

陈元昭,俞小鼎,陈训来. 2016. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征. 气象, 42(2):144-155.

# 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征<sup>\*1</sup>

陈元昭<sup>1,2</sup> 俞小鼎<sup>2,3</sup> 陈训来<sup>1,2</sup>

1 深圳市气象局,深圳 518040

2 深圳南方强天气研究重点实验室,深圳 518040

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

**提 要:** 为了了解珠江三角洲(简称珠三角)地区重大短时强降水(小时雨强 $\geq 50$  mm)发生的环境特征,利用珠三角地区稠密自动气象站资料、探空资料、卫星资料等分析研究了近 7 年(2007—2013 年)68 个重大短时强降水事件的环境流型、 $T$ - $\ln p$  图形态和关键物理参数,结果表明珠三角地区重大短时强降水天气流型主要有台风型、西南季风型、北部湾低压型、冷(式)切变线型和热带云团型等 5 种;不同类型、不同季节出现的频率不同。台风型、西南季风型和北部湾低压型的大多数过程  $T$ - $\ln p$  图温度廓线和湿绝热线很接近,整层水汽含量丰富,对流有效位能(CAPE)大致呈“瘦弱”的狭长形形态;冷(式)切变线型温湿廓线呈上干下湿分布,CAPE 大致呈较“胖”的狭长形;热带云团型温度廓线和湿绝热线很接近,CAPE 形态较“胖”。850~500 hPa 间温差  $\Delta T_{85}$  都较小,一般在 21~23℃,大气层结接近于湿中性层结,呈现弱的条件不稳定层结,表明大多数过程中有利于重大短时强降水发生的环境条件的关键点不是强对流预报中常关注的“高空冷空气的侵入”,而是低层暖湿气流的输送;地面露点一般在 23~25℃,暖云厚度在 4100 m 以上;大多数重大短时强降水发生前大气可降水量都在 57 mm 以上,其中台风型最大,其次是西南季风型、北部湾低压型、热带云团型,冷(式)切变线型最小,台风型、西南季风型、北部湾低压型 CAPE 一般小于  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,属于比较温和的 CAPE 值,冷(式)切变线型、热带云团型平均  $\text{CAPE} \geq 1700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;对于所有类型对流抑制能(CIN) $\leq 50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;除热带云团型外,大多数过程出现了低空急流;五种流型配置下,台风型、西南季风型大多处在弱到中等的 0~6 km 深层垂直风切变环境中,北部湾低压型和热带云团型处在弱的 0~6 km 垂直风切变环境中;冷(式)切变线型大多数过程处在中等强度的 0~6 km 垂直风切变环境中。可以将流型配置方法(分型)、重大短时强降水对应的关键环境参数以及根据箱线图展示的参数范围设定适宜的阈值的方法相结合,为珠三角地区显著强降水预报的改进提供有价值的参考。

**关键词:** 重大短时强降水事件,天气流型配置, $T$ - $\ln p$  图形态,关键环境参数,珠江三角洲

中图分类号: P457

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.002

## Characteristics of Short-Time Severe Rainfall Events Based on Weather Flow and Key Environmental Parameters in Pearl River Delta

CHEN Yuanzhao<sup>1,2</sup> YU Xiaoding<sup>2,3</sup> CHEN Xunlai<sup>1,2</sup>

1 Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040

2 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen 518040

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In order to understand the environmental characteristics of short-time severe rainfall event (hourly rainfall amount  $\geq 50$  mm) in Pearl River Delta, we researched the weather flow,  $T$ - $\ln p$  chart

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006)、华南区域气象中心气象科技攻关项目(GRMC2014M08)、广东省科技计划项目(20140218)和中国气象局强对流创新专家团队项目共同资助

2015 年 6 月 30 日收稿; 2015 年 10 月 20 日收修定稿

第一作者:陈元昭,主要从事短期及短时临近天气预报研究工作. Email:943508839@qq.com

通信作者:俞小鼎,主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. Email:xduy1962@126.com

patterns and key physical parameters of 68 short-time intense rain event for nearly 7 years (2007–2013) by using automatic weather station data, sounding data, satellite data in the Pearl River Delta region. The results showed that such severe rainfalls in Pearl River Delta are characterized by, first, the weather flow patterns, which include typhoon type, southwest monsoon type, Beibu Gulf low pressure type, cold shear line type and tropical cloud type. Different types have different frequencies in different seasons. Secondly, temperature profiles and wet adiabat are very close in  $T\text{-ln}p$  in most of the short-time severe rain events, and the water vapor content are rich in the whole layer. Thirdly, the features of the key parameters of the severe rainfalls are that mainly the value of  $T_{850}-T_{500}$  is small, usually  $21-23^{\circ}\text{C}$  with a weak unstable stratification, higher ground dew point and  $PW$ .  $CAPE$  values are more moderate, mostly less than  $1500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ .  $CIN$  and vertical wind shear of  $0-6\text{ km}$  are relatively weak, and low-level jets appear in most cases. The key conditions for most of the short-time severe rainfall process are not the high-altitude cold air intrusion, but the warm air transport from low level. Although small  $CAPE$  value limits updraft, the cloud base of specific humidity is high. If combining the configuration method of flow pattern (type), the key environmental parameters, the range of parameters to set appropriate threshold according to the box whisker plots, we can provide valuable reference to rebuild the forecast method of short-time severe rainfall in the Pearl River Delta region.

**Key words:** short-time severe rainfalls, weather flow,  $T\text{-ln}p$  diagram, key environmental parameters, Pearl River Delta

## 引 言

短时强降水常具有突发性强,小时雨强大等特点,很容易导致城市内涝、地质灾害等次生灾害(俞小鼎等,2012),它是珠江三角洲(以下简称珠三角)地区主要灾害性天气之一。如 2010 年 5 月 7 日广州大暴雨,降水仅持续了 6 h,降水量达 213 mm,最大小时雨量 99.1 mm,导致严重的城市内涝,直接经济损失约 5.4 亿元(伍志方等,2011)。2008 年 6 月 13 日深圳大暴雨,全市平均雨量 214 mm,24 h 累积最大雨量 498.0 mm,最大小时雨量 96.8 mm,出现大面积水浸,直接经济损失超 5 亿元。对短时强降水正确的预报预警是各级政府组织、指挥救灾的重要科学依据(曲晓波等,2010)。因此,短时强降水的预报是非常重要的,一直是天气预报业务中的难点,也是气象工作者研究的重点之一(俞小鼎,2012;慕建利等,2008;Ni et al,2011;张晓惠等,2009;彭菊香等,2011;陶诗言等,2007;姜丽萍等,2007;廖胜石等,2008;王东海等,2011;孙继松等,2013;陈永仁等,2013;郑婧等,2014;王婧羽等,2014;寿亦萱等,2014;冉令坤等,2014;周泓等,2015;段鹤等,2014)。20 世纪 70 年代,美国空军气象局的资深预报员 Miller(1972)和 Crisp 等(1979)

在 Fujita(1956)提出的中尺度分析概念的基础上,提出了利用高空和地面观测资料分析中尺度对流系统发生、发展的环境背景条件的一套规则,在此基础上,2010 年中国气象局建立了一套强对流天气分析的规则,称为中尺度分析(张小玲等,2012)。20 世纪 70 年代末,Maddox 等(1979)在分析了美国的致洪暴雨后,总结出了暴洪预报的三种典型天气流型配置,用于致洪暴雨的预报,即流型识别法。针对流型识别方法的一些缺陷和局限性,Doswell 等(1996)提出了基于构成要素的预报方法(ingredients-based forecasting methodology),即“配料法”。俞小鼎(2011)认为流型识别法和“配料法”两者之间具有很强的互补性;流型识别技术是一项很有用的主观预报技术,预报员应该尝试用基于构成要素的方法去解释,获得充分的物理解释。樊李苗等(2013)研究了中国短时强降水等强对流天气的关键环境参数特征。Chen 等(2013)分析了我国暖季 4—9 月降水分布特征,指出华南地区是我国短时强降水多发区。张一平等(2013)总结了河南强对流天气的四种概念模型,得出了各流型天气系统特点及对流发生条件的关注点,为河南强对流天气分析预报提出思路和预报着眼点。农孟松等(2008)根据环流形势将广西冰雹分为华北低槽型、高原东部低槽型和南支槽型,用数值预报产品有物理意义的预报

