

林墨, 黄小燕, 黎彦祖, 等. 基于热力学熵的广西暴雨落区预示性效果检验初报[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(3): 69–75.

Lin Mo, Huang Xiaoyan, Li Yanzuo, et al. Preliminary report on the predictive effect verification of rainstorm area in Guangxi based on thermodynamic entropy[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(3): 69–75.

# 基于热力学熵的广西暴雨落区预示性效果检验初报

——以突发性暴雨为例

林 墨<sup>1</sup>, 黄小燕<sup>1</sup>, 黎彦佐<sup>2</sup>, 黄 颖<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022; 2. 南宁市气象台, 南宁 530029)

**摘要:** 基于热力学熵的 MCS 理论体系预测方法已在广西中尺度短时天气预报业务上得到应用, 为了进一步检验该方法对突发性暴雨的预示性效果, 本文选取了 2019—2020 年广西 3 个不同特点的突发性暴雨过程进行分析。结果表明, 在暴雨落区预示性分析中, 时间分布预示性超前于暴雨实际发生 2—8h, 空间分布预示性与暴雨实际发生发展相吻合, 与基于热力学熵的 MCS 理论体系描述一致。

**关键词:** 暴雨; 热力学熵; 预示性检验; MCS 概念模型

**中图分类号:** P458

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.3.12

**OSID:**



## 引言

华南西部前汛期的突发暴雨大多是由中尺度对流系统(MCS)产生<sup>[1-9]</sup>。早些年, 我国气象学者在研究华南暴雨过程中提出了“暖区暴雨”概念<sup>[10]</sup>, 但正如覃武<sup>[1]</sup>, 谌芸等<sup>[11]</sup>指出, 暖区暴雨是中国大气科学界的一个研究热点, 由于其天气尺度斜压性强迫弱、环境大气热动力不稳定性强, 以及特殊的地形和海陆热力差异等外强迫作用, 导致暴雨对流系统触发机制复杂, 暴雨突发性、局地性特征明显。目前全球业务数值预报模式、中尺度数值模式对此类突发性暴雨的预报能力有限。究其原因, 大气对流是一个开放系统复杂的热动力过程, “上升速度”、“潜热释放”、“卷入稀释”三者同时相互作用, 形成“类 N 体问题”, 动力学方法难以解决此难题。“数值预报空隙”<sup>[12]</sup>是真实存在的, 对流突发性暴雨恰是发生在“数值预报空隙”内。因此, 针对动力学方法上的不足, 林宗桂、林墨<sup>[13]</sup>从热力学入手, 利用热力学熵原理创建了基于热力学熵的 MCS 理论体系。为了进一

步检验该理论体系的暴雨落区预示性效果, 利用 2019—2020 年广西发生的 3 个突发性暴雨实例, 分别从空间和时间的分布预示性对突发性暴雨落区预示性效果进行讨论, 以验证该 MCS 理论体系的适用性。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

资料来源为 2019 年—2020 年广西中尺度负压区预报图(0~6h)和广西区域自动气象站实况雨量图, 选取的 3 个过程为: (1) 2019 年年 6 月 16—17 日暴雨过程; (2) 2020 年 5 月 21—22 日暴雨过程; (3) 2020 年 5 月 24—25 日暴雨过程。3 个暴雨过程共同特点都是在数小时内突发的强降雨, 卫星云图上中尺度演变特征不明显, 雷达回波图上没有对流回波<sup>[1]</sup>, 暴雨发生前传统或者数值天气图上很难分析出强降雨前兆。

根据暴雨过程发生发展特征进行了如下命名: (1) 2019 年 6 月 16—17 日暴雨过程造成了重大经

收稿日期: 2021-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41765002)、广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA281229, 2018GXNSFAA281281)

作者简介: 林墨(1983—), 男, 工程师, 主要从事短时天气预报方法研究。E-mail: 771550973@qq.com

济损失和人员伤亡,属于重灾型例子;(2)2020年5月21—22日暴雨过程由于其传统天气形势图特征不明显,属于极弱环境场例子;(3)2020年5月24—25日暴雨过程由高原短波槽南下触发引起,槽底擦着桂北边界快速东移,属于快速短波槽东移例子。

