

宝鸡市陇县冰雹气候特征和新型预警指标研究

孟妙志, 张向荣, 王仲文, 巨欢颜, 任欢 (陕西省宝鸡市气象局, 陕西宝鸡 721006)

摘要 利用1980—2016年陇县的冰雹资料, 采用数理统计方法, 分析近37年来陇县冰雹时空特征; 利用多普勒雷达资料对风暴发展特征进行统计分析, 探讨上游风暴对陇县风暴的指标性和大小冰雹的回波特征、区别。结果表明, 陇县冰雹频次5.2次/a, 其中直径>2 cm的大冰雹频次为1.1次/a, 冰雹主要集中在6、7、8月, 最多发生于14:00—17:00; 陇县冰雹主要在北部, 上游交界的乡镇形成东西向带状多雹区; 陇县冰雹均自上游组合反射率因子(CR)≥45 dBz 风暴移入陇县发展, 自西北路华亭移来占主体, 单体移入陇县时间为18~100 min; 风暴CR≥60 dBz、出现旁瓣回波和三体散射对应有大冰雹, 风暴CR≥55 dBz、出现旁瓣回波对应有小冰雹; 关注上游CR≥45 dBz 风暴动向, 可提前预警陇县冰雹。雷达冰雹指数(HI)、风暴追踪信息(STI)产品可参考发布预警。

关键词 冰雹; 气候特征; 雷达特征; 预警指标; 宝鸡陇县

中图分类号 S427 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)23-0165-04

Study on Climatic Characteristics and New Early Warning Index of Hail in Longxian County of Baoji City

MENG Miao-zhi, ZHANG Xiang-rong, WANG Zhong-wen et al (Baoji City Meteorological Bureau of Shanxi Province, Baoji, Shanxi 721006)

Abstract Using the hail data of Longxian in 1980–2016, the mathematical characteristics of hail in Longxian County were analyzed by mathematical statistics. Using the Doppler radar data to analyze the characteristics of storm development, and discuss the characteristics of upstream storm on the indicators of Longxian storm and the echo characteristics of hail. The results showed that the hail frequency was 5.2 times/a in Longxian County, and the hail frequency was 1.1 times/a with a diameter greater than 2 cm. The hail was mainly concentrated in June, July, August and occurred at 14:00–17:00. The hail of Longxian County was mainly in the north, towns upstream junction formed the east–west banded hail area. The hail of Longxian County from the upstream CR≥45 dBz storm into the development of Longxian County, since the north–west Huating moved to the main body, monomer moved to Longxian County for 18–100 min. Side echo was related to small hail while thunderstorm CR≥55 dBz, and further three body scattering means large hail while thunderstorm CR≥60 dBz. Therefore, the motion of upstream hail (CR≥45 dBz) could indicate the hail produced in Longxian County. Hail index(HI) and storm tracking information(STI) from radar can be considered as a reference for releasing warning of hail.

Key words Hail; Climatic characteristics; Radar characteristics; Early warning indicators; Longxian County of Baoji

陕西省宝鸡市陇县位于六盘山雹源影响区, 是宝鸡冰雹发生次数最多、雹灾影响最重的县区, 每年都有冰雹天气出现, 易成灾^[1]。宝鸡多普勒雷达已于2008年6月启用, 但目前预报、人工防雹仍使用基于711雷达的参考指标^[2-3], 缺乏利用多普勒雷达的预报预警指标。陇县2015年7月18日、2016年6月12日均出现大冰雹, 对陇县烤烟、玉米等农作物造成了严重的灾害, 引起社会的高度关注。笔者利用1980—2016年陇县记录资料和宝鸡多普勒雷达资料, 统计分析近37年来陇县冰雹气候特征和雷达特征, 提炼基于多普勒雷达的新型短临预报预警指标, 为及时防灾减灾提供依据。

1 资料与方法

利用陇县气象局人工影响天气办公室完整记录的1980—2016年冰雹资料, 采用数理统计方法, 分析近37年来陇县冰雹时空特征。利用多普勒雷达资料对风暴发展特征进行统计分析, 探讨上游风暴对陇县风暴的指标性和大小冰雹的回波特征、区别。

