

文章编号: 1672-8785(2019)09-0039-08

基于 CloudSat 的台风深对流云 微物理参数相关性分析

罗 双^{1,2*} 张 峰³ 杨柳妮⁴

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

3. 南京信息工程大学, 南京 210044;

4. 北京市突发事件预警信息发布中心, 北京 100089)

摘 要: 以 2009 年 14 号台风“彩云”为例, 基于 CloudSat 相关云产品统计了台风深对流云中水云和冰云的有效粒子半径、云水含量谱分布的特征。在此基础上探讨了两个云微物理参数的相关性, 并对不同发展时期的多个台风进行了该关系的应用检验。研究结果表明, 不论是水云还是冰云, 若以云水含量为横坐标, 以云有效粒子半径为纵坐标, 台风深对流云像元散点图的分布存在明显的下边界线, 且边界值随着有效粒子半径和云水含量参数值的增大而逐渐提高; 零度层以下低层水云的有效粒子半径与液态水含量呈正相关关系, 可采用对数关系式进行拟合。经检验, 该拟合关系式对其他发展阶段的台风同样适用, 证实了该关系的普适性。

关键词: CloudSat; 台风; 有效粒子半径; 云水含量

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.09.007

Correlation Analysis of Microphysical Parameters in Typhoon Deep Convective Cloud Based on CloudSat

LUO Shuang^{1,2*}, ZHANG Feng³, YANG Liu-ni⁴

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

4. Beijing Emergent Incident Warning Issue Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Taking the typhoon "Choi-wan" on the 14th of 2009 as an example, based on CloudSat related cloud products, the effective particle radius and cloud water content distribution characteristics of water and ice clouds in the deep convection cloud of the typhoon were calculated. On this basis, the correlation between the

收稿日期: 2019-07-24

基金项目: 上海市自然科学基金项目(18ZR1434100); 华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QY-HZ201611)

作者简介: 罗双(1988-), 女, 湖南浏阳人, 硕士, 工程师, 主要从事卫星遥感和大气辐射传输研究。

E-mail: luoshuang_2010@163.com

two cloud microphysical parameters was discussed, and the application test of this relationship was performed for multiple typhoons in different development periods. The results show that, for both water clouds and ice clouds, if the water content of clouds is taken as the x-coordinate and the effective particle radius of clouds as the y-coordinate, the distribution of scatter map of the typhoon deep convective cloud pixel has an obvious lower boundary. The boundary value gradually increases with the increase of effective particle radius and cloud water content parameters. The effective particle radius of low-level water clouds below the zero layer has a positive correlation with the liquid water content, which can be fitted using a logarithmic relationship. The test shows that the fitting relationship is also applicable to typhoons in other stages of development, confirming the universality of the relationship.

Key words: CloudSat; typhoon; effective particle radius; cloud water content

0 引言

台风是一种生成于热带或副热带洋面、破坏性很强的天气系统。随着卫星遥感技术的发展,特别是云探测卫星 CloudSat 的发射,人们不仅能通过静止卫星获得云层顶部的信息,而且可以观测到从薄云到浓厚云的精细垂直结构特征^[1]。台风具有深对流云的结构特点,而 CloudSat 卫星上搭载的云观测雷达能提供有效的垂直探测,使我们更好地理解深对流云的内部结构和垂直特征,从而提高对天气系统和云微物理结构的认识程度。

国内外对于云垂直结构以及云微物理量特征的研究已经开展了不少工作,取得了一定的成果。Li^[2]采用蒙特卡洛辐射传输方法模拟了云内部垂直微物理量的分布特征。Liou^[3]分析了冰云中冰水含量和有效粒子半径的相关性,并将两者的拟合关系用于辐射传输和卷云模型研究。Durden^[4]采用 CloudSat 和其他 A-Train 系列地球科学卫星群数据产品分析了 17 个典型热带气旋的微物理属性,发现在近台风眼壁云系中冰云有效粒子半径随高度增加、云中冰水含量随高度减少等重要信息。赵姝慧等^[5]综合应用 FY-2C、TRMM、CloudSat 等多种卫星资料研究了台风“艾云尼”的发展演变过程及台风眼区、外围螺旋雨带云的宏微观结构特征,为深入研究台风的内部结构和发展演变提供了重要的观测事实。尚博^[6]利用 CloudSat 资料研究了我国华北和江淮典型区域云的垂直结构的统计特征及其差异。张华、杨冰韵^[7-8]

