

唐菁,陈生,李峙,等,2023. 基于雷达观测的华南夏季降水类型日变化的时空分布特征[J]. 气象,49(3):279-290. Tang J, Chen S, Li Z, et al, 2023. Spatio-temporal distribution characteristics of diurnal variation of summer rainfall in South China based on radar observation[J]. Meteor Mon, 49(3): 279-290 (in Chinese).

基于雷达观测的华南夏季降水类型日变化的时空分布特征^{*}

唐菁^{1,2} 陈生^{3,4} 李峙^{1,2} 韦春霞⁵

- 1 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001
- 2 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530001
- 3 中国科学院西北生态环境资源研究院黑河遥感站, 兰州 730000
- 4 中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省遥感重点实验室, 兰州 730000
- 5 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022

提 要: 新一代多普勒天气雷达(CINRAD)具有高时空分辨率的特点,可以精细观测降水强度变化过程以及降水区域的实时移动,能有效监测灾害性天气事件。利用华南地区的多普勒天气雷达组网拼图资料,系统研究分析 2017—2020 年间夏季降水类型时空分布特征。研究表明:华南夏季出现的降水多为层云降水,大部分地区出现频次占比超过 85%,而对流降水出现频次仅占 14%左右。广东的雷达反射率峰值和对流降水频次均高于广西和海南。华南的雷达反射率峰值和降水频次显示出强烈的日变化特征,并存在显著的区域性差异。雷达反射率峰值与对流降水空间分布大致相似,沿海地区降水频次高于内陆地区;而层云降水在内陆地区的发生频次高于沿海地区。华南层云降水频次多集中在夜间,并在上午达到峰值;反射率峰值和对流降水多集中在日间,高值区随着时间变化从西部沿海不断向内陆和东部沿海移动扩张,并在午后和夜间之间达到峰值。对流降水日变化在沿海和内陆地区呈现不同的双峰模式,西部沿海上午出现主峰值,次峰值出现在午后早些时候;而内陆的粤中地区上午峰值明显低于午后峰值。

关键词: CINRAD, 雷达反射率, 对流降水, 层云降水, 降水日变化

中图分类号: P426, P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.061001

Spatio-Temporal Distribution Characteristics of Diurnal Variation of Summer Rainfall in South China Based on Radar Observation

TANG Jing^{1,2} CHEN Sheng^{3,4} LI Zhi^{1,2} WEI Chunxia⁵

- 1 Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001
- 2 School of Geographic Sciences and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001
- 3 Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000
- 4 Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000
- 5 Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022

^{*} 国家自然科学基金项目(41875182)、北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室开放基金(NNNU-KLOP-K2103)和广西重点研发计划(桂科 AB22035016、桂科 AB22080104)共同资助

2021 年 11 月 14 日收稿; 2022 年 6 月 10 日收修定稿

第一作者:唐菁,主要从事地图学与地理信息系统研究. E-mail: tangjinggx@163.com

通讯作者:陈生,主要从事水文气象遥感与人工智能研究. E-mail: chensheng@nieer.ac.cn

Abstract: The Chinese new generation of Doppler weather radar (CINRAD) has the advantages of high spatio-temporal resolution. It can observe the change process of precipitation intensity and the real-time movement of precipitation area in detail, and also can effectively monitor disastrous weather events. In this paper, the spatio-temporal distribution characteristics of summer precipitation in South China are investigated based on Doppler multiradar mosaic data in South China from 2017 to 2020. The results show that the frequency of summer precipitation in South China is dominated by stratiform precipitation. In most parts of South China, the frequency of stratiform precipitation is more than 85%, while the frequency of convective precipitation only accounts for about 14%. The peak reflectivity and the frequency of convective precipitation in Guangdong are higher than those in Guangxi and Hainan. Both the peak reflectivity and precipitation frequency show strong diurnal variation with local solar radiation, and also exhibits discernible regional differences. The reflectivity peak is roughly similar to the spatial distribution of convective precipitation, and the frequencies along the coast are higher than those in the inland region. Stratiform precipitation occurs most frequently in the inland region than along the coast. The frequency of stratiform precipitation is mostly concentrated at night with peaks seen in the morning. The peak reflectivity and convective precipitation are mostly concentrated in the daytime, the high-value region expands from the western coast to the inland and eastern coast as time changes, reaching the peak between afternoon and night. The diurnal variation of convective precipitation exhibits different bimodal patterns in coastal and inland region. A major peak appears in the morning and a secondary peak in the late afternoon, and the morning peak in central Guangdong is significantly lower than the afternoon peak.

Key words: CINRAD, radar reflectivity, convective precipitation, stratiform precipitation, rainfall diurnal variation

引 言

降水日变化主要是由太阳辐射的驱动而导致降水在一天内出现的周期性变化,由于复杂地形和海陆的影响,其具有明显的区域性特征(宇如聪等, 2014)。降水主要分为对流降水和层云降水,不同类型的降水具有其特定的热力、动力和微物理特性(刘鹏等, 2012)。研究不同降水类型的时空分布,有利于增进降水与热力学以及大气循环之间的相互关系。

研究降水日变化,掌握降水的周期变化,可提高对降水预报的可预报性(Carbone et al, 2002)。降水日变化一直以来都是学术研究的热点,以往的研究大多利用雨量计来探讨某一地区降水的时空分布特点(马慧等, 2009),但由于降水强度和分布具有强烈的时空变化,而雨量计分布密度又十分有限,容易遗漏空间尺度小的局地强降水中心,同时雨量计也未能对不同降水类型进行观测(刘鹏和傅云飞, 2010)。近年来,高分辨率卫星和天气雷达已成为研究降水分布、发生与变化过程等天气特征的重要工

具,国内许多学者利用卫星降水产品对中国以及其他地区的降水日变化进行研究分析。Yu et al (2007)、Chen S et al(2016a)研究发现,中国夏季降水日变化较大,具有明显的区域差异,池艳珍等(2005)、高辉等(2013)研究发现中国华南地区地处欧亚大陆的东南端,是中国雨量最充沛的地区,也是夏季强降水的高频区,具有雨季长,暴雨次数多等特点。华南的两个汛期主要发生在4—9月,分别为前汛期(4—6月)和后汛期(7—9月)。夏季降水主要在下午达到峰值。由于海陆风、太阳辐射和复杂地形等的影响,沿海地区常出现强降雨,且日对流降雨量远大于内陆地区(Zhao, 2013)。降雨在中午时分主要出现在沿海地区,且由于内陆地区地表温度不断升高,傍晚时分降雨集中出现在内陆地区(Chen, 2020)。

全球测雨卫星(GPM)的双频测雨雷达(DPR)是目前唯一在轨的星载降水雷达,但时间和空间分辨率都较低,且近地面的降水观测误差比较大,难以精确估测快速发展的对流降水。同时,刘鹏等(2010)、孔宇(2017)、张华龙等(2020)也利用地面观测数据(如地基雷达和雨量计)对卫星降水资料的精