统计标准: 有冰雹发生时间和地点的记录, 以乡镇为单位统计。气象上, 根据冰雹直径尺寸, 分为大冰雹、小冰雹, 直径≥2 cm为大冰雹, 直径<2 cm为小冰雹。经统计, 2008—2016年陇县出现5例大冰雹和31例小冰雹过程。

2 陇县冰雹气候特征

2.1 年分布 近37年来陇县冰雹总次数为193次, 年频次5.2次/a。冰雹年分布最多为1983年的12次; 最少为1995年的0次; 有7年冰雹出现次数大于9次, 分别为1980年11次、1982年10次、1983年12次、1991年11次和2002年10次、1981年9次和2015年9次(图1)。

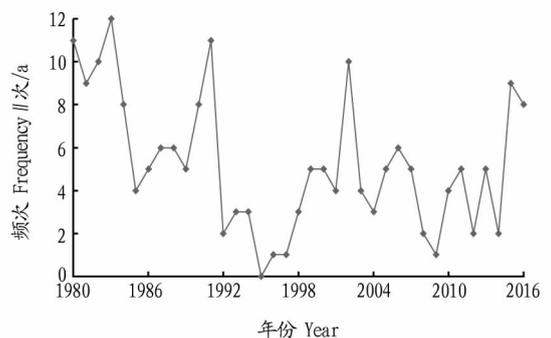


图1 1980—2016年陇县冰雹年分布

Fig. 1 Annual distribution of hail in Longxian County from 1980 to 2016

2.2 月分布 陇县冰雹出现在3—10月, 主要出现于6—8月, 冰雹频次分别为1.4、1.1、1.0次/a, 6月最多; 3和10月均仅出现1次冰雹。单月冰雹发生最多: 6月7次(2016年)、7月4次(2015年)、8月5次(1983年)、9月4次(1991年)、5月3次(2002年)。由此可见, 近37年来陇县冰雹年年有, 6月至少1次。

37年中, 直径>2 cm的大冰雹出现总次数为39次, 年

基金项目 陕西省气象局重点科研项目(2016z-5)。

作者简介 孟妙志(1964—), 女, 甘肃平凉人, 高级工程师, 从事天气预报及其研究工作。

收稿日期 2017-07-21

频次 1.1 次/a, 最多年份为 1991 年, 共 5 次, 次多为 1999 年, 共 4 次, 2007 年共 3 次; 有 12 年未观测到大冰雹。大冰雹出现于 4—9 月, 集中出现在 6—8 月, 累计分别为 10、9、8 次, 9 月有 6 次, 5 月 4 次, 4 月为最少, 仅有 2 次。单月大冰雹发生最多 2 次(6、7、8、9 月均 2 次)。由此可见, 陇县每年 6 月最易有冰雹、大冰雹出现。

2.3 日分布 近 37 年来陇县冰雹出现在 09:00—22:00, 主要出现在 13:00—20:00, 最多集中在 14:00—17:00, 这个时段是防雷重点。

2.4 空间分布 以乡镇为单位统计, 陇县冰雹呈现自北向南减少分布(图 2), 冰雹主要在北部, 大冰雹与冰雹分布一致: 与上游甘肃交界的乡镇形成多雹区(东西向带状), 新集川最多(43 次), 火烧寨次多(34 次), 河北、李家河、固关数量相当(30 次), 排第 3。陇县冰雹分布是六盘山雹源的直接反映。

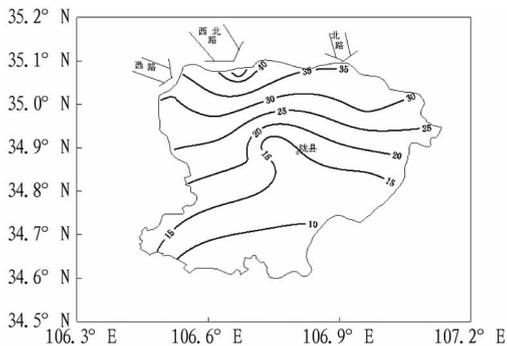


图 2 1980—2016 年陇县冰雹累计次数空间分布(单位:次)

