

赵文慧, 姚展予, 贾烁, 等. 2019. 1961~2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究 [J]. 大气科学, 43(3): 539-551.
Zhao Wenhui, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. 2019. Characteristics of spatial and temporal distribution of hail duration in China during 1961-2015 and its possible influence factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (03): 539-551, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18123

1961~2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究

赵文慧 姚展予 贾烁 王伟健 张沛 高亮书

中国气象科学研究院中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081

摘要 本文利用1961~2015年(55年)中国地区577个地面观测站的冰雹资料,应用统计学方法,分析了冰雹持续时间的空间分布、年际变化以及日变化特征,包括站点降雹累积持续时间、平均单次降雹持续时间、区域平均单次降雹持续时间、小时降雹累积持续时间和总降雹累积持续时间。结果表明:(1)1961~2015年中国地区站点降雹累积持续时间与海拔高度呈现较高的正相关关系,相关系数高达0.99。站点降雹累积持续时间的最大值出现在青藏高原地区,累积持续时间高达250分钟,其次为内蒙古中部以及东北部的山区地带,累积持续时间约为150分钟。(2)1961~2015年平均单次降雹持续时间呈现上升趋势,55年冰雹累积持续时间大约增长1分钟,且通过了95%信度水平的显著性检验。(3)西北地区、北部平原地区和东南地区在1961~1980年期间,区域平均单次降雹持续时间都有显著的下降趋势,而在1970~2015年期间西北地区和青藏高原地区呈现显著的上升趋势。1961~1980年期间区域平均单次降雹持续时间在西北地区的长期趋势变化主要受到日最低气温以及温度日较差长期年际变化的影响,在北部平原地区仅与温度日较差相关,而在东南地区与三个对流参数都有较好的相关性;1970~2015年和1961~2015年期间西北地区和青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间的上升趋势分别与这两个区域的区域平均日最高气温、日最低气温呈正相关。(4)单次降雹持续时间的日变化明显,午后至夜间出现的冰雹持续时间长于凌晨和上午的冰雹持续时间,持续时间峰值出现在当地时间17时和18时。本文还利用探空资料分析了对流有效势能和Totals-totals指数与冰雹持续时间的关系,结果表明中国地区20时(北京时间)的对流有效势能和Totals-totals指数可能是冰雹持续时间日变化的影响因子之一。

关键词 冰雹 持续时间 时空分布 影响因子

文章编号 1006-9895(2019)03-0539-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18123

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Hail Duration in China during 1961-2015 and Its Possible Influence Factors

ZHAO Wenhui, YAO Zhanyu, JIA Shuo, WANG Weijian, ZHANG Pei, and GAO Liangshu

Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

收稿日期 2018-02-05; 网络预出版日期 2018-07-16

作者简介 赵文慧,女,1993年出生,硕士研究生,从事云降水与人工影响天气研究。E-mail: m_zhao0807@yeah.net

通讯作者 姚展予, E-mail: yaozy@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41775139、41375135,科技部公益性行业(气象)科研专项GYHY201406033,科技部战略性国际科技创新合作重点专项2016YFE0201900

Found by National Natural Science Foundation of China (Grants 41775139, 41375135), Specialized Scientific Research Project in Public Welfare Profession (Meteorology) of the Ministry of Science and Technology (Grant GYHY201406033), Key Project of Strategic International Scientific and Technological Innovation Cooperation of the Ministry of Science and Technology (Grant 2016YFE0201900)

Abstract Based on 55-year (1961 to 2015) ground-based hail and atmospheric sounding observations, the climatological characteristics of hail duration in mainland China, including hail durations at individual stations, average single hail duration, regional average single hail duration, hourly hail duration, and whole hail duration, along with convective parameters, are analyzed. The results show that: (1) The hail duration is highly positively correlated with altitude and the correlation coefficient is up to 0.99. The largest hail duration of about 250 min for the period 1961–2015 appeared in the Tibetan Plateau, followed by that in the mountainous areas in the central and northeastern Inner Mongolia (about 150 min). (2) Overall, the average single hail duration increased by 1 minute from 1961 to 2015, and the trend is statistically significant at the 95% confidence level. (3) Regionally average single hail duration shows a downward trend in NWC (Northwest China), NCP (North China Plain), and SEC (Southeast China), but an upward trend in NWC and TP (the Tibetan Plateau) during 1961–1980. There are positive relationships between regional average single hail duration trend in NWC and the trends of $T_{\min}$ (daily minimum temperature) and DTR (daily temperature range), while the hail duration trend in NCP is mainly correlated with the DTR trend. The hail duration trend in SEC is well correlated with all convective parameters. The upward trends of regional average hail duration both are positively correlated with the trends of $T_{\max}$ (daily maximum temperature) and $T_{\min}$ in NWC and TP during 1970–2015 and 1961–2015. (4) In terms of diurnal variability, the hail duration of cases that occurred during afternoon and night is longer than the duration of cases that occurred in the morning. The hail duration peaks appear at 1700 LT (local time) and 1800 LT. The analysis of relationships of hail duration and CAPE (Convective Available Potential Energy), Totals-totals index based on long-term sounding data shows that CAPE and Totals-totals index at 2000 BJT (Beijing time) may be two factors that influence the diurnal cycle of hail duration in mainland China.

Keywords Hail duration, Temporal and spatial distribution, Potential influential factors

1 引言

强对流性天气主要包括冰雹、龙卷、雷雨大风、短时强降雨和飏线等,一般具有发生突然、移动迅速、天气剧烈、破坏性强等特点。冰雹是一种直径大于 5 mm 的冰相降水粒子,由于它直径大、落速快,只有在强对流云中才有可能形成,因此是强对流云的产物(金晓中和贡觉顿珠, 2007)。我国每年冰雹天气频发,是世界上四大多雹区之一,冰雹灾害也是我国最严重的气象灾害之一。一场强烈的降雹可产生局地毁灭性的灾害,导致农作物毁种或绝收对国家经济造成严重的影响,此外冰雹还会对交通运输、部分地区的电力和通讯设备等造成不同程度的威胁(董安祥和张强, 2004; 陈传雷等, 2010)。

在过去的二十年中,冰雹的趋势变化引起了越来越多的关注。在欧洲,冰雹造成的破坏在过去二三十年间大幅增加(Mohr and Kunz, 2013; Kunz and Kugel, 2015),且冰雹多发生在欧洲暖季(5月1日至9月14日)的下午和傍晚(Počakal et al., 2009; Sioutas et al., 2009; Tuovinen et al., 2009; Berthet et al., 2011),最常见的冰雹天气过程出现在欧洲的山脉地区和中纬度地区(Počakal

et al., 2009; Tuovinen et al., 2009; Berthet et al., 2011; Mohr and Kunz, 2013)。而过去五十年中,在澳大利亚悉尼每年平均有 10 次冰雹过程,对澳大利亚东南部地区的经济和农业构成重大威胁(Niall and Walsh, 2005)。Schuster et al. (2005)发现,在 10 月到次年 2 月期间的 15 时到 19 时(当地时间标准时)之间,新南威尔士州西北部和北部地区最常出现冰雹天气过程。

中国是一个农业大国,因此对冰雹频次以及冰雹持续时间的时空变化特征的研究和认识对冰雹灾害预测和经济损失预防有很大积极作用。在过去的三十年中有些学者把研究重点放在冰雹频次的时空分布上(Zhang et al., 2008),同时也有一些学者研究了中国冰雹的长期趋势(金晓中和贡觉顿珠, 2007; Xie et al., 2008; 杨敏和丁建芳, 2015; 高晓梅等, 2016)。Zhang et al. (2008)发现,1960 年到 1980 年代初的年平均冰雹天数的变化趋势较平稳,但是之后有显著下降的趋势。在中国大部分地区,雹暴主要发生在 15 时到 20 时(北京时间),而在贵州和湖北省则多发于夜间。有研究表明中国西北地区降雹平均累积持续时间与地形相关,高原、山区的冰雹持续时间比平原、盆地长(刘德祥等, 2004)。而唐浩鹏等(2017)发现在黔西南州的冰