## 1.2 热力学熵暴雨落区预测方法

热力学熵的暴雨落区预测方法是基于热力学熵的“负熵源→负熵汇→负熵流”MCS发生发展原理和中尺度分离算法<sup>[13]</sup>,由分离算法可生成广西中尺度变压场负变压区预报图。林宗桂等<sup>[13]</sup>研究指出,MCS触发暴雨主要发生在中尺度负变压区内,中尺度负变压区形成和加强超前于MCS的发生发展,预测方法正是利用了这个预示性特征。通过广西中尺度变压场预报图(0~6h)进行检验,以红蓝两色标示,红色区域为负变压区,为所检验的暴雨落区预示性区域,区域颜色越深预示为暴雨主落区中心概率越大;蓝色区域为正变压区,一般由弱冷空气或者下沉气流流入填塞形成。

过程的检验分为空间和时间两部分,空间分布预示性检验采用将中尺度变压场区的形成加强过程与90个国家基本气象站逐小时实况雨量发展过程

进行对比分析;时间分布预示性检验,采用逐1h暴雨及以上量级( $\geq 15\text{mm/h}$ )降雨总站数的时间分布特征直方图进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 2019年6月16—17日暴雨过程

根据特征命名该过程属于重灾型例子。2019年6月16日08时,在桂北边界线附近有弱的静止锋存在,卫星云图上从桂西北边界到湘西有东北-西南向的浅槽前云系,云系北段慢速东移伸展,南段呈准静止状态,到16日20时,云系北段东移伸展湘东北一带,南段仍停留在桂西北边界附近。此时,卫星云图和雷达回波图上难以分析出强降雨发生的前兆特征信息,天气图上的天气系统强度很弱,更难以分析出强降雨即将发生的可能性,但中尺度变压场演变过程所表现出的超前特征却非常明显。

#### 2.1.1 空间分布预示性检验

图1是高空浅槽的槽底附近地面中尺度负变压区从发生到成熟过程的关键阶段,以及明显对流性降雨空间分布图。

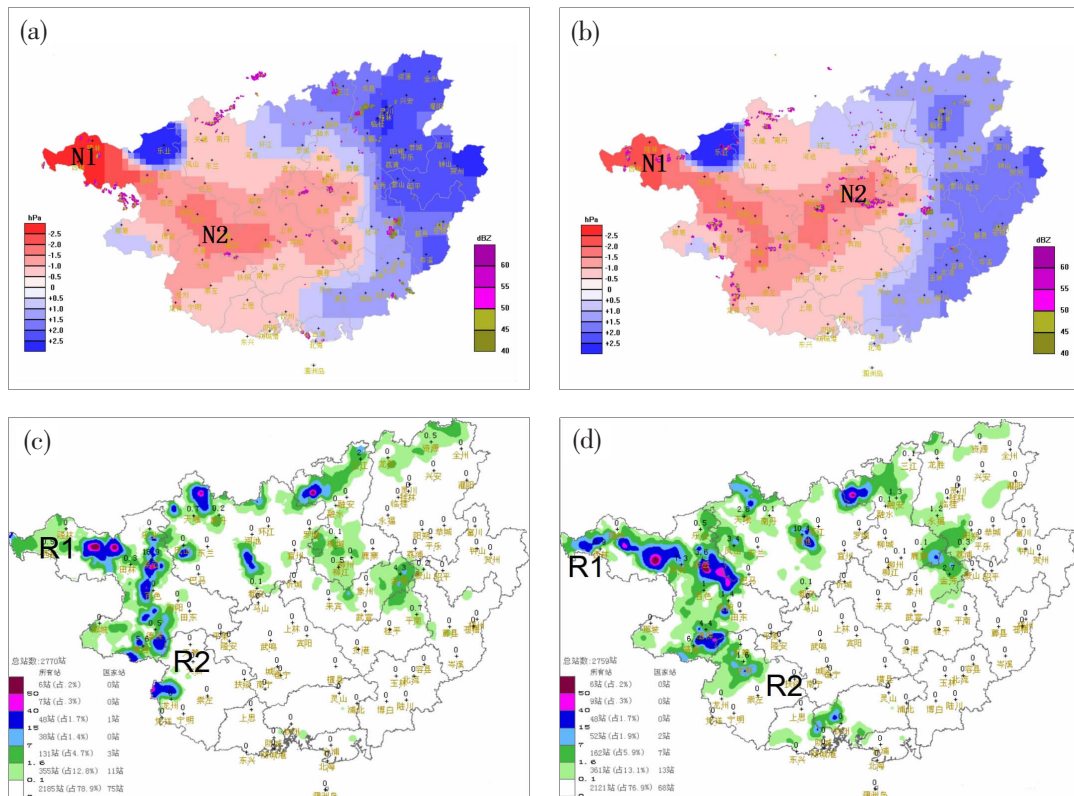


图1 地面中尺度变压图(a、b)和1h降雨分布图(c、d)