Fig. 2 The space distribution of hail cumulative times in Longxian County from 1980 to 2016

3 陇县冰雹多普勒雷达特征

3.1 冰雹风暴路径 经统计, 陇县上游午后发展的强对流对陇县对流天气有关联指示性, 陇县的冰雹风暴均自上游移入陇县发展, 陇县冰雹与上游雷达组合反射率因子(CR) ≥ 45 dBz 风暴单体关联度 100%。

原始风暴在上游形成, 风暴自西北向东南移进陇县, 移入影响陇县的路径, 如图 2 中箭头所示, 分为西路(天水张家川)、西北路(华亭)、北路(崇信)。经统计, 大冰雹有 2 例西北路、1 例西路、2 例北路; 小冰雹主要为西北路, 仅 1 例西路, 1 例北路。可见, 陇县冰雹风暴自西北路移来居多, 即华亭移来占主体, 因此与华亭毗邻的新集川成为陇县冰雹中心。

统计显示, 原始风暴在上游华亭、崇信形成为 CR ≥ 45 dBz 单体后移入陇县的时间, 大冰雹为 20~74 min, 平均 46 min, 小冰雹为 18~43 min, 平均 33 min。大冰雹风暴酝酿时间长、移动较慢, 小冰雹风暴移动较快。

陇县冰雹与上游 CR ≥ 45 dBz 对流单体关联度 100%, 原始风暴在上游华亭形成为 CR ≥ 45 dBz 单体后移入陇县的时间平均 30~40 min, 据此气象台可在上游出现 CR ≥ 45 dBz 的风暴时提前发布短临预报, 人工影响天气办公室及时进行防雷作业准备, 风暴移近陇县边界提前发布冰雹预警信号。

3.2 冰雹雷达因子统计 三体散射和旁瓣回波是风暴产生

冰雹的指示性特征, 统计显示, 陇县大冰雹单体回波强度高, CR 为 60~65 dBz、垂直累积液态含水量(VIL) 为 55~65 kg/m², 均出现旁瓣回波和三体散射, 三体散射维持 12~36 min, 平均 28 min; 风暴三体散射出现 1~2 个体扫开始降冰雹; 陇县小冰雹单体回波强度较强, CR 为 55~60 dBz、VIL 为 45~60 kg/m², 仅出现旁瓣回波。6°仰角最先出现旁瓣回波和三体散射特征, 因此结合 CR 强度、通过高仰角产品特征回波可及时发现风暴冰雹特征。

强单体风暴降雹同时会激发新单体, 2 个单体先后影响造成二次降雹。大冰雹小冰雹各均有 4 例为 2 个单体先后影响陇县降雹。因此, 需高度关注强单体可能造成二次降雹。

4 典型大冰雹个例雷达分析

2015 年 7 月 18 日 15:00—17:00, 宝鸡陇县出现冰雹天气, 降雹持续 30~40 min, 最大直径 4 cm, 同时出现短时强降雨、7 级以上大风。2016 年 6 月 12 日 18:00—20:00, 宝鸡陇县出现雷阵雨伴冰雹天气, 先后 2 次降雹, 累计时间 35 min, 冰雹最大直径 2 cm。“2015. 7. 18”“2016. 6. 12”这 2 次大冰雹天气集中发生于陇县, 雷达显示, 对流风暴均自上游华亭生成、东南向移入陇县发展降雹, 强度大、致灾重。

4.1 “2015. 7. 18”过程雷达特征分析

4.1.1 回波演变特征。 陇县强对流历时 2 h(18 日 15:00—17:00), 先后受 2 个单体风暴 A、B 影响, A 是 15:00 自上游华亭移入陇县, 15:09—16:04 影响陇县, 连续 5 个体扫出现三体散射和旁瓣回波, 回波中心强度 60~65 dBz、VIL 值 55~64 kg/m², 且梯度很大, 对应陇县出现第 1 次降(大)冰雹持续 20 min 左右。单体 A 减弱时在右后一侧形成单体 B, 16:11—17:00 影响陇县, 连续 4 个体扫出现三体散射, 中心强度 60~64 dBz、VIL 值 50~68 kg/m², 且梯度很大, 对应陇县出现第 2 次降冰雹、持续 15 min 左右。由图 3 可见, 单体 A、B 为中心强度大、结构紧密、梯度大的风暴。当单体 CR ≥ 60 dBz 且 VIL ≥ 55 kg/m² 出现三体散射和旁瓣回波对应降大冰雹。

