

1978—2023年陇东冰雹气候特征及其影响因素分析

张可心, 赵玉娟, 李美瑜

(甘肃省庆阳市气象局, 甘肃 西峰 745000)

摘要: 冰雹是强对流引起的极端天气之一, 发展速度快, 危害性大, 尤其是对农业经济为主体的陇东地区具有极大的威胁。在气候变暖背景下, 有必要深入研究陇东冰雹气候特征及其影响因素。利用1978—2023年陇东地区15个县区地面观测站记录的冰雹数据和灾情资料, 结合ECMWF提供的ERA5再分析资料, 利用线性倾向估计、Mann-Kendall突变检验、Morlet小波分析法等方法分析了陇东地区冰雹时空分布特征及关键影响因素。结果表明: (1) 陇东地区冰雹日数空间分布不均匀, 呈现西北、东南多, 中部、南部少的特征, 多雹区主要位于下坡地形、山脉背风坡及子午岭山区, 少雹区主要位于平坦的塬区及六盘山南部。(2) 近46 a冰雹日数呈减少趋势, 且春季减少趋势最显著; 5—8月为冰雹高发期, 占全年冰雹日数的81.5%。(3) 冰雹日变化呈现“单峰型”特征, 15:00—18:00为冰雹多发时段; 持续时间0~9 min及直径中等的降雹频率最高; 局地性冰雹频率远高于区域性冰雹, 但区域性冰雹具有显著增加趋势。(4) 冰雹日数存在3 a的主震荡周期以及14 a、35 a的次震荡周期。(5) 不同季节影响冰雹日数的主导气象因素不同, 对流有效位能(CAPE)、0℃层高度对陇东冰雹日数最具有主导作用。研究结果可认识陇东冰雹发生规律, 为优化预报预警模型和人工防雹工作提供科学参考。

关键词: 冰雹; 气候特征; 影响因素; 气候变暖; 陇东

文章编号: 1000-6060(2025)08-1374-11(1374~1384)

冰雹是从强烈发展的积雨云中降落到地面的坚硬的球状、锥形或不规则的固体降水, 是一种季节性明显、局地性强、来势凶猛、持续时间短、以机械性伤害为主的灾害性天气, 常给工农业和人民生产生活造成极大的危害^[1-3]。一直以来冰雹都是国内外气象学者的研究重点^[4-6], 冰雹的研究工作不仅局限于短时天气预报预警及形成物理机制, 也集中在冰雹气候特征的研究, 通过研究气候特征可以认识冰雹天气在某地的发生规律及特征, 对冰雹预报及防雹工作同样具有重要意义^[7-8]。不同地区冰雹的气候特征不同, 影响冰雹产生的地形、气象因子也不尽相同。Kunz等^[9]研究表明, 德国西南部在1974—2003年的30 a内, 雷暴日的年平均数量基本保持不变, 而冰雹日数显著增加。Li等^[10]研究发

现, 20世纪90年代以来, 中国北部和西北部冰雹频率明显降低。Zhang等^[11]详细分析了我国冰雹发生的时空特征, 指出中国大部分地区的冰雹事件主要发生在当地15:00—20:00之间, 贵州省和湖北省的冰雹事件则常在夜间发生。不少国内学者也针对特定区域的冰雹展开了气候分析, 冯晓莉等^[12]发现1980—2018年青海高原冰雹频次显著减小, 南部高海拔区域为冰雹高发区, 降雹持续时间也较长, 大冰雹主要落区在降雹次数较少的东部低海拔地区。山东省降雹主要出现在鲁中地区和鲁北地区, 具有较大的对流有效位能(CAPE)、中等及以上强度的深层(0~6 km)垂直风切变、显著的条件不稳定层结和适宜的特征层高度/厚度等特征^[13]。贵州省冰雹主要分布在中西部, 年均冰雹频次与海拔呈正相

收稿日期: 2024-09-27; 修订日期: 2024-12-19

基金项目: 甘肃省自然科学基金(24JRRM008); 庆阳市科技计划项目(QY-STK-2024A-098, QY-STK-2023A-022); 庆阳市气象局项目(QY2023-1)资助

作者简介: 张可心(1995-), 女, 工程师, 主要从事中短期天气预报及气候变化研究. E-mail: 18893420889@139.com

关,降雹时刻多集中在14:00至次日02:00,全省自西北向东南降雹发生在白天的频率逐渐降低^[14]。

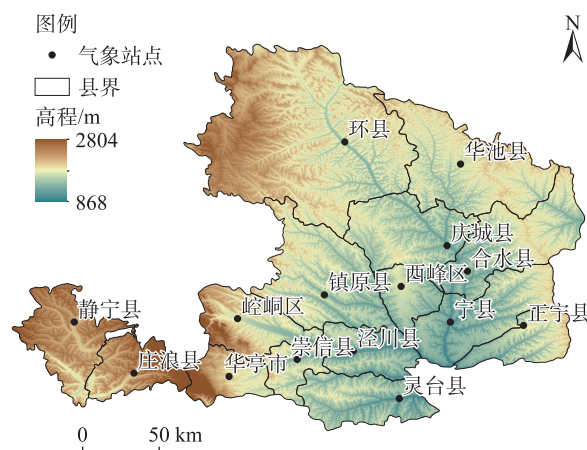
陇东地区地处黄土高原,山地、丘陵、沟壑纵横交错,地形条件复杂,海拔落差大、温差大,因此强对流天气高发^[15]。黄土高原土质疏松、生态脆弱,冰雹多发于春夏两季,正值冬小麦、苹果、玉米等主要经济作物生长的关键时段,极易造成重大的经济损失,且严重威胁人民生命安全。诸多学者对陇东冰雹天气成因^[16]、雷达特征及预报预警指标^[17-19]展开了一系列的研究,为陇东冰雹短临预报预警提供了依据,但针对冰雹气候分析的研究较少。吴爱敏等^[20]分析了1971—2000年陇东冰雹气候特征,得出陇东降雹主要集中在5—8月,降雹时间多集中在13:00—19:00;王若升等^[21]分析了平凉市的冰雹时空分布特征、环流背景及雷达回波特征。然而以上研究结论均基于2013年以前的资料,且多侧重于基本时空尺度分布和预报预警总结,随着西北地区气候显著暖湿化发展^[22-23],针对陇东地区冰雹气候研究尤其是影响因子的分析尤为必要。

