

钱莉,滕杰,杨鑫. 逐步消空法在祁连山区东部冰雹预报中的应用[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 560-567, [QIAN Li, TENG Jie, YANG Xin. Application of the Stepwise Decreasing FAR Method to Hail Forecast in the Eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 560-567], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0560

逐步消空法在祁连山区东部冰雹预报中的应用

钱莉^{1,2}, 滕杰¹, 杨鑫³, 白国强³

(1. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,
甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室,
甘肃 兰州 730020; 3. 甘肃省气象局, 甘肃 兰州 730020)

摘要:选取祁连山区东部5个测站1992—2012年3—9月4280个样本和114个冰雹个例,利用同期NCEP/NCAR再分析资料,采用差分法、天气诊断、因子组合等方法构造出反映本地对流天气特征的104种对流参数。在天气学分型的基础上,利用点双序列相关系数方法计算每个对流参数与同期冰雹日的相关系数,选取相关性好且物理意义明显的因子作为候选因子,利用逐步消空法,根据设定的空报率阈值,逐个引进因子,当小于阈值要求,结束预报因子的引进。对2013—2014年预报模型试报效果进行检验,预报准确率达45.5%,命中率为100%,预报效果较好。

关键词:对流参数;逐步消空法;冰雹;祁连山区东部

文章编号:1006-7639(2016)-03-08-0560 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0560

中图分类号:P457

文献标识码:A

引言

冰雹是一种局地性强、季节性明显,对工农业生产、人民生命财产均可造成严重危害的灾害性天气。祁连山区东部的武威市是高原气候和沙漠气候交汇之处,地形北低南高,北部为走廊绿洲和荒漠区,南部为山脉纵横的高寒山区,海拔在1300~4874 m。境内沿祁连山区山多林少,地形复杂,气候变化无常,夏秋季节雹暴频繁出现,是全国3大冰雹重灾区之一。加强对该地区冰雹天气的预报方法研究,对提高祁连山区冰雹活动的预报预警能力具有重要意义。

近年来已有很多学者对不同地区冰雹的分布特征、冰雹个例的天气学特征、冰雹天气的雷达回波特征等进行了分析研究^[1-20],这些研究加深了对冰雹天气的认识,对各地的冰雹预报提供了参考。雹暴云的发展取决于热力不稳定、风的垂直切变及水汽的垂直分布3个因子,所以冰雹的产生与大气的不稳定因子、能量的积累和水汽分布之间必然存在关系。暴雨、冰雹、雷暴、龙卷等许多灾害性天气现象,

都属于小概率事件,具有突发性强、落区不确定和易成灾的特点,预报难度大,极易漏报。提高这些灾害性天气预报准确率的有效途径之一是将小概率事件变为条件概率下的大概率事件,逐步消空法就是逐步将小概率事件变为大概率事件的具体方法。目前已有许多学者在冰雹、局地暴雨、雷暴等强对流天气预报中总结了较好的预报方法,如刘子英等^[21]采用逐步消空法寻找雹云识别指标集合,臧传花等^[22]利用逐步消空法开展对暴雨的预报,杨仲江等^[23]利用逐步消空法开展雷电潜势预报等,以上研究均取得较好的预报效果。本文尝试使用NCEP/NCAR再分析资料,采用逐步消空法,寻求祁连山东部冰雹落区潜势预报指标模型,以期对冰雹预报提供技术支持,提高冰雹天气的预报预警能力。

1 资料 and 关键区选取

祁连山东部的武威市深居内陆,为典型的大陆型气候,3—9月冰雹日数占全年冰雹日数的98.8%。因此,选取祁连山区东部民勤、凉州、古浪、永昌、乌鞘岭5个测站1992—2012年3—9月出现

收稿日期:2015-12-01;改回日期:2016-02-23

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-6)资助

作者简介:钱莉(1963-),女(汉族),浙江金华人,正研级高级工程师,主要从事天气气候研究工作。E-mail:wwqxjql@163.com

的冰雹个例 114 个,利用同期 NCEP/NCAR 再分析资料 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点值,包括位势高度、温度、相对湿度以及纬向风、经向风。应用差分方法计算出 850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa 的物理量对流参数 104 个。天气学分型从影响该区域的天气尺度系统进行划分,选取范围涵盖河西走廊所在区域 (96°E — 104°E , 38°N — 42°N);预报指标关键区选取范围为祁连山东部所在区域 (101°E — 103°E , 37°N — 39°N)。定义某站某日观测到 1 次或以上冰雹现象时,不论其时间长短,都定义该站该日为 1 个冰雹日;同一天 1 站以上出现降雹,为 1 次降雹过程。由于冰雹为中小尺度天气系统,而 NCEP/NCAR 再分析资料及其物理量对流参数 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点资料对于冰雹落点预报网格距太粗,因此本文建立的预报指标模型为区域内冰雹落区潜势预报指标。

