

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).

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^{*}

马晓玲^{1,2} 李德帅³ 胡淑娟¹

1 兰州大学大气科学学院,兰州 730000

2 民航青海空管分局气象台,西宁 810000

3 中国人民解放军 93995 部队,西安 710300

提 要: 基于青海地区 1981—2011 年的地面天气现象月报表记录,整理出雷暴、冰雹天气的逐小时数据集和持续时间数据集,并利用该数据集对青海地区雷暴、冰雹的时空分布及变化特征进行分析。结果表明:青海地区雷暴、冰雹的发生频率受地形影响显著,呈现出“南多北少”的分布特征,雷暴过程的平均持续时间一般不超过 40 min,冰雹过程的持续时间一般不超过 10 min;雷暴、冰雹具有显著的年变化与日变化特征,一年之中主要集中出现在 5—9 月,一日之中主要出现在午后,但雷暴、冰雹峰值的出现时间表现为一致的由北向南逐渐推迟,平均而言北部比南部提前 3 h 左右;不同持续时间的雷暴、冰雹出现概率不同,随着持续时间的增长,雷暴过程数呈现出指数递减的变化特征,而冰雹过程的发生次数呈现出先增加后减少的特征;近 31 年来青海地区的雷暴、冰雹均呈明显的下降趋势,雷暴频数的下降速率为 $15.0 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,冰雹频数的下降速率为 $2.3 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,雷暴、冰雹多发地区/多发时段的下降趋势明显大于少发地区/少发时段;虽然雷暴天气过程在减少,但天气过程的平均持续时间却在缓慢增加,持续时间增加的站点主要位于人口较密集的青海中部和东北部,意味着每次雷暴过程带来的潜在危害在增大,冰雹天气过程与雷暴不同,冰雹天气过程数及其持续时间均呈现出减少的趋势。

关键词: 雷暴,冰雹,持续时间,时空特征,青海地区

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.002

Refined Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Thunderstorm and Hail over Qinghai Province

MA Xiaoling^{1,2} LI Deshuai³ HU Shujuan¹

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Qinghai Weather Station of Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation, Xining 810000

3 Unit 93995 of the Chinese People's Liberation Army, Xi'an 710300

Abstract: Based on a comprehensive collection of thunderstorm and hail observation data from the National Meteorological Information Center (NMIC) of China, the hourly and duration datasets which include the onset and end time of thunderstorm and hail were established. Then the characteristics of spatio-temporal distribution, duration and their long-term trends over Qinghai Province from 1981 to 2011 were documented in this study. The results showed as follows. The frequencies of thunderstorm and hail are significantly influenced by the topography, so both of them occur more frequently in the south part than in the north

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC1502300、2017YFC1502305)、国家自然科学基金项目(41775069、41475068)和空军军事理论课题(19KJ3C1-0076R)共同资助

2018 年 9 月 28 日收稿; 2019 年 4 月 11 日收修定稿

第一作者:马晓玲,主要从事灾害性天气分析和航空气象预报. Email: maxiaolinglzu@163.com

通讯作者:胡淑娟,主要从事气候动力学与气候预测理论研究. Email: hushuju@lzu.edu.cn

part over Qinghai Province. Generally speaking, the duration of a thunderstorm process does not last for longer than 40 minutes, and the duration of the hailstorm process does not exceed 10 minutes. The frequencies of thunderstorm and hail both present significant monthly and diurnal variations. In a year, they are mainly concentrated in May to September; in the daytime, they are mainly concentrated in the afternoon, but the occurring time shows an obvious decaying from north to south, and the peak time in the north is about 3 h earlier than in the south part of Qinghai Province. With the duration increasing, the number of thunderstorm processes shows an e-folding decay derived from the exponential distribution, while the number of hailstorm processes increases first and then decreases according to the e-folding decay. The frequencies of thunderstorm and hail both have presented significant decreasing tendencies since 1981, and the climatic tendencies of thunderstorm and hail are $-15.0 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ and $-2.3 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, respectively. Although the number of thunderstorm process is decreasing, the average duration of each process shows a slightly increasing trend. And the increasing-duration stations are mainly located in the northeastern and central parts of Qinghai, which is the most densely populated area, implying that the potential damage caused by thunderstorm is increasing. Different from that of thunderstorm, the number of hail process and its duration both show decreasing trends, which may be related to the increased height of the melting layer.

Key words: thunderstorm, hail, duration, spatio-temporal characteristics, Qinghai Province

引 言

雷暴、冰雹是由对流系统所引发的剧烈天气现象,具有突发性强、生命史短、局地性显著等特征。雷暴、冰雹天气不仅会给人民的生命财产造成直接损失,也给农业生产、交通运输、航空安全、军事行动等带来极大的危害(盛杰等,2019;张小娟等,2019);随着高新科技的发展,雷电灾害更被称为“电子化时代的一大公害”(马明等,2008),因此雷暴、冰雹等对流天气的分布及变化特征受到广泛关注。已有研究表明,对流天气的预报难度大、区域性强(杨新林等,2017;刘洲洋等,2018;李文娟等,2018),不同环流背景下产生的天气现象也有所不同(杨晓霞等,2014;路亚奇等,2016;唐文苑等,2017;郭大梅等,2018)。作为我国对流天气的高发区之一(李照荣等,2005;陈思蓉等,2009;陈国春等,2011),青海地区不仅是气候变化的敏感区(Liu and Chen,2000;Hansen et al,2010),还是长江、黄河、澜沧江“三江源”的所在地,由于该区独特的地理环境和气候特点,雷暴、冰雹等对流天气也呈现出特殊性(李典等,2014;阮悦等,2018),因此分析其时空分布特征及变化,对于加深灾害性天气的理解及预防具有重要的科学意义和现实意义。

对于雷暴、冰雹的时空变化特征,前人已开展过

许多研究。巩崇水等(2013)基于 1981—2010 年的雷暴观测资料,分析了年平均雷暴日的时空分布及年际变化特征,指出青藏高原的雷暴日数多于周边地区,且中国北方地区的雷暴整体呈现出减少趋势,而南方则是先减后增。尤伟等(2012)利用 2000—2009 年的雷暴资料指出,夏季青藏高原中部雷暴中心区随月份向西南转移,其东侧的雷暴中心区随月份向南偏移。胡亮等(2018)统计了夏季生成于青藏高原地区的对流系统,指出高原对流系统主要生成于青藏高原中东部,存在两个高发中心。具体到青海地区,有学者指出其雷暴分布特征为自东南向西北随纬度增加而逐渐减少,且雷暴日数整体呈减少趋势,而在三江源地区尤为突出(孔尚成等,2015;康晓燕等,2016);胡玲等(2009)发现虽然青海地区雷暴日数在减少,但雷暴天气引起的灾害却在逐年增多。青海地区的冰雹日数也非常多,但与我国东部低海拔地区不同,该区的冰雹粒径较小、局地性非常强(曹艳察等,2018),且自 20 世纪 80 年代初之后冰雹日数呈减少趋势(Li et al,2016)。此外,也有学者指出,高原雷暴云发生时段主要在午后到前半夜,且在青藏铁路沿线表现出由北向南逐渐推迟的特征(Fujinami and Yasunari,2001;张鸿发等,2003;常祎和郭学良,2016)。

