

冯晓莉,马占良,管琴,等,2021. 1980—2018 年青海高原冰雹分布特征及其关键影响因素分析[J]. 气象,47(6):717-726. Feng X L, Ma Z L, Guan Q, et al, 2021. Spatio-temporal characteristics of hail and its influence factors in Qinghai Plateau during 1980—2018[J]. Meteor Mon, 47(6):717-726(in Chinese).

1980—2018 年青海高原冰雹分布特征 及其关键影响因素分析*

冯晓莉¹ 马占良¹ 管琴² 刘彩红¹

1 青海省气候中心, 西宁 810001

2 青海省气象台, 西宁 810001

提 要: 基于青海高原 50 个地面气象观测站点 1980—2018 年的观测数据, 结合欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料, 利用线性倾向估计、皮尔逊相关分析以及概率密度分布等方法, 揭示青海高原降雹频次、大小、持续时间的时空分布特征, 以及海拔高度、特殊层高度和气温变化对冰雹分布特征的影响。结果表明: 近 39 年来, 青海高原年降雹次数总体表现为显著减少趋势, 进入 21 世纪后减少尤为明显, 6—7 月冰雹高发且减少速率为年内最快, 平均单次降雹持续时间亦呈显著减少趋势, 20 世纪 90 年代中后期开始, 较大冰雹发生概率明显增大; 空间分布上, 南部高海拔地区为冰雹高发区, 降雹持续时间也较长, 大冰雹落区主要在冰雹次数较少的东部低海拔地区; 直径介于 3~5 mm 以及持续时长在 2~3 min 左右的降雹频率最高; 较低的 0℃ 和 -20℃ 层高度有利于冰雹生成并且延长降雹持续时间, 较高的 0℃ 和 -20℃ 层高度对支撑空中冰雹的碰并增长具有重要作用; 降雹频次和降雹持续时间显著减少不仅与 0℃ 和 -20℃ 层高度上升有关, 还与平均气温显著升高、气温日较差减小密切相关。

关键词: 青海高原, 冰雹直径, 降雹持续时间, 0℃ 和 -20℃ 层高度

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.007

Spatio-Temporal Characteristics of Hail and Its Influence Factors in Qinghai Plateau During 1980—2018

FENG Xiaoli¹ MA Zhanliang¹ GUAN Qin² LIU Caihong¹

1 Qinghai Climate Centre, Xining 810001

2 Qinghai Meteorological Observatory, Xining 810001

Abstract: By using the daily data from 50 stations and ERA-Interim reanalysis data in Qinghai Plateau during 1980—2018, and the methods of linear regression, Pearson correlation analysis and probability density distribution, this paper analyzed the spatio-temporal characteristics of hail frequency, hail diameter, hail duration, and the effects of elevations, special layer heights, and surface temperature on hail. The results demonstrate that the mean hail frequency in Qinghai Plateau has decreased significantly in the recent 39 years, especially since 2000. Hail events are most seen in June and July, with a fast decline rate in a year. The mean single time hail duration has decreased significantly, while the occurrence of large hail events has increased since the middle—late of 1990s. From the spatial distribution, the high value areas of hail frequency and duration are in the south part of Qinghai Plateau with high elevation, while the high value areas of

* 国家重点研发计划(2018YFC1505705)、青海省科技厅基础研究项目(2020-ZJ-739)、国家自然科学基金项目(42065003 和 42075017)、青海省气象局重点项目(QXZ2020-003)共同资助

2020 年 6 月 16 日收稿; 2021 年 2 月 24 日收修定稿

第一作者: 冯晓莉, 主要从事气候监测评估工作. E-mail: fxl_lxf2008@163.com

通讯作者: 管琴, 主要从事高原灾害性天气机理研究. E-mail: 446298319@qq.com

mean hail diameter are in the eastern part of Qinghai Plateau with lower altitudes. The hail diameter in 3—5 mm and duration 2—3 min of hail events have the highest frequency. The lower 0°C and -20°C isotherm heights are favorable for hail formation and prolonging the hail duration. The higher 0°C and -20°C isotherm heights play an important role in supporting the collision and growth of hail in the air. The decreases of hail frequency and hail duration are related to the significant increase in mean surface air temperature and decrease in diurnal temperature range as well as the rising of 0°C and -20°C layer heights.

Key words: Qinghai Plateau, hail diameter, hail duration, 0°C and -20°C isotherm heights

引 言

在气候研究领域中,作为最重要的大气清洁机制的降水(雨、雪、冰雹等)一直以来备受关注。冰雹是对流云中产生的球状或不规则冰块形式的降水,由于其突发性强、生命史短,一旦发生往往造成较严重的雹灾,对农牧业生产、人类生活和生态系统带来严重影响(王静爱等,1999;王文宇和王静爱,2001;董安祥和张强,2004;赵金涛等,2015)。

青海高原地处青藏高原东北部,占青藏高原面积的三分之一,是生态环境脆弱带和气候变化敏感区,气候变化的微小波动都有可能对该地区脆弱的生态系统造成影响(常国刚等,2005;孙鸿烈等,2012)。高原境内地形、地貌复杂,高山、谷地、盆地交错,沟壑相连,局地强对流天气频繁发生,冰雹作为高原的主要气象灾害,已成为影响当地经济发展的重要因素(刘彦忠等,2006;高懋芳和邱建军,2011)。据《中国气象灾害大典·青海卷》(温克刚和王莘,2007)记载,1971年7—8月,东部农业区、海北、海南多次遭受雹灾,受灾面积达3.7万ha,其中8月31日贵南雹灾,冰雹直径为4~8cm,打死牲畜19头,打伤484人;2013年8月10日,青海高原境内多地出现冰雹灾害,其中乐都县两镇油菜籽、小麦全部绝收(李万志和戴升,2014)。因此,加强对该地区冰雹气候特征的研究,对于加深灾害性天气的理解和做好冰雹灾害防御工作具有重要的科学意义和现实意义。

过去几十年关于冰雹气候特征的研究主要从冰雹日数的角度出发,研究发现,青藏高原是我国冰雹灾害的频发区,夏季是集中高发期,20世纪80年代末以来青藏高原中东部冰雹呈显著下降趋势(李照荣等,2005;金晓中和贡觉顿珠,2007;张芳华和高辉,2008;Xie et al,2008;符琳等,2011;黄玉霞等,2017;Li et al,2018)。也有学者对青海高原的冰雹