雹持续时间不超过5分钟。过去的研究多着重于冰雹频次的时空分布特征,而对于冰雹持续时间的时空分布特征研究甚少。虽然有一些关于本地的冰雹累积持续时间的研究,但是罕有针对全国范围内长期的冰雹持续时间的时空分布特征以及可能的影响因子的研究。因此了解全国降雹累积持续时间的长期时空分布特征,做好全面防雹、消雹的工作探讨,努力把冰雹自然灾害的损失减少到最低限度,对保障全国经济发展以及农业发展具有十分重要的意义。

强对流天气的发生除了必备的水汽、上升运动和不稳定层结等条件以外,还和地形及其他因素有关,并且不同地区冰雹发生和发展的影响因子也会不同(李厚楹和孙承旬,1996;张敏峰和冯霞,1998)。对流参数可以代表大气的对流不稳定性,因此可以把对流参数看作冰雹发生的预报因子(Manzato,2003)。已有一些针对雹云影响因子的研究,如对流抑制能量、对流有效势能、垂直风切变和冻结层高度等(McCaul and Weisman,2001;Brooks et al.,2003;Xie et al.,2008;Li et al.,2016b)。Xie et al.(2008)发现,20世纪80年代以后高原地区的冰雹频次呈现下降趋势主要是与冻结层高度及对流抑制能量的增加有关,而垂直风切变和冰雹变化趋势之间几乎没有相关性。Li et al.(2016b)认为中国北方对流抑制能量的增加使大气趋于稳定,从而使气块难以获得能量向上抬升形成对流,也就是说对流抑制能量的增加可能导致中国北方冰雹频次的减少。也有研究指出较强的不稳定层结和一定的外部抬升条件是产生强对流天气的重要的环境场特征,且出现在对流层低层的干而暖的逆温层更有利于对流活动的强烈发生发展(许新田等,2010)。李怀宇等(2015)发现广东省的冰雹天气与K指数、SI指数和垂直风切变有密切的关系。较大的K指数以及较大的垂直风切变和较小的SI指数容易产生较大直径的冰雹粒子。但是,由于中国的地理条件复杂,导致这些对流参数与冰雹之间的相关性仍然存在很大的不确定性(Xie et al.,2008)。在全国范围内,已有很多学者对冰雹频次时空分布特征的可能影响因子进行了深入的研究,然而针对冰雹持续时间时空分布特征的影响因子研究比较匮乏。因此,探究中国冰雹持续时间气候态特征的可能影响因子,对开展高效防雹、消雹工作以及灾害预警预防政策的制定和实施都具有十

分重要的意义。

为此,本文利用1961~2015年中国地区577个地面观测站的数据以及120个探空站的探空数据来分析中国地区长期冰雹持续时间的时空分布特征以及可能的影响因子。文章第2节介绍了本文使用的资料以及方法;第3节给出冰雹持续时间的空间分布特征并对可能的影响因子进行讨论;第4节给出冰雹持续时间的分布特征以及可能影响因子讨论;第5节为本文的一些主要结论。

2 资料与方法

2.1 地面气象台站观测数据

本文选取1961~2015年(55年)中国地区2400多个气象台站的历史气象资料,包括降雹时间(北京时)、降雹持续时间、地面最高气温、地面最低气温、平均气温、相对湿度等。此数据集的同质性和可靠性在发布前已经过严格检查和质量控制。本文使用的1961~2015年中国地面气象台站的冰雹数据信息是人工记录数据,只包括降雹开始时间和结束时间(北京时)。在本文分析中如果一个台站一年有超过10%的观测数据缺失,则这一年被视为无效年份。如果一个测站至少含有一个无效年,则该气象台站被剔除。因此,本文选取了1961~2015年间有完整冰雹记录资料(没有一个无效年)的577个地面测站作为研究对象,以确保有一个相对较大和连续的数据记录集(图1)。577个站点的冰雹数据总缺失率为0.005%,站点的年降雹数据的最大缺失率为0.3%。

根据中国地区577个地面观测站1961~2015年每次降雹起迄时间(当地时间)的记录,统计单次降雹持续时间。如降雹发生在14:32(当地时间),在14:35(当地时间)结束,那么该次降雹的单次降雹持续时间记为3分钟。本文第3节所分析的有关冰雹持续时间的变量定义如下:站点降雹累积持续时间为577个站点在1961~2015年内所有单次降雹持续时间的累加;平均单次降雹持续时间为每一年中577个站点所有降雹事件持续时间之和除以降雹总次数;区域平均单次降雹持续时间为每一年中该区域内包含的所有站点所有降雹事件的持续时间之和除以降雹总次数;小时降雹累积持续时间为577个观测站点在55年内发生在各个小时内的所有降雹事件持续时间的累加,即逐小时统计每个整点

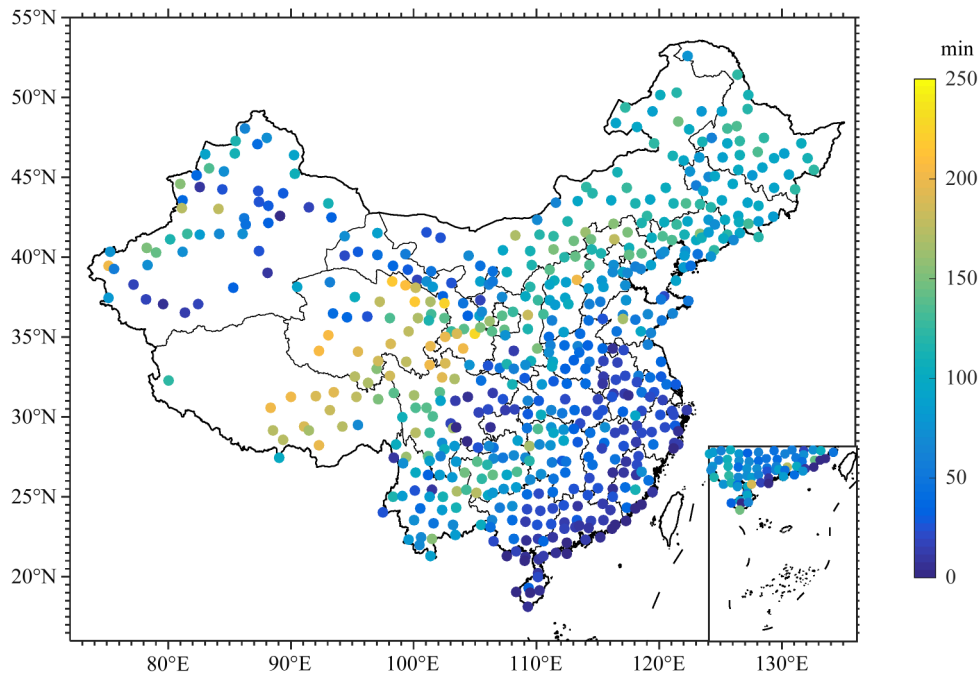


图1 1961~2015年中国地区站点降雹累积持续时间的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of total hail duration for stations in China during 1961–2015

内55年内所有降雹事件持续时间的累积,例如14:32(当地时间)发生的降雹过程将按照14:00(当地时间)进行统计;而总降雹累积持续时间为55年内577个观测站点的所有降雹事件持续时间的累加。

2.2 探空数据

Niall and Walsh (2005) 和 Mohr and Kunz (2013) 对影响冰雹时空分布的一些对流参数进行了分析研究,发现对流有效势能(CAPE)和Totals-totals指数(定义如式(2)所示)与澳洲、欧洲的冰雹时空分布都有较强的相关性。CAPE表示气块在上升过程中可能获得的不稳定能量,表征大气的不稳定度,而当Totals-totals指数较大时表征大气层结具有较高的温度递减率,配合底层较丰富的水汽和500 hPa高空冷空气则会较容易触发对流从而产生冰雹天气(Niall and Walsh, 2005)。因此本文利用1961~2015年中国地区120个探空站的探空数据分别计算了北京时08时和20时的对流有效势能:

