

基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究

农孟松^{1,2} 祁丽燕² 黄明策² 曾小团²

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044; 2. 广西气象台)

提 要: 利用常规观测资料,在对广西4个区域冰雹气候特征分析的基础上,对造成冰雹的环流形势分为华北低槽型、高原东部低槽型和南支槽型。检索出数值预报产品有物理意义的预报因子,采取判别分析法和指标叠套法制作广西冰雹的潜势预报。结果表明,指标叠套法优于判别分析法。基于数值模式输出场的参数估计,对于不同参数设置、不同阈值范围来制作广西冰雹落区的概率预报试验,过程预报有一定效果,但落区预报方法还有待于进一步改进。

关键词: 冰雹 环流分型 潜势预报 参数估计 阈值 概率预报

Research on Hail Potential Forecast Happened in Guangxi Based on Circulation Classification

Nong Mengsong^{1,2} Qi Liyan² Huang Mingce² Zeng Xiaotuan²

(1. School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2. Guangxi Meteorological Observatory)

Abstract: By using routine observation data, the climate characteristics of the hail in four areas of Guangxi are analyzed. The circulation patterns that causes hail are classified to be three kinds: Huabei trough, east plateau trough, south branch trough. By searching the forecast factors with physics meaning from numerical forecast products, the potential forecast of hail is produced by using the discriminate analytical method and index accumulating method. The results show that the index accumulating method is better than the discriminate analytical method. Based on the parameter estimation of numerical model output fields, different thresholds for different parameters are set up to produce the probability forecast of the falling area for the hail happened in Guangxi. Process forecast has some effect while the falling area forecast needs to be improved.

Key Words: hail circulation classification potential forecast parameter estimation threshold probability forecast

引 言

广西地处低纬地区,春季冷暖空气交汇频繁,冰雹是主要灾害性天气之一。冰雹是一种中小尺度系统,具有很强的局地性,是在一定的环流背景下,在不稳定层结、触发机制和云物理机制等有利的条件下产生,预报难度较大^[1]。多年来,国内外许多专家致力于冰雹预报方法的研究,通过寻找与云中能够降雹的种种相关因素,建立天气形势预报、物理量参数预报和相关统计预报等方法^[2-4]。通过大量的观测研究,特别是数值模拟方法的广泛使用,人们对强对流天气发生的物理机制有了更为深入的了解,并在业务预报中引入了许多新的物理参数^[5-7]。但大量研究中对造成冰雹天气的环流形势分型之后再行潜势预报,在此基础上根据物理参数估计进行的概率预报的研究甚少。本文通过对 1976—2006 年共 31 年春季(2—5 月)广西出现的 70 次区域性冰雹过程环流形势场分型和对冰雹天气有指示意义的物理量场分析,研究广西区域性冰雹天气潜势预报方法,在业务试验预报中取得了一定的效果。

1 定义和资料

本文使用 1976—2006 年广西 89 站地面观测资料,1990 年至今的高空观测资料、1986 年至今的 ECMWF 的分析场、24 小时预报场和基本要素场计算后的物理量场资料。

把广西区分成 4 个区域,分别为:桂东南、桂东北、桂西南和桂西北,每个区域出现日冰雹数 ≥ 2 个站,即视为该个区域出现一次冰雹天气过程。经统计后,1976—2006 年春季(2—5 月)共 31 年间,达到过程的次数:桂东南 7 次、桂东北 20 次、桂西南 16 次和桂

西北 27 次,其中桂西北出现的次数最多。

2 环流分型和预报因子的选取

2.1 环流分型

冰雹天气过程主要是冷、暖空气在广西一带交绥的结果,但引起冰雹天气的环流形势是不完全相同的,根据冰雹发生前 24 小时的基本特征,概括为 3 种类型的环流形势。

第一类为华北低槽型(如图 1a)。500hPa 华北、河套有较强的冷温槽东移,槽底南伸到贵州北部、云南北部一带,槽后有宽广的西北气流控制,温度槽和高度槽基本同步,广西受槽前西南气流控制;850hPa 在华北东部、贵州中部到广西西部有冷式切变线;地面在河套附近有冷高压,其中心与桂林的气压差 5~6hPa,冷锋位置与 850hPa 切变线相似,冷空气从中路南下影响广西。这类冰雹落区主要出现在桂北。