本文利用陇东地区15个国家级气象观测站1978—2023年逐日冰雹观测资料,结合欧洲中心(ECMWF)ERA5再分析资料,通过分析陇东冰雹气候变化特征及其影响因子,旨在揭示陇东冰雹时空变化特征及发生规律,为当地冰雹预报预警模型构建、优化人工防雹减灾机制提供科学的参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

参照李栋梁等^[24-25]对甘肃气候的划分,甘肃分为河西地区、陇中地区、陇东地区、陇南地区和甘南地区,本文所研究的区域即为陇东地区,包括地级市平凉市和庆阳市,总计15个县(区);其中平凉市县(区)7个,分别为崆峒区、泾川县、灵台县、崇信县、庄浪县、静宁县、华亭市;庆阳市8个县(区)分别为西峰区、环县、华池县、庆城县、镇原县、合水县、宁县、正宁县。陇东地区地理位置介于105°20′~108°45′E,34°54′~37°10′N之间(图1),地处陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区三省交汇处,属于黄土高原片区,受六盘山、陇山、华家岭、子午岭等山脉隆起的影响,形成东部黄土丘陵区、北部黄土丘陵沟壑区、西南部中山山脉区、中南部黄土高原沟壑区



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3082号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

等复杂地貌,海拔高度在885~2857 m之间^[26]。冬季受西北风影响,夏季东南风盛行,降雨量南多北少,主要集中在夏季。陇东地区为甘肃主要农业区,素有“陇上粮仓”的美誉。由于地形条件复杂、海拔落差大,是甘肃省冰雹频发区之一,对农业生产和人民生命财产造成严重威胁。

1.2 数据来源

本文使用全国自然灾害综合风险普查结果中陇东地区15个县(区)冰雹灾害资料、国家基本站上报的重要天气报(WS报)、信息员上报冰雹实况中的冰雹灾情资料,分析陇东地区冰雹时空分布、冰雹直径、一次降雹持续时间、冰雹范围、周期变化等特征。为保证数据有效性,选取和研究时段均无缺测数据,最后选择1978—2023年46 a的冰雹灾害记录,包含台站编号、海拔高度、经纬度、冰雹时间、冰雹最大直径、降雹频次、降雹开始和结束时间(精确到分钟)。大气物理量数据来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代全球气候再分析资料(ERA5)的月平均数据,空间分辨率0.1°×0.1°,选取要素分别为2 m气温、2 m露点温度、CAPE、K指数、0℃层高度、云底高度、总降水量、对流降水量8项,该资料与预报员日常使用频率最高的ECMWF数据同源,是目前气象部门天气分析和机理研究常用的再分析资料。利用ERA5再分析资料提供的大气物理参数与冰雹日数进行相关性分析,可检验大

气物理参数在陇东冰雹预报的可应用性,可为预报技术人员开展冰雹天气分析和客观算法研究提供科学参考^[27-30]。

参考相关研究^[31],冰雹日数定义为在1个观测日内全地区范围出现1站及以上冰雹为一个冰雹日,一个冰雹日中,某一站点无论发生几次冰雹均记为1站次;日界以地面气象观测标准20:00为准,如18日20:00—19日20:00定义为19日。冰雹持续时间取每次观测记录开始至结束的持续分钟整数部分,若降雹时间小于1 min则记为1 min。雹粒直径(D)大小根据冰雹等级国家标准划分^[32],将冰雹划分为小冰雹、中冰雹、大冰雹、特大冰雹4类,4类冰雹标准分别为 $D<5\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}\leq D<20\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}\leq D<50\text{ mm}$ 、 $D\geq 50\text{ mm}$ 。冰雹范围分为区域性冰雹和局地性冰雹,将一日中出现冰雹涉及3县(区)及以上的过程记为一次区域性冰雹过程,出现冰雹涉及3县(区)以下的过程记为一次局地性冰雹。季节划分以3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月—次年2月为冬季。

1.3 研究方法

利用 ArcGIS 软件空间分析模块的反距离权重插值法对冰雹日数的空间分布特征进行绘制;采用线性倾向估计方法对冰雹日数的气候倾向率进行分析,并采用 Mann-Kendall 检验法进行趋势分析和突变点检测;用 Morlet 小波分析法对冰雹日数周期变化进行分析;用 Python 软件编程处理 ERA5 再分析资料,并计算大气物理因子与冰雹日数的相关性。研究时间序列为 46 a,显著性检验级别及标准为: $P<0.001$ 、 $r>0.469$, $P<0.01$ 、 $r>0.376$, $P<0.05$ 、 $r>0.291$ 。

2 结果与分析

2.1 空间分布特征

从 1978—2023 年陇东地区 46 a 冰雹日数空间分布特征来看(图 2),北部环县冰雹日数最多,为 231 d;其次是镇原县,为 150 d;庆城县最少,为 24 d,冰雹日数差异达 9.6 倍。空间分布极不均匀,整体呈现西北、东南多,中部、南部少的特征。

为了探究冰雹日数空间分布的成因,本文将各个台站的海拔高度与冰雹日数进行了线性拟合(图略),发现降雹日数与站点海拔高度的相关性不强,究其原因可能是由于陇东地形复杂,气象站点多建

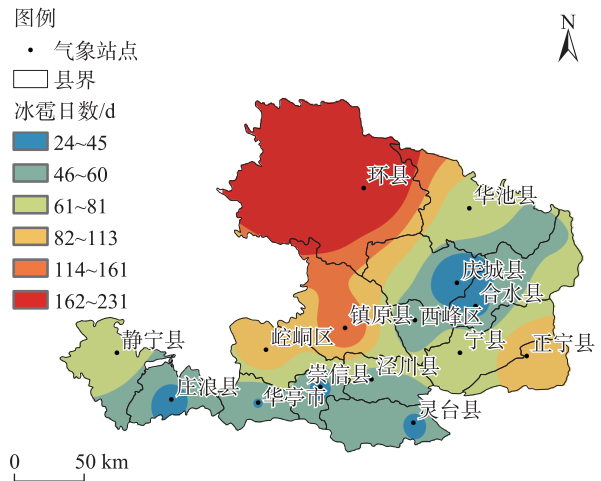


图2 1978—2023年陇东地区冰雹日数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of hail days in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