(a)2019年6月16日17时;(b)2019年6月16日20时;(c)2019年6月16日23时;(d)2019年6月17日01时

16 日 15 时开始形成中尺度负变压区,但此时结构特征不明显。16 日 17 时(图 1a),桂西负变压区梯度变大,强度明显加强,形成了具有明显槽状结构的负变压核心区 N1-N2,这是发展成熟的中尺度负变压区基本特征。16 日 17 时后,中尺度负变压区的形状和强度少变,一直维持到 16 日 20 时后(图 1b)。

在 1h 降雨量分布图上,16 日 20 时桂西北边界开始有局地对流性降雨出现。16 日 23 时(图 1c),桂西北开始出现具有系统降雨特征的线状对流降雨 R1-R2。对流雨团组成的线状雨线在 17 日 01 时前后降雨强度达到最大(图 1d)。

对比图 1a、图 1b 与图 1c、图 1d,可以明显看出对流雨线 R1-R2 是发生在中尺度负变压核心区 N1-N2 的北边沿附近,这是由于弱冷空气从西北方向渗透入侵抬升触发对流而形成对流线,然后对流线逐渐向中尺度负变压区 N1-N2 内传播发展,但对流活动主要还是在中尺度负变压区内发生发展,两者具有明显的对应关系,中尺度负变压区预示性特征得到验证。

### 2.1.2 时间分布预示性检验

2019 年 6 月 16 日 09 时至 17 日 08 时逐 1h 暴雨及以上量级( $\geq 15\text{mm/h}$ )降雨总站数的时间分布特征如图 2 所示。

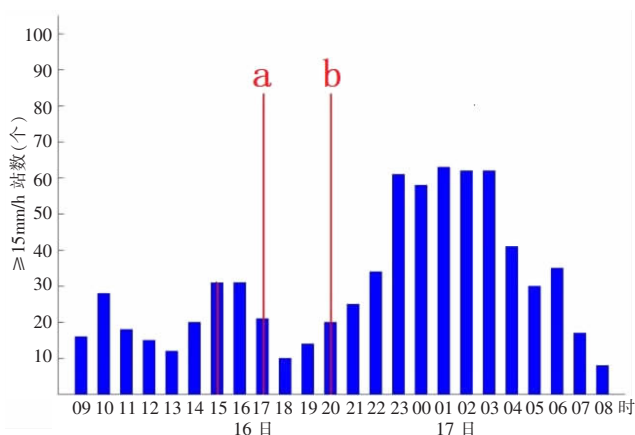


图 2 2019 年 6 月 16—17 日逐 1h 暴雨及以上量级降雨总站数时间分布直方图

(图中红竖线 a、b 分别与图 1a、图 1b 时间对应)

从逐 1h 雨量分布图上可以看到,16 日对流性强降雨峰值区主要出现在 16 日 23 时至 17 日 4 时,这是弱冷空气入侵中尺度负变压区抬升触发对流而形成。虽然 16 日 17 时前也有明显对流性降雨,但 16 日 09—15 时降雨时间分布特征主要是受海洋性

天气系统影响。17 时后(图 1a),在桂西北到桂中一带形成了结构特征明显,强度较强的中尺度负变压区,对应的图 2 17 时(红竖线 a)中尺度负变压区形成后一直到 23 时阶跃式强降雨峰值区开始,时间间隔为 6h,也就是说中尺度负变压区的形成超前于强降雨峰值约 6h,时间分布预示性得到检验。

## 2.2 2020 年 5 月 21—22 日暴雨过程

根据特征命名该过程属于极弱环境场例子。21 日 08 时,在天气图上很难分析出有明显的天气系统影响广西,直至 21 日 20 时,综合卫星云图、雷达回波等多种资料,才能大致分析出有 1 条很弱的短波槽影响广西,槽底伸达桂北,地面有很弱的静止锋配合。与此相对比,中尺度变压场的演变和前兆特征却很明显,预示了 MCS 的发生发展。

