符琳,李维京,张培群,等. 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,2011,37(6):669-676.

近 50 年我国冰雹年代际变化及北方冰雹趋势的成因分析*

符 琳[1,2] 李维京[2] 张培群[2] 张 强[3] 高 歌[2]

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象局预报与网络司, 北京 100081

提 要: 利用 1958—2007 年中国 755 个站的逐日冰雹资料和同期 NCEP/NCAR 再分析资料及环流特征量,研究了中国近 50 年冰雹时空变化特征。研究表明,20 世纪 70 年代末、80 年代初我国冰雹呈下降趋势,尤其是 80 年代末以来降雹次数基本低于近 50 年的平均值,其中我国北方冰雹下降趋势比南方显著,除黄淮、江淮、长江中下游和华南地区外,全国大部分地区冰雹下降趋势都通过了 0.05 的显著性水平检验,尤其是东北、华北、西北和青藏高原中东部地区。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,200 hPa 高空西风急流南移,导致我国北方纬向风场减弱,风速垂直切变减小,对流减弱;850 hPa 高度场升高不利于极地冷空气南下和对流系统的建立;同时副高增强,极涡减弱使大气层结稳定,冷空气活动减弱。伴随着大尺度环流的调整,局地垂直温度场结构的变化是影响降雹次数的一个重要原因,局地 0 ℃线和−20 ℃线之间过冷却水滴累积区距离缩短,不利于雹粒充分地碰并增长,这对东北、华北和西北西部降雹出现显著减少具有十分重要的作用。

关键词: 冰雹, 年代际变化, 成因分析, 西风急流, 温度场

Inter-Decadal Change of Hail Events over China and Causation Analysis in Northern China in Recent 50 Years

FU Lin[1,2] LI Weijing[2] ZHANG Peiqun[2] ZHANG Qiang[3] GAO Ge[2]

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Climate Centre, Beijing 100081

3 Forecast and Network Department, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: With data of hail days at 755 stations, NCEP/NCAR monthly reanalysis and atmospheric circulation characteristics from 1958 to 2007, we have investigated the inter-decadal change of hail events in China. The results indicate that the overall trend of hail events has declined remarkably since the 1980s. Most of China has a descending tendency especially in the Northeast China, North China, Northwest China and East-Central Tibetan Plateau. According to the analysis of relation between hail events and wind fields, height fields, subtropical high, polar vortex and temperature fields, we have found that the hail event has declined significantly in northern China, which is related to the southward shift of the 200 hPa westerly jet stream, the upward elevating of the 850 hPa height field, the weakening of the subtropical high, the strengthening of the polar vortex and the shortening of the distance between 0 ℃ and −20 ℃.

Key words: hail, inter-decadal change, causation analysis, westerly jet stream, temperature field

---

* 科技部科技支撑项目(2007BAC29B04)资助
2010 年 2 月 31 日收稿; 2011 年 2 月 12 日收修定稿
第一作者: 符琳,主要从事短期气候预测研究. Email:fulin08@163.com
通讯作者: 李维京, Email: liwj@cma.gov.cn

引 言

冰雹是我国一种比较常见的气象灾害，历史上几乎全国各地都发生过冰雹灾害。它与极端降水一样，都是强对流天气的产物，它的出现对农业生产、国民经济、人民生命和财产都构成了极大威胁，因此对于冰雹的研究是十分重要的。

前人的大部分研究是从天气学角度出发，基于一些冰雹个例的发展过程，分析冰雹产生的前期条件[1-4]；肖现等[5]通过分析一次典型的雹暴过程，证明温度场的冷暖池结构对维持风暴的发展起到很大的作用；宋晓辉等[6]通过分析冰雹形成的前期条件和发展消亡过程，进一步提出用于预报冰雹的各种指标；从气候上来看，Zhang 等[7]从区域、季节、发生时间三个方面对我国 1961—2005 年冰雹进行了研究，得出了我国冰雹发生的区域特征和集中时间段，却没有深入分析其年际和年代际变化特征。另外一些研究则主要针对某一区域的冰雹的气候特征进行分析[8]，如郭江勇等[9]分析了我国西北地区冰雹的特征及影响因子，但只提出了冰雹与高度、温度的简单关系；林纾等[10]分析了西北地区冰雹的环流背景气候特征，比较了多雹年和少雹年中四类环流特征量的合成指数；张信华等[11]分析了闽北不同季节冰雹在时间分布、地理分布、源地及路径等的特征；徐桂玉等[12]分析了我国近 50 年南方冰雹的时空气候特征，发现其具有 28，14，8～9，5 年和 3.5～4 年左右的周期震荡，但是对于北方这个冰雹的高发区却没有研究。因此，在全球变暖条件下，对我国冰雹的年代际变化趋势及其成因的探究是有重要意义的，为以后冰雹的预报及其与大尺度环流关系的研究奠定了基础。

