

黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等, 2017. 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象, 43(4): 450-459.

# 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征<sup>\*1</sup>

黄玉霞<sup>1</sup> 王宝鉴<sup>1</sup> 王研峰<sup>2</sup> 黄武斌<sup>1</sup> 孔祥伟<sup>1</sup> 谭丹<sup>1</sup> 李文莉<sup>1</sup>

1 兰州中心气象台, 兰州 730020

2 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020

**提 要:** 利用甘肃省 1974—2013 年 80 个观测站的冰雹观测资料和 NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料, 通过统计分析和物理量诊断等方法, 对 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征进行了分析, 结果表明: 冰雹总的分布特征是高原和山高多, 河谷、盆地、沙漠戈壁少, 多年平均降雹日数在 0.05~9 d 之间, 有三个高发中心, 主要位于高原和高山地区, 说明海拔高度对甘肃冰雹的形成具有重要影响。降雹最早始于 3 月, 最晚结束于 11 月, 主要发生在 5—8 月。近 40 年年冰雹日数呈明显的下降趋势, 20 世纪 70—80 年代是冰雹的高发期, 进入 21 世纪以后迅速减少, 全省而言每 10 年减少 0.5 d。5—8 月冰雹日数总体上也呈下降趋势, 但各月的年际和年代际变化又具有显著的差异性。除河西地区外, 甘肃其他四个区的年冰雹日数均发生了显著减少突变。对 5 月甘肃降雹偏多年和偏少年的对比分析表明, 作为一种强烈的对流运动, 降雹偏多年首先表现出对流不稳定能量的异常偏高, 能够达到常年的两倍以上, 其次发现环境温、湿层结在偏多年份朝着冰雹在积雨云中形成、增长及其落地前融化等一系列物理过程的有利条件方向发展, 例如 500 hPa 有一明显的温度槽且较常年偏低  $2^\circ\text{C}$  左右, 低层水汽增多、中层减少, 形成了“上干下湿”的不稳定层结配置, 有适宜生长和降落的  $0^\circ\text{C}$  层 (3900~4500 m) 和  $-20^\circ\text{C}$  高度 (6400~7000 m)。此外, 200 hPa 涡旋特征的出现保证了一支强上升气流支撑空中冰雹的增长。

**关键词:** 甘肃, 冰雹日数, 年际和年代际变化, 中尺度对流环境条件

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.007

## Variation Characteristics of Hail Days in Gansu Province During 1974—2013

HUANG Yuxia<sup>1</sup> WANG Baojian<sup>1</sup> WANG Yanfeng<sup>2</sup> HUANG Wubin<sup>1</sup>

KONG Xiangwei<sup>1</sup> TAN Dan<sup>1</sup> LI Wenli<sup>1</sup>

1 Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

2 Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020

**Abstract:** According to hail observation data based on 80 weather stations in Gansu Province and the NCEP/NCAR data with resolution of  $1^\circ \times 1^\circ$ , spatio-temporal characteristics of hail events during 1974—2013 in Gansu are analyzed by the methods of statistical analysis and physical diagnosis. The results show that hail occurs frequently in plateau and mountain regions but rarely in valley, basin, and Gobi desert. Annual mean of hail days is 0.05—9 days with three largest values in plateau and mountains, which indicates that the altitude plays an important role in the formation of hail in Gansu. The seasonal cycle shows that hail falls earliest in March, latest in November, and mainly from May to August. The hail days present an evident decreasing trend during the recent 40 years. Hail days decrease rapidly by 0.5 d/10 yr on average in the whole province since 21st century after a high incidence during the seventh—eighth decades of last century. The decreasing trend can also be found in hail days from May to August. However, its

\* 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160214)和国家科技支撑计划项目(2015BAC03B06)共同资助  
2016年5月16日收稿; 2017年2月17日收修定稿  
第一作者: 黄玉霞, 主要从事强对流天气预报研究. Email: hyx\_gsma@163.com

interannual and interdecadal variations are greatly different. Except in Hexi area, the annual means of hail days in the other four regions undergoes an abrupt change of decline. Comparison analysis of years with more and less hail days in May over Gansu reveals that: As hail is a product of severe convection, the most significant character in more hail years is the positive abnormal convective energy, which can be more than two times of the normal value. After that, environmental temperature and humidity level in the more hail years develop into favorable conditions for a series of physical processes of hail formation in cumulonimbus, growing and melting before the hail falls to the ground. For example, there is an evident temperature trough at 500 hPa with temperature of 2°C below normal value, and meanwhile, humidity increases in low level and decreases in middle level. Such condition is beneficial to form the unstable “upper dry and lower wet layer”. The 0°C layer (3900—4500 km) is favorable for hail increase and the -20°C layer (6400—7000 km) is helpful for hail’s falling. In addition, the vortex at 200 hPa guarantees a strong upward stream to support the increase of hail.

**Key words:** Gansu, hail days, interannual and interdecadal variations, mesoscale convective condition

## 引言

冰雹是一种由强对流系统所引发的剧烈天气现象,局地性强、生命史短、突发性强,常伴随狂风、强降水、急剧降温等阵发性灾害天气(Knight and Knight, 1971; Changnon and Changnon, 2000; 鲁德金等, 2015),给农业、林业、交通行业及人民生命财产等造成严重的损失。符琳等(2011)通过对中国近50年冰雹时空变化特征及北方冰雹趋势的成因分析表明,20世纪70年代末大尺度环流系统的一系列调整是我国北方冰雹减少的主要原因。闵晶晶等(2012)发现近30年京津冀地区的冰雹有明显减少趋势,基本上都存在2.0~2.5 a的变化周期。刘晓璐等(2012)发现四川冰雹日数高原山地多于盆地,其年际变化主要有准两年和6 a的振荡周期。对西北地区冰雹气候特征及异常类型的大量研究表明,西北地区的冰雹天气具有明显的空间差异(刘德祥等, 2004; 赵红岩等, 2004; 李照荣等, 2005)。甘肃省地处黄河中上游黄土高原、内蒙古高原和青藏高原的交汇地区,境内地貌复杂多样,高山、盆地、平川、沙漠和戈壁等交错分布,这些特殊的地理特征导致局部地区容易形成强烈的上升气流,为冰雹天气的形成发展提供有利的条件(王锡稳, 2005)。据统计,冰雹是甘肃省仅次于干旱的第二大气象灾害,每年因冰雹造成的经济损失高达数千万元以上(董安祥, 2005)。在全球气候变暖、极端天气气候事件频发的背景下,利用最新资料研究甘肃冰雹的年际和年代际变化趋势具有重要意义,同时甘肃省不同区域气温差异明显,气候类型多样,即使同样的天气系统影