等对东亚地区云的微物理量的分布特征和季节变化进行了分析。陈勇航等^[9]采用云廓线雷达反演资料,分析了新疆天山及周边地区强降雨过程中云冰水含量的垂直分布特征。史红兰等^[10]利用 CloudSat 和其他 A-Train 卫星的反演数据,分析了台风眼壁及周围螺旋云带的微物理属性的垂直分布,并给出了初步的概念模型。

本文拟利用 CloudSat 相关云产品数据分析 2009 年 14 号台风“彩云”深对流云中冰/液态水的含量和有效粒子半径的统计特征,讨论冰水含量和冰云有效粒子半径、液态水含量和水云有效粒子半径的相关性,并进一步分析零度层以下低层水云的微物理结构特性。为了说明统计特征的普适性,还对不同发展时期的多个台风进行了检验,以便能更好地了解台风深对流云的微物理结构。

1 数据和产品

CloudSat 卫星于 2006 年 4 月由美国航空航天管理局成功发射到 705 km 高度的太阳同步轨道,是世界上首颗专门用于研究云的卫星。CloudSat 上搭载的 94 GHz 云剖面雷达 CPR,能够接收到整个大气气柱内各高度水凝物的雷达回波功率。卫星星下点沿轨分辨率为 2.5 km,横轨分辨率为 1.4 km,垂直分辨率为 240 m,从地面到高空共获得 125 个高度数据。

CloudSat 卫星主要有标准数据产品和辅助数据产品。最新发布的产品多达 19 种,可以帮助更好地了解真实大气的垂直结

构特征,从而提高对天气系统和云微物理过程的认知程度及预报能力^[11]。本文使用的产品包括雷达反射率因子产品(2B-GEO-PROF)、云分类产品(2B-CLDCLASS)以及云水含量产品(2B-CWC-RVOD)。其中 2B-CWC-RVOD 产品是利用雷达反射率因子和可见光学厚度两个物理量反演得到,且引进了来自 MODIS 卫星获得的可见光光学厚度数据,输出的物理量有云液态水含量(Liquid Water Content, LWC)、冰水含量(Ice Water Content, IWC)、冰云和水云的有效粒子半径(r_e)等,这些都为我们深入了解云的内部结构提供了重要信息。

表 1 列出了 CloudSat 卫星反演水云和冰云粒子谱分布、云水含量、有效粒子半径的计算关系^[12]。其中, N_r 是粒子数浓度, ω 是分布宽度参数。 r 是水云粒子的半径, r_g 是水云的几何平均半径, P_w 是水云的密度。 D 表示冰球体的有效直径, D_g 是冰晶的几何平均直径, P_i 是冰云的密度。云中液态水含量反映了水云中的含水量,冰水含量反映了冰云中整体所含的冰晶质量,统称云水含量,单位是 mg/m^3 。水云有效粒子半径反映了水云中云滴的尺度大小,冰云有效粒子半径反映了冰云粒子的平均有效尺度,单位是 μm 。

2 台风深对流云微物理参数分析

2.1 个例分析

以 2009 年 14 号台风“彩云”为例进行云微物理特性分析。虽然是发生在 139°E 以东的转向台风,对陆地影响不大,但据 NOAA 系

统卫星多平台地面风分析及许多其他测定,其结构是许多热带气旋中罕见的一例^[13]。“彩云”台风是 2009 年 9 月 12 日 08 时(北京时间)在西北太平洋上一个热带低压基础上加强发展起来的,到 14 日 08 时达到台风级别,并不断增强,15 日中午有次急剧加强过程,中心最低气压突降,其强度达到强台风级别(<http://typhoon.nmc.cn/web.html>)。