确度进行误差验证。Chen S et al(2013;2014)早年对 TRMM 卫星搭载的降水雷达(PR)的评估工作,以及后续对 GPM DPR 的评估验证工作,都表明星载雷达的测量存在比较大的误差。另外,与卫星降水资料相比,地基雷达资料是目前时空分辨率最高的天气观测资料,可以获取降水过程的精细时空信息和不同相态的降水分布信息,如冰雹、强降水落区,垂直累积液体水含量等,可以更好地追踪快速发展的降水活动。

中国从 20 世纪 90 年代开始部署新一代天气雷达网,现已部署 200 多部天气雷达,并建立了完善、密集的雷达观测网络(黄朝盈等,2020)。在多雨的沿海地区,大部分天气雷达为 S 波段雷达。多普勒天气雷达具有高时空分辨率、定量测量降水及监测大尺度天气系统空间结构的能力,还可以准确监测降水强度的变化过程以及降水区的实时移动。如今,多普勒天气雷达已成为监测预警灾害性天气事件的重要工具,广泛应用于各个领域(李柏等,2013;支树林等,2018;纪永明等,2018;管理等,2020)。近年来,中国气象局利用一系列质量控制方法不断提高雷达拼图的质量,李彦霖等(2018)利用贵阳雷达站资料,分析了 2014—2016 年 5—8 月贵阳地区的对流性降水特征;Bai et al(2020a;2020b)通过 CMORPH 卫星降水产品和雨量计数据验证了雷达组网拼图资料的可用性,并利用华南地区雷达组网拼图揭示了季风期华南沿海地区对流触发活动的时空变化特征。因此,雷达拼图数据为研究不同地区降水活动的气候特征提供了一定的参考。

本文以华南地区(广东省、广西壮族自治区和海南省)为研究区,利用华南地区的多普勒天气雷达组网拼图资料,构建华南反射率数据集,从降水日变化的角度,统计分析 2017—2020 年华南地区夏季反射率、对流和层云降水的气候特征,有助于了解华南地区夏季对流和层云降水的日变化规律,为该地区今后的气候研究和防范洪涝灾害等方面提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区域

本文以华南地区为研究区,经纬度跨度为 $18^{\circ}1' \sim 26^{\circ}20'N$, $104^{\circ}2' \sim 117^{\circ}80'E$ (图 1)。华南地区地处中国南部,地势由北向南倾斜,地形复杂。该区域

属亚热带季风气候和热带季风气候,雨热同期,降水强度大,也是中国降水最多、汛期最长的地区(Chen X C et al,2014;Chen S et al,2016b)。

1.2 研究资料

多普勒天气雷达观测降水能力强,不仅可以观测到发生降水的区域,还可以观测到降水区域内的降水强度及时空变化,并且能快速准确获取精细的降水信息,是观测和研究降水变化过程的有效工具。雷达拼图数据来自于中国气象局国家气象科学数据中心制作的雷达反射率拼图产品(<http://www.nmic.cn/site/index.html>),显示了雷达基本反射率(dBz),并有 8 个地理区域(中国、中国东北、中国华北、中国西北、中国西南、中国华中、中国华东、中国华南)。在 2016 年 6 月 15 日之前每 10 min 生成一次,之后每 6 min 生成一次。

本文使用 2017—2020 年 6—8 月的华南雷达拼图构建华南反射率数据集,数据边界范围为 $16^{\circ} \sim 28^{\circ}N$, $104^{\circ} \sim 122^{\circ}E$,时间分辨率为 6 min,由 800×600 的格点构建成网络,空间分辨率约为 2.15 km(Bai et al, 2020a),其中有 84 358 张雷达拼图可用,数据完整率为 95.51%。

参考 Bai et al(2020a)处理雷达拼图的方法,从拼图数据的红-绿-蓝彩色空间(RGB)中提取反射率(dBz),通过读取各像素点的 RGB 值,按照颜色条分配与其相对应的 dBz(图 2)。由于拼图数据部分像素点被注记(地名、河流、国界线等)覆盖而导致数据缺失,因此对数据缺失地区使用 Cressman 插值算法补充缺失值,同时本文不考虑因插值带来的误差影响。

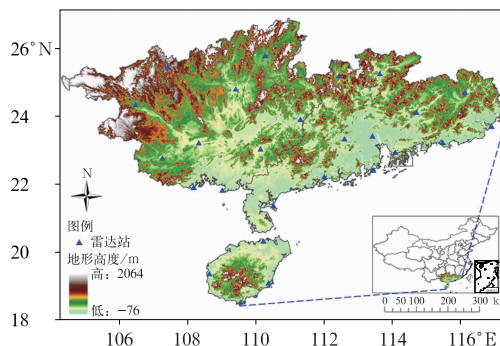


图 1 中国华南地区地形及雷达站点空间分布
Fig. 1 Topography of South China and spatial distribution of radar stations

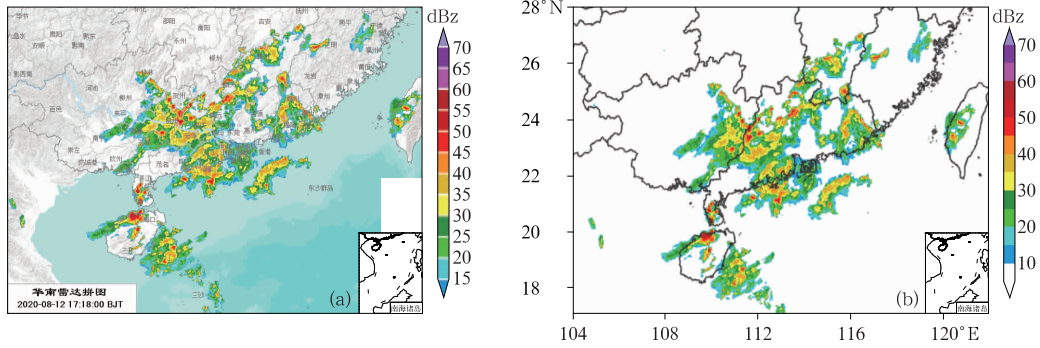


图 2 (a)2020 年 8 月 12 日 17:18 华南雷达拼图示例,(b)提取图 2a 中的雷达反射率

Fig. 2 (a) A radar mosaic map at 17:18 BT 12 August 2020 over South China and (b) reflectivity map extracted from Fig. 2a

1.3 研究方法

1.3.1 Cressman 插值

Cressman 插值算法可对行政区域、字体、河流等图层掩盖区域进行修补填充,插值的结果接近真实值,可以极大程度上确保数据在空间上的连续性,因而广泛应用于各种气象数据分析中(符传博等,2011)。其基本原理是:根据实际研究尺度确定影响半径,以插值点为中心,计算影响半径 R 以内各邻近点的权重系数 w ,最终得到插值点与各邻近点的加权平均值(冯锦明等,2004),具体公式如下:

$$\alpha' = \alpha_0 + \Delta\alpha_{(i,j)} \quad (1)$$

$$\Delta\alpha_{(i,j)} = \frac{\sum_{n=1}^N [w_{(i,j)}^2 \Delta\alpha_n]}{\sum_{n=1}^N w_{(i,j)}} \quad (2)$$

$$w_{(i,j)} = \begin{cases} \frac{R^2 - r_{(i,j)}^2}{R^2 + r_{(i,j)}^2} & r < R \\ 0 & r \geq R \end{cases} \quad (3)$$

