

张茜茹,高山红.山东省冰雹频数月际变化的时空特征与成因探究[J].海洋气象学报,2020,40(1):22-32.  
ZHANG Qianru, GAO Shan hong. A study on monthly spatiotemporal variation of hail frequency over Shandong Province and its formation mechanism[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(1):22-32. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.003. (in Chinese)

## 山东省冰雹频数月际变化的时空特征与成因探究

张茜茹<sup>1,2</sup>,高山红<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

**摘要:** 基于观测数据,统计分析了1999—2017年山东省冰雹频数月际变化的时空特征;基于大气再分析数据,通过对大尺度环流客观分型与物理量场的合成分析,探究了月际变化的成因。统计结果显示,山东省冰雹频数存在显著的月际变化,逐月冰雹落区具有明显的空间差异。成因探究结果表明:1)约88%的冰雹发生于低槽槽前,或槽后西北气流的环流形势下,此两种形势发生频率之和的月际变化与冰雹频数的月际变化呈现一致的起伏特征;2)水汽与热力条件影响了冰雹发生频数,对4—6月和9—10月而言,充足的水汽与强不稳定对应了较高的冰雹频数,其中6月冰雹频数最高归因于水汽含量与K指数均达到最大,且距平正异常最小;3)4—9月冰雹落区的空间分布与低层水汽输送及辐合存在较好的对应关系,而10月对应关系不明显。

**关键词:** 冰雹频数;月际变化;时空特征;环流客观分型;水汽与热力条件;水汽辐合

**中图分类号:** P426.64;P458.1212 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)01-0022-11  
**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.003

## A study on monthly spatiotemporal variation of hail frequency over Shandong Province and its formation mechanism

ZHANG Qianru<sup>1,2</sup>, GAO Shan hong<sup>1,2</sup>

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The monthly temporal and spatial characteristics of hail frequency (HF) over Shandong Province from 1999 to 2017 are statistically analyzed based on observation data. In addition, the reasons of the monthly variations are explored by the objective classification of circulation patterns and the composite analysis of physical characters based on atmospheric reanalysis data. The statistic results show that there are obvious monthly variations of HF and spatial differences in the monthly hailfall area over Shandong. The exploration of formation mechanism is shown below. 1) About 88% of hail occurs in the trough or the northwest airflow behind trough, and the monthly variation of the above two circulation patterns' cumulative frequency is consistent with the monthly variation of HF. 2) Low-level water vapor and thermal conditions affect the HF. From April to June and from September to October, sufficient water vapor and strong instability correspond to higher HF. The HF is the highest in June because both water vapor and K index reach their maximum and the positive anomaly is the smallest. 3) From April to September, the spatial distribution of hailfall area is well correlated to low-level water vapor transport and

收稿日期:2019-12-04; 修订日期:2020-02-06

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404200, 2017YFC1404100);山东省重点研发计划项目(2019GSF111066)

作者简介:张茜茹,女,硕士研究生,主要从事山东省冰雹的统计分析工作及数值模拟的研究,zhangqianru\_m@163.com。

通信作者:高山红,男,博士,教授,主要从事海洋灾害天气的演变机理及数值模拟与预报技术的研究,gaosh@ouc.edu.cn。

convergence, while such correlation is not obvious in October.

**Key words** hail frequency; monthly variation; spatial and temporal characteristics; objective classification of circulation pattern; water vapor and thermal condition; water vapor convergence

## 引言

冰雹是一种固态降水,常由强对流系统引发,具有时效短、局地性强、单次影响程度大的特点<sup>[1-2]</sup>。冰雹发生的时空尺度通常很小,实际业务预报难度较大。了解冰雹发生的时空分布特点,分析其变化特征,是加深冰雹机制认识的重要基础之一。

国内外学者在冰雹的发生机制、业务预报与统计分析等方面进行了大量的研究。譬如,LI et al.<sup>[3]</sup>,刁秀广<sup>[4]</sup>和高晓梅等<sup>[5]</sup>研究了冰雹的触发机制及动力热力结构的演变特征;JOE et al.<sup>[6]</sup>利用雷达研究了冰雹的短时临近预报技术。这些工作多针对单个冰雹事件开展个例研究。除此之外,很多学者对世界各地冰雹事件的时空分布特征进行了统计分析,寻求冰雹的时空变化规律。例如,CHANGNON<sup>[7]</sup>,DESSENS<sup>[8]</sup>和 LI et al.<sup>[9]</sup>指出冰雹在空间分布上具有显著的局地性,其发生频率与地势高度成正比,主要集中在山地与丘陵等高地形附近;KAHRAMAN et al.<sup>[10]</sup>、张芳华和高辉<sup>[11]</sup>分别对土耳其与中国的冰雹频数进行研究,指出冰雹在时间分布上具有明显的季节性,多发生在春夏两季。此外,冰雹还存在着明显的月际变化特征,如MERINO et al.<sup>[12]</sup>指出欧洲西南部的冰雹集中发生在 5 月,随后冰雹频数逐渐减少,到 9 月鲜有冰雹发生;吴占华等<sup>[13]</sup>对山西省冰雹进行了逐月统计,指出山西省各月冰雹日数的空间分布特征不尽相同,5—9 月冰雹日的空间分布格局相似,主要发生在山西东部,而 4 月与 10 月较为相似,主要发生在山西西北部,但未给出该现象的成因。

山东省地处华东沿海,中部为地势较高的鲁中山区,东部为与黄海、渤海毗邻的山东半岛,冰雹是其境内的一种主要灾害天气。已有文章主要研究了山东省多年总冰雹频数或指定月份冰雹频数的空间分布特征<sup>[14-17]</sup>,对逐月冰雹落区空间分布差异的研究几乎没有。此外,尽管前人统计了山东省冰雹频数的逐月变化,但是尚未给出其成因。因此,本文在前人<sup>[18-28]</sup>工作的基础上,进一步详细统计分析山东省冰雹频数月际变化的时空特征,并试图清楚地揭示其形成原因。

## 1 数据与方法

### 1.1 地面观测与再分析数据

选用 1999—2017 年中国气象局《全国特殊天气数据库》中记录冰雹过程的地面观测数据进行冰雹统计工作。从中提取出山东省 123 个国家级气象观测站,并对观测结果进行了随机抽样检查,以保证数据的可靠性。该数据中,冰雹事件的天气代码为 39,记录节点为每天的 08 时(北京时,下同)、14 时及 20 时,即前一日 20 时—08 时每 12 h 记录 1 次降雹,08 时—20 时每 6 h 记录 1 次降雹。本文中的冰雹频数指降雹次数。

采用了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)0.75°×0.75°的 ERA-Interim 再分析数据,包括地面至 500 hPa 共 14 层 6 h 间隔的基本气象要素场:位势高度、风、温度、相对湿度和比湿。

### 1.2 统计分析方法及其目的

#### 1.2.1 REOF 与 K-means

冰雹是特定天气系统下的产物,其发生与大尺度环流形势紧密关联。在已有研究中,多采用主观的统计方法,即挑选冰雹个例并逐一分析,归纳总结获得冰雹天气形势的分型结果<sup>[18-20]</sup>。这种方法不仅耗时,而且客观性较差。本文采用旋转经验正交函数分解(简记 REOF,下同)与 K-means 聚类分析结合的方法<sup>[21-22]</sup>,对山东省 1999—2017 年发生冰雹月份的环流形势进行客观分型,目的是得到逐月环流的分布特征以及造成冰雹的主要天气系统,为后面冰雹月际变化的成因分析提供支撑。

