

苏冉,廖菲,齐彦斌,2019. 华南暖区暴雨过程集合动力因子的诊断分析[J]. 气象,45(11):1517-1526. Su R, Liao F, Qi Y B, 2019. Diagnostic analysis of ensemble dynamic factors during the warm-sector torrential rain in South China[J]. Meteor Mon, 45(11):1517-1526(in Chinese).

华南暖区暴雨过程集合动力因子的诊断分析*

苏冉¹ 廖菲¹ 齐彦斌²

1 广州市气象台,广州 511430

2 吉林省人工影响天气办公室,长春 130062

提 要: 选取 2015—2017 年 4—6 月发生在广东地区的 20 个暖区暴雨个例,利用 GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 预报场资料,分析了集合动力因子在华南暖区暴雨中的分布特征。研究结果表明:(1)在广东省的四类主要暖区暴雨中,锋前低槽暴雨中各集合动力因子和累积降水的相关性最高,其次是西南急流暴雨,而回流暴雨中的相关性最差。锋前低槽暴雨与回流暴雨有共同的相关性较好的集合动力因子,高空槽和副热带急流暴雨与西南急流暴雨也有共同的相关性较好的集合动力因子。(2)选取各类暖区暴雨中对降水表征最好的集合动力因子分别构建了 3 个量级的权重指数(量级分别为 10^{-3} 、 10^{-1} 和 10^2),发现各量级的权重指数随着降水量级的增大而增大,说明权重指数对分析判断不同量级的降水具有很好的指示作用。(3)采用各量级权重指数的中位数作为判断降水等级的阈值,并利用 3 个量级的权重指数可以综合判断降水的强度等级,这为降水的量级预报提供了一个客观化指标。这些结果进一步提高了集合动力因子在华南暖区暴雨预报中的实际应用能力。

关键词: 动力因子,暖区暴雨,阈值

中图分类号: P433, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.002

Diagnostic Analysis of Ensemble Dynamic Factors During the Warm-Sector Torrential Rain in South China

SU Ran¹ LIAO Fei¹ QI Yanbin²

1 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

2 Weather Modification Office of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract: In this paper, 20 cases of the prefrontal torrential rain in Guangdong Province from April to June of 2015—2017 were selected, and the distribution characteristics of ensemble dynamic factors of the warm-sector torrential rain were analyzed by using the GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ data. The results are as follows. (1) Among the four types of warm-sector torrential rain in Guangdong Province, the correlation between the ensemble dynamic factors and the accumulated precipitation is the highest in the prefrontal trough torrential rain, followed by the southwest jet torrential rain and the lowest correlation is with the backflow torrential rain. There are common ensemble dynamic factors between the prefrontal trough and the backflow torrential rain, and also between the high-level trough and subtropical jet torrential rain and southwest jet stream torrential rain. (2) Three orders of magnitude weighting index are constructed by different ensemble dynamic factors which are the best representation of precipitation in various warm-sector torrential rains. The index (magnitude is 10^{-3} , 10^{-1} and 10^2 respectively) is found to be increasing with the increase of

* 广东省自然科学基金项目(2019A1515011813)、国家自然科学基金项目(41775140)、广州市科技计划项目(907158342066)、广东省气象局科研项目(GRMC2017Q12)和广东省气象局“地域频发性强降水(‘雨窝’)”项目共同资助

2018 年 8 月 10 日收稿; 2019 年 9 月 23 日收修定稿

第一作者:苏冉,主要从事强降水预报研究. Email:susan_su91@foxmail.com

通信作者:廖菲,主要从事海洋气象观测研究. Email:fliao@gd121.cn

precipitation level, which indicates that the index has a good indication for judging the precipitation intensity. (3) The median of each magnitude index is used as the threshold to judge the precipitation intensity, providing an objective norm for the quantity forecast of precipitation. These results further promote the practical application of ensemble dynamic factors in the prediction of warm-sector torrential rain in South China.

Key words: dynamic factor, warm-sector torrential rain, threshold

引 言

暴雨,特别是局地暴雨的预报一直是气象领域中一个普遍性难题,暴雨的发生发展受到层结不稳定性、水汽供应和抬升触发机制等诸多因素的制约。冷暖气流的交汇(陆尔和丁一汇,1997)驱动中尺度对流系统发展,容易引发暴雨(高守亭等,2008)。此外,重力波和地形抬升,高空短波槽,高、低空急流,低层切变线及远距离台风等都对暴雨的发生发展有一定影响(李麦村,1978;孙建华和赵思雄,2000;张顺利等,2001;张维桓等,2000)。

华南地处东亚,在春、夏过渡时期受大气环流调整,导致华南冷暖空气交汇活动频繁,出现华南前汛期暴雨。受各种天气系统影响,前汛期暴雨主要有锋面暴雨、暖区暴雨两种,锋面暴雨由于存在明显的冷空气,容易受到注意,而暖区暴雨往往因没有冷空气活动而导致事前不易被察觉,从而造成漏报。加之华南地区复杂的地形、海陆热力差异等对中小尺度对流系统的复杂外强迫作用,使得其预报难度非常大(薛纪善,1999)。为此,学者们从华南前汛期暖区暴雨的天气系统特征(陶诗言,1980;周秀骥,2003),锋面附近和锋前暖湿区内暴雨系统的主要物理差异(赵玉春等,2008),暖区暴雨类型及主要触发条件(何立富等,2016),暖区暴雨与高、低空急流等天气系统的关系(丁治英等,2011;汪玲瑶等,2018),数值模式模拟分析(罗建英等,2009;吴亚丽等,2018)等方面开展了丰富细致的研究工作。不过,对华南暖区暴雨发生发展机制的认识还是不够,对于提高暖区暴雨预报的时效性及针对降水的分量级预报更是难上加难。