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} R_d (T_{\text{psud}} - T_{\text{sounding}}) \text{dln}p, \quad (1)$$

其中, LFC是自由对流高度, EL是平衡高度。 R_d 是干空气中的比气体常数, p 是一定高度处的压强, T_{psud} 和 T_{sounding} 分别是该高度处的假绝热温度和

探测温度。

Totals-totals指数(TT)的定义为

$$\text{TT} = T_{850} + T_{\text{d850}} - (2T_{500}), \quad (2)$$

其中, T_{850} 和 T_{500} 分别是850 hPa和500 hPa的温度, T_{d850} 是850 hPa的露点温度。由于中国地区的冰雹多发于暖季(Zhang et al., 2008), 因此本文只分析暖季(3~8月)的两个对流参数。

2.3 趋势分析方法

本文使用两个独立的统计方法,即最小二乘回归和Mann-Kendall(MK)检验(Mann, 1945; Kendall, 1975)来确定每个点的年际趋势。在最小二乘回归中,相关系数 r 表示变量 x 与时间 t 之间线性相关的密切程度,当确定显著性水平 α ,若 $|r| > r_\alpha$ (在给定显著性水平 α 时的相关系数),则表明 x 随时间 t 的变化趋势是显著的,否则表明变化趋势是不显著的。为了增加线性趋势的稳健性,在最小二乘回归后进行MK检验(Li et al., 2016a)。MK检验是一种非参数检验,用于检验时间序列中是否存在单调趋势,且更适合于非正态分布的数据。当给定显著性水平 α ,若统计量 $|\text{UF}_i| > U_\alpha$ (在给定显著性水平 α 时的统计量值),则表明时间序列存在明显的趋势变化。

在本文分析中只有当最小二乘回归和MK检验

的信度水平平均高于95%时, 趋势变化才被认为是显著的。

3 结果和讨论

3.1 冰雹累积持续时间的空间分布特征

1961~2015年中国地区站点降雹累积持续时间总的空间分布特征为高原和山地多, 平原和盆地少(图1)。站点降雹累积持续时间高值区出现在青藏高原地区, 持续时间高达250分钟, 其次为内蒙古中部和东北地区, 累积降雹持续时间为150分钟左右。而秦岭淮河以南, 尤其是东南沿海地区冰雹持续时间最短, 累积降雹时间不超过50分钟。站点降雹累积持续时间的空间分布受海拔高度的影响十分明显, 多雹区都出现在高原和山区。从图2可以看出, 站点降雹累积持续时间和海拔高度成显著的正相关, 相关系数高达0.99, 即站点降雹累积持续时间随海拔高度升高而增加。在地势高、地形复杂的山区, 一次冷空气过后, 残余的冷空气堆积在山谷, 形成高气压, 山脊或向阳山坡由于白天加

热快, 形成相对低压区, 于是就形成山谷风, 气流向上辐合, 在水汽比较充足的条件下容易发生对流, 故山区的降雹过程常出现在冷锋后。世界上主要多雹区均与高大的山脉地形影响有关(孙旭映等, 2008; Tuovinen et al., 2009; Mezher et al., 2012; Kahraman et al., 2016)。我国的青藏高原、天山、祁连山、六盘山、大兴安岭、小兴安岭、长白山等多雹区也均为海拔较高、地形复杂的山区。

3.2 冰雹持续时间的分布特征

3.2.1 冰雹持续时间的年变化

本文对1961~2015年期间平均单次降雹持续时间的时序做最小二乘回归拟合, 可以看出平均单次降雹持续时间在1961年为2.97分钟, 在1961~2015年期间呈现一个轻微的上升趋势, 55年内平均单次降雹持续时间增长了0.11分钟(图3)。图4为1961~2015年期间平均单次降雹持续时间时序的趋势分析, 可以看出, 中国地区577个站点的平均单次降雹持续时间在1960~1980年期间呈下降趋势, 而在1965~2015年期间呈上升

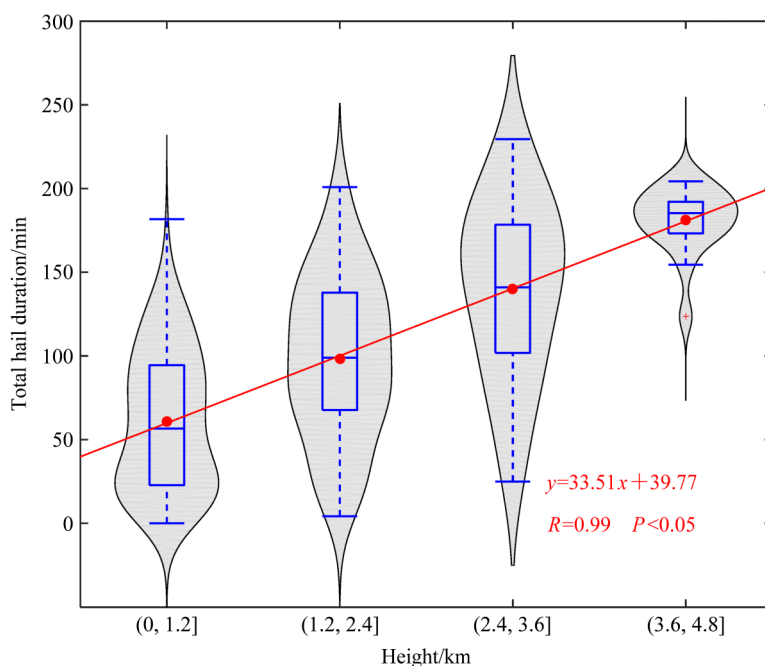


图2 1961~2015年中国地区站点降雹累积持续时间和海拔高度的相关关系。箱图代表了每个间隔内的最大值、最小值、中位数, 红色圆点代表每个间隔的平均值, 灰色阴影区域代表了概率密度分布, 灰色阴影的宽度越宽概率越大。 R 表示每个间隔的平均值和海拔高度的相关系数, P 表示显著性水平

Fig. 2 Relationships between the total hail duration and elevation at different intervals. Boxes represent the maximum, minimum, median of the data at individual intervals. Red dots represent the mean values at different intervals. The gray shading areas represent the probabilities of samples, and wider gray shading areas indicate greater probabilities. R denotes the correlation coefficient between mean value at different intervals and elevation, P represents significance level