2 方法介绍

2.1 方法的数学表述

根据我国天气预报质量检验、评估标准:

$$CSI = \frac{Na}{Na + Nb + Nc} \times 100\% \quad (1)$$

$$POD = \frac{Na}{Na + Nb} \times 100\% \quad (2)$$

$$FAR = \frac{Nc}{Na + Nc} \times 100\% \quad (3)$$

其中,CSI 为准确率、POD 为命中率、FAR 为空报率,Na 为预报正确次数、Nb 为漏报次数、Nc 为报空次数。

寻找预报指标,就是寻找 Nb 和 Nc 减小、CSI 变大的条件。所谓寻找预报指标集的逐步消空法,就是使 Nb = 0 与 Nc 逐步变小的方法,它可用命中率 POD 与空报率 FAR 表示为:

$$POD = 100\% \quad (4)$$

$$100\% > FAR = m\% > 0 \quad (5)$$

$$[(FAR)_{j-1} - (FAR)_j] > m_j\% > 0 \quad (6)$$

其中,m 为空报率的具体数值, $(FAR)_j$ 为引入第 j 个消空因子后的空报率、 $(FAR)_{j-1}$ 为引入第 j-1 个消空因子后的空报率, m_j 为引入第 j 个与第 j-1 个消空因子的空报率差的具体数值。公式(5)、(6)表示“宁空”,公式(4)表示“勿漏”,公式(4)与(6)是“逐步消空法”的数学表述^[24]。

2.2 寻找指标的步骤

一次降雹过程就是大气不稳定能量的产生、积累、释放的过程。首先,根据降雹日,寻找物理量在降雹前或降雹时共有的特征。这个特征可以作为寻

找的预报指标 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$),将该区域当日是否为冰雹日设为 y。有冰雹时 $y = 1$,无冰雹时 $y = 0$,则 y 为“0”、“1”变量。 x_i 是各对流参数,为连续性变量。寻找消空指标的步骤为:

(1) 天气学分型

冰雹等中小尺度天气不是随机发生的天气现象,而是与大尺度环流系统密切相关,其能否产生和强度大小取决于动力、热力和水汽条件,不同的大尺度天气类型对应冰雹天气的触发机制不尽相同。因此,选取大尺度环流形势分型作为第一个消空指标。

(2) 求取相关系数

在分型的基础上,使用点双序列相关系数法^[25]建立各个物理量参数 x_i 与 y 之间的相互关系(线性相关):

$$r = \frac{\bar{x}(1) - \bar{x}}{S_x} \times \left(\frac{p}{1-p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中, $\bar{x}$ 为因子 x_i 的平均值, $\bar{x}(1)$ 为 $y = 1$ (冰雹天气发生)时 x_i 的平均值, p 为 $y = 1$ 事件出现的频率, S_x 为因子的样本标准差。

用公式(7)求得各因子与冰雹日情况的点双序列相关系数,当相关系数 $\geq$ 给定的临界相关系数阈值时,表示通过 F 检验 ($\alpha = 0.05$)。

(3) 逐步消空法

在理想情况下,选取大于相关系数阈值的预报因子,只有当利用 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 制作预报得出的虚假报警率 $(FAR)_n$ 接近 0 时,才算达到目的,这时指标集包含指标的个数为 N。实际上使之接近零较难达到,常取 $(FAR)_n \leq m_2\%$ 时,就认为已达目的。其数学表达式为:

$$m_2\% \leq (FAR)_n < (FAR)_{n-1} < \dots < (FAR)_2 < (FAR)_1 \quad (8)$$

式中, m_2 为给定的空报率阈值。公式(8)表明:每增多一个预报指标,既可使虚假报警率 FAR 减小一些,从而使 $(FAR)_1, (FAR)_2, \dots, (FAR)_{n-1}, (FAR)_n$ 组成一个 N 项的递减级数,这就是“逐步消空法”。需要指出的是, N 的大小不仅与预报对象有关,还与寻找预报指标时采用的参数、选取的临界值等有关。但一旦限定指标集后,即选定 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 后,得出的预报结论则与指标集中诸要素的先后次序无关。

当 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 降雹预报指标集合中每一个的临界值都达到时,预报未来有降雹事件发生;否则,预报无降雹事件发生。

