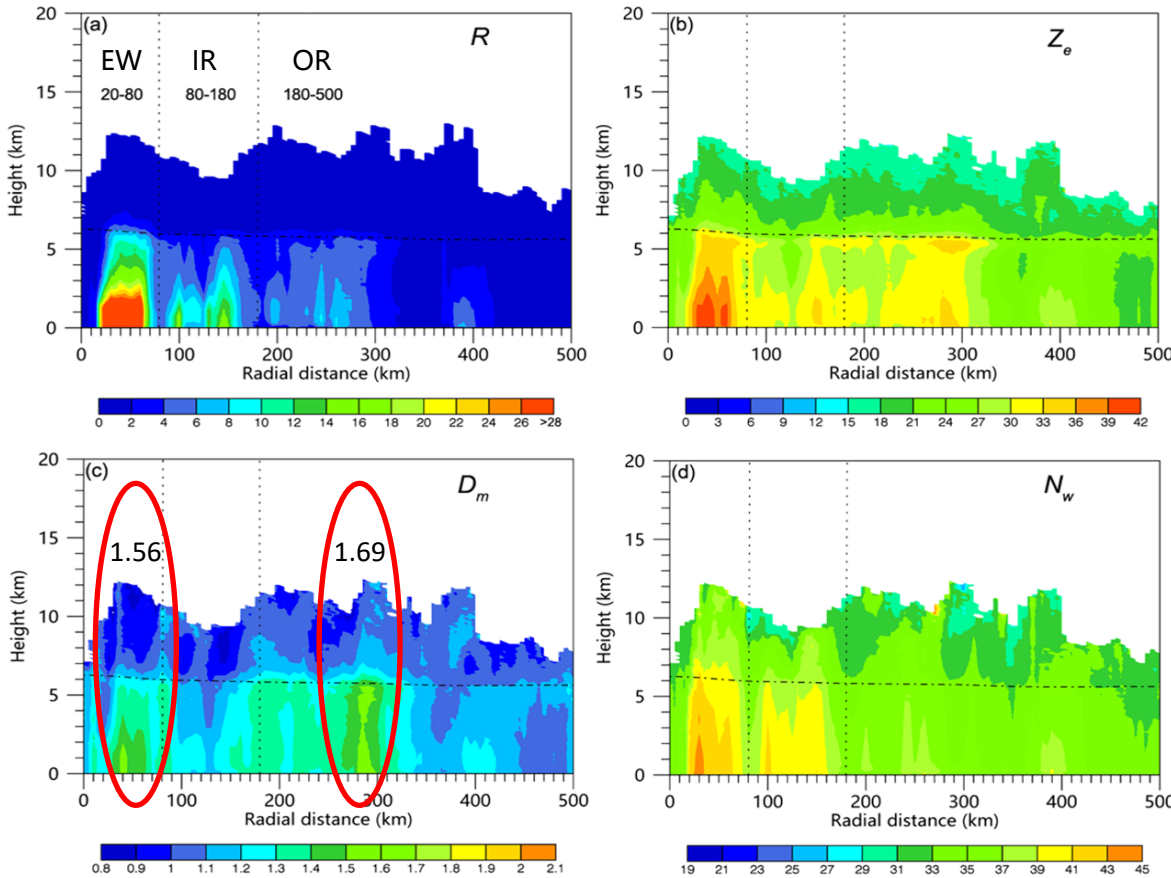


研究内容

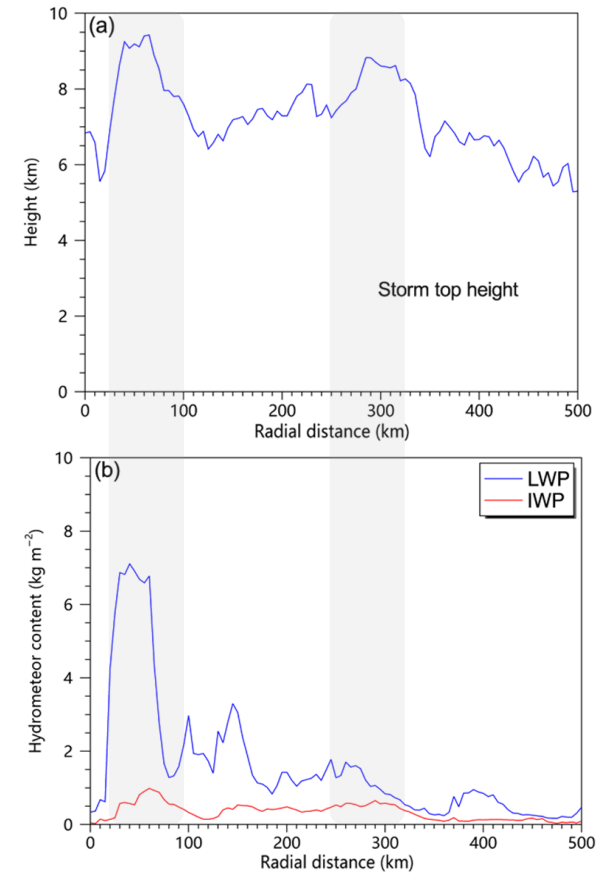
降水垂直径向分布--微物理特征 (台风“利奇马”)

外雨带大雨滴粒径 (1.69) 大于眼墙大雨滴粒径 (1.58)

风暴高度反映TC强对流降水



(Wu & Zhang et al., 2021, AR)



SuperTY Lekima (2019)