发生频次及时空分布进行了较为详细的研究,结果表明冰雹高发区主要在青海南部牧区(简称青南牧区)、环青海湖地区(简称环湖湖区),以及东部农业区,低值区出现在柴达木盆地(赵仕雄和李正贵,1991;张国庆和刘蓓,2006;刘彩虹等,2012;朱平等,2019;马晓玲等,2020)。由于资料限制,关于冰雹大小和降雹持续时间的研究甚少。随着长时间序列冰雹资料的积累,以及人们对于系统了解青海高原冰雹气候特征的迫切需要,现在有必要全面了解该地区冰雹频次、大小、持续时间的时空分布特征,这对开展防雹、消雹作业以及冰雹灾害防御规划均具有十分重要的意义。

近几十年来,不少学者在区域性冰雹的天气形势和物理量参数分析等方面取得了一系列成果,但研究领域一直以来偏重于冰雹天气学特征和形成机制,大部分都是从个例角度出发(李厚楹和孙承旬,1996;赵丽萍,1997;保广裕等,2003;康凤琴等,2004;苏永玲等,2018;王莎等,2019;张小娟等,2019)。另外,由于地理条件复杂,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(孙继松等,2006;樊李苗和俞小鼎,2013;曹艳察等,2018)。因此,了解冰雹气候特征,开展冰雹时空分布特征影响因子的研究,为做好冰雹预报预警工作打下基础。

鉴于此,本文利用1980—2018年青海高原50个地面气象观测站点的逐日观测资料以及欧洲中心ERA-Interim再分析资料,揭示降雹频次、大小、持续时间的时空分布特征,从不同海拔范围、特殊层高度以及气温变化的角度探讨冰雹分布特征的可能影响因素,以为青海高原冰雹灾害防御工作提供科学的参考依据。

1 资料和方法

本研究选取青海高原50个地面气象台站

(31°~39°N, 89°~104°E, 海拔高度为 1700~6681 m; 图 1) 1980—2018 年逐日观测资料, 包括降雹频次、降雹持续时间、冰雹直径以及平均气温、最高气温和最低气温等资料, 该数据均进行了严格检查和质量控制。根据青海省《地面气象记录月报表》A 文件, 整理出 50 个站点的降雹记录共 11413 条, 其中包括 10884 条降雹持续时间和 10602 条冰雹最大直径。

再分析资料来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF), 本文的 ERA-Interim 数据分别选取了 500 和 700 hPa 两个规定气压层上的逐月平均气温和位势高度, 时间选取范围为 1980—2018 年, 空间分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, 该资料在中国有关温度、降水、水汽以及云特性等的可靠性已通过卫星资料、站点观测等方式的验证 (赵天保和符淙斌, 2009; 谢潇等, 2011; 李瑞青等, 2012; 白磊等, 2013)。

本文主要采用线性倾向估计的方法研究气象要素在时间变化中升降的定量程度, 并对其进行统计检验 (施能等, 1995); 利用皮尔逊相关分析方法探讨冰雹频次、直径、持续时间与气温、海拔、特殊层高度之间的关系 (魏凤英, 1999); 用 ArcGIS 绘制气象要

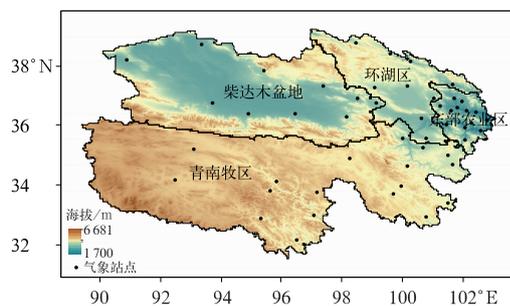


图 1 青海高原地形及气象站点的空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations and topography in Qinghai Plateau

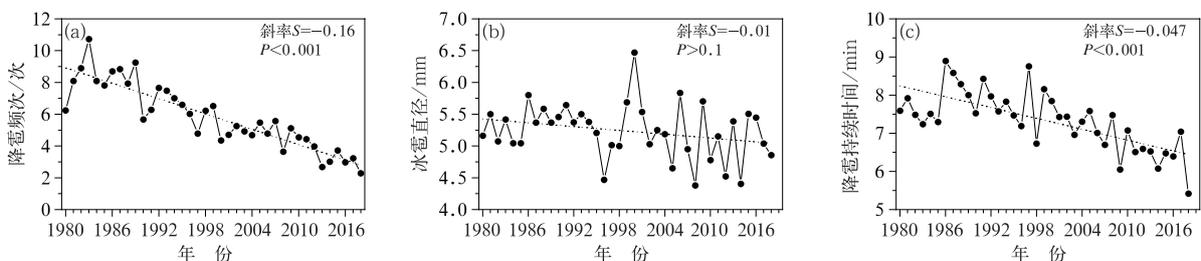


图 2 1980—2018 年青海高原 (a) 降雹频次、(b) 平均单次冰雹直径、(c) 平均单次降雹持续时间的年际变化 (P 为显著性检验水平, 下同)

Fig. 2 The interannual variations of (a) hail frequency, (b) mean single-time hail diameter, (c) mean single-time hail duration in Qinghai Plateau during 1980—2018 (P is for significant level, the same below)

素均值的空间分布图。 0°C 和 -20°C 层高度的计算公式如下 (赵爱芳等, 2013):

$$H_i = \frac{H_{ij} - H_{ik}}{T_{ij} - T_{ik}}(T_i - T_{ik}) + H_{ik}$$

式中: H_i 为 0°C 或 -20°C 层高度 (单位: m), 下标 i 代表 0°C 或 -20°C 层, H_{ij} 和 H_{ik} 分别代表 0°C 或 -20°C 层所在位置的上下两个标准气压层高度 (单位: m), T_{ij} 和 T_{ik} 分别为 0°C 或 -20°C 层所在位置的上下两个标准气压层的温度 (单位: $^\circ\text{C}$), T_i 为 0°C 或 -20°C 层的温度。本研究中 0°C 或 -20°C 高度特指距地面的高度, 因此在统计研究时对其进行了一定处理, 减去了站点本身的海拔。