3 预报因子的选取

3.1 天气学分型

由于不同的环流形势产生冰雹的物理机制不同,对冰雹的环流形势分型,根据南北气流配置方法结合温度平流的影响进行^[26],选取影响该区域的天气尺度系统的关键区(38°N—42°N,96°E—104°E),分型格点位置见图1。

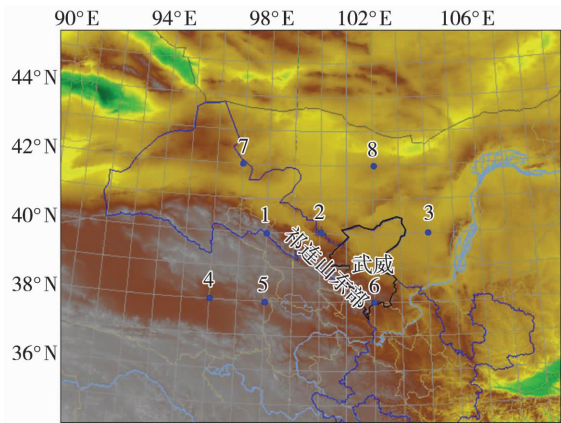


图1 天气学分型关键区格点分布
Fig.1 The key region grid distribution of synoptic classification

使用500 hPa高度场资料,在38°N、40°N各取3个经度格点的组合分别代表南北气流的不同类型。

$$\Delta H_1 = h_1 + h_2 - 2h_3 \quad (9)$$

$$\Delta H_2 = h_4 + h_5 - 2h_6 \quad (10)$$

其中, $h_1 = h_{500 \text{ hPa}}(40^\circ\text{N}, 98^\circ\text{E})$ 、 $h_2 = h_{500 \text{ hPa}}(40^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E})$ 、 $h_3 = h_{500 \text{ hPa}}(40^\circ\text{N}, 104^\circ\text{E})$ 、 $h_4 = h_{500 \text{ hPa}}(38^\circ\text{N}, 96^\circ\text{E})$ 、 $h_5 = h_{500 \text{ hPa}}(38^\circ\text{N}, 98^\circ\text{E})$ 、 $h_6 = h_{500 \text{ hPa}}(38^\circ\text{N}, 102^\circ\text{E})$ 。

500 hPa温度场以本影响区为参照点,向北和西北方向各取2个格点,分别取其温度差值,代表北方、西北方向有无温度平流。其中 t 下标的数字与图1中代码位置所代表的格点位置一致:

$$\Delta T_1 = t_6 - t_7 \quad (11)$$

$$\Delta T_2 = t_6 - t_8 \quad (12)$$

其中, $t_6 = t_{500 \text{ hPa}}(38^\circ\text{N}, 102^\circ\text{E})$ 、 $t_7 = t_{500 \text{ hPa}}(42^\circ\text{N}, 97^\circ\text{E})$ 、 $t_8 = t_{500 \text{ hPa}}(42^\circ\text{N}, 102^\circ\text{E})$ 。 ΔT_1 代表东南—西北向的温差、 ΔT_2 代表南北向的温差。当差值为正时,表示有冷平流;当差值为负时,表示有暖平流。

分型规则:

(1)若 $\Delta H_1 \geq 2 \text{ dagpm}$ 和 $\Delta H_2 \geq 2 \text{ dagpm}$ 且 $\Delta T_1 \geq 1.5^\circ\text{C}$ 或 $\Delta T_2 \geq 1.5^\circ\text{C}$,则代表西北气流型;

(2)若 $|\Delta H_1| < 2 \text{ dagpm}$ 和 $|\Delta H_2| < 2 \text{ dagpm}$ 且

$\Delta T_1 \geq 1.5^\circ\text{C}$ 或 $\Delta T_2 \geq 1.5^\circ\text{C}$,则代表西风气流型(低涡型);

(3)若 $\Delta H_1 \leq -2 \text{ dagpm}$ 和 $\Delta H_2 \leq -2 \text{ dagpm}$ 且 $\Delta T_1 \geq 1.5^\circ\text{C}$ 或 $\Delta T_2 \geq 1.5^\circ\text{C}$,则代表西南气流型;

(4)其余为不规则型。

依据以上判据将天气类型分为西北气流型、西风气流型(低涡型)、西南气流型、不规则型等4种天气类型。根据分型规则对冰雹个例进行分类,结果见表1。不规则型中仅有2个冰雹正例,属小概率事件,在分型建立预报指标时不予考虑。因此,分型后进入不规则型作为一级消空指标,共消空618个。