4.1.2 超级单体特征。 0.5°、2.4°仰角反射率因子图(图 4a₁、a₂) 和 1.5°仰角径向速度图(图 4b) 显示, 单体 A 三体散射特征明显, 有勾状回波形态, 双箭头指向风暴的低层入流缺口; 而 6.0°仰角的图中雷达反射率因子(R) ≥ 55 dBz 强回波中心落在低层弱回波处(图 4a₃), 即低层入流缺口对应的弱回波区之上有一个强回波悬垂。沿雷达径向通过最强反射率因子核心做垂直剖面, 结果发现, 强回波悬垂明显; 回波悬垂上 R ≥ 50 dBz 高度达到 9 km, 远在当日 -20℃层(7.6 km) 以上, 剖面左侧的强回波(达 65 dBz) 对应大冰雹的下降通道, 已经接地对应陇县出现直径 4 cm 的大冰雹。

中气旋是雹暴的重要特征^[4], “2015. 7. 18”过程中雷达产品未识别出中气旋, 经过人工退模糊后, 人工可识别出中气旋, 中气旋持续 5 个体扫。中气旋、勾状回波形态表明单体 A 是超级单体风暴。

4.2 “2016. 6. 12”过程雷达特征分析 17:56—18:45, 风暴

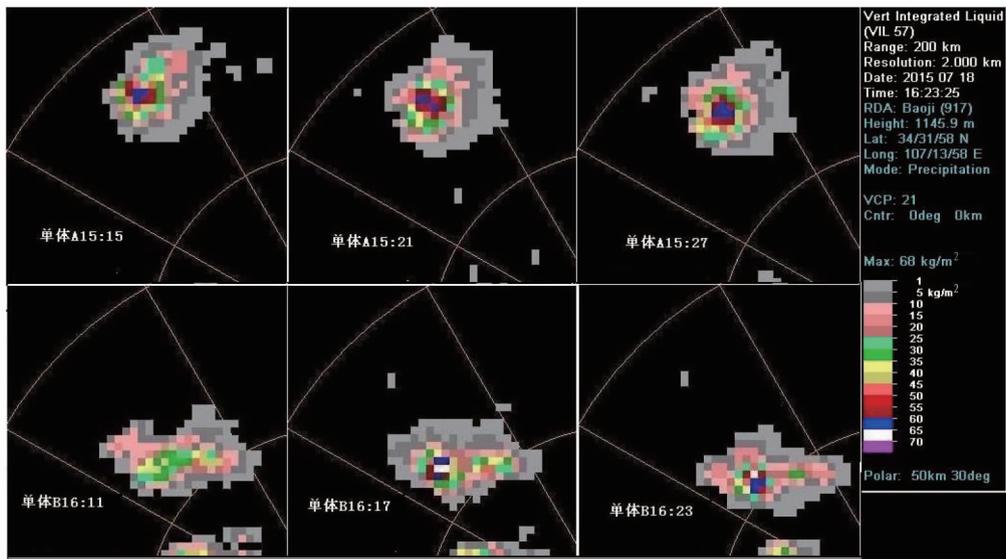


图3 2015年7月18日宝鸡多普勒雷达中风暴单体A、B垂直累积液态含水量演变

Fig.3 The VIL for storm A and B from Baoji Doppler radar on July 18, 2015

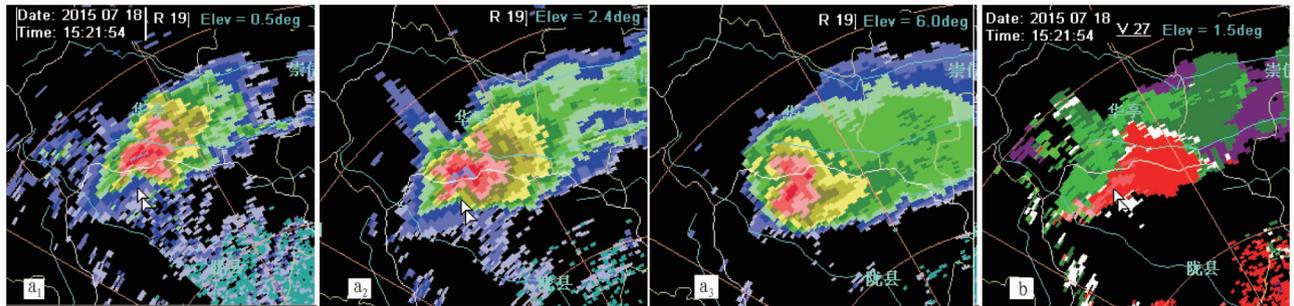


图4 2015年7月18日15:21宝鸡多普勒雷达反射率因子 0.5° (a₁)、 2.4° (a₂)、 6.0° (a₃)和径向速度 1.5° (b)