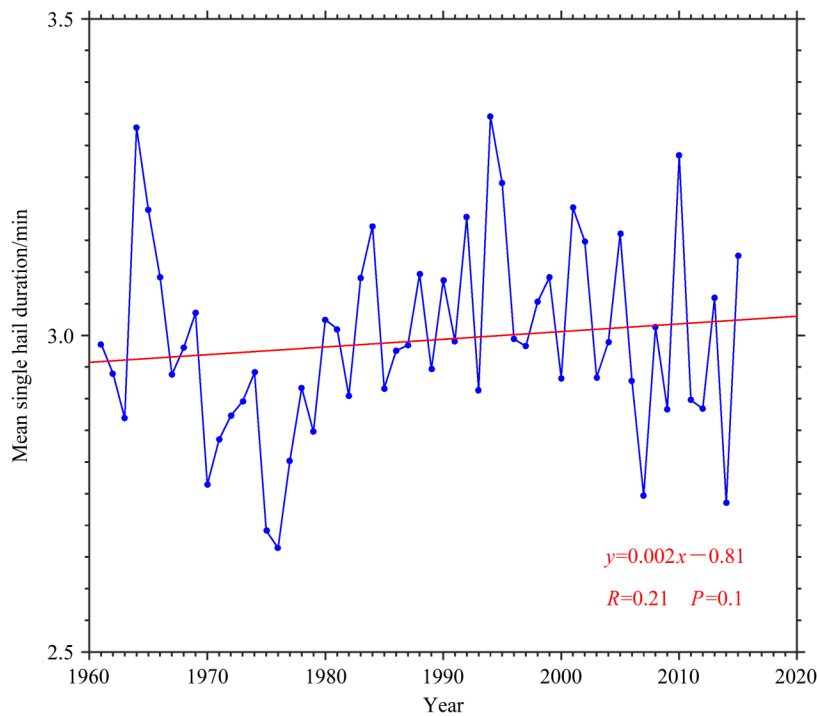
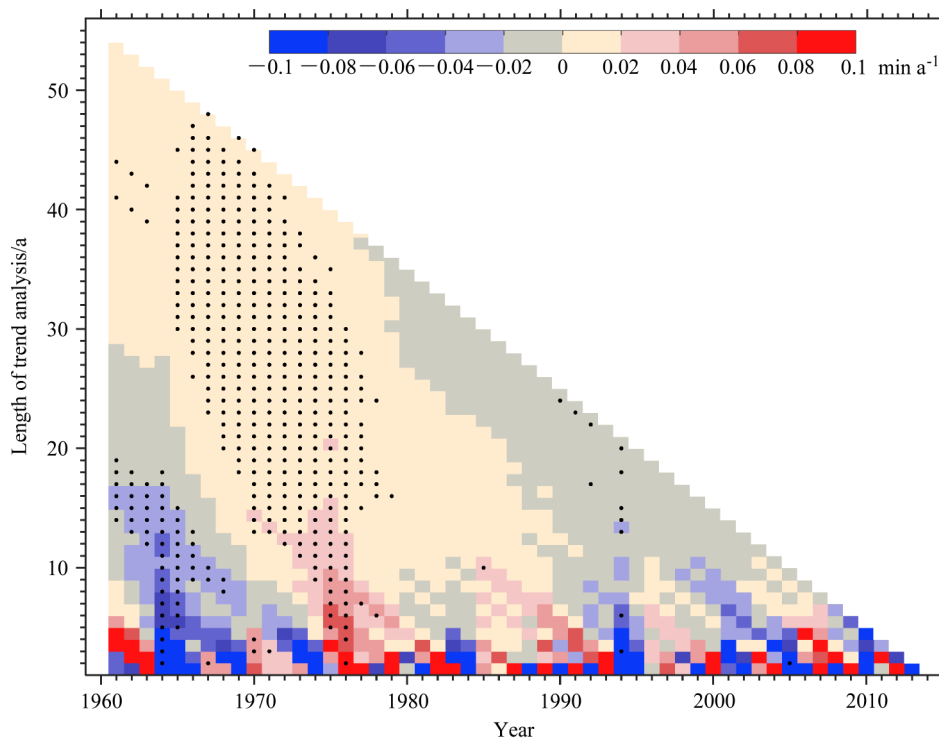


图3 1961~2015年中国地区平均单次降雹持续时间的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of mean single hail durations in China during 1961–2015

图4 1961~2015年中国地区平均单次降雹持续时间的趋势变化 (单位: min a^{-1})。横坐标表示趋势分析的起始年份, 纵坐标表示趋势分析的时间长度, 黑色圆点表示该趋势通过了95%信度水平的显著性检验Fig. 4 Trend (units: min a^{-1}) of mean single hail duration in China during 1961–2015. The x-axis and y-axis denote the starting year and the length of trend analysis, respectively. Black dots indicate the trends at/above the 95% confidence level

趋势。平均单次降雹持续时间在2010年之后比20世纪60~70年代增长了大约1分钟,且通过了95%信度水平的显著性检验。Xie et al. (2008)和Zhao et al. (2018)表明中国地区的冰雹频次在1961~2015年期间呈现下降趋势,因此在1961~2015年期间中国地区的冰雹时间分布总体特征呈现为频次减少而持续时间增加。

由于站点降雹累积持续时间的空间分布受地形影响较大(图1),因此平均单次降雹持续时间的年际变化可能会随地形的不同而变化。为了进一步分析1961~2015年期间平均单次降雹持续时间在不同区域的趋势变化特征,本文将中国地区的577个观测站点划分为六个区域:西北地区(NWC)、北部平原地区(NCP)、东北地区(NEC)、青藏高原地区(TP)、西南地区(SWC)和东南地区(SEC)(图5)。首先分别统计六个区域所包含的站点降雹的区域平均单次降雹持续时间,随后对不同区域的区域平均单次降雹持续时间进行趋势分析(图6)。从图6可以看出,在1961~1980年期间,区域平均单次降雹持续时间在西北地区、北部平原地区和东南地区都有显著的下降趋势,而1970~2015年期间西北地区和青藏高原地

区的区域平均单次降雹持续时间都呈现出显著的上升趋势。

随着IPCC第五次评估报告的问世,气候变化问题再次在世界范围内升温。此次报告指出1880~2012年全球地表平均气温升高了0.85°C(IPCC, 2013),这种变暖会导致全球降水以及极端天气对气候变暖呈现出不同的响应(王展等, 2011; 赵丽等, 2016)。不同地区,不同环流条件下,强对流天气形成的物理过程可能完全不同,这与下垫面的动力和热力作用的影响有关,其中温度的变化是冰雹发生的重要影响因子之一(王芝兰等, 2011)。日最高气温出现在当地时间午后14时左右,代表了午后的地面热力性质。日最高气温升高,导致地表向大气边界层强烈的感热输送,同时有利于地表蒸发,地面热空气上升,导致周围空气补偿性辐合,低层辐合带来的水汽为热对流降水提供了水汽条件(李昀英等, 2008; 赵晓川和何晓东, 2011)。较高的日最高气温可能在近地表形成上冷下暖的不稳定大气层,触发较强的午后热力对流,从而导致持续时间较长的冰雹天气过程的出现。Zhang et al. (2008)指出,中国地区的冰雹多出现在午后(12~18时),因此日最高气温可能是冰雹持续时间的影

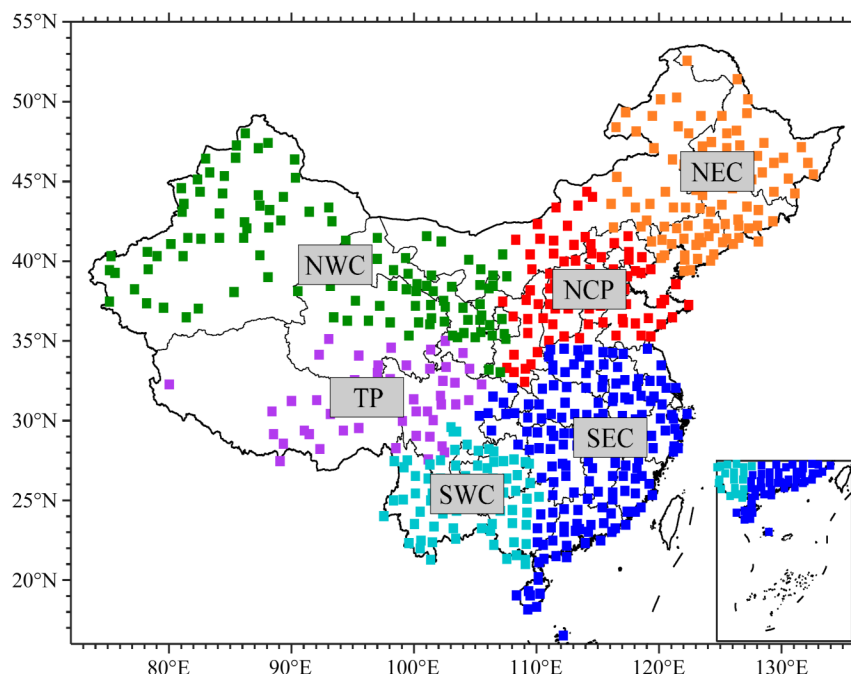


图5 中国地区577个观测站点的区域划分:西北地区(NWC)、北部平原(NCP)、东北地区(NEC)、青藏高原地区(TP)、西南地区(SWC)、东南地区(SEC)