1 资料和质量控制

本文所用资料主要包括：(1)国家气象信息中心 1958—2007 年 755 个站的逐日冰雹资料；(2) 1958—2007 年 NCAR/NCEP 再分析月平均资料，所选要素包括风场、高度场和温度场，资料的水平分辨率为 2.5°×2.5°，垂直方向为 17 层；(3)国家气候中心 1958—2007 年的逐月环流特征量，北半球副高面积指数和北半球极涡面积指数。

在对资料进行检查时发现，许多测站资料序列不完整，于是对其进行了质量控制。在研究中，当某年缺测天数超过 18 天(即实际观测日数不到 95%)时，设为缺测年，由于站点资料较多，仅保留 1958—2007 年间没有缺测年的测站，最后得到 501 个有效的冰雹站点。为便于区域之间的比较，根据杨金虎等[13]的区域划分方法，将中国划分为 8 大区域(表 1)。

表 1 中国区域划分

Table 1 The division of eight regions in China

区域名称	范 围
东北	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东部
西北西部	新疆
西北东部	陕西、甘肃、宁夏、内蒙古西部
华北	河北、山东、河南、山西、北京、天津、内蒙古中部
长江中下游	江苏、浙江、江西、安徽、湖北、湖南、上海
西南	四川中东部、云南(除德钦外)、贵州
华南	广东、广西、福建、海南
青藏高原	青海、西藏、四川西部、云南西北部

2 冰雹气候特征

2.1 时空分布特征

从全国各站降雹次数分布图来看(图 1)，我国大部站点每年都有冰雹发生，降雹次数较少的为每年 1～2 次，主要位于黄淮流域、长江流域、华南等平原地区；年均降雹次数在 2～10 次左右的地区主要集中在东北、内蒙古中部、西北东部和西南部分地区；降雹次数最多的地区主要集中在青藏高原中东部和新疆西部，单站年均降雹超过 10 次，其中部分站点年均降雹次数达34次。总体来看，降雹次数较

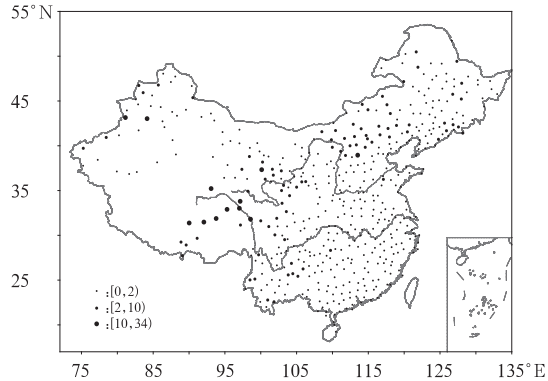

图 1 1958—2007 年全国各站年降雹次数分布图(单位：次数/年)

Fig. 1 Hail events of each station in China during the period of 1958—2007 (unit: times/a)

多的地区主要集中在山地和高原地区,这主要受地形的局地条件影响,复杂的地形使得边界层内的各参量水平分布不均,从而产生许多热力、动力性质的局地环流,使水汽和热量重新分布,从而容易触发不稳定能量造成冰雹天气[14]。

从各区域来看(图 2),冰雹发生的频次和时间段均不相同,冰雹高频次发生在青藏高原和我国北方地区,华南和长江流域频次较低。从时间来看,主要体现为南北差异,总体来看是南方早于北方。青藏高原和我国北方冰雹主要集中在 4—10 月,其中青藏高原为 6—9 月,东北和华北为 5—9 月,西北为 4—9 月;南方冰雹主要集中在 1—5 月,其中西南全年都有冰雹,高发时间段为 2—5 月,华南为 2—4 月,长江流域为 2—4 月。