从模式预报技术角度来看,发展对流尺度集合预报技术是目前提高暴雨预报的一种可行方法(俞小鼎等,2012)。高守亭等(2013)在广义位温理论和中尺度波流相互作用理论的基础上,结合暴雨动、热力学特点,充分利用数值模式对温、湿、压、风等基本气象要素预报比较准确的优势,建立了多个包含动

力、热力和水汽等信息,并且物理意义明确的集合动力因子。在此基础上,针对不同地区不同降水系统的特点,挑选出了对降水落区诊断效果较好的不同动力因子(冉令坤等,2013;2014;杨帅等,2013;许雯等,2013;吴贤笃等,2013;李娜等,2015;李琴等,2016)。这些动力因子对诊断地形影响下的四川暴雨落区(王成鑫等,2013),2006年台风碧利斯降水(汪亚萍等,2015)都表现出较好的效果。这些工作均表明集合动力因子对于强降水过程中降水系统的发展和演变具有一定的预报能力,能较好地指示出强降水的落区。不过,高守亭等(2013)发展的集合动力因子有40多种,且目前在华南暖区暴雨中的诊断研究工作还不多见。为此,以暖区暴雨为对象,重点分析各种动力因子对华南暖区暴雨的诊断能力,探讨不同因子对于不同暖区暴雨类型的适用性,基于具有预报优势的多动力因子,建立客观化判断阈值,这项工作对于提高华南暖区暴雨预报诊断技术有着积极的帮助。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用的数据主要为美国 NCEP/NCAR 全球预报系统(GFS)的预报场资料,每天进行4次滚动预报。所选取资料的预报时效为0~96 h,预报时间间隔为3 h,水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,垂直方向有26个等压面层。

在分析集合动力因子对降水落区的诊断效果时,降水落区的资料采用的是模式降水预报场,这主要是因为通过分析模式降水预报场与观测降水的分布,发现模式的3 h累积降水与观测降水是比较一致的。例如:图1给出了2018年5月3日12时(世界时,下同)3 h累积降水的对比,实况3 h累积降水量级为大雨,GFS预报3 h累积降水量级为中雨,虽然降水量级有差别,但可以看到降水落区还是高度一致的。

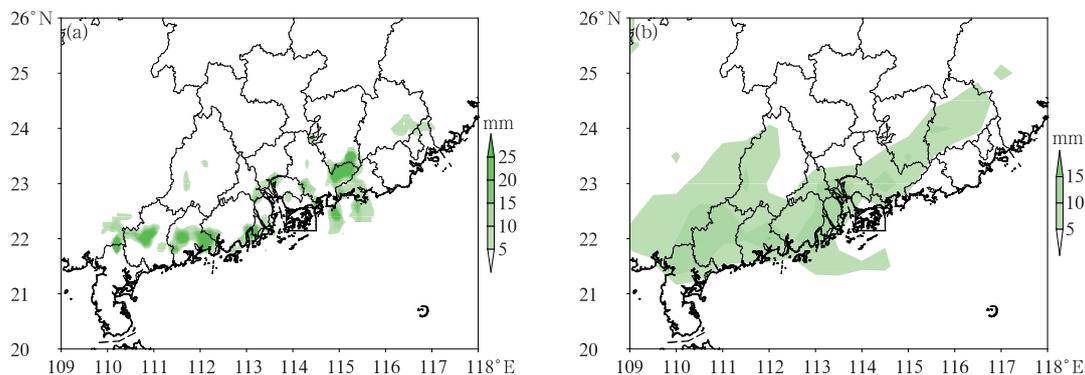


图 1 2018 年 5 月 3 日 12 时地面自动站观测(a)和 GFS 预报场(b)的 3 h 累积降水

Fig. 1 3 h accumulated precipitation from 0900 UTC to 1200 UTC 3 May 2018

(a) automatic surface station, (b) GFS forecast

1.2 集合动力因子选取

由于暖区的暖湿不稳定程度高,暖区暴雨的发生往往取决于是否有扰动触发,因而动力、热力条件的选取显得尤为重要。目前,集合动力因子共发展有 47 个,通过计算其与降水的相关性,在每个个例计算时挑选出与降水相关最显著的前 10 个动力因子,以此作为研究的基础。计算结果还表明,针对不同的暖区暴雨类型,相关最明显的动力因子略有不同,因而将分类开展集合动力因子的诊断分析工作。

1.3 暖区暴雨个例

根据《广东省天气预报技术手册》(林良勋等, 2006)对暖区暴雨的分类定义,华南暖区暴雨主要分为锋前低槽暴雨、回流暴雨、高空槽副热带急流共同作用产生暴雨和强西南季风爆发产生的暴雨这四种

类型。根据其主要天气形势特点,选取了 2015—2017 年 4—6 月发生在广东地区的暖区暴雨(相邻 3 个国家站或者分散 5 个国家站日雨量超过 50 mm)共 20 例,其中锋前低槽暴雨有 3 例,回流暴雨有 3 例,高空槽和副热带急流暴雨有 7 例,西南急流暴雨有 7 例,表 1 列出了各暖区暴雨个例发生的时间。

2 集合动力因子的诊断分析

为筛选出对降水落区和强度有较好预报效果的集合动力因子,通过求取所选区域中各格点上集合动力因子平均值与该格点 3 h 累积降水量的相关系数,评估集合动力因子的预报效果。计算时,针对四类暖区暴雨天气过程分别计算,各集合动力因子的公式和物理意义详见表 6。

表 1 暖区暴雨个例发生时间

Table 1 The occurrence time of warm-sector torrential rain cases

锋前低槽暴雨	回流暴雨	高空槽和副热带急流暴雨	西南急流暴雨
2016050818*	2017042306	2016040312	2016052700
2016051912	2017050612	2016040906	2016060906
2017051406	2016062712	2016041212	2016061012
		2016042106	2016061106
		2016042212	2016061306
		2016050400	2016061506
		2017050718	2016061912

注: * 2016050818 表示 2016 年 5 月 8 日 18 时,下同。

Note: * 2016050818 represents 1800 UTC 8 May 2016, the same below.