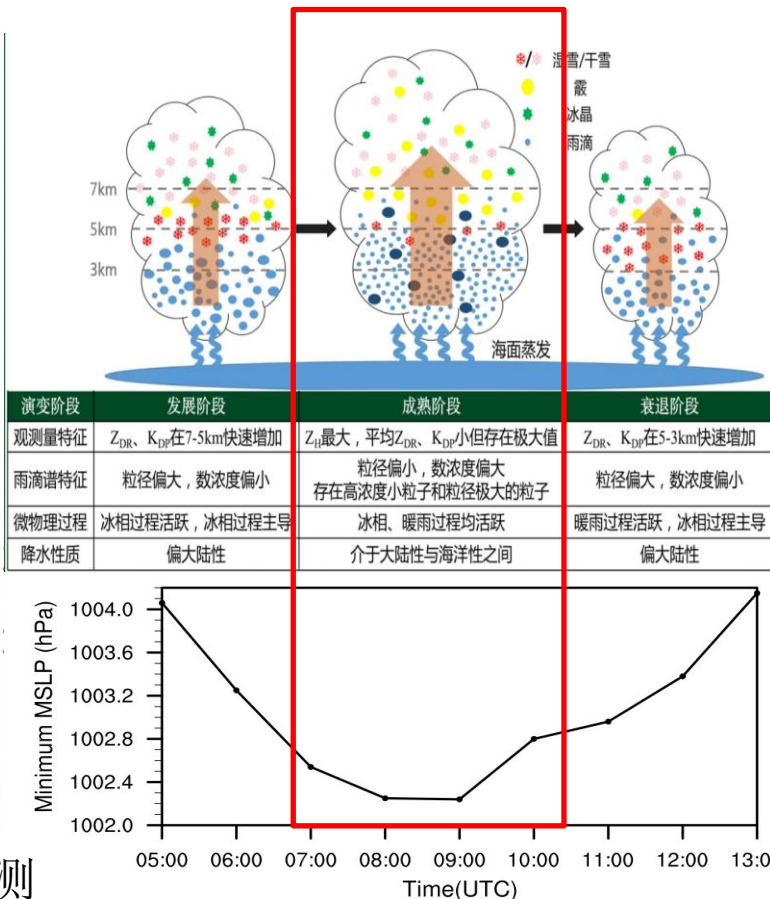
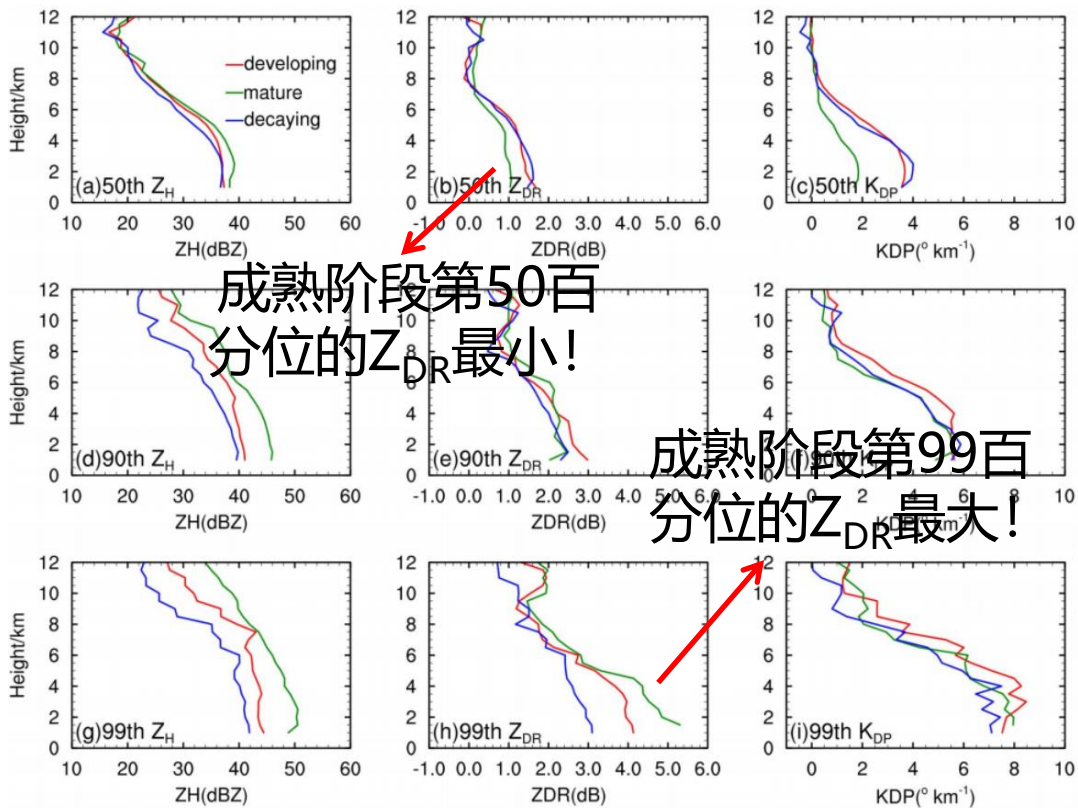


研究内容

外雨带降水微物理特征 (台风“彩云”)

台风成熟阶段的外雨带 Z_{DR} 总体偏小，但存在极大值

外雨带存在少量大雨滴



利用C波段船载双偏振雷达对台风外雨带的微物理观测
(该工作由中山大学杜宇教授团队完成)