但总体而言,以往的研究主要是根据逐日或逐年的资料进行分析,时间分辨率较低,而雷暴、冰雹

天气的生命史往往只有几小时,甚至只有几分钟(尤其冰雹天气),逐日/年的资料不能很好地反映对流天气的日变化及其持续时间的分布等特征,也难以满足大数据时代气象用户对精细化服务的更高要求(王秀成等,2017);卫星资料的时间分辨率虽然可达到小时级别,但一方面难以辨别对流云在地面产生的具体天气现象,另一方面由于资料的累积时间短,不便于研究其长期变化情况。随着高质量、长时序的雷暴、冰雹等资料的积累,以及人们对于系统了解青海地区雷暴、冰雹等对流天气特征的迫切需要,现在有必要、也有条件开展新的研究。

因此,本文基于地面气象记录月报表数据,整理出了青海地区1981—2011年的逐小时、并且可精确到分钟的地面观测资料数据集,然后经统计分析,给出了青海地区雷暴、冰雹精细化的空间分布及时间变化特征,以弥补以往研究的不足。

1 资料和方法

1.1 资料选取及细化整理

雷暴、冰雹等天气现象的数据来源于中国气象局国家气象信息中心整理的青海省《地面气象记录月报表》A文件,资料长度为1981—2011年。该数据由国家气象信息中心进行了严格的质量控制和检查,如极值检验和时间一致性检验,质量可靠(Zhang et al, 2017)。由于部分站点的记录不完整,考虑到数据的连续性,本文进行了进一步的质量控制:要求站点的记录完整率为100%,以保证数据的高可信度。经筛选,青海省内数据完整的站点有30个,空间分布如图1所示,其中在海拔较低的青海东部站点较密,而在海拔较高(超过4500 m)的青海西南部站点相对稀疏,但总体而言,站点分布较为均匀,具有代表性。

《地面气象记录月报表》的原始报文中记录了天气现象的有无(出现记为1,否则记为0)及其开始、结束时刻,为了更清晰地展示雷暴、冰雹等中尺度天气的特征,本文对记录资料进行了细化整理,分别整理为雷暴、冰雹天气的逐小时数据集和天气过程持续时间数据集。在整理雷暴、冰雹天气的逐小时数据集时,参照雷暴日、冰雹日的定义,在本小时内发

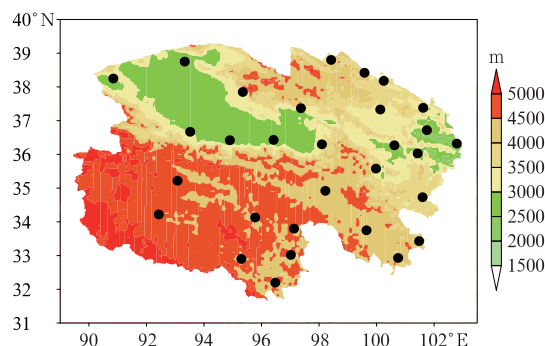


图1 青海省内站点分布(黑色圆点)及海拔高度(填色)

Fig. 1 Distribution of observation stations (black solid dots) used in this study and the altitude distribution (colored area) in Qinghai Province

生了该天气现象记为1,否则便记为0,而不论在该小时内有几次记录。这样,逐小时数据集中每个整点时次均有一次记录,记录的是该整点时次之前一个小时内是否出现雷暴/冰雹天气的观测结果。

在整理雷暴、冰雹天气过程持续时间数据集时,采用精确到分钟的雷暴、冰雹的开始时刻与结束时刻。根据观测规范,雷暴过程指的是从台站观测员第一次闻雷,直到连续15 min以上没有雷暴发生的一次过程;相应地,雷暴过程的持续时间是指该过程持续的分钟数。因此若雷暴持续时间长,一次雷暴过程可能持续数小时;若雷暴持续时间短,一小时内或许会出现2~3个雷暴过程,采用精确到分钟的数据能更清楚地反映中尺度天气过程及其持续时间。冰雹过程及其持续时间的定义与雷暴相类似。

对比而言,逐小时数据集在每个整点均有记录,能够反映出雷暴、冰雹发生频数的空间分布及日变化特征,但由于雷暴、冰雹过程的持续时间较短,往往不足一小时,难以反映雷暴、冰雹过程的持续时间特征,因此,本文在统计分析雷暴、冰雹的发生频数、空间分布及日变化特征时,采用逐小时数据集,而在分析雷暴、冰雹天气过程的持续时间时,采用雷暴、冰雹天气过程持续时间数据集。

1.2 研究方法

(1) 气候趋势系数和倾向率

为了定量比较气象要素的变化趋势,采用无量纲的气候趋势系数(施能等,1995;李邦东等,2013)

$$r_{xt} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(t - \frac{n+1}{2})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 (t - \frac{n+1}{2})^2}} \quad (1)$$

式中: r_{xt} 为趋势系数, 表示气象要素序列 x 与年份序列 $t (t=1, 2, 3, \dots, n)$ 的相关系数; x_t 为气象要素序列的第 t 个值; $\bar{x}$ 为气象要素的平均值; n 为样本长度。这样求得趋势系数是无量纲的, 实际上就是标准化的回归系数, 其数值在区间 $[-1, 1]$ 中变化, 当 r_{xt} 为正值时, 表示气象要素呈上升趋势, 反之则为下降趋势, 适合对空间范围较大的、不同气象要素场的变化趋势大小特征进行比较研究。趋势检验时采用 t 检验。

计算倾向率时采用一元线性回归, 回归方程可以写为

$$X = A + Bt \quad (2)$$

式中: X 为雷暴或冰雹的发生频数, t 为时间序数 ($t=1, 2, 3, \dots, n$), A 为一常数, B 为回归系数, 计算时采用最小二乘法。倾向率为 $10 \times B$, 表示每 10 年的变化。

(2) REOF 分析

REOF 称为旋转 EOF 分析, 是基于 EOF 对载荷向量场再做方差极大旋转的过程(魏凤英, 1999; 陈豫英等, 2010), 其特点是可以较好地反映不同空间的差异, 而且可反映出不同子区域之间的相关性特征。EOF 及 REOF 分析方法的原理、公式可参考已有文献(魏凤英, 1999), 这里不再赘述。

基于上述分析, 本文选取 1981 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日青海地区 30 个气象观测站(图 1)的雷暴、冰雹天气的发生频数、天气过程数及其持续时间进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 雷暴、冰雹的空间分布

由图 2a 可见, 青海地区雷暴的空间分布不均匀, 地域差异显著, 总体呈现出“南多北少”的特征。青海南部年平均雷暴频数可超过 140 次, 最大值在青海东南部的久治站 (33.7°N 、 101.6°E), 年均可达