2 结果分析

2.1 时空分布特征

1980—2018 年, 青海高原平均年雹次数总体表现为显著减少趋势, 倾向率为 $-1.6 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 通过 0.001 的显著性水平检验 ($P < 0.001$), 尤其是 2000 年以来减少最明显。与 1980—1999 年平均值相比, 2000—2018 年平均年雹次数偏少 3.2 次, 其中 1983 年为近 39 年来最多, 达 10.7 次, 2018 年达到最低值, 仅为 2.3 次 (图 2a)。降雹频次的年际变化特征也体现在各月降雹频次的变化中 (图 3), 5—9 月各月降雹频次呈显著减少趋势 ($P < 0.001$), 倾向率为 $-0.5 \sim -0.2 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其中 7 月减少最明显, 6 月次之, 5 月减速相对较慢。由图 2b 可知, 1980—2018 年, 青海高原平均单次冰雹直径呈微弱减小趋势, 倾向率为 $-0.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 1998 年后变率明显加大, 2008 年和 2014 年达历史

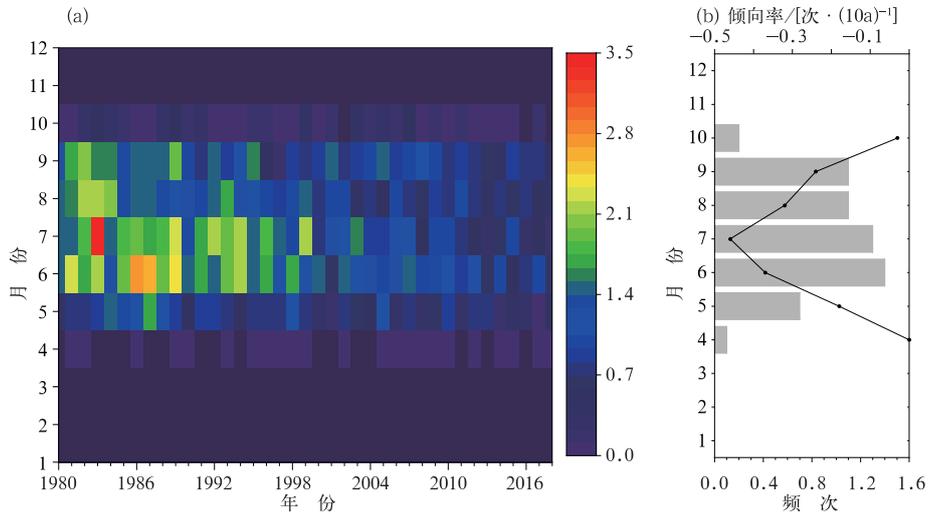


图3 1980—2018年青海高原(a)各月降雹频次的年际变化、(b)各月平均降雹频次(柱型)及其倾向率(黑色曲线)

Fig. 3 The interannual variations of (a) hail frequency and (b) monthly mean hail frequency (column) and their linear trends (black curve) in Qinghai Plateau during 1980–2018

最小值(4.4 mm),2000年达历史最大值(6.5 mm)。近39年来,青海高原平均单次降雹持续时间呈显著下降趋势($P < 0.001$),倾向率为 $-0.5 \text{ min} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,2000—2018年平均单次降雹持续时间较1980—1999年缩减1.0 min,其中1986年为历史最长(8.9 min),2018年达到历史最低值(5.4 min)。降雹频次的年变化如图3所示,可以看出,11月至次年3月为无雹时段,4月、10月偶有出现,5月较少,6—9月为冰雹高发期,其中6月最多,7月开始逐渐减少。降雹频次的这种季节分布原因可能是春末夏初地面太阳辐射增强,近地层大气不稳定,加之过渡季节冷暖空气活动频繁,易造成较多的冰雹天气,而在9月以后,随着太阳辐射减弱和西太平洋副热带高压东退,大气层结逐渐趋于稳定,冰雹频次迅速减少。

从青海高原各地历年平均年降雹次数的空间分布来看(图4a),降雹次数较少的地区主要位于高原西北部的柴达木盆地、东部农业区大部以及环青海湖部分地区,年均降雹次数为0.3~5.0次,特别是这些地区的沙漠、盆地、河谷地区,年均不足3次;年均在5次以上的地区主要集中在青南牧区、环湖区的野牛沟、海晏、刚察以及东部农业区的大通、化隆等地,青南牧区最多,年雹次数达10次以上。青海高原各地

平均单次冰雹直径介于2.8~12.8 mm,东部农业区大部、柴达木盆地的小灶火、乌兰以及环湖区的天峻在6.0 mm以上,民和直径最大(图4b)。青海高原平均单次降雹持续时间分布不均(图4c),各地平均单次降雹持续时间为3.8~10.7 min,其中6.0 min以下的冰雹主要分布在东部农业区大部、柴达木盆地的格尔木和诺木洪、环湖区的门源、共和以及西南部的玉树等地,省内其余大部地区在6.0 min以上,刚察降雹持续时间最长。不难看出,降雹次数较多、持续时间较长的站点主要集中在南部高海拔地区,东部低海拔地区冰雹较少、持续时间也较短,但低海拔处冰雹直径较南部高海拔地区大。

2.2 影响因素分析

2.2.1 不同海拔范围内冰雹分布差异性

前文分析表明海拔对冰雹的形成、发展、持续等具有重要影响,这里进一步分析不同海拔范围内年降雹次数、冰雹直径、降雹持续时间的差异性,如图5所示。年降雹次数的中位数随着海拔的升高呈增加趋势,尤其是3.2 km以上年降雹次数增加明显;3.2~3.9和3.9~4.6 km海拔带内年降雹次数的箱体较长,表明海拔越高,降雹频次的波动越大;3.9 km以上年降雹次数的波峰值在13次左右,