响下,不同气候区发生的冰雹也不尽相同,冰雹短时预报的难点也值得关注。2010年以来,强对流天气中尺度环境条件分析技术已被广泛应用于冰雹、短时强降水的预报(张涛等, 2013; 蓝渝等, 2013; 仇娟娟和何立富, 2013),因而在认识冰雹时空分布、年际和年代际变化的基础上,对比冰雹发生异常年份表征水汽、热力和动力不稳定等中尺度环境条件物理量参数的差异,找到冰雹日数年际变化的可能成因也是本文的研究重点。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

冰雹资料采用甘肃省气象信息与技术装备中心整编筛选的甘肃省1974—2013年近40年的80个观测站资料,其中卓尼站观测资料从1976年开始。对某站的冰雹日数进行统计时,该站在一日内观测到一次或多次冰雹现象时,无论其时间长短,均定义为一个冰雹日(刘治国等, 2007; 张芳华和高辉, 2008)。同时利用1999—2013年NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,计算了表征冰雹发展维持的中尺度环境条件物理量参数。

### 1.2 方法

采用Morlet小波分析方法对冰雹日数时间序列的变化趋势和高周期性进行分析。采用Mann-Kendall法(简称M-K法)对冰雹日数做突变分析。应用气候倾向率分析冰雹发生的长期变化趋势(施能等, 1995)。

### 1.3 气候区划分

依据李栋梁和刘德祥(2000)对甘肃气候的划

分,研究了河西、陇中、陇东、陇南和甘南 5 个气候区(表 1)近 40 年甘肃冰雹发生的时空分布特征。

表 1 甘肃省 5 个气候区及所包含地区

Table 1 The five climatic zones and the coverage areas in Gansu Province

气候区	河西地区	陇中地区	陇东地区	陇南地区	甘南地区
涵盖市(州)	酒泉市、嘉峪关市、 张掖市、武威市、 金昌市	兰州市、白银市、 定西市、 临夏回族自治州	平凉市、庆阳市	天水市、陇南市	甘南藏族自治州
涵盖站点数	19	23	15	16	7

## 2 冰雹日数的趋势和年代际特征

### 2.1 多年平均冰雹日数的空间分布

从甘肃省多年平均冰雹日数的空间分布可以看出(图 1):冰雹的空间分布与海拔高度、地形和下垫面性质等关系密切,具有明显的局地性和分散性,总的分布特征是高原和高山多,河谷、盆地、沙漠戈壁少。甘肃冰雹主要发生于青藏高原边坡和高山地区,多年平均冰雹日数在 0.05~9 d 变化,玛曲站发生冰雹日数最多,多年平均为 9 d,民勤站最少,多年平均为 0.05 d。有三个高发中心,甘南高原及邻近的甘岷山区、祁连山东段的乌鞘岭和通渭县的华家岭,多年平均在 2 d 以上;六盘山区、陇东黄土高原和祁连山北麓地区的多年平均在 1 d 以上,河西地区和陇东南大部分地区均小于 1 d。计算发现多年年平均冰雹日数与海拔高度相关系数为 0.86(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验),说明海拔高度对甘肃地区冰雹形成具有重要影响。冰雹发生与海拔

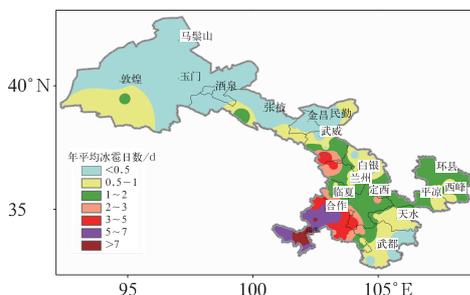


图 1 甘肃省 1974—2013 年近 40 年多年平均冰雹日数空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of annual hail days over Gansu Province in recent 40 years of 1974—2013

高度呈显著正相关,这是因为高原地区强烈的太阳辐射造成近地层大气中较大的温度垂直递减率,导致近地面大气变得越不稳定,容易形成冰雹(李国平,2002)。

### 2.2 冰雹日数的气候趋势及突变特征

#### 2.2.1 冰雹日数的气候趋势

为讨论甘肃不同气候区年平均冰雹日数的年际变化趋势,计算了不同气候区及全省年平均冰雹日数的气候倾向率(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验)(表 2),可以看出不同气候区气候倾向率均小于 0,说明甘肃多年平均冰雹日数随时间呈减少趋势,全省而言冰雹日数减少趋势为  $-0.5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,甘南高原年平均冰雹日数减少最快,减少趋势为  $-0.86 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,陇中地区次之,减少趋势为  $-0.56 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,陇东地区和陇南地区减少基本相近,减少趋势为  $-0.45 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,河西地区最缓,减少趋势为  $-0.27 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

表 2 甘肃不同气候区年均冰雹日数的气候倾向率  
[单位:  $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

Table 2 The climatic trend rate of annual hail days in different climatic zones in Gansu Province [unit:  $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

	河西	陇中	陇东	陇南	甘南	全省
气候倾向率	-0.27	-0.56	-0.45	-0.45	-0.86	-0.50

#### 2.2.2 冰雹日数的突变特征

通过 M-K 检验分析甘肃全省及不同气候区年均冰雹日数的突变特征(图 2),从图中看出,河西地区冰雹日数在 1979—1984 年呈增加趋势,其余年份基本呈减少趋势,尤其 2003 年之后减少趋势更明显(图 2a)。陇中地区冰雹日数在 1976—1980 年及 1985—1992 年呈增加趋势,其余年份呈减少趋势,且 2004 年开始减少趋势更明显(图 2b)。甘南地区