Fig. 5 Six regions that 577 stations in China are divided: Northwest China (NWC), North China Plain (NCP), Northeast China (NEC), Tibetan Plateau (TP), Southwest China (SWC), Southeast China (SEC)

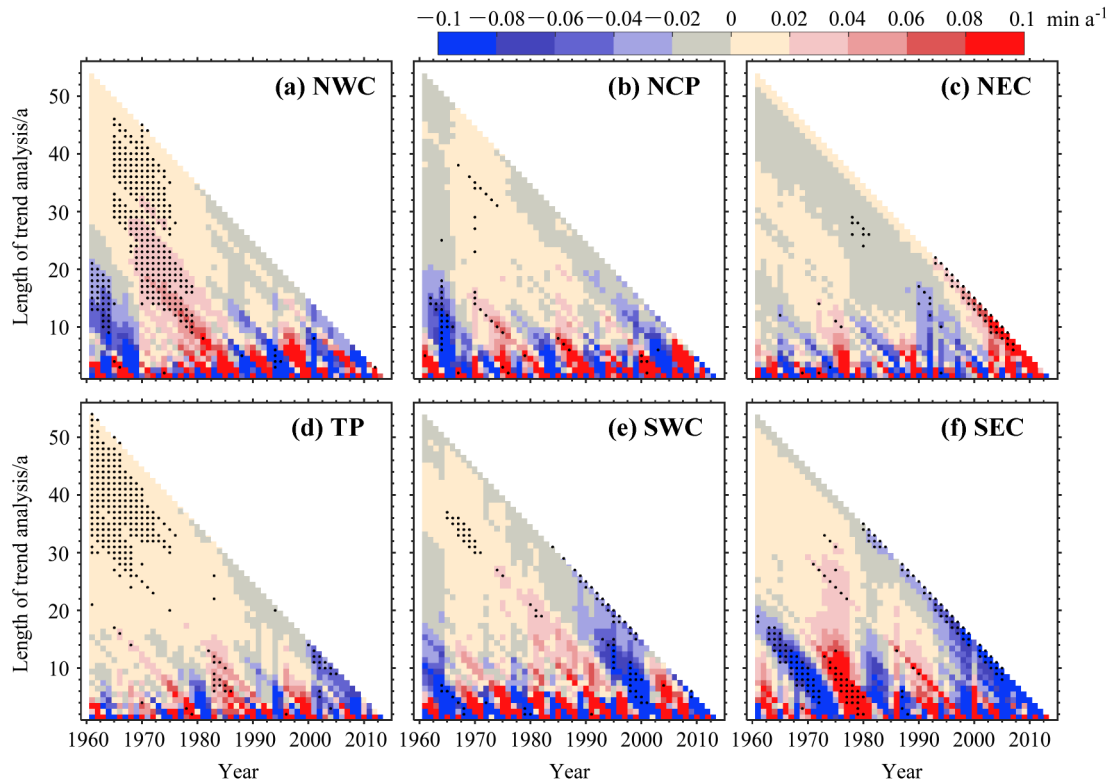


图6 1961~2015年 (a) 西北地区、(b) 北部平原、(c) 东北地区、(d) 青藏高原地区、(e) 西南地区、(f) 东南地区的区域平均单次降雹持续时间的趋势变化。横坐标表示趋势分析的起始年份, 纵坐标表示趋势分析的时间长度, 黑色圆点表示该趋势通过了95%信度水平的显著性检验
Fig. 6 Trends of single hail duration during 1961–2015 averaged in (a) NWC, (b) NCP, (c) NEC, (d) TP, (e) SWC, (f) SEC. The x-axis and y-axis denote the starting year and the length of trend analysis, respectively. Black dots indicate the trends at/above the 95% confidence level

响因子之一。此外, 日最低气温多出现于午夜日出前后, 且 Dessens (1995) 发现日最低气温近似等于第二天的午后湿球位温, 而午后的湿球位温是较好的雹暴指示因子。Dessens (1995) 发现法国地区 1946~1992 年期间的冰雹频次随着日最低温度的升高而增加, 且降雹日多发于夏季 (夜间温度较高), 因此日最低气温可能是影响冰雹的重要影响因子之一。许多天气过程不仅取决于平均温度, 还与最高和最低温度有很高的相关性 (Braganza et al., 2004)。较高的温度日较差 (DTR, 每日观测的最高气温与最低气温之差) 通常意味着较高的午后温度, 较高的午后温度容易导致午后热对流和超级雷暴的形成和发展, 因此 DTR 与冰雹的发生也密切相关 (Lewis and Karoly, 2013; Lindvall and Svensson, 2015)。

由于冰雹累积持续时间在不同时间段内呈现不同的趋势特征, 以及不同地区的平均单次降雹持续时间的年际变化的影响因子可能有所不同, 因此本文针对不同地区的平均单次降雹持续时间在不同时

间段内的可能影响因子进行分析研究 (图7)。从图 7a–c 可以看出, 1961~1980 年期间, 西北地区的区域平均单次降雹持续时间和区域平均日最低温度以及区域平均温度日较差都呈现下降趋势, 即西北地区的区域平均单次降雹持续时间趋势变化与日最低气温和温度日较差的趋势变化都成正相关关系, 北部平原地区的区域平均单次降雹持续时间只和区域平均温度日较差的趋势呈正相关 (都为下降趋势), 而东南地区的区域平均单次降雹持续时间和三个对流参数的区域平均值的趋势都呈正相关 (都为下降趋势)。也就是说, 在 1961~1980 年期间西北地区的区域平均单次降雹持续时间的趋势变化主要受到日最低气温以及温度日较差的长期年际变化的影响, 北部平原的区域平均单次降雹持续时间的长期变化仅与温度日较差的年际变化相关, 而东南地区的区域平均单次降雹持续时间的长期变化与三个对流参数都有较好的相关性。在 1970~2015 年期间西北地区和青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间都呈现显著的上升趋势 (图6),