表1 1992—2012年祁连山区
东部冰雹日天气学分型结果

Tab.1 Weather classification results of hail day in the eastern Qilian Mountains during 1992 – 2012

天气学分型	入型个数	正例个数
西北气流型	1 844	72
西风气流型(低涡型)	1 348	33
西南气流型	470	7
不规则型	618	2

3.2 因子的相关系数

根据不同天气类型分别采用公式(7)求得西北气流型1 844个(其中冰雹日72 d、非冰雹日1 772 d)、西南气流型470个(其中冰雹日7 d、非冰雹日463 d)、西风气流型(低涡型)1 348个(其中冰雹日33 d、非冰雹日1 315 d)。分型对样本中各对流参数因子(104个)与冰雹日求点双序列相关系数, $r \geq 0.2$ 即通过 $\alpha = 0.05$ 的 F 检验。

选取预报指标关键区(101°E—103°E,37°N—39°N)按照间隔1°选取3×3个格点(图2),计算

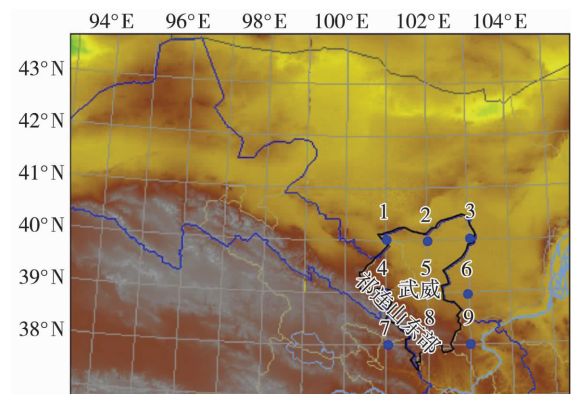


图2 预报因子格点分布

Fig.2 The grids distribution of forecasting factors

104 个对流参数在预报指标关键区 9 个格点中的最大(最小)值,根据每个对流参数的物理意义取出最大(最小)值,结合发生冰雹天气时各物理量值的反应确定指标阈值。利用点双序列相关系数方法计算每个对流参数与同期冰雹日的相关系数,根据不同天气类型产生冰雹的不同物理机制,选择相关系数较大的作为逐步消空的候选因子。经分析发现,西北、西南、西风气流型中相关系数较好的对流参数预报因子有总能温、总比湿、500 hPa 与 700 hPa 温差、500 hPa 与 700 hPa 能温差、500 hPa 与 700 hPa 比湿

差、500 hPa 温度露点差、500 hPa 温度平流、风暴螺旋度、对流稳定度指数、沙氏指数等。其中,总能温、500 hPa 与 700 hPa 能温差、总比湿、风暴螺旋度代表产生对流性天气的不稳定能量和湿度条件;500 hPa 与 700 hPa 温差、500 hPa 温度平流等代表冷空气的强度;500 hPa 与 700 hPa 比湿差、500 hPa 温度露点差代表水汽条件;而对流稳定度指数、沙氏指数、理查森指数代表大气的对流稳定程度。这些对流参数均具有明确的物理意义,对流参数的符号和物理意义见表 2。

表 2 冰雹指示意义好的对流参数及物理意义对照

Tab.2 The convection parameters with good implications for hail occurrence and their physical significance

对流参数	符号	物理意义
K 指数	K	K 值越大,大气层层结越不稳定
总能温	$\sum_{850}^{500} T\sigma$	反映 850 ~ 500 hPa 整层的湿静力能量的累计, $\sum T\sigma$ 越大,越容易发生对流天气
总比湿	$\sum_{850}^{500} q$	反映 850 ~ 500 hPa 整层水汽的分布, $\sum q$ 越大,水汽越丰富,越容易发生对流天气
500 hPa 与 700 hPa 温差	t_{5-7}	上下层温度之差,值越小越有利于对流天气发生
500 hPa 与 700 hPa 能温差	$T\sigma_{5-7}$	上下层的湿静力温度差,差值越小越有利于对流天气发生
500 hPa 温度露点差	$(t-t_d)_5$	代表空气中的水汽含量,差值越小,水汽越丰富
对流稳定度指数	I	$I > 0$ 为对流性稳定; $I < 0$ 为对流性不稳定,值越小,越有利于对流性天气发生
500 hPa 温度平流	$tadv$	代表高层温度平流,值越小,冷平流越强,越容易发生对流天气
风暴螺旋度	SHR	反映风暴的移动速度和强度, SHR 越大,越容易发生对流性天气
500 hPa 与 700 hPa 比湿差	q_{5-7}	反映上下层的差动水汽分布,值越小越有利于对流天气产生
沙氏指数	Si	反映大气条件性稳定状况的一个指数。当 $Si < 0$ 时,大气层结不稳定,且值越小气层越不稳定
理查森数	Ri	Ri 反映湍流运动因抵抗重力所做的功, Ri 越小越利于乱流发展