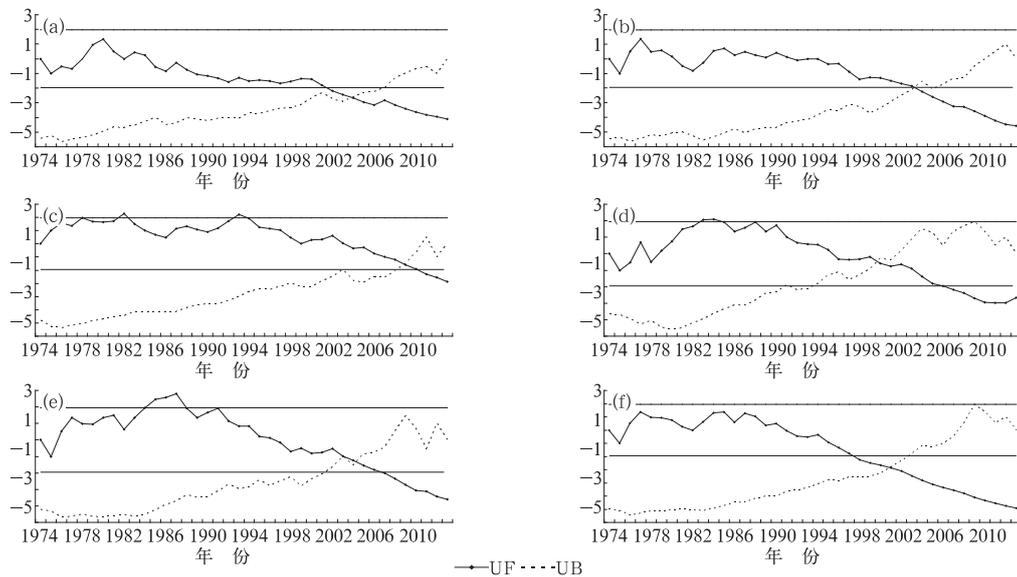


图2 甘肃不同气候区年平均冰雹日数的 M-K 检验

(上下实线内区域,表示通过 0.05 显著性水平检验)

(a)河西地区,(b)陇中地区,(c)甘南地区,(d)陇南地区,(e)陇东地区,(f)全省

Fig. 2 Annual hail days based on M-K test of different climatic zones in Gansu Province

(Area between upper and lower solid lines represents passing through 0.05 significance level of test)

(a) Hexi region, (b) Longzhong region, (c) Gannan region, (d) Longnan region,

(e) Longdong region, (f) the whole province

冰雹日数 2003 年之前呈增加趋势,2004 年开始减少(图 2c)。陇南和陇东地区(图 2d 和 2e),冰雹日数在 1977—1996 年基本呈增加趋势,1997 年开始均呈减少趋势,尤其 2009 年开始减少趋势更明显。全省冰雹日数在 1976—1992 年间呈增多趋势,其余年份呈减少趋势,且 2000 年之后减少趋势更加明显。对于冰雹的突变,全省和河西地区在  $\alpha=0.05$  的显著性区间内没有突变,陇中地区、甘南地区、陇南地区、陇东地区分别在 2003、2008、2000 和 2004 年发生明显突变,突变之后年冰雹日数明显偏少。

### 2.3 年冰雹日数的周期变化

图 3 为近 40 年甘肃全省及不同气候区冰雹日数的小波功率谱及其对应的方差,可以看出,河西地区冰雹日数存在 3~4 a 的短周期震荡和 11 a 左右的长周期震荡,3~4 a 的周期震荡在 1975—1985 年期间比较显著;陇中地区冰雹日数存在 2~3 a 和准 6 a 的周期震荡,2~3 a 的周期震荡在 1985—1990 年期间比较显著;甘南地区存在准 5 a 的短周期震荡和准 11 a 的长周期震荡,准 5 a 的周期震荡在 1980 年前后比较显著;陇南地区存在 3~4 a 的短周期震荡和准 14 a 的长周期震荡,3~4 a 的周期震荡在 1977—1983 年期间以及 1990 年前后比较显著;

陇东地区存在准 3 a 的短周期震荡和 13~14 a 的长周期震荡,准 3 a 的周期震荡在 1980—2000 年期间比较显著;对于全省范围而言,存在准 3 a 及准 7 a 的短周期震荡,准 3 a 的周期震荡在 1975 年前后及 1985—1995 年期间比较显著。

## 3 年际变化及其成因分析

### 3.1 冰雹日数的年际变化

图 4 为甘肃省近 40 年冰雹日数年际变化曲线,可以看出:冰雹日数总体上呈减少趋势,冰雹较多年集中在 20 世纪 70 年代中后期至 90 年代初,年雹日数在 60~84 d 变化,1979 和 1990 年冰雹偏多,年雹日平均为 84 d。冰雹较少年主要为 1998、2003—2004、2007—2013 年,年雹日在 20~50 d 变化,其中 2009、2010 和 2012 年为偏少年份,年雹日仅为 20、24 和 27 d。从年代际变化看(表 3),70—80 年代是甘肃冰雹的高发期,平均年冰雹日数 69 d,90 年代减少为 55.4 d,到了 21 世纪头 10 年锐减至 38.8 d。2011—2013 年平均仅为 29.3 d,与 70 年代相差 40 d,约为高发年代平均年雹日数的 56% 左右。