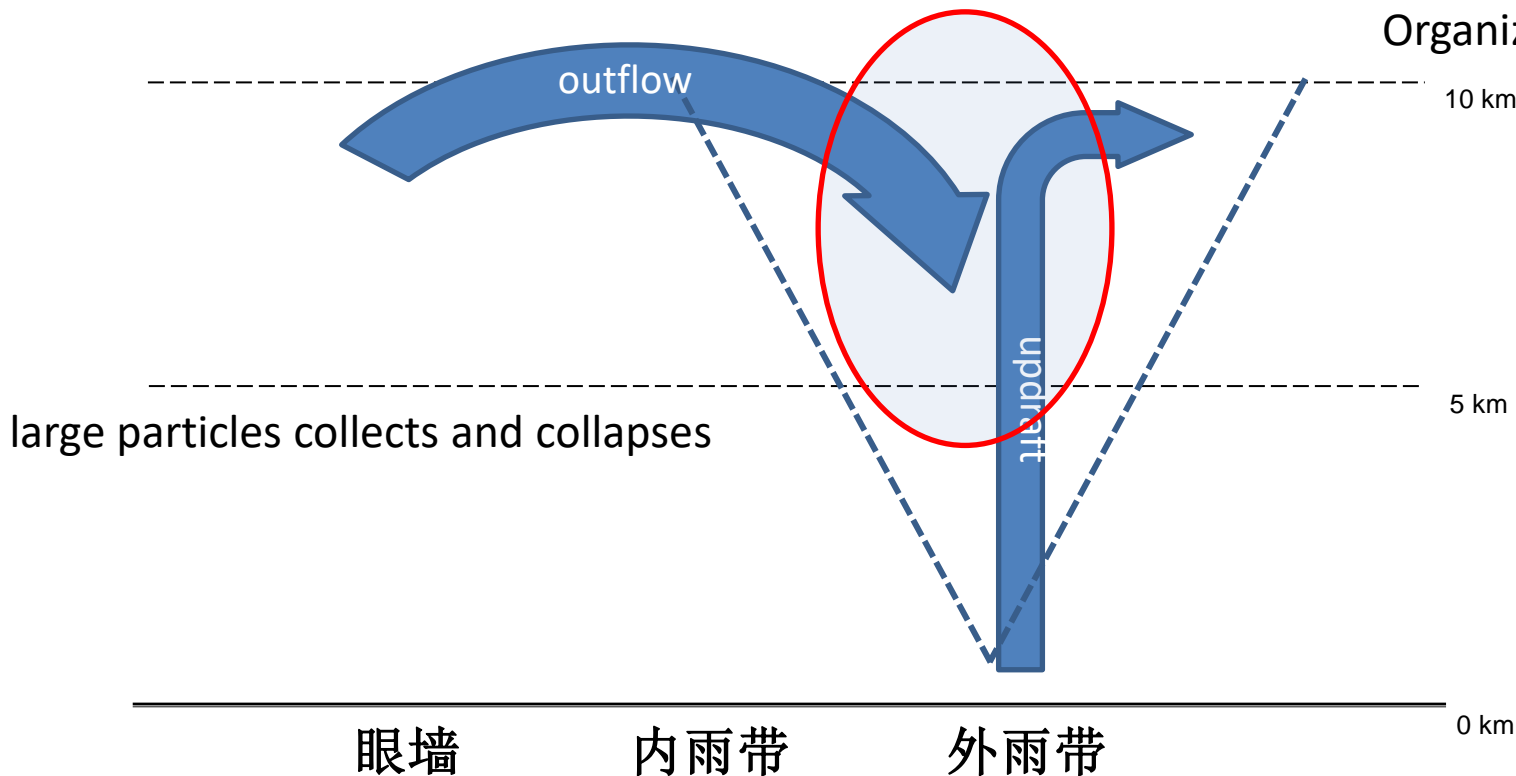
Typhoon Choi-wan (2021)



研究内容

□ 台风RI的“隧道模型” - 微物理

组织化!
Organized!



□ 粒子输送, 堆积, 融化碰并 (蒸发) -> 拖曳

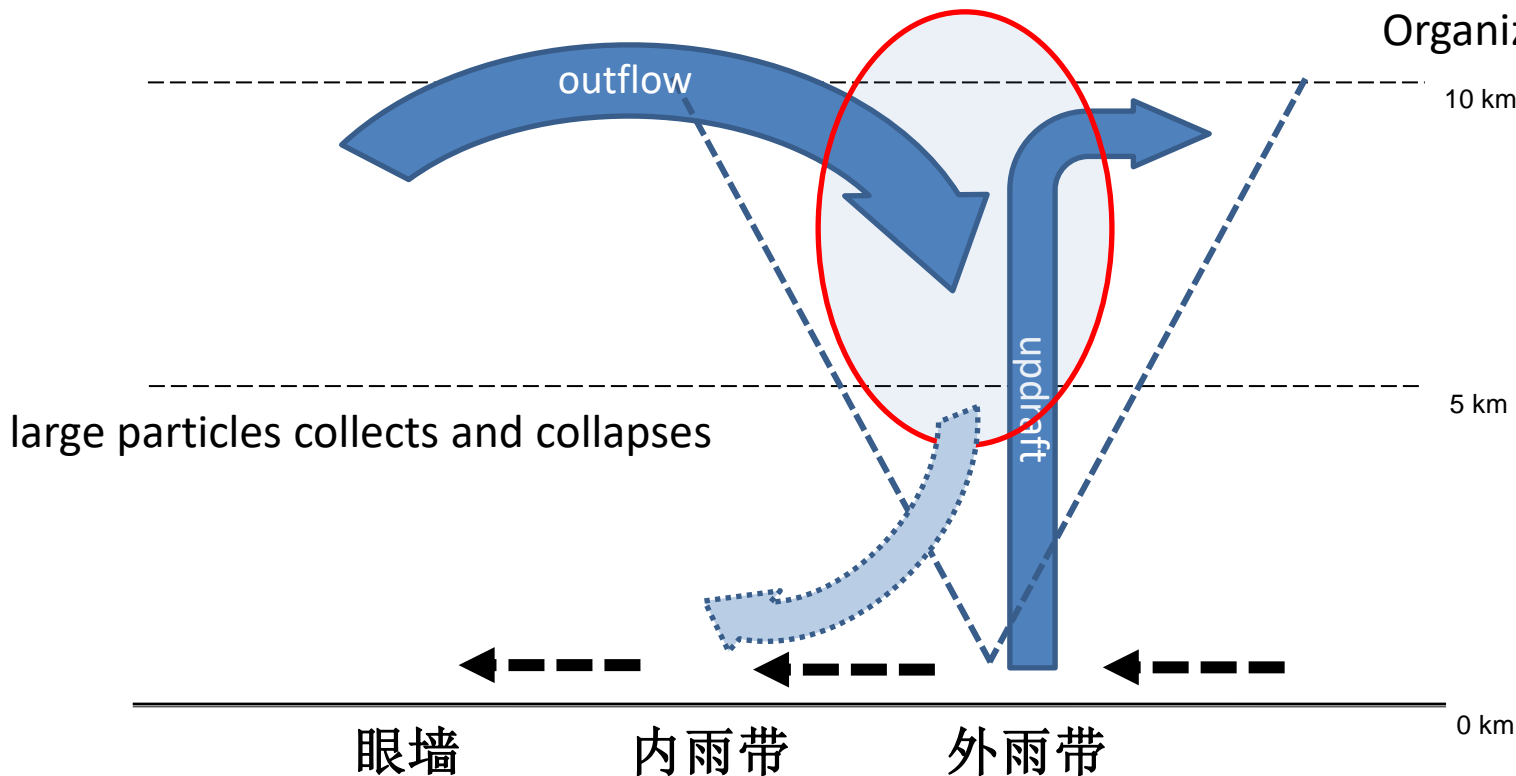
□ V形通道, 大雨滴形成的微物理机制



研究内容

台风RI的“隧道模型” – 动力学

组织化!
Organized!