表 3 为不同天气类型的点双序列相关系数及检验结果。可以看出,西北气流型中 K 指数、 I 指数分别与冰雹日相关性最高,达到 0.81,说明西北气流型中大气的稳定度是产生冰雹的主要因素;西风气流型和西南气流型中, t_{5-7} 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma$ 分别与冰雹日的相关性最高,说明西风气流型(低涡型)、西南气流型中温度平流和能湿条件的积累是产生冰雹的主要因素。

4 逐步消空法的预报指标模型

在点双序列相关系数通过 $\alpha = 0.05$ 信度检验的预报因子中,选取相关系数较大的预报因子作为逐步消空法的候选因子。选取因子的标准为:①预报因子

与预报对象的 $r \geq 0.2$,且越大说明相关性越好;②因子物理意义清晰;③同一类型的预报因子值选取相关系数最大的因子作为候选因子;④逐步消空法候选因子与先后顺序无关,引进第 n 个预报因子,当 FAR (空报率) $\leq 13\%$ 时,结束预报因子引进。输出最终引进的预报因子名称、消空个数及 CSI 和 FAR 。表 4 为不同天气类型消空指标阈值及消空个数。

西北气流型共引入 6 个消空指标,分别为 I 、 K 、 q_{5-7} 、 t_{5-7} 、 $(t-t_d)_5$ 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma$,点双序列相关系数分别为 0.81、0.81、0.79、0.69、0.59、0.71。消空指标阈值分别为: $I \leq -1 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $K \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $q_{5-7} \leq -3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $t_{5-7} \leq -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $(t-t_d)_5 \leq 9 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma \geq 320 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

表 3 不同天气类型对流参数与冰雹日的相关性检验
Tab.3 The correlation test between convection parameters
and hail day for different weather types

对流参数	点双序列相关系数(r)		
	西北气流	西风气流	西南气流
K	0.81 *	0.29 *	0.37 *
$\sum_{850}^{500} T\sigma$	0.71 *	0.67 *	0.53 *
$\sum_{850}^{500} q$	0.27 *	0.10	0.02
t_{5-7}	0.69 *	0.85 *	0.89 *
$T\sigma_{5-7}$	0.46 *	0.41 *	0.33 *
$(t-t_d)_5$	0.59 *	0.52 *	0.46 *
I	0.81 *	0.56 *	0.42 *
Ri	0.15	0.47 *	0.39 *
$tadv$	0.23 *	0.46 *	0.35 *
SHR	0.26 *	0.42 *	0.29 *
q_{5-7}	0.79 *	0.24 *	0.31 *
Si	0.54 *	0.22 *	0.09

注：* 通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验

6 个消空指标共消去 1 762 个空报个例,拟合准确率 (CSI) 为 95.6% ,空报率(FAR)为 12.1%。

西风气流型共引入 5 个消空指标,分别为 I 、 t_{5-7} 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma$ 、 Ri 、 $(t-t_d)_5$,其点双序列相关系数分别为 0.56、0.67、0.85、0.52、0.47。消空指标阈值分别为: $I \leq -1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $t_{5-7} \leq -19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma \geq 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $Ri \leq 6$ 、 $(t-t_d)_5 \leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。5 个消空指标共消去 1 310个空报个例, CSI 为 97.2% , FAR 为 12.9%。

西南气流型共引入 6 个消空指标,分别为 I 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma$ 、 t_{5-7} 、 $(t-t_d)_5$ 、 Ri 、 $tadv$,点双序列相关系数分别为 0.42、0.53、0.89、0.46、0.39、0.35。消空指标阈值分别为: $I \leq -1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\sum_{850}^{500} T\sigma \geq 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{5-7} \leq -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(t-t_d)_5 \leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $Ri \leq 5$ 、 $tadv \leq -4 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6 个消空指标共消去 462 个空报个例, CSI 为 99.3% , FAR 为 12.5%。

3 种冰雹天气学类型的 CSI 均在 95% 以上, FAR 在 12.9% 以下。由此可以认为建立的冰雹预报模型达到较高的拟合精度和消空效果。

表 4 不同天气类型消空指标阈值及消空个数
Tab.4 The indicator threshold and the eliminated numbers for different weather types