根据 CloudSat 发布的轨道扫描图可以看到,2009 年 9 月 15 日 11:51(北京时间),CloudSat 卫星第 17996 条轨道正好扫描穿过台风云系,扫描范围是 $12.01^\circ\sim 21.99^\circ\text{N}$ 、 $144.93^\circ\sim 147.19^\circ\text{E}$ (图 1)。本研究从该条轨道所有 37081 个星下像素点中选取探测到台风云系及其附近的第 19811 到第 20846 个像元(即第 17 和第 18 段中的 1036 个像元)作为分析对象。

图 2(a)是 AQUA 红外云图和 CloudSat 扫描轨迹的叠加图。可以看到,卫星扫描线正好穿过台风眼区附近。从 AQUA 红外云图看,台风发展十分成熟,螺旋结构完整且对称,台风眼清晰可见,眼区周围被密闭云区覆盖,此时台风达到超强台风级别,中心位于(17.3°N , 146.2°E)。

CloudSat 卫星搭载的毫米波云廓线雷达(Cloud Profiler Radar, CPR)对云滴粒子甚为敏感,其接收到的散射能量用雷达反射率表示,反映了雷达所接受到的液态水滴或冰晶粒子后向散射能力的强弱,其分布特征表明天气系统中不同相态、不同粒子大小云的分布规律^[14]。图 2(b)是利用 2B-GEO-PROF 产

表 1 CloudSat 卫星反演冰云和水云相关物理参数的计算关系

物理参数	水云	冰云
粒子谱分布 $N(r)$ 或 $N(D)$	$\frac{N_T}{\sqrt{2\pi\omega r}} \exp\left[-\frac{\ln^2(r/r_g)}{2\omega^2}\right]$	$\frac{N_T}{\sqrt{2\pi\omega D}} \exp\left[-\frac{\ln^2(D/D_g)}{2\omega^2}\right]$
云水含量 LWC 或 IWC	$\int_0^\infty P_w N(r) \frac{4}{3} \pi r^3 dr$	$\int_0^\infty P_i N(D) \frac{1}{6} \pi D^3 dD$
有效粒子半径 r_e	$\frac{\int_0^\infty N(r) r^3 dr}{\int_0^\infty N(r) r^2 dr}$	$\frac{1}{2} \frac{\int_0^\infty N(D) D^3 dD}{\int_0^\infty N(D) D^2 dD}$

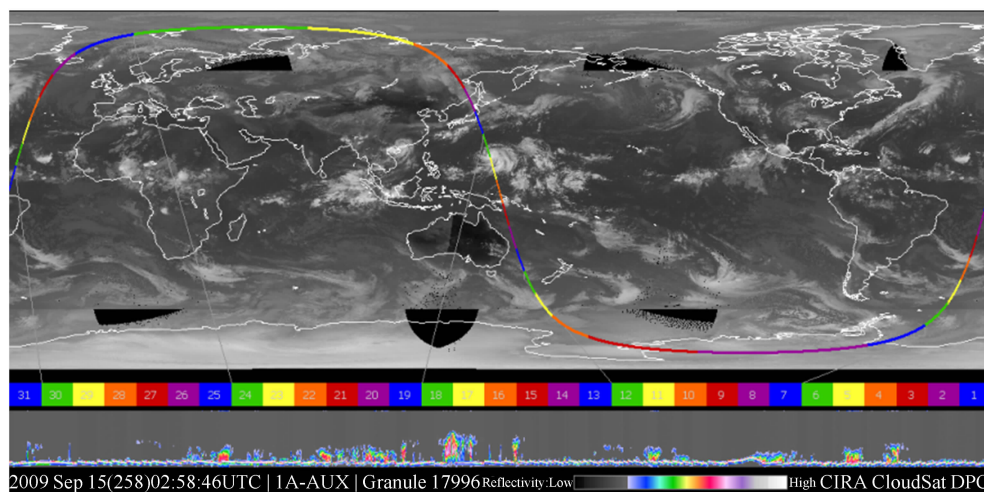


图 1 CloudSat 卫星第 17996 轨道的扫描图 (图片来自 http://cswww.cira.colostate.edu/data_dist/OrderData.php)

