王若升,张 彤,樊晓春,等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):373-377, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0373

甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析

王若升[1],张 彤[2],樊晓春[1],王丽娜[1],赵 果[2],吴颖娟[1]

(1. 甘肃省平凉市气象局,甘肃 平凉 744000;2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要:利用甘肃平凉市7个气象台站1965~2011年冰雹观测资料详细分析了平凉冰雹的时空分布特征、气候特征。同时利用2003~2011年平凉辖区内乡镇冰雹观测资料和冰雹日探空资料及2009~2011年雷暴云多普勒雷达资料分析了平凉市冰雹日的层结特征及雷达回波特征。分析结果表明:平凉市冰雹高发区位于六盘山和关山山脉两侧的华亭、庄浪和崆峒区。1980年代是降雹的高峰期,1990年代至今冰雹发生的次数是减少的。一日中冰雹天气主要发生在17~22时。对流层上层(300~600 hPa)不稳定是平凉降雹的主要特征。平凉冰雹云回波强度>50 dBZ,回波顶高度在8 km以上,垂直液态含水量在20 kg·m^{-2},强中心平均高度在6 km左右,45 dBZ回波高度高于0 ℃层高度2 km。

关键词:冰雹;气候特征;回波特征

文章编号:1006-7639(2013)-02-0373-05 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0373

中图分类号:P458.1^{+}21.2 **文献标识码**:A

引 言

冰雹天气由于其空间尺度小、生命史短、突发性强、发展演变迅速、破坏力大,预报难度极大而深受人们的关注。冰雹是影响甘肃平凉市的主要气象灾害,且常伴有短时强降水、大风等,对人民生活、生命财产安全造成严重危害,加之平凉市地处黄土高原,多山地、丘陵地区,地形复杂,天气多变,冰雹多,危害重。目前对这类天气的预报手段有限,国内外利用加密的中尺度观测及卫星、雷达资料,采用变分同化技术融入非静力中尺度模式等方法研究该类天气[1]。天气雷达从半个多世纪以前开始应用于气象领域,一直是监测和预警强对流天气的主要工具,特别是我国新一代多普勒天气雷达网的建设,使得雷达的性能大大提高,对于雷达的使用效率也有很大提高。吴爱敏等通过新一代天气雷达观测,利用基本数据产品和物理量产品,分析了庆阳市冰雹过程中雷达回波强度、速度、云顶高度、垂直积分液态含水量的特征[2],为冰雹预报提供了可靠的依据,但由于各地气候等条件差异,应用不尽相同。本文利用平凉市7县区近47 a的冰雹基本观测资料和近3 a的多普雷达回波资料,分析了平凉市冰雹的时空分布特征、环流背景、冰雹天气的层结参数特征及雷达回波特征,探索平凉市冰雹短时临近预报方法,为平凉市人工消雹和防灾减灾工作提供参考。

1 资料说明

所用资料为平凉市7县区1965~2011年气象部门测站冰雹观测资料,2003~2011年平凉、民勤、兰州、银川站的探空资料,2009~2011年平凉市102个雷暴单体(其中普通雷电单体35个,短时强降水33个,冰雹单体34个),固原、西峰新一代天气雷达资料,包括基本反射率、组合反射率、基本速度、回波顶高、垂直积分液态含水量等产品。

2 冰雹天气的气候特征

2.1 冰雹天气的空间分布特征

分析平凉市7县区气象台站1965~2011年47

收稿日期:2012-10-09;**改回日期**:2012-12-18

基金项目:中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开发基金项目(LPCC201107)资助

作者简介:王若升(1974-),男,高级工程师,主要从事短期天气预报研究. E-mail:plwrs@163.com

a 的降雹日数分布(图 1),可以看出降雹次数分布有明显的地域特点,自中部向东西 2 侧降雹次数趋于减少,中部的华亭、南部的庄浪冰雹次数最多,降雹日为 91、83 次,崆峒为次多,降雹日数为 75 次。东部的泾川次数最少,平均每年不到 1 次。可见沿着六盘山脉和关山 2 侧的区域为平凉市降雹中心,张鸿发等研究指出[3-5],在六盘山东侧,沿六盘山南北走向,强雷达回波频数等值线形成一带状,带上有几个相对大的中心,说明山脉起着对雷暴云强回波频数增加的作用,这可能是山脉下坡作用和背风波作用等影响的结果。