因子制作广西冰雹的潜势预报。因此,在统计大量个例基础上,给出短时强降水的主要流型配置,再根据“配料法”思路,统计分析每种流型配置下的关键环境参数特征,将流型识别与关键环境参数特征识别结合起来,将有助于更深入了解包括强降水在内的强对流天气发生的物理过程,提高这类天气的预报水平。

短时强降水是典型的中尺度系统导致的强烈天气,但对于不同地区、不同天气过程,大气的热力不稳定层结、水汽、垂直风切变等要素的重要性不尽相同,产生的强天气类型也不相同(郑媛媛等,2011)。广东处在华南沿海,短时强降水发生频率高,造成损失大。许多气象学者对华南地区强对流发生条件、触发机制和潜势预报方法进行了详细的研究(陈联寿等,2001;刘运策等,2001;赖绍钧等,2012;庞古乾等,2012;刘国忠等,2013;吴乃庚等,2013;陈元昭等,2014;冯文等,2015;赵欢等,2015)。Tian 等(2015)对我国华东地区暖季短时强降水的环境参数进行了统计分析,指出任何类型的短时强降水大气可降水量(PW)都在 28 mm 以上, KI 指数在 28.1℃ 以上, 850 和 700 hPa 的相对湿度可判断是否会出现降水,研究结果在业务中有很好的指导作用。目前对珠三角地区短时强降水发生的天气流型配置和关键环境参数特征还没有系统性的深入研究。本文利用珠三角地区稠密自动气象站资料、探空资料、卫星云图资料等,将天气流型分型和各种流型下关键环境参数的特征分析结合,给出珠三角地区重大短时强降水事件的流型配置类型,以及每种流型配置下  $T-\ln p$  图形态特征和相应的关键环境参数,为这类强降水事件的预报提供思路和预报着眼点。

## 1 资料说明及方法

### 1.1 资料说明

(1) 选取雨量数据为 2007—2013 年共 7 年珠三角地区近 600 个自动气象站(分布见图 1)逐小时降水量。参照珠三角地区强降水、地质环境和城市发展等特点,文中重大短时强降水选取标准为每小时雨量  $\geq 50$  mm。中国气象局规定的短时强降水标准为小时雨量  $\geq 20$  mm,因此小时雨量  $\geq 50$  mm 可以看作是重大短时强降水事件(significant flash rain event)。为保证强降水天气过程筛选的准确

性,考虑了自动站密度和资料的可靠性问题,规定在一次天气过程中,10 个或以上连片区域自动站记录到小时雨量  $\geq 50$  mm、出现的范围不小于  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  为一次重大短时强降水过程。按照以上原则严格筛选出珠三角地区 7 年共 68 场满足条件的重大短时强降水天气。68 次重大短时强降水事件过程中,最大总雨量 498.0 mm,平均总雨量 136.1 mm。最大小时雨量分布如图 2,最大小时雨量在 60~69.9 mm 次数最多 21 次,其次是 50~59.9 mm 为 20 次,小时雨量  $\geq 100$  mm 有 4 次,小时雨量最大为 108.9 mm。需要指出的是,这里以上述标准选出的 68 次重大短时强降水事件中,降水持续时间往往超过 1 h,其中最短持续时间 1 h,有 5 个过程甚至断断续续持续了 1~2 d,平均降水时长为 9 h。但在考虑其关键环境参数时,主要考虑  $1 \text{ h} \geq 50 \text{ mm}$

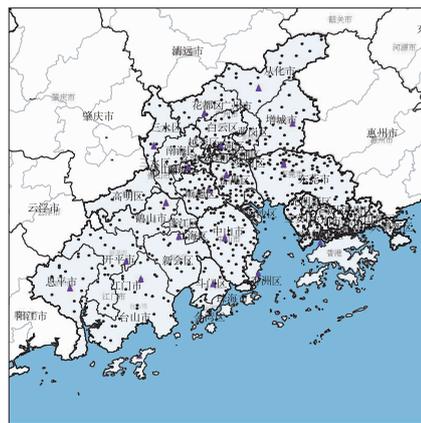


图 1 珠三角地区自动站及国家级观测站分布  
(■区域自动气象站,▲国家级气象观测站)  
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Pearl River Delta  
(■ regional automatic meteorological station, ▲ national meteorological station)

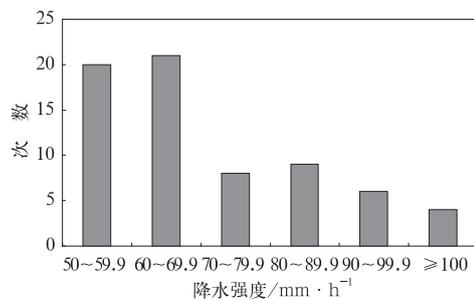


图 2 珠三角地区 68 个重大短时强降水过程最大小时雨量分布  
Fig. 2 The maximum hourly rainfall distribution of 68 short-time severe rain events in Pearl River Delta

的重大短时强降水事件发生前的大气环境参数。因此,后面讨论的流型配置不仅是针对显著强降水事件的,而是适用于包含该显著强降水事件的整个暴雨事件的。而关于探空  $T-\ln p$  图形态和关键环境参数则是尽量选择在显著强降水事件发生前对该事件最有代表性的探空进行分析。

(2) 国家气象信息中心下发的同时期 MICAPS 格式资料,包括常规地面高空观测、加密地面观测和风云 2 号气象卫星云图等。

(3) 本研究提及的台风泛指热带气旋,文中为北京时间,20 时为日界。

### 1.2 技术方案

应用 MICAPS 的分析平台,首先分析影响珠三角重大短时强降水的天气流型配置,并对流型配置进行分类,然后针对每种流型配置,分析相应的  $T-\ln p$  图形态和关键环境参数特征。选取短时强降水发生前的 20 或 08 时的高空和间隔 3 h 的地面观测资料进行中尺度分析。 $T-\ln p$  图形态和关键环境参数选取短时强降水发生之前最近时次和最近距离的探空资料以保证较好的代表性:如果强降水发生在

08—11 时,选取 08 时的探空给出相应的关键环境参数;强降水发生在 11—20 时,对强降水发生地附近或上游地区 08 时探空用 11—17 时温度、露点温度订正后计算环境参数;强降水发生在 20—08 时用 20 时探空给出相应环境参数。

## 2 珠江三角洲重大短时强降水事件的流型配置

强降水是在有利的大尺度环流条件下由中小尺度系统造成的。分析珠江三角洲地区 68 个重大短时强降水事件的主要影响系统,结果显示其对应的天气流型配置主要有五种(图 3):台风型(TPT)、西南季风型(SWMT)、北部湾低压型(BGLT)、冷(式)切变线型(CSLT)和热带云团型(TCT)。总体上统计,每种类型所占的百分比分别为 29%、29%、22%、10%和 10%,台风型和西南季风型出现概率最大,冷(式)切变线型和热带云团型发生概率最低,北部湾低压型发生概率位于中间。在不同季节,每种流型配置出现频率不同(图 4)。