于地势平缓的塬地、河谷地带,其海拔高度无法客观的代表全县(区),故而进一步分析了冰雹日数空间分布特征与地形地貌之间的关系,得出陇东冰雹高发区主要受2类因素的影响,一类为地形地貌影响,另一类为冰雹云发源地及移动路径的影响。冰雹日数最多的环县位于陇东最北部,地势西北高东南低,最高点毛井镇施家滩村马家大山海拔2089 m,最低处曲子镇五里桥环江河道海拔1136 m,相对高度差953 m,极大的海拔落差和低植被覆盖率为冰雹的产生提供了有利的条件,影响该地的强对流云团大多发源于宁夏回族自治区大罗山,自西北向东南移动,经过该下坡区域时越山气流在波峰处促进对流活动^[33],形成多雹区;崆峒区、镇原县位于六盘山南段东麓,影响该地的强对流云团大多发源于宁夏回族自治区海源县,越六盘山后加强,使此区域成为另一多雹区;正宁县位于陇东子午岭山区一带,地形复杂,水汽充沛,是影响陕西省与甘肃省交界区冰雹的主要发源地之一^[34],因此在该地形成第3个多雹区。庆城县、西峰区、合水县位于黄土高原的塬区,地势平坦,植被覆盖率较高,不利于冰雹云发展增强,因此冰雹日数较少,46 a间冰雹日数均不足50 d;华亭市、崇信县、庄浪县、灵台县位于六盘山南部,属于南北走向山脉的南坡,冰雹日数也相对较少,该特征与周崑等^[35]的研究结论一致。

上述分析可以看出,陇东冰雹空间分布不均匀,冰雹日数差异极大,整体呈现出西北、东南多,中部、南部少的特征。多雹区可分为3个区域,第一

区域为西北部环县;第二区域为六盘山东麓的崆峒区、镇原县;第三区域为陇东子午岭一带。少雹区可以分为2个区域,第一区域为黄土高原的塬区,以西峰区、庆城县、合水县为中心;第二区域为六盘山南部,以华亭市、崇信县、庄浪县、灵台县为主。冰雹空间分布特征与陇东地形地貌的关系密切,多雹区位于下坡地形、山脉背风坡及子午岭山区,少雹区位于相对平坦的塬区及六盘山南部。

2.2 时间变化特征

2.2.1 年际变化 1978—2023年陇东年冰雹日数达649 d,年际波动较大,多发年和少发年交替出现,冰雹日数最多的年份为1990年,达到了30 d,最少为1982、2009、2018年,均为7 d。近46 a陇东冰雹日数呈减少趋势(图3a),每10 a减少0.426 d,但减少趋势变化并不显著。冰雹日数的年代际变化上,1990 s冰雹日数最多,年平均冰雹日数达到了16.1 d;2000 s冰雹日数最少,年平均冰雹日数为12.5 d。

近46 a陇东春、夏、秋三季冰雹日数整体均呈现出减少趋势(图3b~d),且春季减少趋势通过了0.05的显著性检验。春、夏季年冰雹日数极大值为11 d,分别为1990、1999年;秋季为7 d,2023年。春、夏、秋三季均有无冰雹日数的年份,分别为5 a、5 a、9 a;

春季和夏季的无雹年份分别集中在2004—2008年和1980—1984年,而秋季无雹年与有雹年交替出现。

近年来陇东地区暖湿化凸显^[36],王芝兰等^[37]指出地形不变的条件下,气候变暖可能导致大气环流和下垫面性质的变化,从而改变区域水汽条件、层结稳定性和抬升力大小,从而影响冰雹的发生。随着近地面层气温的升高,中层大气也在升温,0℃层高度和-20℃层高度也随之升高,因而冰雹频率降低;气温日较差减小影响对流活动减弱,也会影响冰雹发生的频率。

2.2.2 年际变化的 Mann-Kendall 突变检验 应用 Mann-Kendall 突变检验方法,对近46 a陇东地区冰雹日数年际变化特征进行突变检验。结果显示,全年冰雹日数(图4a)的变化整体呈现出下降-上升-下降的特征,1978—1982年正向序列UF的下降特征超过了置信区间,即1978—1982年冰雹日数显著减少,1984—1990年呈增加趋势,1990—2023年呈波动减少趋势;1984、1994年为升降趋势的2个突变点。春季呈现出上升-下降的特征(图4b),且升降趋势均超过了置信区间,即1978—1990年冰雹日数显著增多,1990—2023年显著减少;1992年为突变点。夏季呈现出下降-上升-下降的趋势(图4c),