第二类为高原东部低槽型(如图 1b)。500hPa 高空中、低纬度地区出现强的经向环流,在亚洲中、低纬度地区为明显的两脊一槽形势,低槽位于高原东部,槽后经向环流较大,高原东部有较深厚的冷温槽东移,有时出现冷温槽明显落后于高度槽的特征,槽后有正变高和负变温,槽前负变高和正变温,这种变高、变温的配置有利于低槽在东移过程中进一步发展加强。地面西南暖低压发展旺盛,中心气压 ≤ 1000 hPa,广西大部地区出现干热天气,下午气温上升到 30~33℃,个别站高达 36℃,云南西部和黔西南部分地区出现 5~7 级的西南大风,西南暖低压在东移的过程中有时发展演变成江淮气旋,冷空气从西路到中路南下,暖低压后部的干冷空气快速南侵影响广西,是冰雹天气发生的主要触发机制之一。此类冰雹落区主要出现在桂北和桂西。

第三类为南支槽型(如图 1c)。南支槽位

于 30°N 以南, 90°E 附近, 槽比较宽, 温度槽前倾, 高原南部、云南、广西西部有负变温, 新疆到西北地区东部为槽区, 其所在的位置比南支槽偏东, 槽后有明显的西北气流, 河套到江南北部为暖脊。850hPa 高原南部到云贵川为暖低压环流控制, 温度锋区位于长江流域到湖南南部一带, 并有偏南气流和偏东气流的暖式切变存在, 华北为冷高压控制。地面图上, 西南地区为暖低压控制, 冷高压位于华北到东北, 地面静止锋位于湖南南部到广西北部, 呈西北—东南向。在冰雹发生当天, 南支槽快速东移, 每天大约有 10 个经度, 有时与西北地区低槽合并移出; 地面冷空气从东路南压影响广西, 这类冰雹落区主要在桂西北。

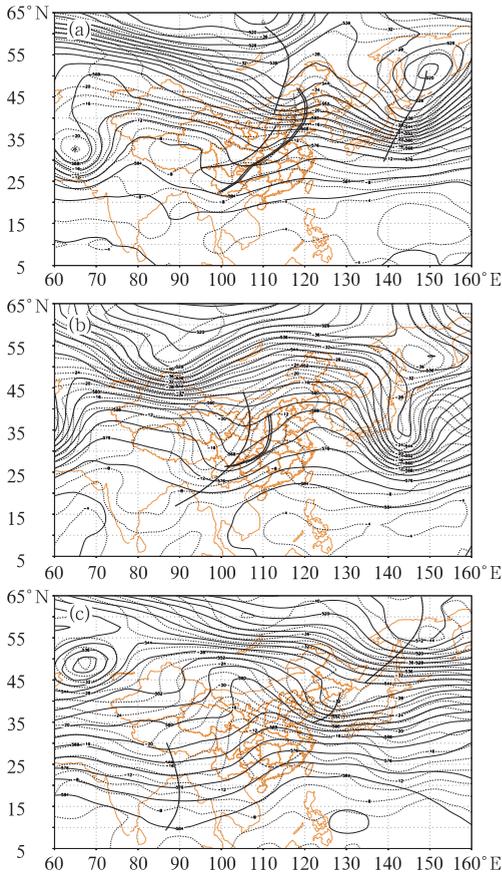


图 1 华北低槽型(a)、高原东部低槽型(a)和南支槽型(c)环流形势图
实线是等高线, 虚线是等温线, 粗实线是 500hPa 槽线, 双实线是 850hPa 切变线, 点断线是地面锋面

根据以上的分型, 统计了广西 4 个区域冰雹天气对应的环流分型次数和比例(见表 1)。由表 1 可见, 4 个区域中由高原东部低槽造成的冰雹过程所占的比例为最大, 其次为南支槽型, 最少的为华北低槽型。

表 1 广西 4 个区域各环流型下出现次数

	总次数	华北低槽型	高原东部低槽型	南支槽型
桂西北	27	2(7.4%)	20(74.1%)	5(18.5%)
桂西南	16	2(12.5%)	11(68.8%)	3(18.8%)
桂东北	20	5(25.0%)	13(65.0%)	2(10.0%)
桂东南	7	2(28.5%)	3(42.8%)	2(28.5%)
合计	70	11(15.7%)	47(67.1%)	12(17.1%)