□ 拖曳、增强下沉气流

□ 促进内核区的辐合，影响内雨带和眼墙结构（眼墙替换）



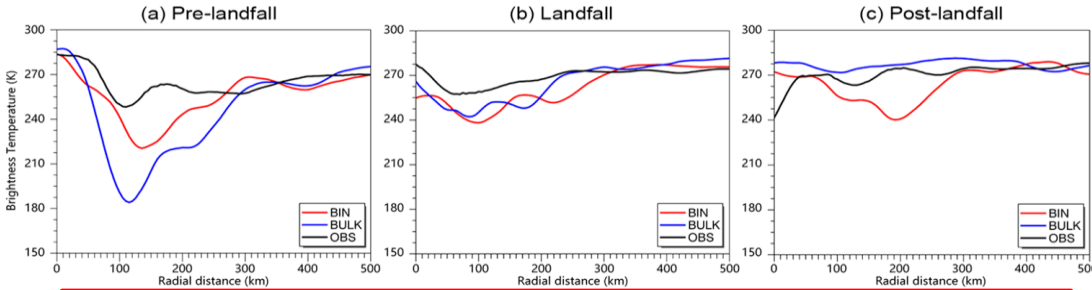
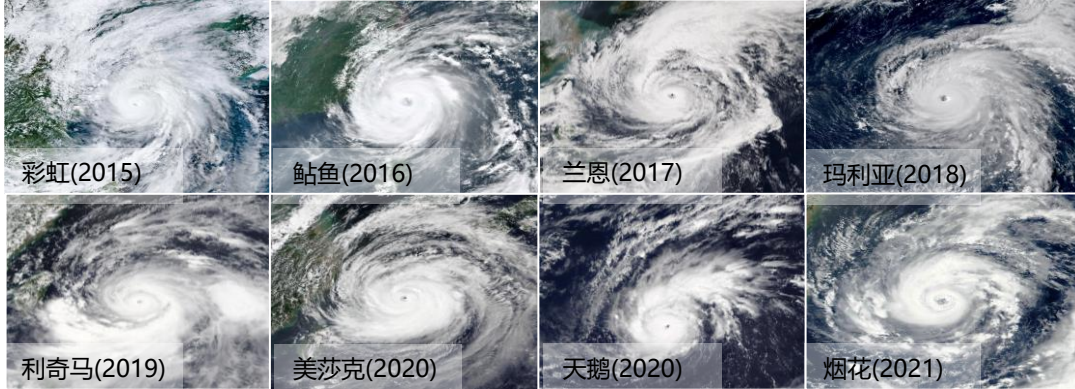
□ 台风快速增强过程中的云动力和微物理相互作用

□ 台风数值模拟的微物理参数化方案改进方法研究

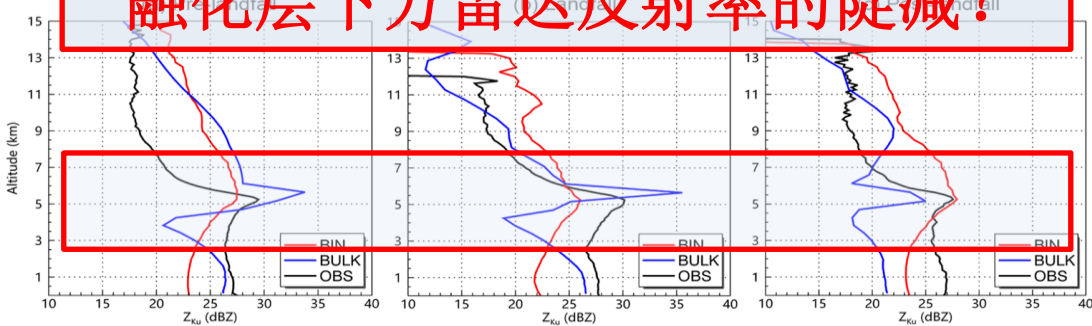


模式存在的问题-模拟过多小雨滴

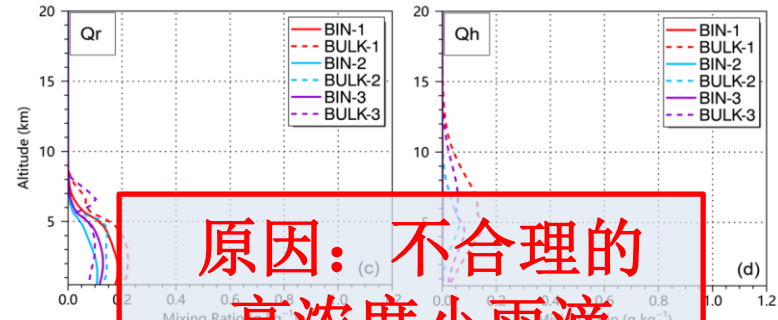
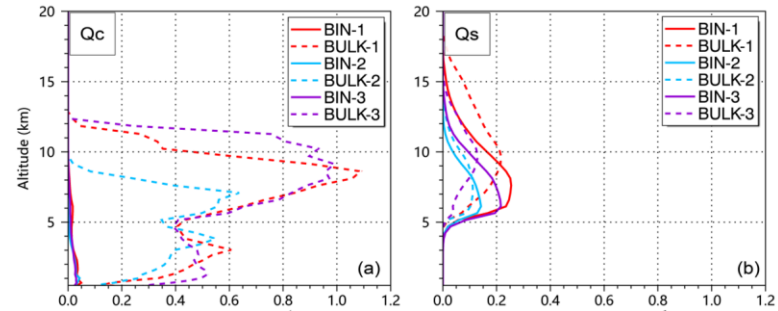
对西太平洋8个强台风开展模拟评估和改进研究