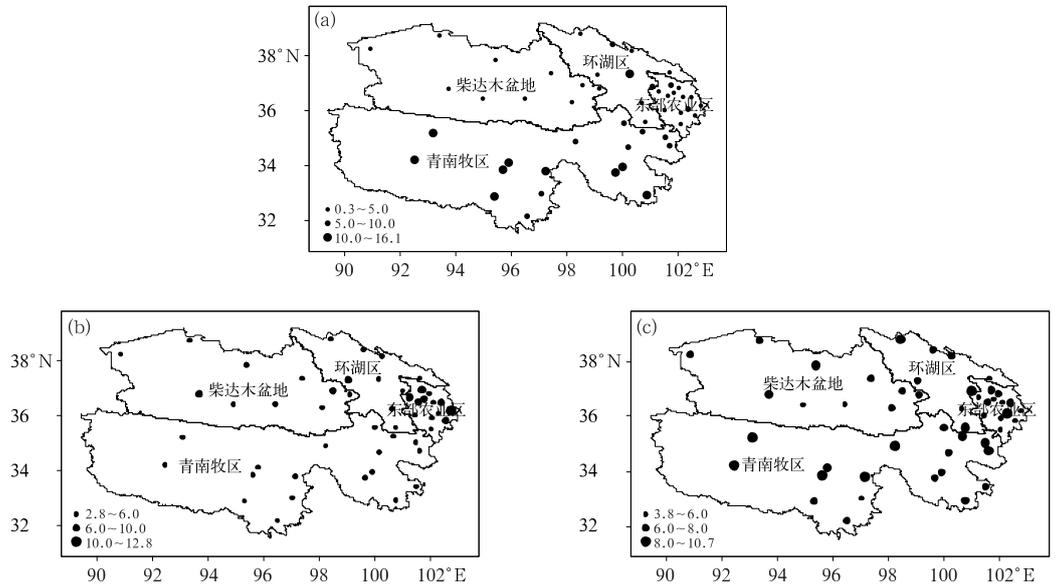


图 4 1980—2018 年青海高原(a)平均年降雹次数(单位:次·a⁻¹)、(b)平均单次冰雹直径(单位:mm)、(c)平均单次降雹持续时间(单位:min)的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of (a) the mean annual hail frequency (unit: times · a⁻¹), (b) the mean single-time hail diameter (unit: mm) and (c) the mean single-time hail duration (unit: min) in Qinghai Plateau during 1980—2018

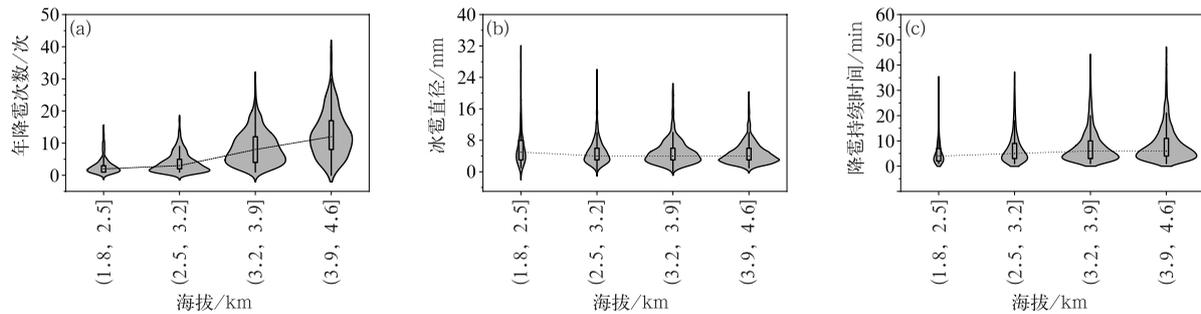


图 5 1980—2018 年青海高原不同海拔范围内(a)年降雹次数、(b)冰雹直径、(c)降雹持续时间的小提琴图 (箱图代表每个间隔内的最大值、最小值、75%和 25%分位数以及中位数,灰色阴影区域代表概率密度分布)

Fig. 5 Violin plots for (a) the annual hail frequency, (b) hail diameter and (c) hail duration at different elevation intervals in Qinghai Plateau during 1980—2018 (Boxes represent the maximum, minimum, 75%, 25%, median of the data in each intervals; gray shaded areas represent the probabilities of samples)

3.2~3.9 km 海拔带内峰值为 5 次左右,较低海拔处波峰值为 3 次左右(图 5a)。不同海拔范围内冰雹直径的中位数差别不大,总体呈微弱减小趋势,1.8~2.5 km 海拔带内冰雹直径的箱体较长,表明海拔越低,冰雹直径的波动越大;不同海拔带内冰雹直径峰值介于 3~5 mm,1.8~2.5 km 海拔范围内冰雹直径波峰值在 5 mm 左右,2.5 km 以上出现 3 mm 冰雹的概率最大(图 5b)。不同海拔带内降雹

持续时间的中位数呈微弱增加趋势,降雹持续时间的箱体也随海拔的升高而变长,表明海拔越高,降雹持续时间的波动越大,所有冰雹事件中,降雹持续时间在 2~3 min 左右的概率最大(图 5c)。

2.2.2 特殊层高度特征

冰雹的发生离不开深厚对流的发展,当不稳定能量迅猛释放时,有时降雹,有时不产生冰雹,这与特殊层高度有关,冰雹需要适当的 0℃ 和 -20℃ 层

高度,它影响着降水相态的转化以及冰雹下落融化的空间距离(周崑等,2005)。从 1980—2018 年 5—9 月青海高原平均 0°C 和 -20°C 层高度的时间序列可以看出(图 6),近 39 年来, 0°C 和 -20°C 层高度均呈显著升高趋势($P < 0.001$),上升速率分别为 44.1 和 $73.0 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这与黄小燕等(2017)的研究结果相吻合。通过比较可以看出,近 39 年来,青海高原平均年降雹次数、平均单次降雹持续时间与 0°C 和 -20°C 层高度的时间序列呈反相变化,即降雹频次减少、降雹持续时间缩短对应特殊层高度上升,其负相关系数达 -0.5 ,通过 0.01 的显著性水平检验。

整体而言,青海高原 1980—2018 年 5—9 月平均 0°C 和 -20°C 层高度分别为 1640 和 4788 m ,青南牧区大部 0°C 层高度在 2000 m 以下,东部农业区、柴达木盆地中部 0°C 层高度在 2000 m 以上(图 7a);各地 -20°C 层高度为 $3792 \sim 6030 \text{ m}$,青南牧区部分地区、柴达木盆地西北缘以及环湖区西北部 -20°C 层高度较低,东部农业区大部在 5200 m 以上(图 7b)。不难看出, 0°C 和 -20°C 层较低的地

区冰雹频发且持续时间长,东部农业区 0°C 和 -20°C 层高度最高,该地区冰雹直径也较大。从青海高原 50 个气象观测站点 1980—2018 年平均年降雹频次、平均单次冰雹直径、平均单次降雹持续时间与 5—9 月平均 0°C 、 -20°C 层高度的散点相关图可以看出(图 8),冰雹高发区的 0°C 和 -20°C 平均高度分别为 $200 \sim 1500$ 和 $3500 \sim 5200 \text{ m}$,特殊层高度在这一区间内的降雹持续时间也较长; 0°C 、 -20°C 层平均高度分别在 2000 、 5000 m 以上的地区则更容易出现较大直径的冰雹。