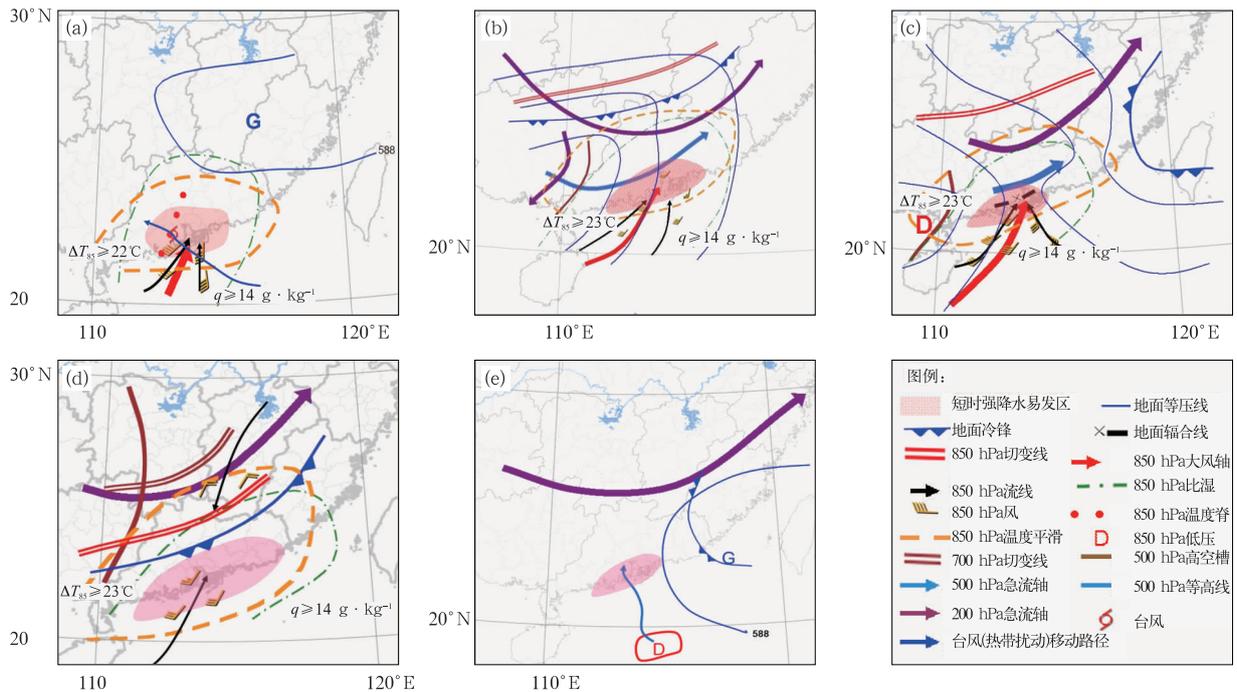


图 3 珠三角地区重大短时强降水天气概念模型

(a) 台风型, (b) 西南季风型, (c) 北部湾低压型, (d) 冷(式)切变线型, (e) 热带云团型

Fig. 3 The conceptual model of short-time severe events in Pearl River Delta

(a) typhoon type, (b) southwest monsoon type, (c) Beibu Gulf low pressure type, (d) cold shear line type, (e) tropical cloud type

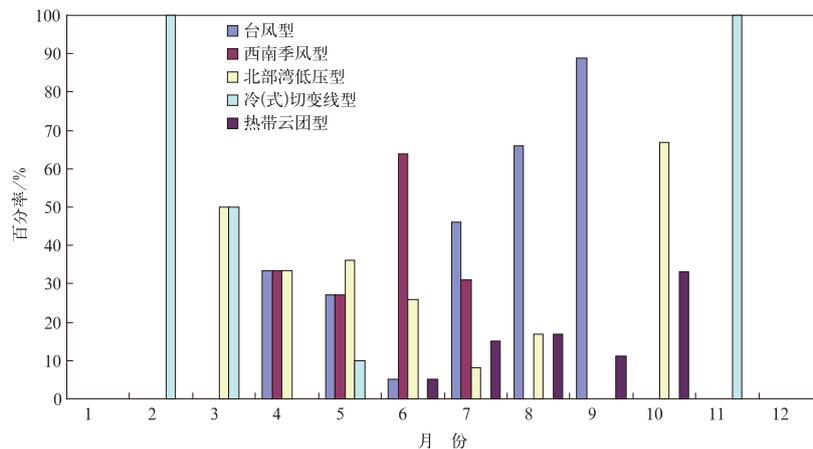


图 4 2007—2013 年珠三角地区重大短时强降水事件天气流型各月分布百分率

Fig. 4 The weather flow distribution percentages of short-time severe rainfall events in Pearl River Delta during 2007—2013

## 2.1 台风型

造成珠三角地区重大短时强降水的台风以强热带风暴以上级别的强度为主。台风一般在珠江口附近或珠江口西侧到阳江的沿海登陆。台风高低层云系结构对称,登陆后移动速度较慢,维持时间长,东南象限有明显的西南风卷入。强降水一般出现在台风经过的附近地区或略偏于移动路径的右侧。

此类强降水概念模型如图 3a 所示。200 hPa 上空被反气旋所控制,华南上空有一定的流向和流速的辐散特征。500 hPa 上 588 线控制湖南、江西、福建一带,副热带高压(以下简称副高)稳定少动。台风在副高南沿较弱的东南气流引导下缓慢的向偏西北移动。弱的西风槽位于副高北部的长江流域以北地区,弱槽对副高强度影响较小,使副高稳定维持,台风移动慢。850 hPa 台风东南象限的西南风和副高西南侧的东南风在华南沿海辐合。台风型重大短时强降水多出现在 7—9 月。

台风造成的降水分布非常复杂,除了必须具备充沛的水汽、强烈的上升运动和条件不稳定等条件外,还与台风周边的其他天气系统的配置有关,地面适度冷空气的侵入也有利于台风暴雨的增幅(林良勋等,2006)。

## 2.2 西南季风型

西南季风一般在 5 月中下旬爆发,给珠三角地区带来的强降水多发生于 6 月西南季风盛期。伴随着西南季风的爆发,6 月珠三角常出现大范围的暴

雨降水,是华南前汛期的盛期,也是短时强降水的多发期。68 场重大短时强降水中有 19 场出现在 6 月。该型强降水多发生在下半夜到上午,降水有短时雨强强,总雨量大等特点,常出现大范围的大暴雨降水。

此类强降水的流型配置如图 3b 所示。200 hPa 南亚高压位于中南半岛北部地区,急流轴在华南北部到江西、福建一带,有时南亚高压东南侧出现东北风急流,华南上空处在扇形辐散区内。500 hPa 上副高中心位于西太平洋上,呈带状分布,西脊点在南海东部海面,南支槽位于广东广西交界处,槽底在雷州半岛附近,槽前西南风大。850 hPa 切变线在湖南南部一带,南海中北部西南风明显加大,出现低空急流,华南沿海出现西南风和东南风或西南风和偏南风辐合,不断触发对流发展。地面上冷空气主体在南岭附近或湖南一带,南海中北部到广东沿海地面等压线稀疏,呈南北或西南东北走向,渗透南下的弱冷空气和暖湿气流汇合(有时冷空气不明显),触发抬升。珠三角地区西南季风型短时强降水一般不出现在切变线附近,而出现在 850 hPa 急流轴核区附近或气流辐合区。

## 2.3 北部湾低压型

北部湾低压型的显著特点是地面到 850 hPa 在北部湾附近区域( $7^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ )有闭合低压,有时低压环流可向上伸展到 500 hPa 高度。