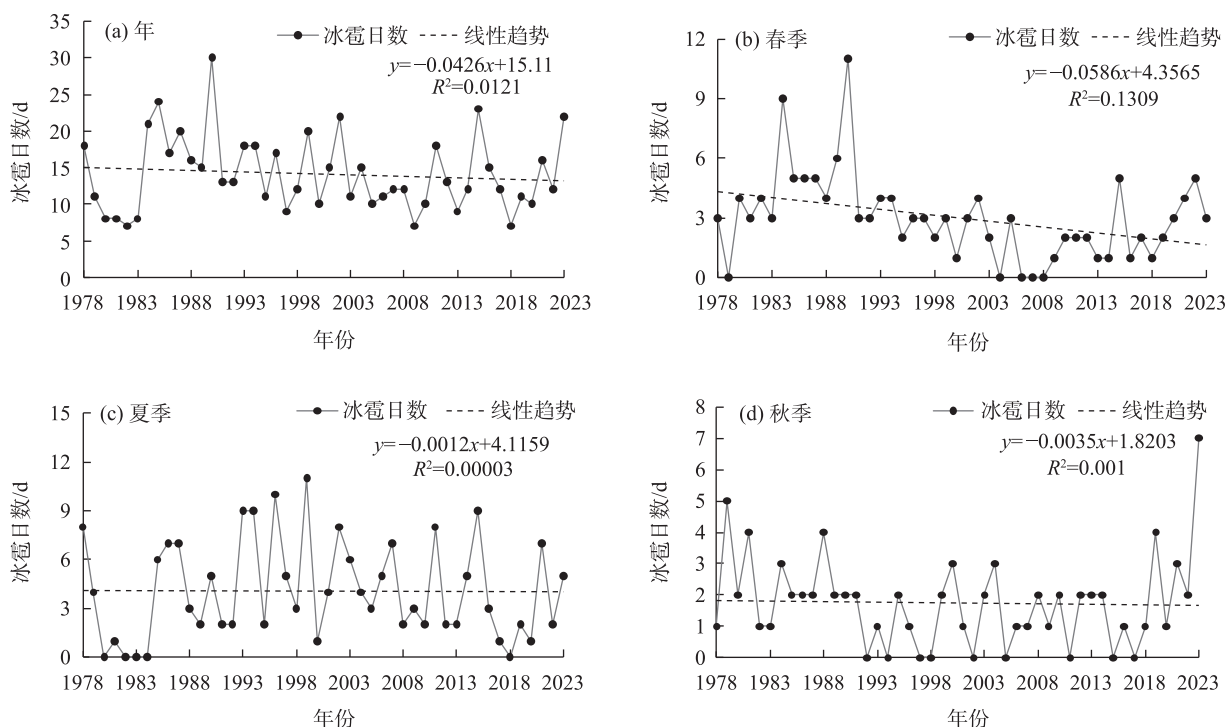
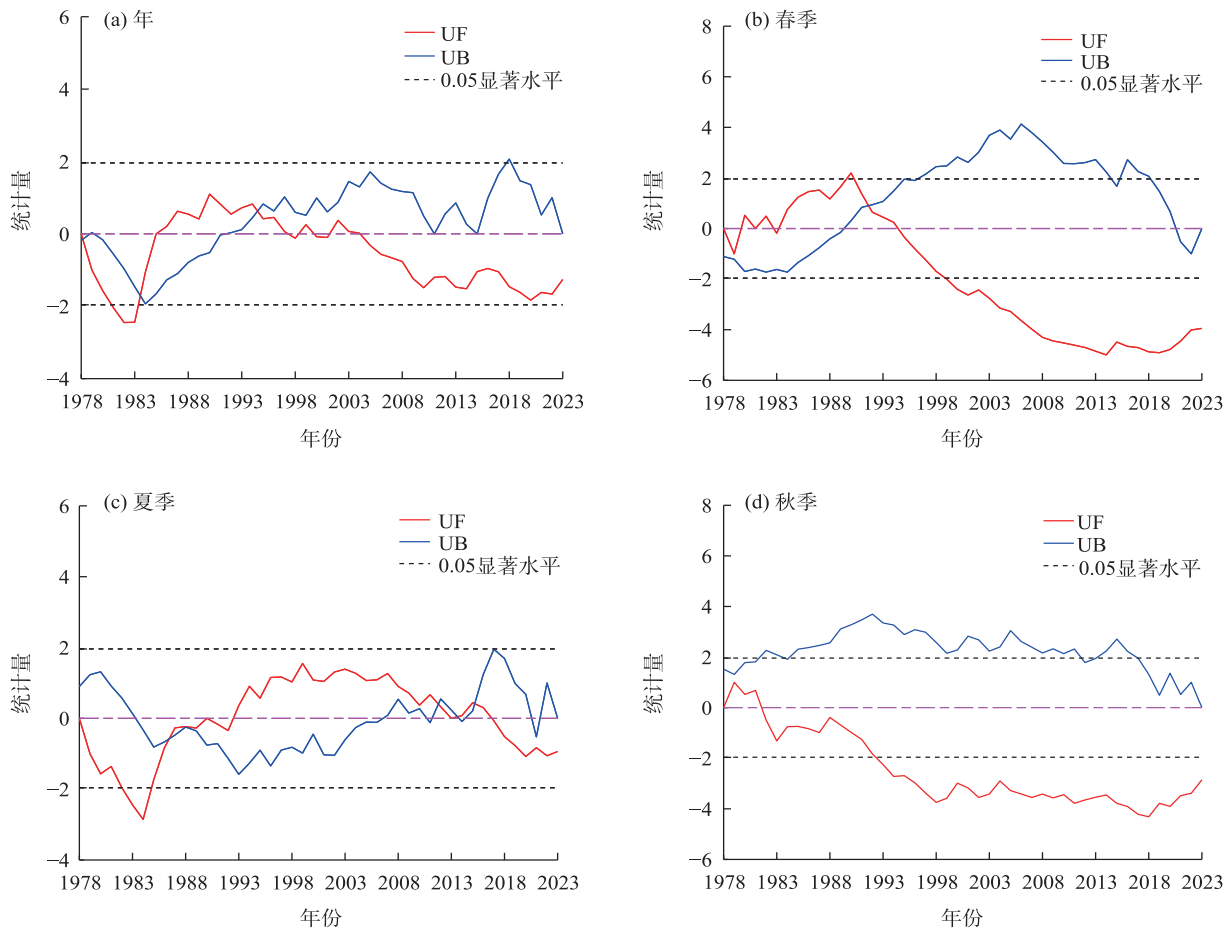


图3 1978—2023年陇东地区冰雹日数年际变化

Fig. 3 Annual variation of hail days in eastern Gansu Province from 1978 to 2023



注:UF为顺序统计量;UB为逆序统计量。

图4 1978—2023年陇东地区冰雹日数年际变化Mann-Kendall突变检验

Fig. 4 Mann-Kendall mutation tests of interannual variation of hail days in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

1978—1984年UF曲线呈下降特征,并且在1982年超过了置信区间,即1978—1984年冰雹日数显著减少,1984—2007年呈增加趋势,2007—2023年呈减少趋势;1987、2015年为2个突变点。秋季呈现较一致的下降趋势(图4d),并且自1992年之后均超过了置信区间,表明秋季冰雹日数的下降趋势非常显著。

2.2.3 月际变化 从1978—2023年陇东地区冰雹日数月际分布特征分析(图5)可以看出,陇东冰雹具有明显的季节特征,除了冬季,春、夏、秋三季均有冰雹发生,夏季为冰雹高发期,秋季少发。月际变化总体呈现出“单峰型”的特征,5—8月冰雹发生频率最高,占比达全年的81.5%,其中7月冰雹日数最多,达到了188 d,其次是6月,为144 d;3、11月冰雹发生率极低,3月仅出现过3 d,11月仅出现过1 d。

分析造成陇东冰雹日数季节及月变化特征的原因,主要是5月之后陇东地区近地面气温升高,位

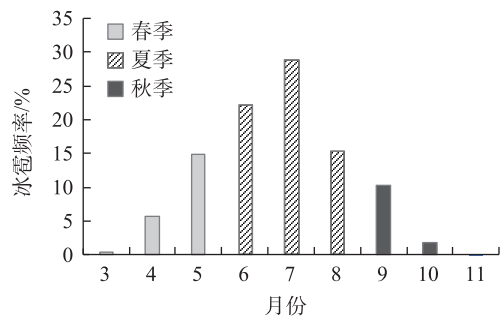


图5 1978—2023年陇东地区冰雹频率月际变化

Fig. 5 Monthly variation of hail frequency in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

于地面暖高压前部,而高空盛行西北气流,多冷空气活动,层结不稳定度的增加为冰雹产生提供了有利条件。陇东地区最早的冰雹日分别为1990年3月28日(正宁县),2003年3月31日(庄浪县),2023年3月31日(灵台县),均地处陇东南部,与其他地

