

文章编号:1673-8411 (2014) 03-0015-06

广西雷暴天气预报指标研究

梁维亮, 屈梅芳, 赖珍权, 翟丽萍
(广西气象台, 广西 南宁 530022)

摘 要:利用 2003~2012 年的地面填图和探空资料,统计常用对流参数满足指定阈值条件时广西 6 个探空站出现雷暴天气的概率(简称“雷暴概率”)。统计结果表明:整层比湿积分(IQ)、K 指数(KI)和抬升指数(LI)与雷暴概率有显著的线性关系,当 IQ、KI 增大,或 LI 减小时,雷暴概率增大。对流有效位能(CAPE)在 0~200J·kg⁻¹ 之间增长时雷暴概率迅速增大,但超过 200J·kg⁻¹ 后雷暴概率增大不明显。根据统计结果,选取 IQ、KI 和 LI 作为预报因子,CAPE 作为消空因子,定义了一个适用于广西雷暴天气的经验预报指标。用 2013 年资料做试报检验,结果表明该指标对 6 小时内的雷暴天气有较好的预报能力。

关键词:雷暴天气;IQ;KI;LI;CAPE;经验预报指标

中图分类号:P457.6 **文献标识码:**A

Research on the Forecasting Index for
the Thunderstorms in Guangxi
Liang Wei-liang, Qu Mei-fang, Lai Zhen-quan, Zhai Li-ping
(Guangxi Meteorological Observation, Nanning, 530022)

Abstract: Based on the surface and sounding data from 2003 to 2012, the thunderstorms probability (TP) in the 6 sounding stations of Guangxi were calculated under the index within the given range. The result showed that the Integral (IQ), KI and MDPI had significant linear correlation. When IQ, KI increased or MDPI decreased, TP increased. TP greatly increased when CAPE increased from 0 to 200J·kg⁻¹, but TP slowly increased when CAPE was larger than 200 J·kg⁻¹. According to the statistical results, an experiential forecasting index was defined by comprising IQ, KI, MDPI as forecast factors and CAPE as negative factor. The examination which used the data of 2013 proved that the experiential forecasting index was effective and practical.

Key Words: Thunderstorms; IQ; KI; MDPI; CAPE; Experiential Forecasting Index

广西是对流天气多发的地区。强烈发展的对流系统造成的冰雹、大风、强降水给生命和财产安全造成重大的威胁,雷暴也经常造成人员的伤亡和电子设备的损坏,造成的经济损失不可估量^[1-3]。因此研究雷暴天气潜势的预报方法,对于预报评估雷暴天气,乃至其强烈发展的阶段——强对流天气可能引

发的风险,提前做好预警和防御工作,具有非常重要的意义。

雷暴天气具有尺度小、发展移动速度快的特点,利用传统的天气学方法所做的雷暴天气预报的精细化程度已经不能满足当前的需求。近年来,有关雷暴天气预报方法有很多研究成果,综合利用物理量指

收稿日期:2014-05-16
资助项目:广西自然科学基金项目:2012GXNSFAA053191; 广西自然科学基金项目:2013GXNSFAA019288; 广西自然科学基金项目:2014GXNSFAA118290。
作者简介:梁维亮(1983-),工程师,硕士,从事灾害性天气预报和研究工作。

数进行潜势预报就是重要方法之一。沙氏指数、K 指数、对流有效位能是天气预报业务中常用的物理量指数,在对锋面暴雨、台风和短时强降水、大风、冰雹等强对流天气的诊断和预报工作中发挥了重要作用^[4-19]。郝莹等^[20]、郑婧等^[21]、湛志刚等^[22]综合运用各种对流参数,建立了雷暴天气潜势预报的方法,取得了较好的预报效果。

本文通过统计和分析雷暴天气和对流参数的相关关系,选取雷暴天气的预报因子,定义适用于广西雷暴天气的经验预报指标。

1 资料

本文所用资料为 2003~2013 年的地面填图和探空资料,地面填图时间间隔 3 小时,探空资料时间间隔 12 小时。其中 2003~2012 年 10a 的资料用于统计分析,2013 年的资料用于样本检验。对流参数值基于探空资料,利用 MICAPS3.1 系统输出。