式中: α' 是 Cressman 插值后的格点 (i,j) 的值, α_0 是格点 (i,j) 上的雷达反射率背景场的初始值; $\Delta\alpha_n$ 为观测点 n 的观测值与背景场初始值 α_0 之差, N 为影响半径 R 内的总观测数; $w_{(i,j)}$ 为权重函数, r 为格点 (i,j) 到观测点 n 的距离。其中,影响半径 R 的选取具有一定的人为因素,一般选取常数 1、2、4、7 和 10 (冯锦明等,2004)。

1.3.2 降水类型分类

降水一般可以分为对流和层云降水两种类型 (Varma and Liu, 2010),国内外已做了很多利用雷

达反射率资料来区分对流降水和层云降水的相关研究。早期 Austin and Houze(1972)使用基于雨量计资料的 background-exceedence technique(BET)技术来区分对流降水,即只要降水率超过给定的背景阈值,就被识别为对流降水,其余区域为层云降水(肖艳姣,2007)。Churchill and Houze(1984)将 BET 技术运用到二维雷达反射率资料中,通过设置固定的影响半径,利用反射率阈值确定对流核,将对流核周围的区域识别为对流降水。Steiner et al(1995)在此基础上,建立影响半径和反射率阈值随背景强度变化的反射率函数,来识别对流降水。这种基于 BET 技术改进的方法称为“巅峰值法”。Rickenbach and Rutledge (1998)、Wilson and Roberts (2006)、Chen S et al(2015)研究表明 40 dBz 为反射率阈值可以用于确定并区分对流和层云降水。Bai et al(2020a)以 40 dBz 为阈值识别了华南暖季(4—9 月)的对流降水,并利用雨量站和 CMORPH 卫星数据来验证对流降水数据集的准确性。

由于本文主要针对华南夏季降水,而华南夏季的融化层高度一般在 5~6 km(Xu et al,2009;Chen X C et al,2014),对降水类型分类结果影响较小 (Parker and Knievel, 2005)。因此,本文设置区分对流降水和层云降水的阈值为 40 dBz。反射率大于等于 40 dBz 的格点被识别为对流降水,小于 40 dBz 并大于等于 10 dBz 的格点为层云降水。

1.3.3 概率统计法

为了方便统计以及确保每个格点有足够的样本,本文对华南雷达反射率数据集进行格点化处理,生成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率的格点数据,来增加样

本量和统计可信度。然后基于 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 网格中各格点的样本,统计各格点的反射率峰值、对流降水和层云降水频次。参考 Chen S et al(2016a)的定义,将各格点在统计时段内的最大反射率作为该格点的反射率峰值,并记录最大反射率在统计时段内所出现的时间,选取最大反射率出现最频繁的小时时间为该格点的反射率峰值时间。层云降水频次为格点在统计时段内累计识别为层云降水总次数与总降水次数的比值。同理对流降水频次是指格点在统计时段内识别为对流降水总次数与总降水次数的比值。总降水次数是指两种降水类型观测次数总和。

由于华南地区经纬度跨度较大,横跨了多个时区,本文使用时间为当地太阳时(local solar time, LST; $LST = UTC + (Lon/180^{\circ}) \times 12$],即当地太阳在天顶的时候为 12 时(以下均为地方时, LST)。从反射率峰值和各类型降水频次来分析华南地区夏季降水类型的时空分布变化特征。

2 结果分析

2.1 华南夏季降水雷达反射率峰值日变化空间分布

图 3 显示了华南 2017—2020 年夏季雷达反射率峰值出现时间的时空分布情况,华南夏季绝大部分地区的反射率在午后至夜间达到峰值,且反射率峰值出现时间呈现出由西到东的阶梯性变化,具有显著的区域特征。广东反射率峰值多出现在夜间,而海南反射率峰值主要在午后出现。广西反射率峰值出现时间主要集中在午后至夜间,桂中地区反射率峰值出现时间相比于广西其他地区稍晚,桂西北和桂西南部分地区反射率峰值则在上午出现。

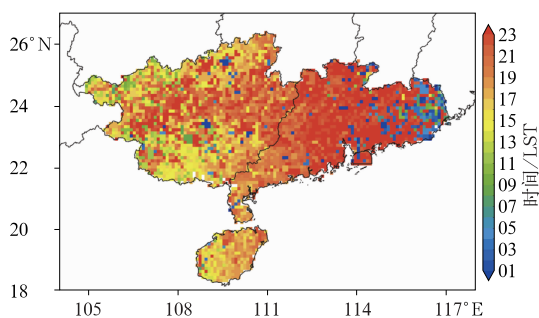


图 3 2017—2020 年华南夏季雷达反射率出现峰值的时间分布

Fig. 3 Time distribution of peak radar reflectivity in summer over South China in summer from 2017 to 2020

由于华南雷达拼图时间分辨率为 6 min,每小时会生成 10 张雷达拼图数据。为进一步了解反射率的日变化特征,本文统计了 2017—2020 年华南夏季每小时格点反射率的最大值,逐时分析华南夏季反射率峰值时空变化。即在 2017—2020 年夏季,以格点中同一小时内被观测到所有反射率值中的最大值为该格点的反射率峰值。图 4 显示华南夏季反射率从西北向东南方向不断递增;也就说明,反射率存在由内陆向沿海的阶梯变化,即内陆的反射率峰值明显小于沿海地区。08 时,反射率高值区主要出现在华南西南部(图 4i),之后迅速向内陆地区和东北方向扩张发展。正午时分(图 4m)开始,反射率峰值的高值区位于琼州海峡及附近地区,并不断向粤中地区移动。夜间(图 4u~4b)反射率峰值不断增大,同时其分布范围达到最大,广东反射率峰值基本上达 55 dBz 以上。最后,反射率峰值在午夜时分逐渐减弱。

华南地区反射率峰值的低值区主要位于广西西北部的喀斯特山区,广西反射率峰值的高值区主要于中午到傍晚(12—18 时)出现在桂南沿海地区(图 4m~4s),桂北地区在午后至傍晚(图 4p~4t)达到 55 dBz 以上。正午(图 4m),海南西北部沿海地区的反射率峰值首先达到最大值,之后高值区向东方向移动增强,午后(图 4o~4r)再次达到最大值,傍晚(图 4t)逐渐减弱;广东的反射率峰值高于广西和海南,13 时开始于雷州半岛出现峰值高值区,并逐渐增大至凌晨。上述分析表明,华南地区反射率峰值多出现在午后至夜间,且存在明显的地域特征。广东是华南地区反射率峰值的高值区,沿海地区的反射率峰值高于内陆地区。

2.2 华南夏季对流降水和层云降水频次的时空分布特征

华南夏季对流降水和层云降水的空间分布特征来看(图 5),华南的夏季对流和层云降水具有强烈的日变化特征,且层云降水频次明显远高于对流降水的四倍以上。刘鹏和傅云飞(2010)指出,夏季两种降水类型在中国南方大部分地区,占总降水量的比例相当,Yu et al(2010)也提出类似的结论。由此可看出,虽然对流降水频次明显不如层云降水,但降水量大。此外,对流降水频次和反射率峰值的空间