从理论上讲,青海高原太阳辐射强,感热输送强,温度垂直递减率大,对流发展旺盛,较低的 0°C 层和 -20°C 层高度使对流系统更容易穿过,有利于冰雹生成,而且冰雹持续时间也较长。另一方面, 0°C 层高度越低,冰雹融化空间距离越小,地面观测到冰雹的可能性越大。在东部低海拔地区,较高的 -20°C 层高度使冰雹反复升降并与云雨滴反复碰并增长,它决定着对流风暴内雹胚能否增长为较大冰雹,所以 -20°C 层高度是影响冰雹增长的重要因素。

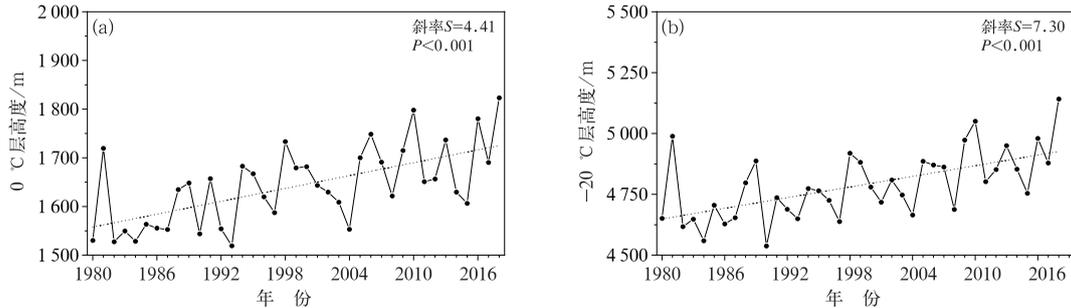


图 6 1980—2018 年 5—9 月青海高原平均(a) 0°C 和(b) -20°C 层高度的年际变化
Fig. 6 The interannual variations of the mean (a) 0°C and (b) -20°C isotherm heights in Qinghai Plateau from May to September during 1980—2018

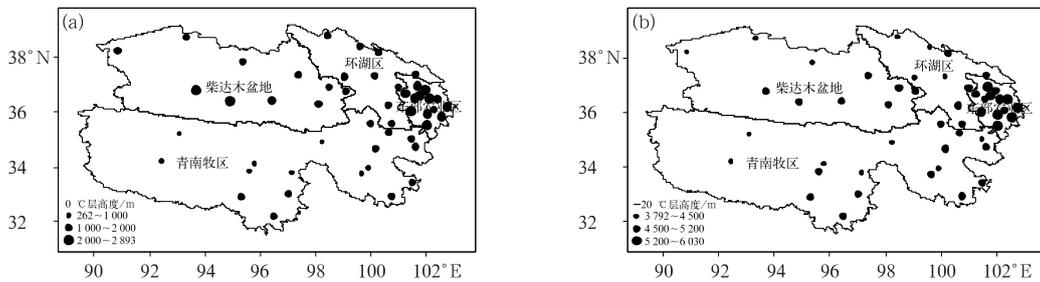


图 7 青海高原 1980—2018 年 5—9 月平均(a) 0°C 和(b) -20°C 层高度的空间分布
Fig. 7 Spatial distributions of the mean (a) 0°C and (b) -20°C isotherm heights in Qinghai Plateau from May to September during 1980—2018

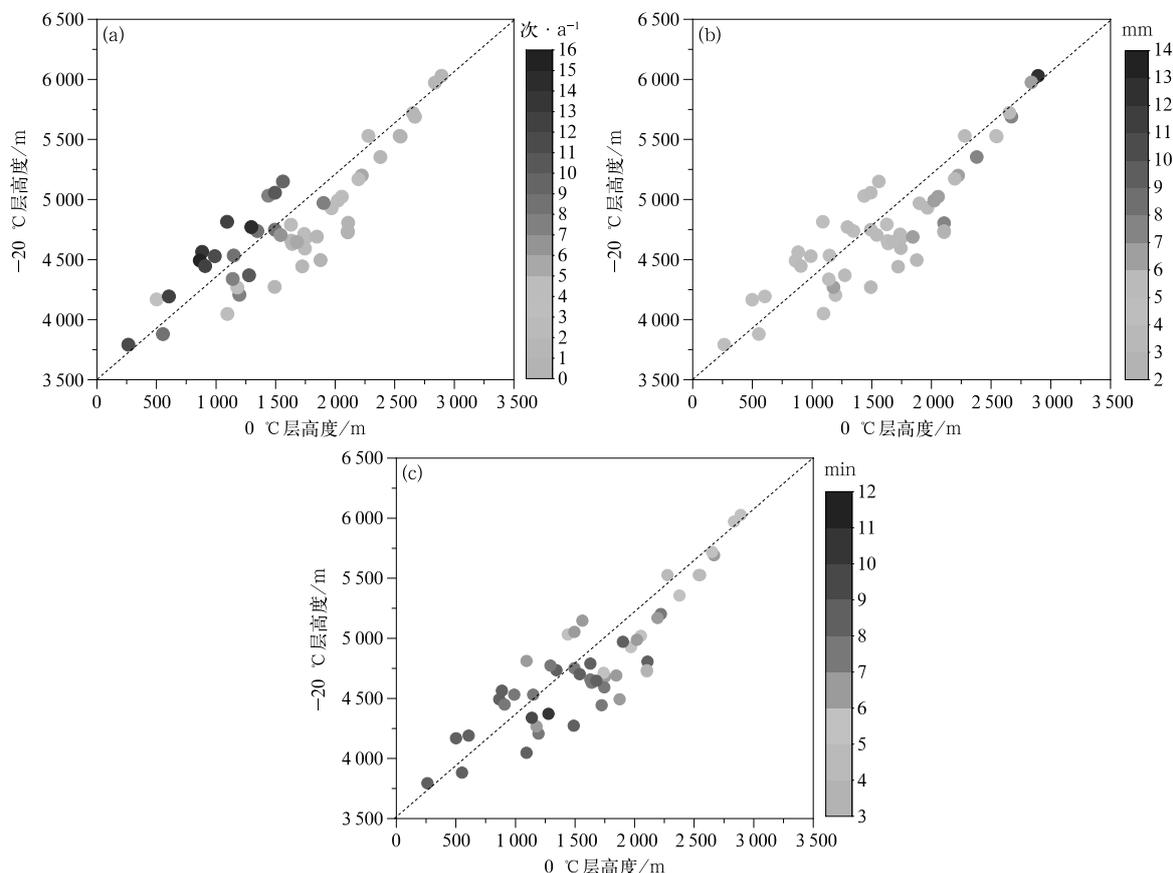


图 8 1980—2018 年青海高原 50 个气象站点(a)平均年降雹频次、(b)平均单次冰雹直径、(c)平均单次降雹持续时间与 5—9 月平均 0℃和 -20℃层高度的散点相关图