REOF 是在传统主成分分析(EOF)的基础上做旋转,本文采用了方差最大正交旋转法<sup>[23]</sup>,其分离出来的典型空间模态载荷集中在某一较小的区域上,其余区域均接近于 0,可最大限度地捕获到同类天气过程的局地变化特征。REOF 的荷载向量场反映了空间结构特征,对应的时间系数的量级大小为空间特征的权重系数,时间系数相近的个例表示空间特征相似,因此需要通过时间系数聚类来实现对天气形势的分类。本文采用的是 K-means 聚类分析的方法<sup>[24]</sup>。K-means 的基本原理是把  $n$  个对象分为  $k$  个簇( $k$  最优解的范围为  $2 \leq k \leq n^{1/2}$ ),使簇内具有较高的相似度,聚类效果的优劣使用轮廓系数

$S_k$  衡量,该数值越大聚类效果越好。

本文聚焦于 1999—2017 年山东省内发生冰雹的 4—10 月的逐月环流特征,对山东省范围内 ( $33.75^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$ ,  $114^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ ) 日平均物理量场首先逐月地进行 EOF。考虑到冰雹发生时具有垂直层结不稳定、较充沛的水汽条件与较强的垂直风切变等特征,所以在做 EOF 分解时,着重考虑了 500 hPa 位势高度、700 hPa 风以及 850 hPa 温度与比湿这 4 个物理量。接着,对 EOF 结果中的前 3 个模态旋转,完成 REOF。最后,对 REOF 分析得到的时间序列进行聚类分析,根据轮廓系数  $S_k$  选出最优聚类,从而完成客观分型。

### 1.2.2 合成分析

合成分析是指对同类天气进行平均,从而系统地分析某类天气过程。本文利用合成分析方法对 4—10 月各自的最优聚类结果进行合成,归类出不同月份环流形势背景场,得到造成冰雹的环流形势,服务于冰雹月际变化的成因解释。此外,研究水汽与热力条件,以及低层水汽输送等方面的特征时,也利用了合成分析的方法。

## 2 冰雹频数月际变化的时空特征

基于 1999—2017 年国家级气象观测站资料,对这 19 a 山东省各站点发生冰雹的频数进行加和,得到了冰雹落区(图 1)。由图 1 可以看出,山东省存在鲁中山区西部、鲁北平原及半岛北部 3 个冰雹多发区(图 1 中的红框所示),这与王庆<sup>[17]</sup>研究给出的冰雹多发区的地理位置大致相同。下面基于此观测数据,详细给出山东省冰雹频数月际变化的时空分布特征。

### 2.1 逐月频数变化

1999—2017 年山东省共发生 157 次降雹,图 2 给出了全省逐月冰雹频数。由图 2 可以清楚地看出:冰雹只发生在 4—10 月;4—6 月冰雹频数迅速增加,6 月冰雹频数高达 61 次;7 月冰雹频数骤降,8—9 月继续降低,9 月仅为 6 次;而到了 10 月,冰雹频数却再次增加至 10 次。已有研究虽然指出冰雹集中于春末夏初<sup>[14-17]</sup>,但却没有提及 7 月存在冰雹频数骤降与 10 月冰雹频数再次增加的现象。

### 2.2 逐月冰雹落区

为了进一步清晰地揭示图 2 中冰雹频数骤降与再次增加这种现象,图 3 详细地展示了 4—10 月逐月冰雹落区的空间分布。总地看来,图 3 中 5 月、6 月与 10 月这 3 个月的单站冰雹频数较高,分别高达

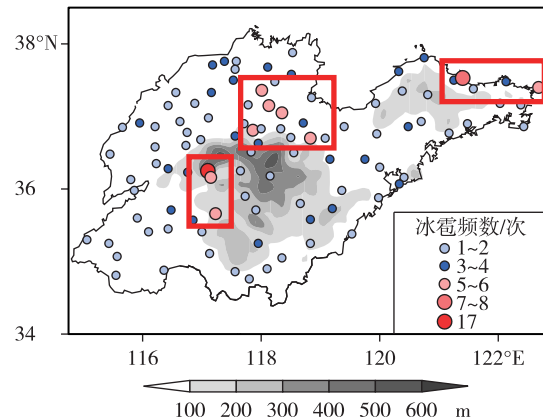


图 1 1999—2017 年山东省冰雹落区(红框为冰雹多发区;阴影为地形高度)

Fig.1 Hailfall area over Shandong from 1999 to 2017 (red frame for hail-prone area; gray shaded area for topographic height)

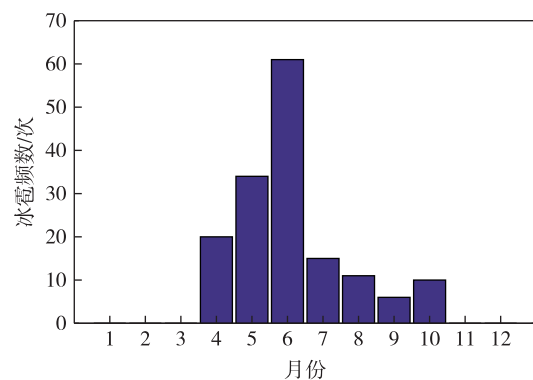


图 2 1999—2017 年 4—10 月山东省冰雹频数的逐月变化规律

Fig.2 Monthly variation of hail frequency over Shandong between April and October from 1999 to 2017

4 次、9 次与 4 次;其他月份单站冰雹频数较低,最高不超过 2 次。对比这 3 个月的各站冰雹频数空间分布,发现 6 月存在 3 个站点冰雹频数较高的区域,分别为鲁中山区西部、鲁北平原及半岛北部(图 3c 中的红框所示);而 5 月与 10 月分别存在 2 个和 1 个站点频数较高的区域,5 月为鲁中山区西部与南部(图 3b 中的红框所示),10 月为半岛北部(图 3g 中的红框所示)。这与图 2 中的 6 月冰雹频数最高,7 月频数骤降与 10 月频数再次增多的统计结果吻合。

此外,仔细考察图 3,可以看出逐月冰雹落区的空间分布呈现明显的月际差异:4 月,冰雹主要集中于鲁西北(图 3a);5 月,鲁西北冰雹频数继续增加,鲁中山区与半岛南部冰雹频数也开始增加(图 3b);6 月,降雹台站增多,出现了鲁中山区西部、鲁北平原、半岛北部 3 个主要冰雹落区(图 3c);7 月,降雹

台站迅速减少且较为分散,相对集中于鲁北平原一带(图 3d);8月,冰雹落区继续缩小,主要分布于鲁北平原与鲁中山区交界处(图 3e);9月,鲁西北的冰雹频数再次变多(图 3f),与4月冰雹落区的空间