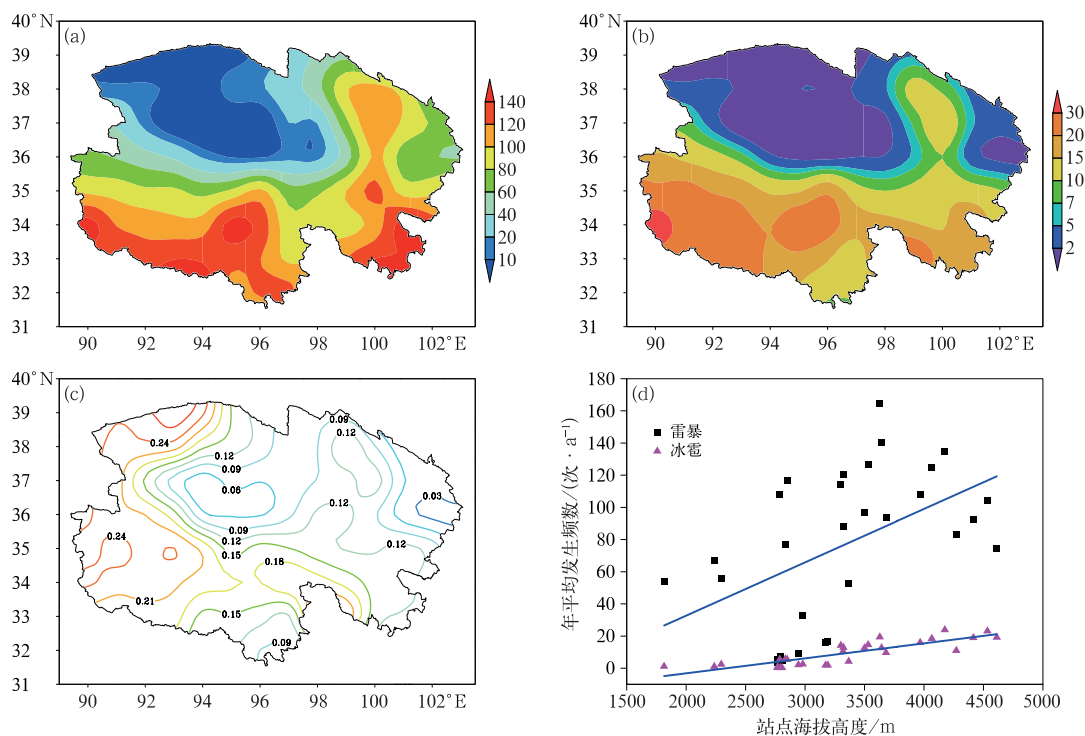


图 2 雷暴(a)、冰雹(b)的年均频数(单位:次·a⁻¹)分布,冰雹与雷暴频数比值的分布(c)

以及雷暴、冰雹的年均发生频数与站点海拔高度的关系(d)

Fig. 2 Distribution of annual mean frequencies of thunderstorm (a) and hail (b), the ratio of hail to thunderstorm frequency (c) and relationship between thunderstorm/hail frequency and the altitude of observation stations (d)

171次;同时,在青海北部的祁连山地区具有一个相对高值区,年均雷暴频数可超过100次,而在柴达木盆地年平均频数不足10次,最低仅为4次。位于青海东北部的农业区,雷暴频数也较低,年均雷暴频数不到80次;冰雹的空间分布与雷暴类似,也呈现出“南多北少”的特征,但冰雹发生的频数明显比雷暴少,在柴达木盆地年均冰雹频数在2次以下,而在青海西南部的玉树地区年均冰雹频数在20次以上(图2b)。

冰雹往往产生在雷暴云中,是对流强烈发展(上升气流强盛、水汽充足、融化层高度适中)的产物,因此冰雹与雷暴有一定的关系(从图2a、2b也可看出)。从逐年的发生次数来看,冰雹与雷暴的相关系数为0.90,且通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。但在不同的区域,雷暴发生时伴随冰雹出现的可能性并不相同。虽然在海拔较高的青海西南部地区以及北部的祁连山地区,产生冰雹的可能性大(图2b),但与雷暴相比,冰雹频数仅占雷暴频数的24%;在柴达木盆地及青海东北部的农业区,冰雹频数一般不足雷暴频数的10%,最低甚至不足3%(图2c),也就是说,在同一站点,冰雹的发生频数在雷暴发生频数中所占的比例较低,说明形成冰雹的环境条件比形成雷暴的条件更高。

对流的发生具有较强的局地性。为表征地形与

对流活动的关系,对站点的海拔高度及雷暴、冰雹的发生频数进行了分析,发现随着站点海拔高度的增加,雷暴、冰雹均呈增加趋势,而冰雹与海拔的线性关系更为明显(图2d),冰雹的发生频数与站点海拔高度的相关系数为0.85,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,说明站点的海拔高度及地理位置对冰雹的形成具有重要影响,有学者指出这是因为在高原地区的太阳辐射强烈,感热输送强,在山区近地层的温度垂直递减率较大,大气不稳定性增加,且大气环境中常存在干层,为中小尺度对流提供了条件,容易形成冰雹(李国平等,2002;黄玉霞等,2017;郑永光等,2017)。

2.2 雷暴、冰雹的年变化及日变化

雷暴、冰雹均存在明显的年变化及日变化。由图3a可见,一年之中,青海地区的雷暴主要出现在5—9月,尤以夏季(6—8月)最为集中,其中5—9月雷暴占全年雷暴时数的95.0%,而6—8月占全年雷暴时数的70.0%。一年中,雷暴呈明显的“单峰型”,从3—5月迅速增多,7月达到峰值(平均为620.6次),9月之后急剧减少。冰雹也主要发生在5—9月,该段时间的冰雹时数占全年总时数的96.1%,与雷暴不同的是,冰雹频数的最大值出现在6月,7—8月逐渐减少,但在9月又出现一个较弱的峰值,9月之后急剧减少,这可能与冰雹的形成条件

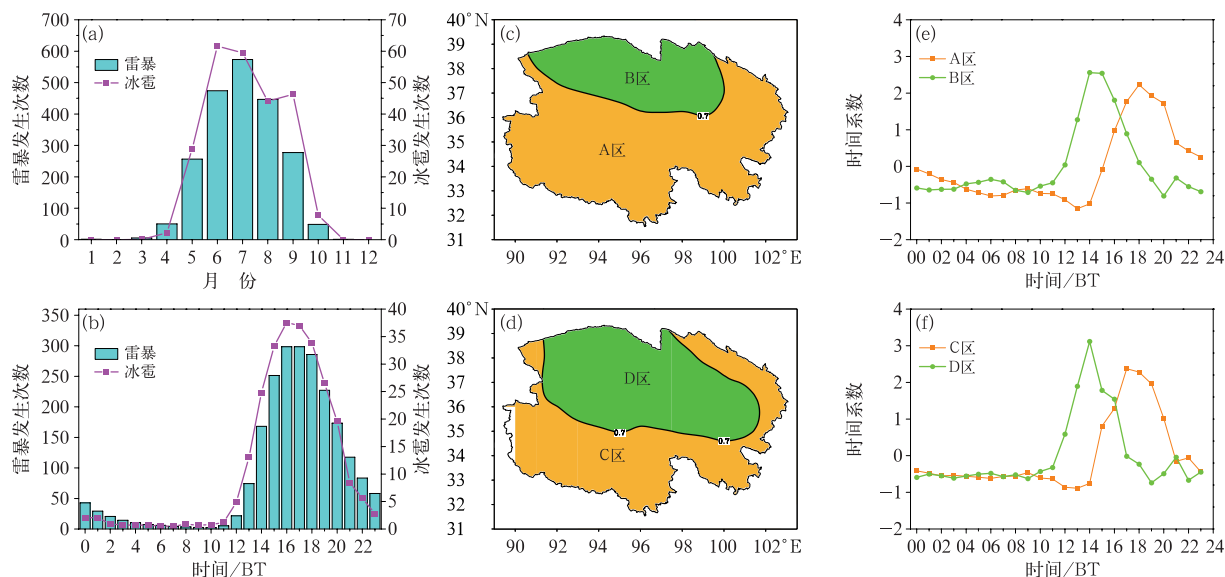


图3 青海地区雷暴、冰雹频数的年变化(a)、日变化(b),雷暴(c,e)、冰雹(d,f)频数 REOF 分析得到的前两个载荷向量(c,d)及其时间系数(e,f)分布