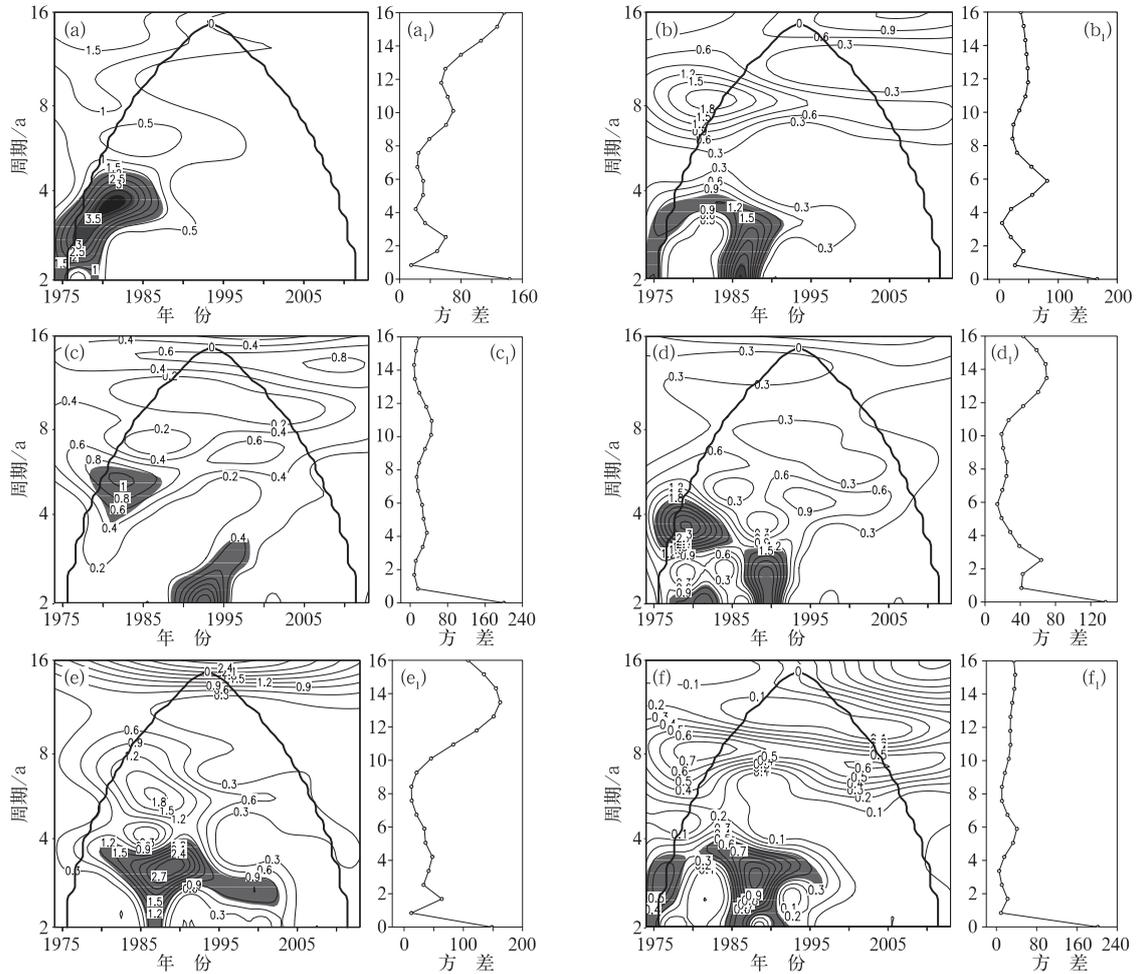


图 3 甘肃不同气候区年均冰雹日数的小波功率谱(a~f)及其对应的方差(a<sub>1</sub>~f<sub>1</sub>)  
(a)河西地区, (b)陇中地区, (c)甘南地区, (d)陇南地区, (e)陇东地区, (f)全省  
(阴影区通过 0.10 的显著性水平检验)

Fig. 3 Analysis of the wavelet power spectrum (a-f) and variance (a<sub>1</sub>-f<sub>1</sub>) of annual hail days in different climatic zones in Gansu Province  
(a) Hexi region, (b) Longzhong region, (c) Gannan region, (d) Longnan region, (e) Longdong region, (f) the whole province  
(Shading denotes the area exceeding the 0.10 level of significance test)

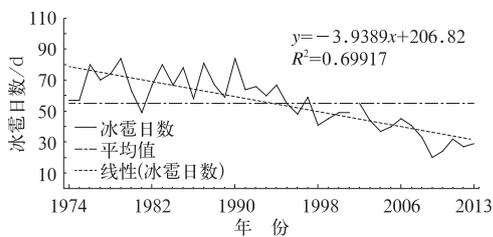


图 4 近 40 年甘肃冰雹日数年际变化  
Fig. 4 Interannual variation of hail days over Gansu Province in recent 40 years

表 3 各年代年平均冰雹日数(单位:d)

Table 3 Average hail days in different decade (unit: d)					
年代	70 年代	80 年代	90 年代	21 世纪 头 10 年	2011—2013
日数/d	69.3	69.0	55.4	38.8	29.3

### 3.2 月冰雹日数的年际及年代际变化

甘肃降雹具有季节性强、雹日高度集中的特征。近 40 年月冰雹日数的变化表明(图 5):降雹最初始

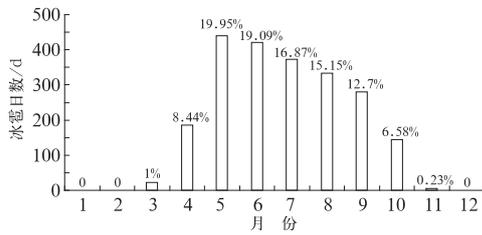


图 5 近 40 年甘肃冰雹日数的月变化

Fig. 5 Monthly variation of hail days over Gansu Province in recent 40 years

于 3 月,最晚结束于 11 月,主要发生在 5—8 月,春末夏初是冰雹最多发的季节。其中,5 月日数最多,占全年的 19.95%,也是增长最快的月份,较 4 月猛增 2.36 倍,达到峰值;其次为 6—8 月,分别占全年的 19.09%、16.87% 和 15.15%,10 月是雹日减少最快的月份,其后就很少出现,12 月至次年 2 月为无雹时段。这种季节分布的可能原因是春末夏初空气中水汽含量开始不断增强,同时伴随着地面太阳辐射加热的增强,使得边界层特别是近地层大气变得很不稳定,加之过渡季节冷暖空气交汇频繁,因此高原或高大山脉迎风坡、喇叭口盆地和谷地在中尺度切变线等的触发下产生冰雹,此外由地形强迫产生的重力波触发不稳定能量释放也可能造成降雹天气(周崑等,2005)。9 月以后,伴随着西太平洋副热带高压东退和太阳辐射减弱,暖湿条件明显下降,大气层结逐渐趋于稳定,冰雹天气也就迅速减少。

5—8 月的冰雹日数占全年的 71.06%,因此可以认为冰雹的年际变化特征也主要体现在这 4 个月的变化上,下面将以 5—8 月的月冰雹日数为研究对

象,分析其年际变化(图 6):5 月冰雹日数从 1974 年开始显著增加,20 世纪 80 年代初至 90 年代初期最多(平均 14.4 d,较 70 年代增加 3.0 d,表 4),1993 年冰雹日数开始减少,2007 年开始显著减少,2011—2013 年间,冰雹日数锐减至 6.3 d,较 80 年代减少 8.1 d。6 月冰雹日数从 1974 年开始增加,到 70 年代中后期的 1978 年最多,平均 14.0 d;随后快速减少,1985 年再次出现增长,至 1990 年平均达到 12.1 d;90 年代初开始呈明显的减少趋势,90 年代冰雹日数为 10.6 d;21 世纪头 10 年为 8.1 d,2011—2013 年则降至 5.0 d,较 70 年代减少 9.0 d。7 月冰雹日数在 1974—2000 年间基本呈多波动的震动,没有明显减少的趋势,1970—1990 年平均在 12.3~10 d 变化,进入 21 世纪后就快速减少为 7.2 d,2011—2013 年间则减至 4.7 d。8 月冰雹日数在 20 世纪 80 年代呈现波动式的减少变化特征,2001 年后减少非常明显,这一点从冰雹日数的年代际变化可以看出,例如 80 年代的平均日数为 12.5 d,70、90 年代为 8.9 d 和 8.6 d,21 世纪头 10 年锐减至 4.4 d。