分布有相似之处;10月,冰雹落区明显东移,仅发生在莱州湾以东半岛地区,并在半岛北部出现了一个主要冰雹落区(图 3g)。

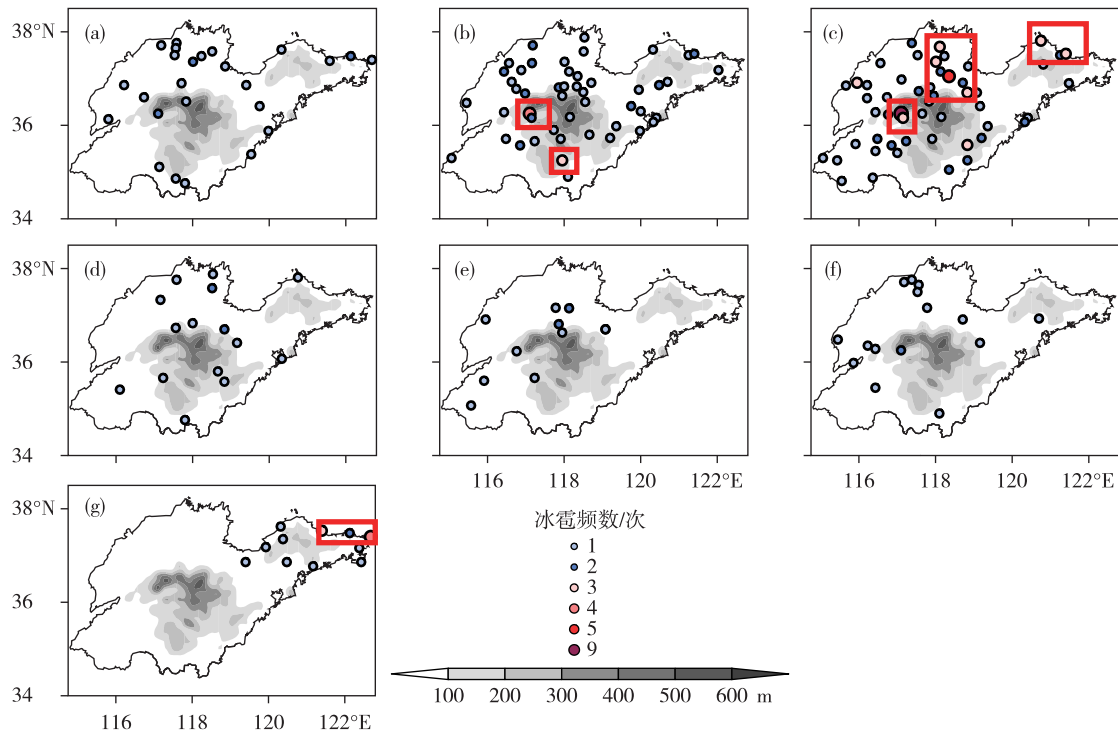


图 3 1999—2017 年 4—10 月山东省逐月冰雹落区(红框为冰雹多发区,阴影为地形高度;a. 4 月,b. 5 月,c. 6 月,d. 7 月, e. 8 月,f. 9 月,g. 10 月)

Fig.3 Monthly hailfall area over Shandong between April and October from 1999 to 2017 (red frame for hail-prone area, gray shaded area for topographic height; a. April, b. May, c. June, d. July, e. August, f. September, g. October)

### 3 冰雹频数月际变化的成因探究

第 2 节的统计结果表明,山东省冰雹频数在时间分布上有显著的逐月变化规律,在空间分布上存在冰雹落区逐月差异明显的特征。下面将从 4 个方面对冰雹频数月际变化的成因展开探究。

#### 3.1 逐月冰雹频数变化规律与大尺度环流的关系

##### 3.1.1 环流形势的客观分型

利用 REOF 与 K-means 聚类分析相结合的方法,对 1999—2017 年山东省 4—10 月的环流形势逐月进行客观分型。以 500 hPa 环流形势和影响系统为主,700 hPa 和 850 hPa 系统为辅,将客观分型结果分为低槽型、槽后西北气流型、脊前西北气流型、高压脊型、副热带高压型及平直西风气流型。由于不同月份同一种环流形势的特征十分一致,所以对环流分型结果进行了归纳,其中低槽型(图 4a)、两类西北气流型(图 4b、c)以及平直西风气流型(图 4f)取 10 月的环流分型结果,高压脊型(图 4d)、副

热带高压型(图 4e)取 7 月的环流分型结果。各月环流类型发生频数的统计结果如表 1 所示,可以看出,客观分型将 4—6 月环流分为 3 大类,7 月环流种类增多,可分为 4 类,8—9 月分为 5 类,而 10 月分为 4 类。

表 2 给出了 6 类环流类型对应冰雹发生的频数与该种环流下冰雹发生率(即百分比),可见各类环流下均有冰雹发生,但低槽型与槽后西北气流型对应的冰雹发生频数和发生率较高,在此两类环流下冰雹发生的频数占总冰雹频数的 87.9%,所以认为低槽型与槽后西北气流型为发生冰雹的主要环流。一些主观统计<sup>[18-20]</sup>指出,降雹时主要环流为冷涡型、低槽型、西北气流型以及横槽转竖型。客观分型结果得到的低槽型和西北气流型降雹与主观统计结果一致,且进一步将西北气流型分为了槽后西北气流型与脊前西北气流型,并指出发生在脊前西北气流型下的冰雹频数较低;此外,客观分型结果还指出了高压脊型、副热带高压型以及平直西风气

流型3种非主要降雹环流。但由于客观分型时存在资料经纬度范围(山东区域)与时间分辨率(日平

均)的限制,所以客观分型结果未得到冷涡型与横槽转竖型降雹。

表1 1999—2017年4—10月各类环流形势的发生频数

Table 1 Frequency of various circulation patterns between April and October from 1999 to 2017

次

月份	发生频数					
	低槽型	槽后西北气流型	脊前西北气流型	高压脊型	副热带高压型	平直西风气流型
4	177	167	226	0	0	0
5	131	304	0	154	0	0
6	159	256	0	155	0	0
7	155	109	0	172	153	0
8	197	101	0	71	130	90
9	62	115	138	129	0	126
10	127	121	206	0	0	135

表2 1999—2017年4—10月各类环流对应冰雹发生频数和发生率

Table 2 Hail frequency and percentage under various circulation patterns between April and October from 1999 to 2017

月份	发生频数/次(发生率/%)					
	低槽型	槽后西北气流型	脊前西北气流型	高压脊型	副热带高压型	平直西风气流型
4	6(3.4)	14(8.3)	0	0	0	0
5	11(8.4)	21(6.9)	0	2(1.3)	0	0
6	23(14.5)	32(12.5)	0	6(3.9)	0	0
7	4(2.5)	8(7.9)	0	1(0.5)	2(1.3)	0
8	3(1.5)	6(5.9)	0	1(1.4)	1(0.8)	0
9	0	2(1.7)	2(1.4)	0	0	2(1.6)
10	2(1.6)	7(5.8)	1(0.5)	0	0	0

### 3.1.2 冰雹频数与环流形势的关系

4—10月低槽型(图4a)环流特征大致相似,500 hPa低槽位于山东西部,700 hPa槽超前于500 hPa高空槽,大气层结不稳定;低层建立了西南—东北向的水汽通道。低槽型环流对应的降雹范围广,但相对集中于鲁西一带。

槽后西北气流型(图4b)为发生冰雹的主要环流类型,表现为朝鲜半岛一带存在低压槽,山东地区700~500 hPa均处于槽后一致较平直的西北气流控制,有强盛的干冷空气侵入;700 hPa受强西北气流影响,风速高达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。脊前西北气流型(图4c)出现在4月、9月与10月,仅造成3次降雹,表现为500 hPa日本海上空受低压槽控制,山东受脊前西北气流影响;700 hPa山东区域的整体风速小于槽后西北气流型。图4b和图4c中的绿色实线分别为10月槽后西北气流型与脊前西北气流型的低层垂直风切变的分布,经对比可以发现,山东区域槽后西北气流型的垂直风切变大于 $3.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,