### 2.2.1 空间分布预示性检验

暴雨过程出现前、后地面中尺度变压场和降雨量分布演变如图 3 所示。

中尺度变压场上,21 日 19 时开始桂中形成弱负变压区,21 日 12 时(图 3a),从桂西到桂中形成了强度较强、结构特征明显的槽状中尺度负变压区 N1-N2,桂北边界上的正变压区范围和强度基本保持。21 日 17 时(图 3b),中尺度负变压区核心区 N1-N2 位置和强度少变,但桂北正变压区加强南压,中尺度负变压区北边沿梯度加大,表明有弱冷空气渗透入侵。1h 降雨量空间分布图上,21 日 19 时(图 3c),在图 5a 中尺度负变压区 N1-N2 范围内出现了对流性降雨。21 日 20 时(图 3d),中尺度负变压区 N1-N2 内对流性降雨强度加强,形成了由若干雨团组成的对流降雨线 R1-R2。分析图 3 中的中尺度变压场和降雨分布图可以发现,对流性降雨主要出现在中尺度负变压区 N1-N2 内,对流强降雨线 R1-R2 与核心区 N1-N2 有很好的对应关系,中尺度负变压核心区 N1-N2 超前对流强降雨线 R1-R2 约 3~8h,预示性特征得到验证。

### 2.2.2 时间分布预示性检验

2020 年 5 月 21 日 09 时至 22 日 08 时逐 1h 暴雨及以上量级( $\geq 15\text{mm/h}$ )降雨总站数的时间分布特征如图 4 所示。

强度和结构特征明显的中尺度负变压区形成时间约在 21 日 15 时,此后一直维持到 21 日 17 时后,明显的对流性降雨开始时间为 21 日 17 时后,强降雨峰值区主要出现在 21 日 22 时至 22 日 05 时,中尺度负变压区的形成超前于对流性降雨峰值约 6h。



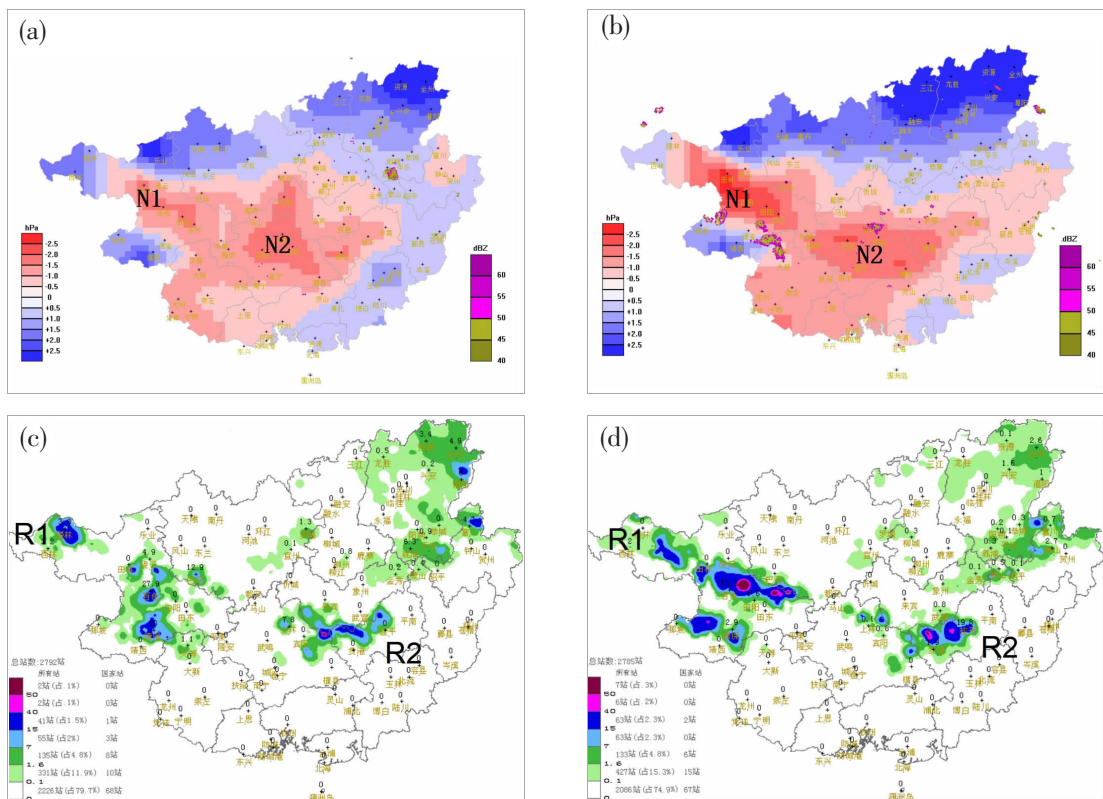


图3 地面中尺度变压图(a、b)和1h降雨分布图(c、d)

