

沈澄, 孙燕, 魏晓奕, 等. 2016. 基于物理量参数的江苏短时强降水预报模型的研究. 气象, 42(5): 557-566.

基于物理量参数的江苏短时强降水 预报模型的研究^{* 1}

沈澄¹ 孙燕² 魏晓奕³ 尹东屏⁴

1 南京市气象局, 南京 210009

2 江苏省气象台, 南京 210008

3 江苏省气象信息中心, 南京 210008

4 江苏省气象服务中心, 南京 210008

提 要: 本文利用 2004—2013 年 6—8 月江苏省三个常规探空站(徐州、射阳、南京)的逐日高空探测资料, 计算了 51 个物理量参数。在物理量参数与短时强降水事件(观测时刻后 0~6 h 内出现的短时强降水天气)相关系数的显著性检验基础上, 根据物理量参数在短时强降水样本和非短时强降水样本中值域分布特征, 最终选定了具有预报意义的 16 个物理量参数。通过分析不同类型物理量参数对短时强降水天气的指示作用, 根据各物理量参数在各月短时强降水事件中的阈值, 确定了江苏短时强降水预报的判定指标。采用隶属函数转换法, 建立江苏夏季短时强降水预报模型, 经实况拟合检验, 效果良好。

关键词: 短时强降水, 物理量参数, 拟合率

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.005

Research of Flash-Heavy-Rain Forecast Model in Jiangsu Based on Physical Parameters

SHEN Cheng¹ SUN Yan² WEI Xiaoyi³ YIN Dongping⁴

1 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210009

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Information Center, Nanjing 210008

4 Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008

Abstract: Fifty-one physical parameters are calculated by using upper sounding data from the Xuzhou, Sheyang and Nanjing Stations from June to August in 2004—2013. Based on the significance test of the correlation coefficient between physical parameters and flash-heavy-rain events (flash heavy rain that occurred after 0—6 h of the observation time) and the analysis of numerical distribution of physical parameters in the flash-heavy-rain samples and the non-flash-heavy-rain samples, 16 physical parameters of prediction are selected finally. Through analyzing the indication to the flash-heavy-rain events of different types of physical parameters, and according to the different threshold of physical parameters in each month, different criteria for the flash-heavy-rain events are determined respectively. Thus, the flash-heavy-rain forecast model for summer short-time heavy rains in Jiangsu is established by the membership function conversion method. The fitting test and forecasting test of the forecast model are verified, and the results are good.

Key words: flash heavy rain, physical parameters, fitting rate

* 江苏省科委科技支撑计划社会发展项目(BE2011818)和中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014Z02)共同资助
2015 年 6 月 11 日收稿; 2016 年 2 月 2 日收修定稿
第一作者: 沈澄, 主要从事中短期天气预报技术研究. Email: sicii@126.com

引 言

短时强降水属于强对流天气的一种,是指对流系统在短时间内造成的较大雨量,降水强度超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,持续时间不超过 6 h,降水集中时段一般在 3 h 以内。由于短时强降水历时短、降水强度大,其在短时间内形成的较大降水可形成城市暴洪,往往容易造成重大经济损失和人员伤亡(段鹤等,2014)。

江苏地处长江中下游地区,梅雨期间暴雨频发,特别是夏季短时强降水天气的发生频率更是呈显著上升趋势。由于短时强降水往往是中小尺度天气系统造成的,发生发展十分迅速,局地性较强,对短时强降水落区和时效的预报预警一直都是预报中的难点(郝莹等,2012;仇娟娟等,2013;牛金龙等,2015)。近年来,国内外关于强对流天气的预报方法已有很多研究成果,特别是利用对流参数进行潜势预报成为重要的方法之一(陈秋萍等,2010;冯民学等,2012;庞古乾等,2012;樊李苗等,2013;李娜等,2015;郑栋等,2005;李佰平等,2016;陈元昭等,2016)。同时,中尺度模式的发展也为基于对流参数的分类强对流天气预报提供了有效的途径(雷蕾等,2012;曾明剑等,2015a;2015b)。各种对流参数从不同侧面反映了环境特性,其不同季节、不同种类的强对流天气下显示出的特性差异对判断对流发展与否以及预报对流天气类型都有一定的帮助(刘玉玲,2003;李耀东等,2004;孙继松等,2012)。郝莹等(2007)选取与雷暴相关性好的对流参数,在考虑了预报因子季节特征的基础上,对比使用判别分析法、指标叠加法对安徽地区的雷暴天气进行潜势预报研究。周后福等(2006)将稳定度指标和能量指标作为强对流天气的短时预报指标,结果表明:A 指数和 K 指数具有一定的预报能力;位势不稳定指标在各地具有不同的临界值;当能量平衡高度较高时,强对流天气易于发生。

上述研究主要针对的是雷暴事件、闪电活动等强对流天气,而对短时强降水天气与各种物理量参数之间关系的研究较少,并且各地所研制的强对流天气物理量参数的阈值具有不同的侧重点。本文利用 2004—2013 年 6—8 月江苏省三个常规探空站(徐州、射阳、南京)的逐日高空探测资料,分析了物理量参数对上述三个地区短时强降水天气预报的指

示作用,建立了江苏夏季短时强降水预报模型,以期为汛期短时强降水天气的预报提供参考依据。

1 数据和方法

利用江苏省三个探空站(包括徐州、射阳以及南京)的逐日常规高空探测资料,借助 MICAPS 系统的物理量参数计算模块,计算了 2004—2013 年 6—8 月逐日 08 和 20 时的 51 个物理量参数。规定:若徐州市、盐城市以及南京市在当日 08—14 时或当日 20 时至次日 02 时内,出现任意 1 h 降水量在 20 mm 以上的降水过程,则将当日 08 或 20 时的相应探空站数据作为一个短时强降水样本,否则作为非短时强降水样本。剔除缺测资料后,共得到 4905 个样本,其中短时强降水的样本为 223 个,非短时强降水的样本为 4682 个。