2 研究方法

首先,将地面观测到的雷暴天气与探空资料对应起来是研究两者关系的前提。但是要求雷暴天气与探空施放时间、空间完全一致是不可能的。Darkow 提出过较严格定义:探空施放地点距离对流天气发生地点不超过 80km,对流天气在探空气球释放前后的 105 分钟内出现。如此严格的定义在实际业务中难以实行。本文结合广西的实际情况将上述定义扩展为:探空站与雷暴天气发生地点的距离不超过 100km,雷暴天气出现在探空气球施放时间前后 6 小时内。

判断探空站在气球施放时刻是否出现雷暴天气的具体方法为:在探空施放前后各 6 小时时段内,与探空站距离小于 100km 的地面观测站在地面填图的现在天气或过去天气中只要有一个有雷电天气记录的,均视为该探空站在气球施放时刻出现了雷暴天气。这样就将雷暴天气与探空资料对应起来,同时也将雷暴天气和对流参数对应起来。

地面观测和对流参数取得对应后,统计对流参数满足指定阈值条件的总次数 m ,以及在满足该阈值条件的前提下出现雷暴天气的次数 n ,则此时雷暴概率为 n/m 。雷暴概率表示在对流参数满足阈值条件下距离探空站 100km 的范围内出现雷暴天气的可能性。

通过对 2003~2012 年资料的统计分析,根据雷

暴概率随对流参数值的变化规律挑选出对雷暴天气指示作用较好的参数进行适当组合,定义一个综合的雷暴天气经验预报指标。用 2013 年资料对广西雷暴天气做试报,通过临界成功指数 (CSI)、命中率 (POD) 和虚警率 (FAR) 等指标来检验和评估经验预报指标的实际效果。

3 统计结果分析

雷暴天气的发生要求充足的水汽、不稳定层结和抬升机制等三个基本条件,加强时还需要有较强的垂直风切变条件。目前对流参数大多是考虑以上一个或多个条件来定义,从不同角度反映雷暴天气潜势。

常用的对流参数可以根据定义分为几类:大气温湿类参数,用来表示大气中水汽的多少,如整层比湿积分 (IQ);热力综合参数,反映大气的温湿状态,如 K 指数 (KI)、总指数 (TT);层结稳定度类参数,用来表示大气层结是否稳定,如沙氏指数 (SI)、抬升指数 (LI);动力类参数,如最大上升速度 (W_m);另外还有能量类参数,表示不稳定能量的大小,如对流有效位能 (CAPE)、粗理查逊数 (BRN)。

通过对比上述对流参数在不同阈值条件下的雷暴概率,发现 IQ、KI 和 LI 与雷暴概率的有显著的线性关系(通过显著水平 0.05 的显著性检验),在同类参数中对雷暴天气的指示作用最好。能量类参数 CAPE 的特征虽然与前三者不同,但也对雷暴天气有特殊的指示作用。为方便分析,当雷暴概率小于 25% 时称为雷暴不易出现,25%~50% 时称为雷暴可能出现,50%~75% 时称为雷暴容易出现,75% 以上时称为雷暴极易出现。

3.1 整层比湿积分 (IQ)

整层比湿积分指的是从地面到大气层顶的比湿的积分:

$$IQ = \int_{p_0}^0 q \cdot dp$$

其中 q 为比湿, p 为气压, p_0 为地面气压。在指层上的比湿越大则 IQ 越大,因此 IQ 直观反映了气柱中的水汽总量。

随着 IQ 的增大,雷暴概率持续增大(图 1a)。当 $IQ \leq 4500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时雷暴天气不易出现,在 4500~5500 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间可能出现,在 5500~6000 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间容易出现,6000 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上则极易出现 ($IQ > 7000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本数少,统计结果的代表性较差)。不同探空站的

雷暴概率有一定差异,地处桂西的南宁、百色在 $IQ > 4000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时就可能出现雷暴天气,而南宁站只要 $IQ > 4500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 就容易出现雷暴天气, $IQ > 5500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 就极易出现雷暴天气。

3.2 K 指数(KI)

KI 是反映垂直温度递减率和低层水汽含量的热力综合参数,定义为:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$$

其中 T 和 T_d 分别表示温度和露点温度,下标表示等压面(hPa)。KI 定义中的物理意义简单明确:等式右边三项分别表示温度垂直递减率、低层的水汽条件和中层的饱和程度。KI 反映的是 850~500hPa 之间的层结状态,除了比较特殊的高架雷暴,或海拔较高的地区以外,在大多数情况下 KI 是适用的。