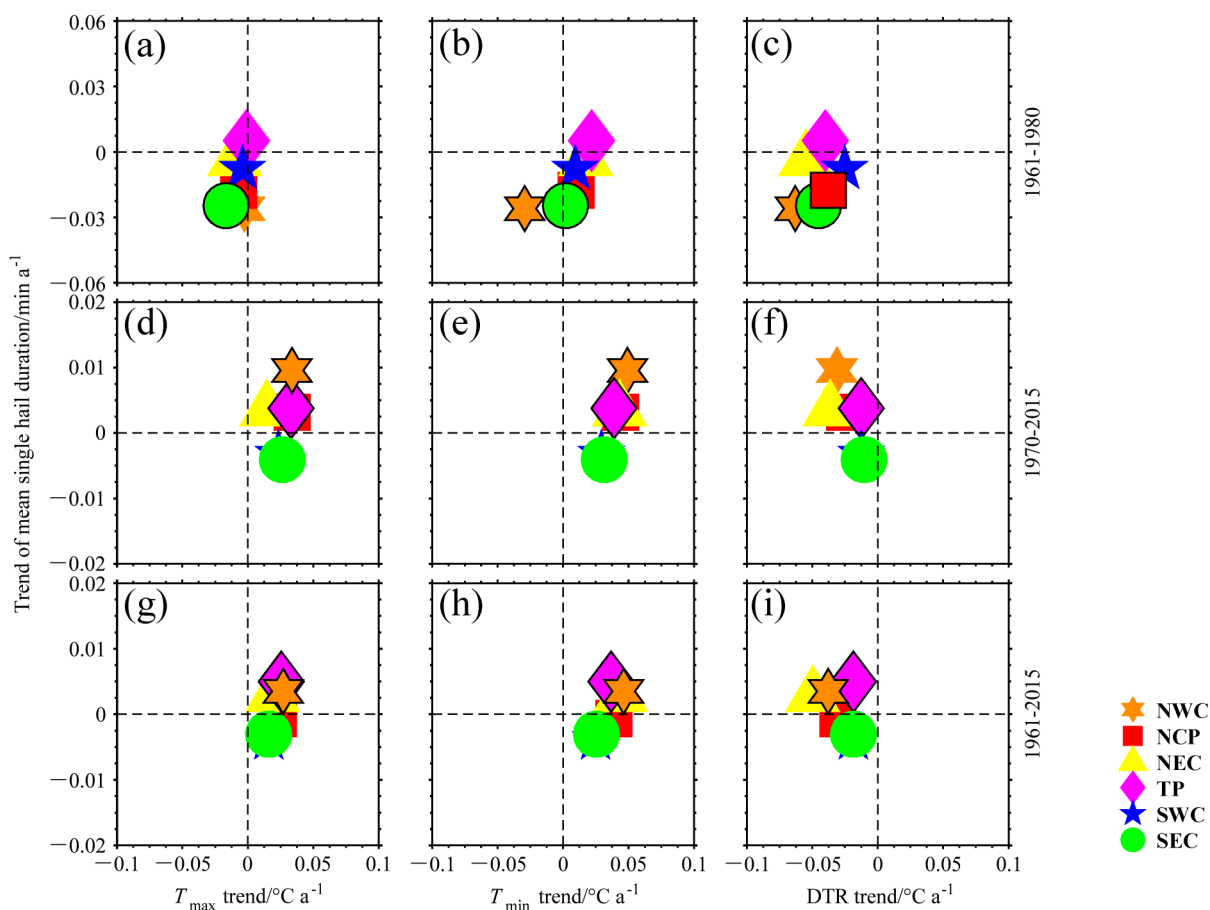


图7 西北地区、北部平原、东北地区、青藏高原地区、西南地区、东南地区区域平均单次降雹持续时间趋势与区域站点平均日最高气温(左)、日最低气温(中)以及温度日较差(右)的趋势在(a-c) 1961~1980年、(d-f) 1970~2015年以及(g-i) 1961~2015年的相关关系。黑色外框表示该区域的降雹持续时间趋势以及三个对流参数(日最高温度、日最低气温、温度日较差)的趋势都通过95%信度水平的显著性检验

Fig. 7 Relationships of the trend of mean single hail duration and trends of $T_{\max}$ (daily maximum temperature, left), $T_{\min}$ (daily minimum temperature, middle), DTR (daily temperature range, right) averaged in NWC, NCP, NEC, TP, SWC, SEC for the periods of (a-c) 1961~1980, (d-f) 1970~2015, and (g-i) 1961~2015. Areas highlighted in black frames indicate the trends of mean single hail durations and three convection parameters ($T_{\max}$, $T_{\min}$, DTR) at/above the 95% confidence level

从图7d、e可以看出,这两个区域的区域平均日最高气温和区域平均日最低气温都呈现上升趋势,即与区域平均单次降雹持续时间的年际变化成正相关。青藏高原地区的区域平均温度日较差在1970~2015年期间呈下降趋势(图7f),虽然温度日较差的减小不利于冰雹过程的发生发展,但是这一时间段内青藏高原地区的区域平均日最高气温和日最低气温的变化均对冰雹持续时间的变化产生正影响,所以1970~2015年期间青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间总体受日最高气温和日最低气温的影响呈上升趋势。在1961~2015年期间,中国地区内只有西北地区和青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间呈上升趋势(图6),分别与两个区域平均日最高气温和日最低气温的年际变化

呈正相关(图7g、h),而与区域平均温度日较差的趋势呈负相关(图7i)。也就是说,1961~2015年期间中国西北地区和青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间的趋势变化主要受区域平均日最高气温和日最低气温的影响呈上升趋势,而温度日较差不是这两个区域的冰雹持续时间的因子。

3.2.2 冰雹累积持续时间的日变化

冰雹天气过程是强对流性天气过程,具有明显的日变化。有研究表明,中国地区冰雹频次的峰值出现在当地时间午后12时至18时(金晓中和贡觉顿珠, 2007; Zhang et al., 2008)。如图8所示,对单次降雹持续时间按照降雹开始时间分别进行分析,可以看出出现在午后12时至18时(当地时间)的所有冰雹过程的单次降雹持续时间的中位数

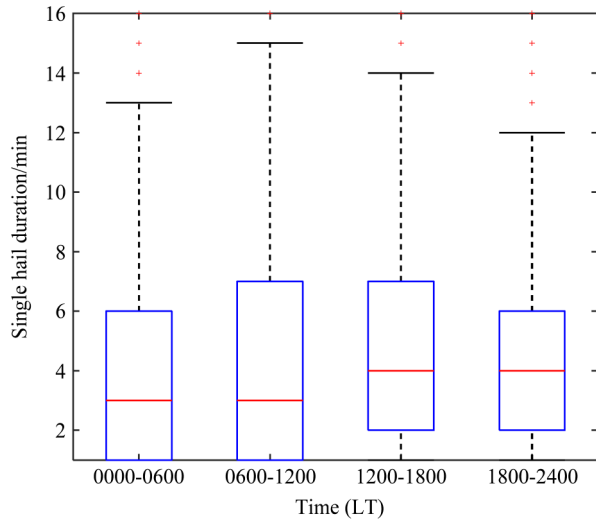


图8 1961~2015年中国地区平均单次降雹持续时间的日变化。红色实线代表每个分组数据的中位数

Fig. 8 Diurnal change of single hail durations in China during 1961–2015. Each red line represents the median value in the corresponding period

值最高, 平均单次降雹持续时间大于4分钟。在夜间18时至24时(当地时间), 单次降雹持续时间的中位数值为4分钟, 仅次于午后冰雹过程。而凌晨和上午出现的冰雹天气过程的单次降雹持续时间的中位数值最小, 单次降雹持续约为3分钟。为了探究时间精度更高的冰雹持续时间的日变化特征, 对每个小时内单次降雹持续时间累积求和即为小时降雹累积持续时间进行日变化分析。图9为55年内中国地区小时降雹累积持续时间占总降雹累积持续时间百分比的日变化分布, 可以看出, 小时降雹累积持续时间从10时(当地时间)开始呈上升趋势,

峰值出现在午后17时和18时(当地时间), 约占总降雹累积持续时间的8.5%左右。当地时间11时至24时的冰雹天气过程的小时降雹累积持续时间明显大于发生在01时至10时(当地时间)的冰雹过程(小于总降雹累积持续时间的1%)。

冰雹天气属于强对流天气系统, 静力不稳定是其发生的必要条件。有研究表明由于白天强烈的非均匀地表加热导致较高的午后地表温度, 以及地表温度与气温产生的巨大差异形成的午后较强的对流潜能是形成午后局地热对流降水的必要条件(赵晓川和何晓东, 2011)。对流有效势能代表了一个气块可能获得的静态不稳定能量, 是度量静力稳定度的基本参数之一(Dessens, 1995; López et al., 2001)。而较大的Totals-totals指数代表了环境场较大的温度递减率, 配合丰富的低层水汽源以及500 hPa高空的冷空气, 较容易形成对流天气从而产生降雹(Niall and Walsh, 2005)。因此本文利用1961~2015年中国地区的探空数据分别计算了北京时08时和20时的对流有效势能和Totals-totals指数。从图10可以看出同一个地面观测站20时(北京时)的对流有效势能和Totals-totals指数均明显大于08时(北京时)。其中, 北京时20时的对流有效势能值大约为北京时08时对流有效势能的两倍, 代表了午后较强的太阳短波辐射导致大气具有较强的热力对流势能, 午后的大气静力不稳定性远大于上午, 从而有可能在20时(北京时)左右产生较强且持续时间较长的冰雹天气过程。因此, 北京时20时较强的对流有效势能和Totals-totals指数可能是中国地区冰雹持续时间日变化的影响因子之一。