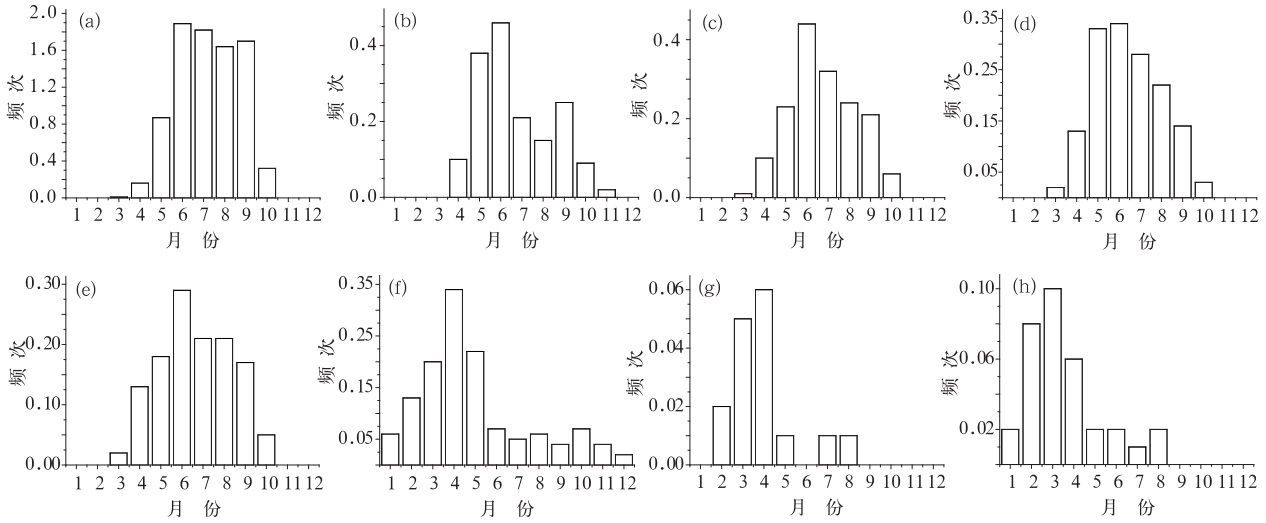

图 2　1958—2007 年我国 8 大区域月冰雹频次图

(a)青藏高原;(b)东北;(c)华北;(d)西北西部;(e)西北东部;(f)西南;(g)华南;(h)长江流域

Fig. 2　Hail monthly frequency in 8 regions of China for period 1958—2007

(a) Tibetan Plateau, (b) Northeast China, (c) North China, (d) western Northwest China, (e) eastern Nothwest China, (f) Southwest China, (g) South China, and (h) the Yangtze River Valley

2.2　时空变化特征

我国冰雹次数近 50 年呈显著下降趋势,前 30 年基本高于平均值 100～200 次,且呈周期波动状态,而近 20 年,降雹次数呈显著下降状态,且均低于平均值 200～300 次,近 50 年冰雹下降趋势为每年减少 12 次(图略)。从空间分布来看,我国大部分地区降雹呈下降趋势,尤其是在我国的北方、青藏高原中东部、西南和长江中上游以南部分地区,大部分通过了 0.05 的显著性水平检验,这几个区域连成一片,占据了我国近 2/3 的面积,其中又以东北、华北、西北和青藏高原中东部的下降趋势最为明显,平均每个站点的降雹次数在近 50 年减少了 5～20 次。黄淮流域、长江中下游和华南地区年降雹次数的变化趋势不一致,有的增加有的减少,增加的区域主要分布在东部和南部的沿海区域,增加和减少的趋势都不显著(图 3)。

对我国年降雹次数做距平处理后进行EOF分

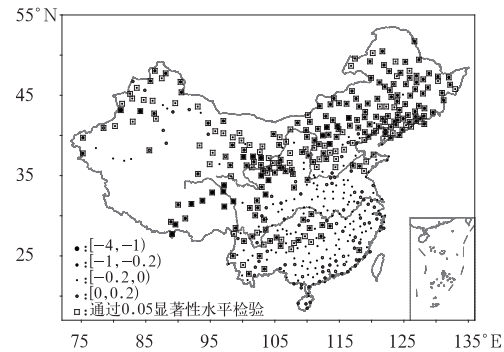

图 3　1958—2007 年我国各站冰雹变化趋势

(单位:次数/10 年)

●表示下降趋势,○表示上升趋势,

□表示通过了显著性水平检验

Fig. 3　Trend of hail events in each station of China for period 1958—2007

(times/decade)

● downtrend, ○ uptrend, □ statistical significance level passing through 0.05

析(图 4)。第一特征向量的结果与图 3 的线性趋势方法结果一致,主要反映了冰雹的空间下降趋势与冰雹的空间分布大致相同,降雹较多的地方下降较显著,我国冰雹下降最多的区域以北方和青藏高原为主,西南和长江中上游以南部分地区次之。从时间系数可知,近 50 年我国冰雹呈显著下降趋势,20 世纪70年代末以前降雹较多,从70年代末开始减少,80 年代末至今冰雹下降显著。

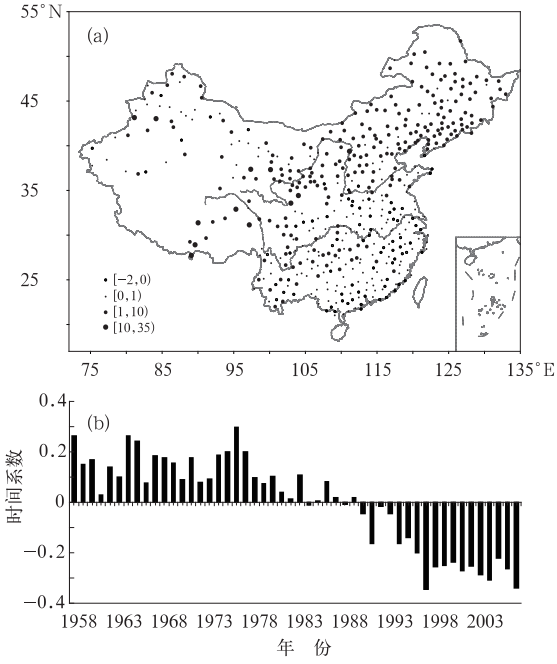

图 4 1958—2007 年全国年降雹次数 EOF 第一模态(a)及时间系数(b)