总体上 KI 越大则雷暴概率越大。KI $\leq 30^\circ\text{C}$ 时不易出现雷暴天气,在 $32 \sim 36^\circ\text{C}$ 之间为可能出现,在 $36 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间为容易出现, $KI > 40^\circ\text{C}$ 时为极易出现(图 1b)。在 KI 相同时,桂西和桂南的雷暴概率大于桂东和桂北。百色、北海、南宁在 $K > 30^\circ\text{C}$ 时已经可能有雷暴天气;北海、南宁只要 $K > 34^\circ\text{C}$ 时就容易出现雷暴天气, $K > 38^\circ\text{C}$ 时极易出现雷暴天气。

3.3 抬升指数(LI)

LI 是层结稳定度参数,表达式为:

$$LI = T_{500} - T_s$$

其中 T_{500} 是 500hPa 的环境温度, T_s 为气块从修正的低层 3000 英尺高度开始干绝热抬升,饱和后再湿绝热抬升到 500hPa 时的温度。

LI 越小,雷暴概率越大。雷暴天气在 $LI > 1^\circ\text{C}$ 时不易出现,在 $-2 \sim -1^\circ\text{C}$ 之间时可能出现, $LI \leq -2^\circ\text{C}$ 时容易出现(图 1c)。当 LI 相同时,南宁、桂林的雷暴概率相对较大,北海的雷暴概率相对较小。

3.4 对流有效位能(CAPE)

CAPE 是基于气块理论定义的能量类参数,反映出气块在环境浮力作用下的上升运动所能达到的强度,这种能量是有利于对流发展的。其计算方法为:

$$CAPE = \int_{PEL}^{PLFC} R_d (T_{vp} - T_{ve}) \cdot d \ln p$$

其中 R_d 为气体常数, T_{vp} 和 T_{ve} 分别为气块和环境的虚温, P_{LFC} 和 P_{EL} 分别为自由对流高度和平衡高度上的气压。

当 $CAPE \leq 100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,雷暴概率最大仅为 11.9%(桂林),不易出现雷暴。当 $CAPE > 200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,

各站雷暴概率均超过 25%,个别站超过了 50%。但是随着 CAPE 继续增大,雷暴概率增大的幅度变小,并且有上下波动,即使在 $CAPE > 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,雷暴概率也只是在 51%~76% 的范围(图 1d)。在没有对流发生时 CAPE 是没有实际意义的,CAPE 只有在有释放机制时才能够反映对流的初始阶段的一些特征,要达到强对流还需要有不稳定能量的输送。说明 CAPE 在雷暴天气出现之前并不能对其产生影响,因此不能明确指示雷暴天气是否发生。但是从相反的角度来看,在 CAPE 接近为 0 时雷暴概率很低,实际上 $CAPE = 0$ 时广西 6 个站的雷暴概率平均仅为 5.7%,所以较小的 CAPE 指示无雷暴天气的作用是明显的,可以作为雷暴天气预报的消空因子。

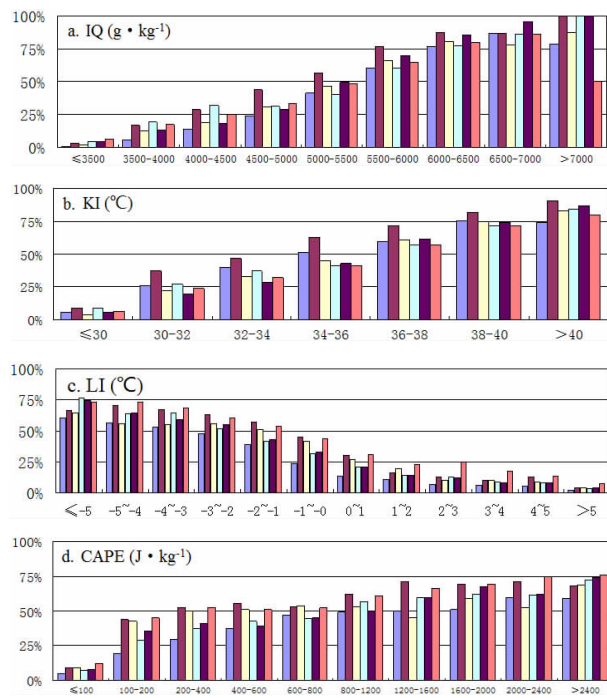


图 1 对流参数在不同阈值条件下的雷暴概率

4 经验预报指标

4.1 指标的定义

雷暴天气的发生要求水汽条件、层结条件、抬升条件这三个基本条件都同时具备,一个完整的预报指标应该同时包含三个方面的信息,但是目前对流参数都是诊断水汽和稳定度条件的,表示当前温、湿状态下的雷暴天气潜势。这是因为抬升条件由中尺度系统提供,难以用常规的高空观测值来定义相关参数^[23]。鉴于此,短期预报时可以用一个综合的指标来诊断雷暴天气的潜势,再通过自动站、雷达等非常