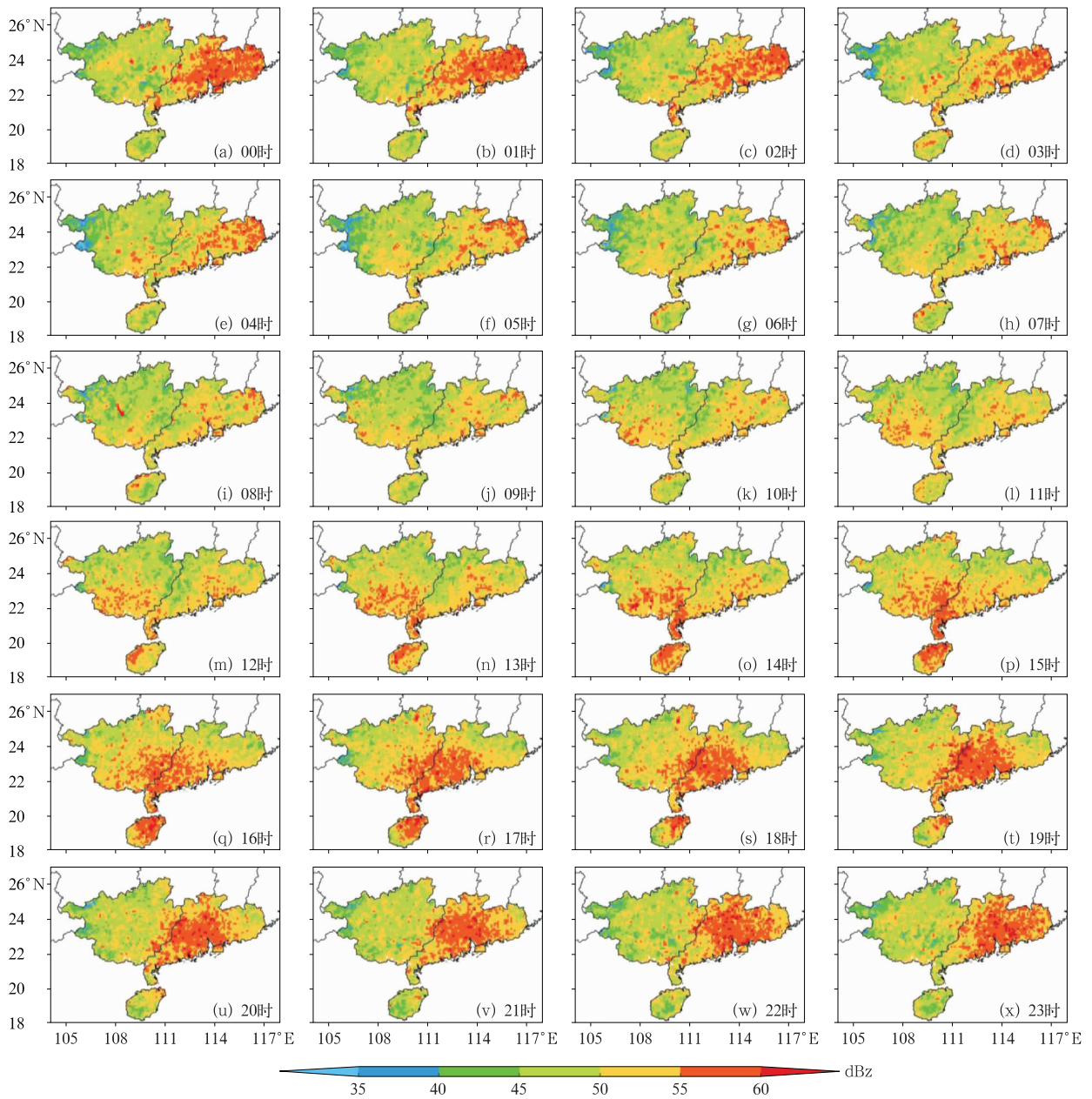


图 4 2017—2020 年华南逐时夏季反射率峰值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of hourly reflectivity peak values over South China in summer from 2017 to 2020

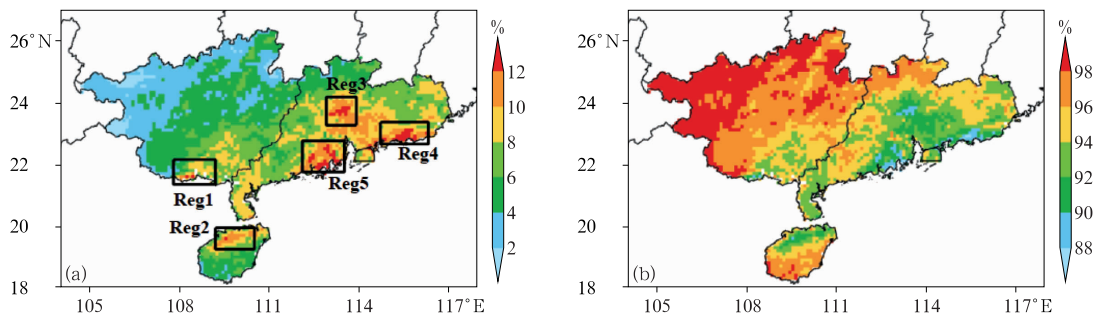


图 5 2017—2020 年华南夏季 (a) 对流降水和 (b) 层云降水频次的空间分布
(方框代表具体范围见表 1)

Fig. 5 Distribution of (a) convective and (b) stratiform precipitation frequencies over South China in summer from 2017 to 2020
(Detailed information of the scope in the boxes is in Table 1)

表 1 分析区域范围

Table 1 Scope of analysis area

区域代号	纬度范围/°N	经度范围/°E	对应降水中心
Reg1	21.6°~22.4°	108.1°~109.5°	桂南沿海
Reg2	19.3°~20.0°	109.2°~110.5°	琼东沿海
Reg3	23.3°~24.2°	112.9°~113.9°	粤中内陆
Reg4	22.7°~23.4°	114.7°~116.3°	粤东沿海
Reg5	21.8°~22.8°	112.1°~113.5°	粤西沿海

分布非常相似,都是从西北向东南方向不断递增的分布特征,而层云降水呈现从西北向东南方向不断递减的分布特征。揭示出对流降水与反射率峰值的空间分布模式较为相似,且对流降水频次比层云降水小。对流降水频次高的地区集中分布在华南沿海和粤中地区,超过 14%。反之,层云降水频次高的地区集中分布在广西西北部的喀斯特山区以及桂北部分地区,少量分布在海南南部地区。