Fig. 4 The EOF first mode of space distribution (a) and time coefficient (b) of annual hail events in China for period 1958—2007

从各区域近 50 年冰雹的变化趋势来看(图 5),青藏高原降雹次数从 20 世纪 70 年代初开始,有一个上升趋势,在 1975 年达到峰值,70 年代末开始下降,90 年代开始降雹次数均低于平均值,2006 年达到最小值;东北降雹次数在 1971 年达到峰值,随后呈下降趋势,从 1988 年开始降雹次数均低于平均值,2007 年达到最小值;华北降雹次数在 1959 年达到峰值,之后呈波动状态,从 60 年代中期开始呈下降趋势,1992 年以后均低于平均值,2007 年达到最小值;西北西部地区降雹次数波动比较大,降雹次数在 1958 年达到峰值,从 70 年代末开始在波动中下降,1994 年以后均低于平均值,1997 年达到最小值;西北东部地区降雹次数在 1959 年达到峰值,随后变化比较平缓,基本在平均值上下小范围内波动,1991 年以后均低于平均值,90 年代中后期有一个持续的低值期;徐桂玉等[12]认为我国南方冰雹近 40 年总趋势是下降的,但笔者将南方细分为三大区域后,发现各大区域变化趋势并不一致,西南地区降雹次数波动较大,降雹次数在 1981 年达到峰值,持续 3 年位于高值区后显著下降,随后连续 6 年低于平均值,在 90 年代初有个短暂的上升,随后在波动中下降,趋势显著,在 1999 年达到最小值;华南地区降雹次数周期性明显,基本以 3～4 年的周期波动为主,在 1983 年达到峰值,下降趋势并不显著;长江中下游地区的周期体现为 3～4 年的大波动伴随 4～5 年的小波动,在 1988 年达到峰值。总体来看,我国多雹年主要集中在20世纪60和70年代,80年代为过

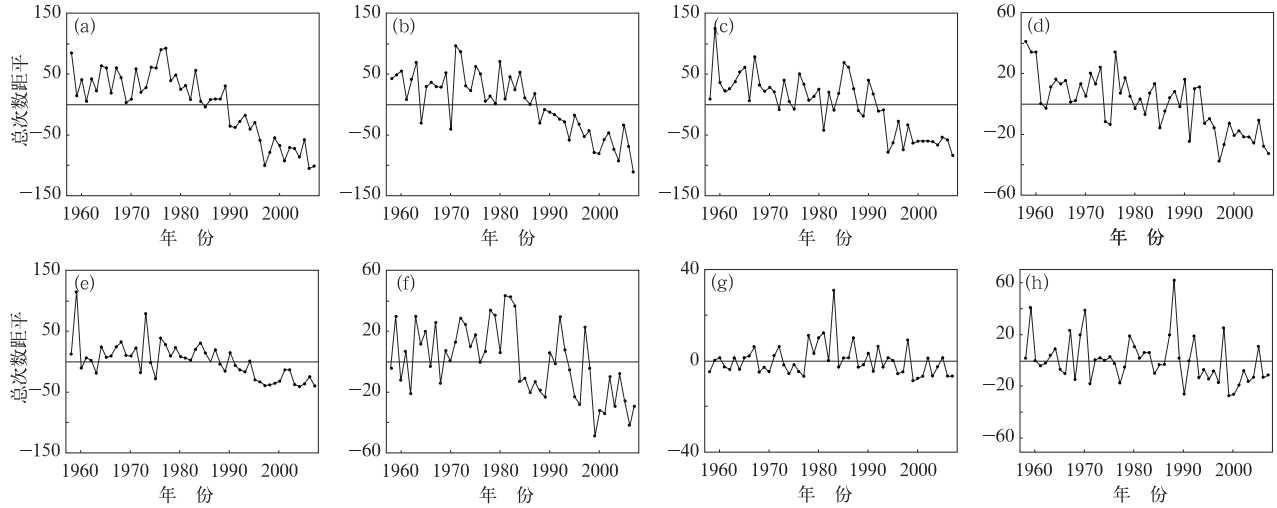

图 5 1958—2007 年我国 8 大区域年冰雹次数距平图(单位:次数)

(a)青藏高原;(b)东北;(c)华北;(d)西北西部;(e)西北东部;(f)西南;(g)华南;(h)长江流域

Fig. 5 As in Fig. 2, but for annual hail anomalies (unit: times)

渡期,少雹年主要集中在 90 年代以后。

3　北方冰雹趋势成因分析

我国北方为冰雹高发地区,20 世纪 70 年代末以来整体下降趋势显著,下面分别从大尺度环流系统的改变及局地温度场的变化来分析我国北方冰雹下降的主要原因,所用特征量的统计时段为北方冰雹的高发时段 4—10 月。