而脊前型垂直风切变小于 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,前者垂直风切变更强。此外,4月、9月也呈现相同的特征,其中4月槽后型的垂直风切变大于 $4.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,脊前型垂直风切变小于 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ;9月槽后型的垂直风切变大于 $2.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,而脊前型垂直风切变小于 $2.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。可见槽后西北气流型垂直风切变均大于脊前型,而低层强垂直风切变为冰雹的发生提供了动力不稳定条件<sup>[25]</sup>,导致槽后西北气流下冰雹发生频数更高。大气中层干冷空气侵入是西北气流型环流的主要特征,其中强垂直风切变下的槽后西北气流型更易发生冰雹,对应的降雹范围广。

其余环流类型造成降雹的频数均较小,动力条件相对较差。其中高压脊型环流(图4d)造成10次降雹,降雹主要集中于鲁中山区,其环流特征主要表现为500 hPa山东省受高压脊控制,700 hPa受反气旋控制,低层水汽通道建立有利于水汽输送至山东境内。副热带高压型(图4e)仅出现在7—8月,只造成3次降雹,分布在鲁北平原与副热带高压边



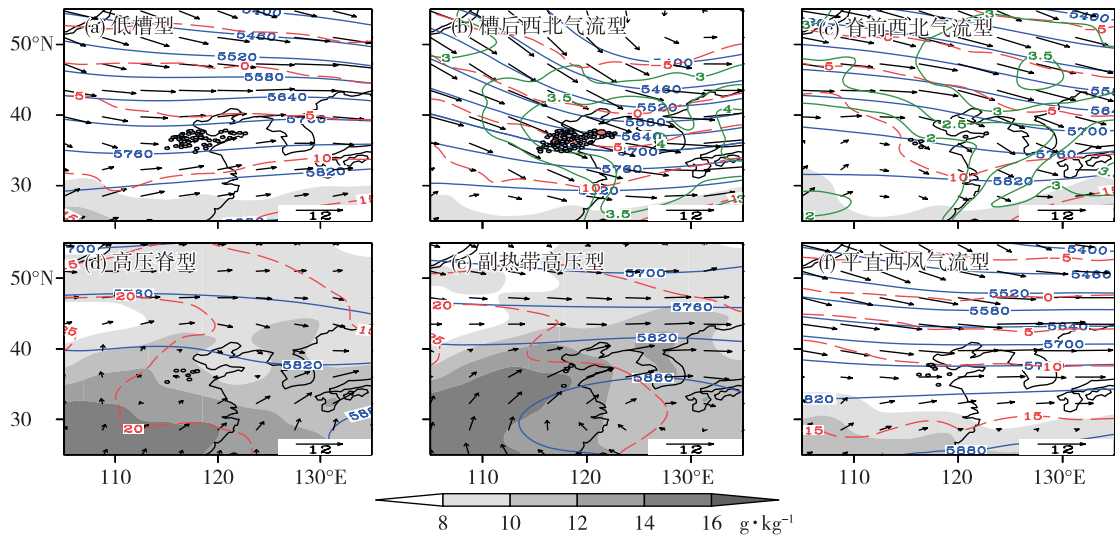


图 4 1999—2017 年环流客观分型结果(蓝色等值线为 500 hPa 位势高度,单位:gpm;箭头为 700 hPa 风场,单位: $m \cdot s^{-1}$ ;红色等值线与填色分别为 850 hPa 温度场与比湿,单位分别为 $^{\circ}C$ 与 $g \cdot kg^{-1}$ ;b、c 中绿色等值线为地面至 700 hPa 垂直风切变,单位: $10^{-3} s^{-1}$ ;图中圆点标记的含义同图 1;a.低槽型,b.槽后西北气流型,c.脊前西北气流型,d.高压脊型,e.副热带高压型,f.平直西风气流型)

Fig.4 Objective classification result of circulation patterns from 1999 to 2017 (blue isoline for geopotential height at 500 hPa, units: gpm; wind arrow for wind field at 700 hPa, units:  $m \cdot s^{-1}$ ; red isoline and shaded area for temperature and specific humidity at 850 hPa, units are  $^{\circ}C$  and  $g \cdot kg^{-1}$ , respectively; green isoline in Fig. 4b and Fig. 4c for vertical wind shear between ground and 700 hPa, units:  $10^{-3} s^{-1}$ ; see Fig. 1 for the meanings of the dots; a. trough, b. northwest airflow behind trough, c. northwest airflow in front of ridge, d. ridge, e. subtropical high, f. straight westerly wind)

缘,此类型下 500 hPa 环流呈现纬向型,高纬度以平直西风气流为主,副热带高压北抬,鲁东南位于副热带高压边缘一带,850 hPa 山东境内存在一条暖舌,对流层中低层西南—东北向水汽通道建立,降雹站点水汽含量高。平直西风气流型(图 4f)仅造成 2 次降雹,降雹站点较分散,500 hPa 环流呈纬向型,华北地区有移动性弱槽过境,由于位置各不相同使得平均场上槽的特征不明显。

图 5 给出了 4—10 月环流类型的分布,由于表 2 的统计结果以及环流特征分析均指出低槽型与槽后西北气流型为降雹的有利环流形势,所以将此两种环流的发生频率之和表示为冰雹有利环流型的发生频率。图 5 显示,有利环流型在 4—6 月维持了较高的发生频率,均大于 60%,7 月发生了骤降,降低至 44.8%,即不利于降雹的环流形势比例增加,导致 7 月冰雹频数骤降;同时,有利环流型在 8—10 月发生频率较低,对应 8—10 月冰雹频数较低;而 10 月有利环流发生频率相比 9 月而言再次增加,使得 10 月冰雹频数再次增加。因此,逐月环流类型分布显著影响了冰雹频数,降雹有利环流型的逐月变化解释了 4—6 月冰雹频数相对较高,7 月发生骤降以及 10 月再次增加的现象。

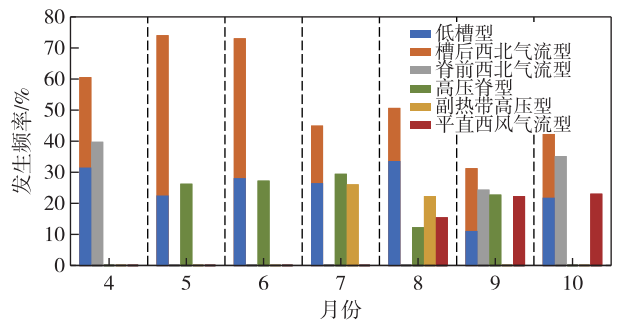


图 5 1999—2017 年 4—10 月环流类型分布  
Fig.5 Distribution of circulation patterns between April and October from 1999 to 2017

### 3.2 水汽与热力条件对逐月冰雹频数差异的影响

冰雹有利环流型发生频率的月际变化与冰雹频数的月际变化呈现相似的起伏特征,但是图 5 中 6 月有利环流型发生频率略低于 5 月,显然无法解释 6 月冰雹频数最高的特征。考察表 2,各类环流下 6 月冰雹发生率均大于 5 月,使得 6 月冰雹频数大于有利环流发生频率更高的 5 月。此外,对比不同月份同一种降雹环流形势下的冰雹发生率,发现 6 月冰雹发生率最大,进而使得冰雹频数在 6 月达到峰值,那么导致 6 月冰雹发生率较大的原因是什么? 水汽与热力条件是冰雹产生的重要因素,下面