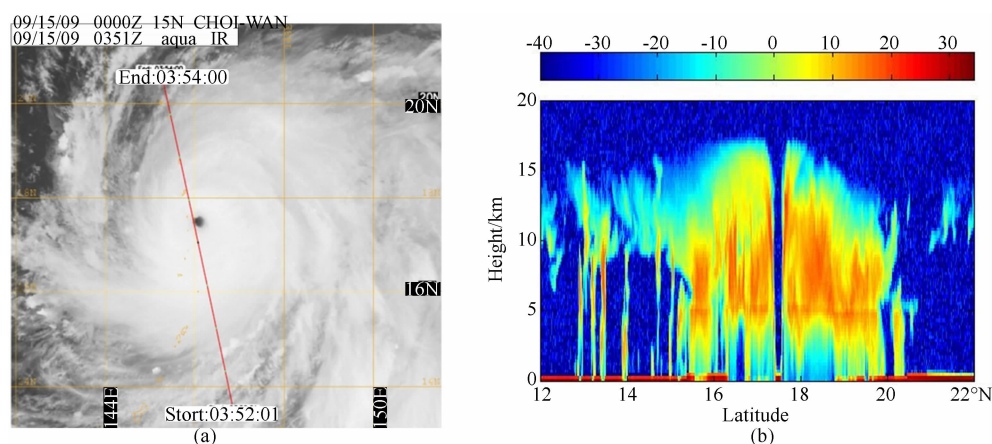


图 2 (a)AQUA 红外云图及 CloudSat 卫星扫描轨迹的叠加; (b) 2B-GEOPROF 雷达反射率因子的垂直剖面(单位: dBZ)(图片来自 <http://CloudSat.atmos.colostate.edu/news/2009>)

品的云雷达反射率因子数据集得到的台风云系垂直剖面。同样可以看到台风眼区的位置。图中最主要的特征是在 5 km 高度附近出现明显的不连续分布的亮带结构, 表明 0°C 凝结层的存在, 这与赵姝慧^[3]、严卫^[14]等人的研究结果一致。

CloudSat 云分类产品将云分为深对流云(Dc)、积雨云(Ns)、积云(Cu)、层积云(Sc)、层云(St)、高积云(Ac)、高层云(As)和高云(Ci)八类。本文中采用 CloudSat Level 2B-CLDCLASS 来获得云的垂直分类, 判定深对流云的存在。从图 3 中可以看到, 这个时刻的“彩云”台风眼是无云区, 眼壁边缘向外朝上倾斜, 并在两侧成高耸的塔状形分布。台风眼

壁处云高达 17.7 km, 除 16°N 附近有部分高层云(蓝色表示)之外, CloudSat 扫描的台风主体云系基本全为深对流云(白色表示)。

2.1.1 统计特征

对“彩云”台风云系眼区附近深对流云中冰云和水云的云中含水量和有效粒子半径进行统计, 分析这两个云微物理量的分布特征, 如图 4 所示。“彩云”台风深对流云中水云的液态水含量基本分布在 400 mg/m^3 以下, 以 $0\sim 110\text{ mg/m}^3$ 的像元数居多, 达到 1000 个以上, 其次是 $110\sim 300\text{ mg/m}^3$ (图 4(a))。冰云中冰水含量大部分在 1000 mg/m^3 以下, 并且值越大, 占的像元数逐渐减小(图 4(c))。