北部湾低压型流型配置如图 3c 所示。短时强降水区位于 200 hPa 急流入口区的右侧或右后侧,

为气流辐散区。500 hPa 副高较弱,控制福建以东地区,北部湾附近的广西、广东交界处为南支槽,上游有时没有明显冷平流。850 hPa 北部湾附近为一闭合低压,低压中心的东南象限南海北部到华南中西部沿海出现西南风低空急流,切变线在湖南一带,华东地区为反气旋控制。地面图上前期南下的冷空气变性出海,变性脊经福建沿海伸向广东东部,珠江口以东吹东南或偏南风,高压底部常有冷空气渗透到珠江口一带。珠江口以西吹暖湿的西南到偏南风,与珠江口以东吹相对较干的东南气流在珠江口附近汇合,形成辐合渐近线。在汇合点附近常会诱发出现中尺度辐合线或中尺度低压,形成  $\beta$  中尺度短时强降水云团,持续影响珠三角地区,导致珠三角地区出现明显降水。北部湾低压型重大短时强降水主要出现在 4—5 月。

#### 2.4 冷(式)切变线型

冷(式)切变线型多见于 5 月。每年春夏之交,冷暖空气对峙,常会出现由高空槽、切变线和冷空气(锋面低槽)共同引起的强对流天气。这种过程由于斜压性强,系统移动较快,水汽一般也不充足,多以雷雨大风天气为主,出现重大短时强降水的可能性小。但如果低层配合西南风低空急流且水汽充足,降水将会明显加大。

图 3d 为冷(式)切变线型流型配置图。200 hPa 珠三角上空为发散流场,具有明显的气流辐散特征。500 hPa 副高主体稳定在西北太平洋,青藏高原东侧不断有短波分裂下滑叠加到位于广西、广东的西风槽中。850 hPa 初时切变线位于湖南境内,南海中北部西南风大。随着 500 hPa 西风槽东移,850 hPa 切变线南压进入广东地区。地面气压场上,初时西南低槽发展,南压的冷锋为强降水提供了触发机制。当冷空气侵入到 850 hPa 以上高度,降水将结束。

冷(式)切变线型短时强降水要特别注意 500 hPa 槽线移出目标区上空而低层仍为暖湿气流控制的前倾槽形势,很容易造成天气系统已经移出本地的错觉。

#### 2.5 热带云团型

热带云团型重大短时强降水主要出现在 7—8 月。图 3e 为热带云团型重大短时强降水的流型配置。200 hPa 上珠江口附近为风速辐散区。

500 hPa 副高呈块状,粤东一带被副高脊所控制,珠江口附近位于副高边沿的不稳定区,  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$  附近为平直西风,有利于副高稳定维持。南海中北部海面的扰动云团生成后,沿着副高西缘不断向北移动,靠近珠三角地区。扰动在北移的过程中强度有所发展,但达不到热带低压级别,西南风也不是很强盛。地面弱冷空气从中路或东路渗透南下,有时冷空气不明显。正是由于块状副高稳定维持引导南海扰动云团向北移动而带来明显降水。这种扰动云团由于经过较长时间的水汽累积,雨强往往很大。如果配合有西南季风卷入,降水量将会异常偏大。

### 3 重大短时强降水事件的 $T\text{-ln}p$ 图形态和关键环境参数

实际业务中常出现天气形势与典型天气流型相差甚远,但实况下了暴雨,出现漏报;有时出现的天气形势与典型天气型大致一样,但没有出现暴雨,导致空报。基于上述情况,在流型识别的前提下,分析研究了对应重大短时强降水事件的  $T\text{-ln}p$  图形态和关键环境参数,为重大短时强降水的预报提供参考。

#### 3.1 $T\text{-ln}p$ 图形态特征

对上述五种流型重大短时强降水发生前的  $T\text{-ln}p$  图进行分析。根据探空曲线中大气层结曲线与状态曲线的形态、对流有效位能(CAPE)形状等特点对各型  $T\text{-ln}p$  图进行分类,每种流型给出了 3 种  $T\text{-ln}p$  图(图 5,其中热带云团型为 2 种)。没有进行合成,而是使用的具体个例的  $T\text{-ln}p$  图。

台风型重大短时强降水:20 个过程中  $T\text{-ln}p$  图中温度廓线和湿绝热线都比较接近,整层湿度大。有 15 个过程的 CAPE 形状呈“瘦弱”的狭长形,抬升凝结高度比较低(图 5a),5 个过程 CAPE 形状更“瘦弱”,但抬升凝结高度略高(图 5b 和 5c)。这说明台风导致的短时强降水事件中大气层结非常接近于湿中性层结,只具有弱的条件不稳定,水汽条件非常充分。

西南季风型短时强降水的 20 个个例中,有 18 个个例的  $T\text{-ln}p$  图温度廓线和湿绝热线非常接近(图 5d 和 5e),其中有 2 个过程温湿廓线几乎重合,整层大气相对湿度很高,水汽含量丰富;另外 2 个过程 400~500 hPa 高度层略干,这和 500 hPa 高度层附近有弱的干冷空气侵入有关,中低层温度廓线和