Fig. 3 Annual (a) and diurnal (b) variations of thunderstorm and hail frequency; and the first two load vectors (c, d) and their time coefficients (e, f) obtained from the REOF analysis of thunderstorm (c, e), hail (d, f) frequencies in Qinghai Province

有关,夏季尤其8月青海地区对流层大气温度较高,融化层高度也较高,地面反而不容易出现冰雹(俞小鼎,2014),而在初夏的6月,冷空气仍较活跃,加上水汽相对充足、温度逐渐升高,在冷锋后容易形成冰雹(林纾和陆登荣,2006)。

一日之中,青海地区的雷暴、冰雹整体表现为单峰型(图3b),峰值出现在午后,主要集中在14—20时;而05—11时对流活动很少,说明青海地区午后热对流活跃、日变化明显,这与高原地区的对流特征相一致。

但有趣的是,在不同地区,雷暴、冰雹的日变化特征并不完全相同,这种差异可通过REOF分析来得到。将雷暴、冰雹在一日中的出现时间进行REOF分析,均可得到两个主模态(图3c~3f):雷暴前两个载荷向量的解释方差为96.1%,其中第一、二载荷向量的解释方差分别为57.2%、38.9%;冰雹前两个载荷向量的解释方差为87.9%,其中第一、二载荷向量的解释方差分别为55.1%、32.8%,因此前两个载荷向量代表了其主要模态。

就雷暴而言,第一载荷向量所在的区域为青海南部及东北部(图3c中A区),雷暴主要发生在16—20时(图3e),峰值出现在18时,而第二载荷向量所在的区域是以柴达木盆地为主的西北部(图3c

中B区),雷暴主要出现在13—17时,峰值出现在14—15时,比A区的雷暴峰值提前3h左右;就冰雹而言,第一、二载荷向量所在的区域与雷暴所在区域类似,但冰雹第二载荷向量的范围更大一些,在青海南部及东北部(图3d中C区)冰雹也主要发生在14—20时(图3f),峰值为17时,而青海北部大部分地区(图3d中D区)冰雹的出现时间非常集中,主要出现在12—15时,峰值为14时,比青海南部C区的峰值提前3h,即青海南部和北部的对流日变化存在差异,峰值由北向南逐渐推迟,这种差异可能与不同地形下的加热机制、下垫面条件及冷空气的活动路径有关(张鸿发等,2003;张翠华等,2005;郑淋淋等,2011;尤伟等,2012),具体成因仍有待进一步研究;但是由于北部的雷暴、冰雹较少,导致平均之后主要表现为午后单峰型。对流的这种日变化与Kurosaki and Kimura(2002)用卫星和雷达对青藏高原对流云日变化的分析结果一致,这同时也表明了精细化资料的优越性。

2.3 雷暴、冰雹的持续时间特征

除了频数的时空分布特征外,雷暴、冰雹天气过程的持续时间也非常重要,以往由于资料限制,对中尺度天气过程的持续时间研究较少。由图4a可见,

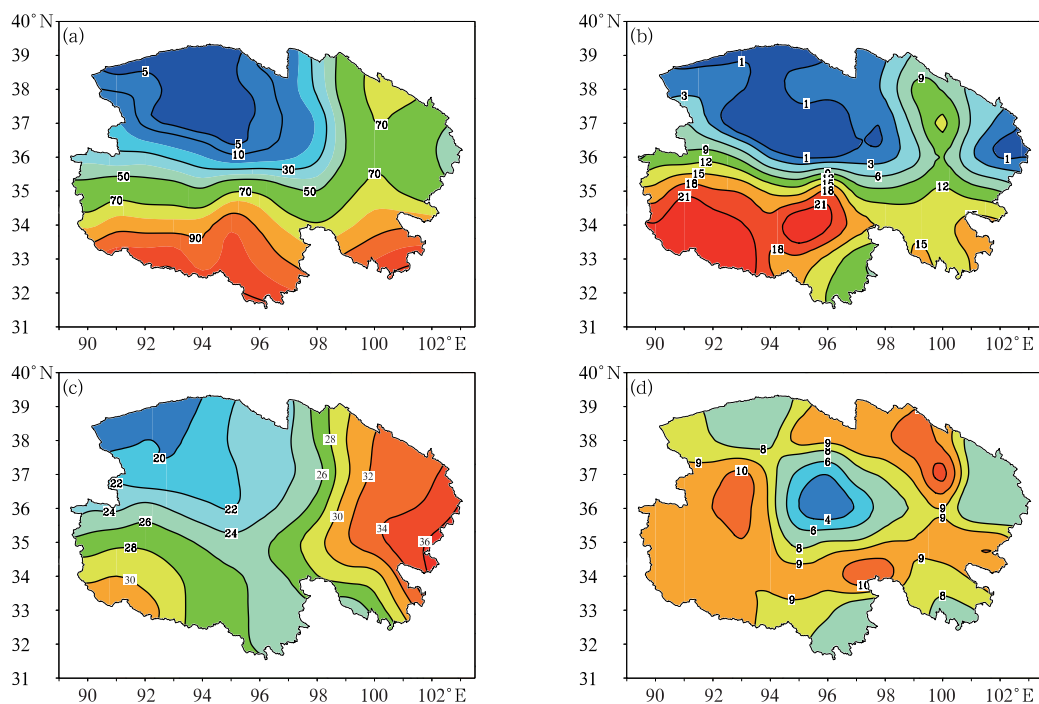


图4 年平均的雷暴(a,c),冰雹(b,d)过程数(a,b,单位:次)及其平均持续时间(c,d,单位:min)的分布

Fig. 4 Distribution of annual mean number (a, b, unit: time) of thunderstorm process (a, c), hail process (b, d) and its duration (c, d, unit: min)

青海地区雷暴过程的分布呈现出南部山区多、北部盆地少的特征,最大值在青海南部的高原地区,年均雷暴过程可达100次以上,最小值在青海西北部的柴达木盆地,大部分地区在5次以下,这与雷暴频数的空间分布(图2a)较为一致。雷暴天气过程的平均持续时间一般不超过40 min(图4c),在青海东北部雷暴过程的持续时间较长,平均一次过程可持续30 min以上;但在青海西部,雷暴的平均持续时间为20~26 min,尤其在西北部的柴达木盆地,雷暴的平均持续时间较短,大部分地区不超过22 min。

冰雹过程的分布具有南部山区多,北部盆地少的特征(图4b),尤其西南部山区的冰雹过程较多,年均可超过21次,而在柴达木盆地和青海东北部地区,年均冰雹过程次数多在3次以下,甚至不足1次。与雷暴相比,冰雹持续时间的分布更为分散(图4d),持续时间较长的站点位于祁连山南侧及青海东部,冰雹过程的平均持续时间可超过10 min;持续时间最短的站点位于柴达木盆地,平均持续时间不足4 min。整体而言,海拔低的地方冰雹过程的持续时间也较短,反之亦然,进一步说明了地形差异对冰雹的产生具有重要影响。