表 4 各年代 5—8 月平均冰雹日数(单位:d)

Table 4 Average monthly hail days from May to August in different decades (unit: d)

月份	70 年代	80 年代	90 年代	21 世纪头 10 年	2011—2013 年
5 月	11.4	14.4	11.6	8.1	6.3
6 月	14.0	12.1	10.6	8.1	5.0
7 月	12.3	10.0	10.0	7.2	4.7
8 月	8.9	12.5	8.6	4.4	5.7

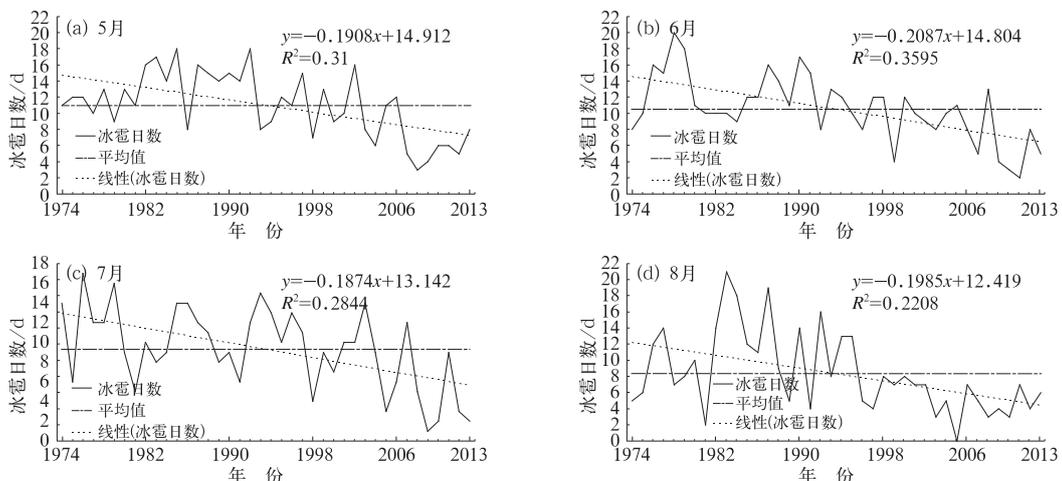


图 6 近 40 年 5—8 月各月冰雹日数年际变化

Fig. 6 The inter-annual variation of monthly hail days from May to August in recent 40 years

### 3.3 成因分析

冰雹是由中小尺度对流系统引发的,生命史在数十分钟到 1~2 h,突发性特别强,预报技术难度较大。近年来,冰雹等强对流天气研究越来越多(农孟松等,2013;许爱华等,2006;雷蕾等,2011;郑媛媛等,2011;曲晓波等,2011),对其形成机制与预报着眼点有了更深的认识。2009 年中央气象台正式组建强天气预报中心,这标志着我国强对流天气预报业务开始向专业化方向发展,主要技术路线是利用中尺度天气分析方法开展强对流天气的分类预报(郑永光等,2010;何立富等,2011;张小玲等,2012;周庆亮,2010),其核心是 Doswell et al(1996)提出的基于构成要素(各要素独立)的强对流分类预报方法,即“配料法”,俞小鼎(2011)认为预报员应该尝试用基于构成要素的方法去解释强对流天气形成的机制。仇娟娟和何立富(2013)认为  $\Delta T_{350-500}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层高度等对流参数在区域性冰雹和强降水天气中存在明显差异,而高 CAPE 值、低层适当水汽条件及较强的深层垂直风切变、正涡度平流造成的上升运动等有利于强冰雹天气的发生(徐芬等,2016;黄晓龙和高丽,2016),结合兰州中心气象台强对流天气中尺度环境条件分析技术规范(黄玉霞等,2014),选取对流有效位能(CAPE)、中低层相对湿度(Rh)、200 hPa 涡度(VORT<sub>200 hPa</sub>)、500 hPa 温度( $T_{500 \text{ hPa}}$ )、 $0^{\circ}\text{C}$  和  $-20^{\circ}\text{C}$  层高度等对流参数,分析其在冰雹偏多、偏少年的特征,以期得到冰雹年际变化的可能成因。

5 月是甘肃冰雹最多发的月份,且冰雹主要发生在 13—18 时(占总次数的 87.65%),因此对流参数的计算以 14 时为准。受 NCEP  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  再分析资料的限制(始于 1999 年),多(少)雹年只能从 1999 年后挑选。对冰雹日数序列去趋势后求标准差,以超过一个正负标准差( $\pm 1.0\delta$ )为界限挑选多雹年和少雹年,1999 年以来多雹年为 2002 年(1.99 $\delta$ )和 2006 年(1.02 $\delta$ ),少雹年为 2007 年(-1.03 $\delta$ )、2008 年(-1.58 $\delta$ )和 2009 年(-1.22 $\delta$ ),本文将以标准差绝对值最大的 2002 年(多雹年)和 2008 年(少雹年)为例进行分析。

#### 3.3.1 不稳定条件

冰雹等强对流天气的发生离不开深厚对流的发展,层结不稳定是强对流活动最重要的基本条件,而对流能量的大小又决定了对流发展的程度,对流有效位能(CAPE)则是衡量对流不稳定能量大小的最

佳参量。甘肃 5 月 14 时 CAPE 值一般在 20~140  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  变化(图略),冰雹异常偏多年的 CAPE 在 60~280  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图略),从其距平图(异常多年 5 月均值与 1999—2013 年 5 月均值之差,下同)(图 7),可以看出冰雹高发的乌鞘岭地区、华家岭地区、六盘山地区、陇东黄土高原及甘南高原与甘岷山区的 CAPE 较常年均明显偏高,其中乌鞘岭地区偏高最多,达到 120  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,武威以东的大部分地区偏高 40~120  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,甘南高原与甘岷山区偏高 0~40  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,不稳定能量条件大大增强非常有利于大气不稳定层结的建立。冰雹异常偏少年武威以东大部分地方 CAPE 在 0~40  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图略),与常年相比,武威以东均明显减小,其中冰雹最为高发的甘南高原与甘岷山区减少 30~50  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其他地区减少 10~40  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