华南是我国夏季强降水的高频区,为了解华南夏季不同时段不同降水的日变化特征,本文逐时探讨对流降水和层云降水的日变化过程。华南夏季每小时的对流降水和层云降水频次分布(图 6、图 7)显示,广西夏季出现的降水多为层云降水,沿海和桂北地区是广西对流降水的多发区。孙建华和赵思雄(2002)猜测,喇叭口地形对桂北地区的强降水生成具有一定的影响。桂北地区在午夜(图 6b~6d)的对流降水频次明显大于其他时段。同时,对流降水频次高值区主要分布在桂南沿海地区,并不断地随时间变化向内陆地区移动扩张。至正午(图 6m)高值区范围达到最大,桂南沿海大部分地区对流降水频次达到 14%以上,最后对流降水频次在午后开始逐渐减弱。除北部湾的广西其他地区,尤其是桂西北喀斯特山区,夏季出现的降水多为层云降水,层云降水频次日变化不是很剧烈。从 09 时(图 7j)开始,桂西南地区层云降水频次呈现逐渐减弱的趋势,午后广西大部分地区层云降水频次减弱。可以见,广西夜间的层云降水频次高于日间,桂南沿海地区是对流降水的高频区。

03—05 时(图 6d~6f),对流降水在海南北部的频次达到峰值,但对流降水主要高发时段为午后时分(图 6m~6q),绝大部分地区的对流降水频次达 14%以上,特别是西北部地区,高达 20%。此后对流降水频次在夜间逐渐减弱;而层云降水频次开始

逐渐增加,在傍晚和夜间,海南降水主要由层云降水占据主导地区。从上述分析可看出,琼西地区的对流降水频次高于其他地区,对流降水主要集中在日间出现,并在午后达到峰值。

与广西和海南相比,广东对流降水和层云降水日变化十分强烈,粤中地区的层云降水频次要小于其他地区。03 时(图 6d)粤东地区的对流降水频次高于其他地区,达 16%以上。在 03—06 时,珠三角西侧地区的对流降水频次呈现不断增强的趋势,高值区范围也不断扩大至粤中地区。08 时(图 6i)对流降水频次在珠三角西侧首先达到峰值,粤中地区对流降水频次在 10 时(图 6k)达到峰值。早上层云降水频次高值区主要集中分布在粤西、粤北和粤东地区。同时,珠三角地区对流降水频次开始逐渐减弱,对流降水频次高值区向粤东沿海地区移动。至午后层云降水频次逐渐减弱,而粤中内陆地区的对流降水频次开始再次增大,并在傍晚(图 6t~6w)达到第二次峰值,之后其频次在午夜逐渐减弱。

整体而言,两种类型降水发生的天气系统、地形和海陆风对降水日变化起到了一定的作用(Chen X C et al, 2015)。清晨,层云降水广泛分布在华南大部分地区。对流降水主要在华南沿海地区开始出现,这可能是由于陆风和海岸线附近的盛行风的相互影响(Chen X C et al, 2015)。随后由于太阳辐射和海陆热力差异导致地表温度升高(Chen, 2020),对流降水在上午迅速向内陆和东北移动发展。午后至日落时分(12—18 时),层云降水频次减弱,华南沿海的对流降水频次达到峰值,且对流降水的范围也变得更大。然后在夜间时分,对流降水主要集中在加热的内陆上(Jiang et al, 2017)。此时,对流降水频次的高值区分布于广东大部分地区,粤中地区对流降水频次达到峰值。最后对流降水在午夜减弱(图 6a~6c)。

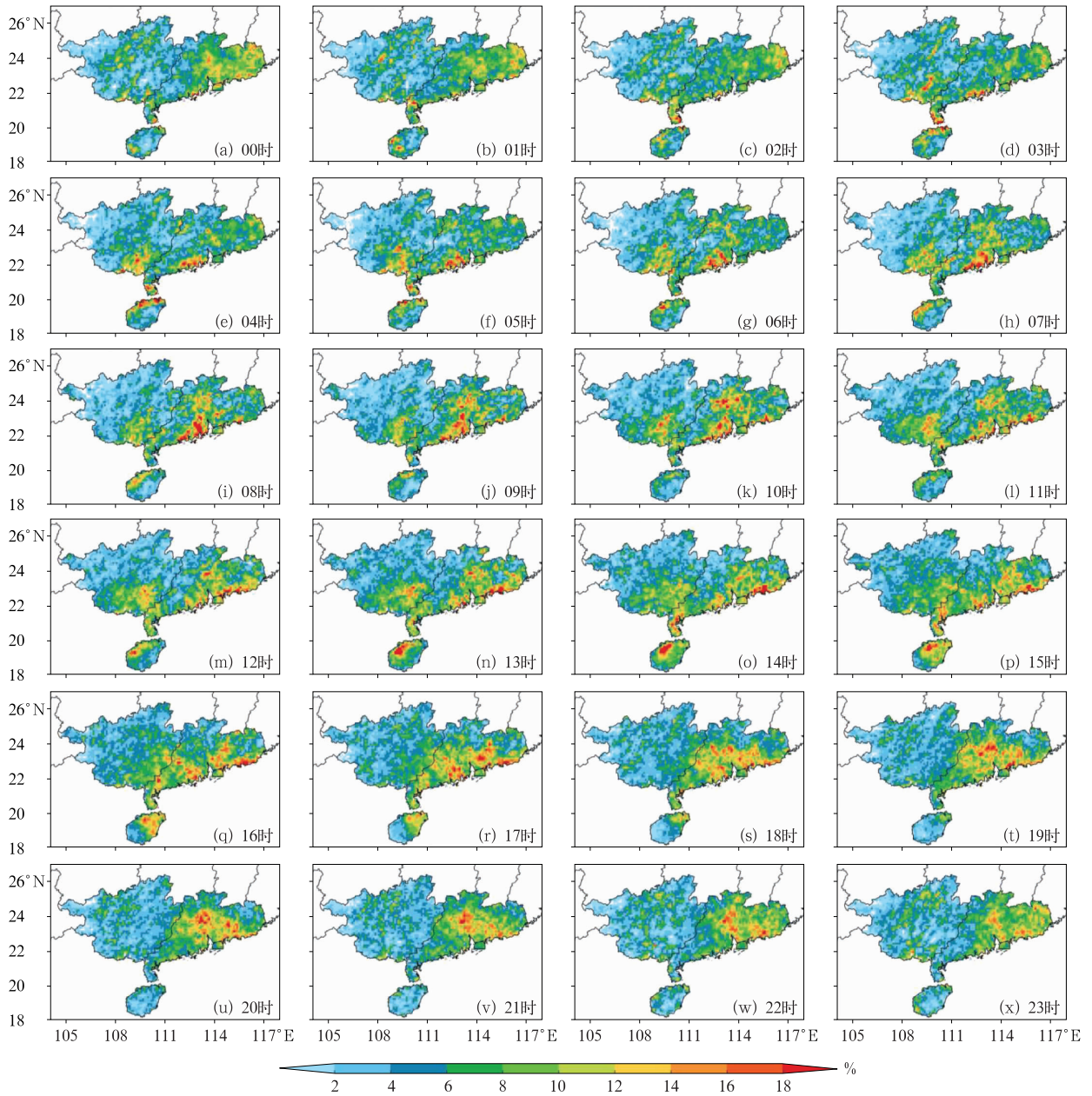


图 6 2017—2020 年华南逐时夏季对流降水频次空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of hourly summer convective precipitation frequencies in South China from 2017 to 2020