除了持续时间的空间分布特征外,不同持续时间的天气过程出现可能性的大小也是反映雷暴、冰雹特征的一个重要参数。由图5a可见,持续时间在10 min以内的雷暴过程出现次数最多,可达508.4次,10~20 min的雷暴过程出现次数次之,年均均为309.2次,减少幅度很大,呈现出指数递减的分布规律。在对数坐标中的图像几乎为一条直线(图5a的右上角),基于此可得拟合方程,方程为

$$Y = 699.2e^{-0.0345x} \quad x = 10, 20, 30 \dots$$

式中: Y 表示青海地区雷暴天气过程出现的次数, x 表示每次过程的持续时间。 Yu and $Li(2012)$ 指出,降水量的分布符合指数递减规律,在此又发现了一个新的符合指数递减率的分布,这种分布可用于对极端事件进行判断,判断其出现的可能性。例如判断一次雷暴过程在站点附近的活跃时间达到280 min的可能性,代入公式可得0.045,表示从概率上讲,青海地区观测到一次雷暴过程的持续时间超过280 min,大约为22年一遇。但必须指出的是,此处的雷暴过程持续时间是站点观测的(符合欧拉法),不是跟随对流云一起运动的(拉格朗日法),所以其测得的持续时间比持续跟踪对流云的活跃时间要短,但测站观测到的持续时间可反映出雷暴过程对当地的影响程度,也是表征对流活动的一个有意义的物理参量。

与雷暴不同,不同持续时间的冰雹过程发生次数呈现出先增加后减少的特征。持续时间在2 min以内的青海地区平均每年有11.6次,2~4、4~6 min的分别有56.0、53.0次,之后随着持续时间的增加,冰雹出现次数迅速减少,6~8 min的有34.8次,持续时间超过32 min的年均频次为0.97次,已经低于每年一次了,说明冰雹在某一站点出现的持续时间更短,局地性更强。如果从对数坐标来看,其分布在6 min之后近似为一条直线,但由于冰雹相对于雷暴的出现次数少,其波动较大。对于冰雹过程随持续时间表现出先增加后减少的原因,仍需开展进一步研究。

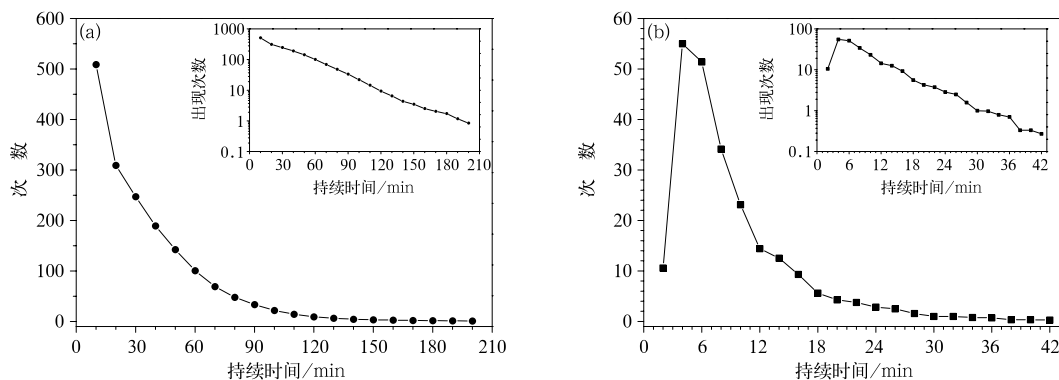


图5 1981—2011年不同持续时间的雷暴过程(a)、冰雹过程(b)的累积出现次数

(图中右上角方框为相应的对数坐标)

Fig. 5 Accumulated number of thunderstorm (a) and hail (b) weather processes with different durations from 1981 to 2011

(Boxes in the upper right corner show the corresponding logarithmic coordinates)

2.4 雷暴、冰雹的长期变化

作为全球气候变化的敏感区域,青海地区的雷暴、冰雹发生的频数也发生了明显变化。按小时统计,青海地区1981—2011年每站点每年出现雷暴、冰雹的平均频数分别为76.5、9.1次,由其距平值可见(图6a),青海地区雷暴的年际变化明显,年均频数最大值为104.6次(出现在1981年),最小值为48.8次(出现在2008年);年代际变化也非常显著,20世纪80年代平均雷暴频数为93.0次,90年代为77.9次,而21世纪00年代仅为58.6次。冰雹与雷暴呈现出类似的特征,年均频数最大值为15.0次(出现在1989年),最小值为4.8次(出现在2008年)。总体而言,在近31年,青海地区的雷暴、冰雹均呈明显的下降趋势,其中雷暴频数的下降速率为 $15.0 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,冰雹频数的下降速率为 $2.3 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这种减少趋势与基于逐日资料的研究结论相一致(陈思蓉等,2009;林建和曲晓波,2008;符琳等,2011;巩崇水等,2013;康晓燕等,2016)。

具体到不同站点,雷暴、冰雹的变化特征存在一定差异。对比图6c,6d可知,在青海地区雷暴、冰雹呈减少趋势的站点分别为28和29个,说明这种减少基本是区域一致的,在呈减少趋势的站点中,雷暴显著减少的有20个站点(通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验),占67.7%,冰雹显著减少的有14个站点,占46.7%。通过显著性检验的站点主要位于青海南部及东北部地区,其中包括了长江、黄河、澜沧江的源区及青海湖地区;而在对流活动较少的柴达木盆地,雷暴、冰雹虽也在减少,但减少趋势较弱。

雷暴、冰雹具有年变化和日变化,因此在各月、各时之中,其发生频数的长期变化也有差异。由表1可见,在各月之中,雷暴、冰雹的减少主要发生在5—9月,均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,尤其7—8月雷暴、冰雹的减少更为明显;雷暴变化最明显的是在7月,趋势系数为 -0.78 ,冰雹变化最明显的是在8月,趋势系数可达 -0.80 ;而在对流较少的其他月份,冰雹的变化均未通过显著性检验,雷暴在3月和4月显著减少,其他月份变化不显著。

用同样的方法对发生在一天中各个时刻的雷暴、冰雹进行检验,发现在一天之中,雷暴、冰雹频数

均呈现出减少趋势(表2),且在14:00—20:00减少趋势更为明显,均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,尤其是14:00雷暴、冰雹的减少趋势最为显著,趋势系数分别为 -0.90 与 -0.77 ,在对流较少的清晨及上午,雷暴、冰雹虽有减少但趋势较弱,这也说明在一日之中对流活动的减少主要集中在午后至傍晚。综上以上分析可知,在时间和空间上,雷暴、冰雹的气候变化具有一致性,表现为减少趋势,而且在多发地区、多发时段的减少更为显著。

2.5 雷暴、冰雹过程及其持续时间的变化

雷暴、冰雹的频数均呈减少趋势,其频数的变化又是由雷暴、冰雹的过程数及其持续时间的变化来决定的。由图7a可见,青海地区雷暴天气过程数呈现出显著的减少趋势,倾向率为 $-14.85 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,但雷暴天气过程的持续时间呈现出微弱的增加趋势,气候倾向率为 $0.35 \text{ min} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这一增一减表明,雷暴发生频数的减少主要是由于雷暴天气过程的减少引起的,但平均而言雷暴天气过程的持续时间却在增加,意味着每次雷暴过程带来的危害在增大,与Trenberth(2011)指出的“不雨则已,一雨倾盆”相类似,也反映出气候变化背景下极端天气具有增多、增强的趋势。从雷暴持续时间的站点分布来看,持续时间增加的站点有18个(占60%),主要位于青海中部和东北部,而持续时间减少的站点主要位于南部山区(图7c)。