#### 3.3.2 水汽条件

冰雹天气除了需要层结不稳定外,还需要“上干下湿”的水汽条件(黄治勇等,2014),即低层要有较为充沛的水汽,而中层环境相对比较干燥,这是因为水汽条件充沛易产生大的降水,而云中由降水拖曳作用形成的强下沉气流不利于上升气流的发展。由于甘肃地形差异大,所以对海拔 3000 m 以上高山或高原地区低层湿度看 500 hPa,1000~3000 m 的地区低层看 700 hPa。在异常偏多年,500 hPa 相对湿度武威以东的高海拔地区在 50%~60%,低海拔地区在 45%~55%(图 8a),700 hPa 相对湿度武威以东大部在 60%~70%(图 8b)。与常年相比:500 hPa 相对湿度的变化有两个特点,一是对高海拔的祁连山区、甘南高原及甘岷山区、六盘山区表现为低层水汽的增强(较常年偏多 4%~16%),二是相对低海拔地区 500 hPa 又是中层,这些地方(包括陇东黄土高原、陇中和陇南的大部)水汽又较常年偏少 4%~12%(图 8c);700 hPa 是低海拔地区的低层,其距平变化说明冰雹偏多年武威以东低层湿度明显升高,增幅达 10%~20%(图 8d)。湿度的垂直变化表明,多雹年低层湿度明显增大,而中层湿度减小,大大增强了上干下湿的不稳定层结配置。冰雹异常偏少年(图略),低层湿度呈现出显著的下降,具体表现为武威以东大部分地方 700 hPa 的相对湿度仅为 30%~50%,与常年同期相比减少 5%~10%,湿度条件的变弱不利于冰雹这类强对流天气的发展。

#### 3.3.3 冷空气条件

冰雹一般发生在 500 hPa 冷空气叠加在低层暖

空气的大尺度环流背景下(陈关清等,2016;廖晓农等,2008),对流层中层及地面干冷空气的入侵是必要的触发条件,在实际的冰雹潜势预报业务中,预报员非常重视 500 hPa 冷平流入侵的时间,如果在对流能量最好的 14—17 时入侵,非常利于冰雹等强对流天气的发生发展。从图 9 可以看出:冰雹异常偏多年,在甘南高原—华家岭—六盘山—陇东黄土高原有一个西南—东北走向、强度在  $-2.2 \sim -2.0^{\circ}\text{C}$  温度距平带(图 9a),说明多雹年 500 hPa 温度较常年同期显著偏低,这也有利于垂直方向上温度梯度的加强;与之对应的是多雹年 14 时平均温度场上,

陇东黄土高原—六盘山—华家岭—甘南岷县山区有一明显的温度槽(图 9b)。冰雹异常偏少年,500 hPa 温度则较常年同期偏高  $0 \sim 2^{\circ}\text{C}$ ,平均温度场上也没有明显的温度槽(图略)。

### 3.3.4 动力条件

冰雹是一种强烈的对流运动,降雹时降雹区存在一个轴线向东南方倾斜的正涡度系统,除地面外,各层均为正涡度,并以  $300 \sim 200$  hPa 为最大,降雹时高层正涡度往往加强(白肇烨和徐国昌,1988)。5 月武威以东 200 hPa 的涡度除六盘山区和陇东黄土高原为正涡度外( $0 \sim 0.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),其他区域均为

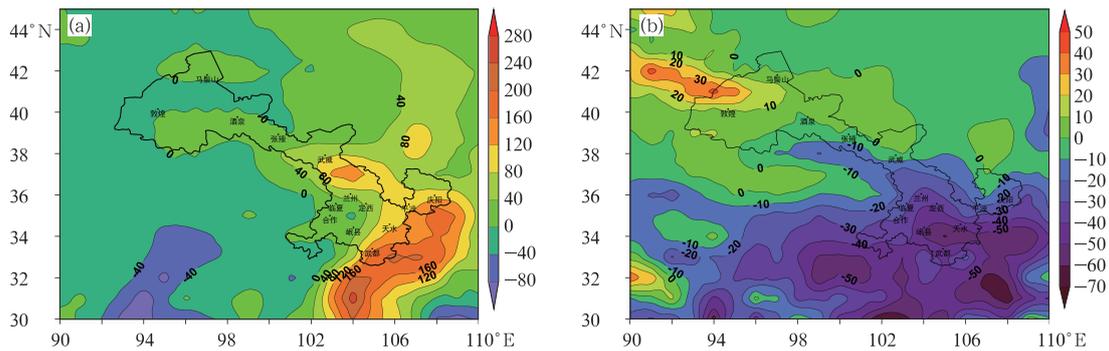


图 7 冰雹偏多年(a,2002 年,下同)和偏少年(b,2008 年,下同)5 月 14 时(下同)CAPE 距平场(单位:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
Fig. 7 Distribution of CAPE anomalies at 14:00 BT in May for more (a, 2002)/less (b, 2008) hail years (unit:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