分析逐月冰雹发生时以及月平均的水汽、热力不稳定性特征,试图给出6月冰雹发生率最大的原因。

水汽是冰雹产生的基本要素之一,高晓梅等<sup>[25]</sup>指出在冰雹多发的季节,水汽主要集中于大气低层,大部分发生冰雹时的低层水汽都较充足,所以这里主要分析表示低层水汽条件的1 000~700 hPa水汽含量(比湿垂直积分)场。图6给出了4—10月逐月降雹时合成的低层水汽含量(等值线),以及降雹时水汽与19 a月平均(包括非雹日)的差值(填色部分,下面简称“距平”)。图6a—c显示,4—6月水汽逐渐北推,降雹时水汽含量逐月升高,6月低层水汽含量为 $26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右;同时4—6月降雹时水汽含量均高于月平均水汽含量,但距平值逐月减

小,4月山东省范围内最大距平值达 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,6月降为 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下,且最大距平覆盖面积远小于4月,即6月更容易达到降雹时的水汽条件。7—8月水汽含量均较高,为 $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上(图6d,e),降雹时水汽含量均低于月平均水汽含量,但对应的冰雹发生率均较低,是因为7—8月冻结高度较高增加了冰雹下落过程中融化的可能性<sup>[26]</sup>。9—10月降雹时水汽含量持续降低,距平再次成为正值,其中9月降雹时水汽含量较高,但是距平值较大,高达 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图6f),即9月不易达到降雹时的水汽条件,从而限制了冰雹的发生;10月水汽含量整体较低成为降雹的制约条件,降雹只发生于水汽含量较高的莱州湾以东半岛一带(图6g)。

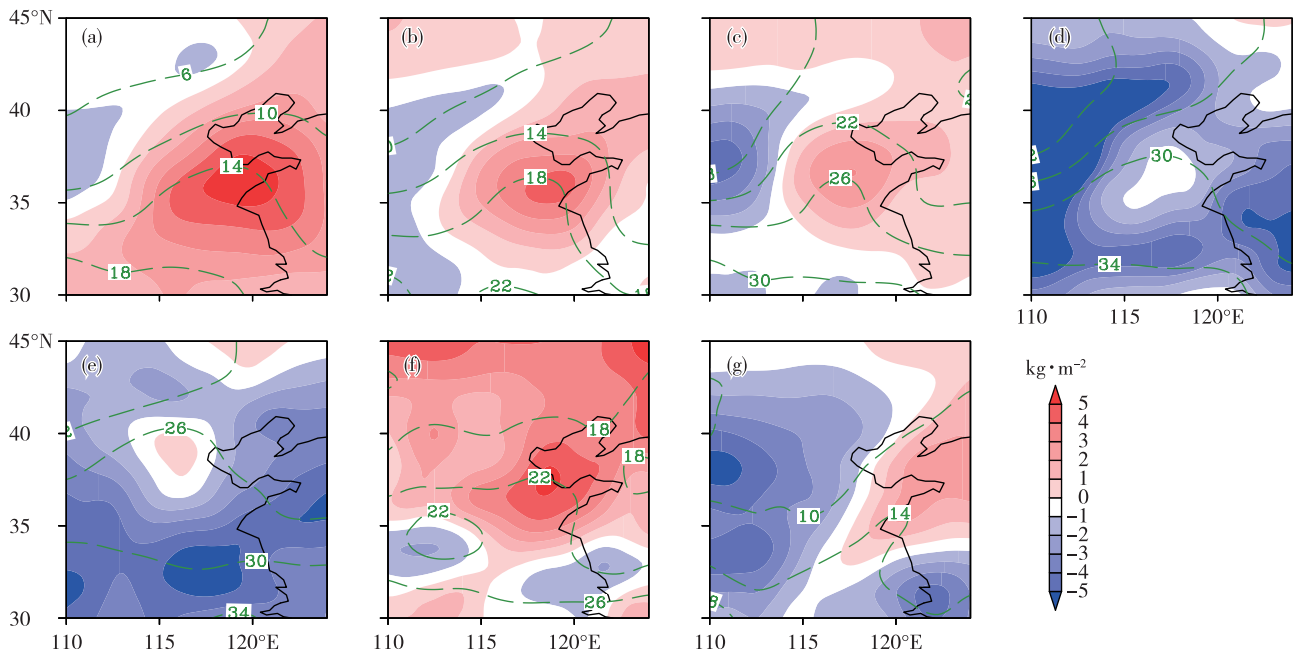


图6 1999—2017年4—10月临近降雹时1 000~700 hPa合成水汽含量(绿色等值线,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )和距平(填色,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )分布(a. 4月, b. 5月, c. 6月, d. 7月, e. 8月, f. 9月, g. 10月)

Fig.6 Composite water vapor content (green isoline, units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) from 1 000 hPa to 700 hPa and the anomaly (shaded, units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) when hail approaches between April and October from 1999 to 2017 (a. April, b. May, c. June, d. July, e. August, f. September, g. October)

冰雹产生的另一个基本要素是热力不稳定性,其中对流层中低层的温湿分布影响了大气稳定度,可用K指数表示不稳定的程度。图7给出了4—10月逐月降雹时合成的K指数(等值线)及距平(填色部分)。总得来看,降雹时K指数随着月份先递进后减小,7月达到最高值,为 $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(图7d),10月最小,仅在山东东部半岛地区为 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上(图7g),可见降雹时K指数的逐月变化与低层水汽的逐月变化趋势一致。然而,K指数距平的逐月变化与水汽距平的逐月变化不同,K指数距平均为正值,即4—10月降雹时K指

数均大于月平均K指数。图7填色部分详细地展示了K指数距平的月际变化:4—6月K指数距平逐渐减小(图7a—c),最大距平差由 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上降为 $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,即6月更容易达到降雹时的热力条件;K指数距平在7—8月均小于 $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图7d,e),虽然达到降雹时热力条件的要求较低,但正如前文指出,7—8月过高的冻结高度使得冰雹下落过程中容易融化;9—10月K指数距平值逐渐增大(图7f,g),最大距平差均为 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,即9—10月不易达到降雹时的热力条件,对应冰雹发生率较低。