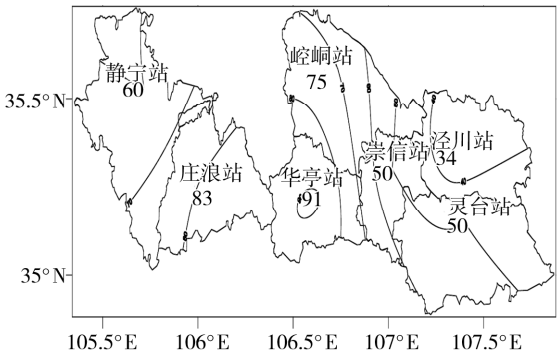

图 1 1965 ~ 2011 年平凉降雹总次数分布

Fig. 1 Spatial distribution of total hail days from 1965 to 2011

2.2 冰雹天气的时间变化特征

2.2.1 冰雹的年代际及年际变化

平凉市各气象台站在近 47 a 中共计出现冰雹 440 次,其中 1965 ~ 1970 年中共计 69 次,平均每年 11.5 次;1970 年代共出现 111 次,平均每年 11.1 次;1980 年代 143 次,平均每年 14.3 次;1990 年代 68 次,平均每年 6.8 次;2001 年至 2010 年 45 次,平均每年 4.5 次。可见 1980 年代是降雹的高峰期,1990 年代至今冰雹相对较少,总的趋势来看,冰雹发生的次数是减少的。

从 1965 ~ 2011 年的逐年降雹时序图上看(图 2),冰雹的年际变化显著,降雹发生最多的是 1984 年,降雹次数为 25 次,2009 年最少,没有冰雹发生。从线性趋势可以看出平凉市降雹频率是趋于减少的,每 10 a 减少 2.2 次,此倾向率通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性 F 检验。

2.2.2 冰雹天气的月分布特征

平凉冰雹的季节性特征非常明显,47 a 来平凉降雹最早的月份为 3 月,出现在 1997 年 3 月 28 日的庄浪县,最晚结束是在 2010 年 10 月 19 日的华亭县,可见 3 ~ 10 月为平凉市降雹期,雹期长达 8 个月。47 a 来各月降雹总数分布图(图 3)可以看出,3 月份开始降雹次数逐月增加,6 月份达到最高,降雹总数为 93 次,每年 6 月份平均降雹 1.98 d,随后又呈逐月下降趋势,其它月份无降雹。主要降雹时段在 4 ~ 9 月,占冰雹总数的 95%。另外统计 3 月和 10 月的降雹区域主要是崆峒、庄浪和华亭,说明六盘山山脉 2 侧冰雹天气来的早,结束晚。