2.2 预报因子的选取

在对广西冰雹环流分型的基础上, 取格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 以 $22.5 \sim 25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $105.0 \sim 107.5^{\circ}\text{E}$ 的 4 个格点代表桂西北, $20.0 \sim 22.5^{\circ}\text{N}$ 、 $105.0 \sim 107.5^{\circ}\text{E}$ 的 4 个格点代表桂西南, $22.5 \sim 25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $107.5 \sim 110.0^{\circ}\text{E}$ 的 4 个格点代表桂东北, $20.0 \sim 22.5^{\circ}\text{N}$ 、 $107.5^{\circ}\text{E} \sim 110.0^{\circ}\text{E}$ 的 4 个格点代表桂东南。

根据冰雹发生的基本条件: 不稳定能量积聚引起的不稳定层结, 较好的低空水汽条件和适当的对流触发因子, 我们选取了以下冰雹日前一天 20 时的 ECMWF 常用预报因子。

代表不稳定能量积聚引起的不稳定层结预报因子:

(1) $\Delta P_{0(\text{桂林}-\text{海口})}$: 海平面气压中 25°N 、 110°E 格点值与 20°N 、 110°E 格点值之差, 它表示海平面上广西南北气压梯度, 差值越大, 气压梯度越大。

(2) $\sum T_{850\text{hPa}}$: 850hPa 温度场中 (25°N 、 105°E)、(25°N 、 110°E)、(30°N 、 110°E) 3 个格点值之和, 它表示 850hPa 温度场上贵州南部、广西北部到湖南南部之间的温度之和, 温度和越大, 越有利于强对流发生。

(3) $\Delta T_{850(\text{兴仁}-\text{海口})}$: 850hPa 温度场中 25°N 、 105°E 格点与 20°N 、 110°E 格点温度差,

它表示广西上空对流层中低层的温度梯度。

代表低空水汽条件的预报因子:

(1) H_{R850} : 850hPa 广西 4 个区域分别对应格点的相对湿度值。

(2) H_{R700} : 700hPa 广西 4 个区域分别对应格点的相对湿度值。

代表对流触发因子:

(1) $H_{k1,500}$: 500hPa 高度场上 (20°N 、 95°E)、(25°N 、 95°E)、(30°N 、 95°E) 3 个格点值之和与 (20°N 、 110°E)、(25°N 、 110°E)、(30°N 、 110°E) 3 个格点值之和的差。它表示南支槽与 105°E 的相对位置和深浅, 负值越大, 槽的位置越偏西。

(2) $H_{k2,500}$: 500hPa 高度场上 (20°N 、 105°E)、(25°N 、 105°E)、(30°N 、 105°E) 3 个格点值之和与 (20°N 、 120°E)、(25°N 、 120°E)、(30°N 、 120°E) 3 个格点值之和的差。它表示南支槽与 110°E 的相对位置和深浅, 负值越大, 槽的位置越偏西。

(3) $\Delta H_{500\text{高原槽}}$: 500hPa 高度场上 (30°N 、 95°E)、(35°N 、 95°E)、(40°N 、 95°E)、(45°N 、 95°E)、(50°N 、 95°E) 5 个格点值之和与 (30°N 、 110°E)、(35°N 、 110°E)、(40°N 、 110°E)、(45°N 、 110°E)、(50°N 、 110°E) 5 个格点值之和的差。它表示高原东部槽与 105°E 的相对位置和深浅, 负值越大, 槽的位置越偏西。

(4) $\Delta H_{500(\text{东-西})}$: 500hPa 高度场 (30°N 、 105°E)、(35°N 、 105°E)、(40°N 、 105°E)、(45°N 、 105°E)、(50°N 、 105°E)、(55°N 、 105°E)、(60°N 、 105°E) 7 个格点值之和与 (30°N 、 120°E)、(35°N 、 120°E)、(40°N 、 120°E)、(45°N 、 120°E)、(50°N 、 120°E)、(55°N 、 120°E)、(60°N 、 120°E) 7 个格点值之和的差。它表示华北低槽与 110°E 的相对位置和深浅, 负值越大, 槽的位置越偏西。

3 预报方法

首先, 利用数值预报产品资料计算出上

述 9 个预报因子, 根据 1976—2004 年 2—5 月资料, 分别求出 9 个因子和冰雹的单相关系数, 得到表 2 中的结果。广西 4 个区域发生和不发生冰雹总样本数为 18592 个, 经过 $\alpha = 0.05$ 的显著水平检验, 查得 $r_{\alpha=0.05} = 0.1873$ 。9 个因子中, 除了 H_{R700} 外, 我们选取相关系数大于 0.2 的 8 个因子作为预报因子, 它们分别为: $\Delta P_{0(\text{桂林-海口})}$ 、 $\sum T_{8501\text{区}}$ 、 $\Delta T_{850(\text{兴仁-海口})}$ 、 H_{R850} 、 $H_{k1,500}$ 、 $H_{k2,500}$ 、 $\Delta H_{500\text{高原槽}}$ 、 $\Delta H_{500(\text{东-西})}$ 。