区相比同时期温度较高,可见热力条件对冰雹的出现时间具有明显的影响。

2.2.4 日变化 对1978—2023年陇东地区冰雹发生的时间段进行统计(图6),共有710站次的记录。结果显示:陇东地区的冰雹日变化呈现“单峰型”特征,00:00—12:00之间共计27站次,占比3.8%,13:00开始冰雹站次显著增加,15:00—18:00为主要的降雹时段,总计361站次,占降雹总站次的50.8%,其中17:00—18:00达到了130站次,占降雹总站次的18.3%,20:00之后冰雹站次显著减少。有3个时段没有冰雹出现,分别是02:00—03:00、04:00—05:00、06:00—07:00,均为凌晨时段。

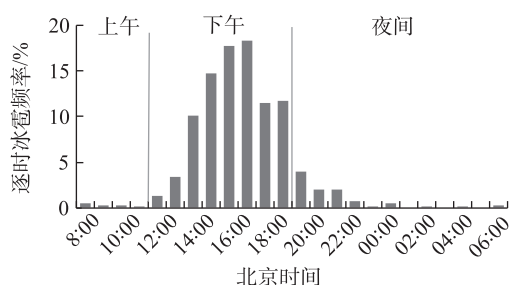


图6 1978—2023年陇东地区冰雹日变化
Fig. 6 Diurnal variation of hail in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

将24 h划分为3个时段,其中08:00—12:00为上午,12:00—20:00为下午,20:00—次日08:00为夜间。分时段冰雹频率统计显示:91.6%的冰雹发生在下午时段;其次是夜间,占比5.9%;上午时段冰雹频率最低,仅占比2.5%。以上分析可以看出陇东冰雹主要发生在下午至傍晚,该时段为一天中温度最高的时段,低层大气增温与高层大气的热力对比加大,有利于形成热力不稳定层结,促进冰雹的产生。

2.3 一次降雹持续时间

对1978—2023年陇东地区一次降雹持续时间进行统计(图7),共有666站次的记录。结果显示:陇东地区冰雹持续时间普遍较短,0~9 min有279站次,占比为42%。随着持续时间的延长,冰雹站次也迅速减少,持续时间40 min以上的为46站次,其中持续时间在60 min以上的有4站次;华池县1站次(2020年6月24日)、静宁县3站次(2011年8月25日、2015年5月19日、2015年5月30日),除2015年5月19日以外,其余冰雹日均有4~6站次发生冰雹,

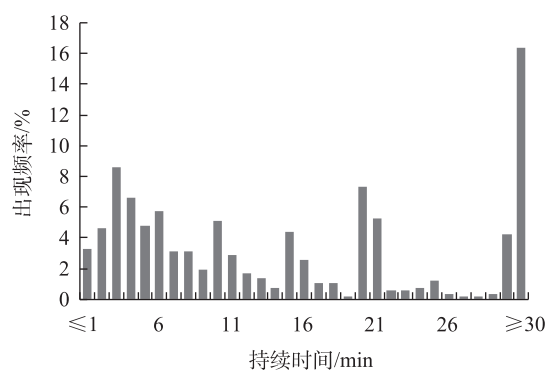


图7 1978—2023年陇东地区一次冰雹持续时间频率分布
Fig. 7 Frequency distribution of a hail duration in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

可见多站降雹持续时间长的概率更高,这与隋玉秀等^[38]的研究结论相吻合。

2.4 冰雹直径

对1978—2023年陇东地区冰雹过程最大冰雹直径进行统计(图8),共有666站次的记录。统计结果显示:中等直径冰雹出现的频率最高,达到了63.2%;其次是大冰雹,占比为18.5%,最大冰雹直径达10 cm(镇原县,1986年8月4日),达到了特大冰雹的标准。根据孙继松^[1]对强对流天气的定义, $D \geq 2$ cm为强对流天气, $D \geq 5$ cm为极端强对流天气,陇东降雹达到强对流标准的站次占比为25.7%,其中达到极端强对流标准的占比3.6%。据《中国气象灾害大典·甘肃卷》记载^[39],1980年6月26日环县出现特大冰雹,雹粒大如鸡蛋,导致死伤30人,夏田无收,秋田绝苗,受灾面积达1172.4 hm²;1991年6月7、9日,平凉市9个乡镇出现历史罕见雹洪灾害,冰雹普遍大如鸡蛋,花所乡个别冰雹大如砖块、脸盆,导致2人死亡,7870 hm²农作物受灾;2005年5月30

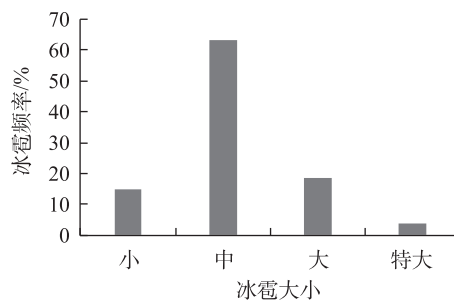


图8 1978—2023年陇东地区不同直径冰雹发生频率分布
Fig. 8 Frequency distribution of hail with different diameter in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

日陇东出现大范围强冰雹,8个县区遭受冰雹袭击,冰雹直径均大如鸡蛋,董志塬地区冰雹最大直径75 mm,重量达78 g,小麦和大部分蔬菜绝收,造成直接经济损失达 2.5×10^8 元。可见虽然极端强对流冰雹发生频率较低,但是一旦出现对陇东地区造成的灾害十分严重。

2.5 冰雹范围

1978—2023年陇东地区总计发生649场次冰雹(图9a),其中局地性冰雹居多,共发生526次,占比81%,3—11月均有发生,频次最高的月份为7月,达到了157 d;区域性冰雹过程123次,占比为19%,发生于4—10月,频次最高的月份为6月,共出现35 d,范围最大为9站次(2007年7月24日)。近46 a冰雹范围年际变化显示(图9b),区域性冰雹呈增多趋势,且通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验,频次最高的为2015年,达到了8 d,2022年区域性冰雹场次占比最多,达到全年冰雹场次的50%;局地性冰雹随时间变化逐渐减少。有8 a无区域性冰雹,分别为1978、1979、1980、1982、1995、1998、2009、2018年。

以上分析可以看出,陇东冰雹以局地性为主,区域性冰雹占比虽少但随时间变化呈显著增加趋势。通过对比冰雹直径与冰雹范围,发现大多数大冰雹及特大冰雹为区域性冰雹过程产生,如2005年5月30日(8个县区,最大直径75 mm)、2008年7月19日(4个县区,最大直径72 mm)、2020年6月24日(6个县区,最大直径50 mm),可见陇东区域性冰雹更易产生大直径冰雹。