3.1　风场

强大的冰雹云的发展与较大的风垂直切变有密切关系,200 hPa 高空西风急流轴附近存在强大的风垂直切变,可引起动力湍流,使垂直速度加强,同时促进云顶的抽风效应,有利于强对流天气的产生。将降雹次数 EOF 分析第一模态的时间系数与 4—10 月 200 hPa 高空纬向风场做相关(图 6),阴影区为 200 hPa 西风急流气候态。由图可见,200 hPa 西风急流气候态位于我国 35°～40°N 之间,以 35°N 为界,我国北方冰雹变化趋势与 200 hPa 风场呈正相关,南方与 200 hPa 风场呈负相关,正相关高值中心位于内蒙古中部,负相关高值中心覆盖了我国西南和华南地区,高值中心均通过了 0.05 的显著性水平检验,根据冰雹时间系数的变化趋势,说明近 50 年 200 hPa 纬向风场在北部强度逐渐减弱,在南部强度逐渐增强。正如前人所研究的,从 20 世纪 70 年代末开始,200 hPa 西风急流出现南移[15-16],80 年代以前,200hPa高空西风急流偏北,我国北方大部分地区位于西风急流的正下方,高空辐散和低空辐合的条件有利于气流上升运动,风速垂直切变大,易于产生强对流天气[17];80 年代以后,随着 200 hPa 西风急流的南移,北部的风场逐渐减弱,垂直切变减小,对流随之减弱,不利于冰雹的形成,冰雹次数下降。

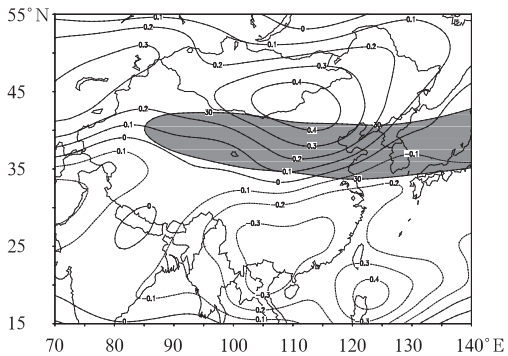

图 6　第一模态时间系数与 200 hPa 风场相关图
阴影区为 200 hPa 西风急流气候态
(单位:m·s^{-1})

Fig. 6　The correlation between the first mode time coefficient and the 200 hPa zonal wind
Shading indicates the climate mean conditions of 200 hPa westerly jet stream (m·s^{-1})

3.2　高度场

高度场随着全球变暖而升高,其年代际变化特征也会影响冰雹的形成。将降雹次数 EOF 分析第一模态的时间系数与 4—10 月 850 hPa 高度场做相关分析,由图7a可见,整个中国区域的高度场与冰

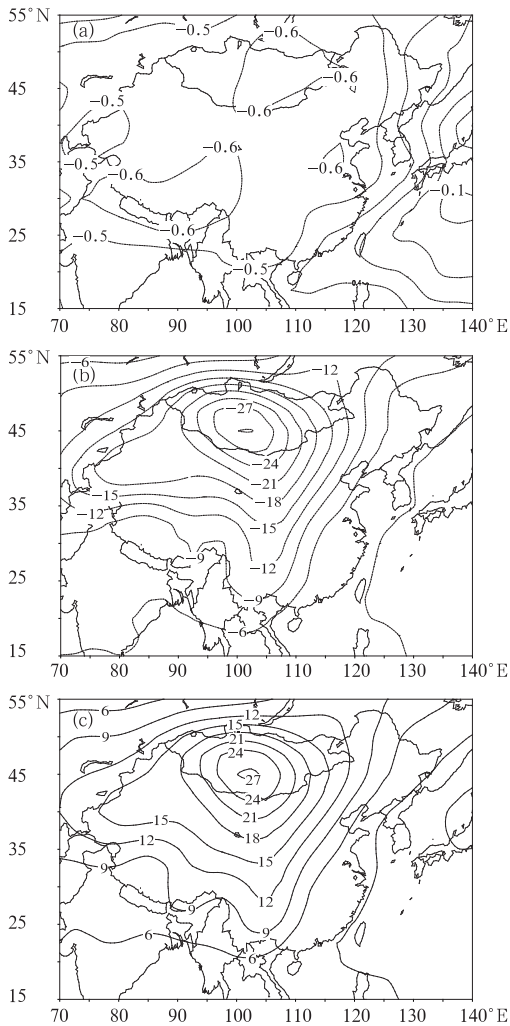

图 7　EOF 第一模态时间系数与 850 hPa 高度场相关图(a);多雹年 850 hPa 高度场距平图(b);少雹年 850 hPa 高度场距平图(c)