表 2 预报因子和各个区域冰雹的相关系数

因子类型	预报因子	相关系数			
		桂西北	桂西南	桂东北	桂东南
不稳定条件	$\Delta P_{0(\text{桂林-海口})}$	0.347	0.334	0.256	0.198
	$\sum T_{8501\text{区}}$	0.253	0.221	0.398	0.301
	$\Delta T_{850(\text{兴仁-海口})}$	0.333	0.253	0.369	0.342
水汽条件	H_{R850}	0.437	0.326	0.368	0.254
	H_{R700}	0.102	0.087	0.161	0.117
对流启动条件	$H_{k1,500}$	-0.338	-0.296	-0.415	-0.321
	$H_{k2,500}$	-0.369	-0.338	-0.354	-0.347
	$\Delta H_{500\text{高原槽}}$	-0.210	-0.222	-0.241	-0.187
	$\Delta H_{500(\text{东-西})}$	-0.432	-0.334	-0.365	-0.321

3.1 用逐步判别分析法进行冰雹预报

在计算相关系数的基础上, 利用逐步判别分析法建立广西各区域冰雹预报方程。方程建立过程中剔除了部分因子, 得到各区域的判别方程、阈值、临界成功指数、命中率和假警率和漏报率如表 3。其中 X_1 为 $\Delta P_{0(\text{桂林-海口})}$ 、 X_2 为 $\sum T_{8501\text{区}}$ 、 X_3 为 $\Delta T_{850(\text{兴仁-海口})}$ 、 X_4 为 H_{R850} 、 X_5 为 $H_{k1,500}$ 、 X_6 为 $H_{k2,500}$ 、 X_7 为 $\Delta H_{500\text{高原槽}}$ 、 X_8 为 $\Delta H_{500(\text{东-西})}$ 。 Y 的阈值为 Y_c , 即当 $Y \geq Y_c$ 时, 认为将产生冰雹, 当 $Y < Y_c$ 时, 则认为不产生雷暴。

对此方程进行历史拟合, 得出 4 个判别方程的平均临界成功指数为 33.9%, 平均命中率为 46.5%, 平均虚假报警率为 37.4%, 漏报率为 16.4%。方程组预报结果空多漏少, 虽然对冰雹有一定的预报能力, 但是距离

表 3 各区域判别方程、阈值、临界成功指数、命中率和假警率

	方程	阈值	临界成功指数	命中率	假警率	漏报率
桂西北	$Y=0.7262X_1+0.0653X_2-0.7765X_5-2.5931X_7$	16.38	40.5%	55.6%	37.0%	7.0%
桂西南	$Y=0.3398X_1+0.0189X_2-0.4673X_5-2.7754X_7$	23.87	26.1%	37.5%	43.8%	18.8%
桂东北	$Y=0.4598X_1+0.0387X_2-0.4382X_5-2.0381X_8$	36.82	35.7%	50.0%	40.0%	10%
桂东南	$Y=0.5687X_1+0.0375X_2-0.7538X_5+2.2756X_8$	31.37	33.3%	42.9%	28.6%	28.6%

投入业务运行还有很大差距。

3.2 用指标叠加法进行冰雹预报

由于用判别方程预报方法空报偏多,再用指标叠套法进行预报。

首先,在对样本的统计分析中发现,以上的预报因子在一定的阈值之外可以是很好的消空指标。他们分别为:① $\Delta P_{0(\text{桂林}-\text{海口})} \leq -4$,或 ≥ 7 。桂林-海口之间的气压梯度太大或者太小,同时, $\Delta H_{500(\text{东}-\text{西})} \geq -4$,广西处于槽后;② $\sum T_{8501\text{区}} \leq 9$,恩施、兴仁-桂林一带的温度太低。③ $\Delta H_{500(\text{东}-\text{西})} \leq -70$,槽距离较远,或 ≥ 35 ,槽已经东移出广西。④ $\Delta H_{500\text{高原槽}} \leq -45$,或 ≥ 100 ,高原槽未移近 95°E 或者已经远离 110°E ;⑤ $H_{k1,500} \geq 8$,或 $H_{k2,500} \geq 6$,或 $(H_{k1,500} + H_{k2,500}) \geq 6$,南支槽未移近 105°E 或者已经移出 115°E 。只要达到上述 5 个消空指标中的任何一个,即可进行消空,即可预报第二天广西没有区域性的冰雹天气。