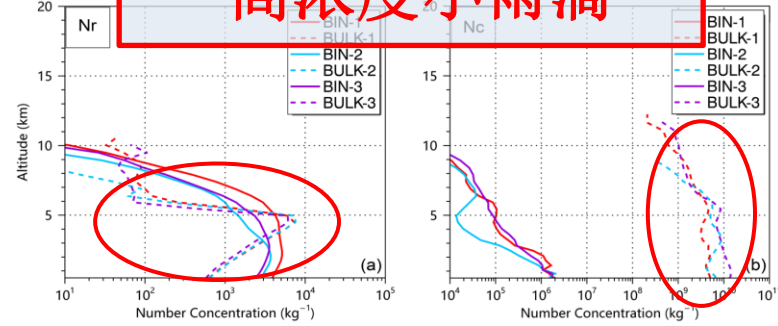
融化层下方雷达反射率的陡减?



观测和模拟的方位平均亮温分布 (上) 以及垂直反射率廓线 (下)



原因: 不合理的高浓度小雨滴

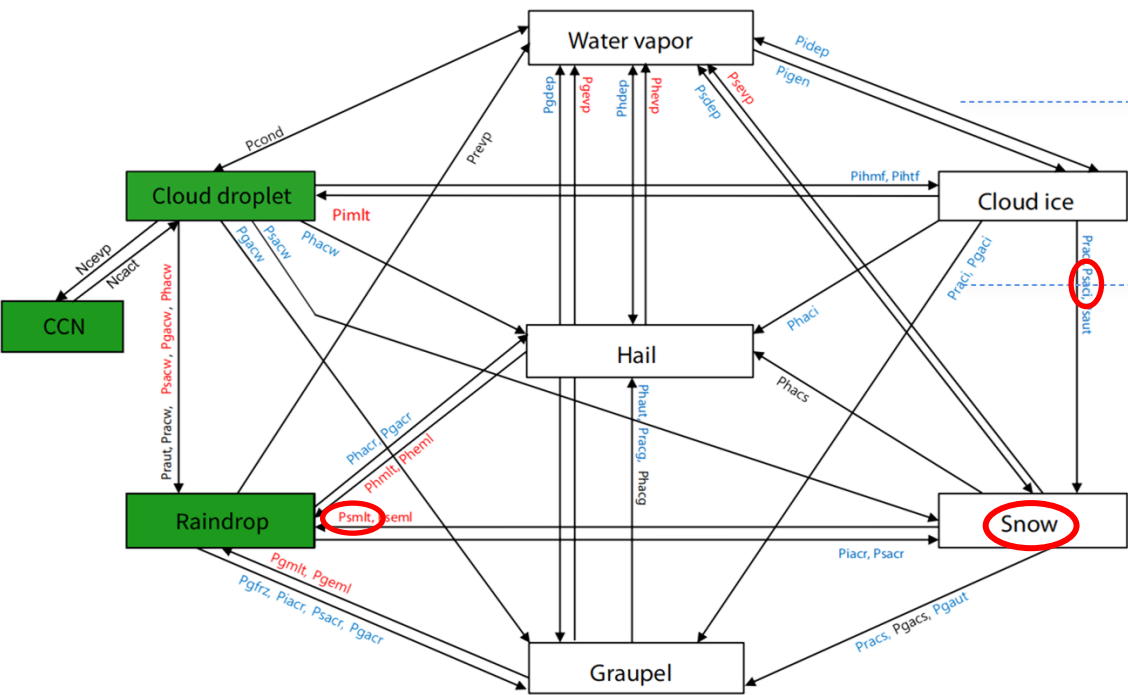
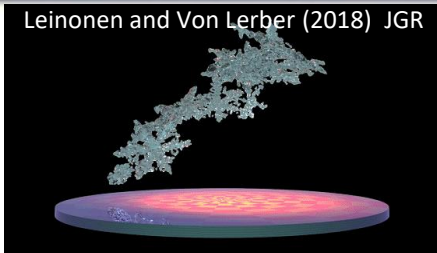


不同降水粒子的区域平均混合比及数浓度垂直廓线



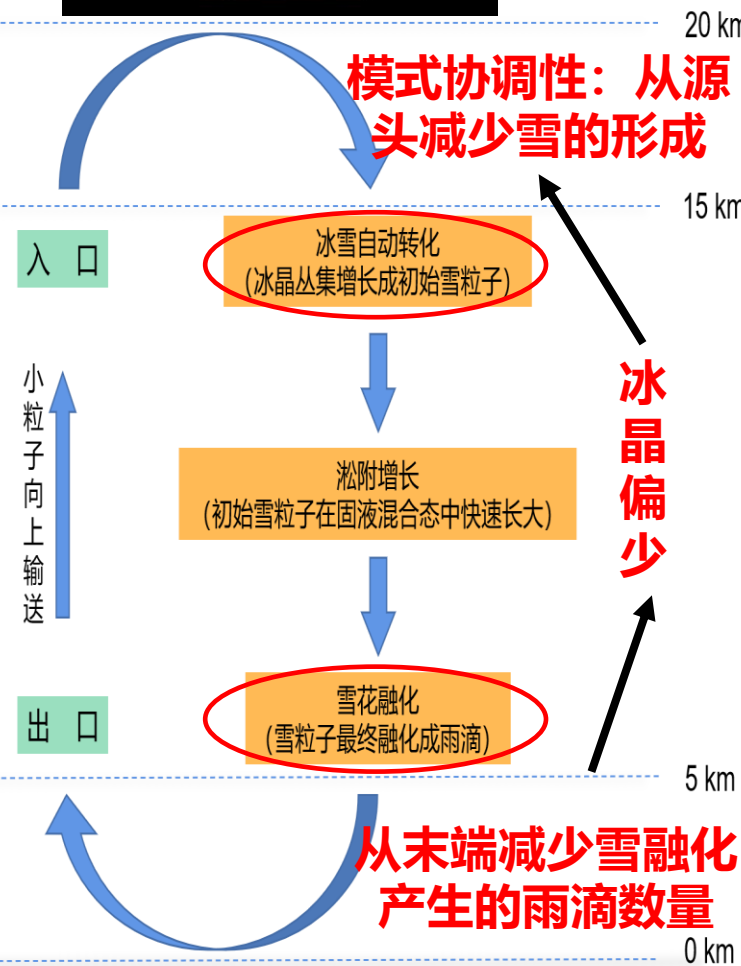
台风降水模拟改进

1. 源汇项及误差分析



对于台风冷云过程中的主要水凝物**雪粒子**而言：
 $SQ_S = Piacr + Psacr + Psacw + Psden + Praci + Psaci - Psauc$
 $- Pracs - Pgacs - Pgaut - Phacs - Psmilt - Pseml - Psevp$