2.1 锋前低槽暴雨

通过计算发现,在不同的降水个例中与降水相

关性较好的前 10 个集合动力因子各有不同,其相关性大小也有差异,不过也有共同的特点。在 3 个个例中(表 2),水汽散度垂直通量(sumwqvdiv)、质量散度

垂直通量(sumwdendiv)、凝结潜热质量散度垂直通量(sumwaldiv)这 3 个集合动力因子都是相关性较高,且在每个个例中都出现,而这 3 个集合动力因子侧重的分别是水汽条件、动力条件、凝结潜热条件,说明水汽的辐合和垂直输送对于此类暴雨是比较重要的。此外,比较 2016 年 5 月 19 日 12 时(2016051912)和 2017 年 5 月 14 日 06 时(2017051406)两次降水过程,发现除上述 3 个集合动力因子与降水相关较明

显外,还有共同的其他 6 个因子,分别是:散度垂直通量(sumwdiv)、凝结潜热散度垂直通量(sumwetadiv)、热力质量散度(sumdival)、二级位涡(sumsecpv)、凝结潜热质量位涡波作用密度(swavepval)、凝结潜热位涡波作用密度(swavepveta)。这 6 个物理量本质上也是与水汽凝结潜热释放、垂直输送有关,因而,对于锋面低槽型暴雨,水汽的辐合抬升及相应的潜热释放对于华南地区暖区暴

表 2 锋前低槽暴雨个例中集合动力因子与累积降水的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of dynamical parameters and 3 h accumulated precipitation in prefrontal trough torrential rain

2016050818		2016051912		2017051406	
集合动力因子	相关系数	集合动力因子	相关系数	集合动力因子	相关系数
sumwqvdiv	0.46	sumwqvdiv	0.67	sumwqvdiv	0.65
sumwaldiv	0.43	sumwaldiv	0.67	sumwaldiv	0.66
sumwdendiv	0.43	sumwdendiv	0.67	sumwdendiv	0.66
swaveshreta	0.43	sumwetadiv	0.68	sumwetadiv	0.66
sumwptediv	0.43	sumwdiv	0.67	sumwdiv	0.66
hsfc	0.44	sumdival	0.67	sumdival	0.72
swavestreta	0.42	sumsecpv	0.70	sumsecpv	0.65
sumhelden	0.42	swavepval	0.67	swavepval	0.66
sumhelth	0.42	swavepveta	0.66	swavepveta	0.65
swaveshral	0.42	sumheleta	0.66	swavepvpte	0.65

雨触发是关键。

2.2 回流暴雨

与锋前低槽暴雨相比,在与降水相关性较好的前 10 个集合动力因子中,不同个例中具有 8 个相同的集合动力因子(表 3)。这 8 个因子中,除了与锋前低槽暴雨相同的 3 个外,其余 5 个分别是:凝结潜热散度垂直通量(sumwetadiv)、散度垂直通量(sumwdiv)、热力散度垂直通量(sumwptediv)、质量垂直螺旋度(sumhelden)、垂直螺旋度(sumhel)。

因而,在这类暴雨个例中,凝结潜热、散度及垂直通量的作用是比较明显的,说明热力因素对于回流暴雨的触发有重要作用。

不过,在回流型暴雨个例中,各集合动力因子与降水的相关性明显偏低,大部分都在 0.3 左右甚至更低,这也说明环境场的热力作用对于降水的触发并不是那么明显,动力、水汽的影响也是不可忽视的,因此对回流暴雨的预报是这四类暴雨中最为困难,因为各种因素对其都有影响,很难找出主要的影响因子。

表 3 同表 2, 但为回流暴雨个例
Table 3 Same as Table 2, but for backflow torrential rain cases

2016062712		2017042306		2017050612	
集合动力因子	相关系数	集合动力因子	相关系数	集合动力因子	相关系数
sumwqvdiv	0.25	sumwqvdiv	0.34	sumwqvdiv	0.31
sumwaldiv	0.26	sumwaldiv	0.32	sumwaldiv	0.31
sumwdendiv	0.26	sumwdendiv	0.32	sumwdendiv	0.31
sumwetadiv	0.26	sumwetadiv	0.32	sumwetadiv	0.33
sumwdiv	0.26	sumwdiv	0.32	sumwdiv	0.33
sumwptediv	0.26	sumwptediv	0.32	sumwptediv	0.33
sumhelden	0.23	sumhelden	0.26	sumhelden	0.28
sumhel	0.22	sumhel	0.26	sumhel	0.29
sumhelal	0.23	sumhelal	0.26	sumhelth	0.29
sumhelqv	0.23	sumhelqv	0.30	sumheleta	0.29

2.3 高空槽和副热带急流暴雨

将此类暴雨中的 7 个个例进行计算发现,各因子在不同的暴雨个例中的表现差异性较大,只有 1 个散度垂直通量(sumwdiv)因子在所有个例中均表现与降水相关性较好,而 2016040906 个例与其他个例的情况差异性很大,因而主要比较其他个例之间