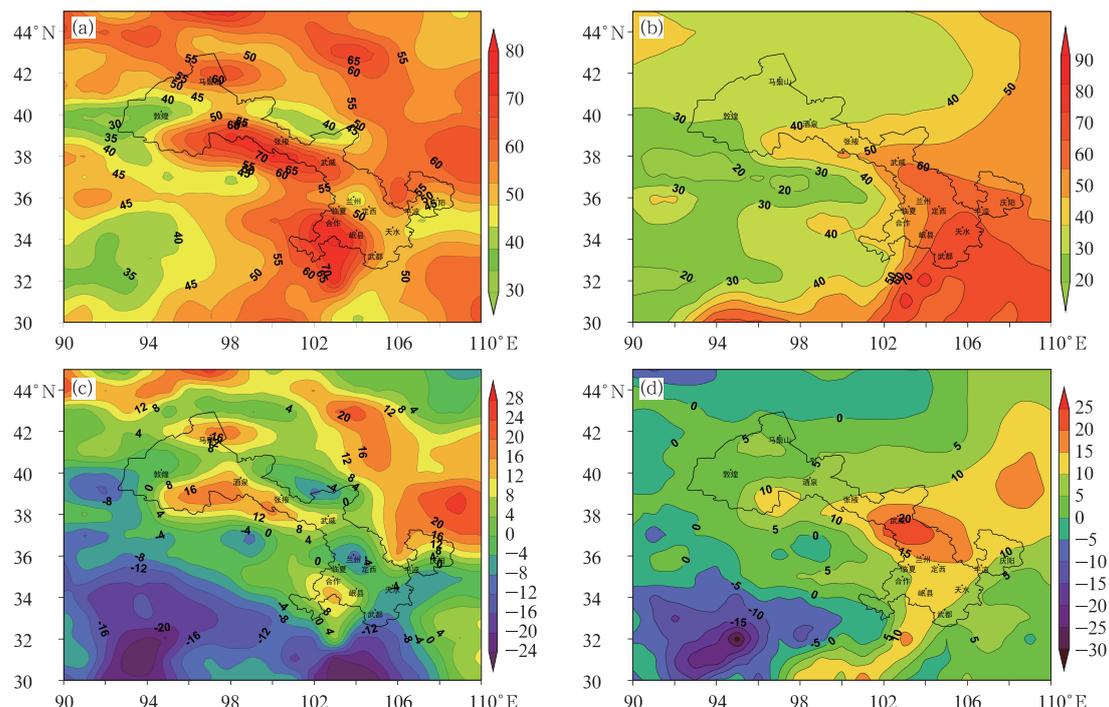


图 8 冰雹偏多年 500 hPa(a, c)和 700 hPa(b, d)相对湿度平均场(a, b)及距平场(c, d)(单位:  $\%$ )  
Fig. 8 Distribution of average relative humidity (a, b) and its anomaly (c, d) at 500 hPa (a, c) and 700 hPa (b, d) for more hail years (unit:  $\%$ )

负涡度( $-0.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 0$ )。从图 10 可知,冰雹偏多年甘肃 200 hPa 涡度全省均为正值,其中武威以东达  $2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略),与常年相比偏高  $1.6 \times 10^{-5} \sim 3.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,表明冰雹天气发生时对流发展非常旺盛,这种高度可达 200 hPa 涡旋特征的出现保证了一支强上升气流支撑空中冰雹的增长,而冰雹异常偏少年 200 hPa 涡度全为负值( $-2.4 \times 10^{-5} \sim -0.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),较常年减弱  $0 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  左右。

### 3.3.5 0℃层和-20℃层高度

0℃层和-20℃层高度分别是云中冷暖云分界线高度和大水滴的自然冰化区下界,是表现雹云特征的重要参数。地面冰雹半径与 0℃层高度和 0℃层冰雹半径相关,冰雹的热融化作用随着 0℃层高度产生较大变化(濮文耀等,2015),分析发现(图略):多雹年 0℃层高度除甘南高原和甘岷山区在 3900~4500 m 外,武威以东其他大部分地方都在 3500~3900 m,这与我国江西、北京和苏沪等地的高度基本一致(许爱华等,2013;雷蕾等,2011;仇娟娟等,2013);少雹年 0℃层高度甘南高原和甘岷山区在 4200~4700 m,其他在 3800~4200 m,较多雹

年偏高 300 m 左右;多雹年乌鞘岭地区、华家岭地区、六盘山地区、陇东黄土高原及甘南高原与甘岷山区-20℃层高度为 6400~7000 m,高度适中,少雹年-20℃层高度达 7000~7400 m,较多雹年偏高 500 m 左右。上述讨论可见,0℃层高度为 3900~4500 m、-20℃层高度为 6400~7000 m 是适宜甘肃冰雹生长和降落的高度。

## 4 结 论

(1)甘肃冰雹的空间分布具有明显的局地性和分散性,总的分布特征是高原和高山多,河谷、盆地、沙漠戈壁少。多年平均降雹日数在 0.05~9 d 之间,玛曲站发生冰雹的日数最多(9 d)。甘南高原及邻近的甘岷山区、乌鞘岭地区和华家岭地区是三个高发中心,多年年平均冰雹日数与海拔高度的相关系数为 0.86,说明海拔高度对甘肃冰雹的形成具有重要影响。

(2)除河西地区外,甘肃其他四个区的年冰雹日数均发生了显著减少突变。周期特征表现为甘肃全省及各气候区均存在准3a周期变化。甘肃降雹具

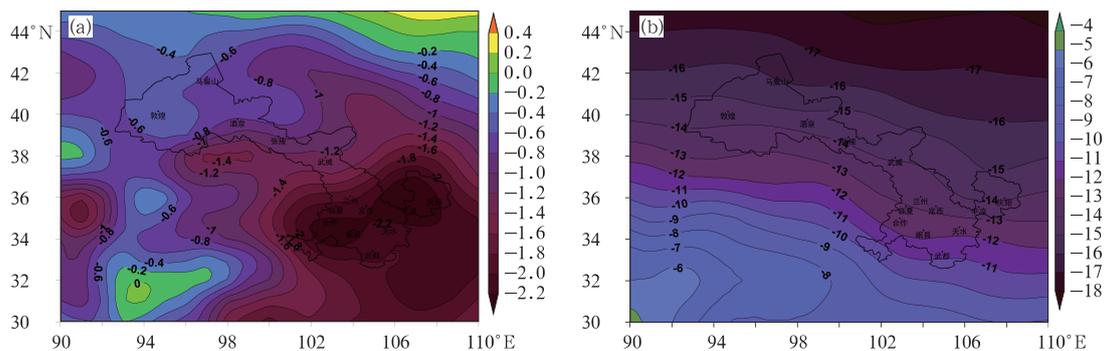


图 9 冰雹偏多年 500 hPa 温度距平场(a)和温度场(b)(单位: °C)

Fig. 9 Distribution of temperature field (b) and its anomaly (a) at 500 hPa for more hail years (unit: °C)

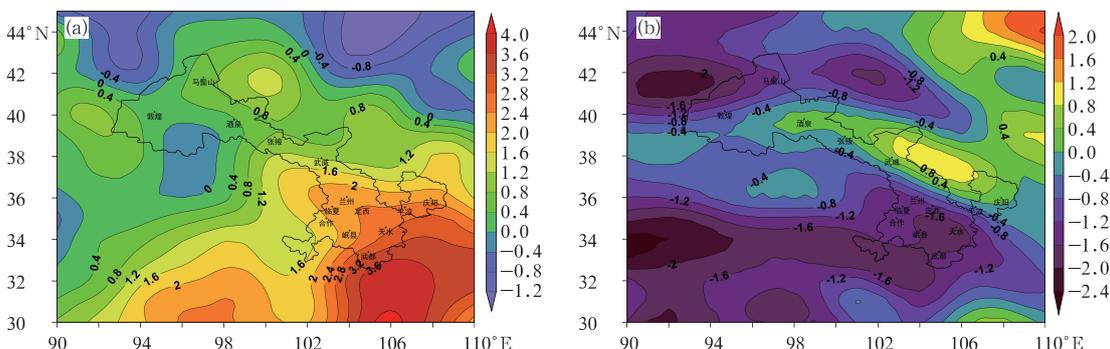


图 10 同图 7,但为 200 hPa 涡度距平分布(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for Distribution of vorticity anomaly at 200 hPa (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