规资料进行短时临近的监测和预警。

IQ、KI、LI 在正常的取值区间内分别与雷暴概率有显著的线性关系,根据“配料法”思想和线性叠加原理,可以将三者线性相加作为雷暴天气的一个综合指标,并且考虑 CAPE 特殊指示作用将其作为消空因子。由于前三者本身的量级不同,变化值的量级也不同,因此相加前要统一量级才能在综合指标中平等地反映这三个参数变化时对雷暴天气中所产生的影响。于是定义经验预报指标:

$$I=IQ/100+KI-10LI \tag{1}$$

IQ 和 KI 的值越大、或 LI 的值越小则 I 越大,越有利于雷暴天气发生,所以指标 I 代表的是水汽和不稳定条件综合影响下的雷暴天气潜势。

4.2 预报阈值的确定

评价预报效果常用的指标为临界成功指数(CSI)、命中率(POD)和虚警率(FAR),计算方法为^[24]:

CSI=正确次数/(正确次数+空报次数+漏报次数)

POD=正确次数/(正确次数+漏报次数)

FAR=空报次数/(正确次数+空报次数)

CSI、POD 越高、或 FAR 越低,则预报效果越好。

首先用 CAPE 进行消空,当 CAPE=0 时均预报无雷暴天气,然后根据(1)式对 2003~2012 年的资料进行拟合,设预报阈值为 a,当 $I \geq a$ 时预报有雷暴天气,当 $I < a$ 时预报无雷暴天气。

连续改变阈值 a,通过比较对应的 CSI、POD、FAR 来确定最优的预报阈值。从图 2 可以看到,CSI 表现为单峰值的特征,不同站点达到峰值的阈值 a 有差异。各站 CSI 峰值均在 50%左右,桂南比桂北高,主要原因是桂北站点漏报较多。阈值为 40 时北海站漏报 110 次,而桂林站漏报多达 468 次,说明在 I 值很小(即各种条件都较为不利)的情况下桂北仍会有较多的雷暴天气发生,原因可能与桂北的地形条件和影响系统都更复杂有关。对比未经过 CAPE 消空的预报指标,当 I 值较小时 FAR 有所减小,CSI 有所提高,说明此时用 CAPE 消空能有效减少空报次数;而当 I 值较大时消空的效果不明显。