其中,1 h 降水量指的是整点小时值,来自于探空站所在行政区域的各国家基准气候站、基本气象站以及一般气象站的常规地面降水观测资料,包括徐州市的徐州站、丰县站、沛县站、邳州站、睢宁站和新沂站,盐城市的盐城站、射阳站、滨海站、大丰站、东台站、阜宁站、建湖站和响水站以及南京市的南京站、六合站、浦口站、溧水站和高淳站。

2 51 个物理量参数的相关性分析

为了选取与短时强降水有关的物理量参数,对 51 个物理量参数进行了计算,逐一进行挑选及分析,旨在找到对短时强降水预报有指示意义的判据。

假设短时强降水样本的 $Y=1$,非短时强降水样本的 $Y=0$, X_i 为各物理量参数的值($i=1,2,\dots,51$)。逐一分析 X_i 与 Y 之间的相关系数,并进行显著性检验,最后得到 22 个通过 $\alpha < 0.01$ 水平双侧检验、且相关系数 > 0.08 的物理量参数,如表 1。其中剔除的参数包括:修正深对流指数 $MDCI$ 、抬升指数 LI 、最大抬升指数 LI_{Max} 、最优抬升指数 BLI 、斯拉维指数 SLW 、Faust 指数、对流温度 T_g 、对流稳定度指数 IC 、条件对流稳定度指数 ILC 、最大对流稳定度指数 BIC 、Barber 对流不稳定指数 ICC 、对流稳定度指数 BI 、杰弗逊指数 JI 、修正杰弗逊指数 mJI 、对流有效位能 $CAPE$ 、抑制有效位能 CIN 、归一化有效位能 $GCAPE$ 、能量螺旋度 EHI 、最大上升速度 w_{cape} 、大风指数 VV 、粗理查森数 BRN 、粗理

查森数切变 Shr 、风暴强度指数 SSI 、Doswell 云的

厚度、地面温度、地面露点、850 hPa 温度、700 hPa 温度、500 hPa 温度。

表 1 通过检验的物理量参数与短时强降水事件的相关系数

Table 1 The correlation coefficients of physical parameters having passed the significance test and the flash-heavy-rain events

	物理量参数	简写	相关系数
热力稳定度参数	整层比湿积分	IntegralQ	0.220913
	A 指数	A	0.198171
	干暖盖指数	Ls	-0.19403
	潜在下冲气流指数	MDPI	-0.17481
	Tefffer 指数	Tefffer	-0.17191
	K 指数	K	0.168752
	修正 K 指数	mK	0.160862
	沙氏指数	SI	-0.14789
	深对流指数	DCI	0.127137
	总指数	TT	0.113961
动力参数	Charba 总指数	ChTT	0.108401
	风暴相对螺旋度	SRH	0.170943
	0~3 km 垂直风矢量差	ΔV_{0-3}	0.165203
	0~6 km 垂直风矢量差	ΔV_{0-6}	0.099895
热力、动力综合参数	通气管参数	TQG	-0.08442
	强天气威胁指数	SWEAT	0.207938
	瑞士第二雷暴指数	SWISS12	-0.17859
水汽参数	瑞士第一雷暴指数	SWISS00	-0.16866
	700 hPa 比湿	Q_700	0.19121
	700 hPa 相对湿度	RH_700	0.185368
	850 hPa 比湿	Q_850	0.162036
	850 hPa 相对湿度	RH_850	0.154303

3 物理量参数的选定和分析

理想情况下,如果物理量参数在有短时强降水的情况下和无短时强降水的情况下是完全不同的,即物理量参数在短时强降水样本与非短时强降水样本中的数值分布是没有任何交集的,则可以认为该物理量参数对短时强降水的发生有较好的指示意义(樊李苗等,2013)。实际上,出现这种理想情况的可能性是很小的,所以只有选择交集相对较小的物理量参数作为对短时强降水发生具有指示意义的参数。首先,统计出各物理量参数涵盖 75% 以上短时强降水样本的取值区间,如表 2。

对于非短时强降水样本,各物理量参数的取值落在上述涵盖 75% 以上短时强降水样本的取值区间的概率差异较大(图 1),热力稳定度参数和水汽参数平均分别仅为 36.9% 和 36.5%,而动力及综合

表 2 各物理量参数涵盖 75% 以上短时强降水样本的取值区间

Table 2 The thresholds of physical parameters covering more than 75% of flash-heavy-rain samples

参数	取值区间	参数	取值区间	参数	取值区间
IntegralQ	$\geq 5529.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	A	$\geq 8^\circ\text{C}$	Ls	$\leq -46.6 \text{ K}$
MDPI	$\leq 1.5 \text{ K}$	Tefffer	$\leq 35.75^\circ\text{C}$	K	$\geq 35^\circ\text{C}$
mK	$\geq 42.4^\circ\text{C}$	SI	$\leq 0.75^\circ\text{C}$	DCI	$\geq 35.1^\circ\text{C}$
TT	$\geq 42^\circ\text{C}$	ChTT	$\geq 3377.8^\circ\text{C}$	SRH	$\geq 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
ΔV_{0-3}	$\geq 7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	ΔV_{0-6}	$\geq 8.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	TQG	$\leq 333 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
SWEAT	≥ 240.3	SWISS12	≤ 2.9	SWISS00	≤ 2.1
Q_700	$\geq 8.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	RH_700	$\geq 76\%$	Q_850	$\geq 13.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$
RH_850	$\geq 80\%$				

类参数则达到 44.7%。其中,0~6 km 垂直风矢量差 ΔV_{0-6} 、风暴相对螺旋度 SRH 、通气管参数 TQG 以及 Charba 总指数 $ChTT$ 对短时强降水事件指示性较差。

3.1 热力稳定度参数

从以上分析可以看出,仅仅反映了 850 hPa 一层的水汽情况以及中低层稳定度大小的总指数、Charba 总指数、深对流指数以及沙氏指数对短时强

降水的预报指示性均不是很强。然而,无论是考虑到 700 hPa 湿度的 K 指数和修正 K 指数,还是关注到 500、700 以及 850 hPa 温度露点差的 A 指数,甚至仅仅是代表整层比湿积分的 $IntegralQ$ 参数,均对强降水的发生具有明显的指示意义。