(a)2020年5月21日12时;(b)2020年5月21日17时;(c)2020年5月21日19时;(d)2020年5月21日20时

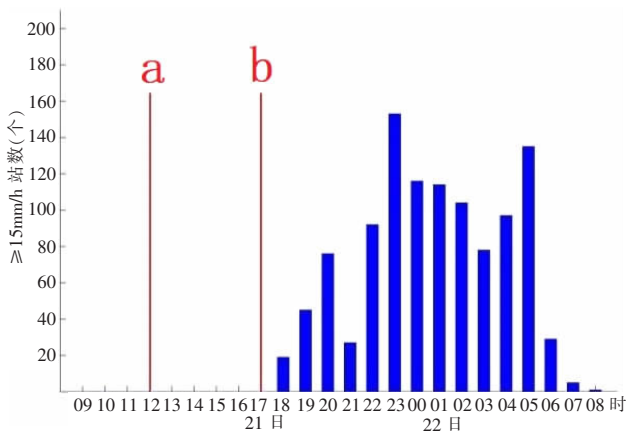


图4 2020年5月21—22日逐1h暴雨及以上量级降雨总站数时间分布直方图

(图中红竖线a、b分别与图3a、图3b时间对应)

从图3a、图3b分析可知,弱冷空气是以渗透式入侵中尺度负变压区的,对应表现在图4中对流性降雨强度以渐增式加强,约在21日22时后才进入峰值区,并维持了约7h。

### 2.3 2020年5月24—25日暴雨过程

根据特征命名该过程属于快速短波槽东移例

子。从雷达拼图分析可以看出,24日08时有一条从高原移出的短波槽进入贵州境内,槽底擦着桂北边界快速东移,24日17时短波槽东移过贵州并趋于减弱消失,这条短波槽对广西无明显影响。随后,又有一条短波槽从高原移出并进入贵州境内,24日23时槽底抵达桂西北边界,24日23时至25日08时槽底扫过桂北大部,对桂北造成了明显影响并产生了强降雨。对这类快速东移的短波槽,常规天气图分析追踪难度很大,经验预报方法成功率不高。但在地面中尺度变压场演变过程中却表现出明显的预示性特征,为短波槽突发性暴雨准确预测提供了有利基础条件。

#### 2.3.1 空间分布预示性检验

中尺度变压场演变过程以及代表性的降雨分布特征图如图5所示。

地面中尺度变压场上,24日23时(图5a)中尺度变压场在短波槽前的桂西北负变压区范围加大,强度加强,形成了块状的负变压中心区N。25日07时(图5b),随着短波槽底部移入,槽底前部的桂西、桂北负变压区进一步加强,形成了结构特征明显的