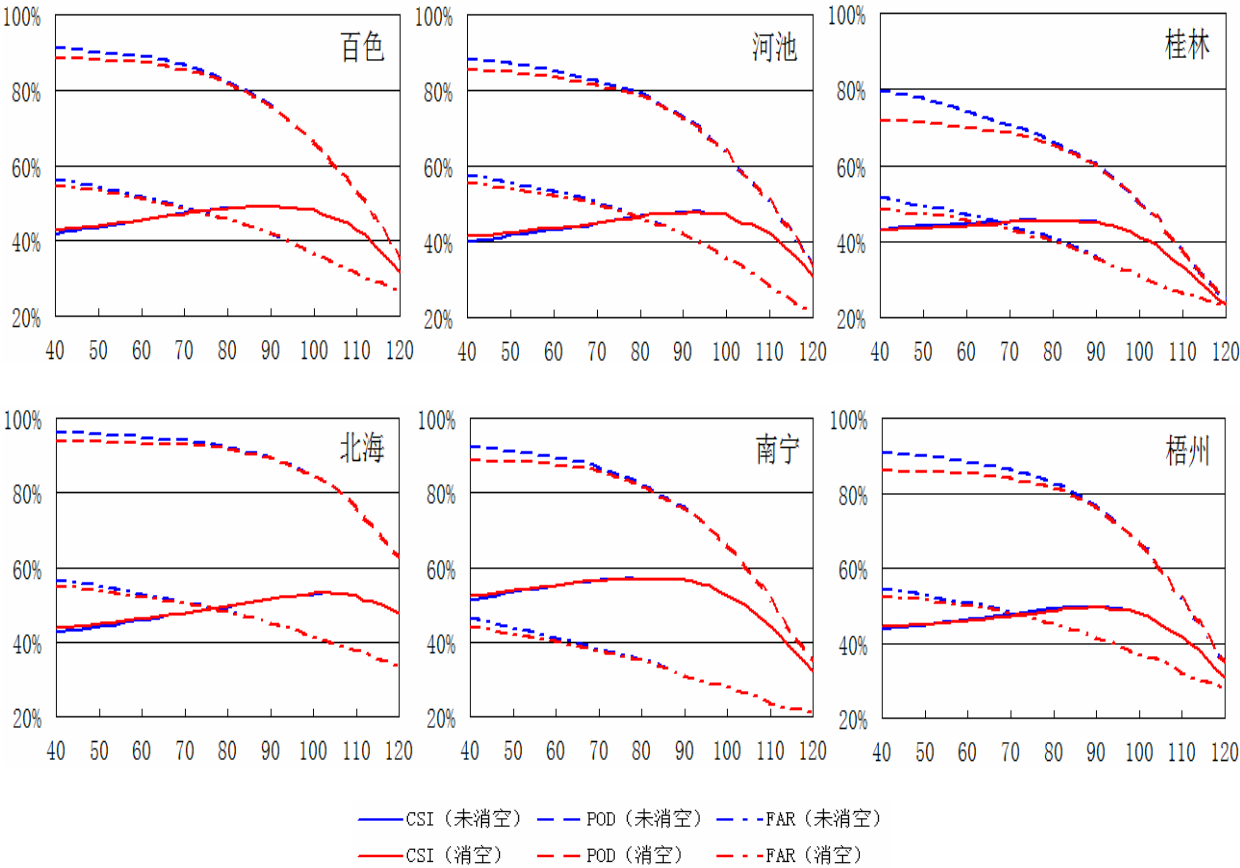


图 2 不同阈值对应的 CSI、POD 和 FAR

CSI 是业务中评价预报质量的最重要的一个指标,而且要求有一个阈值能够同时满足 POD 最大和 FAR 最小显然是做不到的。因此确定预报阈值时选择 CSI 作为首要的参考指标。这里选取 CSI 最大时的 a 值作为预报阈值,确定各站的预报阈值如表 1, 而此时的 CSI 可以看作预报质量的预期。

表 1 最大 CSI 和对应的预报阈值

	北海	南宁	梧州	百色	河池	桂林
最大 CSI(%)	53.1	56.8	49.5	49.0	47.9	45.4
预报阈值	104	80	92	88	92	80

4.3 试报检验

用 2013 年的资料作为样本对经验预报指标进行试报检验。将样本用 CAPE 进行消空后根据表 1 中预报阈值对各站雷暴天气做试报,I 大于该阈值的预报有雷暴天气,I 小于该阈值的预报无雷暴天气。试报效果总体较好(表 2),南宁、百色、桂林的 CSI 高于预期,其中南宁的 CSI 达到 62.9%,比预期提高了 6.1%;北海、梧州、河池的 CSI 低于预期,与预期的差距分为 1.8%、1.4%、3.2%。从试报的 CSI、POD 和 FAR 综合评估,经验预报指标 I 对 2013 年雷暴天气的预报效果与预期偏差不大,是满足雷暴预报质量评分要求的,对雷暴预报业务有较好的指导作用。

表 2 2013 年试报结果

	北海	南宁	梧州	百色	河池	桂林
实况/预报(次)	203/248	238/262	189/230	191/261	174/212	174/201
正确/空报/漏报(次)	153/95/50	193/69/45	136/94/53	152/109/39	119/93/55	120/81/54
CSI/ POD/ FAR (%)	51.3/73.4/38.3	62.9/81.1/26.3	48.1/72.0/40.9	50.7/79.6/41.8	44.7/68.4/43.9	47.1/69.0/40.3

5 结论

通过统计特定阈值条件下的雷暴概率,发现 IQ、KI 增大或 LI 减小时雷暴概率增加,且三者分别与雷暴概率有显著的线性关系,可用于建立经验预报指标。CAPE=0 时雷暴概率很小,指示无雷暴天气的作用明显,可以作为消空因子。

用 IQ、KI、LI 和 CAPE 定义了经验预报指标 I, 并确定了广西各站的预报阈值。对 2013 年广西的雷暴天气进行试报检验,结果表明 I 的预报效果较好,达到了预报质量评分要求,可以应用于 6 小时短时预报业务。

参考文献:

[1] 刘献耀, 许爱华, 刘芳.江西省春夏季强对流天气气候特征 [J]. 气象与减灾研究, 2009, 32 (4): 50-56.