中低层较厚的湿层有利于短时强降水天气的发生,反映中低层温湿差异的干暖盖指数和潜在下冲气流指数,与短时强降水呈反相关关系,也具有较好的指示意义。

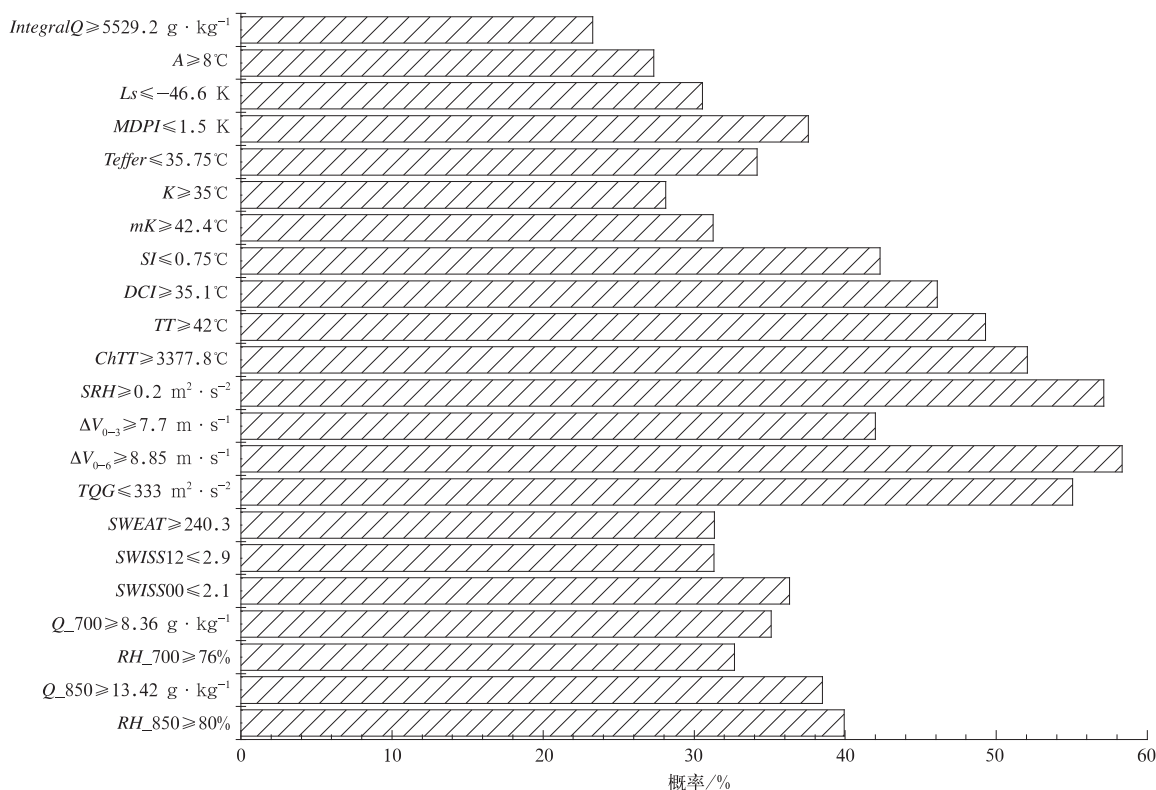


图 1 涵盖 75% 以上短时强降水样本的物理量参数取值区间在非短时强降水样本中的概率

Fig. 1 The probability of non flash-heavy-rain samples in the thresholds of physical parameters covering more than 75% of flash-heavy-rain samples

3.2 动力及综合类参数

强降水常发生于深层垂直风切变较弱的环境下(俞小鼎, 2012), 与雷雨大风或强冰雹等强对流天气的差异较大, 但是却与普通雷暴单体产生的降水天气差异不大, 从而也就使得风暴相对螺旋度参数以及 0~6 km 的垂直风矢量差失去了对短时强降水天气的指示作用。但是由于绝大多数的强降水都伴随低空急流(陶诗言, 1980), 结果显示 0~3 km 垂直风矢量差可以作为强降水发生的判据之一。

除此之外, 由于短时强降水天气经常发生在高低空急流相互耦合造成的中小尺度对流系统中, 所以描述低层 850 hPa 风矢与高层 300 hPa 风矢差异大小的通气管参数在短时强降水天气与无高低空急流发展的普通天气中的取值几乎没有差别, 因此对是否发生短时强降水天气并不具有良好的指示意义。

表征 850~500 hPa 大气状态的热力学和动力学参数的组合物理量——瑞士雷暴指数和强天气威

胁指数均可以较好地反映短时强降水天气发生的潜势大小。

3.3 水汽参数

短时强降水虽然是属于强对流天气的一种, 但其对水汽条件的要求比其他强对流天气要高得多。由前面的分析可知, 水汽参数和热力稳定参数在短时强降水样本与非短时强降水样本中的数值分布的交集相较于动力参数及综合类参数要小得多, 可以认为, 水汽参数与热力稳定度参数对短时强降水事件的发生均较动力及综合类参数具有更显著的指示意义。

3.4 其他常用参数

根据预报员的经验, 我们还对 850 和 500 hPa 温差、850 hPa 温度露点差、地面和 925 hPa 露点平均值以及 925 和 850 hPa 平均风速这四个常用的参数进行了计算和分析, 结果显示: 850 和 500 hPa 温差与短时强降水事件的相关系数较小, 只有 -0.02,

指示意义不强,不能选用。对 850 hPa 温度露点差、地面和 925 hPa 露点平均值以及 925 和 850 hPa 平均风速这三个参数来说,其在短时强降水样本与非短时强降水样本中数值分布的交集较大,对短时强降水事件的指示意义也略差些。