上述分析表明,华南地区是夏季强对流天气的多发地区,虽然层云降水频率远高于对流降水,但华南地区的强对流降水对夏季总降水量的贡献与层云降水相当。在复杂地形、海陆热力差异和季风的影响下,华南夏季降水仍具有明显的地域特征。其中,沿海地区是夏季对流降水的多发地区,且沿海地区早于内陆地区达到对流降水频次峰值。夏季,由于太阳辐射的变化,华南大部分地区对流降水主要集中在午后出现。

众所周知,地理和地表因素(包括土地利用类型)对降水都会产生影响。比如由于地形的阻挡造成水汽提升,如果水汽剧烈上升造成强降水就形成对流降水。目前中国国家天气雷达组网分辨率为 1 km/6 min,对于沿海地区小山包等造成的降水,如果尺度够大,基本上可以被雷达捕捉到。目前广东部署了相控阵双偏振雷达,可以捕捉到时空尺度更小的降水。

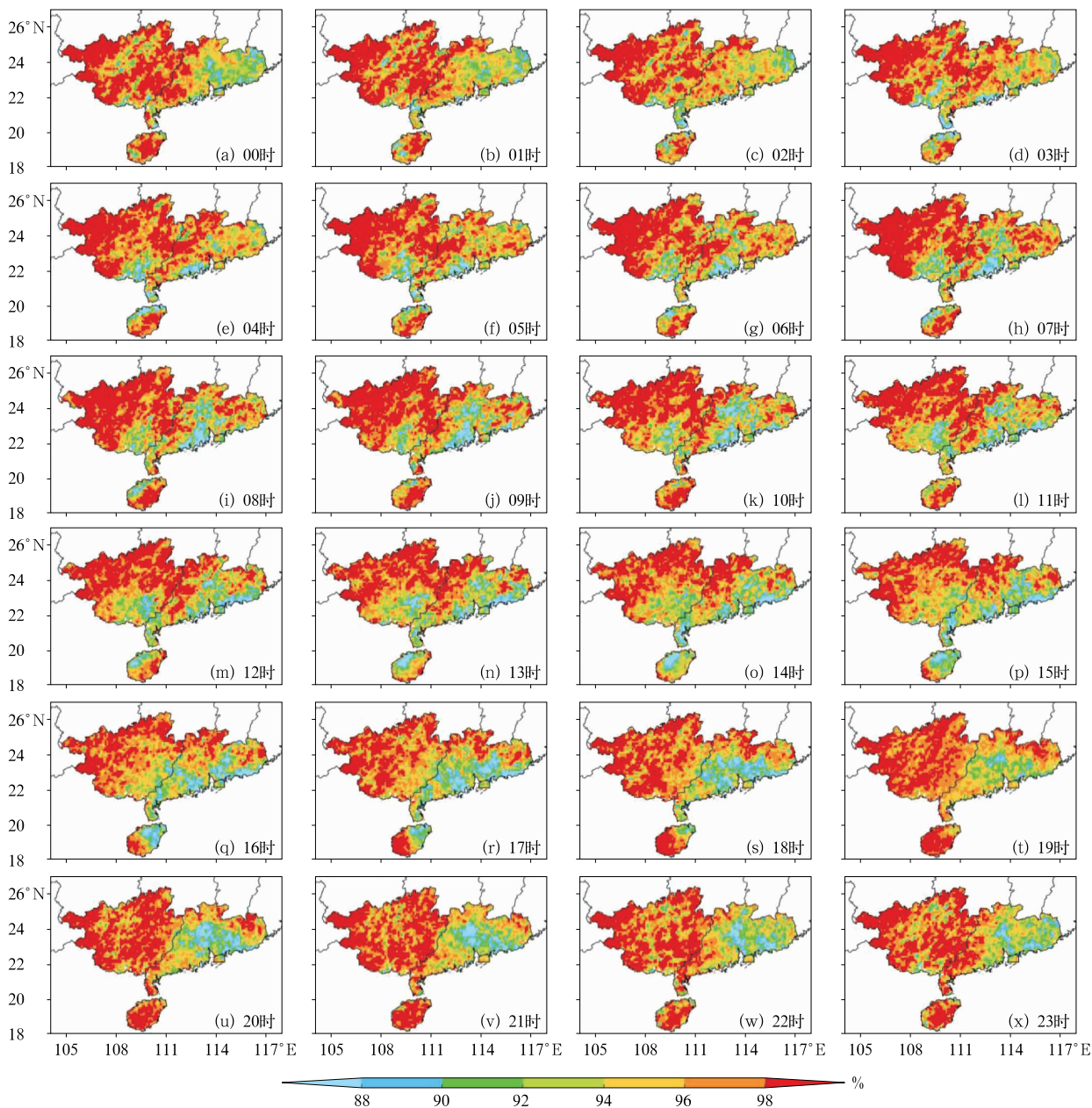


图 7 2017—2020 年华南夏季逐时层云降水频次空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of hourly summer stratiform precipitation frequencies in South China from 2017 to 2020

由于华南夏季降水通常受地形、海陆风和季风等因素的影响(Jiang et al, 2017)。同时从上述分析发现,华南夏季降水具有强烈的日变化和区域差异的特征。本文以雷达对降水的真实观测的反射率为基础进行降水类型的划分,之后进行降水类型日变化时空分布研究,并选取日变化强烈的 5 个区域(图 5a 中方框),逐时分析各区域的降水类型频次日变化特征,了解不同条件下不同类型降水的日变化特征。具体区域范围见表 1。

为更清楚地了解华南对流降水和层云降水的日

变化特征,对 5 个区域的逐时对流降水和层云降水频次的日变化曲线进行对比分析。从图 8 中可看出,虽然其中 4 个区域都位于沿海地区,但对流降水和层云降水的频次呈现显著的差异。

Reg1(桂南沿海)对流降水主要集中在凌晨到日出期间(03—07 时),在日间频次呈现逐渐降低的趋势,夜间对流降水频次高于日间,层云降水频次在 18 时达到峰值。Reg2(琼东沿海)对流降水和层云降水呈现明显的双峰型日变化特征,对流降水频次的峰值分别出现在 03—08 时和 14 时,在上午明显

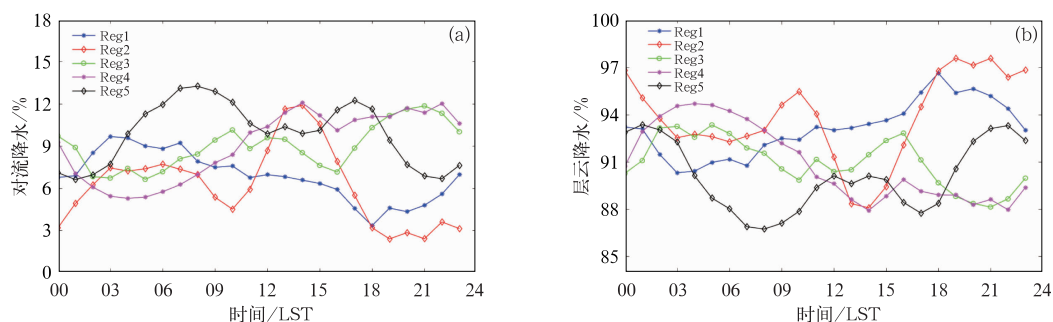


图 8 2017—2020 年华南夏季不同区域逐时(a)对流降水和(b)层云降水频次日变化

Fig. 8 The diurnal variation of (a) convective and (b) stratiform precipitation frequencies in different regions over South China in Summer from 2017 to 2020