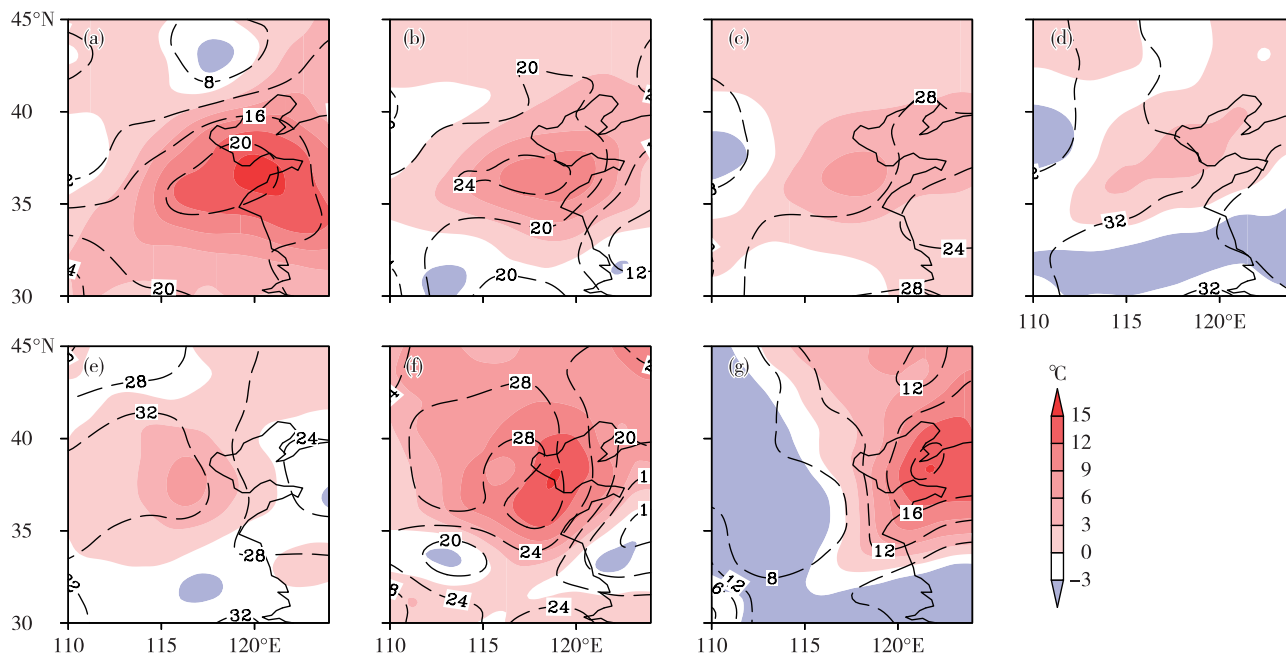


图7 1999—2017年4—10月临近降雹时合成K指数(黑色等值线,单位:°C)和距平(填色,单位:°C)分布(a.4月,b.5月,c.6月,d.7月,e.8月,f.9月,g.10月)

Fig.7 Composite K index (black isoline, units: °C) and the anomaly (shaded, units: °C) when hail approaches between April and October from 1999 to 2017 (a. April, b. May, c. June, d. July, e. August, f. September, g. October)

对比对流层低层水汽含量与K指数的月际变化特征,发现两者都是随月份推移先增加后减小,7月水汽含量与K指数均达到最大。7—8月,水汽充足且K指数较大,但由于山东省处于主汛期,暴雨天气偏多,同时较高的冻结高度增加了冰雹下落过程中融化的可能性,使得7—8月冰雹频数较低。对4—6月和9—10月而言,充足的水汽与强不稳定对应了较高的冰雹发生率,其中6月降雹时以及月平均的水汽含量与K指数均达到最大,同时距平正异常最小,使得6月更容易达到降雹时的水汽与热力条件,解释了表2中同一降雹环流形势下6月冰雹发生率最高这一现象。

### 3.3 逐月冰雹落区与水汽辐合区之间的联系

冰雹有利环流型发生频率总和的逐月变化(图5),结合逐月水汽、热力条件分布特征(图6和图7)可以解释山东省冰雹频数的逐月变化规律(图2),但无法解释逐月冰雹落区的空间差异(图3)。GARCÍA-ORTEGA et al.<sup>[27]</sup>和MERINO et al.<sup>[28]</sup>指出1 000~700 hPa水汽辐合区可大致代表冰雹发生的位置,水汽的辐合可利用负水汽通量散度来表示。因此,下面将利用临近降雹时1 000~700 hPa水汽通量散度分析水汽辐合区与冰雹落区是否存在较好的对应关系。

由图8a-g可发现,山东省冰雹大多发生于水汽辐合区域:4月,冰雹主要集中于鲁西北一带的水汽辐合大值区(图8a);5—6月山东省境内降雹站点分布较均匀,对应水汽辐合的范围较大。对于5月,水汽辐合大值区位于鲁西、鲁北平原以及鲁中山区,其强度大于 $-12 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而以上区域单站冰雹发生频数较高,且降雹站点分布密集(图8b);6月鲁北平原与鲁中山区为水汽辐合大值区,强度在 $-15 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,对应了主要冰雹落区(图8c);7月,冰雹落区与水汽辐合区迅速缩小,此时冰雹集中于鲁北平原一带的水汽辐合大值区,强度达 $-9 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图8d);8—9月,水汽辐合大值区均位于鲁西一带,前者强度较弱,最大值大于 $-9 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,主要冰雹落区位于水汽辐合大值区边缘一带(图8e),后者强度较强,达 $-18 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应9月主要冰雹落区(图8f);10月,莱州湾以东的半岛北部为水汽辐合大值区,强度达 $-9 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与主要冰雹落区吻合。由此来看,低层水汽辐合区与冰雹落区有很好的对应关系。下面将分析逐月水汽通量散度的分布特征,找到水汽辐合的活跃区,从气候背景场解释冰雹落区的逐月差异。



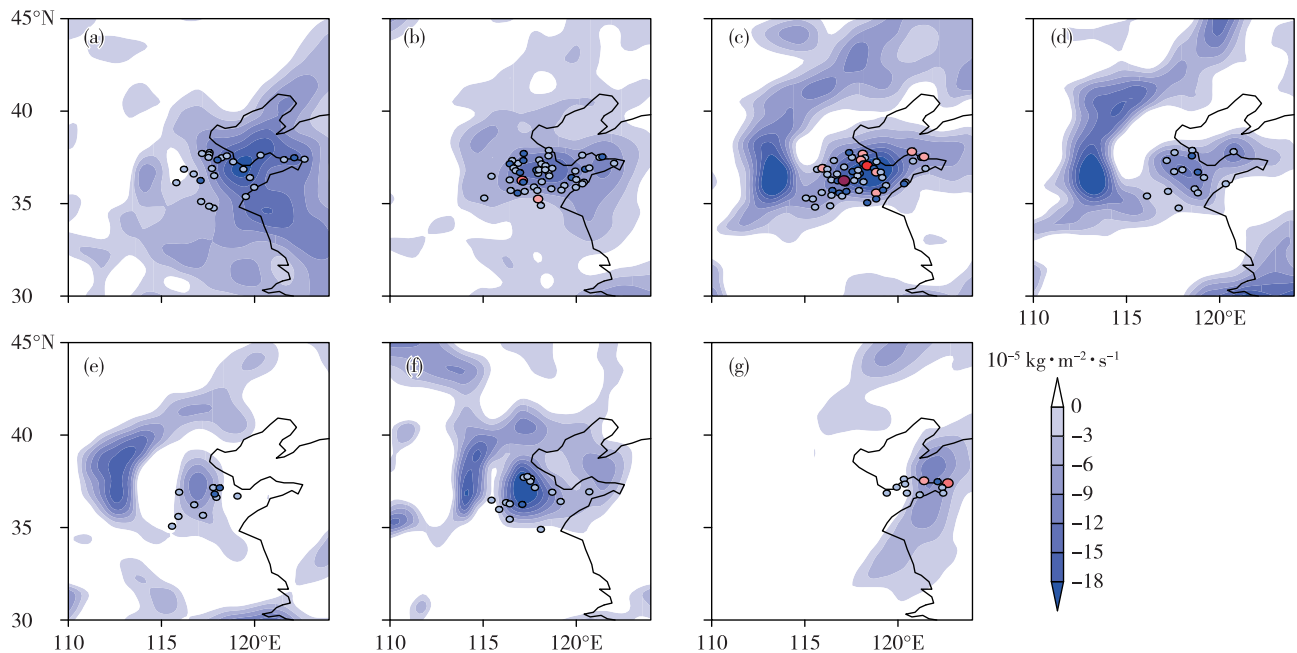


图8 1999—2017年4—10月临近降雹时1000~700 hPa合成水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,图中圆点标记的含义同图3;a. 4月,b. 5月,c. 6月,d. 7月,e. 8月,f. 9月,g. 10月)