综上所述,选择取值区间涵盖 75% 以上短时强降水样本的、非短时强降水样本处于该取值区间的概率小于 45% 的、并且对短时强降水天气有一定指示意义的物理量参数进行重点分析。因此最终选取 16 个物理量参数(整层比湿积分、A 指数、干暖盖指数、潜在下冲气流指数、*Teff* 指数、K 指数、修正 K 指数、沙氏指数、0~3 km 垂直风矢量差、强天气威胁指数、瑞士第二雷暴指数、瑞士第一雷暴指数、700 hPa 比湿、850 hPa 比湿、700 hPa 相对湿度以及 850 hPa 相对湿度)用于建立短时强降水预报模型。

4 建立夏季短时强降水预报模型

4.1 物理量参数的月分布特征

通过端须图可以得到发生短时强降水和未发生短时强降水时各月物理量参数的分布情况。假定各物理量参数的样本呈正态分布,则每个方框的上下底分别表示(准)正态分布两端占该物理量参数样本总数(包括短时强降水样本以及非短时强降水样本)25% 个例的物理量参数值;方框中的黑线表示占样本总数 50% 个例的物理量参数值;从方框上下边延伸出的黑线的端点(*号)分别表示样本的最大和最小值(不包括异常值)(杨贵名等,2005)。

定义各月各物理量参数取值区间涵盖 75% 以上短时强降水样本为必要条件,得到:(1)若非短时强降水样本处于该取值区间的概率小于 25%,则将该物理量参数的取值区间作为该月判断短时强降水事件的指标;(2)若非短时强降水样本处于该取值区间的概率在 25%~50%,则将该物理量参数的取值区间作为该月短时强降水事件发生的有利条件;(3)若非短时强降水样本处于该取值区间的概率大于 50%,则认为该物理量参数对该月的短时强降水事件并无明显指示意义。

4.1.1 热力稳定度参数

6 月热力稳定度参数对短时强降水的发生具有

较好的指示意义(图 2),非短时强降水样本落在涵盖 75% 短时强降水样本取值区间的概率仅为 17.9%,其次是 8 月,为 36.3%,而在 7 月,则达到 43.3%,指示意义较差。其原因在于初夏时的 6 月,冬季风仍能够不时地渗透至江苏地区,使得中低层的热力稳定度参数呈现出过程性的变化,而随着夏季风的增强北抬,冬季风的减弱北缩,7 月以后,江苏逐渐转为被副热带高压控制的盛夏天气,中低层的温度及湿度均明显增大,大气经常处于不稳定的状态下,热力不稳定参数的指示性也明显下降。

因此,将 $IntegralQ \geq 5300 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)、 $A \geq 5^\circ\text{C}$ (图 2b)、 $Ls \leq -43 \text{ K}$ (图 2c)、 $MDPI \leq 1.5 \text{ K}$ (图 2d)、 $K \geq 34^\circ\text{C}$ (图 2f)以及 $mK \geq 41^\circ\text{C}$ (图 2g)作为判断 6 月短时强降水事件的指标, $Teff \leq 38^\circ\text{C}$ (图 2e)以及 $SI \leq 1.2^\circ\text{C}$ (图 2h)作为 6 月短时强降水事件发生的有利条件;将 $A \geq 9^\circ\text{C}$ (图 2b)作为判断 7 月短时强降水事件的指标, $IntegralQ \geq 5400 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)、 $Ls \leq -47 \text{ K}$ (图 2c)、 $Teff \leq 36^\circ\text{C}$ (图 2e)、 $K \geq 34^\circ\text{C}$ (图 2f)以及 $mK \geq 43^\circ\text{C}$ (图 2g)作为 7 月短时强降水事件发生的有利条件,而 $MDPI$ 指数(图 2d)以及 SI 指数(图 2h)对 7 月短时强降水事件无明显指示意义;将 $IntegralQ \geq 5700 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)以及 $A \geq 11^\circ\text{C}$ (图 2b)作为 8 月短时强降水事件的指标, $Ls \leq -47 \text{ K}$ (图 2c)、 $Teff \leq 34^\circ\text{C}$ (图 2e)、 $K \geq 35^\circ\text{C}$ (图 2f)、 $mK \geq 43^\circ\text{C}$ (图 2g)以及 $SI \leq 0^\circ\text{C}$ (图 2h)作为 8 月短时强降水事件发生的有利条件,而 $MDPI$ 指数(图 2d)对 8 月短时强降水事件无明显指示意义。

4.1.2 动力及综合类参数

与热力稳定度参数一样,6 月动力及综合类参数同样对短时强降水的发生具有较好的指示意义(图 3),非短时强降水样本落在涵盖 75% 短时强降水样本取值区间的概率为 20.3%,其次是 8 月,为 42.1%,而在 7 月,则达到 47.8%,指示意义较差。其原因在于动力参数或综合类参数中的动力因子均与中低层的垂直风切变相关,而 6 月中下旬至 8 月,随着夏季风的不断北推,江苏地区的中低层风速自南向北逐渐增大,导致垂直风切变的均值增大,进而使得动力及综合类参数的指示性变差。

因此,将 $SWEAT \geq 240$ (图 3b)、 $SWISS12 \leq 3.3$ (图 3c)以及 $SWISS00 \leq 2.5$ (图 3d)作为判断 6

月短时强降水事件的指标, $\Delta V_{0-3} \geq 8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3a) 作为 6 月短时强降水事件发生的有利条件; 将 $\text{SWEAT} \geq 245$ (图 3b) 以及 $\text{SWISS12} \leq 2.9$ (图 3c) 作为 7 月短时强降水事件发生的有利条件, 而

ΔV_{0-3} (图 3a) 以及 SWISS00 (图 3d) 对 7 月短时强降水事件均无明显指示意义; 将 $\Delta V_{0-3} \geq 6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3a)、 $\text{SWEAT} \geq 230$ (图 3b)、 $\text{SWISS12} \leq 2.7$ (图 3c) 以及 $\text{SWISS00} \leq 1.6$ (图 3d) 作为 8 月短时