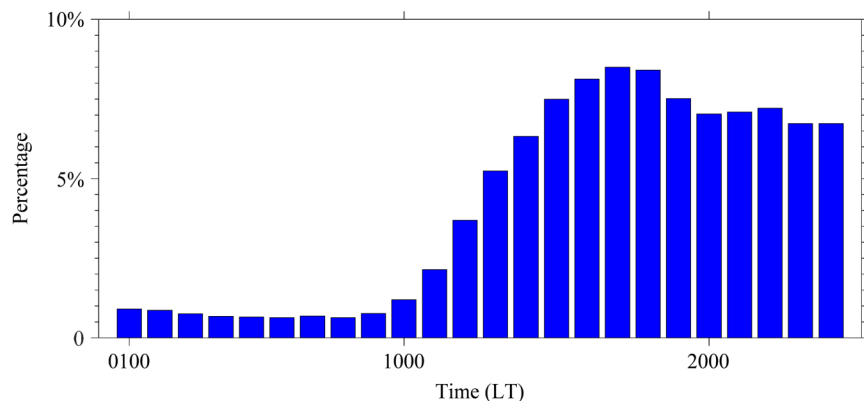


图9 1961~2015年中国地区小时降雹累积持续时间占总降雹累积持续时间百分比的日变化

Fig. 9 Diurnal change of the percentages of hail durations at individual hours in total hail duration in China during 1961–2015

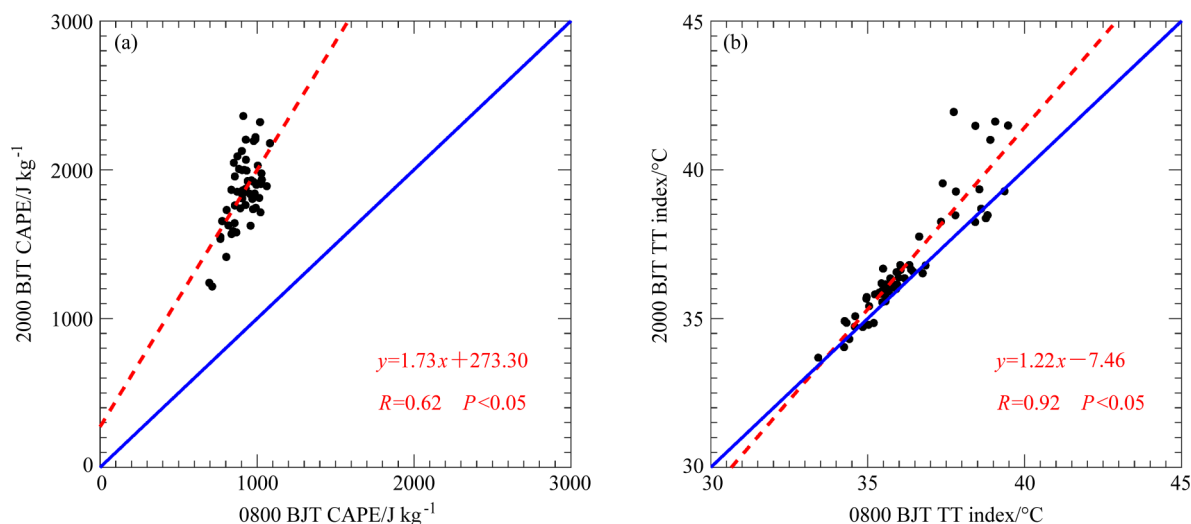


图10 1961~2015年中国地区暖季(3~8月)北京时08时与20时探空的(a)对流有效势能、(b) Totals-totals指数对比

Fig. 10 Scatter plots of (a) CAPE (Convective Available Potential Energy) and (b) Totals-totals (TT) index at 0800 BJT (Beijing time) and 2000 BJT in China in the warm season (March–August) during 1961–2015

4 结论

本文利用1961~2015年中国地区577个地面气象台站的观测数据以及120个探空站的探空数据讨论了中国地区冰雹持续时间的时空分布特征,同时进一步探讨了可能的影响因子,主要结论如下:

(1) 站点降雹累积持续时间空间分布特征与海拔高度、地形等关系密切,总的分布特征是高原和高山多,而平原、河谷少。站点降雹累积持续时间与海拔高度呈现较高的正相关关系,相关系数高达0.99。站点降雹累积持续时间的最大值出现在青藏高原地区,其次为内蒙古中部以及东北部的山区地带。

(2) 中国地区平均单次降雹持续时间在1961~2015年期间呈现明显的上升趋势。55年期间中国西北地区 and 青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间呈上升趋势主要受区域平均日最高气温和日最低气温的影响,而温度日较差不是这两个区域的冰雹持续时间的影响因子。在1961~1980年期间,西北地区、北部平原地区和东南地区的区域平均单次冰雹持续时间都有显著的下降趋势,其中平均单次降雹持续时间在西北地区的趋势变化主要受到日最低气温以及温度日较差的长期年际变化的影响,在北部平原地区的长期变化仅与温度日较差的年际变化相关,而在东南地区的长期变化与三个对流参数都有较好的相关性。在1970~2015年期间西北

地区和青藏高原地区的区域平均单次降雹持续时间都呈现出显著的上升趋势,且分别与这两个区域的区域平均日最高气温和区域平均日最低气温成正相关,而与温度日较差都没有较好的相关性。

(3) 中国地区午后至夜间出现的冰雹过程持续时间长于凌晨和上午的冰雹过程,且峰值出现在17时和18时(当地时间)。中国地区20时(北京时)的年平均对流有效势能和Totals-totals指数均大于08时(北京时),因此,北京时20时较强的对流有效势能和Totals-totals指数可能是冰雹持续时间日变化的影响因子之一。

参考文献 (References)

- Berthet C, Dessens J, Sanchez J L. 2011. Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France [J]. *Atmospheric Research*, 100(4): 391–400. doi:10.1016/j.atmosres.2010.10.008
- Braganza K, Karoly D J, Arblaster J M. 2004. Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(13): L13217. doi: 10.1029 / 2004GL019998
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data [J]. *Atmospheric Research*, 67–68: 73–94.
- 陈传雷, 吴晓峰, 孙晓巍, 等. 2010. 辽宁省强对流性天气的气候特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 26(3): 27–33. Chen Chuanlei, Wu Xiaofeng, Sun Xiaowei, et al. 2010. Climatic characteristics of severe convective weather in Liaoning Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 26(3): 27–33. doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2010.03.005