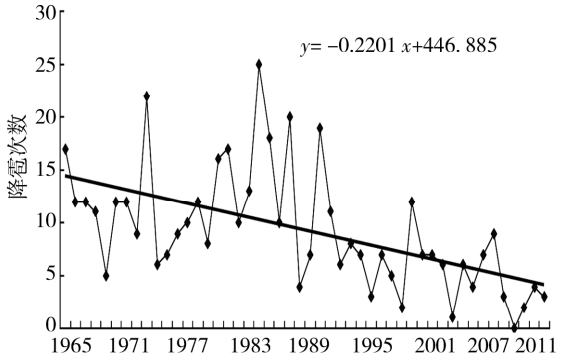

图 2 1965 ~ 2011 年降雹时间序列和线性趋势

Fig. 2 Time series and trends of annual hail days from 1965 to 2011

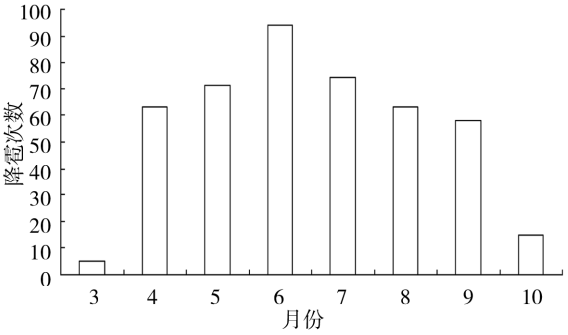

图 3 1965 ~ 2011 年降雹月分布

Fig. 3 The monthly total hail days from 1965 to 2011

2.2.3 冰雹天气发生的日变化特征

计算 1965 ~ 2011 年不同时段发生冰雹的百分率(图 4)可以看出,平凉市冰雹的日变化特征也非常明显。降雹的主要时段集中在午后至傍晚时分,尤以傍晚时分发生频率最高,上午和 23 时以后没有降雹发生。下午 17 时前平凉冰雹的发生率较小,12 ~ 17 时降雹发生率为 6.5%,17 时起降雹概率逐渐增加,并于 20 时左右冰雹发生率达最大,占冰雹总数的 27.4%,后逐渐降低,22 时以后降雹很小只占冰雹总数的 2.9%,17 ~ 22 时降雹发生率达 90.6%,大部分冰雹发生在午后至傍晚时分,说明热力条件在冰雹天气发生时起重要作用。

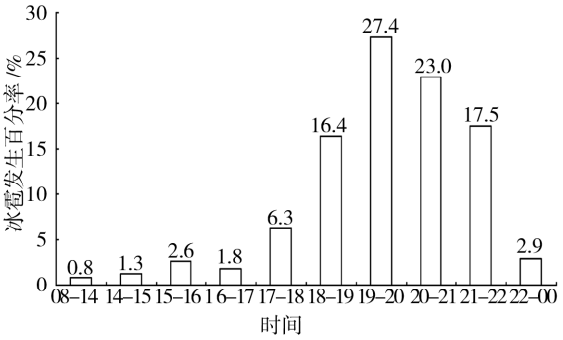

图 4　一日中各时段发生冰雹的百分率

Fig. 4　The percentage of the hail occurrence during the different time of a day

3　冰雹天气的天气学特征

3.1　冰雹天气环流背景特征

冰雹天气是局地强对流系统,它的发生往往是在一定的大尺度环流背景下[6-14],王若升等对平凉市冰雹发生当日或前一日 08 时 500 hPa 的天气图进行了合成分析[6],总结了平凉冰雹天气发生时主要的环流形势背景:57% 的冰雹天气发生在蒙古冷涡控制的天气背景下,有 25% 的冰雹天气受河套低压槽影响,15% 的冰雹天气是西方小槽东移造成,还有 5% 的冰雹天气发生在西南气流中。可见蒙古冷涡是造成平凉降雹的主要天气形势,这种形势往往持续数日,造成平凉连续数日降雹。

3.2　冰雹天气发生时的探空层结特征

强对流天气是一种强烈的对流运动,其发生要求有一定的不稳定能量的积累[11]。利用 2003 ~ 2010 年平凉市 7 县(区)境内发生的 356 次强对流天气过程,其中冰雹过程 73 次,统计冰雹天气过程前一天和当日平凉本站及周边地区兰州、银川的探空资料发现,冰雹发生日 08 时或 20 时平凉探空层结有明显的特征。