Fig. 8 Scatter correlation diagrams between (a) the mean annual hail frequency, (b) mean single-time hail diameter, (c) mean single-time hail duration and the mean 0°C and -20°C isotherm heights for 50 meteorological stations in Qinghai Plateau from May to September during 1980—2018

2.2.3 冰雹与气温变化的联系

王芝兰等(2011)研究指出,在地形不变的条件下,气候变暖可能造成大气环流和下垫面性质发生变化,从而改变区域水汽条件、层结稳定性和抬升力大小,因此温度的变化是冰雹发生的重要影响因子之一。气温日较差与冰雹的发生也密切相关(孔锋等,2018;加勇次成等,2019)。鉴于此,下面进一步分析平均气温、气温日较差与冰雹之间的相关性。

1981—2018 年,青海高原 5—9 月平均气温增温率为 $0.52^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,同时段内平均最低气温的线性增温率达 $0.65^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,高于平均最高气温的增幅 $0.48^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,均通过 0.001 的显著性水平检验,气温变化的非对称性特征使得气温日较差呈现显著的减小趋势,倾向率为 $-0.2^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P < 0.05$)。相关分析表明,青海高原气温变化与年

降雹频次、降雹持续时间具有高相关性,但与冰雹直径的相关性不显著,图 9 分别给出了经标准化处理后的青海高原年降雹频次、平均单次降雹持续时间与 5—9 月平均气温、平均气温日较差序列,可以看出,降雹频次与平均气温呈反位相变化,负相关系数达 -0.78 ,通过 0.01 的显著性水平检验,气温日较差与降雹频次的相关不显著(图 9a);降雹持续时间与平均气温呈显著负相关性,而与气温日较差呈显著正相关性,相关系数分别为 -0.58 、 0.51 ,均通过 0.01 的显著性水平检验(图 9b)。也就是说,青海高原降雹频次和持续时间的显著减少与平均气温显著升高、气温日较差显著减小密切相关,随着近地层气温的升高,中低层大气温度也在升高,从而引起 0℃层高度上升,冰雹频次随之减少,而气温日较差小、对流活动相对偏弱,冰雹发生概率随之降低。

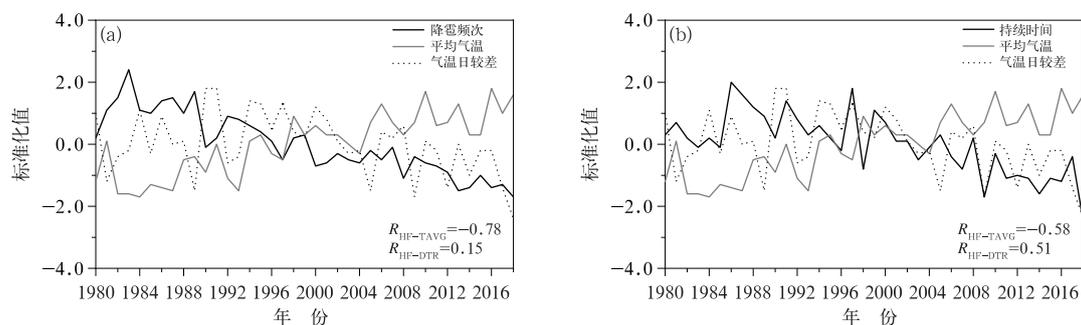


图9 1980—2018年青海高原(a)降雹频次、(b)平均单次降雹持续时间与5—9月平均气温、平均气温日较差的标准化序列

Fig. 9 Standardized series of (a) hail frequency, (b) mean single-time hail duration, and mean May–September temperature and diurnal temperature range in Qinghai Plateau during 1980–2018

3 结论与讨论

本文利用青海高原50个地面气象观测站点1980—2018年的逐日观测数据和ERA-Interim高空资料,分析讨论了该地区冰雹的时空分布特征及其与海拔、特殊层高度以及气温变化的联系,主要结论如下:

(1)1980—2018年,青海高原平均年降雹次数总体表现为显著下降趋势,倾向率为 $-1.6 \text{次} \cdot (10 \text{a})^{-1}$,尤其是2000年以来减少最明显。高原冰雹具有季节性强、集中分布的特点,受地面太阳辐射增强及冷暖空气活动影响,6—7月冰雹频发,9月随着西太平洋副热带高压东退及太阳辐射减弱,冰雹迅速减少;另外,冰雹高发的6月和7月也是近39年来冰雹减少最明显的月份。

(2)1980—2019年,青海高原平均单次降雹持续时间亦呈显著减少趋势,倾向率为 $-0.5 \text{min} \cdot (10 \text{a})^{-1}$;极端冰雹事件发生概率自20世纪90年代中后期开始增大。直径介于3~5 mm以及持续时长在2~3 min左右的降雹频率最高。

(3)空间分布上,青南牧区为冰雹频发区,环湖区次多,柴达木盆地和东部农业区最少;冰雹直径的空间分布表现出与年降雹次数相反分布形式,大冰雹落区主要在冰雹次数少的地区,年降雹次数多的青南牧区冰雹直径普遍较小;降雹持续时间分布不均,总体表现为青南牧区降雹持续时间长、东部地区持续时间较短的特点。

(4)海拔对冰雹的形成、发展、持续等具有重要

影响,1980—2018年青海高原年降雹次数和降雹持续时间随着海拔的升高而增加,冰雹直径随着海拔的升高而减小。近39年来,青海高原降雹频次和持续时间的显著减少与该区域平均气温显著升高、气温日较差显著减小以及 0°C 和 -20°C 层高度显著上升密切相关。随着近地层气温的升高,中低层大气温度也在升高,从而引起 0°C 和 -20°C 层高度上升,较高的 0°C 和 -20°C 层高度不利于冰雹生成和持续,但对支撑空中冰雹的增长具有重要作用,是影响冰雹大小的重要因素。