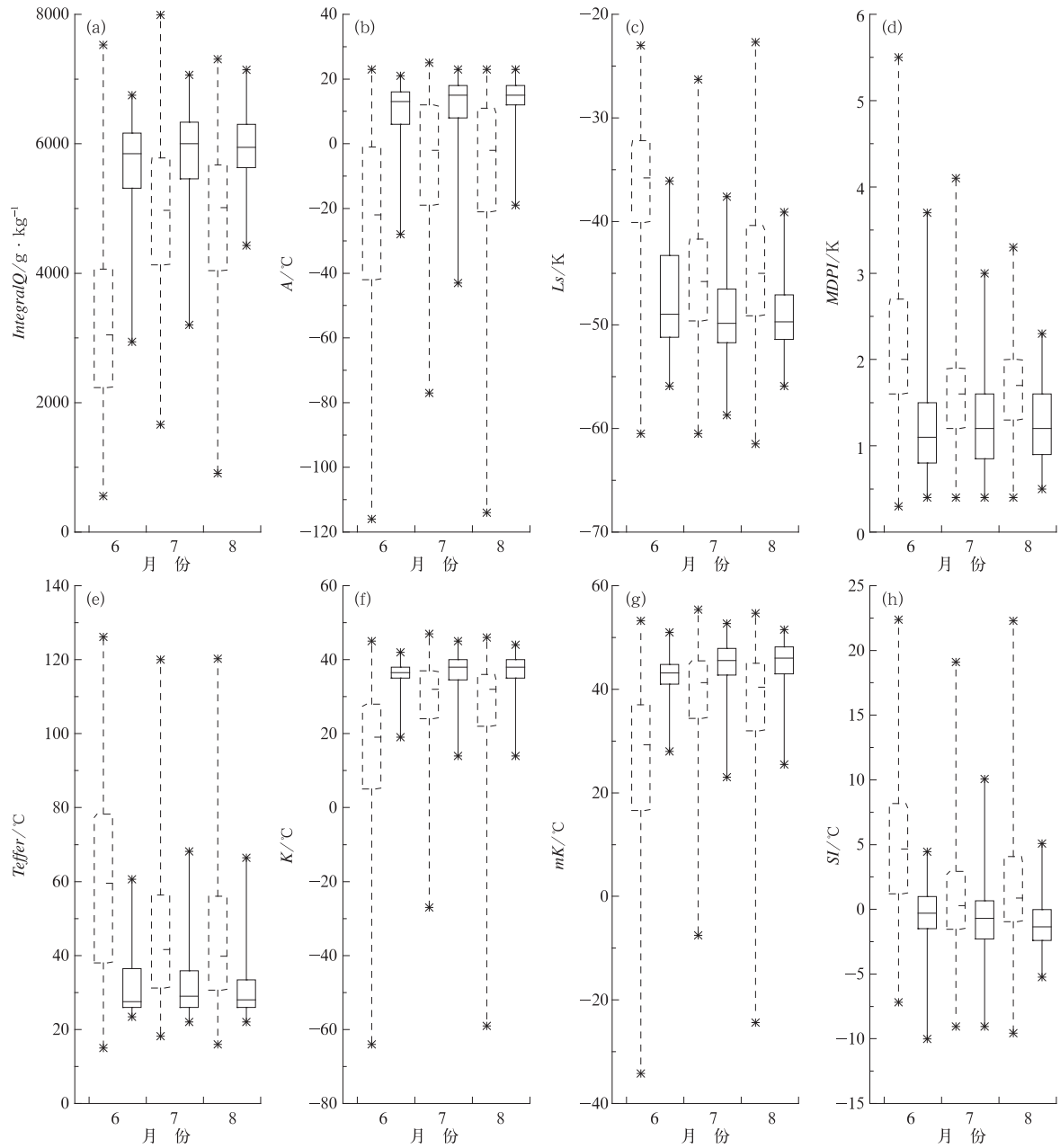


图 2 2004—2013 年 6—8 月热力稳定度参数的端须图

(a) 整层比湿积分, (b) A 指数, (c) 干暖盖指数, (d) 潜在下冲气流指数, (e) *Teffer* 指数,

(f) K 指数, (g) 修正 K 指数, (h) 沙氏指数

(虚线框: 非短时强降水样本; 实线框: 短时强降水样本)

Fig. 2 Box-whisker plots of the thermal stability parameters from June to August 2004–2013
(a) *IntegralQ*, (b) *A* index, (c) dry and warm lid strength, (d) microburst-day potential index,
(e) *Teffer* index, (f) *K* index, (g) modified *K*-index, (h) showalter index
(dashed box: non flash-heavy-rain samples; solid box: flash-heavy-rain samples)