其次,对消空后的样本逐区域判断预报因子的值,并将阈值确定(见表 4),要求各个区域都要满足 8 个指标的阈值才能判断该区域次日有一次冰雹过程。

表 4 各区域冰雹预报因子阈值

	桂西北	桂西南	桂东北	桂东南
$\Delta P_{0(\text{桂林}-\text{海口})}$	≥ 7	≥ 8	≥ 6	≥ 6
$\sum T_{8501\text{区}}$	≥ 34	≥ 34	≥ 34	≥ 34
$\Delta T_{850(\text{兴仁}-\text{海口})}$	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10
H_{R850}	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75
$H_{k1,500}$	≤ 0	≤ -10	≤ 6	≤ 3
$H_{k2,500}$	≤ -10	≤ -10	≤ -10	≤ -4
$\Delta H_{500\text{高原槽}}$	≤ 0	≥ 5	≥ 15	≥ 25
$\Delta H_{500(\text{东}-\text{西})}$	≤ -15	≤ -10	$0 \sim -10$	$0 \sim 15$

用此方法对 2005、2006 年的冰雹进行历史拟合,两年间共有 5 个区域性雷暴日,报对 4 个,漏报 0 个,空报 2 个,临界成功指数为 57.1%,命中率为 80.0%,虚假报警率为 40.0%。指标叠加法比判别法的虚假报警率要低,由于 2 年用于检验的个例太少,除了以上的两种方法之外,我们还结合当天 08 时广西 6 个探空站实况观测资料,进行订正,分别用百色、南宁、桂林和梧州 4 个探空站当天 700hPa($T-T_d$) $\leq 10^\circ\text{C}$,850hPa($T-T_d$) $\leq 4^\circ\text{C}$,且 $\Delta T_{(850-500)} \geq 24^\circ\text{C}$,分别作为桂西北、桂西南、桂东北和桂东南的补充订正指标,空报次数则可以减少为 1 次。

3.3 用指标叠加法试报 2007 年 2—5 月的广西区域冰雹

用指标叠加法试报广西 2007 年 2—5 月的冰雹,期间共有 4 次区域性冰雹,用本预报方法报对 4 次,漏报 0 次,空报 1 次,则临界成功指数为 80.0%,命中率为 100.0%,虚假报警率为 25.5%,对区域性的冰雹有较好的潜势预报能力。

另外,本方法对区域性的雷雨大风(规定当天有 ≥ 8 级大风出现为雷雨大风)也有较好的预报能力。统计了广西在 2007 年 2—5 月出现的 11 次雷雨大风天气,用该预报方法报对了 10 次,漏报 1 次,该漏报样本为 2 个站雷雨大风。可能由于区域性的雷雨大风的预报条件比冰雹的条件相对要宽松而造成漏报,但此方法对雷雨大风、冰雹还是有较好的指示意义。

4 基于对流参数估计的冰雹落区概率预报试验

由于强对流天气系统的中小尺度特性及其发生发展的复杂性,使用数值预报结果或使用常规天气图方法直接作强对流天气的定点、定时、定量短时预报十分困难。为了表述强对流天气发生、发展的环境,经常用到各种对流参数,以下是我们冰雹落区概率预报试验中所用的对流参数。

4.1 对流参数表达式及其物理意义

(1) K 指数: $K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$

K 指数是描述大气暖湿程度和稳定度的综合性指标,既考虑了垂直温度梯度,又考虑了低层的水汽和湿层的厚度。K 指数越大,层结越不稳定。

(2) 沙瓦特稳定指数: $SI = (T_{环境500} - T_{气块})$

SI 是描述大气稳定度的物理量。它是 850hPa 等压面上的湿空气团沿干绝热线上升,到达抬升凝结高度后再沿湿绝热线上升至 500hPa 时所具有的气团温度与 500hPa 等压面上的环境温度的差值。SI 大于 0,为大气稳定,反之不稳定。