2.6 冰雹周期变化

采用Morlet小波分析方法对1978—2023年陇东冰雹日数的周期变化进行研究(图10),小波系数等值线填色图中,暖色为正值,表示冰雹多发的年

份,冷色为负值,表示冰雹少发的年份。可以看出,冰雹日数在3~5 a、13~15 a、34~35 a的3个时间尺度上震荡强烈,正值中心与负值中心交替出现。冰雹日数的小波方差在3 a、14 a、35 a出现极值,由此可以推断陇东冰雹日数存在3 a的主震荡周期以及14 a、35 a的次震荡周期,而2023年陇东处于13~15 a长周期的冰雹多发期,因此可以推断接下来陇东地区仍然维持冰雹多发的趋势。

2.7 大气物理参数与冰雹日数的相关性

冰雹的形成除有利的天气形势背景条件外还必须具备低层水汽辐合、大气不稳定层结、触发机制3个基本条件,此外冰雹的形成机制中,云物理机制、垂直风切变、0℃和-20℃特性层的高度也对冰雹的产生有至关重要的作用^[1]。基于上述冰雹形成的物理条件,本文选取ERA5再分析资料中的2 m气温、2 m露点温度、CAPE、K指数、0℃层高度、云底高度、总降水量、对流降水量等大气物理参数与冰雹日数进行拟合得到相关系数(表1)。其中CAPE、K指数代表了大气边界层不稳定能量的强弱;0℃层高度为影响冰雹形成的特性层高度;2 m气温、2 m露点温度代表大气低层温湿状况;云底高低影响对流强度、冰雹的降落高度及融化速度;总降水量、对流降水量代表降水量的变化。

分析结果显示,春季冰雹日数与8个参数的相关性均通过了显著性检验,与CAPE、K指数、对流性降水、总降水量、2 m露点温度呈正相关,与2 m气温、云底高度、0℃层高度呈负相关。其中相关性最强的是CAPE,通过了 $P < 0.001$ 的极显著性检验;其次是云底高度、2 m气温和K指数,均通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验。可见春季冰雹的形成机制具有复杂性,选取的8个大气物理参量对于春季冰雹的预测

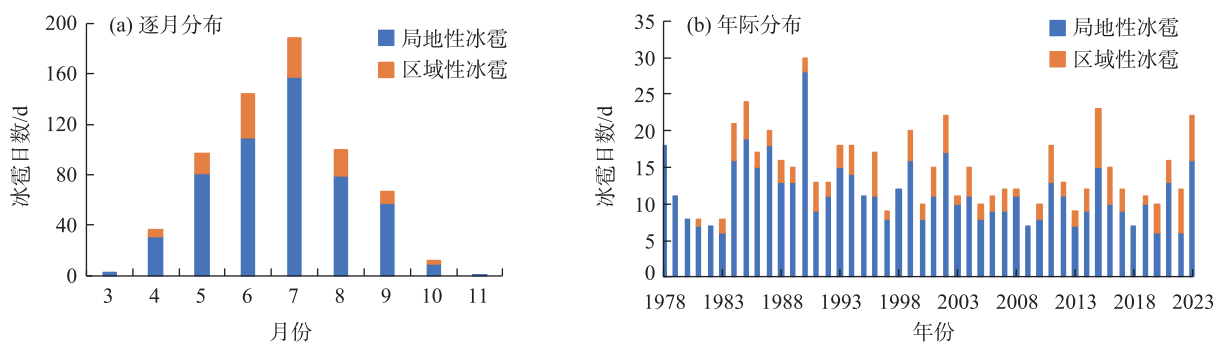


图9 1978—2023年陇东地区局地性、区域性冰雹的月际及年际分布

Fig. 9 Local and regional hail monthly distribution and interannual distribution in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

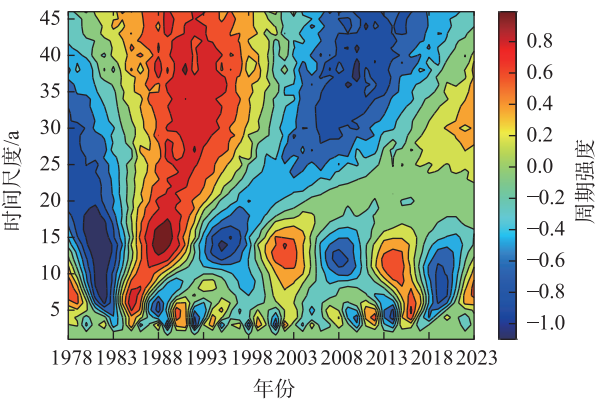


图 10 1978—2023 年陇东地区冰雹日数周期变化
Fig. 10 Periodic variation of hail days in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

表 1 近 46 a 大气物理参数与陇东冰雹日数的相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis between atmospheric physical parameters and hail days in eastern Gansu Province over recent 46 years

大气物理参数	春季	夏季	秋季
2 m 气温/K	-0.440**	-0.031	-0.121
2 m 露点温度/K	0.360*	-0.038	-0.142
对流有效位能(CAPE)/J·kg ⁻¹	0.554***	0.169	0.480***
云底高度/m	-0.457**	0.113	0.069
对流性降水/mm	0.316*	-0.005	0.026
K 指数/℃	0.393**	0.155	-0.152
总降水量/mm	0.346*	-0.164	-0.090
0℃层高度/m	-0.305*	-0.291*	-0.209

注:***、**、*分别代表通过0.001、0.01、0.05水平的显著性检验。

均具有参考意义,其中不稳定能量类因子与冰雹日数的相关性更高,这也是由于陇东春季整体大气温度较低,较强的不稳定能量容易在其他因子共同作用下导致冰雹频发。夏季冰雹日数仅与0℃层高度具有显著的负相关,通过了 $P<0.05$ 的显著性检验,即0℃层高度越低,冰雹越频发;陇东夏季高温多雨,水汽和热力条件普遍较好,地形抬升及局地热力不稳定引起的强对流天气显著增多,因此可能导致大多物理量对冰雹日数的敏感性不高,曹彦超等^[40]在研究陇东雷暴影响因子时也出现了上述特征;适当的0℃层高度有利于冰雹的形成和增长,夏季高温导致0℃层高度达到全年最高,因此较低的0℃层高度容易导致夏季冰雹日数增多。秋季冰雹日数仅与CAPE具有显著正相关,且通过了 $P<0.001$ 的极