- Dessens J. 1995. Severe convective weather in the context of a nighttime global warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 22(10): 1241–1244. doi:10.1029/95GL00952
- 董安祥, 张强. 2004. 中国冰雹研究的新进展和主要科学问题 [J]. *干旱气象*, 22(3): 68–76. Dong Anxiang, Zhang Qiang. 2004. New development of hail research in China and main scientific problem [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 22(3): 68–76. doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2004.03.013
- 高晓梅, 王令军, 王世杰, 等. 2016. 1952~2012年潍坊地区冰雹时空分布特征 [J]. *气象与环境学报*, 32(3): 77–82. Gao Xiaomei, Wang Lingjun, Wang Shijie, et al. 2016. Temporal-spatial distributions of hail disaster from 1952 to 2012 in Weifang of Shandong Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 32(3): 77–82. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2016.03.011
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- 金晓中, 贡觉顿珠. 2007. 那曲冰雹天气的气候特征分析 [J]. *西藏科技*, 3: 61–63. Jin Xiaozhong, Gongjue Dunzhu. 2007. Hail climate characteristic analysis in Naqu County [J]. *Tibet Science and Technology (in Chinese)*, 3: 61–63. doi:10.3969/j.issn.1004-3403.2007.03.021
- Kahraman A, Tilev-Tanriover S, Kadioglu M, et al. 2016. Severe hail climatology of turkey [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144(1): 337–346. doi:10.1175/MWR-D-15-0337.1
- Kendall M G. 1975. *Rank Correlation Methods* [M]. London: Charles Griffin, 202pp.
- Kunz M, Kugel P I S. 2015. Detection of hail signatures from single-polarization C-band radar reflectivity [J]. *Atmospheric Research*, 153: 565–577. doi:10.1016/j.atmosres.2014.09.010
- Lewis S C, Karoly D J. 2013. Evaluation of historical diurnal temperature range trends in CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 26(22): 9077–9089. doi:10.1175/JCLI-D-13-00032.1
- 李厚樞, 孙承旬. 1996. 相对广义温度平流在强对流天气分析和预报中的应用 [J]. *高原气象*, 15(3): 363–369. Li Houying, Sun Chengxun. 1996. The application of relation generalized temperature advection to analysis and forecast of severe convective weather [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15(3): 363–369
- 李怀宇, 何如意, 胡胜, 等. 2015. 近10年广东冰雹的统计特征及天气形势 [J]. *气象科技*, 43(2): 261–269. Li Huaiyu, He Ruyi, Hu Sheng, et al. 2015. Statistical characteristics and circulation patterns of hails in Guangdong in recent 10 years [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 43(2): 261–269. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2015.02.017
- Li J, Li C C, Zhao C S, et al. 2016a. Changes in surface aerosol extinction trends over China during 1980–2013 inferred from quality-controlled visibility data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(16): 8713–8719. doi:10.1002/2016GL070201
- Li M X, Zhang Q H, Zhang F Q. 2016b. Hail day frequency trends and associated atmospheric circulation patterns over China during 1960–2012 [J]. *J. Climate*, 29(19): 7027–7044. doi:10.1175/JCLI-D-15-0500.1
- 李昀英, 宇如聪, 傅云飞, 等. 2008. 一次热对流降水成因的分析和模拟 [J]. *气象学报*, 66(2): 190–202. Li Yunying, Yu Rucong, Fu Yunfei, et al. 2008. A case study on triggering of thermal convective precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66(2): 190–202. doi:10.11676/qxxb2008.019
- Lindvall J, Svensson G. 2015. The diurnal temperature range in the CMIP5 models [J]. *Climate Dyn.*, 44(1–2): 405–421. doi:10.1007/s00382-014-2144-2
- 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. Liu Dexiang, Bai Huzhi, Dong Anxiang. 2004. Studies on climatic characteristic and anomaly of hail in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23(6): 795–803. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.009
- López L, Marcos J L, Sánchez J L, et al. 2001. CAPE values and hailstorms on northwestern Spain [J]. *Atmospheric Research*, 56(1–4): 147–160. doi:10.1016/S0169-8095(00)00095-8
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 13(3): 245–259. doi:10.2307/1907187
- Manzato A. 2003. A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods [J]. *Atmospheric Research*, 67–68: 417–454. doi:10.1016/S0169-8095(03)00058-9
- McCaull E W Jr, Weisman M L. 2001. The sensitivity of simulated supercell structure and intensity to variations in the shapes of environmental buoyancy and shear profiles [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(4): 664–687. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0664:TSOSSS>2.0.CO;2
- Mezher R N, Doyle M, Barros V. 2012. Climatology of hail in Argentina [J]. *Atmospheric Research*, 114–115: 70–82. doi:10.1016/j.atmosres.2012.05.020
- Mohr S, Kunz M. 2013. Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe [J]. *Atmospheric Research*, 123: 211–228. doi:10.1016/j.atmosres.2012.05.016
- Niall S, Walsh K. 2005. The impact of climate change on hailstorms in southeastern Australia [J]. *International Journal of Climatology*, 25(14): 1933–1952. doi:10.1002/joc.1233
- Počakal D, Večenaj Ž, Štalec J. 2009. Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography [J]. *Atmospheric Research*, 93(1–3): 516–525. doi:10.1016/j.atmosres.2008.10.017
- Schuster S S, Blong R J, Speer M S. 2005. A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia [J]. *International Journal of Climatology*, 25(12): 1633–1650. doi:10.1002/joc.1199
- Sioutas M, Meaden T, Webb J D C. 2009. Hail frequency, distribution and intensity in northern Greece [J]. *Atmospheric Research*, 93(1–3): 526–533. doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.023
- 孙旭映, 渠永兴, 王坚. 2008. 地理因子对冰雹形成的影响 [J]. *干旱*

- 区研究, 25(3): 452-456. Sun Xuying, Qu Yongxing, Wang Jian. 2008. Effects of geographical factors on the formation of hailstorm [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 25(3): 452-456. doi:10.13866/j.azr.2008.03.007
- 唐浩鹏, 王芬, 付琼. 2017. 近 10 a 黔西南州冰雹特征分析 [J]. *云南地理环境研究*, 29(1): 65-68. Tang Haopeng, Wang Fen, Fu Qiong. 2017. Analysis of hail characteristics of nearly 10 years in Qianxinan prefecture [J]. *Yunnan Geographic Environment Research* (in Chinese), 29(1): 65-68. doi:10.3969/j.issn.1001-7852.2017.01.010.
- Tuovinen J P, Punkka A J, Rauhala J, et al. 2009. Climatology of severe hail in Finland: 1930-2006 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(7): 2238-2249. doi:10.1175/2008MWR2707.1
- 王展, 申双和, 刘荣花. 2011. 近 40 a 中国不同量级降水对年降水量变化的影响性分析 [J]. *气象与环境科学*, 34(4): 7-13. Wang Zhan, Shen Shuanghe, Liu Ronghua. 2011. Impact analysis of precipitation in different classes on annual precipitation change in recent 40 years in China [J]. *Meteorological and Environmental Sciences* (in Chinese), 34(4): 7-13. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2011.04.002
- 王芝兰, 陈录元, 尚可政, 等. 2011. 青海强对流天气时空特征及其对气候变暖的响应 [J]. *干旱气象*, 29(4): 439-445. Wang Zhilan, Chen Luyuan, Shang Kezheng, et al. 2011. Characteristics of temporal and spatial distribution of severe convective weather and its response to climate warming in Qinghai Province [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 29(4): 439-445. doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2011.04.008
- Xie B G, Zhang Q H, Wang Y Q. 2008. Trends in hail in China during 1960-2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(13): L13801. doi:10.1029/2008GL034067
- 许新田, 王楠, 刘瑞芳, 等. 2010. 2006 年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比分析 [J]. *高原气象*, 29(2): 447-460. Xu Xintian, Wang Nan, Liu Ruifang, et al. 2010. Comparative analyses on two severe convective hailstorm weather processes in Shaanxi Province in 2006 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29(2): 447-460.
- 杨敏, 丁建芳. 2015. 河南省冰雹时空分布及天气形势特征 [J]. *气象与环境科学*, 38(1): 54-60. Yang Min, Ding Jianfang. 2015. Temporal and spatial distribution and weather situation characteristics of hail in Henan Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences* (in Chinese), 38(1): 54-60. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2015.01.008
- Zhang C X, Zhang Q H, Wang Y Q. 2008. Climatology of hail in China: 1961-2005 [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3): 795-804. doi:10.1175/2007JAMC1603.1
- 张敏峰, 冯霞. 1998. 我国雷暴天气的气候特征 [J]. *热带气象学报*, 14(2): 156-182. Zhang Minfeng, Feng Xia. 1998. The climatology of thunderstorms in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 14(2): 156-182.
- 赵丽, 韩雪云, 杨青. 2016. 近 50 a 西北干旱区极端降水的时空变化特征 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 10(1): 19-26. Zhao Li, Han Xueyun, Yang Qing. 2016. Spatial and temporal variability of the extreme precipitation in the arid region of Northwest China during recent 50 years [J]. *Desert and Oasis Meteorology* (in Chinese), 10(1): 19-26. doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2016.01.003
- Zhao W H, Guo J P, Yao Z Y, et al. 2018. Declining hailstorm frequency in China during 1961-2015 and its potential influential factors [J]. *International Journal of Climatology*, 38(11): 4116-4126. doi:10.1002/joc.5556
- 赵晓川, 何晓东. 2011. 一次局地热对流降水天气分析 [J]. *安徽农业科学*, 39(8): 4675-4677, 4689. Zhao Xiaochuan, He Xiaodong. 2011. Analysis of a local thermal convective precipitation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (in Chinese), 39(8): 4675-4677, 4689. doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2011.08.105