与雷暴不同,冰雹过程数及其持续时间均呈现出减少趋势(图7b),气候倾向率分别为 $-2.23 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 及 $-0.83 \text{ min} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这说明冰雹发生频数的减少是冰雹天气过程及其持续时间的减少共同引起的。从冰雹过程持续时间的分布来看,绝大多数站点的冰雹天气过程持续时间在减少,只有4个分散的站点呈非常微弱的增长,趋势不明显(图7d),说明近31年的大气环境变化不利于冰雹的生成。在全球变暖的背景下,Xie et al(2008)与Li et al(2016)指出,冰雹的减少与融化层高度的上升趋势一致,随着 0°C 层高度升高,有利于冰雹消融;同时 -20°C 层高度升高,要求有更强的上升气流,增大了冰雹的形成难度,这均在一定程度上减少了冰雹的发生频率。

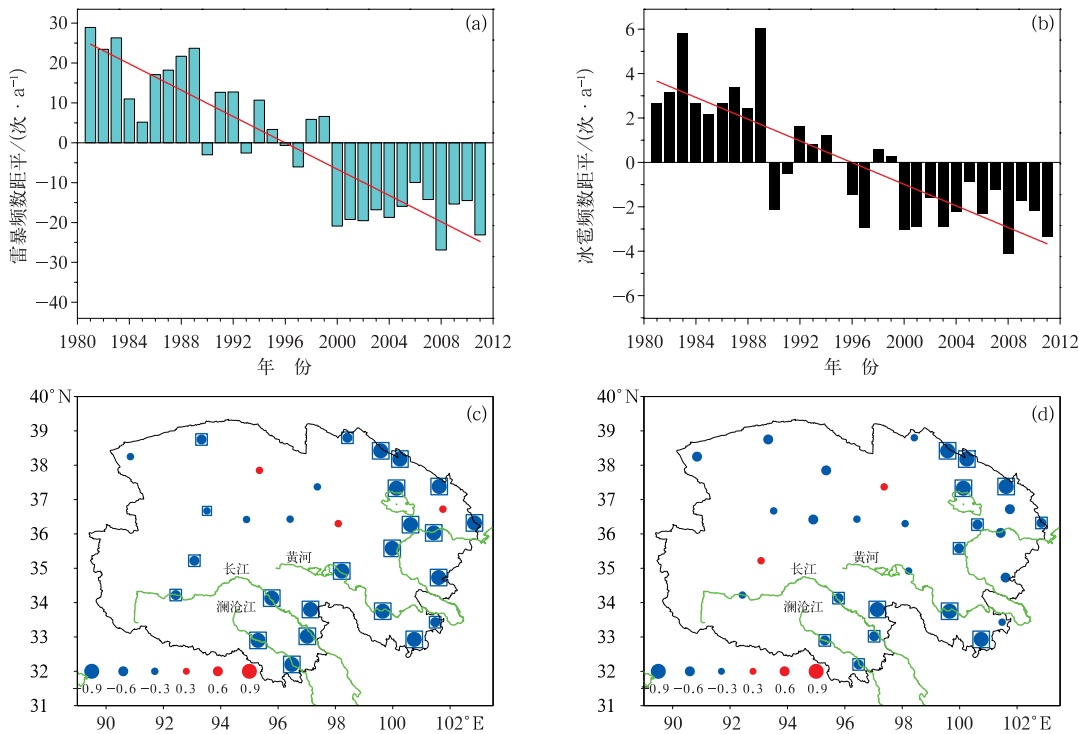


图 6 青海地区雷暴频数距平(a)、冰雹频数距平(b)的变化特征以及各站点雷暴频数(c)、冰雹频数(d)变化的趋势系数

(图 6c,6d 中红色圆点表示上升趋势,蓝色圆点表示下降趋势,方框表示该站点的趋势通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,绿色实线表示河流、湖泊)

Fig. 6 Trends of thunderstorm (a) and hail (b) anomalies of 30 stations over Qinghai Province, and the trend coefficients of thunderstorm (c) and hail (d) at each station (Red/blue dots indicate increasing/decreasing trend and the box indicates that the station's trend having passed the 0.01 significance level test, and the green solid line indicates the river and lake in Figs. 6c, 6d)

表 1 雷暴、冰雹频数在各月的趋势系数

Table 1 Monthly trend coefficients of thunderstorm and hail frequencies

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
雷暴	-0.27	0.30	-0.48*	-0.49*	-0.70*	-0.66*	-0.78*	-0.70*	-0.44*	-0.29	-0.12	0.00
冰雹	0.00	0.00	0.07	0.21	-0.48*	-0.64*	-0.60*	-0.80*	-0.51*	-0.11	0.00	0.00

注: * 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验

表 2 雷暴、冰雹频数在各小时的趋势系数

Table 2 Trend coefficients of thunderstorm and hail frequencies in different hours

时间/BT	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20	22	24
雷暴	-0.19	-0.37	-0.24	-0.29	-0.47*	-0.66*	-0.90*	-0.89*	-0.87*	-0.81*	-0.63*	-0.28*
冰雹	-0.27	-0.49*	-0.50*	-0.28	-0.53*	-0.23	-0.77*	-0.71*	-0.59*	-0.75*	-0.53*	-0.35

注: * 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验

3 结论与讨论

利用青海地区 1981—2011 年的地面天气现象月报表记录,对雷暴、冰雹天气记录进行了细化和整理,然后利用新整理的数据集,对比分析了青海地区

雷暴、冰雹天气的发生频数和天气过程持续时间的时空分布特征,主要得到如下结论:

(1)青海地区雷暴、冰雹受地形影响显著,均呈现出“南多北少”的特征,青海南部年平均雷暴、冰雹时数分别可超过 140 次、20 次,而在北部的柴达木盆地年平均时数不足 10 次、2 次。