上升,并在 14 时达到最大峰值,下午的峰值明显大于上午。10 时和 18—00 时是层云降水频次的高发时段,且夜间的峰值高于 10 时。

Reg3、Reg4 和 Reg5 的层云降水出现时间主要集中在分布在夜间(01—07 时)。Reg3 和 Reg4 层云降水在上午达到峰值,且午后的层云降水频次小于其他时段。

Reg3(粤中内陆)和 Reg4(粤东沿海)的对流降水和层云降水频次变化较为平稳,且在 18 时至次日 10 时变化较为一致。Reg3(粤中内陆)和 Reg5(粤西沿海)对流降水频次的日变化曲线呈现明显的双峰型,Reg3 的对流降水频次峰值一个出现在上午(10 时),另一个出现在晚上(21 时),且晚上的峰值要大于上午。而 Reg5 对流降水主峰值出现在早晨(08 时),18 时出现次峰值。Reg4 的对流降水主要集中在出现在午后至夜间(14—00 时),相比于同是沿海地区的 Reg5,要稍晚些才达到对流降水频次峰值。

以上分析表明,5 个区域具有完全不同的对流降水和层云降水日变化特征,华南西部沿海地区的对流降水频次要早于东部达到峰值。且西部沿海上午的对流频次峰值高于午后晚些时候的峰值,而华南东部和中部地区正好相反。华南地区的层云降水多集中在夜间出现,并在上午达到峰值,午后的层云降水出现频次明显小于其他时段。这与 Luo et al (2013)和 Chen S et al(2016a)的发现较为一致。Jiang et al(2017)指出,上午的降水高峰可能是由于强降水频率,而由于夏季风的影响,地表温度在午后升高,强对流在下午更容易触发,所以下午晚些时候的降水峰值可归因于高降水频率。

3 结论与讨论

为了解华南夏季降水的日变化规律特征,本文利用 2017—2020 年华南地区的多普勒天气雷达组网拼图资料,对华南夏季雷达反射率峰值、对流降水和层云降水频次的日变化特征进行分析,得到以下结论:

(1)雷达反射率峰值日变化分析表明,华南夏季反射率峰值高峰时段为午后至夜间。内陆的反射率峰值明显小于沿海地区,反射率峰值低值区主要分布在广西西北部的喀斯特山区,且反射率峰值呈现由西北向东南方向不断递增的趋势。反射率峰值的高值区最初分布在沿海地区,内陆的反射率峰值在午后不断增大,其范围也逐渐向内陆地区和东北方向不断扩大。

(2)对流降水和层云降水频次分析表明,华南夏季出现降水多为层云降水,对流降水频次明显远低于层云降水。但对流降水的降水强度大,对夏季总降水的贡献量与层云降水相当。同时,区域间降水日变化具有较大差异。沿海和桂北地区是广西对流降水的多发区,层云降水占据桂西北地区夏季降水出现频次的主导地位。相对内陆地区,靠近沿海地区的对流降水和层云降水日变化较为剧烈。沿海地区的对流降水频次早于内陆地区达到峰值。

(3)层云降水在清晨广泛分布在华南大部分地区,对流降水主要集中在沿海地区,之后随时间变化,对流降水频次的高值区范围不断向内陆扩大,对流降水的分布范围也变得更大。华南沿海的对流降水频次达到峰值,粤中地区对流降水频次随后也达到首个峰值。层云降水频次在午后逐渐减弱,对

流降水主要集中在加热的内陆上。粤中地区对流降水频次达到第二个峰值,且比上午的峰值明显。最后对流降水在午夜减弱。

(4)分析5个区域的对流降水和层云降水频次的日变化特征,发现华南地区降水主要呈现双峰模式,但不同区域间对流降水和层云降水频次的双峰模式存在显著的差异。西部沿海上午的对流频次峰值高于午后晚些时候的峰值,华南东部和中部地区相反。且华南西部沿海地区的对流降水频次要早于东部达到峰值。华南地区的层云降水频次多集中在夜间,并在上午达到峰值,午后的层云降水明显小于其他时段。

通过上述分析,可以较为全面地了解华南夏季反射率峰值以及不同降水类型日变化特征,但对降水类型分类能力较弱,影响华南夏季降水日变化的机制复杂,今后需要上述基础上展开进一步分析探讨。

参考文献

- 池艳珍,何金海,吴志伟,2005. 华南前汛期不同降水时段的特征分析[J]. 南京气象学院学报,28(2):163-171. Chi Y Z, He J H, Wu Z W, 2005. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(2):163-171(in Chinese).
- 冯锦明,赵天保,张英娟,2004. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究,9(2):261-277. Feng J M, Zhao T B, Zhang Y J, 2004. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data[J]. Climatic Environ Res, 9(2):261-277(in Chinese).
- 符传博,吴润,丹利,2011. 近50年云南省雨日及降水量的气候变化[J]. 高原气象,30(4):1027-1033. Fu C B, Wu J, Dan L, 2011. Climatic changes of rainfall and rain days in Yunnan Province[J]. Plateau Meteor, 30(4):1027-1033(in Chinese).
- 高辉,蒋薇,李维京,2013. 近20年华南降水季节循环由双峰型向单峰型的转变[J]. 科学通报,58(15):1438-1443. Gao H, Jiang W, Li W J, 2013. Transition of the annual cycle of precipitation from double-peak mode to single-peak mode in South China[J]. Chin Sci Bull, 58(15):1438-1443(in Chinese).
- 管理,戴建华,赵渊明,等,2020. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象,46(12):1543-1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al, 2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai[J]. Meteor Mon, 46(12):1543-1554(in Chinese).
- 纪永明,蒋大凯,陈传雷,等,2018. 基于雷达组网拼图的定量降水反演 I-动态 Z-I 关系法[J]. 气象与环境学报,34(4):18-25. Ji Y M, Jiang D K, Chen C L, et al, 2018. Quantitative precipitation inversion algorithm based on the multi-radar mosaic I: dynamic Z-I relationships[J]. J Meteor Environ, 34(4):18-25(in Chinese).
- 孔宇,2017. 中国大陆 GPM/IMERG 产品的精度评估[D]. 南京:南京信息工程大学. Kong Y, 2017. Evaluation of the accuracy of GPM/IMERG over the mainland of the China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 黄朝盈,张阿思,陈生,等,2020. GPM 卫星和地面雷达对江苏盐城龙卷风强降水估测的对比[J]. 大气科学学报,43(2):370-380. Huang C Y, Zhang A S, Chen S, et al, 2020. Inter-comparison of rainfall estimates from radar, satellite and gauge during the Yancheng Tornado[J]. Trans Atmos Sci, 43(2):370-380(in Chinese).
- 李柏,古庆同,李瑞义,等,2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象,39(3):265-280. Li B, Gu Q T, Li R Y, et al, 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteor Mon, 39(3):265-280(in Chinese).
- 李彦霖,张述文,田程,等,2018. 基于雷达回波的贵阳地区对流性降水特征分析[J]. 气象,44(6):752-758. Li Y L, Zhang S W, Tian C, et al, 2018. Statistics characteristics of radar echoes of convective precipitation in Guiyang[J]. Meteor Mon, 44(6):752-758(in Chinese).
- 刘鹏,傅云飞,2010. 利用星载测雨雷达探测结果对夏季中国南方对流和层云降水气候特征的分析[J]. 大气科学,34(4):802-814. Liu P, Fu Y F, 2010. Climatic characteristics of summer convective and stratiform precipitation in southern China based on measurements by TRMM precipitation radar[J]. Chin J Atmos Sci, 34(4):802-814(in Chinese).
- 刘鹏,傅云飞,冯沙,等,2010. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析[J]. 气象学报,68(6):822-835. Liu P, Fu Y F, Feng S, et al, 2010. A comparison of the precipitation from rain gauge observations with from TRMM PR measurements in the southern China[J]. Acta Meteor Sin, 68(6):822-835(in Chinese).
- 刘鹏,李崇银,王雨,等,2012. 基于 TRMM PR 探测的热带及副热带对流和层云降水气候特征分析[J]. 中国科学:地球科学,42(9):1358-1369. Liu P, Li C Y, Wang Y, et al, 2012. Climatic characteristics of convective and stratiform precipitation over the tropical and subtropical areas as derived from TRMM PR[J]. Sci China Earth Sci, 42(9):1358-1369(in Chinese).
- 马慧,陈桢华,毛文书,等,2009. 华南前汛期降水异常及其环流特征分析[J]. 热带气象学报,25(1):89-96. Ma H, Chen Z H, Mao W S, et al, 2009. Analysis of precipitation in the annually first rainy period and general circulation in the south of China[J]. J Trop Meteor, 25(1):89-96(in Chinese).
- 孙建华,赵思雄,2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J]. 大气科学,26(5):633-646. Sun J H, Zhao S X, 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall in South China Part II: effect of physical processes, initial environmental fields and topography on meso- β convective system[J]. Chin J Atmos Sci, 26(5):633-646(in Chinese).
- 肖艳姣,2007. 新一代天气雷达三维组网技术及其应用研究[D]. 南