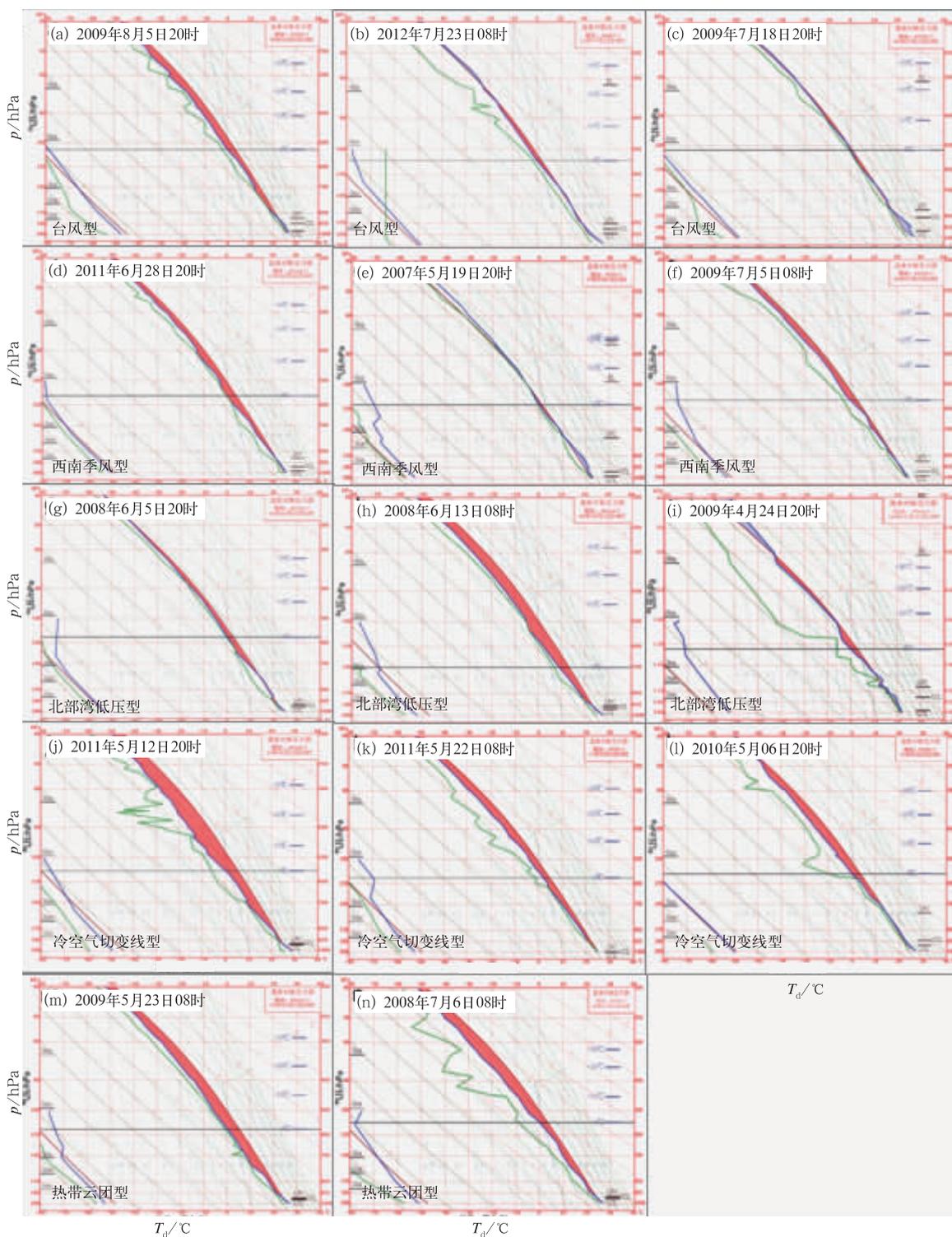


图 5 珠江三角洲地区重大短时强降水  $T-\ln p$  图  
 (a, b, c)台风型, (d, e, f)西南季风型, (g, h, i)北部湾低压型, (j, k, l)冷(式)切变线型, (m, n)热带云团型  
 Fig. 5  $T-\ln p$  diagram of short-time severe rainfall events in Pearl River Delta  
 (a, b, c) typhoon type, (d, e, f) southwest monsoon type, (g, h, I) Beibu Gulf low pressure type,  
 (j, k, l) cold shear line type, (m, n) tropical cloud type

湿绝热线也很接近(图 5f)。有 18 个过程对流有效  
 位能 CAPE 呈“瘦弱”的狭长形分布,抬升凝结高度

较低(图 5d 和 5f),有 2 个过程 CAPE 更小,抬升凝  
 结高度较高(图 5e)。

北部湾低压型(图 5g~5i)14 个过程中,有 13 个温度廓线和湿绝热线很接近,整层水汽非常丰富,有一个过程低层水汽较足而中层较干,呈上干下湿(图 5i)。有 11 个过程 CAPE 大致呈“瘦弱”狭长形分布,抬升凝结高度较低(图 5g 和 5i);有 3 个过程 CAPE 大,形态略“胖”(图 5h)。

图 5j~5l 为冷(式)切变线型重大短时强降水  $T\text{-ln}p$  图。该型温湿廓线大致呈“漏斗”状,大气层结为下层较湿,中(上)层略干,这和低层为暖湿气流,高层干冷空气侵入有关。相对于前三种类型,冷空气切变型对应的 CAPE 较大,形态较“胖”。

热带云团型(图 5m~5n)短时强降水 7 个过程有 6 个  $T\text{-ln}p$  图温湿廓线紧靠,整层水汽含量丰富,对流有效位能 CAPE 形态较“胖”,抬升凝结高度不高(图 5m);只有 1 例  $T\text{-ln}p$  图呈上干下湿型,CAPE 值也相对较大(图 5n)。

从以上分析可知,台风型、西南季风型、北部湾低压型对应的绝大多数重大短时强降水事件的  $T\text{-ln}p$  温度廓线和湿绝热线很接近,CAPE 大致呈“瘦弱”的狭长形,整层相对湿度很高,水汽含量丰富,抬升凝结高度较低。冷(式)切变线型对应的温湿廓线呈上干下湿“漏斗”状分布,CAPE 形态稍“胖”,抬升凝结高度同样比较低。热带云团型温湿廓线紧靠,水汽丰富,CAPE 形态较“胖”。

### 3.2 关键环境参数

强对流天气主要发生在大气处在条件不稳定、一定的水汽条件和适当的垂直风切变的环境下。据此,本研究选取的关键环境参数主要包括表征大气静力稳定度的 850 和 500 hPa 的温差,表示水汽条件的地面露点( $T_d$ )、大气可降水量( $PW$ )和在一定程度上代表水汽输送强弱和 CAPE 维持的低空急流,将条件不稳定和水汽条件结合在一起用来判断深厚湿对流发生潜势的 CAPE 和对流抑制能( $CIN$ ),以及用来代表深层垂直风切变的 0~6 km 风矢量差。

日常业务中常用 850 和 500 hPa 之间的温差  $\Delta T_{85}$ (对流层中低层的温度递减率)来表示大气层结静力稳定度。重大短时强降水  $\Delta T_{85}$  分布的箱线图见图 6a(其中,SWMT 中位值和上四分位值重合;BGLT 中位值和上四分位值重合;CSLT 中位值和上四分位值重合;TCT 中位值和下四分位值重合;最大值和上四分位值重合)。图中表明,西南季风型、北部湾低压型和热带云团型的  $\Delta T_{85}$  箱体类似,箱体也比较窄,中位值在 22~23℃,统计也表明

上述三型的  $\Delta T_{85}$  主要分布在 22~23℃;台风型箱体较宽, $\Delta T_{85}$  主要分布在 21~22℃;冷(式)切变线型  $\Delta T_{85}$  在五类天气型中最大,主要分布在 23~24℃,这和中(高)层有一定的干冷空气侵入有关。汛期华南上空 500~850 hPa 的平均厚度为 4.2 km,相当于重大短时强降水发生时环境温度直减率为 5.0~5.7℃·km<sup>-1</sup>,稍大于平均约 5.0℃·km<sup>-1</sup>(在暖季,850~500 hPa 的湿绝热递减率,也就是湿中性层结对应的温度递减率,约为 5℃·km<sup>-1</sup>左右)。也就是说,重大短时强降水发生前大多数情况下大气存在弱的条件不稳定。

图 6b 显示不同流型之间地面露点  $T_d$  中位值基本在 23~24℃。平均地面露点温度西南季风型和热带云团型都在 24.0℃以上,最小的冷(式)切变线型 23.3℃。统计表明大多数过程地面露点在 23~25℃,最大 27.4℃。不论何种流型,强降水发生前地面露点都比较高,近地面层水汽条件较好。

表征大气水汽条件的另一个重要参数是  $PW$ 。图 6c 所示箱线图表明,各型重大短时强降水  $PW$  不尽相同;台风型  $PW$  值最大,上、下四分位值分别为 68 和 63 mm,中位值接近 65 mm,最大达到 74.2 mm,平均接近 65 mm,85%的过程  $PW \geq 60$  mm;其次为西南季风型,上、下四分位值为 66 和 61 mm,中位值 64 mm,平均接近 64 mm,80%的过程  $PW \geq 60$  mm;北部湾低压型和热带云团型  $PW$  箱形图较相似,中位值分别为 60 和 61 mm,平均  $PW$  为 61 mm,比台风型和西南季风型略小, $PW \geq 57$  mm 的过程都约占 85%;冷(式)切变线型  $PW$  在五个天气型中最小,上、下四分位为 61 和 52 mm,中位值 57 mm,平均为 53 mm, $PW \geq 55$  mm 的过程占 72%。上述事实表明重大短时强降水发生前各型重大短时强降水过程  $PW$  有所差别,台风型最大,冷(式)切变线型最小,但大多数过程  $PW$  呈现出较大的值,超过 87%的过程  $PW \geq 57$  mm。