Fig. 7　(a) The correlation between the first mode time coefficient and the 850 hPa height field; (b) the 850 hPa height field anomalies for years with more hails and (c) the 850 hPa height field anomalies for years with less hails

雹变化趋势呈显著负相关，高值中心位于蒙古国境内，说明近 50 年我国 850 hPa 高度场显著抬升。同时作多雹年、少雹年高度场的合成分析，由于 20 世纪 80 年代为波动期，选取 1958—1980 年作为多雹年时间段，1990—2007 年作为少雹年时间段，分别作两个时间段内 850 hPa 高度场的距平图(图 7b 和 7c)。发现在多雹年时间段里，我国 850 hPa 高度场为负距平，少雹年时间段里，我国 850 hPa 高度场为正距平，两者的高值中心均位于蒙古国境内，与相关分析结果一致。正如前人所研究的，从 20 世纪 70 年代末开始，我国高度场升高[18-19]，高度场的升高，不利于北面冷空气南下和低层辐合高层辐散对流系统的建立，这样无法满足冰雹形成的动力条件，受其影响，降雹次数显著减少。

3.3 副高和极涡

北半球副高和极涡的面积大小对我国冰雹的变化也有一定的影响[10]。将每年 4—10 月平均北半球副高面积指数、北半球极涡面积指数和每年全国的降雹次数分别做距平标准化处理，然后分别做相关分析。北半球副高面积指数与降雹次数成负相关，相关系数达－0.56，北半球极涡面积指数与降雹次数成正相关，相关系数达 0.7，两者均通过了 95% 的显著性水平检验。从图8中可以看出，20世纪80年代开始，北半球副高进入了增强阶段，同时北半球极涡进入减弱阶段，这样的条件下，大气温度较高，层结稳定[20]，极地冷空气活动不够频繁，北方冷空气南下少，在这两个条件的共同作用下，我国降雹次数显著下降。

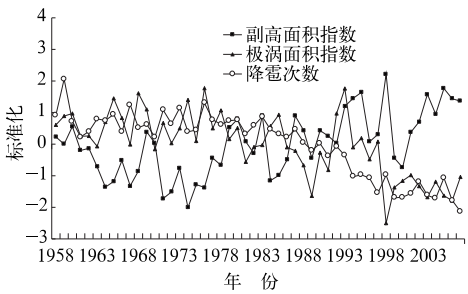

图 8 1958—2007 年我国冰雹、北半球副高面积和极涡面积标准化指数变化图

Fig. 8 Standardized indexes of hail events, subtropical high area and polar vortex area for period 1958—2007

—○— standardized index of hail events, —▲— standardized index of polar vortex area, —■— standardized index of subtropical high area

3.4 局地垂直温度场

根据前人的研究结果[21-22]，近半世纪以来我国气温持续升高，20 世纪 80 年代以后尤其显著，温度场对冰雹的形成有重要影响，因此我们可以从温度场变化情况来分析冰雹减少的原因。以我国北方冰雹下降趋势通过显著性水平检验的区域为研究对象，分别为东北、华北、西北东部和西北西部，选取各区域历史上的多雹年和少雹年，统计多雹年和少雹年中各区域主要降雹月份(4—10 月)纬向平均温度，得到多雹年与少雹年在经向剖面上的温度差(图9)，实线为少雹年减去多雹年的温度差，虚线为 0 ℃线和－20 ℃线，阴影为地形高度，图 9a～9d 分别表示东北、华北、西北东部和西北西部地区。研究发现在少雹年期间，东北和西北西部的 0 ℃线和－20 ℃线均抬升，但 0 ℃线抬升幅度大于－20℃线，华北 0 ℃线在低纬度下降，高纬度变化幅度不大，－20 ℃线下降幅度大于 0 ℃线，西北东部 0 ℃线下降，－20 ℃线抬升，即除西北东部的 0 ℃线和－20 ℃线之间距离增大外，其余三个区域两线之间的距离均缩短。0 ℃线和－20 ℃线分别是云中冷暖分界线和大水滴的自然冰化区下界，是表征雹云特点的两个重要参数，两层之间的区域正好是过冷却水滴累积区，是冰雹反复碰并增长的场所[23]。虽然在全球变暖的大背景下，近 20 年东亚对流层温度升高，平流层中下部温度降低，垂直温度梯度的增大使大气不稳定性增加[24]，但是从动力条件来看，0 ℃ 线的抬升，使对流作用在 0℃线以上所经历的路程变短，冰雹本身温度不够低，不能完成冻结过程，不利于形成冰雹，即使形成，由于 0 ℃线和－20 ℃线之间过冷却水滴累积区的距离减小，使雹粒不能进行充分的碰并增长，体积较小，本身温度较高，同时，0 ℃线的抬升，使冰雹下落距离增大，在下降过程中更容易融化成雨滴，不能以雹粒的形式降落到地面，导致冰雹次数减少。