Fig.4 The reflectivity factor 0.5° (a₁), 2.4° (a₂), 6.0° (a₃) and radial velocity(b) from Baoji Doppler radar at 15:21 on July 18, 2015

单体A1影响陇县,持续6个体扫有三体散射和旁瓣回波特征(图5a、b),CR最大强度为60~65 dBz, VIL中心值达 60 kg/m^2 ,且梯度大,陇县持续20 min降直径2 cm冰雹。风暴A1减弱时其右前一侧发展新风暴单体A2,影响陇县(图5),风暴A2持续5个体扫三体散射和旁瓣回波特征,CR达到60~65 dBz, VIL中心值达 69 kg/m^2 ,且梯度很大,对应陇县出现15 min降直径2 cm冰雹。

由6月12日陇县产生冰雹的2个单体旺盛阶段(A1单体18:21和A2单体18:58)的剖面图(图6)可见,2个单体强反射率中心高度达6 km以上,强回波达9 km,三体散射特征明显。对应的径向速度剖面显示,A1、A2风暴单体中心6 km高度上均有径向辐合(对应强回波中心),这是风暴强烈发展的动力,在风暴后侧低层均有径向辐散。

综上所述,陇县“2016.6.21”冰雹是强单体风暴过程,强对流历时100 min(17:56—19:36)先后受2个强单体风暴影响,A1风暴6个体扫、A2风暴5个体扫持续三体散射和旁瓣回波特征,对应出现两轮大冰雹。

4.3 最强回波特征 VIL产品是判断冰雹等灾害性天气的有效指标之一。降雹单体尤其是强降雹单体在成熟前期有明显VIL跃增现象^[5],在VIL达到最大值后开始降雹。统计

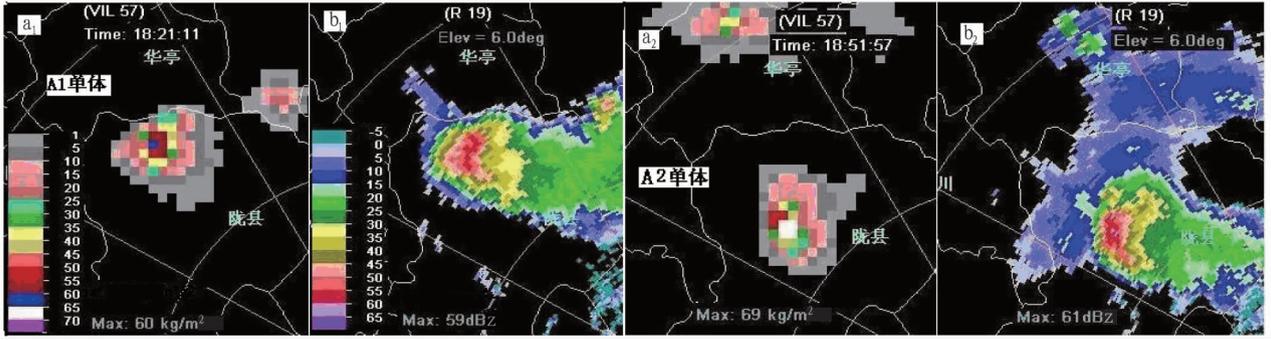
“2015.7.18”和“2016.6.12”2次大冰雹过程中风暴单体主要时段VIL最大值演变可见,2次过程中风暴单体发展迅速,经1~2个体扫VIL值跃增至最大(60 kg/m^2),降雹后快速下降为 40 kg/m^2 。