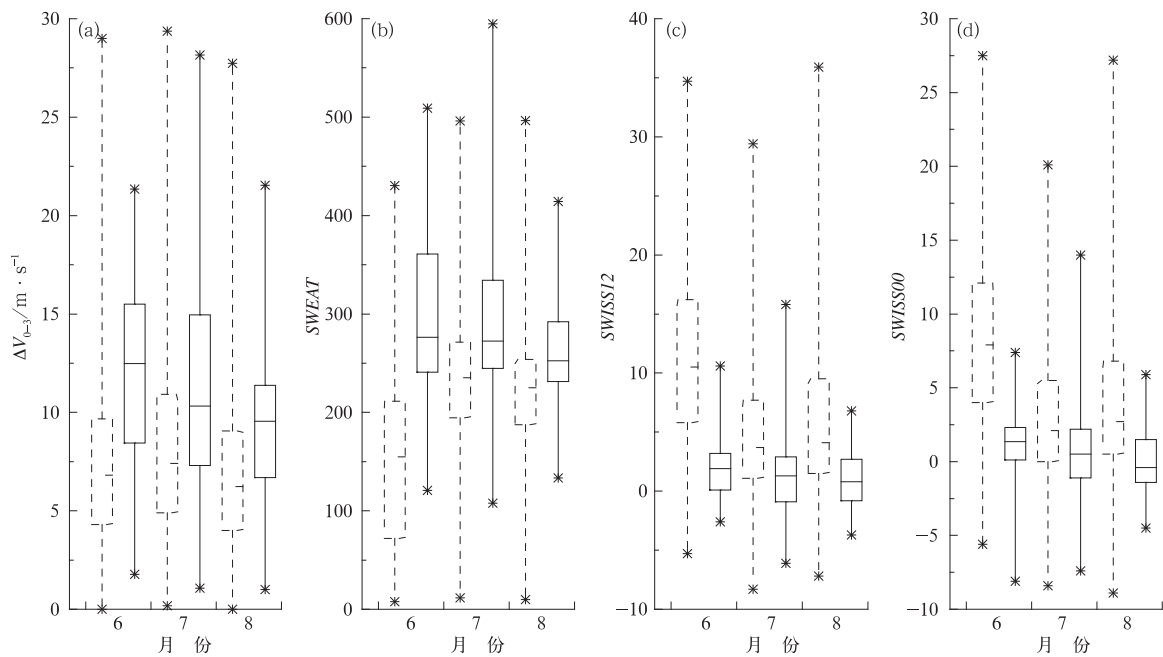


图 3 2004—2013 年 6—8 月动力及综合类参数的端须图

(a)0~3 km 垂直风矢量差, (b)强天气威胁指数, (c)瑞士第二雷暴指数, (d)瑞士第一雷暴指数

(虚线框:非短时强降水样本;实线框:短时强降水样本)

Fig. 3 Box-whisker plots of the dynamic and comprehensive parameters from June to August 2004—2013

(a) vertical wind vector difference of 0~3 km, (b) SWEAT, (c) SWISS00, (d) SWISS12

(dashed box: non flash-heavy-rain samples; solid box: flash-heavy-rain samples)

强降水事件发生的有利条件。

4.1.3 水汽参数

6 月水汽参数对短时强降水事件的指示意义比动力及综合类参数显著,与热力稳定度参数相当(图 4),非短时强降水样本的取值落在涵盖 75%短时强降水样本取值区间的概率为 21.5%,其次是 8 月,为 39.5%,而 7 月,则达到 44.6%,指示意义较差。其原因与热力稳定度参数类似,也是由于春夏交替,夏季风携带大量水汽向北推进,使得水汽参数的均值增大而导致的。

因此,将 $Q_{700} \geq 7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4a)、 $RH_{700} \geq 72\%$ (图 4b)、 $Q_{850} \geq 13.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4c)作为判断 6 月短时强降水事件的指标,将 $RH_{850} \geq 78\%$ (图 4d)作为 6 月短时强降水事件发生的有利条件;将 $Q_{700} \geq 8.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4a)、 $RH_{700} \geq 76\%$ (图 4b)作为 7 月短时强降水事件发生的有利条件,而 850 hPa 的比湿(图 4c)及相对湿度(图 4d)对 7 月短时强降水事件无明显指示意义;将 $Q_{700} \geq 9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4a)、 $RH_{700} \geq 77\%$ (图 4b)以及 $RH_{850} \geq 83\%$ (图 4d)作为 8 月短时强降水事件发

生的有利条件,而 850 hPa 的比湿(图 4c)对 8 月短时强降水事件亦无明显指示意义。

4.2 模型建立

由上述分析可以看出,物理量参数的数值分布及其对短时强降水天气的指示性在不同月份存在较大差异,相较于 7 和 8 月,热力稳定度参数、动力及综合类参数以及水汽参数在 6 月对短时强降水天气的发生具有更好的指示意义。同时,不同类型的物理量对短时强降水天气的指示性也相差较大。一方面,由于短时强降水天气呈现出的是“湿”对流风暴的特征,其形成需要充沛的水汽,而热力不稳定又是对流风暴中上升气流发展的驱动力,这两类参数均是短时强降水发生的必要条件;另一方面,动力及综合类参数大多与垂直风切变相关,而强垂直风切变下强的高空风将冰晶粒子带到云砧处容易造成冰晶蒸发从而降低降水效率(俞小鼎,2012),弱垂直风切变又很难使得风暴有组织的生长。所以,水汽参数与热力稳定度参数对短时强降水事件的发生均较动力及综合类参数具有更显著的指示意义。因而,需

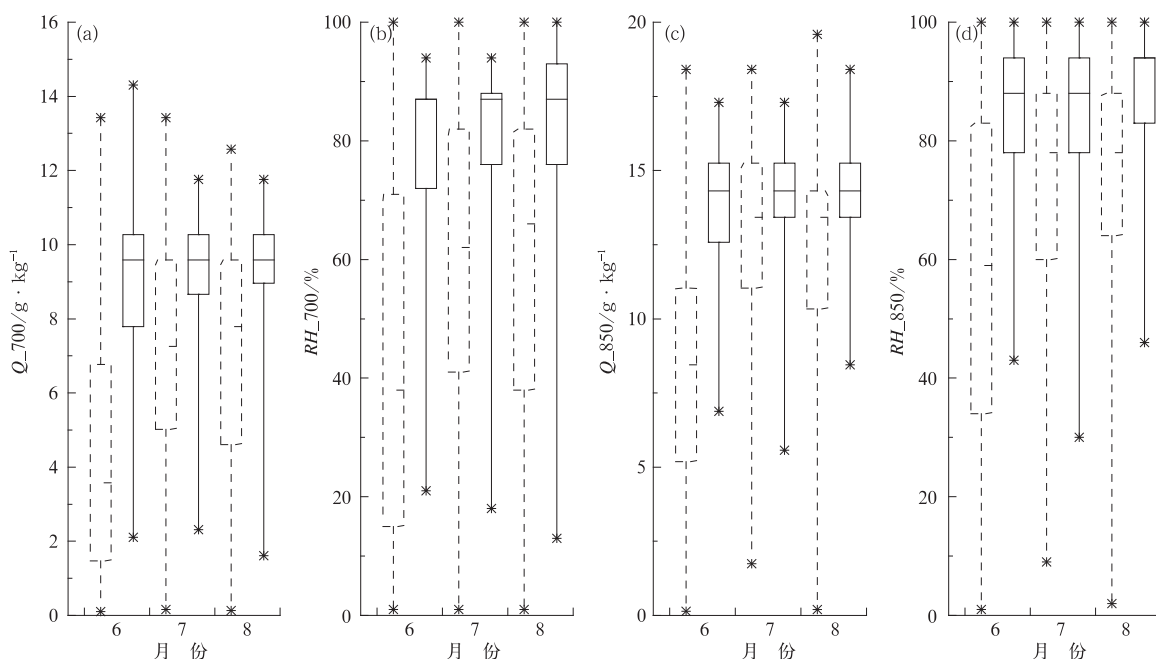


图 4 2004—2013 年 6—8 月水汽参数的端须图

(a) 700 hPa 比湿, (b) 700 hPa 相对湿度, (c) 850 hPa 比湿, (d) 850 hPa 相对湿度
(虚线框:非短时强降水样本;实线框:短时强降水样本)