的共性(表 4)。不难看出,凝结潜热散度垂直通量(sumwetadiv)、凝结潜热螺旋度(sumhelqveta)、垂直螺旋度(sumhel)、质量垂直螺旋度(sumhelden)、凝结潜热质量螺旋度(sumhelpha)这 5 个因子与降水的相关系数在 0.4~0.5,且主要体现出凝结潜热的释放及螺旋度对于该类型暖区暴雨的影响非常大,而水汽和动力抬升条件则相对次要。

表 4 同表 2,但为高空槽和副热带急流暴雨个例

Table 4 Same as Table 2, but for high-level trough and subtropical jet stream torrential rain cases

集合动力因子	相关系数						
	2016040312	2016040906	2016041212	2016042106	2016042212	2016050400	2017050718
sumwdiv	0.35	0.51	0.50	0.46	0.39	0.41	0.54
sumwetadiv	0.36		0.50	0.46	0.39	0.41	0.54
sumhelqveta	0.48		0.55	0.48	0.41	0.45	0.54
sumhel	0.48		0.54	0.48	0.41	0.44	0.54
sumhelden	0.46		0.52	0.47	0.40	0.43	0.54
sumhelpha	0.46		0.51	0.47	0.41	0.42	0.54
sumwaldiv		0.52	0.5	0.46	0.39		0.54
sumwdendiv		0.52	0.49		0.38		0.54
sumhelth	0.46			0.48	0.39		0.54
sumhelqv	0.45		0.54	0.47		0.47	
sumwptediv	0.36			0.46	0.40	0.41	
hsfc	0.37	0.58				0.42	
sumwqvdiv			0.44			0.41	0.56

2.4 西南急流暴雨

与高空槽和副热带急流暴雨相比,西南急流暴雨中集合动力因子在每个暴雨过程中的表现相对一致,且相关系数略高(表 5)。其中,与降水相关性较好的 4 个集合动力因子在所有降水个例中都有体现,分别是:散度垂直通量(sumwdiv)、质量垂直螺

旋度(sumhelden)、凝结潜热质量螺旋度(sumhelpha)、凝结潜热螺旋度(sumhelqveta)。另外,水汽散度垂直通量(sumwqvdiv)、垂直螺旋度(sumhel)也在 7 个个例中的 6 个中重复出现。这些与西南急流暴雨相关性较好的影响因子表现出水汽、螺旋度对华南暖区暴雨具有较好的指示意义,其相关系数往往超过 0.5,且在每个个例中相关系数值均相对

表 5 同表 2,但为西南急流暴雨个例

Table 5 Same as Table 2, but for southwest jet stream torrential rain cases

集合动力因子	相关系数						
	2016052700	2016060906	2016061012	2016061106	2016061306	2017061506	2017061912
sumwqvdiv	0.50	0.49	0.49		0.50	0.61	0.53
sumwaldiv	0.50		0.50	0.45	0.50	0.63	0.53
sumwdendiv	0.50		0.49	0.45		0.62	0.53
sumwetadiv	0.49	0.49			0.50	0.62	0.53
sumwdiv	0.49	0.48	0.49	0.45	0.50	0.63	0.53
sumhelden	0.46	0.50	0.51	0.52	0.60	0.54	0.53
sumhelpha	0.46	0.50	0.51	0.52	0.60	0.54	0.53
sumhelqveta	0.45	0.50	0.50	0.52	0.61	0.54	0.53
sumhel		0.50	0.50	0.52	0.60	0.54	0.53
sumhelqv	0.47	0.50	0.50	0.50	0.60		
sumhelth		0.50	0.49	0.56	0.50		0.52
sumwptediv	0.49	0.49		0.45			

稳定,因而可以选取作为预报的指标参数。

综上所述,锋前低槽暴雨中各集合动力因子和累积降水的相关性最高,其次是西南急流暴雨,而回流暴雨中的相关性最差(往往在 0.3 以下)。不过,锋前低槽暴雨和回流暴雨有共同的相关性较好的集合动力因子,分别是:水汽散度垂直通量(sumwqvdiv)、质量散度垂直通量(sumwdendiv)、凝结潜热质量散度垂直通量(sumwaldiv);而高空槽和副热带急流暴雨与西南急流暴雨也有共同的相关性较好的集合动力因子,分别是:散度垂直通量(sumwdiv)、凝结潜热螺旋度(sumhelqveta)、质量垂直螺旋度(sumhelden)、凝结潜热质量螺旋度(sumhelpha)。前两种降水主要体现水汽和散度的作用,后两种降水主要体现的是水汽和涡度的作用,说明不同类型的华南暖区暴雨,其影响降水的外部条件是有所不同的。

3 基于集合动力因子的降水等级预报方法

3.1 权重指数的构建

从上述对 4 种华南暖区暴雨降水类型的分析不难看出,与降水相关性较高的共有 22 个集合动力因

子,其中有 12 个因子在一半以上的个例中其相关性都较高。为此,利用这 12 个因子构建降水预报权重指数,具体按照: $y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$ 构建权重指数。其中, a 为该种动力因子相关系数(具体见表 2~表 5), x 为该动力因子值,这样便可综合所有动力因子的相关特征,提高动力因子和累积降水的相关性,以 y 值的大小来判断暴雨发生的可能性及相应的降水等级。