低空急流常与强降水相伴。为研究短时强降水和偏南风低空急流( $U \geq 12$  m·s<sup>-1</sup>,简称低空急流)的关系,统计分析了 850 hPa 及以下层最大偏南风速。从图 6d 中可见(其中,TCT 中位值和下四分位值重合),西南季风型、北部湾低压型下四分位都为 12.5 m·s<sup>-1</sup>,这两个型总共 34 个过程中有 30 个过程出现低空急流;台风型和冷(式)切变线型下四分位均为 10 m·s<sup>-1</sup>,中位值在 12.5~13 m·s<sup>-1</sup>,这两个型的 27 个过程中有 20 个出现了低空急流;而热带云团型与上述四种天气型刚好相反,7 个过程只有 1 个出现低空急流。

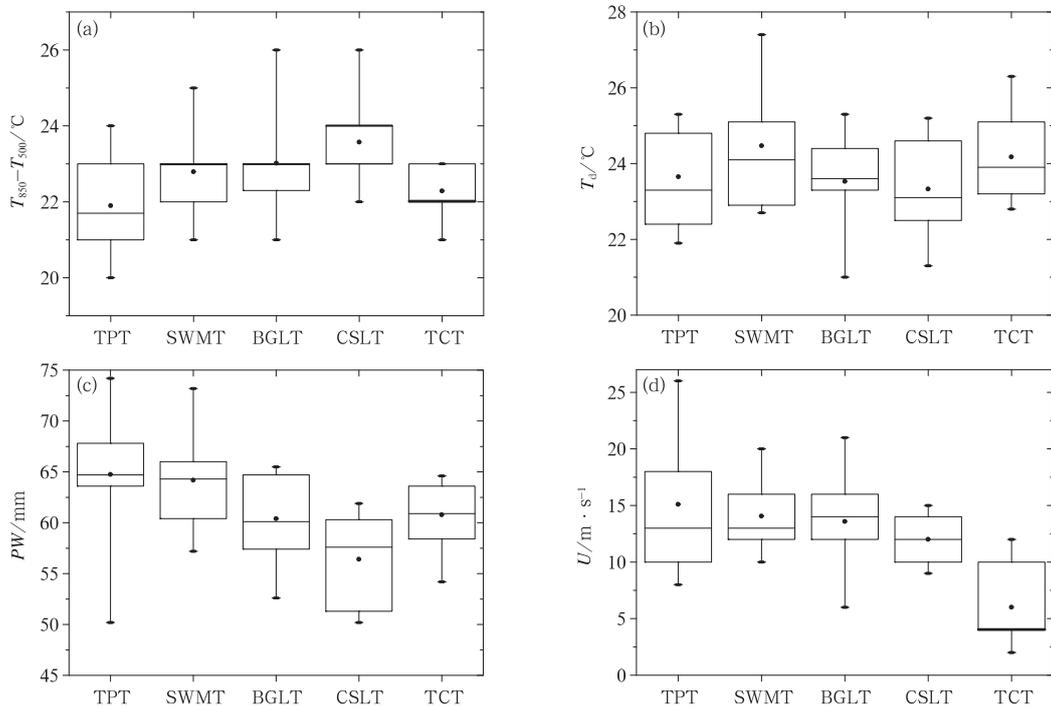


图 6 珠三角地区重大短时强降水各型关键环境参数箱线图

(a)  $\Delta T_{85}$ , (b) 地面露点温度, (c) PW, (d) 低层最大偏南风速

(线段的最高点为统计最大值,最低点为统计最小值,箱形的上部框线为上四分位值,

下部框线为下四分位值,箱内线为中位线,小圆点为平均值;TPT 为台风型,

SWMT 为西南季风型,BGLT 为北部湾低压型,CSLT 为冷(式)切变线型,TCT 为热带云团型)

Fig. 6 Box and whiskers plot of the key environmental parameters of severe short-time rainfall events in Pearl River Delta

(a)  $\Delta T_{85}$ , (b) surface dew point temperature, (c) PW, (d) max southerly wind speed in low level

[The shaded boxes enclose the 25th percentile (bottom of box) to the 75th percentile values, with the median values marked by a horizontal dash within each box; the whiskers extend upward to the maximum,

and downward to the min; dots are the average; TPT is typhoon type, SWMT is southwest monsoon type,

BGLT is Beibu Gulf low pressure type, CSLT is cold shear line type and TCT is tropical cloud type]

从以上分析可知,重大短时强降水发生前,代表局地水汽条件的PW和地面露点在降水发生前都已经具有较高的值,87%的过程  $PW \geq 57$  mm,而  $T_d$  普遍在  $23 \sim 25$  °C。对于所有类型,  $\Delta T_{85}$  较小,一般在  $21 \sim 23$  °C,表明大多数情况下有利于重大短时强降水发生的环境条件的关键点不是强对流预报中常关注的“高空冷空气的侵入”,而是低层暖湿气流的输送。除了热带云团型,其他类型下大多数情况下出现了低空急流。低空急流是一支暖湿气流,一方面为降水提供了丰富的水汽,另一方面低层暖湿气流的输送也有利于维持一定的CAPE,导致PW维持及增加,从而为维持导致强降水的MCS的持续提供了保证(俞小鼎,2012)。进一步分析表明,低空急流在导致较大水汽通量的同时,多数情况下在珠三角地区呈现明显水汽通量辐合(图略)。

CAPE是日常业务中判断深厚湿对流潜势的

重要参数。重大短时强降水CAPE箱线图(图7a,为从地面抬升气块的CAPE)可知,各型CAPE有所差别。台风型箱线图箱体宽,CAPE值较分散,但箱体主要在  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下,平均为  $1033 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,20个过程有16个  $CAPE \leq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占80%。西南季风型中,箱体比台风型窄,CAPE平均值为  $1240 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,20个过程中有15个过程的  $CAPE \leq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占75%。北部湾低压型箱体大多在  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下,平均为  $955 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,14个过程有11个  $CAPE \leq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冷(式)切变线型和热带云团型平均CAPE均大于  $1700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,7个过程中分别有5和4个  $CAPE \geq 1700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从以上分析可知,台风型、西南季风型和北部湾低压型降水CAPE一般不大于  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,都属于比较温和的CAPE(俞小鼎,2012),冷(式)切变线型和热带云团型CAPE稍大。适当