需要指出的是,冰雹是一种局地性较强的天气过程,由于资料限制,对于冰雹的分析研究还无法精细到乡镇。另外,影响冰雹时空分布特征的因子不仅仅包括本文所涉及的特殊层高度、海拔以及气温的变化,还需要结合更多源的资料和多种因素对冰雹的影响因子进行深入研究。

参考文献

- 白磊,王维霞,姚亚楠,等,2013. ERA-Interim和NCEP/NCAR再分析数据气温和气压值在天山山区适用性分析[J]. 沙漠与绿洲气象,7(3):51-56. Bai L, Wang W X, Yao Y N, et al, 2013. Reliability of NCEP/NCAR and ERA-Interim reanalysis data on Tianshan Mountainous Area[J]. Desert Oasis Meteor, 7(3): 51-56 (in Chinese).
- 保广裕,马元仓,史津梅,等,2003. 不平衡场在青海高原冰雹预报中的释用[J]. 青海科技,10(1):44-46. Bao G Y, Ma Y C, Shi J M, et al, 2003. Explanation and application of unbalanced field for hail forecast in Qinghai Plateau[J]. J Qinghai Technol, 10(1): 44-46 (in Chinese).
- 曹艳察,田付友,郑永光,等,2018. 中国两级阶梯地势区域冰雹天气的环境物理量统计特征[J]. 高原气象,37(1):185-196. Cao Y C, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2018. Statistical characteristics of

- environmental parameters for hail over the two-step terrains of China[J]. Plateau Meteor, 37(1):185-196(in Chinese).
- 常国刚,李凤霞,李林,2005. 气候变化对青海生态与环境的影响及对策[J]. 气候变化研究进展, 1(4):172-175. Chang G G, Li F X, Li L, 2005. Impact of climate change on ecology and environment in Qinghai Province and its countermeasures[J]. Adv Climate Change Res, 1(4):172-175(in Chinese).
- 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 A X, Zhang Q, 2004. New development of hail research in China and main scientific problem[J]. Arid Meteor, 22(3):68-76(in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):156-165(in Chinese).
- 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. Fu L, Li W J, Zhang P Q, et al, 2011. Inter-decadal change of hail events over China and causation analysis in Northern China in recent 50 years[J]. Meteor Mon, 37(6):669-676(in Chinese).
- 高懋芳,邱建军,2011. 青藏高原主要自然灾害特点及分布规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 25(8):101-106. Gao M F, Qiu J J, 2011. Characteristics and distribution law of major natural disasters in Tibetan Plateau[J]. J Arid Land Resour Environ, 25(8):101-106(in Chinese).
- 黄小燕,王小平,王劲松,等,2017. 1970—2012年夏半年中国大气0℃层高度时空变化特征[J]. 气象, 43(3):286-293. Huang X Y, Wang X P, Wang J S, et al, 2017. Spatio-temporal changes of 0℃ isotherm height in China during summer half year of 1970—2012[J]. Meteor Mon, 43(3):286-293(in Chinese).
- 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. Huang Y X, Wang B J, Wang Y F, et al, 2017. Variation characteristics of hail days in Gansu Province during 1974—2013[J]. Meteor Mon, 43(4):450-459(in Chinese).
- 加勇次成,次旺顿珠,措姆,2019. 气候变化背景下羌塘自然保护区冰雹日数时空变化特征[J]. 中国农学通报, 35(18):103-109. Jiayong C C, Ciwang D Z, Cuo M, 2019. Hail days in Qiangtang National Nature Reserve of Tibet: spatial and temporal variation characteristics under the background of climate change[J]. Chin Agric Sci Bull, 35(18):103-109(in Chinese).
- 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 X Z, Gongjue D Z, 2007. Hail climate characteristic analysis in Naqu County[J]. Tibet Sci Technol, (3):61-63(in Chinese).
- 康凤琴,张强,渠永兴,等,2004. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究[J]. 高原气象, 23(6):735-742. Kang F Q, Zhang Q, Qu Y X, et al, 2004. Simulating study on hail microphysical process on the northeastern side of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood [J]. Plateau Meteor, 23(6):735-742(in Chinese).
- 孔锋,王一飞,吕丽莉,等,2018. 1961—2016年中国冰雹日数时空演变特征[J]. 水利水电技术, 49(3):7-16. Kong F, Wang Y F, Lyu L L, et al, 2018. Temporal and spatial evolution characteristics of hail days from 1961 to 2016 in China[J]. Water Resour Hydropower Eng, 49(3):7-16(in Chinese).
- 李厚楹,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 H Y, Sun C X, 1996. The application of relation generalized temperature advection to analysis and forecast of severe convective weather[J]. Plateau Meteor, 15(3):363-369(in Chinese).
- 李瑞青,吕世华,韩博,等,2012. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析[J]. 高原气象, 31(6):1488-1502. Li R Q, Lyu S H, Han B, et al, 2012. Preliminary comparison and analyses of air temperature at 2m height between three re-analysis data-sets and observation in the east of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 31(6):1488-1502(in Chinese).
- 李万志,戴升,2014. 2013年青海省十大天气气候事件[J]. 青海气象, 151(1):67. Li W Z, Dai S, 2014. The top 10 extreme weather and climate events of 2013 in Qinghai Province[J]. J Qinghai Meteor, 151(1):67(in Chinese).
- 李照荣,丁瑞津,董安祥,等,2005. 西北地区冰雹分布特征[J]. 气象科技, 33(2):160-162, 166. Li Z R, Ding R J, Dong A X, et al, 2005. Characteristics of hail distribution in Northwest China [J]. Meteor Sci Technol, 33(2):160-162, 166(in Chinese).
- 刘彩红,王黎俊,王振宇,等,2012. 基于灾损评估的青海高原冰雹灾害风险区划[J]. 冰川冻土, 34(6):1409-1415. Liu C H, Wang L J, Wang Z Y, et al, 2012. Division of hail disaster risk scales in Qinghai Plateau based on damage assessment[J]. J Glaciol Geocryol, 34(6):1409-1415(in Chinese).
- 刘彦忠,康凤琴,安林,等,2006. 再议青藏高原东北边缘及毗邻地区人工防雹消雹工作的意义[J]. 干旱气象, 24(3):75-83. Liu Y Z, Kang F Q, An L, et al, 2006. Re-discussion on significance of hail suppression over northeast border of Qinghai-Tibetan Plateau and its neighborhood[J]. Arid Meteor, 24(3):75-83(in Chinese).
- 马晓玲,李德帅,胡淑娟,2020. 青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J]. 气象, 46(3):301-312. Ma X L, Li D S, Hu S J, 2020. Refined analysis of spatio-temporal characteristics of thunderstorm and hail over Qinghai Province[J]. Meteor Mon, 46(3):301-312(in Chinese).
- 施能,陈家其,屠其璞,1995. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 53(4):431-439. Shi N, Chen J Q, Tu Q P, 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteor Sin, 53(4):431-439(in Chinese).
- 苏永玲,马秀梅,马元仓,等,2018. 高空冷涡和副高背景下青海冰雹特征对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 12(4):22-29. Su Y L, Ma X M, Ma Y C, et al, 2018. Comparative analysis on hail characteristics under cold vortex and subtropical high background in Qinghai[J]. Desert Oasis Meteor, 12(4):22-29(in Chinese).
- 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等,2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与