云滴的有效半径是重要的云微物理特征参

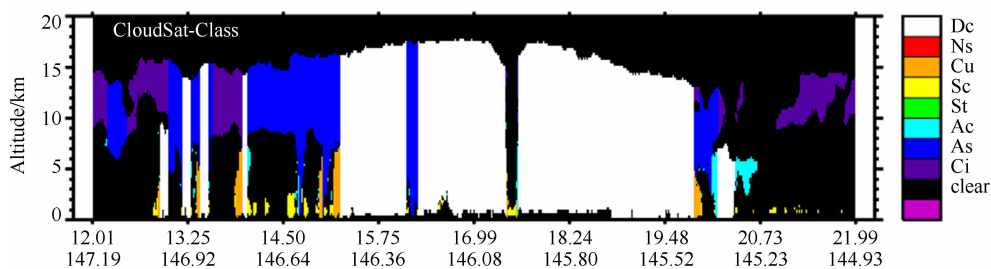


图 3 CloudSat Level 2B-CLDCLASS 云分类的垂直剖面

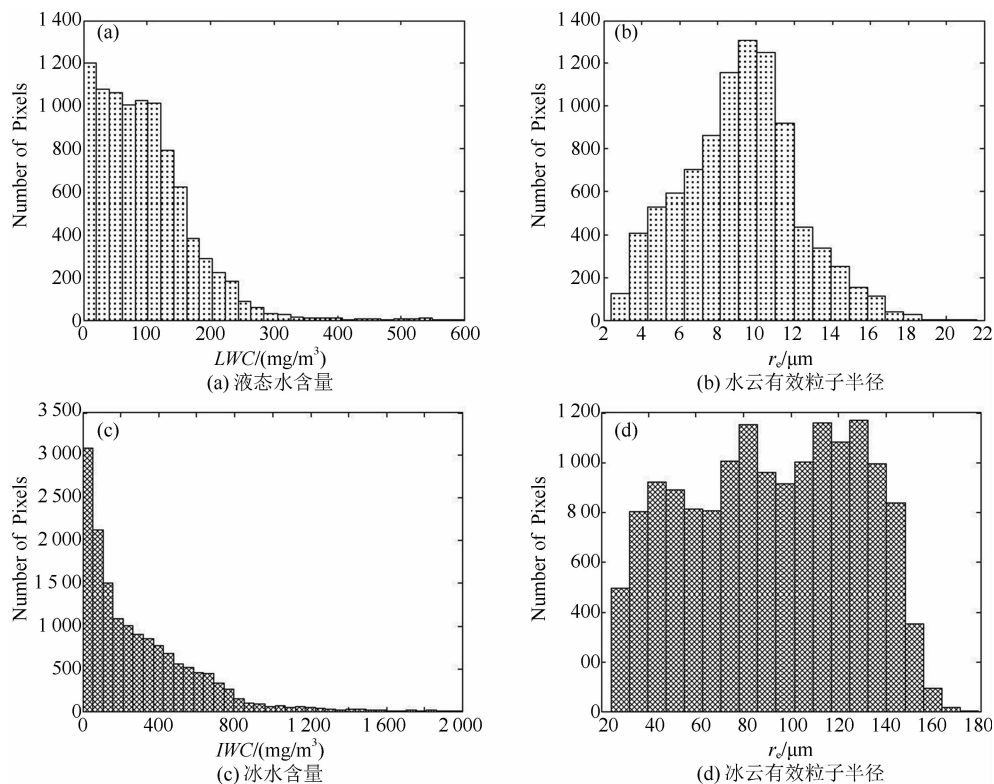


图 4 “彩云”台风深对流云微物理参数频数分布图

量, 宏观上说, 它可以影响云层的散射特性。对于给定的云中液态水含量或冰水含量, 具有较小有效半径的云将反射或散射较多的太阳辐射^[15]。微观层面而言, 云滴的有效半径对云中的微物理过程也有影响。由图 4(b)可知, 水云的有效半径分布在 $2 \sim 18 \mu\text{m}$, 峰值出现在 $10 \mu\text{m}$ 附近。冰云的等效半径明显比水云的有效粒子半径大, 最大值可达到 $160 \sim 180 \mu\text{m}$, 冰云的有效半径在各区间分布较散(图 4(d))。

2.1.2 有效粒子半径和云水含量的相关性

以下将分析水云(冰云)有效粒子半径和液态水含量(冰水含量)的相关性, 其中选用的是“彩云”台风 CloudSat 资料中深对流云系所有

垂直高度上的值。图 5(a)是水云, 图 5(b)是冰云, 横坐标表示云水含量, 单位是 mg/m^3 , 纵坐标表示有效粒子半径, 单位是 μm 。由两图可知, 不论是水云还是冰云, 有效粒子半径和云水含量的散点图均存在明显的下边界。该下边界表示的含义是, 当云水含量为某值时, 有效粒子半径存在下限, 或者当有效半径增长到某值时, 云水含量存在上限。该边界值随微物理参数的增大逐渐提高, 这种关系使得云有效粒子半径和云水含量相互影响。