需要注意的是,各集合动力因子本身的数值量级有较大差异(表 6),为平衡各因子对权重系统的影响,采用同一量级的集合动力因子来构建一个权重指数,因而可以构建 3 个权重指数,其量级分别为 10^{-3} 、 10^{-1} 和 10^2 。 10^{-3} 量级的权重指数包含表 6 中 2 个集合动力因子:水汽散度垂直通量(sumwqvdiv)和水汽垂直螺旋度(sumhelqv)。 10^{-1} 量级的权重指数包含表 6 中 8 个量级为 10^{-1} 的动力因子:凝结潜热质量散度垂直通量(sumwaldiv)、质量垂直螺旋度(sumhelden)、散度垂直通量(sumwdiv)、垂直螺旋度(sumhel)、质量散度垂直通量(sumwdendiv)、凝结潜热散度垂直通量(sumwetadiv)、凝结潜热螺旋度(sumhelqveta)、凝结潜热质量螺旋度(sumhelpha)。 10^2 量级的权重指数包含表 6 中 2 个量级为 10^2 的动力因子:热力散度垂直通量(sumwptediv)和热力垂直螺旋度(sumhelth)。

表 6 主要动力因子的物理意义、出现次数和量级

Table 6 Major dynamical factors' physical meaning, frequency and magnitude

名称	计算公式	物理意义	出现次数/次	量级
水汽散度垂直通量 (sumwqvdiv)	$sumwqvdiv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left[\omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(u q_v) + \frac{\partial}{\partial y}(v q_v) \right] \right] dp$	垂直速度与水汽通量水平散度的乘积;代表水汽通量散度的垂直输送	14	10^{-3}
水汽垂直螺旋度 (sumhelqv)	$sumhelqv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left[\omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(v q_v) - \frac{\partial}{\partial y}(u q_v) \right] \right] dp$	在垂直螺旋度的基础上考虑大气中的水汽效应, q_v 是水汽比湿	10	10^{-3}
凝结潜热质量散度垂直通量 (sumwaldiv)	$sumwaldiv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left[\omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(u \eta) + \frac{\partial}{\partial y}(v \eta) \right] \right] dp$	垂直速度与凝结潜热密度通量水平散度的乘积	15	10^{-1}
质量垂直螺旋度 (sumhelden)	$sumhelden = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left[\omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(v \rho) - \frac{\partial}{\partial y}(u \rho) \right] \right] dp$	将垂直螺旋度中引入密度 ρ ,由于密度 ρ 的值随着高度的增加而减小,故点乘之后垂直螺旋度在高低层的差异更加明显	17	10^{-1}
散度垂直通量 (sumwdiv)	$sumwdiv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left[\omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dp$	垂直速度与水平散度的乘积;代表水平散度的垂直通量	19	10^{-1}

续表 6

名称	计算公式	物理意义	出现次数/次	量级
垂直螺旋度 (sumhel)	$sumhel = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right dp$	垂直速度与相对垂直涡度的乘积;体现相对涡度的垂直通量	15	10^{-1}
质量散度垂直通量 (sumwendiv)	$sumwendiv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(u \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v \rho) \right] \right dp$	垂直速度与质量通量水平散度的乘积	15	10^{-1}
凝结潜热散度垂直通量 (sumwetadiv)	$sumwetadiv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(u \eta) + \frac{\partial}{\partial y}(v \eta) \right] \right dp$	垂直速度与凝结潜热通量水平散度的乘积	16	10^{-1}
凝结潜热螺旋度 (sumhelqveta)	$sumhelqveta = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(v \eta) - \frac{\partial}{\partial y}(u \eta) \right] \right dp$	垂直速度与凝结潜热通量垂直涡度的乘积	15	10^{-1}
凝结潜热质量螺旋度 (sumhelalpha)	$sumhelalpha = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(v \alpha) - \frac{\partial}{\partial y}(u \alpha) \right] \right dp$	垂直速度与凝结潜热密度通量垂直涡度的乘积	15	10^{-1}
热力散度垂直通量 (sumwptediv)	$sumwptediv = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(u \theta^*) + \frac{\partial}{\partial y}(v \theta^*) \right] \right dp$	在散度垂直通量基础上,引入能够反映湿大气非均匀饱和特性的广义位温 θ^*	10	10^2
热力垂直螺旋度 (sumhelth)	$sumhelth = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} \rho \left \omega \left[\frac{\partial}{\partial x}(v \theta^*) - \frac{\partial}{\partial y}(u \theta^*) \right] \right dp$	将广义位温 θ^* 引入垂直螺旋度的概念中给出热力螺旋度的定义	11	10^2

3.2 不同权重指数的分布特征

根据 24 h 累积雨量的定义,可将降取划分为 6 个等级,从 1~6 分别为小雨($<10 \text{ mm}$)、中雨($10 \sim 25 \text{ mm}$)、大雨($25 \sim 50 \text{ mm}$)、暴雨($50 \sim 100 \text{ mm}$)、大暴雨($100 \sim 200 \text{ mm}$)、特大暴雨($\geq 200 \text{ mm}$)。根据每个个例中实际雨量的等级,计算了对应的不同量级的权重指数,由此得到了图 2 中所示的权重指数随雨量等级的分布图。

总体上来看,权重指数随着降水量级的增大而增大,当降水量级在小雨到大雨时,各类降水中权重指数分布大致相当,对应的中位数随降水量级增大而缓慢增大。当达到暴雨及以上量级时,尽管对应的权重指数极大值有明显的增大,不过,计算得到的这些权重指数,75%都相对集中,而且暴雨及以上量级降水对应的中位数也较大雨及以下量级降水的中位数有明显的增大,这对于利用权重指数来分析判断暴雨以上量级的降水具有很好的指示作用。