Fig.8 Composite water vapor flux divergence (units:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 1000 hPa to 700 hPa when hail approaches between April and October from 1999 to 2017 (see Fig. 3 for the meanings of the dots; a. April, b. May, c. June, d. July, e. August, f. September, g. October)

图9为逐月1000~700 hPa月平均水汽通量散度(填色部分)和对应的水汽通量(箭矢),以及负水汽通量散度(即水汽辐合)的发生率(即百分比,等值线),并认为月平均水汽辐合强度较强与水汽辐合发生率大值区为水汽辐合活跃区。由图9可发现,4—9月冰雹落区与水汽辐合活跃区的对应关系较好,而10月较差。4—6月冰雹落区与水汽辐合活跃区的范围均逐月增大,其中4月山东地区低层平均气流水汽输送的方向自西向东,水汽在鲁西北—鲁北平原一带以及半岛北部辐合,同时以上区域为水汽辐合发生率的大值区(大于46%),增加了冰雹发生的可能性,使得4月冰雹多发生于该区域(图9a)。5月,山东低层建立了自西南至东北向的水汽通道,而在山东北部水汽输送方向自西向东,两支水汽输送带在鲁西北—鲁北平原以及半岛北部辐合,辐合带西南向延伸至鲁西以及鲁中山区西北部,同时水汽辐合区域对应了水汽辐合发生率大值区,在水汽辐合与水汽辐合发生率大于42%的水汽辐合活跃区,降雹站点分布密集(图9b)。6月,对流层低层偏南向的水汽输送强度加强,鲁南一带水汽输送方向为东南向,而鲁南以北水汽输送方向转变为西南向,由于鲁中山区地形的阻挡与摩擦作用,使得水汽逐渐辐合,冰雹主要集中于水汽辐合

强度大于 $-1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 且水汽辐合发生率大于46%的鲁中山区西部、鲁西北—鲁北平原以及半岛北部(图9c)。

相比于5月与6月,7月西南季风水汽输送强劲,整个山东省境内均为水汽辐合,但是鲁北平原为水汽辐合大值区,强度大于 $-4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且水汽辐合发生率较高(大于50%),因此鲁北平原为7月水汽辐合的活跃区,对应了主要冰雹落区(图9d)。8月,山东低层平均气流水汽输送的方向自东南至西北,东南向气流经鲁中山区,在鲁中山区西部辐合,最大辐合强度达 $-2 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时该区域水汽辐合发生率较高(大于50%),为8月主要冰雹落区(图9e)。9月,山东地区低层平均气流呈反气旋式旋转,虽然整个山东均为水汽辐散,但是在鲁西一带水汽辐散的强度最小,同时该区域为9月水汽辐合发生率的大值区(大于42%),增加了冰雹发生的可能性,对应9月的主要冰雹落区(图9f)。10月鲁西北一带为水汽辐合活跃区,冰雹落区与之对应关系较差。该月份渤海海气温差增大<sup>[29]</sup>,半岛北部对流层低层平均气流为西北向(图9g),当强冷空气从西北方向流经暖海面时,对流层低层增温增湿,从而产生下湿上干的不稳定层结,在沿半岛北部海岸线分布的莱山山脉阻

阻挡抬升作用下容易造成降雹。因此,渤海海气温差增大以及半岛北部莱山山脉的阻挡抬升作用可能

是导致 10 月降雹集中于半岛北部的重要因素。

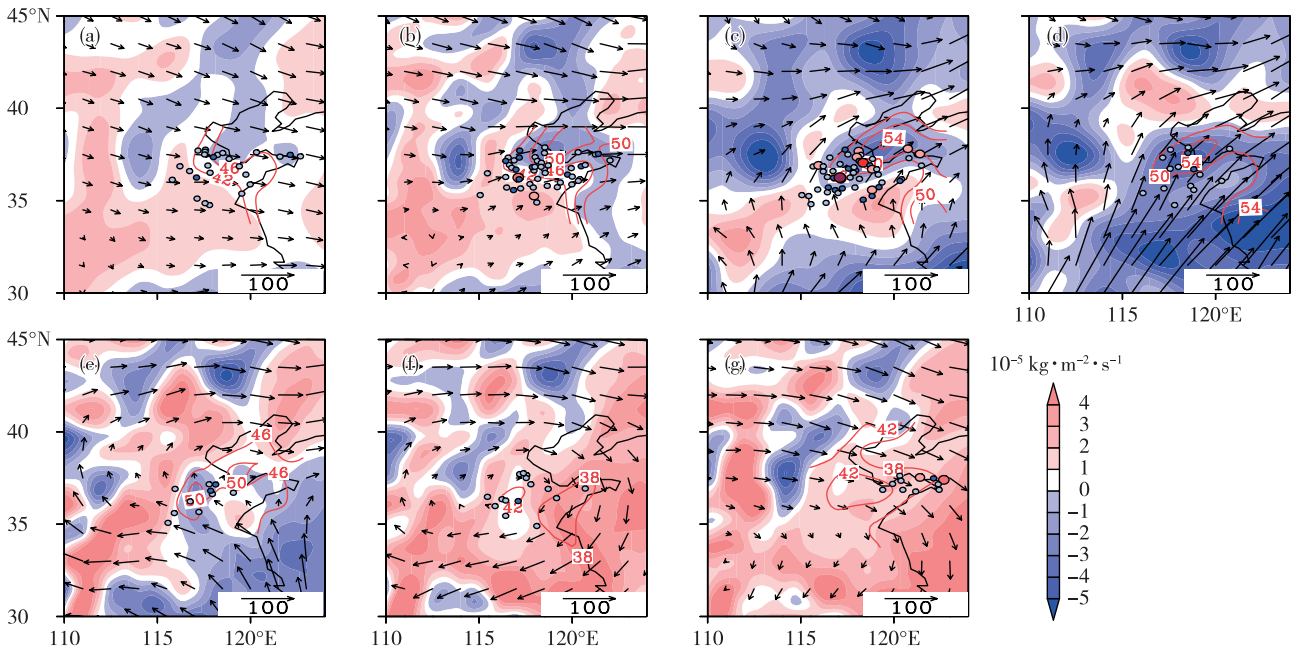


图 9 1999—2017 年 4—10 月 1 000~700 hPa 月平均水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和负水汽通量散度发生率(红色等值线,单位:%)以及月平均水汽通量(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,图中圆点标记的含义同图 3)(a. 4 月, b. 5 月, c. 6 月, d. 7 月, e. 8 月, f. 9 月, g. 10 月)

Fig.9 Monthly mean water vapor flux divergence (shaded, units:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), percentage of negative water vapor flux divergence (red isoline, units: %), and monthly mean water vapor flux (arrow, units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 1 000 hPa to 700 hPa between April and October from 1999 to 2017 (see Fig. 3 for the meanings of the dots; a. April, b. May, c. June, d. July, e. August, f. September, g. October)

#### 4 小结

基于观测数据与大气再分析数据,首先统计分析了 1999—2017 年山东省冰雹频数月际变化的时空特征,然后通过对大尺度环流客观分型与物理量场的合成分析,探究了月际变化的成因,得到如下结论。