冷云模拟：雪粒子
 暖云模拟：雨滴



模式协调性：从源头减少雪的形成

冰雪自动转化
 (冰晶丛集增长成初始雪粒子)

淞附增长
 (初始雪粒子在固液混合态中快速长大)

雪花融化
 (雪粒子最终融化成雨滴)

冰晶偏少

从末端减少雪融化产生的雨滴数量

入口

出口

小粒子向上输送

20 km

15 km

5 km

0 km



台风降水模拟改进

2. 改进思路与方法

微物理约束的控制试验和敏感性试验设计方案

CTL

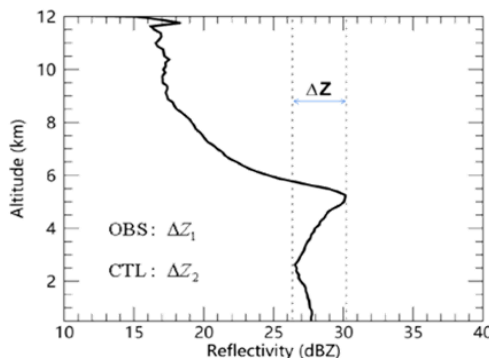
melting of snow to rain

$$\left[\frac{dn_r}{dt} \right]_{mlt} = \frac{N_s}{q_s} \left[\frac{dq_r}{dt} \right]_{mlt}$$

+

autoconversion of ice to snow

$$\left[\frac{dq_s}{dt} \right]_{aut} = \max [(q_i - q_{i0}) / \Delta t, 0]$$



$$m_2 = -0.1 * m_1 = \frac{0.006 * \Delta Z_1 + 0.001 * \Delta Z_2}{2}$$

星载降水雷达观测约束

MOD

减少雪融化的数浓度

melting of snow to rain

$$\left[\frac{dn_r}{dt} \right]_{mlt} = 10^{m_1(T_c - T_{0c})} \frac{N_s}{q_s} \left[\frac{dq_r}{dt} \right]_{mlt}$$

+

autoconversion of ice to snow

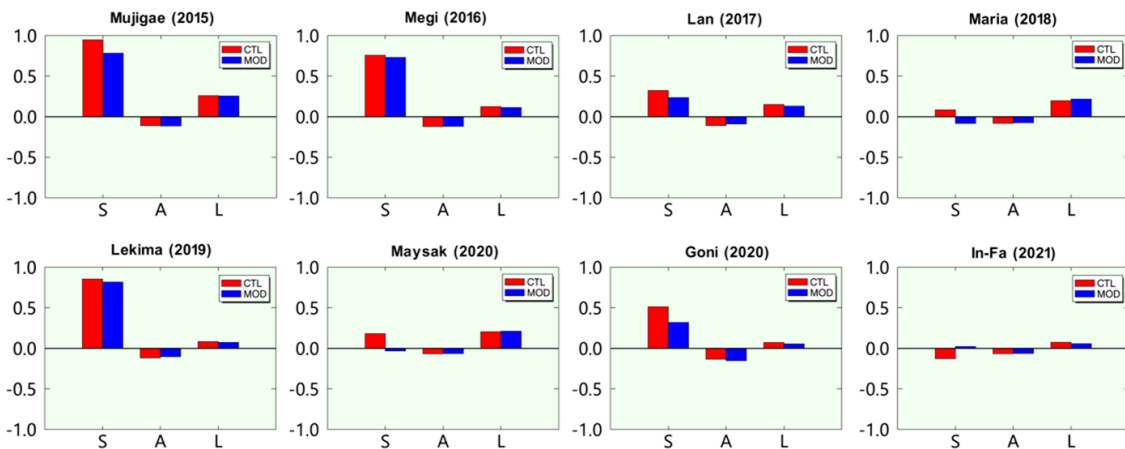
$$\left[\frac{dq_s}{dt} \right]_{aut} = \max [10^{m_2(T_c - T_{0c})} (q_i - q_{i0}) / \Delta t, 0]$$