在不同类型的暖区暴雨中,权重指数的相对大小是存在差异的。在锋前低槽型降水中(图 2a), 10^{-3} 、 10^{-1} 、 10^2 构建的权重指数呈现出明显的量级差异,其中位数大致为 10^{-3} 、 10^0 、 10^2 ,因而利用各权重指数来综合判断降水的量级是可行的,这可能与集合动力因子与降水相关性较好有关。对于回流暴雨(图 2b)、高空槽和副热带急流暴雨(图 2c)两种, 10^{-3} 、 10^{-1} 、 10^2 构建的权重指数对于小雨到大暴雨时有较为明显的差异,但较难区分大暴雨和特大暴雨。而在西南急流暴雨中,各量级权重指数的变化特征与锋前低槽暴雨相似,权重指数都随降水量级的不同有明显差异,可以利用各权重指数来综合判断降水的量级。

从各权重指数分布来看,各权重指数相对集中,因而提取各指数在不同量级降水中的中位数,作为相应的各等级降水发生概率超过 50%的判断阈值,图 2 中也给出了不同降水等级的中位数分布。

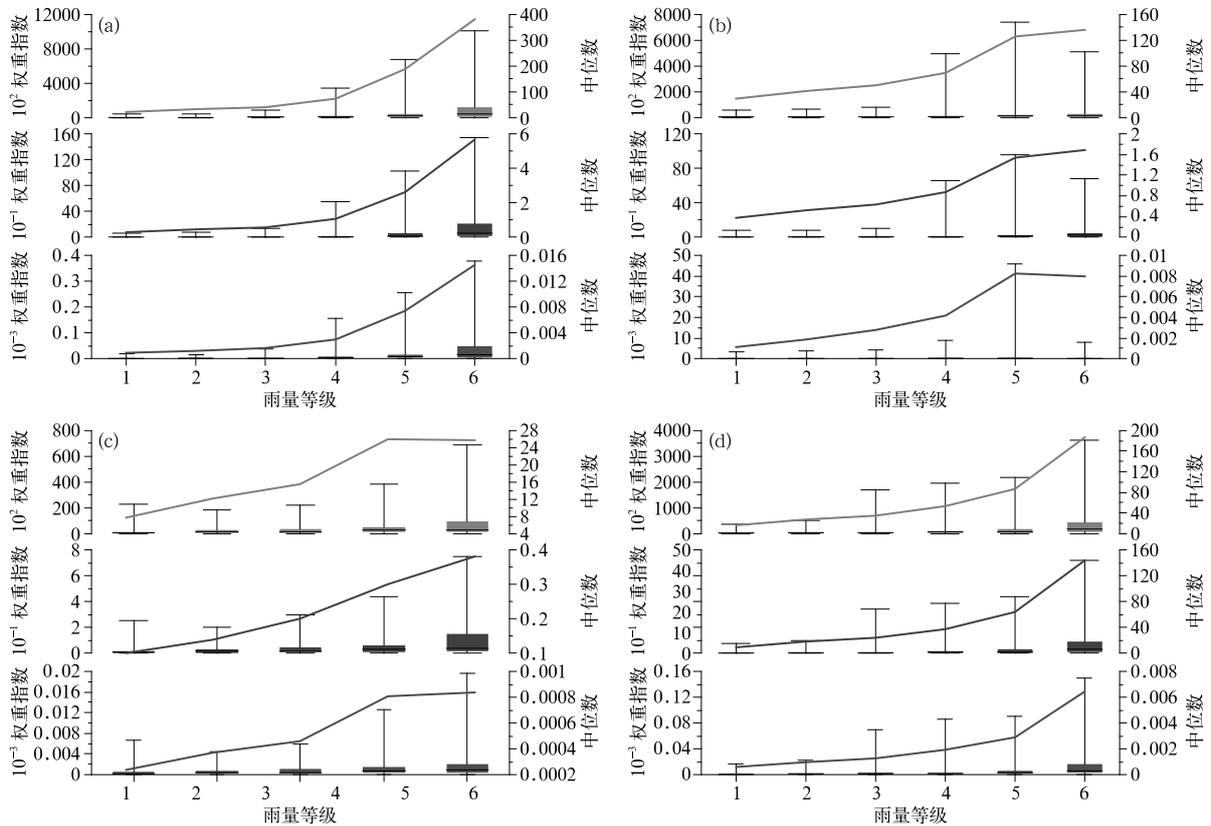


图 2 同量级的集合动力因子计算得到的权重指数箱式分布图

(a) 锋前低槽暴雨, (b) 回流暴雨, (c) 高空槽和副热带急流暴雨, (d) 强西南急流暴雨

Fig. 2 Weight index's box-type distraction of ensemble dynamical factors of the same magnitude

(a) prefrontal trough torrential rain, (b) backflow torrential rain, (c) high-level trough and subtropical jet stream torrential rain, (d) southwest jet stream torrential rain

3.3 基于权重指数的降水等级个例检验

为检验第三节中设置的权重指数的阈值对降水等级的判断能力,利用 2018 年发生的暖区暴雨个例进行检验。2018 年发生的暖区暴雨个例共 11 个,其中回流暴雨 3 例,西南急流暴雨 5 例,锋前低槽暴雨 1 例,高空槽和副热带急流暴雨 2 例。检验时使用 GFS 预报 3 h 累计降水、集合动力因子 3 h 预报降水等级与实况 3 h 累计降水做格点对比。其中,格点检验的区域选取 $20^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $109^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$ (覆盖了整个广东省);实况雨量数据来源于中国气象局“CMPAS 中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水分析产品”,分辨率为每小时 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 。由于 GFS 预报场分辨率为每 3 h $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,因此,针对融合降水格点产品,选取 10×10 个格点进行面积平均,再逐 3 h 进行累加,以此得到与 GFS 相对应的网格降水量。