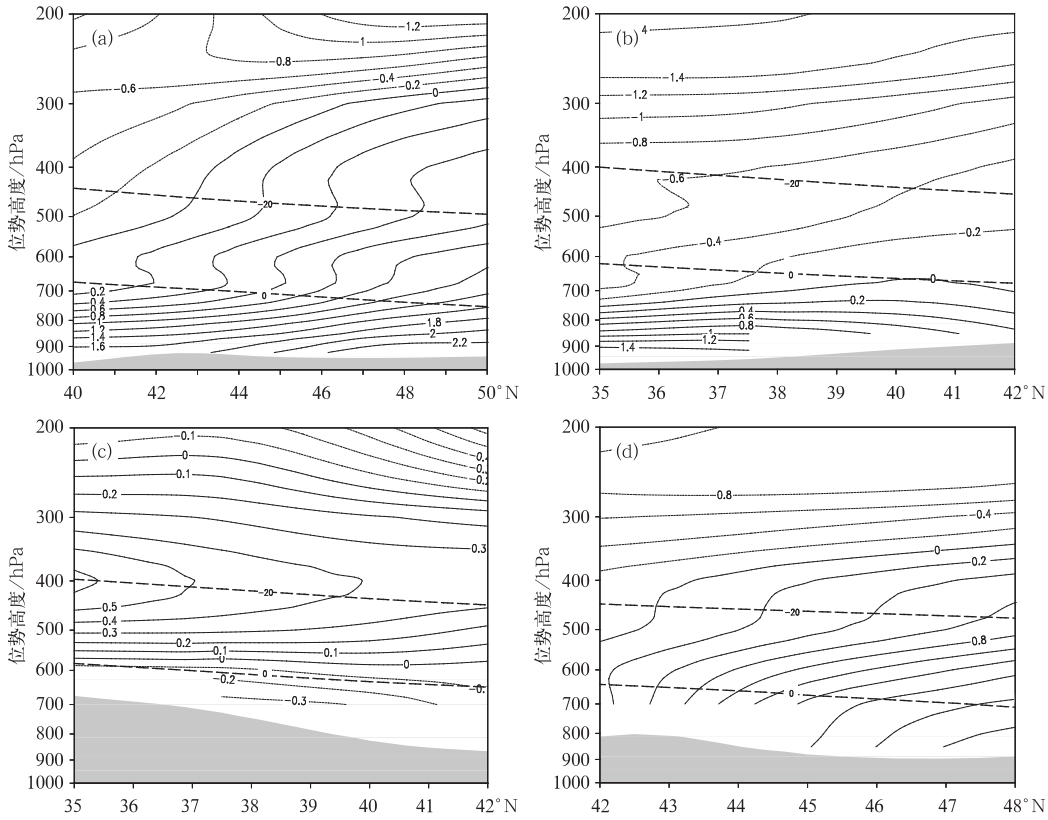

图 9　我国北方温度随高度-纬度变化的剖面图(单位:℃)

(a)东北;(b)华北;(c)西北东部;(d)西北西部地区

Fig. 9　The height-latitude section of temperature in northern China(℃)

(a) Northeast China, (b) North China, (c) eastern Northwest China and (d) western Northwest China

4　结论和讨论

本文利用 1958—2007 年 755 个站的逐日冰雹资料和同期 NCEP/NCAR 再分析资料以及环流特征量,即风场、高度场、温度场、副高和极涡指数资料,研究近 50 年我国冰雹时空变化特征及其成因。结果表明:

(1) 从空间分布来看,我国降雹主要集中在北方和青藏高原,其次是东北、内蒙古中部和西南部分地区,黄淮流域、长江流域和华南最少,总体来看是高原和山地多于平原地区。从时间上来说,南方冰雹早于北方,南方主要集中在 1—5 月,北方和青藏高原集中在 4—10 月。

(2) 近 50 年我国冰雹呈显著下降趋势,20 世纪 70 年代末以前降雹较多,80 年代开始减少,80 年代末以后降雹次数显著下降,其中北方冰雹下降趋势显著,大部地区通过了 0.05 的显著性水平检验,黄淮、长江中下游和华南地区年降雹次数的变化趋势不一致,有增有减;各区域的年冰雹变化趋势也有所差异,除华南和长江流域呈现周期性波动外,其他地区的冰雹都呈显著下降趋势,且多雹年主要集中在 20 世纪 60 和 70 年代,少雹年主要集中在 90 年代以后。

(3) 冰雹年代际变化特征与大尺度环流系统的调整具有密切关系。自 20 世纪 70 年代末开始,200 hPa 高空西风急流南移,我国北方 200 hPa 纬向风场减弱,风速垂直切变减小,对流减弱,不利于冰雹的形成,同时,低层高度场升高,不利于极地冷空气南下和低层辐合高层辐散对流系统的建立,这样无法满足冰雹形成的动力条件,另外,80 年代开始,北半球副高进入了增强阶段,北半球极涡进入减弱阶段,这样的条件下,大气温度较高,层结稳定,同时极地冷空气活动不够频繁,北方冷空气南下少,在这些大尺度环流系统的共同作用下,导致我国北方冰雹显著下降。