显著性检验,即CAPE越大,冰雹越频发;陇东秋季低温多雨,水汽条件、特性层高度等普遍适宜,但热力不稳定条件减弱,因此较强的不稳定能量对冰雹日数具有主导作用。

综上所述,8个大气物理参数与春季冰雹有较强的相关性,尤其是CAPE、K指数、2 m气温及云底高度对春季冰雹日数气候变化具有主导作用;0℃层高度对夏季冰雹日数气候变化具有主导作用;CAPE对秋季冰雹日数气候变化具有主导作用。

3 结 论

(1) 陇东地区冰雹日数空间分布不均匀,整体呈现出西北、东南多,中部、南部少的特征。冰雹日数空间分布与地形地貌的关系密切,多雹区可分为3个区域,主要位于下坡地形、山脉背风坡及子午岭山区;少雹区可以分为2个区域,主要位于相对平坦的塬区及六盘山南部。

(2) 陇东冰雹日数年际变化呈现出减少趋势,其中春季减少的趋势最为显著;M-K突变检验显示,年冰雹日数和夏季冰雹日数的变化均呈现出下降-上升-下降的特征;春季呈现出上升-下降的特征;秋季呈现较一致的显著下降趋势。降雹具有明显季节性,冰雹高发期为5—8月;一日中降雹时刻多出现在15:00—18:00,降雹持续时间以0~9 min居多,冰雹直径大多为中等;649场次冰雹中,局地性冰雹远多于区域性冰雹,但区域性冰雹次数随时间显著增多。

(3) 陇东冰雹日数存在3 a的主震荡周期以及14 a、35 a的次震荡周期,而2023年陇东处于13~15 a长周期的冰雹多发期,可以推断接下来陇东地区仍然维持冰雹多发的趋势。

(4) 大气物理参数与陇东冰雹日数相关性分析显示,不同季节的主导因素不同,春季影响因子复杂,其中CAPE、K指数、2 m气温及云底高度对冰雹日数最具主导作用;夏季0℃层高度对冰雹日数具有主导作用;秋季CAPE对冰雹日数具有主导作用。

(5) 冰雹主要依赖于人工观测,由于资料的限制,本文的研究无法精确到乡镇。此外,本文主要研究了地形及8类大气物理参数冰雹日数的影响,并不全面,后续还需要结合多源资料对冰雹气候的影响因子进行更深入的研究。

ChinaXiv:202509.00035v1

参考文献 (References)

- [1] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 3-6. [Sun Jisong. Fundamental principles and technical methods for severe convective weather forecasting[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014: 3-6.]
- [2] 张强. 中国西北冰雹研究[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 56-68. [Zhang Qiang. Research on hail in northwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 56-68.]
- [3] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 65-75. [Yu Xiaoding, Wang Xiuming, Li Wanli, et al. Nowcasting of thunderstorms and severe convective weather[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020: 65-75.]
- [4] Kang F, Zhang Q, Lu S. Validation and development of a new hailstone formation theory: Numerical simulations of a strong hailstorm occurring over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(d2): 1-13.
- [5] Punge H, Kunz M. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review[J]. Atmospheric Research, 2016(1): 176-177.
- [6] 赵文慧, 姚展予, 贾烁, 等. 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, 2019, 43(3): 539-551. [Zhao Wenhui, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. 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, 2019, 43(3): 539-551.]
- [7] 辛悦, 苏立娟, 郑旭程, 等. 内蒙古冰雹特征及基于机器学习的冰雹识别方法研究[J]. 干旱区地理, 2025, 48(1): 11-19. [Xin Yue, Su Lijuan, Zheng Xucheng, et al. Hail characteristics and hail recognition method based on machine learning in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(1): 11-19.]
- [8] 马荣君, 李潇斐, 毛彦霖, 等. 陕西省冰雹气候变化特征及其关键影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 767-773. [Ma Rongjun, Li Xiaofei, Mao Yanlin, et al. Characteristics and causes of climate change in hail in occurrence Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 767-773.]
- [9] Kunz M, Sander J, Kottmeier C. Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 29(15): 2283-2297.
- [10] Li M X, Zhang Q H, Zhang F Q. Hail day frequency trends and associated atmospheric circulation patterns over China during 1960—2012[J]. Journal of Climate, 2016, 29: 7027-7044.
- [11] Zhang C, Zhang Q, Wang Y. Climatology of hail in China: 1961—2005[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2008, 47(3): 795-804.
- [12] 冯晓莉, 马占良, 管琴, 等. 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, 2021, 47(6): 717-726. [Feng Xiaoli, Ma Zhanliang, Guan Qin, et al. Spatio-temporal characteristics of hail and its influence factors in Qinghai Plateau during 1980—2018[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(6): 717-726.]
- [13] 于怀征, 龚佃利, 朱秀红, 等. 山东冰雹时空分布特征与分类预报指标研究[J]. 气象科技, 2023, 51(2): 254-261. [Yu Huai-zheng, Long Dianli, Zhu Xiuhong, et al. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics of hails in Shandong Province and classified forecast indexes[J]. Meteorological Science and Technology, 2023, 51(2): 254-261.]
- [14] 刘涛, 夏晓玲, 彭宇翔, 等. 贵州省61年冰雹气候特征及其成因分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(6): 872-882. [Liu Tao, Xia Xiaoling, Peng Yuxiang, et al. Climatic characteristic and causes of hail in Guizhou: 1961—2021[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2023, 39(6): 872-882.]
- [15] 杨丽杰, 程鹏, 刘翔, 等. 1970—2019年陇东地区强对流天气的气候特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(1): 25-31. [Yang Lijie, Cheng Peng, Liu Xiang, et al. Analysis of climatic characteristics of severe convective weather in Longdong Area in recent 50 years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(1): 25-31.]
- [16] 孙旭映. 甘肃省冰雹天气形成机理、特征及雷达识别技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. [Sun Xuying. Research on formation mechanism, characteristics and radar recognition technology of hail weather in Gansu Province[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.]
- [17] 路亚奇, 焦美龄, 李祥科, 等. 陇东短时强降水与冰雹天气对比分析及预报方法研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 317-326. [Lu Yaqi, Jiao Meiling, Li Xiangke, et al. Comparative analysis and prediction method of short time heavy precipitation and hail weather in eastern Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 317-326.]
- [18] 路亚奇, 曹彦超, 张峰, 等. 陇东冰雹天气特征分析及预报预警[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1565-1576. [Lu Yaqi, Cao Yanchao, Zhang Feng, et al. The prediction and forewarning system as well as weather characteristics analyses of hail in the east of Gansu[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(6): 1565-1576.]
- [19] 雷瑜, 黄武斌, 黎倩, 等. 不同天气分型下甘肃陇东地区强冰雹天气多普勒雷达产品特征[J]. 干旱气象, 2022, 40(2): 234-243. [Lei Yu, Huang Wubin, Li Qian, et al. Characteristics of Doppler radar products of strong hails under different weather classification in Hedong region of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(2): 234-243.]
- [20] 吴爱敏, 张天锋, 白爱军. 陇东黄土高原冰雹的气候特征及预报[J]. 灾害学, 2005, 20(2): 37-40. [Wu Aimin, Zhang Tianfeng, Bai Aijun. Climatic characteristics and forecast of hail on the Loess Plateau of eastern Gansu[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(2): 37-40.]
- [21] 王若升, 张彤, 樊晓春, 等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 373-377. [Wang Ruosheng, Zhang Tong, Fan Xiaochun, et al. Analysis of the cli-