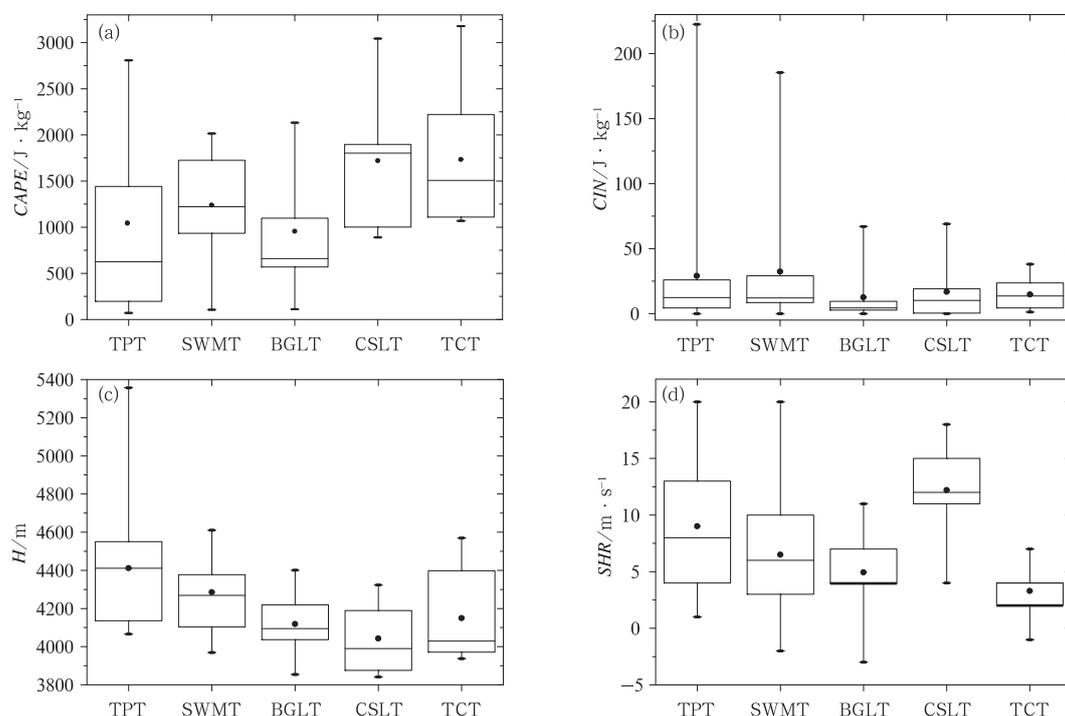


图 7 同图 6,但(a)为 CAPE,(b)为 CIN,(c)为暖云厚度,(d)为 0~6 km 垂直风切变

Fig. 7 Same as Fig. 6, but (a) CAPE, (b) CIN,

(c) warm cloud thickness and (d) vertical wind shear in 0–6 km

大小的 CAPE 比极端的 CAPE 更有利于高降水效率的形成,极端的 CAPE 会使气块加速通过暖云层,从而减少了通过暖云过程形成降水的时间(孙继松等,2014)。

CIN 是自由对流高度以下层结曲线和状态曲线所围成的面积。理论上来说,触发深厚湿对流所需要的抬升强度由 CIN 决定。由图 7b 可知(其中,CSLT 中位值和下四分位值重合),重大短时强降水 CIN 差别不大,值较小。68 个过程有 57 个  $CIN < 50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对于强对流的发生,往往要求 CIN 有一个较为合适的值,如果 CIN 太大,对流抑制的程度大,不利于对流的发生,如果太小,不稳定能量往往很难在低层聚积,也不利于发生较强的对流。上述各种流型配置下,CIN 的值都不大,因此珠三角地区导致显著强降水的深厚湿对流大多数都相对容易触发,对抬升力要求不高。

暖云层是抬升凝结高度到  $0^\circ\text{C}$  层高度之间的厚度差。暖云层厚度越大,降水效率越大(Davis, 2001)。五种天气型的暖云厚度箱线图(图 7c)中,台风型厚度最大,冷(式)切变线型最小。68 个过程有 57 个暖云厚度在 4100 m 以上,属于比较大的值,有利于较高的降水效率。

为了分析垂直风切变(SHR)对短时强降水的影响,将 0~6 km 垂直风切变分为弱、中和强三档(俞小鼎等,2012)。0~6 km 垂直风切变矢量差  $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为弱垂直风切变,  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq$  垂直风切变矢量差  $< 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为中等强度垂直风切变,垂直风切变矢量差  $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为强垂直风切变。由 0~6 km 垂直风切变分布箱线图(图 7d)可知(其中,BGLT 中位值和下四分位值重合;TCT 中位值和下四分位值重合),西南季风型、北部湾低压型、热带云团型的上四分位为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  或小于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。西南季风型 20 个过程中,垂直风切变矢量差  $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  有 17 个,占 85%,其余为中等强度垂直风切变,而北部湾低压型和热带云团型的垂直风切变矢量差全部  $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  上述三类大多数过程处在弱的垂直风切变环境中。台风型箱须图中,箱体较宽,垂直风切变值分布较分散,最大值为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最小值仅  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但 20 个个例中,垂直风切变矢量差  $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  有 14 个,  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq$  垂直风切变矢量差  $< 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  有 5 个,大多数过程处在弱到中等垂直风切变环境中。冷(式)切变线型垂直风切变矢量差普遍较大,7 个个例中,  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq$  垂直风切变矢量差  $< 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  有 5 个,大多数过程处在中等

强度垂直风切变环境中。珠三角重大短时强降水的关键参数阈值列于表 1 中,可以作为业务预报中的参考。

珠三角地区的重大短时强降水事件多数情况下对应弱的大气条件不稳定,即温度直减率只是略微

高于湿绝热递减率,接近湿中性层结。之所以会如此,是因为华南地区水汽条件充足,而夏季很少出现边界层夜间或凌晨逆温,CIN 普遍较小,对流很容易触发。因此一旦出现微小的条件不稳定,就会出现湿对流,使得大气向湿中性状态调整。

表 1 珠三角重大短时强降水主要关键环境参数阈值表

Table 1 Main key environmental parameter thresholds of short-time severe rains in Pearl River Delta

	$\Delta T_{85}/^{\circ}\text{C}$	$T_d/^{\circ}\text{C}$	$PW/\text{mm}$	$CAPE$ $/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$CIN$ $/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	暖云厚度 $/\text{m}$	$SHR$ $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
台风型	21~22	23~25	$\geq 60$	$\leq 1500$	$< 50$	$\geq 4100$	$< 20$
西南季风型	22~23	23~25	$\geq 60$	$\leq 1500$	$< 50$	$\geq 4100$	$< 12$
北部湾低压型	22~23	23~25	$\geq 57$	$\leq 1500$	$< 50$	$\geq 4100$	$< 12$
冷(式)切变线型	23~24	23~25	$\geq 55$	$\geq 1700$	$< 50$	$\geq 4100$	$12 \leq SHR < 20$
热带云团型	22~23	23~25	$\geq 57$	$\geq 1700$	$< 50$	$\geq 4100$	$< 12$

珠三角地区的重大短时强降水事件对应的 CAPE 值普遍不大,平均在  $1200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右,因此所产生深厚湿对流内的上升气流不会很极端,但雨强却很大,这又如何解释呢?

雨强可由式(1)表达:

$$R = k\rho E\omega q \quad (1)$$

式中, $R$  为雨强(单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), $E$  为降水效率, $\rho$  为空气密度(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $\omega$  为云底附近上升气流速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $q$  为云底比湿(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), $k$  为比例系数(取值  $1/3600$ )。从式(1)可知,雨强取决于降水效率、云底附近上升气流速度和比湿。 $E$  是进入云内的水汽总量中最终变为降水降到地面部分的比例,对流层相对湿度越大,暖云层厚度越厚,垂直风切变越小,降水效率也越高(俞小鼎等,2012)。上面分析结果表明,强降水发生前,环境场条件很有利于珠三角地区出现高的降水效率。虽然 CAPE 值不大,限制了上升气流出现很极端的值,但云底的比湿很高, $E$  很高,因而综合起来仍然会导致很大的雨强。

## 4 结 论

应用 2007—2013 年共 7 年珠三角地区近 600 个自动气象站逐小时降水量,根据一定判据筛选出 68 个重大短时强降水事件。首先对它们对应的天气流型配置进行分类,然后对于每一种天气流型进一步分析其  $T-\ln p$  图形态特征和关键环境参数特征。主要结论如下:

(1) 对应珠三角地区重大短时强降水的天气流型主要有 5 种:台风型、西南季风型、北部湾低压型、冷(式)切变线型和热带云团型。2—3 月以冷(式)

切变线型为主,4—5 月北部湾低压型稍多,6 月以西南季风型为主,7—9 月主要为台风型和热带云团型。

(2) 台风型、西南季风型和北部湾低压型大多数过程对应的  $T-\ln p$  图形态特征类似:温度廓线和露点廓线挨得很近,水汽充足,CAPE 区域呈“瘦弱”的狭长形分布,抬升凝结高度较低。冷(式)切变线型对应  $T-\ln p$  图温湿廓线大致呈上干下湿的“漏斗”状,CAPE 较大,虽然仍是狭长形,但形态略“胖”。热带云团型对应温湿廓线紧靠,整层水汽大,对流有效位能 CAPE 值较大。