天气类型	预报指标	取值定义 (关键区)	相关系数	消空阈值	消空个数	FAR	CSI
西北气流型	I	最小值	0.81	$\leq -1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$	1 016	12.1%	95.6%
	K	最大值	0.81	$\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	397		
	q_{5-7}	最小值	0.79	$\leq -3.5\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$	216		
	t_{5-7}	最小值	0.69	$\leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$	63		
	$(t-t_d)_5$	最小值	0.59	$\leq 9\text{ }^{\circ}\text{C}$	37		
	$\sum_{850}^{500} T\sigma$	最大值	0.71	$\geq 320\text{ }^{\circ}\text{C}$	17		
西风气流型	I	最小值	0.56	$\leq -1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$	572	12.9%	97.2%
	t_{5-7}	最小值	0.67	$\leq -19\text{ }^{\circ}\text{C}$	489		
	$\sum_{850}^{500} T\sigma$	最大值	0.85	$\geq 310\text{ }^{\circ}\text{C}$	125		
	Ri	最小值	0.52	≤ 6	78		
	$(t-t_d)_5$	最小值	0.47	$\leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	46		
	I	最小值	0.42	$\leq -1\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$	226		
西南气流型	$\sum_{850}^{500} T\sigma$	最大值	0.53	$\geq 330\text{ }^{\circ}\text{C}$	91	12.5%	98.3%
	t_{5-7}	最小值	0.89	$\leq -18\text{ }^{\circ}\text{C}$	58		
	$(t-t_d)_5$	最小值	0.46	$\leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	40		
	Ri	最小值	0.39	≤ 5	29		
	$tadv$	最小值	0.35	$\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	18		

5 冰雹预报流程图

冰雹预报的逐步消空法,是指降雹预报指标集合中每一个对流参数的临界值都达到时,则预报未来有冰雹天气发生;否则,预报无冰雹天气发生。图3为冰雹预报的业务流程,整个流程共分4步。第1

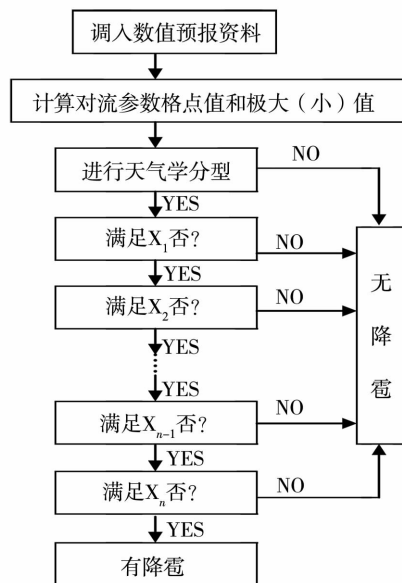


图3 冰雹预报的业务流程

Fig. 3 The operation flow chart of hail forecast

步调入实时数值预报产品;第2步计算预报关键区对流参数的格点值,根据逐个对流参数的物理意义计算区域内的极大(极小)值;第3步根据分型规则进行天气学分型,对不符合西北、西风、西南气流型的天气形势进行消空;第4步满足入型标准的,计算每个预报指标是否满足阈值条件,满足阈值条件,再检查是否满足下一指标的阈值条件,如果给定的 n 个预报指标均满足阈值条件,则预报未来有冰雹;若给定的 n 个指标中有任意一个条件不满足,则预报未来无冰雹。对实时数值预报中每个时次预报产品依据上述步骤进行运行,就能预报出冰雹天气发生的具体时段。

6 预报效果检验

预报效果的评分按照中国气象局下发的《中短期天气预报质量检验办法》中冰雹评定办法,凡自动气象站记录的冰雹、气象灾害情报中确定的冰雹灾害信息,均作为冰雹天气实况采信依据。

建立的祁连山区东部冰雹潜势预报系统于2013年4月1日投入业务试用,按照冰雹预报评定标准,对2013年4月至2014年10月的应用情况进行了预报效果检验。表5给出预报有冰雹的天气过

表5 2013—2014年祁连山区东部冰雹预报模型预报结果评定

Tab. 5 The evaluation of forecast results of hail forecasting model in the eastern Qilian Mountains during 2013 – 2014