区域网格降水检验结果表明(表 7):对四类暖区暴雨,尽管 GFS 对小雨量级降水预报效果优于集合动力因子;但是对于中雨及以上量级的降水,集合动力因子的预报效果则明显优于 GFS,且降水量级越大,集合动力因子的预报效果就提高得越明显。具体表现为:(1)集合动力因子对西南急流暴雨和锋前低槽暴雨两类暖区暴雨的预报效果更加优于其他两类,基于集合动力因子的预报准确率比 GFS 相应提高近一倍,这也说明系统性强的暴雨,从温、湿等环境条件上更容易判断暴雨的发生。(2)对于大暴雨以上的情况,除了高空槽和副热带急流暴雨这类降水外,在其他三类降水中,集合动力因子对其的预报准确率可达 50% 以上,表现出较好的预报能力。(3)对于高空槽和副热带急流暴雨这类降水,基于集合动力因子的预报方法,虽然对大雨以上的预报效果有所提高,但由于其预报准确率最高不足 18%,因此对这类降水的预报,该方法的准确性较差。

表 7 GFS 和集合动力因子对四类暖区暴雨的格点预报准确率(单位:%)
Table 7 Grid precipitation forecast accuracy of four types of warm-sector
torrential rain by GFS and ensemble dynamic factors (unit: %)

降水等级	小雨		中雨		大雨		暴雨		大暴雨		特大暴雨	
	GFS	动力因子	GFS	动力因子								
回流暴雨	76.05	16.06	12.28	15.79	14.62	20.77	5.23	15.79	0	52.27	0	50
西南急流暴雨	61.51	31.46	13.53	31.83	13.25	37.75	17.57	33.47	15.23	41.62	0	60
锋前低槽暴雨	42.28	38.08	22.83	44.57	29.63	49.38	26.37	36.26	5.63	45.07	0	28.57
高空槽和副热带急流暴雨	83.52	15.52	10.26	5.13	3.92	7.84	4.35	17.39	0	0	/	/

4 结 论

通过引入集合动力因子,并选取了 2015—2017 年 4—6 月发生在广东地区的 20 个暖区暴雨个例,分析研究了暖区暴雨过程中集合动力因子的表现及分布特征,结果表明:

(1) 在广东省的四类主要暖区暴雨中,集合动力因子对降水的预报指示作用并不一致,表现为各集合动力因子与累积降水的相关性不同。总体上看,锋前低槽暴雨中各集合动力因子和累积降水的相关性最高,其次是西南急流暴雨,而回流暴雨中的相关性最差。锋前低槽暴雨和回流暴雨有共同的相关性较好的集合动力因子,而高空槽和副热带急流暴雨与西南急流暴雨也有共同的相关性较好的集合动力因子,前两种降水主要体现水汽和散度的作用,后两种降水主要体现的是水汽和涡度的作用,说明不同类型的华南暖区暴雨,其影响降水的外部条件是有所不同的。

(2) 选取各类暖区暴雨中对降水表征最好的集合动力因子分别构建了 3 个量级的权重指数(量级分别为 10^{-3} 、 10^{-1} 和 10^2),发现各量级的权重指数随着降水量级的增大而增大,当降水量级在小雨到大雨时,各类降水中权重指数分布大致相当,当达到暴雨及以上量级时,对应的权重指数也较大雨及以下的情况有明显的增大,这对于利用权重指数来分析判断暴雨以上量级的降水具有很好的指示作用。

(3) 由于各量级的权重指数 75% 的数据相对集中,可以采用各量级权重指数的中位数作为判断降水等级的阈值,通过对实际降水个例的网格场检验,指出利用权重指数可以较好地判断降水的强度等级,尤其是对西南急流暴雨、锋前低槽暴雨两类降水中中雨以上降水预报能力有明显提高。

暖区暴雨是当前华南前汛期降水预报中的一个

技术难点,本文通过引入集合动力因子,建立了一种基于 GFS 预报场的权重指数,并对其在降水量级预报表现中进行了检验。今后将继续丰富降水个例的检验,以及在 ECMWF 产品中的应用及检验,以不断优化和完善本方法的代表性和普适性。

参考文献

- 丁治英,刘彩虹,沈新勇,2011. 2005—2008 年 5、6 月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 27(3):307-316. Ding Z Y, Liu C H, Shen X Y, 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008[J]. J Trop Meteor, 27(3):307-316(in Chinese).
- 高守亭,冉令坤,李娜,等,2013. 集合动力因子暴雨预报方法研究[J]. 暴雨灾害, 32(4):289-302. Gao S T, Ran L K, Li N, et al, 2013. The "Ensemble Dynamic Factors" approach to predict rainstorm[J]. Torr Rain Dis, 32(4):289-302(in Chinese).
- 高守亭,孙建华,崔晓鹏,2008. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究[J]. 大气科学, 32(4):854-866. Gao S T, Sun J H, Cui X P, 2008. Numerical simulation and dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4):854-866(in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):559-569(in Chinese).
- 李麦村,1978. 重力波对特大暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 2(3):201-209. Li M C, 1978. Studies on the gravity wave initiation of the excessively heavy rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 2(3):201-209(in Chinese).
- 李娜,冉令坤,孙建华,等,2015. 基于 NCEP/GFS 资料的中国东部地区雷暴预报研究[J]. 气象学报, 73(3):459-470. Li N, Ran L K, Sun J H, et al, 2015. Research of the thunderstorm forecast in East China based on the NCEP/GFS data[J]. Acta Meteor Sin, 73(3):459-470(in Chinese).
- 李琴,杨帅,崔晓鹏,等,2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J]. 大气科学, 40(2):341-356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al, 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters

- for a heavy rainfall event in Sichuan Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):341-356(in Chinese).
- 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等, 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社. Lin L X, Feng Y R, Huang Z, et al, 2006. Technical Guidance On Weather Forecasting in Guangdong Province [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 陆尔, 丁一汇, 1997. 1991 年江淮持续性特大暴雨的夏季风活动分析[J]. *应用气象学报*, 8(3):316-324. Lu E, Ding Y H, 1997. Analysis of summer monsoon activity during the 1991 excessively torrential rain over Changjiang Huaihe River Valley[J]. *Quart J Appl Meteor*, 8(3):316-324(in Chinese).
- 罗建英, 廖胜石, 黄归兰, 等, 2009. 广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J]. *气象*, 35(10):50-57. Luo J Y, Liao S S, Huang G L, et al, 2009. Numerical simulation and analysis on a heavy rain process in the warm sector in Guangxi[J]. *Meteor Mon*, 35(10):50-57(in Chinese).
- 冉令坤, 李娜, 高守亭, 2013. 华东地区强对流降水过程湿斜压涡度的诊断分析[J]. *大气科学*, 37(6):1261-1273. Ran L K, Li N, Gao S T, 2013. Diagnostic analysis of precipitating convective process in east China with moist baroclinic vorticity parameters[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(6):1261-1273(in Chinese).
- 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌, 等, 2014. “7. 21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J]. *大气科学*, 38(1):83-100. Ran L K, Qi Y B, Hao S C, et al, 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(1):83-100(in Chinese).
- 许雯, 何金海, 高守亭, 等, 2013. 集合动力因子对登陆台风“莫拉克”(0908)暴雨落区的诊断与预报研究[J]. *大气科学*, 37(1):23-35. Xu L, He J H, Gao S T, et al, 2013. Diagnostic and predictive studies of torrential rain location associated with Landfalling Typhoon Morakot (0908) using multi-dynamical parameters [J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(1):23-35(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 2000. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究[J]. *大气科学*, 24(2):223-237. Sun J H, Zhao S X, 2000. Diagnoses and simulations of typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 24(2):223-237(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等, 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析[J]. *大气科学*, 37(5):1099-1110. Wang C X, Gao S T, Liang L, et al, 2013. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Sichuan rainstorm influenced by terrain[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(5):1099-1110(in Chinese).
- 汪玲瑶, 湛芸, 肖天贵, 等, 2018. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. *气象*, 44(6):771-780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. *Meteor Mon*, 44(6):771-780(in Chinese).
- 汪亚萍, 崔晓鹏, 冉令坤, 等, 2015. 动力因子对 2006“碧利斯”台风暴雨的诊断分析[J]. *大气科学*, 39(4):747-756. Wang Y P, Cui X P, Ran L K, et al, 2015. Diagnosis of dynamical parameters in torrential rain associated with typhoon “Bilis” in 2006[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(4):747-756(in Chinese).
- 吴贤笃, 冉令坤, 李娜, 等, 2013. 一次东风波暴雨的动力因子预报研究[J]. *高原气象*, 32(5):1339-1348. Wu X D, Ran L K, Li N, et al, 2013. Forecasting studies of dynamic factors in rainstorm process with easterly wave[J]. *Plateau Meteor*, 32(5):1339-1348(in Chinese).
- 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉, 等, 2018. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J]. *气象学报*, 76(3):323-342. Wu Y L, Meng W G, Chen D H, et al, 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(3):323-342(in Chinese).
- 薛纪善, 1999. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社. Xue J S, 1999. Study on the Heavy Rain in Summer in South China in 1994[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 杨帅, 陈斌, 高守亭, 2013. 水汽螺旋度和热力螺旋度在华北强“桑拿天”过程中的分析及应用[J]. *地球物理学报*, 56(7):2185-2194. Yang S, Chen B, Gao S T, 2013. Diagnostic analyses and applications of the moisture helicity and the thermal helicity for two strong “sauna” weather processes in Northern China[J]. *Chin J Geophys*, 56(7):2185-2194(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等, 2001. 1998 年夏季中国暴雨洪涝灾害的气象水文特征[J]. *应用气象学报*, 12(4):442-457. Zhang S L, Tao S Y, Zhang Q Y, et al, 2001. Meteorological and hydrological characteristics of severe flooding in China during the summer of 1998[J]. *Quart J Appl Meteor*, 12(4):442-457(in Chinese).
- 张维桓, 董佩明, 沈桐立, 2000. 一次大暴雨过程中急流次级环流的激发及作用[J]. *大气科学*, 24(1):45-57. Zhang W H, Dong P M, Shen T L, 2000. Triggering and effects of the secondary circulation associated with upper and low-level jets in a heavy rainfall process[J]. *Chin J Atmos Sci*, 24(1):45-57(in Chinese).
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 2008. 华南锋面与暖区暴雨个例对比分析[J]. *气象科技*, 36(1):47-54. Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N, 2008. Comparison analysis of south china front and warm-area heavy rain systems in June 2006[J]. *Meteor Sci Technol*, 36(1):47-54(in Chinese).
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等, 2003. 98’ 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京: 气象出版社. Zhou X J, Xue J S, Tao Z Y, et al, 2003. Scientific Experiment on Rainstorm in South China in 1998[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).