(3) 五种天气流型对应的关键环境参数  $\Delta T_{85}$ 、 $T_d$ 、 $PW$ 、 $CAPE$ 、 $CIN$ 、暖云厚度及深层垂直风切变的 0~6 km 风矢量差特征为: $\Delta T_{85}$  都较小,一般在  $21\sim 23^{\circ}\text{C}$ ,大气层结与湿中性层结接近,呈现出弱的条件不稳定层结,表明大多数过程有利于重大短时强降水发生的环境条件的关键点不是强对流预报中常关注的“高空冷空气的侵入”,而是低层暖湿气流的输送。 $T_d$  普遍在  $23\sim 25^{\circ}\text{C}$ , $CIN \leq 50 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,暖云厚度在 4100 m 以上。大多数过程  $PW$  都在 55 mm 以上,其中台风型最大,其次是西南季风型、北部湾低压型、热带云团型,冷(式)切变线型最小,统计表明超过 87% 的过程  $PW \geq 57 \text{ mm}$ 。台风型、西南季风型、北部湾低压型 CAPE 一般小于  $1500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,属于比较温和的 CAPE 值,冷(式)切变线型、热带云团型平均  $CAPE \geq 1700 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除热带云团型外,大多数过程都出现了低空急流。台风型、西南季风型大多处在弱到中等的 0~6 km 风切变环境中,北部湾低压型和热带云团型处在弱的垂直风切变环境中;冷(式)切变线型大多数过程处在中等强度垂直风切变环境中。

在珠三角地区,可以将预报重大短时强降水的流型配置方法(分型)与重大短时强降水对应的关键环境参数,以及根据箱须图展示的参数范围设定适宜的阈值的方法相结合,为珠三角地区显著强降水预报的改进提供有价值的参考。

## 参考文献

- 陈联寿,孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 25(3):420-432.
- 陈永仁,李跃清. 2013. “12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降水的影响. 气象, 39(7):848-860.
- 陈元昭,林良勋,陈训来,等. 2014. 最近 5 年深圳大暴雨特征及主要影响系统. 广东气象, 36(1):20-25.
- 段鹤,夏文梅,苏晓力,等. 2014. 短时强降水特征统计及临近预警. 气象, 40(10):1194-1206.
- 樊李苗,俞小鼎. 2013. 中国强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 32(1):156-165.
- 冯文,符式红,赵付竹. 2015. 近 10 年海南岛后汛期特大暴雨环流配置及其异常特征. 气象, 41(2):143-152.
- 姜丽萍,尤红,夏冠聪,等. 2007. 广东罕见特大致洪暴雨形成机理个例分析. 气象科技, 35(3):374-378.
- 赖绍钧,何芬,陈海山,等. 2012. 华南前汛期福建一次致洪暴雨过程的中尺度结构特征. 高原气象, 31(1):167-175.
- 廖胜石,罗建英,姚秀萍,等. 2008. 广西西江流域致洪暴雨过程中尺度特征及机制分析. 高原气象, 27(5):1161-1171.
- 林良勋,黄忠,曾琮,等. 2006. 广东省天气预报技术手册. 北京:气象出版社,29-83.
- 刘国忠,黄开刚,罗建英,等. 2013. 基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究. 气象, 39(1):20-27.
- 刘运策,庄旭东,李献洲. 2001. 珠江三角洲地区由海风锋触发的强对流天气过程分析. 应用气象学报, 12(4):433-441.
- 慕建利,王建捷,李泽椿. 2008. 2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析. 气象学报, 66(3):437-451.
- 农孟松,祁丽燕,黄明策,等. 2008. 基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究. 气象, 34(6):46-52.
- 庞古乾,伍志方,叶爱芬,等. 2012. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究. 热带气象学报, 28(4):564-568.
- 彭菊香,李红莉,崔春光. 2011. 华中区域 LAPS 中尺度分析场的检验与评估. 气象, 2011, 37(2):170-176.
- 曲晓波,张涛,刘鑫华,等. 2010. 舟曲“8.8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析. 气象, 36(10):102-105.
- 冉令坤,齐彦斌,郝寿昌. 2014. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究. 大气科学, 38(1):83-100.
- 孙继松,戴建华,何立富,等. 2014. 强对流天气预报的基本原理与预报方法. 北京:气象出版社,49-50.
- 孙继松,何娜,王国荣,等. 2013. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探. 暴雨灾害, 31(3):218-225.
- 寿亦萱,陆风,王捷纯,等. 2014. 华南冷季暴雨中热带卷云羽特征研究. 气象, 40(6):687-696.
- 陶诗言,卫捷. 2007. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系. 气象, 33(3):10-18.
- 王东海,夏茹娣,刘英. 2011. 2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比分析. 气象学报, 69(1):137-148.
- 王婧羽,崔春光,王晓芳,等. 2014. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程的水汽输送特征. 气象, 40(2):133-145.
- 吴乃庚,林良勋,曾沁,等. 2013. 南海季风爆发前罕见连续 3 场暴雨特征及成因. 应用气象学报, 24(2):129-139.
- 伍志方,曾沁,吴乃庚,等. 2011. 广州 5—7 高空槽后和 5-14 槽前大暴雨过程对比分析. 气象, 37(7):838-846.
- 俞小鼎. 2011. 基于构成要素的预报方法——配料法. 气象, 37(8):913-918.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象, 38(11):1313-1329.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术发展. 气象学报, 70(3):311-337.
- 张晓惠,倪允琪. 2009. 华南前汛期锋面对流系统与暖区对流系统的个例分析与对比研究. 气象学报, 67(1):108-211.
- 张小玲,湛芸,张涛. 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析. 气象学报, 70(4):642-654.
- 张一平,吴秦,苏爱芳,等. 2013. 基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征. 高原气象, 32(5):1492-1502.
- 赵欢,张人禾,温敏. 2015. 2013 年 5 月华南强降水与中国南海夏季风爆发. 气象学报, 73(3):442-458.
- 郑婧,孙素琴,吴静,等. 2014. 梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析. 气象, 40(5):570-579.
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究. 气象, 37(7):795-801.
- 周泓,杨若文,钟爱华,等. 2015. 云南省一次切变冷锋型暴雨过程的中尺度对流系统分析. 气象, 41(8):953-963.
- Chen Jiong, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, et al. 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China. Acta Meteor Sin, 27(6):868-888.
- Crisp Msgt, Charlie A. 1979. Training guide for severe weather forecasters. AFGWCTN-79/002. United States Air Force, Air Weather Service(MAC), Air Force Global Weather Central.
- Davis R S. 2001. Flash flood forecast and detection methods. Meteor Monog, 28(50):481-526.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Fujita T T. 1956. Mesoanalysis: An important scale in the analysis of weather data. Wea Bure Res Paper, 39:1-84.
- Maddox R A, Chappel C F, Hoxit L R. 1979. Synoptic and Meso- $\alpha$  aspects of flash flooding events. Bull Amer Soc, 60(2):115-123.
- Miller R C. 1972. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Technical Report 200 (Rev). Air Weather Service (MAC), United States Air Force.
- Ni Yunqi, Cui Chunguang, Li Hongli, et al. 2011. High-resolution mesoscale analysis data from the South China Heavy Rainfall Experiment (SCHeREX): Data generation and quality Evaluation. Acta Meteor Sin, 25(4):478-493.
- Tian Fuyou, Zheng Yongguang, Zhang Tao, et al. 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. J Meteor Res, 29(3):370-384.