定义风暴单体VIL与顶高之比为VIL密度。有研究表明,风暴单体VIL密度超过 4 kg/m^3 ,单体会产生大冰雹^[6]。由表1可见,2次风暴单体内最大反射率因子均超过60 dBz,最大65 dBz,对应高度在6~7 km;45 dBz回波高度10~11 km;回波顶高13~15 km。其中VIL为 $60 \sim 69 \text{ kg/m}^2$,VIL密度 $4.4 \sim 4.7 \text{ kg/m}^3$ 。

综上所述,2次过程中风暴单体出现三体散射和旁瓣回波时,CR ≥ 60 dBz、VIL持续 $\geq 55 \text{ kg/m}^2$ 且VIL密度 $> 4 \text{ kg/m}^3$,对应有大冰雹产生。

4.4 冰雹指数和风暴追踪信息产品使用检验 对流风暴能否产生冰雹及风暴未来影响区域是短临预报预警的重点、难点,宝鸡雷达冰雹指数(HI)和风暴追踪信息(STI)产品是短临预报业务中的参考,现对这2次大冰雹过程的预测产品进行检验。

HI产品识别出2次过程风暴可能产生冰雹:预测产生大冰雹的概率为100%、冰雹最大直径为6 cm左右。



注:a₁、b₁ 为 A1 单体 18:21;a₂、b₂ 为 A2 单体 18:58

Note:a₁ ,b₁ is A1 monomer 18:21;a₂ ,b₂ is A2 monomer 18:58

图5 2016年6月12日宝鸡多普勒雷达 VIL(a)和 6.0°反射率因子(b)

Fig.5 The VIL(a) and 6.0° reflectivity(b) from Baoji Doppler radar on June 12,2016

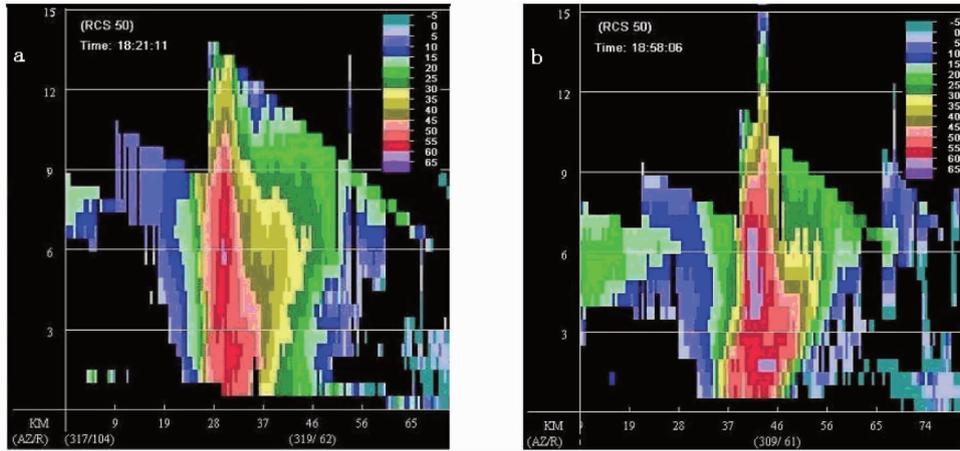


图6 2016年6月12日18:21 A1单体(a)和18:58 A2单体(b)宝鸡雷达反射率因子剖面

Fig.6 The vertical cross section of radar reflectivity from Baoji at 18:21 A1 monomer(a) and 18:58 A2 monomer(b) on June 12,2016