- 建设[J]. 地理学报, 67(1): 3-12. Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al, 2012. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. *Acta Geogr Sin*, 67(1): 3-12(in Chinese).
- 孙继松, 石增云, 王令, 2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J]. 气候与环境研究, 11(1): 76-84. Sun J S, Shi Z Y, Wang L, 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events[J]. *Climatic Environ Res*, 11(1): 76-84(in Chinese).
- 王静爱, 史培军, 刘颖慧, 等, 1999. 中国 1990~1996 年冰雹灾害及其时空动态分析[J]. 自然灾害学报, 8(3): 46-53. Wang J A, Shi P J, Liu Y H, et al, 1999. Hail disaster in China during 1990—1996 and its dynamic spatial and temporal analysis[J]. *J Nat Disaster*, 8(3): 46-53(in Chinese).
- 王莎, 沙勇, 宋金妹, 等, 2019. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象, 45(5): 713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. *Meteor Mon*, 45(5): 713-722(in Chinese).
- 王文宇, 王静爱, 2001. 基于三种信息源的中国冰雹灾害区域分异研究[J]. 地理研究, 20(3): 380-387. Wang W Y, Wang J A, 2001. The distributive pattern of hail disasters based on three data sources in China[J]. *Geogr Res*, 20(3): 380-387(in Chinese).
- 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, 454. Wang Z L, Chen L Y, Shang K Z, et al, 2011. Characteristics of temporal and spatial distribution of severe convective weather and its response to climate warming in Qinghai Province[J]. *J Arid Meteor*, 29(4): 439-445, 454(in Chinese).
- 魏凤英, 1999. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 1999. *Diagnosis and Prediction Technology of Modern Climate Statistics* [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 温克刚, 王莘, 2007. 中国气象灾害大典: 青海卷[M]. 北京: 气象出版社. Wen K G, Wang X, 2007. *Meteorological Disaster of China (Qinghai Volume)* [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 谢潇, 何金海, 祁莉, 2011. 4 种再分析资料在中国区域的适用性研究进展[J]. 气象与环境学报, 27(5): 58-65. Xie X, He J H, Qi L, 2011. A review on applicability evaluation of four reanalysis datasets in China[J]. *J Meteor Environ*, 27(5): 58-65(in Chinese).
- 张芳华, 高辉, 2008. 中国冰雹日数的时空分布特征[J]. 南京气象学院学报, 31(5): 687-693. Zhang F H, Gao H, 2008. Temporal and spatial features of hail days in China[J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 31(5): 687-693(in Chinese).
- 张国庆, 刘蓓, 2006. 青海省冰雹灾害分布特征[J]. 气象科技, 34(5): 558-562. Zhang G Q, Liu B, 2006. Distributional characteristics of hail disasters in recent 40 years over Qinghai Province[J]. *Meteor Sci Technol*, 34(5): 558-562(in Chinese).
- 张小娟, 陶玥, 刘国强, 等, 2019. 一次冰雹天气过程的云系发展演变及云物理特征研究[J]. 气象, 45(3): 415-425. Zhang X J, Tao Y, Liu G Q, et al, 2019. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. *Meteor Mon*, 45(3): 415-425(in Chinese).
- 赵爱芳, 张明军, 孙美平, 等, 2013. 1960—2010 年中国西南地区 0°C 层高度变化特征[J]. 地理学报, 68(7): 994-1006. Zhao A F, Zhang M J, Sun M P, et al, 2013. Changes in 0°C isotherm height of Southwest China during 1960—2010[J]. *Acta Geogr Sin*, 68(7): 994-1006(in Chinese).
- 赵金涛, 岳耀杰, 王静爱, 等, 2015. 1950—2009 年中国大陆地区冰雹灾害的时空格局分析[J]. 中国农业气象, 36(1): 83-92. Zhao J T, Yue Y J, Wang J A, et al, 2015. Study on spatio-temporal pattern of hail disaster in China Mainland from 1950 to 2009[J]. *Chin J Agrometeor*, 36(1): 83-92(in Chinese).
- 赵丽萍, 1997. 青海东部地区冰雹路径的回波分析[J]. 青海气象, (1): 52-54. Zhao L P, 1997. Echo analysis of hail path in eastern part of Qinghai Province[J]. *J Qinghai Meteor*, (1): 52-54(in Chinese).
- 赵仕雄, 李正贵, 1991. 青海高原冰雹的研究[M]. 北京: 气象出版社. Zhao S X, Li Z G, 1991. *A Study on Hail over Qinghai Plateau* [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 赵天保, 符淙斌, 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. 大气科学, 33(3): 634-648. Zhao T B, Fu C B, 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(3): 634-648(in Chinese).
- 周崑, 张强, 康凤琴, 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): 1029-1036. Zhou W, Zhang Q, Kang F Q, 2005. Recent advancements of hail research in Northwest China[J]. *Adv Earth Sci*, 20(9): 1029-1036(in Chinese).
- 朱平, 俞小鼎, 王振会, 等, 2019. 青海高原致灾性对流天气时空分布特征[J]. 干旱气象, 37(3): 377-383. Zhu P, Yu X D, Wang Z H, et al, 2019. Temporal and spatial distribution characteristics of disastrous convective weather over the Qinghai Plateau[J]. *J Arid Meteor*, 37(3): 377-383(in Chinese).
- Li X F, Zhang Q H, Zou T, et al, 2018. Climatology of hail frequency and size in China, 1980—2015[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 57(4): 875-887.
- 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.