Fig. 4 Box-whisker plots of the moisture parameters from June to August 2004—2013

(a) 700 hPa specific humidity, (b) 700 hPa relative humidity,
(c) 850 hPa specific humidity, (d) 850 hPa relative humidity
(dashed box: non flash-heavy-rain samples, solid box: flash-heavy-rain samples)

要根据各月各类型物理量参数指示性的不同及其对短时强降水天气的不同判定指标分别建立预报模型。

选取 4.1 节分析的 16 个物理量参数,首先建立各参数的隶属函数。隶属函数值动态范围取 $-1 \sim 2$,正值越大表示短时强降水天气发生的可能性越大,0 表示短时强降水天气发生的可能性为零。因此,在各参数的隶属函数中,将上节分析得到的短时强降水事件指标区间的函数值取为 2,有利条件区间的函数值取为 1,不利条件区间的函数值取为 -1 ,其他区间的函数值取为 0。然后,通过隶属函数将对应的物理量转换到 $[-1, 2]$,得到单个参量对应的短时强降水事件的可能性大小。最后采用加权平均法,得到一个与短时强降水事件可能性大小相对应的组合量,作为预报短时强降水天气发生的指数 S 。

$$S = \frac{\sum w_i f_i(x)}{\sum w_i}$$

式中, $f_i(x)$ 为物理量的隶属函数, w_i 为权重。本文

根据 6—8 月各物理量参数对短时强降水天气指示性的强弱,分别赋予取值范围在 $1 \sim 10$ 的权重。由此得到观测时刻(08 时,20 时,下同)之后 $0 \sim 1$ h、 $2 \sim 3$ h、 $4 \sim 6$ h 出现短时强降水天气以及观测时刻后 $0 \sim 6$ h 内未出现短时强降水天气的指数 S 。

4.3 预报模型拟合率检验

4.3.1 2004—2013 年样本拟合率分析

结果显示(图 5),短时强降水样本 S 值的分布与非短时强降水样本的交集较小,区分度较好,可以认为该模型得到的指数 S 对短时强降水天气的发生具有一定的指示意义。

从观测时刻之后 $0 \sim 1$ h、 $2 \sim 3$ h 以及 $4 \sim 6$ h 发生短时强降水天气的指数 S 的分布来看,其值阈区间几乎一致,并不是距离短时强降水发生时刻越近, S 值就越大。所以,不能利用指数 S 做短时强降水天气发生时间的预报。

分析拟合结果(表 3):6 月,有 96.0% 的样本拟合完全正确,对短时强降水样本拟合的准确率(TS

评分)为 25.0%,其中空报率为 71.7%,漏报率为 31.6%;7 月,有 80.9%的样本拟合完全正确,对短时强降水样本拟合的准确率(TS 评分)为 19.3%,其中空报率为 79.1%,漏报率为 29.5%;8 月,有 90.2%的样本拟合完全正确,对短时强降水样本拟合的准确率(TS 评分)为 19.6%,其中空报率为 76.4%,漏报率为 46.6%。拟合结果显示,由于短时强降水样本数明显偏少,导致模型对短时强降水样本的空报率偏高。

4.3.2 2014 年预报试验评估

使用该模型对 2014 年 6—8 月的短时强降水天气进行预报试验评估,共 385 个样本,其中短时强降水样本 15 个,非短时强降水样本 370 个。检验结果为:有 94.3%的样本预报完全正确,对短时强降水样本预报的准确率(TS 评分)为 26.6%,具体各月情况见表 4。可以看到,各月的预报准确率均在 25%以上,但由于样本较少,拟合结果并不具有普遍的代表性,模型优劣还需要更多的样本来验证。

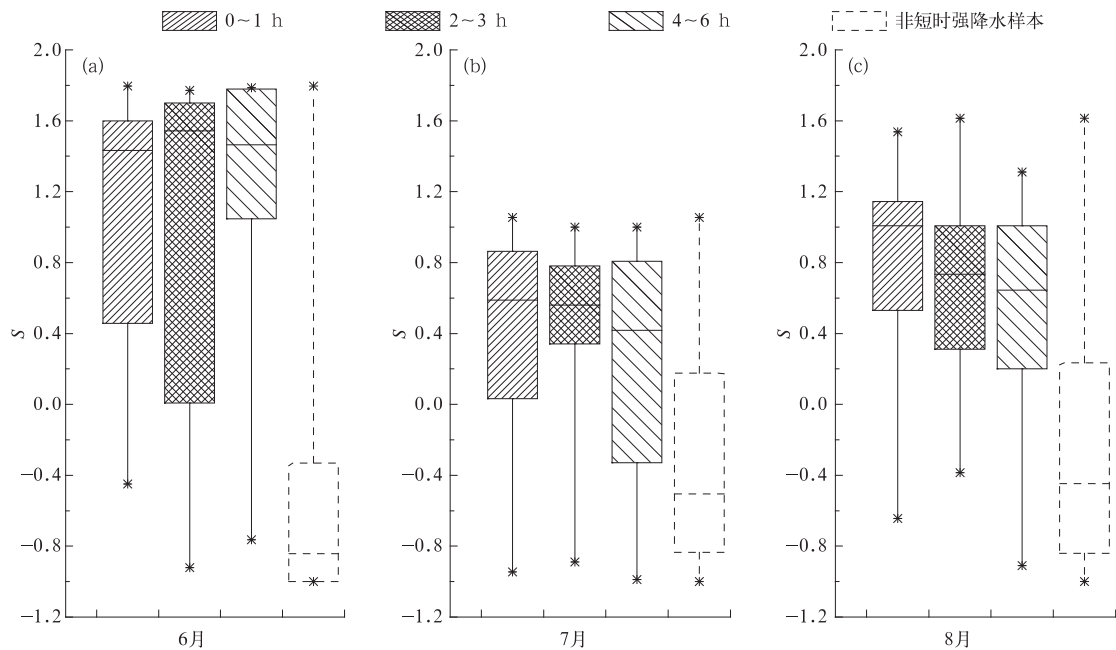


图 5 2004—2013 年 6—8 月(a, b, c)观测时刻后 0~1 h、2~3 h、4~6 h 出现短时强降水天气以及观测时刻后 0~6 h 内未出现短时强降水天气的指数 S 的分布