序号	过程时间	实况	指标反映	是否空报
1	2013-07-21	3站出现雷阵雨	符合	是
2	2013-07-31	2站出现冰雹	符合	否
3	2013-08-06	6站出现雷阵雨	符合	是
4	2013-08-10	1站出现冰雹	符合	否
5	2013-09-09	2站出现冰雹	符合	否
6	2013-09-11	1站出现冰雹	符合	否
7	2014-04-14	1站出现冰雹	符合	否
8	2014-04-15	6站出现雷阵雨	符合	是
9	2014-06-09	1站出现冰雹	符合	否
10	2014-06-16	6站出现雷阵雨	符合	是
11	2014-06-17	6站出现雷阵雨	符合	是
12	2014-06-29	2站出现雷阵雨	符合	是
13	2014-07-02	1站出现冰雹	符合	否
14	2014-07-11	5站出现雷阵雨	符合	是
15	2014-07-12	1站出现冰雹	符合	否
16	2014-07-15	2站出现雷阵雨	符合	是
17	2014-08-12	3站出现雷阵雨	符合	是
18	2014-08-15	1站出现冰雹	符合	否
19	2014-08-22	3站出现雷阵雨	符合	是
20	2014-08-23	5站出现雷阵雨	符合	是
21	2014-08-24	1站出现冰雹	符合	否
22	2014-08-31	2站出现雷阵雨	符合	是

程及预报检验结果。符合逐步消空法预报指标的天气过程共22个,其中,报警22次,命中10次、空报12次、漏报0次,预报准确率(CSI) = 45.5%,命中率(POD) = 100%,空报率(FAR) = 54.5%。12次空报本区域均出现雷阵雨天气,由于气象观测站点分布不能在区域内实现全覆盖,山区人烟稀少地区和测站外出现的小冰雹(无灾害),不能有效反馈实况信息,难免造成冰雹过程遗漏。

对预报空报的12个个例进行反查,发现2013年8月6日与2014年4月15日的空报个例为西南气流型,其共同特点是850 hPa到700 hPa水汽输送通道畅通,且在祁连山东部形成水汽辐合带,虽然符合西南气流型冰雹的各项指标,但由于充足的水汽输送不利于冰雹形成,2次过程均出现局地大到暴雨。其余10个空报个例均为西北气流型,其共同点是整层水汽条件差,且700 hPa附近有弱辐散场存在,既不利于大冰雹形成,也不利于形成有组织的上升或下沉运动,因此这10次过程虽然符合西北气流型冰雹的各项指标,实况只出现了小雷阵雨。

通过2a的实际业务应用,证明使用逐步消空法制作的祁连山东部冰雹潜势预报模型预报效果较好,具有较大的参考价值,为建立灾害性天气预报模型提供了一种有效方法。但也发现存在一些问题,如不能很好地区分对流性暴雨、冰雹以及干雷暴过程,下一步需从冰雹产生的高低空环流配置和物理机制入手,利用雷达资料完善消空因子,进一步提高冰雹预报预警准确率。

7 小结和讨论

选取物理意义明确的104个对流参数,根据对流参数所对应的物理意义选取关键区的极大(极小)值,构造冰雹预报因子。

利用点双序列相关系数法对不同天气类型下的对流参数与冰雹事件的相关性进行分析,得出:总能量、总比湿、500 hPa与700 hPa温差、500 hPa与700 hPa能温差、500 hPa与700 hPa比湿差、500 hPa温度露点差、500 hPa温度平流、风暴螺旋度、对流稳定度指数、沙氏指数等参数与冰雹事件具有较高的相关性,且在不同天气条件下(是否发生冰雹)的区分度较好。

选取与冰雹事件具有较好相关性且因子与因子间关联度较小的因子,作为逐步消空法的候选因子。用逐步消空法得出不同天气类型下冰雹预报的指标集,使冰雹这种小概率事件的预报成为可能。经过2013、2014年试报,预报准确率达45.5%,命中率为

100%,对于冰雹具有良好的甄别指示作用。

由于仅使用2a资料进行试报,加上目前观测站点的密度不能实现对冰雹观测的全覆盖,预报结果难免存在一定的偶然性,还需要更多的资料进行验证。另外,这种预报方法仅是冰雹落区潜势预报,还不能满足落点预报的要求。接下来的工作中,将利用空间和时间分辨率更高的数值预报产品结合雷达资料,进一步优化完善预报模型。