1) 山东省冰雹频数在时间分布上有显著的逐月变化规律,在空间分布上存在冰雹落区逐月差异明显的特征:冰雹频数在 4—6 月逐渐增多并达到峰值,且冰雹落区由鲁西北 1 个主要落区逐渐扩大,6 月扩大为鲁北平原、鲁中山区西部与半岛北部 3 个主要落区;在水汽充沛的 7 月冰雹频数发生骤降,并在 8—10 月维持了较低的频数;10 月的冰雹只出现在莱州湾以东半岛地区,且相比 9 月而言突然再次增多。

2) 冰雹频数的月际变化特征与大尺度环流系统具有密切的联系。由大尺度环流客观分型的结果来看,约 88%的冰雹发生于低槽槽前或槽后西北

气流的环流形势下,此两类环流型发生频率之和的月际变化与冰雹频数的月际变化呈现一致的变化规律,这可以解释 4—6 月冰雹频数相对较高,而 7 月骤降以及 10 月再次增加的现象。

3) 冰雹发生频数明显受水汽与热力条件的影响。对 4—6 月和 9—10 月而言,充足的水汽与强不稳定对应了较高的冰雹频数,其中 6 月降雹时以及月平均的水汽含量与 K 指数均达到最大,同时降雹时水汽含量、K 指数与月平均之间的差值最小,使得 6 月更容易达到降雹时的水汽与热力条件,所以 6 月冰雹频数最高。尽管 7—8 月水汽与热力条件也都较好,但是 7—8 月山东省处于主汛期,以暴雨天气为主,同时较高的冻结高度增加了冰雹下落过程中融化的可能性,使得 7—8 月冰雹频数较低。

4) 冰雹落区与低层水汽辐合有较好的对应关系。其中 4—9 月冰雹落区的空间差异与逐月低层水汽辐合活跃区的空间差异有关,而这种差异是由逐月低层水汽输送的差异造成的;但 10 月气候背景场的低层水汽辐合活跃区不是影响该月冰雹落区

的主要因素。

本文从大尺度环流、水汽与热力条件以及低层水汽辐合4个方面解释了山东省冰雹频数月际变化的成因。这仅仅是从气候学角度探究了有利于冰雹发生的天气尺度条件,冰雹的发生很大程度上受局地中小尺度天气条件的控制。因此,对于冰雹的实际业务预报而言,需要对干暖盖强度指数、粗里查森数等关键环境参数的时空变化特征进行深入分析研究。

### 参考文献:

- [1] 苏福庆,曲金枝.我国冰雹天气及预报研究进展[J]. 气象科技,1984,12(3):92-93.
- [2] 国家减灾中心灾害信息部.2005 自然灾害大盘点[J]. 中国减灾,2006(1):16-31.
- [3] LI X F, ZHANG Q H, XUE H W. The role of initial cloud condensation nuclei concentration in hail using the WRF NSSL 2-moment microphysics scheme [J]. *Adv Atmos Sci*,2017,34(9):1106-1120.
- [4] 刁秀广.阵风锋、海风锋和冷锋等触发局地强对流风暴实例分析[J]. 海洋气象学报,2018,38(4):45-57.
- [5] 高晓梅,王世杰,王文波,等.2016 年山东一次阵风锋触发的强对流天气分析[J]. 海洋气象学报,2018,38(2):67-75.
- [6] JOE P, BURGESS D, POTTS R, et al. The S2K severe weather detection algorithms and their performance [J]. *Wea Forecasting*,2004,19(1):43-63.
- [7] CHANGNON S A Jr. The scales of hail [J]. *J Appl Meteor*,1977,16(6):626-648.
- [8] DESSENS J. Hail in southwestern France I: Hailfall characteristics and hailstorm environment [J]. *J Climate Appl Meteor*,1986,25(1):35-47.
- [9] LI M X, ZHANG Q H, ZHANG F Q. Hail day frequency trends and associated atmospheric circulation patterns over China during 1960 - 2012 [J]. *J Climate*,2016,29(19):7027-7044.
- [10] KAHRAMAN A, TILEV-TANRIOVER S, KADIOGLU M, et al. Severe hail climatology of Turkey [J]. *Mon Wea Rev*,2016,144(1):337-346.
- [11] 张芳华,高辉.中国冰雹日数的时空分布特征[J]. 南京气象学院学报,2008,31(5):687-693.
- [12] MERINO A, SÁNCHEZ J L, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ S, et al. Hailfalls in southwest Europe: EOF analysis for identifying synoptic pattern and their trends [J]. *Atmos Res*,2019,215:42-56.
- [13] 吴占华,窦利军,李瑞芳,等.山西省冰雹天气变化的气候特征分析 [J]. 中国农学通报,2015,31(29):212-220.
- [14] 朱官忠,孙明训.山东冰雹的统计分析[J]. 气象,1984,10(5):36-38.
- [15] 杨晓霞,张爱华,贺业坤.山东省4—6月冰雹气候特征分析[J]. 山东气象,1999,19(3):22-25.
- [16] 高留喜,杨晓霞.山东5月冰雹的分布特征及其成因分析[C]//中国气象学会.中国气象学会2005年年会论文集.苏州:中国气象学会,2005:3954-3958.
- [17] 王庆.从山东冰雹灾情变化看人工防雹作业效果[J]. 山东气象,2013,33(4):28-30.
- [18] 杨晓霞,王以琳,李昌义,等.山东省聊城市冰雹天气气候特征和影响系统[J]. 干旱气象,2006,24(4):9-14,56.
- [19] 阎丽凤,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社,2014:123-127.
- [20] 王培涛,王凤娇,王冰.山东滨州近十年冰雹特征分析[C]//中国气象学会.第33届中国气象学会年会S1灾害天气监测、分析与预报.西安:中国气象学会,2016:1505-1515.
- [21] GARCÍA-ORTEGA E, LÓPEZ L, SÁNCHEZ J L. Atmospheric patterns associated with hailstorm days in the Ebro Valley, Spain [J]. *Atmos Res*,2011,100(4):401-427.
- [22] 李玉梅,李勋,冯文,等.秋季西沙非台风强降水天气形势分析[J]. 气象,2016,42(8):934-943.
- [23] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版.北京:气象出版社,2007:296.
- [24] 孙吉贵,刘杰,赵连宇.聚类算法研究[J]. 软件学报,2008,19(1):48-61.
- [25] 高晓梅,俞小鼎,马守强,等.鲁中地区强对流天气的气候特征及相关环境参数特征分析[J]. 海洋气象学报,2019,39(3):43-54.
- [26] LI M X, ZHANG D L, SUN J S, et al. A statistical analysis of hail events and their environmental conditions in China during 2008-15 [J]. *J Appl Meteor Climatol*,2018,57(12):2817-2833.
- [27] GARCÍA-ORTEGA E, MERINO A, LÓPEZ L, et al. Role of mesoscale factors at the onset of deep convection on hailstorm days and their relation to the synoptic patterns [J]. *Atmos Res*,2012,114/115:91-106.
- [28] MERINO A, GARCÍA-ORTEGA E, LÓPEZ L, et al. Synoptic environment, mesoscale configurations and forecast parameters for hailstorms in Southwestern Europe [J]. *Atmos Res*,2013,122:183-198.
- [29] 周雪松,杨成芳,孙兴池.基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析[J]. 海洋气象学报,2019,39(1):26-37.