(3) 涡度: $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$

表征空气块旋转运动强度特征的物理

量。

(4) 垂直速度: $\omega_p = \omega_{p0} + \bar{D}(p_0 - p)$

其中 ω_p 和 ω_{p0} 分别是 p 和 p_0 高度处的垂直速度。 \bar{D} 为 p 和 p_0 之间的平均散度。

(5) 对流有效位能(CAPE)

$$CAPE = g \int_{z_f}^{z_c} \frac{1}{T_w} (T_w - T_w) dz$$

把在自由对流高度(LFC)到平衡高度(EL)间的层结曲线与状态曲线所围成的面积称为对流有效位能(CAPE),它表示有可能转换为动能的位能。

4.2 对流参数的阈值和概率预报

选用广西气象减灾所 MM5 中尺度模式 08 和 20 时逐 3 小时预报场的数值预报产品(H、T、Td、U、V、P)计算以上对流参数,格距为 45km×45km,并用高斯距离权重法插值到全区 89 个气象测站上,得到各个站点的对应值。根据 2005—2006 年拟合率确定阈值范围,它们分别为: $SI < -3$; $K > 35$; $CAPE > 1500$; $(\zeta_{850} + \zeta_{700} + \zeta_{600} + \zeta_{500}) > 0$; $(\omega_{p850} + \omega_{p700} + \omega_{p600} + \omega_{p500}) < 0$,每满足一个指标 $P_i = 1$,否则 $P_i = 0$,再计算 $P_{概率}$,如式(1)。

$$P_{概率} = \left\{ \sum_{i=1}^5 p_i / 5 \right\} \times 100\% \quad (1)$$

$P_{概率} = 20\%$,表示冰雹出现的可能性小; $P_{概率} = 40\%$,冰雹出现的可能性较小, $P_{概率} = 60\%$,冰雹出现的可能性较大, $P_{概率} = 80\%$,冰雹出

表 5 2007 年广西冰雹概率预报与实况对比

日期	时间	预报地点	预报概率	实况有冰雹站点	正确率	空报	漏报
070215	11-14	百色、河池等市 11 站	100%	田林	1/11	10/11	0
070417	11-14	百色、河池、柳州、桂林等市 28 站	100%	南丹等 5 站	5/28	23/28	0
070422	11-14	百色、河池等市 18 站	100%	田林、都安	2/18	16/18	0
070423	17-20	百色、河池等市 10 站	100%	平果	1/17	16/17	0
070508	14-17	梧州、贺州等市 5 站	100%	0	0/5	5/5	0
070617	14-17	梧州、玉林等市 9 站	100%	0	0/9	9/9	0
平均					10.2%	89.8%	0

现的可能性大, $P_{\text{概率}} = 100\%$, 冰雹出现的可能性很大。2007 年广西有 6 次过程, 9 站次的冰雹, 表 5 给出了冰雹预报概率 $P_{\text{概率}} = 100\%$ 时与实况对比情况。当 $P_{\text{概率}} = 100\%$ 时, 预报出 6 次过程中的 4 次, 准确率 66.7%, 但是, 逐站的正确率却较低, 只有 10.2%, 空报率 89.8%, 没有漏报。此方法对过程有一定的预报能力, 但是落区预报方法还需要进一步探讨。

5 结论与讨论

(1) 在对广西 4 个区域冰雹气候特征分析的基础上, 基于高空槽和地面冷空气路径将造成冰雹的环流形势, 分为华北低槽型、高原东部低槽型和南支槽型, 其中高原东部低槽型影响造成冰雹次数最多。

(2) 在分型基础上检索出数值预报产品有物理意义的预报因子, 分别采用判别分析法和指标叠套法制作广西冰雹的潜势预报, 在预报实践中, 过程的准确率后者比前者要

高; 再结合当天的探空资料指标, 可以进一步提高命中率。

(3) 基于中尺度数值模式输出场的对流参数估计, 对于不同参数设置有不同阈值范围来制作广西冰雹落区的概率预报试验, 试验结果表明, 过程预报有一定效果, 但是落区预报方法还有待于进一步改进。

参考文献

- [1] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1981: 281-316, 451-454.
- [2] 金永利, 张蕾. 北京地区一次降雹过程和冰雹微物理特征[J]. 气象, 2002, 28(1): 18-25.
- [3] 彭治班, 刘健文, 郭虎, 等. 国外强对流天气的应用研究[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [4] 刘子英, 陆海席, 赵秀英, 等. 逐步消空法在雹云识别中的应用[J]. 气象, 2000, 26(10): 41-44.
- [5] 施望芝, 金琪. 湖北一次冰雹天气过程的落区诊断分析和预报[J]. 热带气象学报, 2004, 20(2): 212-217.
- [6] 高守亭, 孙淑清. 应用里查逊数判别中尺度波动的不稳定[J]. 大气科学, 1986, 10: 171-182.
- [7] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 401-409.