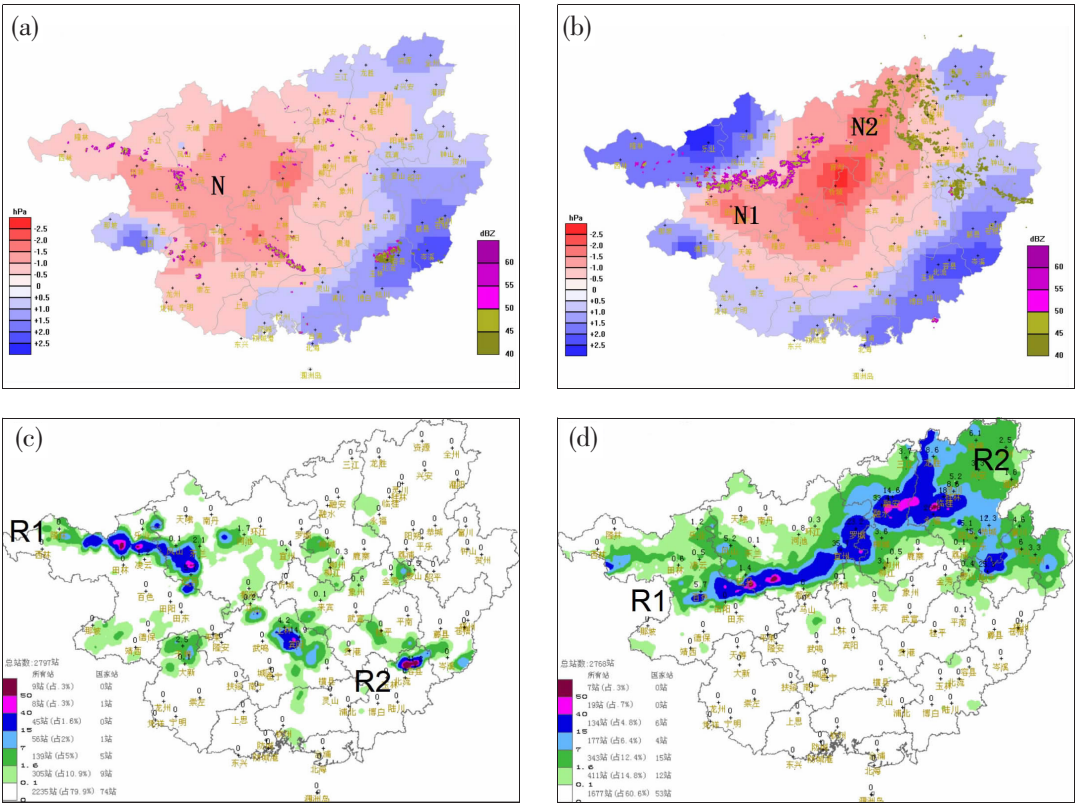


图 5 地面中尺度变压图(a、b)和 1h 降雨分布图(c、d)

(a)2020 年 5 月 24 日 23 时;(b)2020 年 5 月 25 日 07 时;(c)2020 年 5 月 25 日 01 时;(d)2020 年 5 月 25 日 09 时

SW-EN 向的槽状负变压区 N1-N2。从图 5a、图 5b 可以看出,中尺度负变压区加强维持期间,桂西北边界附近的正变压区明显加强南扩,表明短波槽后弱冷空气是从桂西北开始入侵到中尺度负变压 N1-N2 中的。1h 降雨量分布图上,24 日 23 时开始广西境内有分散性的降雨。25 日 01 时(图 5c),在桂西北出现了短的对流性雨线 R1-R2。25 日 06 时开始,对流性降雨明显加强,对流雨线强度加强,并转变成 SW-NE 走向,约在 25 日 09 时(图 5d),对流雨线 R1-R2 发展到峰值,雨团排列紧密,线型光洁,对流降雨达到极强盛阶段。

把图 5a、图 5b 与图 5c、图 5d 作对应分析可以看到,对流雨线 R1-R2 主要是出现在负变压区北边沿弱冷空气渗透入侵部位,前期(图 5c)由于冷空气强度较弱,短对流雨线 R1-R2 近 W-E 向,随着弱冷空气入侵增加,对流雨线 R1-R2 与中尺度负变压区 N1-N2 走向趋于一致,空间分布超前预示性特征得到验证。

2.3.2 时间分布预示性检验

2020 年 5 月 24 日 23 时至 25 日 22 时逐 1h 暴

雨及以上量级( $\geq 15\text{mm/h}$ )降雨总站数的时间分布特征如图 6 所示。

图 6 中降雨总站数的时间分布大致可分为 2 个阶段。第一阶段开始于 24 日 23 时,当前期中尺度负变压区(图 5b)形成后,25 日 01 时对流性降雨明显加强,此后呈继续加强趋势;第二阶段为 25 日 07 时后(图 5d),随着中尺度负变压区继续加强,约在 08 时降雨强度呈阶跃式增强进入到峰值区。前一阶段是中尺度负变压区形成后约 2h,对流性降雨明显加

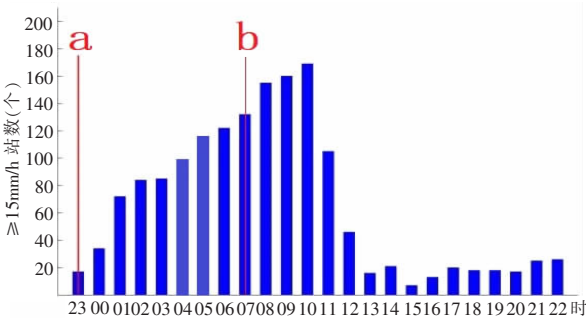


图 6 2020 年 5 月 24—25 日逐 1h 暴雨及以上量级降雨总站数时间分布直方图(图中红竖线 a、b 与图 5a、b 时间对应)