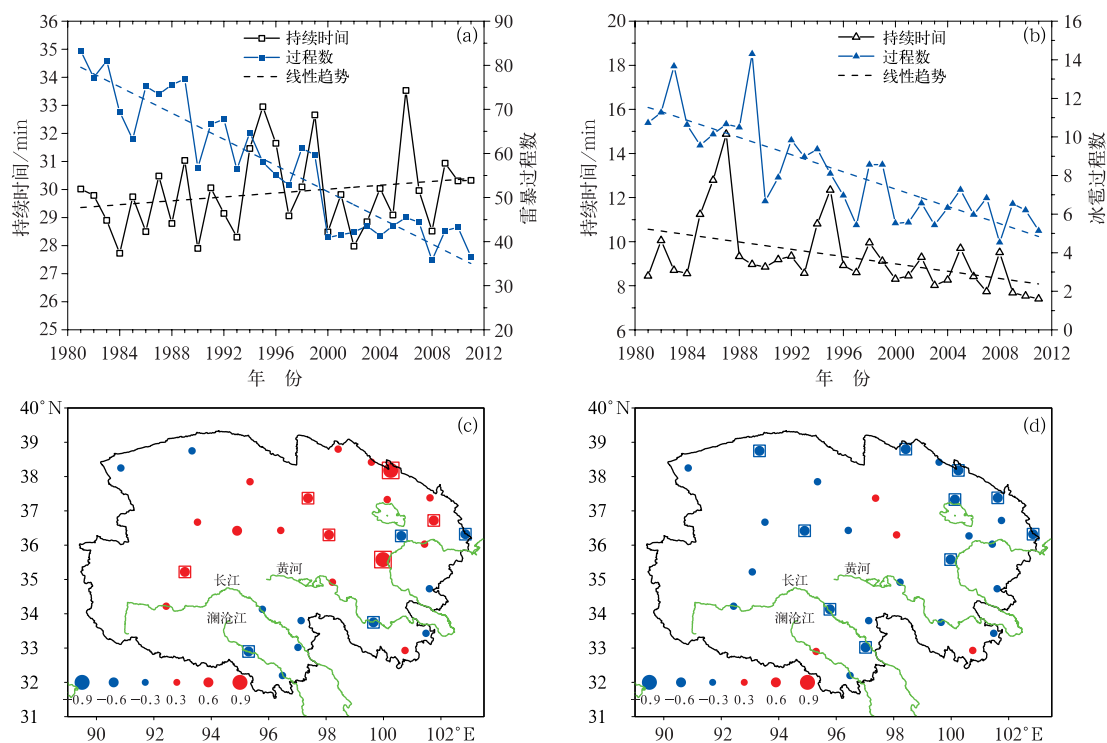


图 7 雷暴(a,c)、冰雹(b,d)过程及其持续时间的变化(a,b),持续时间趋势系数(c,d)分布

(红色圆点表示上升趋势,蓝色圆点表示下降趋势,方框表示该站点的趋势通过了 $\alpha=0.01$

的显著性检验,绿色实线表示河流、湖泊)

Fig. 7 Trends of thunderstorm process (a, c) and hail process (b, d), and their duration (a, b)

and the trend coefficient of duration at each station (c, d)

(Red/blue dots indicate increasing/decreasing trend and box indicates that the station's trend having passed the 0.01 significance level test, and the green solid line indicates the river and lake)

(2)青海地区雷暴过程数的分布与雷暴频数分布较为一致,也呈现出“南多北少”的特征;雷暴过程的平均持续时间一般不超过 40 min,具有东北部持续时间长、西北部持续时间短的特征,冰雹的持续时间一般不超过 10 min,具有很强的局地性。

(3)雷暴、冰雹存在显著的年变化与日变化,一年之中主要出现在 5—9 月,该段时间的频数分别占全年出现时数的 95.0%、96.1%;一日之中,雷暴、冰雹均表现为午后峰值,但峰值的出现时间表现为一致的由北向南逐渐推迟,平均而言北部比南部提前 3 h 左右。

(4)不同持续时间的雷暴、冰雹出现概率不同,随着持续增长,雷暴过程数呈现出指数递减的分布规律;而冰雹过程的发生次数呈现出先增加后减少的特征,但减少时也符合指数递减规律。

(5)近 30 年,青海地区的雷暴、冰雹均呈明显的减少趋势,其中雷暴的减少速率为 $15.0 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,冰雹的减少速率为 $2.3 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,在青海南部等多发地区、汛期、午后等多发时段的减少更明显。

(6)虽然雷暴天气过程在减少,但每次过程的持续时间却在缓慢增加,意味着每次雷暴过程带来的潜在危害在增大;冰雹天气过程与雷暴不同,冰雹天气过程数及其持续时间均呈现出减少趋势,这可能与融化层高度的升高有关。

必须指出的是,雷暴、冰雹等对流天气的时空分布及其变化是多种因素综合作用的结果,除了融化层高度外,其变化还与大气环流背景、边界层高度、凝结核数量(Khain et al, 2011)等因素有关。此外,由于资料原因,文中仅统计了雷暴、冰雹的频数及出现时间,但未统计雷暴云的数量及冰雹直径的变化,Endo and Yasunari(2006)指出在中国南部,虽然积雨云的出现频率在减少,但一旦出现积雨云,其数量在增多,因此对雷暴、冰雹强度的变化还需要开展进一步的研究。

参考文献

- 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).
- 常伟,郭学良,2016. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征[J]. 科学通报, 61(15):1706-1720. Chang Y, Guo X L, 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau[J]. Chin Sci Bull, 61(15):1706-1720(in Chinese).
- 陈国春,郑永光,肖天贵,2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析[J]. 气象, 37(1):75-84. Chen G C, Zheng Y G, Xiao T G, 2011. Distribution and spatio-temporal variations of deep convective clouds over China during the warm season[J]. Meteor Mon, 37(1):75-84(in Chinese).
- 陈思蓉,朱伟军,周兵,2009. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学学报, 32(5):703-710. Chen S R, Zhu W J, Zhou B, 2009. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China[J]. Trans Atmos Sci, 32(5):703-710(in Chinese).
- 陈豫英,陈楠,王式功,等,2010. 中蒙干旱半干旱区降水的时空变化特征(I):年降水特征及5—9月降水的REOF分析[J]. 高原气象, 29(1):33-43. Chen Y Y, Chen N, Wang S G, et al, 2010. Temporal and spatial change features of precipitation over China-Mongolia arid- and semiarid-areas(I): Annual rainfall feature and May—September one REOF analyses[J]. Plateau Meteor, 29(1):33-43(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. Interdecadal 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).
- 巩崇水,曾淑玲,王嘉媛,等,2013. 近30年中国雷暴天气气候特征分析[J]. 高原气象, 32(5):1442-1449. Gong C S, Zeng S L, Wang J Y, et al, 2013. Analyses on climatic characteristics of thunderstorm in China in recent 30 years[J]. Plateau Meteor, 32(5):1442-1449(in Chinese).
- 郭大梅,章丽娜,王秀明,等,2018. 2016年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析[J]. 气象, 44(11):1404-1413. Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al, 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter of 2016[J]. Meteor Mon, 44(11):1404-1413(in Chinese).
- 胡亮,徐祥德,赵平,2018. 夏季青藏高原对流系统移出高原的气象背景场分析[J]. 气象学报, 76(6):944-954. Hu L, Xu X D, Zhao P, 2018. A study of the meteorological background of convective systems over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 76(6):944-954(in Chinese).
- 胡玲,郭卫东,王振宇,等,2009. 青海高原雷暴气候特征及其变化分析[J]. 气象, 35(11):64-70. Hu L, Guo W D, Wang Z Y, et al, 2009. Climate characteristics of thunderstorm and its change in Qinghai Plateau[J]. Meteor Mon, 35(11):64-70(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).
- 康晓燕,周万福,金惠瑛,等,2016. 1961—2013年青海省雷暴变化特征分析及趋势预测[J]. 中国农学通报, 32(5):144-151. Kang X Y, Zhou W F, Jin H Y, et al, 2016. Thunderstorm characteristics analysis and thunderstorm tendency forecast in Qinghai from 1961 to 2013[J]. Chin Agric Sci Bull, 32(5):144-151(in Chinese).
- 孔尚成,戴升,王敏,2015. 1961—2013年青海高原雷暴日数及雷电灾害变化特征研究[J]. 冰川冻土, 37(4):888-897. Kong S C, Dai S, Wang M, 2015. Characteristics of thunderstorm and lightning disasters in Qinghai Plateau in 1961—2013[J]. J Glaciol Geocryol, 37(4):888-897(in Chinese).
- 李邦东,周旭,赵中军,等,2013. 近50年中国东北地区不同类型和等级降水事件变化特征[J]. 高原气象, 32(5):1414-1424. Li B D, Zhou X, Zhao Z J, et al, 2013. Change features of different types and grades of precipitation event in Northeast China in recent 50 years[J]. Plateau Meteor, 32(5):1414-1424(in Chinese).
- 李典,白爱娟,薛羽君,等,2014. 青藏高原和四川盆地夏季对流性降水特征的对比如分析[J]. 气象, 40(3):280-289. Li D, Bai A J, Xue Y J, et al, 2014. Comparative analysis on characteristics of summer convective precipitation over Tibetan Plateau and Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 40(3):280-289(in Chinese).
- 李国平,赵邦杰,杨锦青,2002. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用[J]. 大气科学, 26(4):519-525. Li G P, Zhao B J, Yang J Q, 2002. A dynamical study of the role of surface sensible heating in the structure and intensification of the Tibetan Plateau vortices[J]. Chin J Atmos Sci, 26(4):519-525(in Chinese).
- 李文娟,赵放,郇敏杰,等,2018. 基于数值预报和随机森林算法的强对流天气分类预报技术[J]. 气象, 44(12):1555-1564. Li W J, Zhao F, Li M J, et al, 2018. Forecasting and classification of severe convective weather based on numerical forecast and random forest algorithm[J]. Meteor Mon, 44(12):1555-1564(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).
- 林建,曲晓波,2008. 中国雷电事件的时空分布特征[J]. 气象, 34(11):22-30. Lin J, Qu X B, 2008. Spatial and temporal characteristics of thunderstorm in China[J]. Meteor Mon, 34(11):22-30(in Chinese).
- 林纾,陆登荣,2006. 西北地区初夏冰雹及其环流背景气候特征[J]. 气象科技, 34(4):400-404. Lin S, Lu D R, 2006. Climatic characteristics of hails and their circulation patterns in early summer over Northwest China[J]. Meteor Sci Technol, 34(4):400-404(in Chinese).
- 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等,2018. 中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J]. 气象, 44(2):258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al, 2018. Climatology of cold season elevated convection in Northern China[J]. Meteor Mon, 44(2):258-267(in Chinese).
- 路亚奇,曹彦超,张峰,等,2016. 陇东冰雹天气特征分析及预报预警[J]. 高原气象, 35(6):1565-1576. Lu Y Q, Cao Y C, Zhang F, et al, 2016. The prediction and forewarning system as well as