参考文献

- [1] 张芳华,高辉. 中国冰雹日的时空分布特征[J]. 南京气象学院学报,2008,31(5):687-693.
- [2] 刘德祥,白虎志,董安祥. 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究[J]. 高原气象,2004,23(6):795-803.
- [3] 周崑,张强,康凤琴. 我国西北地区降雹气候特征及若干研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(9):1029-1036.
- [4] 李照荣,丁瑞津,董安祥,等. 西北地区冰雹分布特征[J]. 气象科技,2005,33(2):160-162.
- [5] 钱莉,方锋,杨永龙,等. 河西走廊东部冰雹的气候特征及天气特征[J]. 干旱区研究,2013,30(1):50-55.
- [6] 林纾,陆登荣. 西北地区初夏冰雹及其环流背景气候特征[J]. 气象科技,2006,34(4):400-404.
- [7] 顾光芹,史印山,池俊成,等. 河北冰雹气候特征及其与环流异常的关系[J]. 高原气象,2011,30(4):1132-1138.
- [8] 杨敏,丁建芳. 河南省冰雹时空分布及天气形势特征[J]. 气象与环境科学,2015,38(1):54-60.
- [9] 王在文,郑永光,刘还珠,等. 蒙古涡影响下的背景降雹天气特征分析[J]. 高原气象,2010,29(3):763-777.
- [10] 马禹,王旭,郭江勇. 新疆系统性冰雹天气过程的环流形势及卫星云图特征分析[J]. 高原气象,2004,23(6):787-794.
- [11] 尤莉,徐玉强,程玉琴. 赤峰地区冰雹天气的环流特征及其预报[J]. 气象,2006,23(4):101-105.
- [12] 丁建芳,杜春丽,鲍向东,等. 一次冰雹云过程及其冰雹形成机制的模拟研究[J]. 气象与环境科学,2014,37(2):49-57.
- [13] 袁鹏飞,姬鸿丽,刘文玲. 一次罕见大冰雹天气的新一代天气雷达回波分析[J]. 气象与环境科学,2012,35(1):62-66.
- [14] 丁小剑,唐明晖,陈德桥. 两次冰雹过程多普勒天气雷达产品的对比分析[J]. 气象与环境科学,2010,33(2):42-47.
- [15] 张燕,程相儒,康永义,等. 准噶尔盆地南缘两例强冰雹天气过程对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2008,2(2):49-52.
- [16] 张俊兰,张宁. 2009年阿克苏两次冰雹天气的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2011,5(2):28-31.
- [17] 张磊. 一次局地强冰雹的多普勒雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(4):26-30.
- [18] 李圆圆,支竣,张超. 2013年6月喀什地区一次强冰雹天气的成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(2):19-26.
- [19] 康凤琴,张强,马胜萍,等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理[J]. 高原气象,2004,23(6):749-757.
- [20] 孙旭映,渠永兴,王坚. 地理因子对冰雹形成的影响[J]. 干旱区研究,2008,25(3):452-456.
- [21] 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.
- [22] 臧传花, 李淑珍. 逐步消空法预报西北气流条件下的山区暴雨[J]. 气象, 2005, 31(8): 42–45.
- [23] 杨仲江, 唐晓峰. 逐步消空法在上海雷电潜势预报中的应用[J]. 气象科学, 2009, 29(6): 810–814.
- [24] 孔燕燕, 彭治班, 赵秀英, 等. 寻找降雹预报指标集的一种方法: 逐步消空法[J]. 气象, 2000, 26(10): 10–15.
- [25] 冯民学, 周俊驰, 曾明剑, 等. 基于对流参数的洋口港地区雷暴预报方法研究[J]. 气象, 2012, 38(12): 1515–1522.
- [26] 钱莉, 杨晓玲, 殷玉春, 等. 最优子集回归在武威市降水客观预报中的应用[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 895–900.

Application of the Stepwise Decreasing FAR Method to Hail Forecast in the Eastern Qilian Mountains

QIAN Li^{1,2}, TENG Jie¹, YANG Xin³, BAI Guoqiang³

(1. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733000, China; 2. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China; 3. Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The 4 280 samples and 114 hail cases from March to September during 1992–2012 at five stations in the eastern Qilian Mountains were selected and the NCEP/NCAR reanalysis data in the same period were used to construct 104 kinds of convection parameters to reflect the local convective weather features by using the difference methods including calculus of differences, weather diagnostics, combination of factors, etc. On the basis of synoptic type, the correlation coefficient between each convection parameter and hail day in the same period was calculated by using the method of point biserial correlation coefficient. Factors with good correlation and obvious physical meaning were selected as candidate factors, then the stepwise decreasing FAR method was used to introduce the factor one by one according to the empty forecast rate threshold set. When it was less than the threshold requirement, the introduction of the factor was ended. The forecasting model was used to examine the forecasting results during 2013–2014, the accuracy rate of prediction could reach 45.5% without omission forecast, the forecast effect was better.

Key words: convection parameter; the stepwise decreasing FAR method; hail; the eastern Qilian Mountains