Liou 曾经利用飞机观测资料分析了冰云的冰水含量和有效粒子半径的相关性, 指出二者具有对数二次线性关系。 IWC 越大, De 也越

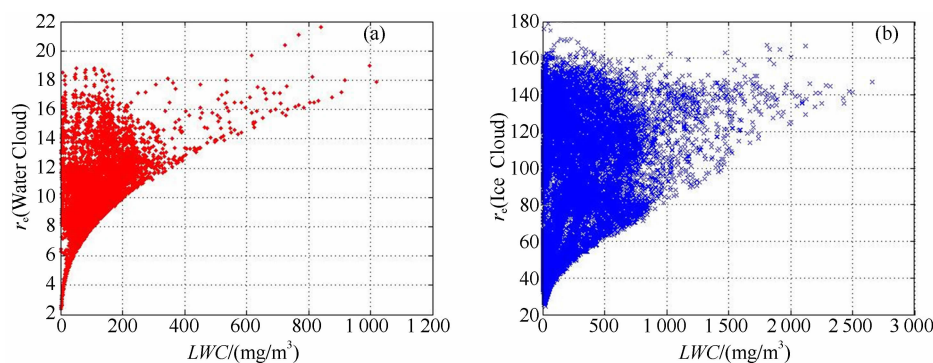


图 5 “彩云”台风深对流云中水云(a)、冰云(b)的有效粒子半径与云水含量的关系

大, 这与冰晶的碰并增长原理相一致。具体的拟合关系式根据热带地区、中纬度地区和北冰洋地区分别取不同的系数^[3]。遗憾的是, Liou 并未对水云的特征展开分析。

前面提到, “彩云”台风对流云系在 5 km 高度处出现一条不连续亮带, 这是雪花或冰晶降落到零度层附近时, 表面发生融化而使雷达反射率突然增大的现象^[16]。由此可知零度等温线在 5 km 高度附近, 该高度以下是降水形成的关键区。后面将进一步分析台风深对流云系零度层以下水云的有效粒子半径和液态水含量的关系。分别对水云的有效粒子半径和液态水含量取自然对数, 并做散点图(图 6)。统计发现, 两者呈明显的正相关关系, LWC 越大, r_e 也越大, 得到的拟合关系式为

$$\ln(r_e) = a + b \ln(LWC) \quad (1)$$

式中, $a = 0.5831$, $b = 0.3225$ 。 LWC 的单位是 mg/m^3 , r_e 的单位是 μm , 且该拟合通过了 95% 的置信度检验。

2.2 关系检验

台风“彩云”在观测时底层中心附近最大平均风速达到 51.0 m/s (即 16 级) 以上, 属于超强台风级别。那么其他级别的台风深对流云中冰云、水云以及零度层以下低层水云的有效

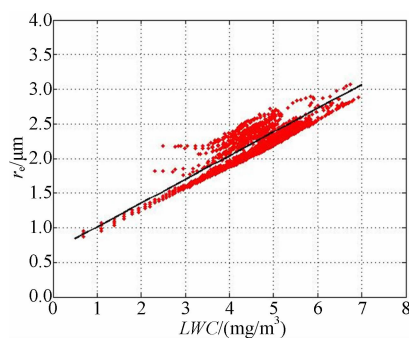


图 6 “彩云”台风对流云零度层以下低层水云的有效粒子半径与液态水含量的关系(黑线为两者取自然对数的线性拟合线)

粒子半径与云水含量是否同样存在上述相关性呢? 本文选取 CloudSat 观测时处于不同发展时期的台风进行分析检验, 分别是处于强台风级别的“艾云尼”、台风级别的“凤凰”和强热带风暴级别的“森拉克”。表 2 中分别列出了 CloudSat 扫描过境这三个台风的时间、轨道号、邻近时刻台风的中心位置及最大风速以及每个台风分析的星下像元点序号。