强;后一阶段是中尺度负变压区加强后约 3h,对流性降雨强度又进一步加强。显而易见,中尺度负变压区形成加强超前于对流性降雨增强,时间分布预示性得到验证。

### 3 结论和讨论

#### 3.1 结论

通过以上对 3 个实例的中尺度变压场演变过程及其对应的对流性降水实况的时空分布关系的分析讨论,结论如下:

在 3 个各具特点的突发性暴雨实例中,中尺度负变压区的形成加强均超前于暴雨发生 2~8h,暴雨主落区都在中尺度负变压区内,这与基于热力学熵的 MCS 理论体系描述一致。在检验过程中,中尺度负变压区前兆信号清晰、明确、指示性强,能以较高精度准确预示暴雨落区,可见热力学熵 MCS 理论体系对暴雨预示效果的灵敏性和适用性。

#### 3.2 讨论

从多年系列性暴雨过程的总结,以及近些年广西中尺度短时预报业务试应用实践,还没有发现突发性暴雨落区发生在中尺度正变压区的反例,表明热力学熵 MCS 理论体系具有较高可靠性。本研究主要讨论的是:广西范围内的弱冷空气南下触发抬升形成的短时突发性暴雨,这也是在广西前汛期易造成重大灾情的主要暴雨类型,但由于受条件限制,此类暴雨的预示性效果目前仍需进一步广泛验证,今后将继续重点推进研究。

#### 参考文献:

[1] 覃武,刘国忠,赖珍权,等.华南暖区暴雨预报失误及可

预报性探讨[J].气象,2020,46(8):1039-1052.

[2] 董良森,翟丽萍,覃月凤,等.2018 年广西东南部一次暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):46-54.

[3] 罗红磊,陈海山,林宗桂,等.一条弱静止锋上对流系统发生过程的中尺度特征[J].热带气象学报,2013,29(1):106-114.

[4] 林宗桂,林开平,李耀先,等.一个高空槽前中尺度对流系统发生发展过程和机制研究[J].气象学报,2011,69(5):770-781.

[5] 林宗桂,李耀先,林开平,等.一个长生命期中尺度对流系统维持机制的研究[J].气象学报,2009,67(4):640-651.

[6] 林开平,陈伟斌,刘国忠,等.广西暴雨业务预报技术回顾与展望[J].气象研究与应用,2020,41(4):13-19.

[7] 陆小晓,农孟松,唐昌秀,等.弱引导气流背景下广西西部特大暴雨天气过程分析[J].气象研究与应用,2021,42(2):90-94.

[8] 唐新,林宗桂,黎家宜,等.一条南北向暴雨带的降雨特征及成因分析[J].气象研究与应用,2009,30(3):1-4,114.

[9] 李菁,黄治逢,高安宁,等.广西重大锋面暴雨天气过程的特征分析[J].气象研究与应用,2008,29(1):1-4,12.

[10] 《华南前汛期暴雨》编写组.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社,1986:55-76.

[11] 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):483-493.

[12] 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003:267-271.

[13] 林宗桂,林墨.强降雨熵原理和方法[M].北京:气象出版社,2018:1-31.

# Preliminary report on the predictive effect verification of rainstorm area in Guangxi based on thermodynamic entropy

## ——taking sudden rainstorm as an example

Lin Mo<sup>1</sup>, Huang Xiaoyan<sup>1</sup>, Li Yanzuo<sup>2</sup>, Huang Ying<sup>1</sup>

(1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning Guangxi 530022;

2. Nanning Meteorological Observatory, Nanning Guangxi 530029)

**Abstract:** The MCS theoretical system prediction method based on thermodynamic entropy has been applied to the mesoscale short-term forecasting operations in Guangxi. In order to further test the predictive effect of this method on sudden rainstorm, three sudden rainstorm processes with different characteristics in Guangxi from 2019 to 2020 were selected for analysis. The results show that in the prediction analysis of rainstorm falling area, the prediction of time distribution is 2–8 hours ahead of the actual occurrence of rainstorm, and the prediction of spatial distribution is consistent with the actual occurrence and development of rainstorm, which is consistent with the description of MCS theoretical system based on thermodynamic entropy.

**Key words:** rainstorm; thermodynamic entropy; predictive test; MCS conceptual model