减少冰晶向雪的转化
保留一定的冰晶含量



台风降水模拟改进

3. SAL评分



登陆热带气旋模拟的SAL评分

登陆

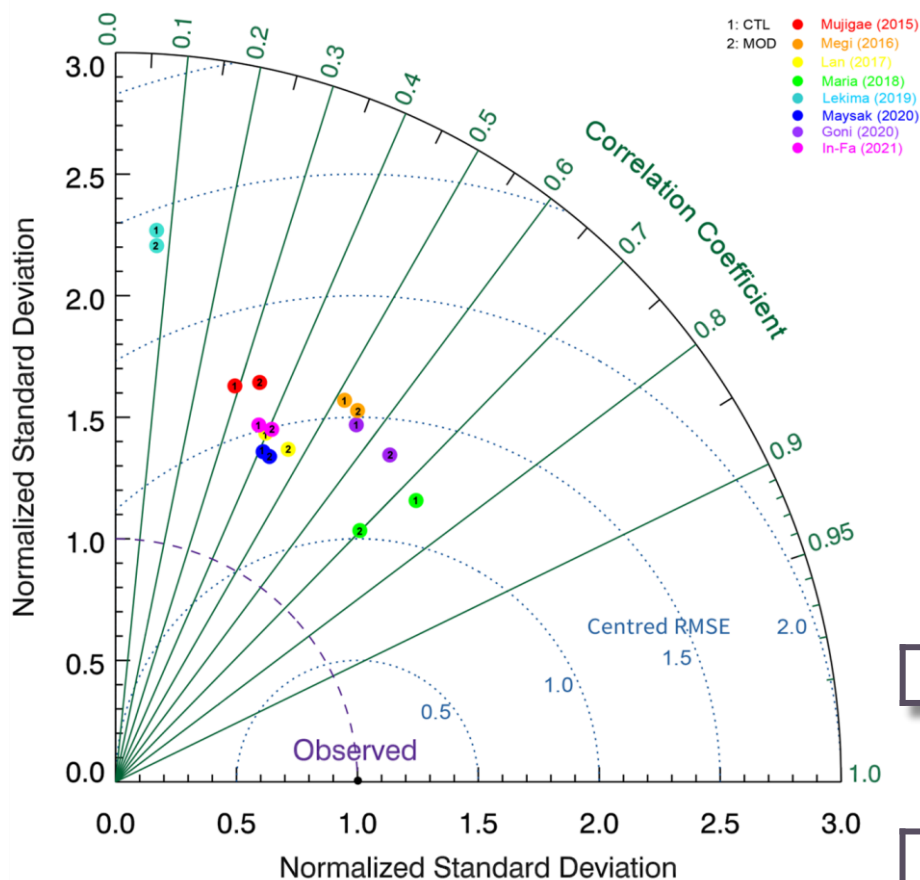
		SAL (%) 误差分析		
序号	台风名称	结构评分的提高率 (%)	强度评分的提高率 (%)	位置评分的提高率 (%)
		17.35		
1	彩虹	3.71	-3.18	1.51
2	鲑鱼	26.61	1.96	9.27
3	兰恩	3.38	18.66	13.24
4	玛莉亚	4.35	8.46	-10.13
5	利奇马	82.75	12.31	12.10
6	美莎克	81.40	3.33	-3.09
7	天鹅	37.70	-14.02	23.32
8	烟花		4.24	23.89

- 微物理约束在水凝物空间结构模拟方面的有很大改进，8个登陆热带气旋的评分平均提高率达32%
- 登陆热带气旋美莎克和烟花的改进率甚至超过80%。在水凝物的位置（强度）预测方面也出现了平均约9% (4%)的改进程度



台风降水模拟改进

4. 泰勒图



登陆热带气旋模拟的泰勒图

使用微物理约束的MOD试验模拟登陆热带气旋的标准差和相关系数与CTL试验的模拟结果相比，都有一定程度的提高。其中登陆热带气旋兰恩 (2017)和天鹅 (2020)在MOD试验中的均方根误差比CTL试验降低了超过2.3 K

登陆热带气旋模拟的RMSE (K) 误差分析

序号	台风名称	CTL试验的误差 (K)	MOD试验的误差 (K)	CTL试验和MOD试验的相对误差 (K)
1	彩虹	27.69	27.63	0.06
2	鲑鱼	35.38	34.41	0.97
3	兰恩	36.24	33.88	2.36
4	玛莉亚	19.05	18.54	0.51
5	利奇马	22.34	22.15	0.19
6	美莎克	27.02	26.94	0.08
7	天鹅	27.03	24.72	2.31
8	烟花	21.19	20.93	0.26



台风快速增强过程中的云动力和云微物理相互作用

“径向外流与上升气流促进冰相粒子堆积、生长和下泻，大粒子的拖曳和融化蒸发冷却引发（增强）下沉气流。”

- 随着台风快速增强，风眼更加清晰圆润，眼墙收缩，高空辐散增强，卷云增多，眼墙内侧上升气流增强，部分液态水可能会随湍流混合卷入眼内。快速增强后期云顶高度逐渐降低，眼墙和螺旋雨带中的“对流柱”明显较少，为台风的快速增强提供能量。 **（宏观特征）**
- “对流柱”内冷云过程活跃，冰相粒子迅速增长，释放大量的潜热，同时下落拖曳，使得冷云被“压缩”，“对流柱”随之减少。同时大的冰相粒子沿径向向外输送，使得冰水含量在外雨带附近增加，冰相粒子在外雨带累积、增长、下泻，融化形成一些大雨滴。 **（微观特征）**



1. 更多的TC快速增强个例

- 目前观测的TC快速增强个例不足，未来结合国产FY-3G卫星和船载雷达观测资料，可以获取更多的TC快速增强个例

2. 基于雷达卫星联合观测改进TC微物理参数化方案

- 结合地基双偏振雷达和空基GPM等星载雷达的联合约束，改进TC微物理参数化方案的模拟能力

3. “隧道模型”理论研究的深化

- 不断提高对该模型的大样本检验和深化研究，进一步揭示TC快速增强后的双眼墙形成(SEF)和眼墙替换(ERC)机制



相关成果

AGU ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCES

Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER
10.1029/2023GL104541

Interaction of Cloud Dynamics and Microphysics During the Rapid Intensification of Super-Typhoon Nanmadol (2022) Based on Multi-Satellite Observations

Zuhang Wu^{1,2}, Yun Zhang^{1,2}, Lifeng Zhang¹, and Hepeng Zheng¹

¹College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, China, ²High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha, China

Abstract Using multi-satellite observations, the cloud dynamic and microphysical characteristics were revealed during the rapid intensification (RI) of super-typhoon Nanmadol (2022). As the storm intensifies, the eyewall contracts, the upper-level divergence strengthens, and the cirrus cloud increases, leading to stronger upper-level radial outflow and the vertical updraft. Meanwhile, it is found that there exists a dynamically attractive area in the outer rainbands, where particles grow effectively and form "a small amount of large particles" around 300 km from the eye. A theory of cloud dynamics-microphysics interaction, called "tunnel theory," is further proposed to explain the generation, accumulation, and concentrated downflow of large particles in the outer rainbands during RI. Results suggest the unique feature of particle distribution in the outer rainbands could be a potential indicator for RI.