以云水含量为横坐标, 有效粒子半径为纵坐标, 分别统计三个台风云系的深对流云中水云和冰云的分布情况, 并用不同颜色叠加显示, 如图 7 所示。可以看到, 不论是水云还是冰云均存在下边界, 这与图 5 的结果一致。对

表 2 用于检验的 CloudSat 扫描台风列表

台风名称	日期	观测时间 (北京时间)	轨道号	像素点范围	中心位置 (°E/°N)	最大风速 (m/s)	卫星观测时 台风级别
艾云尼	2006/07/04	12:42~12:44	00973	19808~20844	132.5/16.1	45.0	强台风
凤凰	2008/07/28	13:17~13:20	11968	20329~21366	120.5/24.2	35.0	台风
森拉克	2008/09/09	12:58~13:01	12594	19707~21158	125.2/17.8	28.0	强热带风暴

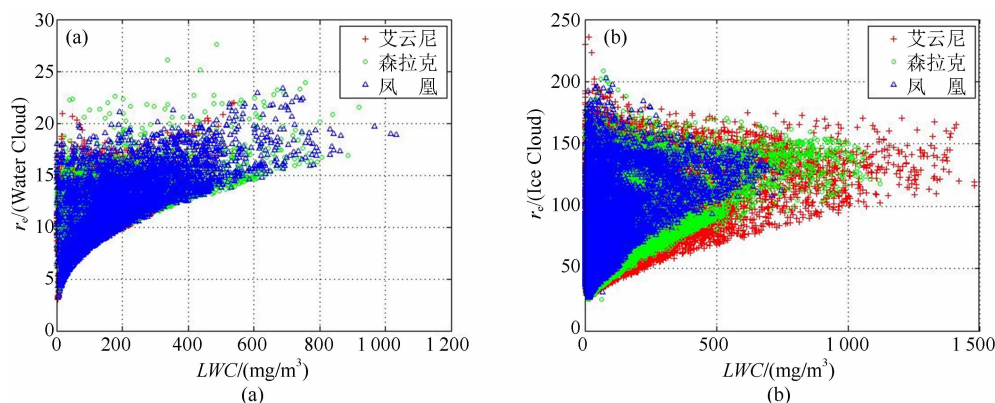


图 7 台风“艾云尼”、“凤凰”、“森拉克”深对流云中水云(a)、冰云(b)的有效粒子半径与云水含量的关系

于水云, 每个台风的 LWC 和 r_e 的物理量值分布范围差不多, 且具有统一的下边界; 对于冰云, 不同发展强度的台风 IWC 和 r_e 的下边界位置虽然有所差异, 但各个台风的下边界线都很清晰。

类似地, 我们可以模拟台风深对流云零度层以下低层水云的有效粒子半径和液态水含量的相关性。可以看到, 对于不同发展强度的台风, 水云的 LWC 和 r_e 呈对数正相关, 这与图 6 的结果相同, 且强台风“艾云尼”、台风“凤凰”、热带风暴“森拉克”深对流云中零度层以下水云的有效粒子半径和液态水含量的拟合线与超强台风“彩云”一致。因此, 这个统计结果可以应用到辐射传输和气候模式中。

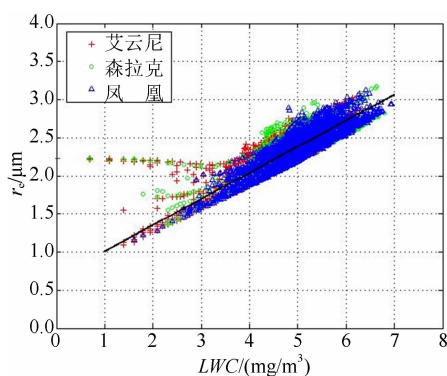


图 8 台风“艾云尼”、“凤凰”、“森拉克”对流云零度层以下低层水云的有效粒子半径与液态水含量的关系 (黑线为有效粒子半径和液态水含量取自然对数的线性拟合线)