Fig. 5 Box-whisker plots of the index S of flash heavy rain seen after 0-1 h, 2-3 h, 4-6 h of the observation time and no flash heavy rain after 0-6 h of the observation time from June to August 2004-2013

表 3 预报模型对 2004—2013 年 6—8 月短时强降水样本的拟合情况

Table 3 The fitting test of the flash heavy rain samples based on flash-heavy-rain forecast model from June to August in 2004-2013

	短时强降水样本	非短时强降水样本	S 阈值	正确样本	空报样本	漏报样本	空报率/%	漏报率/%	TS 评分/%
6 月	38	1621	≥ 1.3	26	66	12	71.74	31.58	25.0
7 月	112	1451	≥ 0.3	79	298	33	79.05	29.46	19.3
8 月	73	1610	≥ 0.9	39	126	34	76.36	46.58	19.6

表 4 预报模型对 2014 年 6—8 月短时强降水天气的预报情况

Table 4 The evaluation of forecasting test of flash heavy rain by flash-heavy-rain forecast model from June to August 2014

	短时强降水样本	非短时强降水样本	S 阈值	正确样本	空报样本	漏报样本	空报率/%	漏报率/%	TS 评分/%
6 月	3	132	≥ 1.3	1	1	2	50.00	66.67	25.0
7 月	7	120	≥ 0.3	5	12	2	70.59	28.57	26.3
8 月	5	118	≥ 0.9	2	2	3	50.00	60.00	28.6

5 结 论

(1) 通过计算 51 个物理量参数与短时强降水事件的相关系数,并进行显著性检验,得到 22 个通过 $\alpha < 0.01$ 水平双侧检验、且相关系数 > 0.08 的物理量参数:整层比湿积分、A 指数、干暖盖指数、潜在下冲气流指数、Teff 指数、K 指数、修正 K 指数、沙氏指数、深对流指数、总指数、Charba 总指数、风暴相对螺旋度、0~3 km 垂直风矢量差、0~6 km 垂直风矢量差、通气管参数、强天气威胁指数、瑞士第二雷暴指数、瑞士第一雷暴指数、700 hPa 比湿、850 hPa 比湿、700 hPa 相对湿度以及 850 hPa 相对湿度。

(2) 水汽参数与热力稳定度参数对短时强降水事件的发生均较动力及综合类参数具有更显著的指示意义。相较于 7 和 8 月,热力稳定度参数、动力及综合类参数以及水汽参数在 6 月对短时强降水天气的发生具有更好的指示意义。

(3) 通过分析 22 个物理量参数在短时强降水样本和非短时强降水样本中的值域分布特征,最终选取了 16 个物理量参数。利用端须图的方法,得到物理量参数在各月短时强降水事件中的阈值并将其作为判定指标,采用隶属函数转换法,建立了江苏夏季短时强降水预报模型。

(4) 按照灾害性天气评分标准,对 2014 年 6—8 月观测时刻后 0~6 h 内的短时强降水天气进行拟合率检验,以省辖市为区域,TS 评分为 25.0%~28.6%。

参 考 文 献

陈秋萍,冯晋勤,李白良,等. 2010. 福建强天气短时潜势预报方法研究. 气象, 36(2): 28-32.

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.

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. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 32(1): 156-165.

冯民学,周俊驰,曾明剑,等. 2012. 基于对流参数的洋口港地区雷暴预报方法研究. 气象, 38(12): 1515-1522.

郝莹,姚叶青,陈焱,等. 2007. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究. 气象, 33(1): 51-56.

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等. 2012. 短时强降水的多尺度分析及临近预警. 气象, 38(8): 903-912.

雷蕾,孙继松,王国荣,等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 70(4): 752-765.

李佰平,戴建华,张欣,等. 2016. 三类强对流天气临近预报的模糊检验试验与对比. 气象, 42(2): 129-143.

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. 气象学报, 73(3): 459-470.

李耀东,刘健文,高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 62(4): 401-409.

刘玉玲. 2003. 对流参数在强对流天气潜势预测中的作用. 气象科技, 31(3): 147-151.

牛金龙,黄楚惠,李国平,等. 2015. 基于高分辨率资料的湿螺旋度指标及其对成都强降水的预报应用. 高原气象, 34(4): 942-949.

庞古乾,伍志方,叶爱芬,等. 2012. 珠三角地区前后汛期强对流过程物理量指数对比分析及阈值选取. 热带气象学报, 28(6): 919-923.

仇娟娟,何立富. 2013. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析. 气象, 39(5): 577-584.

孙继松,陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. 气象, 38(2): 164-173.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社.

杨贵名,宗志平,马学款. 2005. “方框_端须图”及其应用示例. 气象, 31(3): 53-55.

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.

曾明剑,王桂臣,吴海英,等. 2015a. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究. 气象学报, 73(5): 868-882.

曾明剑,张备,吴海英,等. 2015b. 基于接近度概念的强对流天气预报方法研究. 高原气象, 34(5): 1357-1368.

郑栋,张义军,吕伟涛,等. 2005. 大气不稳定性参数与闪电活动的预报. 高原气象, 24(2): 196-203.

周后福,邱明燕,张爱民,等. 2006. 基于稳定性和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析. 高原气象, 25(4): 716-722.