“2015.7.18”过程,7月18日15:15—15:46、16:23—16:48大冰雹概率100%、预测冰雹直径5.7cm,与实况降雹4.0cm比较略偏大。“2016.6.12”过程,18:08—19:16持续预测风暴产生大冰雹的概率为100%、冰雹直径为3~6cm,与实况降雹2cm比较,预报冰雹直径偏大。分析可见,当单体CR

≥60dBZ且VIL≥55kg/m²,即对应单体出现三体散射时段,HI产品预测大冰雹的概率为100%,且预测大冰雹出现(较实况)早、结束晚,即预测降雹时间长、有提前量,因此可参考冰雹指数产品发布预警。

表1 大冰雹风暴单体特征值

Table 1 Monomer of large hail characteristic value

时间 Time	最大反射率因子 Maximum reflectivity factor//dBz	最大反射率因子高度 Maximum reflectivity factor height//km	回波顶高 Echo top high//km	45 dBZ 回波高度 45 dBz echo height//km	VIL kg/m ²	VIL 密度 VIL density kg/m ³
2016-06-12 18:21	60	6.5	13.5	10.5	60	4.4
2016-06-12 18:58	64	7.0	15.0	10.0	69	4.6
2015-07-18 15:21	65	6.0	13.5	10.0	63	4.7
2015-07-18 16:23	60	7.0	14.5	10.5	68	4.7

STI产品提供未来1h、每15min的风暴移动路径预测。对比2次过程风暴实际轨迹和STI产品预测风暴路径发现,2次过程引导气流均为西北气流,“2015.7.18”过程中预测路径偏向风暴右侧、移速差别小,略偏快;“2016.6.12”过程中预测路径偏向风暴左侧、移速偏快。雷达预测风暴路径与风暴实际轨迹夹角在30°以内。由此可见,雷达预测风暴路径与风暴轨迹存在误差,使用时可考虑预测风暴路径左右30°区域受风暴影响。

5 结论

(1)陇县冰雹年频次为5.2次/a,而大冰雹年频次为1.1次/a,陇县每年至少出现1次冰雹;大冰雹和冰雹分布一致:主要在北部,与上游甘肃交界的5个乡镇形成东西向带状多雹区,新集川冰雹最多。

(2)陇县冰雹与上游CR≥45dBZ风暴直接相关,上游风暴经西路、西北路、北路移入陇县发展,其中经(华亭)西北路(下转第203页)

原材料需求量的基础上更能有效进行科学合理地原材料采购,减少原材料订货成本与存储费用。

表 2 用 S-M 法得到的原材料订货批量

Table 2 Quantities of ordered raw materials obtained by S-M method

时段 Time interval 月	需求 U(i) Demand U(i) 件	订货区间 Order interval	订货量 Order quantity 件	订货成本 Ordering cost 元	存储成本 Storage cost 元	总成本 Total cost 元
1	4 000	1	8 000	20 000	20 000	40 000
2	4 000	1				
3	4 000	2	8 000	20 000	20 000	40 000
4	4 000	2				
5	4 000	3	4 000	20 000	0	20 000
6	5 000	4	5 000	20 000	0	20 000
7	5 000	5	5 000	20 000	0	20 000
总计 Total	30 000		30 000	100 000	40 000	140 000

4 结语

该研究以中小型农机制造企业为研究对象,根据农机的季节性、周期性、阶段性等特征构建了一个生产周期内的生产存储决策模型,并进行了实例验证。得出如下结论:

(1) 在市场需求增长率和需求迁移率已知的情况下,备货期的长度不仅直接影响产品的库存成本,也间接影响后期生产成本,合理地选取备货期开始时刻对整个生产周期内的生产存储策略而言至关重要。

(2) 根据库存量的变化进行阶段性的产能调整是减少成本的一项有效措施,恰当的产能调整策略能使得生产成本与存储成本之和达到一个最小值。

该研究是建立在以月为生产单位的情况下,针对生产柔性更强的企业,若继续对生产阶段进行细分,能更加高效地安排生产存储策略,为企业降低成本。

参考文献

- [1] 张华光. 2015 年农机市场十大关键词 [EB/OL]. (2016-02-18) [2017-03-11]. <http://www.cinn.cn/zbzz/nyjx/353205.shtml>.
- [2] 胡飞. 生产系统的经济批量与速率控制模型研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [3] 胡运权. 运筹学基础及应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [4] 王周宏. 运筹学基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.