3.2.1　层结稳定度

统计发现冰雹发生前一日的 08 时或 20 时平凉及其上游民勤、兰州、银川站的探空层结至少有 2 站表现为条件不稳定,且平凉低层都有逆温层。由表 1 可以看出降雹当日平凉本站层结有如下特征:对流层上层的不稳定能量明显增大,冰雹日对流层上层平均温差明显高于普通雷暴日,降雹日 20 时 500 与 300 hPa 的温差平均为 25.4 ℃,最高为 31 ℃,平均温差高于普通雷暴日 0.6 ℃,这是由于西风带冷槽侵袭时,对流层顶下降,对流层中上层降温造成 600 至 300 hPa 之间的对流层上部不稳定[10];降雹日对流层下层不稳定也很明显,20 时 500 与 700 hPa 之间的温差平均为 19 ℃,最高为 26 ℃,平均温差高于普通雷暴日 2.2 ℃;20 时平均 K 指数为 29.9 ℃,最大为 39 ℃,55.8% 的 K 指数 > 29.9 ℃,平均 K 指数高于普通雷暴日 3.6 ℃;20 时平均 SI 指数为 −0.51,75% 小于 0 ℃,小于普通雷暴 2.1 ℃;20 时 500 与 700 hPa 假相当位温平均差为 −0.66 ℃,高于普通雷暴 2.2 ℃;中低空的风向或风速切变明显,有时层结曲线与露点曲线的分布互呈“喇叭口”,即显著的上干下湿状态。

3.2.2　0 ℃层和 −20 ℃层高度

冰雹的形成需要一定的环境场温度,合适的 0 ℃层和 −20 ℃层高度是冰雹形成的必要条件。统计发现降雹当日 08 时平凉 0 ℃层高度平均为 4.4 km,并随月份先增后降,5 月平均为 4.0 km,6、7、8 月在 4.4 ~ 4.6 km 之间,97% 的 0 ℃层高度在 5 km 之下,91% 的 0 ℃层高度在 4 km 之上。降雹当日 08 时平凉 −20 ℃层平均高度为 7.3 km,也是随月份先增后降,7 月达最大,为 7.6 km,5、6 月最低,为 6.9 km。0 ℃层平均高度比 −20 ℃层平均高度低 2.9 km。同时与普通雷暴日比较发现,冰雹日 0 ℃层平均高度与普通雷暴 0 ℃层平均高度相差不大,而 −20 ℃层平均高度冰雹日较普通雷暴日偏低 0.2 km。

表 1　平凉站冰雹天气平均对流参数

Tab. 1　The average convective parameters of hail weather at Pingliang station

天气	$T_{500}-T_{300}$/℃	$T_{700}-T_{500}$/℃	K	Si	$\theta_{se(500-700)}$
雷阵雨伴冰雹 08 时	25.0	18.8	25.9	1.12	−1.047
雷阵雨伴冰雹 20 时	25.4	19.0	29.9	−0.51	−0.66
雷阵雨 08 时	24.2	16.8	22.12	3.79	1.43
雷阵雨 20 时	24.8	16.85	26.30	1.66	1.57

4 冰雹天气的新一代雷达产品特征

应用 2009 ~ 2011 年平凉市 102 个雷暴单体 cinrad - cd 多普勒雷达资料,其中普通雷暴单体 35 个,短时强降水 33 个,冰雹单体 34 个,统计了冰雹云基本反射率、组合反射率、基本速度、回波顶高、垂直积分液态含水量等产品的特征,分析了冰雹云雷达回波与短时强降水回波及普通雷暴的差异(表 2)。

表 2 平凉冰雹回波特征量平均值

Tab. 2 The average echo characteristics of hail weather at Pingliang station

天气	最大回波强度 /dBZ	回波顶高 /km	强中心高度 /km	最大液态含水量 /(kg/m^3)	45 dBZ 回波顶高 /km
雷阵雨伴冰雹	59.3	11.9	6.2	38.1	8.0
雷阵雨伴强降水	52.5	9.4	3.2	25.1	3.0
雷阵雨	45.1	6.7	3.6	4.9	4.5

4.1 回波强度

统计 3 种云的组合反射率发现冰雹云回波强度最大,平均最大回波强度为 59.3 dBZ,最大 65 dBZ,最小 50 dBZ;短时强降水回波强度较冰雹云弱,平均最大回波强度为 52.5 dBZ,最大达 65 dBZ,最小 40 dBZ;普通雷暴回波强度最弱,平均最大回波强度为 45 dBZ,最大达 60 dBZ,最小 30 dBZ。