(4) 从局地垂直温度场的分析来看,随着全球变暖,对流层的升温和平流层中下部的降温,在使大气不稳定性增加的同时,我国东北、华北和西北西部区域0 ℃线和-20 ℃线之间过冷却水滴累积区的距离减小,使雹粒不能进行充分的碰并增长,0 ℃线的抬升,又增加了冰雹落地的距离,使雹粒在降落到地面前就已融化成雨滴,从而导致冰雹的减少,而西北东部地区过冷却水滴累积区距离增大,但冰雹次数仍然下降,这一点有待进一步研究。

大尺度环流系统的改变是我国北方冰雹下降的一个气候背景,而局地垂直温度场的变化直接影响冰雹的形成,这是东北、华北和西北西部冰雹出现年代际显著下降的重要原因,但西北东部垂直温度场的变化并不显著,该区域冰雹显著下降的原因还有待进一步深入研究;另外,在我国降雹整体出现减少的情况下,全国各区域冰雹出现显著下降的阶段有所不同,这也许与大尺度环流调整后,局地环流调整的阶段不尽相同有关,这也有待于进一步细致的分析。上述分析表明,大尺度环流系统的年代际气候调整对于降雹具有重要的影响,随着全国开展人工防雹作业,对降雹的变化也具有影响,但冰雹灾情资料历史信息有限,并且目前的灾情中将大风与冰雹的灾害作为一个整体,一方面风雹灾情资料记录较少且质量不高,另一方面风和冰雹两种灾害的灾情难以分离。本文主要从气候学的角度对冰雹天气现象的年代际变化进行分析,人工防雹作业的影响对冰雹灾害的影响及对冰雹天气现象的年代际影响,是未来需要进一步深入研究的问题。

致谢:感谢杨明珠博士、左金清博士、韩荣青博士、郑志海博士的耐心帮助和指导。

参考文献

[1] 张霞,周建群,申永辰,等. 一次强冰雹过程的物理机制分析[J]. 气象,2005,31(4):13-17.

[2] 许晨海,张纪淮. 降雹前大气层结稳定状态下的环境场特征[J]. 气象,1999,25(12):17-21.

[3] 杨晓霞,张爱华,贺业坤. 连续冰雹天气的物理量场特征分析[J]. 气象,2000,26(4):50-54.

[4] 樊利强,王迎春,陈明轩. 利用雷达资料反演方法对北京地区一次强对流天气过程的分析[J]. 气象,2009,35(11):9-16.

[5] 肖现,陈明轩,孔荣. 一次典型对流天气的温度场结构特点[J]. 气象,2008,34(专刊):80-84.

[6] 宋晓辉,柴东红,蔡守新. 冰雹天气过程的综合分析[J]. 气象科技,2007,35(3):330-335.

[7] Zhang Chunxi, Zhang Qinghong, Wang Yuqing. Climatology of Hail in China: 1961—2005[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008,47(3):795-804.

[8] 尤莉,徐玉强,程玉琴,等. 赤峰地区冰雹天气的环流特征及其预报[J]. 气象,2006,32(4):101-105.

[9] 郭江勇,张强,杨民. 对西北地区冰雹影响因子的探讨[J]. 灾害学,2005,20(1):40-44.

[10] 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.

[11] 张信华,余建华,范明福,等. 闽北不同季节强对流天气异同点分析[J]. 气象,2010,36(6):29-34.

[12] 徐桂玉,杨修群. 中国南方冰雹气候特征的三维 EOF 分析[J]. 热带气象学报, 2002. 18(4):383-392.

[13] 杨金虎, 江志红,王鹏祥,等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008. 13(1):75-83.

[14] 周嵬,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.

[15] Wang H. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18:376-386.

[16] Hu Z Z. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(19):403-419.

[17] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社,2005:138.

[18] Li H, Dai A, Zhou T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950—2000[J]. Climate Dynamics, 2010, 34(4):501-514.

[19] 曾红玲,高新全. 近20年全球冬、夏季海平面气压场和500 hPa高度场年代际变化特征分析[J]. 高原气象, 2002, 21(001):66-73.

[20] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社,2000:45.

[21] 王遵娅,丁一汇,何金海,等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,2004,62(2):228-236.

[22] 卢爱刚,康世昌,庞德谦,等. 全球升温下中国各地气温变化不同步性研究[J]. 干旱区地理,2009,32(4):506-511.

[23] 许焕斌,段英,刘海月. 雹云物理与防雹的原理和设计[M]. 北京:气象出版社, 2004:224.

[24] 吴涧, 杨茜,符淙斌,等. 全球变暖背景下东亚对流层顶高度演变特征的研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6):595-600.