- weather characteristics analyses of hail in the East of Gansu[J]. Plateau Meteor, 35(6):1565-1576(in Chinese).
- 马明,吕伟涛,张义军,等,2008. 1997—2006年我国雷电灾情特征[J]. 应用气象学报,19(4):393-400. Ma M, Lv W T, Zhang Y J, et al, 2008. Characteristics of lightning exposure in China from 1997 to 2006[J]. J Appl Meteor Sci, 19(4):393-400(in Chinese).
- 阮悦,阮征,魏鸣,等,2018. 基于C-FMCW雷达的高原夏季对流云垂直结构分析研究[J]. 高原气象,37(1):93-105. Ruan Y, Ruan Z, Wei M, et al, 2018. Research of the vertical structure of summer convective precipitation cloud over the Qinghai-Tibetan Plateau by C-FMCW radar[J]. Plateau Meteor, 37(1):93-105(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019. 2018年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2):141-154(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).
- 唐文苑,周庆亮,刘鑫华,等,2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析[J]. 气象,43(1):67-76. Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al, 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecasts[J]. Meteor Mon, 43(1):67-76(in Chinese).
- 王秀成,邢杉,赵志军,等,2017. 一种基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报算法[J]. 气象,43(10):1232-1240. Wang X C, Xing S, Zhao Z J, et al, 2017. A thunderstorm explanation forecast algorithm based on convective cloud characteristic temperature judgment[J]. Meteor Mon, 43(10):1232-1240(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. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 杨新林,孙建华,鲁蓉,等,2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象,43(7):769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 杨晓霞,胡顺起,姜鹏,等,2014. 雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究[J]. 高原气象,33(4):1057-1068. Yang X X, Hu S Q, Jiang P, et al, 2014. Research of synoptic model and physical quantity parameter of thunder-gust winds impact area[J]. Plateau Meteor, 33(4):1057-1068(in Chinese).
- 尤伟,臧增亮,潘晓滨,等,2012. 夏季青藏高原雷暴天气及其天气学特征的统计分析[J]. 高原气象,31(6):1523-1529. You W, Zang Z L, Pan X B, et al, 2012. Statistical analyses on characteristic and environmental aspect of summer thunderstorm over the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteor, 31(6):1523-1529(in Chinese).
- 俞小鼎,2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象,40(6):649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6):649-654(in Chinese).
- 张翠华,言穆弘,董万胜,等,2005. 青藏高原雷暴天气层结特征分析[J]. 高原气象,24(5):741-747. Zhang C H, Yan M H, Dong W S, et al, 2005. Analyses on atmospheric stratification characteristics of thunderstorms over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 24(5):741-747(in Chinese).
- 张鸿发,郭三刚,张义军,等,2003. 青藏高原强对流雷暴云分布特征[J]. 高原气象,22(6):558-564. Zhang H F, Guo S G, Zhang Y J, et al, 2003. Distribution characteristic of severe convective thunderstorm cloud over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 22(6):558-564(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).
- 郑淋淋,孙建华,卫捷,2011. 我国雷暴的日变化特征[J]. 暴雨灾害,30(2):137-144. Zheng L L, Sun J H, Wei J, 2011. The diurnal variation of thunder events in China[J]. Torr Rain Dis, 30(2):137-144(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- Endo N, Yasunari T, 2006. Changes in low cloudiness over China between 1971 and 1996[J]. J Climate, 19(7):1204-1213.
- Fujinami H, Yasunari T, 2001. The seasonal and intraseasonal variability of diurnal cloud activity over the Tibetan Plateau[J]. J Meteor Soc Japan, 79(6):1207-1227.
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al, 2010. Global surface temperature change[J]. Rev Geophys, 48(4):RG4004.
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A, et al, 2011. The role of CCN in precipitation and hail in a mid-latitude storm as seen in simulations using a spectral (bin) microphysics model in a 2D dynamic frame[J]. Atmos Res, 99(1):129-146.
- Kurosaki Y, Kimura F, 2002. Relationship between topography and daytime cloud activity around Tibetan Plateau[J]. J Meteor Soc Japan, 80(6):1339-1355.
- Li M X, Zhang Q H, Zhang F Q, 2016. Hail day frequency trends and associated atmospheric circulation patterns over China during 1960—2012[J]. J Climate, 29(19):7027-7044.
- Liu X D, Chen B D, 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. Int J Climatol, 20(14):1729-1742.
- Trenberth K E, 2011. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Res, 47:123-138.
- 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.
- Yu R C, Li J, 2012. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China[J]. J Climate, 25(19):6851-6861.
- Zhang Q H, Ni X, Zhang F Q, 2017. Decreasing trend in severe weather occurrence over China during the past 50 years[J]. Sci Rep, 7:42310.