[2] 简海燕, 龚乃弘, 张秋跃.宜春地区主要气象灾害分布规律及成因分析 [J]. 气象与减灾研究, 2011, 34 (3): 57-63.

[3] 缪霄龙, 缪启龙, 宋健, 等.杭州地区雷雨大风灾害风险区划 [J]. 气象与减灾研究.2012, 35 (3): 45-50.

[4] 欧徽宁, 梁珊珊, 杨胜才.2013 年广西一次前汛期暴雨过程分析 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (4): 14-17.

[5] 黄远盼, 宁玉梅, 莫家尧.广西前汛期两次暴雨天气过程对比分析 [J]. 气象研究与应用, 2014, 35 (1):

12-16, 35.

[6] 朱星球, 王咏青.2010 年冬季江西两次暴雨过程的环境场分析 [J]. 气象与减灾研究, 2011, 34 (4): 30-36.

[7] 杨婷, 苗春生, 唐振飞.江西 “6.19” 特大暴雨天气过程诊断分析 [J]. 气象与减灾研究.2010, 33 (3): 34-41.

[8] 张娟娟, 刘波.2013 年 6 月 26-29 日江西梅雨锋暴雨天气过程分析 [J]. 气象与减灾研究.2014, 37 (1): 55-60.

[9] 张劲梅, 莫伟强, 鄢俊一.西南季风爆发背景下东莞两轮强降水的特征分析 [J]. 广东气象, 2014, 36 (1): 38-42, 46.

[10] 周芳, 陈翔翔, 郭达烽, 等.台风 “海葵” (2012) 造成的景德镇特大暴雨过程分析 [J]. 气象与减灾研究, 2013, 36 (3): 35-42.

[11] 郭达烽, 包慧濛, 郑劲光, 等.台风 “潭美” (2013) 影响江西期间的路径和降水诊断分析 [J]. 气象与减灾研究, 2010, 33 (1): 31-39.

[12] 程正泉, 林良勋, 沙天阳, 等. “尤特” 强降水过程大气层结分析 [J]. 广东气象, 2013, 35 (6): 1-16.

[13] 莫伟强, 鄢俊一, 张劲梅.东莞连日 3 次强对流前期的差异分析 [J]. 广东气象, 2013, 35 (4): 29-33.

[14] 伍秀莲.桂林初夏时节的雷电场特征及潜势预报 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (2): 84-86.

[15] 张凌云, 刘蕾, 李亚琴, 等.柳州 “2012.4.12” 强对流天气过程分析 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (3): 22-25.

(下转第 57 页)

.....
(上接第 19 页)

- [16] 于爱兵, 苗春生, 王坚红. 2009 年 6 月河南一次飚线过程的成因分析 [J]. 气象与减灾研究, 2010, 33 (1): 31-39.
- [17] 黄远盼, 梁珊珊. 贺州市一次致灾冰雹天气过程诊断分析 [J]. 气象研究与应用, 2012, 33 (2): 19-22.
- [18] 王海恒, 朱永兵, 叶永恒, 等. 韶关市区一次罕见大冰雹灾害性天气过程分析 [J]. 广东气象, 2013, 35 (3): 12-19.
- [19] 曾数军, 荣利香, 杨亚钦, 等. 4.12 花都冰雹天气过程分析 [J]. 广东气象, 2013, 35 (6): 23-27.
- [20] 郝莹, 姚叶青, 陈焱, 等. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究 [J]. 气象, 2007, 33 (1): 51-56.
- [21] 郑婧, 许爱华, 应冬梅, 等. 江西夏季雷电天气热力条件及不稳定指数对比分析 [J]. 气象与减灾研究, 2009, 32 (2): 27-32.
- [22] 谌志刚, 王婷, 汪瑛, 等. 广东省后汛期强对流天气潜势预报方法研究 [J]. 气象, 2011, 37 (8): 936-942.
- [23] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论 [J]. 气象, 2014, 40 (4): 389-399.
- [24] 徐文文, 陈申鹏, 李晴岚. 2012 年前汛期降水 EC 与 HAPS 数值模式检验 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (3): 14-16.