3 小结

利用 CloudSat 卫星相关产品, 分析了

0914 号超强台风台风“彩云”的水云和冰云有效粒子半径和云水含量的分布特征, 并在此基础上探讨了两个云微物理参数的相关性。为了进一步说明统计关系的普适性, 对处于不同发展时期的多个台风进行了检验, 研究表明:

(1) “彩云”台风深对流云中水云液态水含量基本在 400 mg/m^3 以下, 有效粒子半径分布在 $2 \sim 18 \mu\text{m}$, 峰值出现在 $10 \mu\text{m}$ 附近。冰云的水含量大部分在 1000 mg/m^3 以下, 有效粒子半径在 $20 \sim 160 \mu\text{m}$, 在各区间分布较散。

(2) 台风深对流云系中水云(冰云)的有效粒子半径和液态水含量(冰水含量)的散点图存在明显的下边界, 且边界值随着微物理参数的增大而逐渐提高。

(3) 台风零度层以下低层水云的有效粒子半径和液态水含量呈正相关关系, 并可以拟合得到统一的对数线性关系式。

本文仅对台风云系进行了分析。产生强降水的暴雨云团中同样存在深对流云, 这类云中有效粒子半径和云水含量呈现何种关系, 下一步将展开讨论。此外, CloudSat 卫星近年来发布了很多新产品, 比如 2D-CLOUDSAT-TRMM、2D-CLOUDSAT-TC 等, 这些产品能否对云垂直特性分析带来更大的帮助也值得深入探讨。

参考文献

- [1] 周毓荃, 赵妹慧. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用 [J]. 南京气象学院学报,

- 2008, **31**(5): 603–614.
- [2] Li J, Geldart D J W, Chýlek P. Solar Radiative Transfer in Clouds with Vertical Internal Inhomogeneity [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 1994, **51**(17): 2542–2552.
- [3] Liou K N, Gu Y, Yue Q, et al. On the Correlation Between Ice Water Content and Ice Crystal Size and Its Application to Radiative Transfer and General Circulation Models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(13): 195–209.
- [4] Durden S L, Tanelli S, Dobrowalski G. CloudSat and A-Train Observations of Tropical Cyclones [J]. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2009, **3**(1): 80–92.
- [5] 赵姝慧, 周毓荃. 利用多种卫星研究台风艾云尼宏微观结构特征 [J]. *高原气象*, 2010, **29**(5): 1254–1260.
- [6] 尚博. 利用 CloudSat 对华北、江淮云垂直结构及降水云特征的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [7] 张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 2015, **39**(2): 235–248.
- [8] 杨冰韵, 张华, 彭杰, 等. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征 [J]. *高原气象*, 2014, **33**(4): 1105–1118.
- [9] 陈勇航, 邓军英, 张萍, 等. 中天山附近强降雨过程中云冰水含量随高度变化特征 [J]. *资源科学*, 2013, **35**(3): 655–664.
- [10] 史兰红, 崔林丽, 赵兵科, 等. 台风眼壁及周围螺旋云带云属性垂直分布研究 [J]. *热带气象学报*, 2015, **31**(1): 51–62.
- [11] Haynes J M, Stephens G L. Tropical Oceanic Cloudiness And the Incidence of Precipitation: Early Results from CloudSat [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(9): 252–254.
- [12] Wood N. Level 2B Radar-Visible Optical Depth Cloud Water Content (2B-CWC-RVOD) Process Description Document Version 5.1 [R]. Cloudsat Project, 2008: 5–15.
- [13] 孙振泽, 问伟力, 郭伟, 等. 彩云台风结构特征分析 [C]. 福州: 2010 年福建省气象学会学术年会, 2010.
- [14] 严卫, 韩丁, 周小珂, 等. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结构特征 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(6): 1809–1824.
- [15] Liou K N. *大气辐射导论* [M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [16] Austin P M, Bemis A C. A Quantitative Study of the 'BRIGHT Band' in Radar Precipitation Echoes [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1950, **7**(2): 145–151.