Plain Language Summary The rapid intensification (RI) of tropical cyclones (TCs) becomes more frequent in recent years, but the TC RI forecasts still remain challenging. Better understanding of the physical

Key Points:

- First satellite-based observational study on the interaction of cloud dynamics and microphysics during typhoon rapid intensification (RI)
- The eyewall contracts, the upper-level divergence strengthens, and the convection column increases, providing kinetic energy for typhoon RI
- A "tunnel theory" is proposed for the generation, accumulation, and downflow of large particles in the outer rainbands during typhoon RI

Supporting Information: Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to: Y. Zhang and L. Zhang, zhangyun17@nudt.edu.cn; zhanglf_gxxy@sina.cn

(Wu & Zhang et al. 2023)

AGU ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE

Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER
10.1029/2022GL100053

Improving the WRF Forecast of Landfalling Tropical Cyclones Over the Asia-Pacific Region by Constraining the Cloud Microphysics Model With GPM Observations

Zuhang Wu¹, Yun Zhang¹, Lifeng Zhang¹, and Hepeng Zheng¹

¹College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, China

Abstract We proposed a method to improve the forecasts of landfalling tropical cyclones (LTCs) by constraining the "cloud physics" with Global Precipitation Measurement (GPM) satellite observations. Eight typical LTCs that are well observed by GPM satellite in the Asia-Pacific region from 2015 to 2021 are selected to verify the feasibility of this method. Using a cloud-resolving model, the LTCs are simulated for 3 days with both the original and modified microphysics scheme for comparison. The improvement of LTC forecasts is evaluated in terms of hydrometeor structure, amplitude, and location. Most notably, the structure forecast of condensed water improved up to 32% on average for all LTCs. The location forecast and amplitude forecast of condensed water also improved to varying degrees. Moreover, it is found that the error of LTC forecasts was reduced even more by using microphysics constraints from GPM observation than that by assimilating GPM data directly in other research.

Plain Language Summary The skill of Landfalling tropical cyclone (LTC) forecasts has increased in recent years but lacks to some degree in accuracy, refinement, and discrimination. It is still difficult for

Key Points:

- Direct constraints on cloud microphysics model are established using Global Precipitation Measurement observation
- Great improvement is achieved in forecasting the spatial structure of landfalling tropical cyclone (LTC) hydrometeors
- Eight typical LTC cases are investigated to ensure robust improvement of their forecasts

Supporting Information: Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to: Y. Zhang and L. Zhang, zhangyun17@nudt.edu.cn; zhanglf_gxxy@sina.cn

(Wu & Zhang et al. 2022)

模式微物理评估和改进方法 已申请国家发明专利: 《一种基于雷达观测物理约束数值 模式的天气预报改进方法》

国家知识产权局

410000
湖南省长沙市开福区德雅路 109 号
吴祖航(13115006832)

发文日:
2023年05月17日

申请号或专利号: 202211732861X
发文字号: 2023051201333500

申请人或专利权人: 吴祖航

发明创造名称: 一种基于雷达观测物理约束数值模式的天气预报改进方法

发明专利申请初步审查合格通知书

上述专利申请, 经初步审查, 符合专利法实施细则第 44 条的规定。
申请人于 2022 年 12 月 30 日提出提前公布声明, 经审查, 符合专利法实施细则第 46 条的规定, 专利申请进入公布准备程序。
初步审查合格的上述发明专利申请是:
2022 年 12 月 30 日提交的说明书摘要
2022 年 12 月 30 日提交的权利要求书
2022 年 12 月 30 日提交的说明书
2022 年 12 月 30 日提交的说明书附图
为基础的。

提示:
1. 发明专利申请人可以自申请日起 3 年内提交实质审查请求书、缴纳实质审查费, 申请人期满未提交实质审查请求书或者期满未缴纳或未缴足实质审查费的, 该申请被视为撤回。
2. 专利费用可以通过网上缴费、银行/邮局汇款、直接向代办处或国家知识产权局专利局缴纳, 缴费时应当写明正确的申请号/专利号、费用名称及分摊金额, 未提供上述信息的视为未办理缴费手续, 了解缴费更多详细信息及办理缴费业务, 请登录国家知识产权局官方网站。

审查员: 覃学英
联系电话: 010-53960295

审查部: 专利审查业务中心
专利审查业务科

210004 纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区前门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处
202210 电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件概不受理。



参考文献

感兴趣请进一步参考团队以下文章：

- Wu, Z., Huang, Y., Zhang, Y., Zhang, L., Lei, H., & Zheng, H. (2021). Precipitation characteristics of typhoon Lekima (2019) at landfall revealed by joint observations from GPM satellite and S-band radar. *Atmospheric Research*, 260, 105714.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105714>
- Wu, Z., Zhang, Y., Xie, Y., Zhang, L., & Zheng, H. (2022). Radiance-based assessment of bulk microphysics models with seven hydrometeor species in forecasting Super-typhoon Lekima (2019) near landfall. *Atmospheric Research*, 273, 106173.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106173>
- Wu, Z.; Zhang, Y.; Zhang, L.; Zheng, H. (2022). Improving the WRF Forecast of Landfalling Tropical Cyclones over the Asia-Pacific Region by Constraining the Cloud Microphysics Model with GPM Observations. *Geophysical Research Letters*, 49(18), e2022GL100053.
<https://doi.org/10.1029/2022GL100053>
- Wu, Z., Zhang, Y., Zhang, L., & Zheng, H. (2023). Interaction of cloud dynamics and microphysics during the rapid intensification of super-typhoon Nanmadol (2022) based on multi-satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 50(15), e2023GL104541.
<https://doi.org/10.1029/2023GL104541>
- Zhang, Y., Wu, Z., Zhang, L., & Zheng, H. (2022). A Comparison of Spectral Bin Microphysics versus Bulk Parameterization in Forecasting Typhoon In-Fa (2021) before, during, and after Its Landfall. *Remote Sensing*, 14(9), 2169.
<https://doi.org/10.3390/rs14092169>



敬请批评指正



谢谢！



研究内容

降水垂直径向分布--微物理特征 (RI-POST)

快速增强台风的“隧道模型” 外雨带大雨滴的由来

融化产生雨水含量明显增多