- [5] PANDA S, SENAPATI S, BASU M. Optimal replenishment policy for perishable seasonal products in a season with ramp-type time dependent demand[J]. Computer and industrial engineering, 2008, 54(2): 301-314.
- [6] PENG S Y. Optimal replenishment policy for product with season pattern demand[J]. Operations research letters, 2005, 33(1): 90-96.
- [7] JIA J X, HU Q Y. Dynamic ordering and pricing for a perishable goods supply chain[J]. Computer and industrial engineering, 2011, 60(2): 302-309.
- [8] 林欣怡, 文晓巍, 达庆利. 随机生产中拖后需求的变质产品最优生产策略[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(4): 731-736.
- [9] 杨涛, 古福文. 一类变质性物品在不稳定生产系统中的最优生产库存策略[J]. 物流技术, 2009, 28(3): 127-129, 147.
- [10] 周思宇, 古福文. 一类变质性物品的最优生产-库存策略[J]. 物流技术, 2007, 26(4): 43-46.
- [11] SARKAR B, MOON I. An EPQ model with inflation in an imperfect production system[J]. Applied mathematics and computation, 2011, 217(13): 6159-6167.
- [12] WEE H M, WANG W T. A supplement to the EPQ with partial backordering and phase-dependent backordering rate[J]. Omega, 2012, 40(3): 264-266.
- [13] 陈宪章, 汪定伟, 刘崇. 冲击型负荷下的生产存储模型研究[J]. 管理科学学报, 2004, 7(4): 33-39.
- [14] 周凌, 杜文. 基于柔性产能的季节性产品生产决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(11): 2863-2868.
- [15] 何亚豪, 从锦玲, 坎杂, 等. 气力式精量排种器辅助夹持装置凸轮轮廓曲线的设计与仿真[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 391-396.

(上接第 168 页)

移入陇县的居多, 对应新集川冰雹(大冰雹)最多。上游原始风暴移入陇县的时间为 18~100 min, 据此气象台可提前发布冰雹预警信号, 人工影响天气办公室及时进行防雷作业准备。

(3) 风暴出现旁瓣回波和三体散射将产生大冰雹, 风暴只出现旁瓣回波产生小冰雹。强单体风暴会激发新单体, 造成二次降雹。

(4) 雷达分析表明, “2015. 7. 18”和“2016. 6. 12”2 次大冰雹非常典型, 自上游华亭移入发展的强单体风暴及其右后一侧产生新单体风暴, 致陇县产生两轮降雹。其中“2015. 7. 18”过程是有勾状回波形态、存在中气旋的超级单体风暴, “2016. 6. 12”过程是强单体风暴。

(5) 大冰雹产生于风暴 $VIL \geq 55 \text{ kg/m}^2$ 且 $CR \geq 60 \text{ dBz}$ 出现三体散射和旁瓣回波特征的时段; 风暴三体散射出现

1~2 个体扫开始降冰雹。

(6) 雷达 HI、STI 产品可参考发布预警。HI 产品预测风暴产生大冰雹的概率 100% 具有提前量、预测冰雹尺寸偏大。未来风暴影响地可考虑 STI 产品预测风暴路径左右 30° 区域。

参考文献

- [1] 刘引鸽, 文彦君, 张转霞. 陇县冰雹灾害特征分析[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2007, 27(2): 159-163.
- [2] 李金辉. 陇县防雷作业前后雷达回波变化分析[J]. 陕西气象, 2009(6): 9-12.
- [3] 李金辉, 樊鹏. 冰雹云提前识别及预警的研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 114-119.
- [4] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 106.
- [5] 刁秀广, 朱君鉴, 黄秀韶, 等. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1131-1138.
- [6] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 57-65.