有很强的季节性,最早始于3月,最晚结束于11月,主要发生在5—8月,其中5月是雹日最多也是雹日增长最快的月份。近40年中,年冰雹日数呈明显的下降趋势,20世纪70—80年代是冰雹的高发期,进入21世纪以后迅速减少,全省而言每10年减少0.5 d。5—8月冰雹日数总体上也呈下降趋势,但各月的年际和年代际变化又具有显著的差异性。

(3) 甘肃冰雹日数与700 hPa相对湿度、500 hPa温度、对流有效位能、200 hPa涡度、0℃和-20℃层高度等表征对流的中尺度环境条件相关性较好。对5月冰雹日数异常的原因分析表明:冰雹作为一种强烈的对流运动,降雹偏多年首先表现出对流不稳定能量的异常偏高,能够达到常年的两倍以上,其次发现环境温度和湿度层结朝着冰雹在积雨中形成、增长及其落地前融化等一系列物理过程的有利条件方向发展,例如500 hPa有一明显的温度槽且较常年偏低2℃左右,低层水汽增多、中层减少,形成了“上干下湿”的不稳定层结配置,具有适宜生长和降落的0℃层(3900~4500 m)和-20℃层高度(6400~7000 m)。此外,200 hPa涡旋特征的出现保证了一支强上升气流支撑空中冰雹的增长。

## 参考文献

- 白肇烨,徐国昌,1988.中国西北天气[M].北京:气象出版社:285-286.
- 陈关清,杨群,李伟栋,2016.贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J].干旱气象,34(1):164-171.
- 董安祥,2005.中国气象灾害大典(甘肃卷)[M].北京:气象出版社:120-125.
- 符琳,李维京,张培群,等,2011.近50年我国冰雹年代际变化及北方冰雹趋势的成因分析[J].气象,37(6):669-676.
- 何立富,周庆亮,湛芸,等,2011.国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J].气象,37(7):777-784.
- 黄晓龙,高丽,2016.2014年3月19日台州冰雹过程中尺度分析[J].气象,42(6):696-708.
- 黄玉霞,王宝鉴,吉惠敏,等,2014.兰州中心气象台中尺度环境条件分析技术规范[G],1-50.
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,2014.基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J].气象,40(2):216-221.
- 蓝渝,张涛,郑永光,等,2013.国家级中尺度天气分析业务技术进展II:对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术[J].气象,39(7):901-910.
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,37(2):136-141.
- 李栋梁,刘德祥,2000.甘肃气候[M].北京:气象出版社:2-105.
- 李国平,2002.青藏高原动力气象学[M].北京:气象出版社:7-15.
- 李照荣,丁瑞津,董安祥,等,2005.西北地区冰雹分布特征分析[J].气象科技,33(2):160-166.
- 廖晓农,俞小鼎,于波,2008.北京盛夏一次罕见大雹事件分析[J].气象,34(2):10-17.
- 刘德祥,白虎志,董安祥,2004.中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究[J].高原气象,23(6):795-803.
- 刘晓璐,刘东升,张世林,等,2012.近30年四川冰雹气候特征[J].气象,38(10):1217-1224.
- 刘治国,王鹏祥,杨建才,等,2007.青藏高原东北侧局地冰雹统计特征及对特殊雹云单体的讨论[J].干旱气象,25(3):10-16.
- 鲁德金,陈钟荣,袁野,等,2015.安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J].气象,41(9):1104-1109.
- 闵晶晶,曹晓钟,段宇辉,等,2012.近30年京津冀地区冰雹的气候特征和突变分析[J].气象,38(2):189-196.
- 农孟松,赖珍权,梁俊聪,等,2013.2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J].气象,39(7):874-882.
- 濮文耀,李红斌,宋煜,2015.0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用[J].气象,41(8):980-985.
- 仇娟娟,何立富,2013.苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J].气象,39(5):577-584.
- 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等,2011.2009年6月淮河中下游三次飑线过程的对比分析[J].气象,36(7):795-801.
- 施能,陈家其,屠其璞,1995.中国近100年四个年代际的气候变化特征[J].气象学报,53(4):531-539.
- 王锡稳,2005.甘肃冰雹天气个例分析与预报方法研究[M].北京:气象出版社:2-5.
- 许爱华,陈云辉,陈涛,2013.锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J].应用气象学报,24(2):197-205.
- 许爱华,詹丰兴,刘晓晖,等,2006.强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J].气象科技,34(4):376-380.
- 徐芬,郑媛媛,慕熙昱,等,2016.江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J].气象,42(5):567-577.
- 俞小鼎,2011.基于构成要素的预报方法——配料法[J].气象,37(8):913-918.
- 张芳华,高辉,2008.中国冰雹日数的时空分布特征[J].南京气象学报,31(5):687-693.
- 张涛,蓝渝,毛冬艳,等,2013.国家级中尺度天气分析业务技术进展I:对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术[J].气象,39(7):894-900.
- 张小玲,湛芸,张涛,等,2012.对流天气预报中的环境场条件分析[J].气象学报,70(4):642-654.
- 赵红岩,汤懋苍,杨瑜锋,等,2004.西北区冰雹分布及与低温场的相关分析[J].高原气象,23(6):781-786.
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J].气象,36(7):33-42.
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等,2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,37(7):795-801.
- 周庆亮,2010.美国强对流预报主观产品现状分析[J].气象,36(11):95-99.
- 周嵬,张强,康凤琴,等,2005.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,20(9):1029-1035.
- Changnon S A, Changnon D. 2000. Long-term fluctuations in hail incidences in the United States[J]. J Climate,13(3):658-664.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: an ingredients based methodology[J]. Wea Forecasting, 11:560-581.
- Knight C A, Knight N C. 1971. Hails tones[J]. Scientific American, 224(4):40-47.