4.2 回波顶高

冰雹云发展最旺盛,平均回波顶高可达 11.9 km,最高达 15.2 km,最低 9.1 km;短时强降水次之,平均 9.4 km,最高 13.7 km,最低 5 km;普通雷暴平均顶高 6.7 km,最高 10.7 km,最小 4 km。

4.3 最大垂直积分液态含水量

通过分析冰雹、雷雨大风、短时强降水发生前(30 ~ 60 min)VIL 变化,显示 23 次冰雹强对流天气过程降雹前 1 h 的 VIL 在不断地升高或维持高值,降雹前的 30 min 左右 VIL 值更是跃增,达到过程最大值后地面开始降雹,降雹后 VIL 迅速减小;同时,从最大液态含水量统计可以看出,冰雹云和强降水回波的垂直累积液态含水量明显大于普通雷暴,冰雹云平均最大垂直积分液态含水量达 38.1 kg/m^2、最大达 60 kg/m^2、最小 20 kg/m^2;强降水回波平均最大垂直积分液态含水量达 25.1 kg/m^2、最大 55 kg/m^2、最小 5 kg/m^2,普通雷暴平均 <5 kg/m^2。

4.4 强中心所在高度

我们选用组合反射率(CR)最大值所在高度统计分析表明,3 种云体最大回波强度平均高度差异明显,冰雹云为 6.2 km,短时强降水云团为 3.2 km。而普通雷暴强中心所在高度平均为 3.65 km,也高于强降水回波的高度。

4.5 45 dBZ 强回波顶对应的高度

在多普勒雷达资料中,新的冰雹算法中判断冰雹的主要判据是检验 0 ℃与 -20 ℃高度以上有无超过 45 dBZ 的反射率因子,0 ℃层高度与 45 dBZ 的反射率因子回波顶高度的距离差用于判断冰雹的有无。经统计,平凉市冰雹云 45 dBZ 回波高度平均值为 8 km、最低 7 km,最高 12 km 以上,短时强降水平均值为 3 km、普通雷暴平均值为 4.5 km,可见冰雹云 45 dBZ 回波顶明显高于短时强降水和普通雷暴。

分析 2009 年 46 次雷暴云 45 dBZ 强回波区高度位置及相对于 0 ℃等温线高度的位置,发现冰雹云 45 dBZ 强回波的高度都位于 0 ℃层高度之上,且在 0 ℃层高度 2 km 以上。而短时强降水天气过程 45 dBZ 强回波高度都位于 0 ℃层高度之下;普通雷暴天气 45 dBZ 强回波的高度位于 0 ℃层高度之下,或与 0 ℃层高度差 <1 km。可见 45 dBZ 强回波区高度及相对于 0 ℃等温线高度差是区别冰雹云的一个主要依据。

由以上分析可见平凉地区冰雹云新一代天气雷达产品有明显的特征,冰雹云回波强度、回波顶高度、垂直累积液态含水量、强中心高度等与普通雷暴及短时强降水雷暴有显著的差异,这些差异可作为冰雹天气短时临近预报的主要判断依据。

5 结 论

(1)平凉市冰雹的分布与六盘山脉的走向有密切关系,沿着六盘山脉和关山 2 侧的区域为平凉地区降雹中心,中部的华亭、崆峒和南部的庄浪是冰雹高发区,东部降雹最少。

(2)平凉冰雹的年代际变化明显,20 世纪 80 年代是降雹高峰期,90 年代至 21 世纪初逐渐减少;降雹最多的年份是 1984 年,最少的年份是 2009 年,平凉市降雹频率是趋于减少的,每 10 a 减少 2.2 次。

(3)平凉降雹季节性变化显著,最早发生在 3 月,最迟为 10 月,雹期长达 8 个月。6 月份冰雹高发,庄浪、华亭、崆峒等地区冰雹天气来的早,结束迟。

(4)平凉市冰雹主要发生在午后至傍晚时分,尤以傍晚时分发生频率最高,特别是 17 ~ 22 时为主

要的降雹时段,占 90.6%。

(5)冰雹日平凉本站层结有如下特征:对流层上层的不稳定能量明显, 500 与 300 hPa 的温差在 25 ℃以上,*K* 指数 >25.9 ℃,*SI* 指数 <0 ℃。