- 京:南京信息工程大学:55-63. Xiao Y J, 2007. Three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics and its application study[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology:55-63(in Chinese).
- 字如聪,李建,陈昊明,等,2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报,72(5):948-968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al, 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin, 72(5):948-968(in Chinese).
- 张华龙,肖柳斯,陈生,等,2020. 基于 GPM 卫星的广东汛期降水日变化特征与评估[J]. 热带气象学报, 36(3): 335-346. Zhang H L, Xiao L S, Chen S, et al, 2020. Characteristics and evaluation of diurnal rainfall variation in rainy seasons in Guangdong based on GPM satellite[J]. J Trop Meteor, 36(3): 335-346 (in Chinese).
- 支树林,李婕,陈娟,2018. 江西不同类型强对流天气的地闪统计特征及与雷达回波特征对比分析[J]. 气象,44(2):222-232. Zhi S L, Li J, Chen J, 2018. Statistical characteristics of CG flashes and comparison to radar echoes in different types of severe convections in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 44(2): 222-232 (in Chinese).
- Austin P M, Houze R A Jr, 1972. Analysis of the structure of precipitation patterns in New England[J]. J Appl Meteor Climatol, 11(6):926-935.
- Bai L Q, Chen G X, Huang L, 2020a. Image processing of radar mosaics for the climatology of convection initiation in South China [J]. J Appl Meteor Climatol, 59(1):65-81.
- Bai L Q, Chen G X, Huang L, 2020b. Convection initiation in monsoon coastal areas (South China) [J]. Geophys Res Lett, 47(11):e2020GL087035.
- Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al, 2002. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes [J]. J Atmos Sci, 59(13):2033-2056.
- Chen G X, 2020. Diurnal cycle of the Asian summer monsoon: air pump of the second kind[J]. J Climate, 33(5):1747-1775.
- Chen S, Kirstetter P E, Hong Y, et al, 2013. Evaluation of spatial errors of precipitation rates and types from TRMM spaceborne radar over the southern CONUS[J]. J Hydrometeorol, 14(6): 1884-1896.
- Chen S, Qi Y C, Hong Y, et al, 2014. Performance and Uncertainty Analysis of Precipitation Retrievals Derived from Dual-frequency Precipitation Radar and Microwave Imager onboard GPM over CONUS[C]. Agu Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Chen S, Behrangi A, Tian Y D, et al, 2016a. Precipitation spectra analysis over China with high-resolution measurements from optimally-merged satellite/gauge observations-Part II: diurnal variability analysis[J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 9(7):2979-2988.
- Chen S, Tian Y D, Behrangi A, et al, 2016b. Precipitation spectra analysis over China with high-resolution measurements from optimally merged satellite/gauge observations-Part I: spatial and seasonal analysis[J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 9(7):2966-2978.
- Chen S, Zhang J, Mullens E, et al, 2015. Mapping the precipitation type distribution over the contiguous united states using NOAA/NSSL national multi-sensor mosaic QPE[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 53(8):4434-4443.
- Chen X C, Zhao K, Xue M, 2014. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3 years of operational radar data[J]. J Geophys Res, 119(22):12447-12465.
- Chen X C, Zhao K, Xue M, et al, 2015. Radar-observed diurnal cycle and propagation of convection over the Pearl River Delta during Mei-Yu season[J]. J Geophys Res, 120(24):12557-12575.
- Churchill D D, Houze R A Jr, 1984. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978[J]. J Atmos Sci, 41(6):933-960.
- Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D, et al, 2017. Diurnal variations of pre-summer rainfall over southern China[J]. J Climate, 30(2):755-773.
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al, 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River Basin[J]. J Climate, 26(1):110-132.
- Parker M D, Knievel J C, 2005. Do meteorologists suppress thunderstorms? Radar-derived statistics and the behavior of moist convection[J]. Bull Amer Meteor Soc, 86(3):341-358.
- Rickenbach T M, Rutledge S A, 1998. Convection in TOGA COARE: horizontal scale, morphology, and rainfall production [J]. J Atmos Sci, 55(17):2715-2729.
- Steiner M, Houze R A Jr, Yuter S E, 1995. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data [J]. J Appl Meteor Climatol, 34(9): 1978-2007.
- Varma A K, Liu G S, 2010. On classifying rain types using satellite microwave observations[J]. J Geophys Res, 115(D7):204.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. Mon Wea Rev, 134(1):23-47.
- Xu W X, Zipser E J, Liu C T, 2009. Rainfall characteristics and convective properties of Mei-Yu precipitation systems over South China, Taiwan, and the South China Sea. Part I: TRMM observations[J]. Mon Wea Rev, 137(12):4261-4275.
- Yu R C, Yuan W H, Li J, et al, 2010. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China[J]. Climate Dyn, 35(4): 567-576.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al, 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett, 34(1):L01704.
- Zhao Y C, 2013. Diurnal variation of rainfall associated with tropical depression in South China and its relationship to land-sea contrast and topography[J]. Atmosphere, 5(1):16-44.

(本文责编:王婷波)