(6)平凉冰雹云雷达回波强中心强度 > 50 dBZ,垂直发展旺盛,回波顶高(ET)都在 8 km 以上,垂直积分液态含水量(VIL) >20 kg · m^{-2},强中心平均高度在 6 km 左右,45 dBZ 回波高度高于 0 ℃ 层高度 2 km。

参考文献:

[1] 董安祥,张强. 中国冰雹研究的新进展和主要科学问题[J]. 干旱气象,2004,22(3):69 - 76.

[2] 吴爱敏,薛璟轩. 庆阳 2 次强对流天气过程的新一代雷达资料对比分析[J]. 干旱气象,2007,25(2):43 - 49.

[3] 张鸿发,龚乃虎. 平凉地区强对流钩状回波特征的观测研究[J]. 大气科学,1997,21(4):401 - 402.

[4] 龚乃虎,瞿章. 平凉地区雹云回波移动特征[J]. 气象学报,1980,38(3):281 - 288.

[5] 张鸿发,左洪超. 平凉冰雹云回波特征分析[J]. 气象学报,2002,60(1):110 - 115.

[6] 王若升,樊晓春. 不平衡场在甘肃平凉市强对流天气预报中的释用[J]. 干旱气象,2009,27(2):181 - 184.

[7] 朱平,田成娟. 青海东部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析[J]. 干旱气象,2011,29(3):336 - 342.

[8] 张正国,汤达章. VIL 产品在广西冰雹云识别和人工防雹中的应用[J]. 热带地理,2012,32(1):50 - 52.

[9] 刘惠云,李进忠. 乌鲁木齐市强降水雷达回波特征分析及预报研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2007,1(2):16 - 22.

[10] 雷雨顺,吴宝俊. 冰雹概论[M]. 北京:科学出版社,1978.

[11] 金飞胜,黄飞羽. 一次早春多单体冰雹分析[J]. 气象科技,2010,38(5):577 - 580.

[12] 马旭洁,陈树. 甘肃临夏州冰雹气候特征及短期预警系统[J]. 干旱气象,2012,30(2):293 - 297.

[13] 张定全,张玲. 甘肃中部地区冰雹灾害分析及防御[J]. 干旱气象,2011,29(2):246 - 250.

[14] 吴剑坤. 俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象,2009,27(3):197 - 205.

Analysis of the Climate Features and Radar Echo of the Hail Weather in Pingliang of Gansu Province

WANG Ruosheng[1], ZHANG Tong[2], FAN Xiaochun[1], WANG Lina[1], ZHAO Guo[2], WU Yingjuan[1]

(1. *Pingliang Meteorological Bureau of Gansu Province*, *Pingliang* 744000, *China*;
2. *Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions*;
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, *CAS*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: Based on the hail observation data from seven stations in Pingliang of Gansu Province from 1965 to 2011, the temporal and spatial distribution of hail weathers and its climate features in Pingliang were analyzed in detail. At the same time, the stratification feature and radar echo characteristics were analyzed by using the hail observation data and the sounding data in hail days from 2003 to 2011, and Doppler radar data of thunder cloud in Pingliang from 2009 to 2011. The results show that the high risk area of hail weather was located in Huating, Zhuanglang and Kongtong of Pingliang area. Hail weather occurred frequently in the 1980s and reduced from the 1990s. In a day, hail mainly occurred from 17:00 to 22:00. The instability of the upper troposphere (from 300 to 600 hPa) is the main characteristic of hail weather in Pingliang. Echo intensity of hail cloud in Pingliang was more than 50 dBZ, echo top height was more than 8 km, vertical liquid water content was 20 kg. m^{-2}, strong center average height was about 6 km, the 45 dBZ echo height was 2 km higher than the height of 0 ℃ layer.

Key words: hail weather; climatic characteristic; radar echo characteristics