mate features and radar echo of the hail weather in Pingliang of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 373–377.]

- [22] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814–1828. [Zhang Qiang, Yang Jinhui, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814–1828.]
- [23] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 551–562. [Ding Yihui, Liu Yanju, Xu Ying, et al. Regional responses to global climate change: Progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(6): 551–562.]
- [24] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 41–56. [Li Dongliang, Liu Dexiang. Gansu climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 41–56.]
- [25] 黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等. 1974—2013年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象, 2017, 43(4): 450–459. [Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Yanfeng, et al. Variation characteristics of hail days in Gansu Province during 1974–2013[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(4): 450–459.]
- [26] 唐延东, 臧翠萍, 于云鹏, 等. 基于分形理论的陇东地区沟谷发育特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2025, 48(2): 223–233. [Tang Yandong, Zang Cuiping, Yu Yunpeng, et al. Developmental characteristics and influencing factors of gullies based on fractal theory in eastern Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(2): 223–233.]
- [27] 黄玥, 孙建华, 张元春, 等. 华北地区暖季雷暴大风对流系统的触发、组织类型及环境条件[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(9): 2929–2947. [Huang Yue, Sun Jianhua, Zhang Yuanchun, et al. Initiation, organizational modes and environmental conditions of severe convective wind events during the warm season over north China[J]. Science China: Earth Sciences, 2024, 54(9): 2929–2947.]
- [28] 衣娜娜, 苏立娟, 郑旭程, 等. 冰雹天气的环境参量及预报模型[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 13–23. [Yi Nana, Su Lijuan, Zheng Xucheng, et al. Environmental parameters and forecast models of hail events[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 13–23.]
- [29] 张海耀, 黄玉霞, 吴辉彦, 等. 黄土高原复杂地形区两次冰雹天气过程对比分析[J]. 干旱气象, 2022, 40(4): 646–655. [Zhang Haiyao, Huang Yuxia, Wu Huiyan, et al. Comparative analysis of two consecutive hail weathers in complex terrain area of Loess Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(4): 646–655.]
- [30] 王子昕. 多源数据融合算法在一次强对流天气过程中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021. [Wang Zixin. Application of multi-source data fusion algorithm in a severe convective weather process[D]. Nanjing: Nanjing University of Information

Science and Technology, 2021.]

- [31] 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. [Zhang Fanghua, Gao Hui. Temporal and spatial features of hail days in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(5): 687–693.]
- [32] 国家气象中心. 冰雹等级 GB/T 27957–2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 3–6. [National Meteorological Center. Hail grade GB/T 27957–2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 3–6.]
- [33] 张鸿发, 龚乃虎, 贾伟, 等. 平凉地区强对流钩状回波特征的观测研究[J]. 大气科学, 1997, 21(4): 18–29. [Zhang Hongfa, Gong Naihu, Jia Wei, et al. Observational investigation of characteristics of severe convective hook echo in Pingliang region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1997, 21(4): 18–29.]
- [34] 仇莉, 姜宗祖, 王凌军, 等. 延安沟壑区冰雹灾害特征及影响路径研究[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(3): 184–186. [Qiu Li, Jiang Zongzu, Wang Lingjun, et al. Study on characteristics and influence path of hail disaster in Yan'an gully region[J]. Agricultural Disaster Research, 2023, 13(3): 184–186.]
- [35] 周崑, 张强, 康凤琴. 我国西北地区降水气候特征及若干研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 1029–1036. [Zhou Wei, Zhang Qiang, Kang Fengqin. Recent advancements of hail research in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(9): 1029–1036.]
- [36] 郭海英, 张谋草, 周忠文, 等. 气候暖湿化及其对陇东冬小麦生产的影响[J]. 中国农学通, 2023, 39(15): 127–131. [Guo Haiying, Zhang Moucao, Zhou Zhongwen, et al. The impact of warming and wetting of climate on production of winter wheat in eastern Gansu Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(15): 127–131.]
- [37] 王芝兰, 陈录元, 尚可政, 等. 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, 2011, 29(4): 439–445, 454. [Wang Zhilan, Chen Luyuan, Shang Kezheng, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of severe convective weather and its response to climate warming in Qinghai Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(4): 439–445, 454.]
- [38] 隋玉秀, 杨景泰, 李昱茜, 等. 1971—2018年大连地区冰雹气候特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(2): 249–255. [Sui Yuxiu, Yang Jingtai, Li Yuqian, et al. Climatic characteristics of hails in Dalian region of Liaoning Province from 1971 to 2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(2): 249–255.]
- [39] 温克刚. 中国气象灾害大典: 甘肃卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 169–197. [Wen Kegang. China meteorological disaster encyclopedia: Gansu[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 169–197.]
- [40] 曹彦超, 韩晶, 路亚奇, 等. 陇东两类夏季雷暴的活动特征及影响因素分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(5): 64–70. [Cao Yanchao, Han Jing, Lu Yaqi, et al. Activity characteristics and influence factors of two kinds of summer thunderstorms in Longdong[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(5): 64–70.]

Hail climate characteristics and influencing factors in eastern Gansu Province from 1978 to 2023

ZHANG Kexin, ZHAO Yujuan, LI Meiyu

(Qingyang Meteorological Bureau, Xifeng 745000, Gansu, China)

Abstract: Hail is an extreme weather phenomenon caused by intense convective activity, characterized by rapid development and substantial damage, particularly threatening to the Longdong region, eastern Gansu Province, China where agriculture constitutes the economic backbone. In the context of climate change, it is imperative to investigate the climatic characteristics of hail in Longdong and identify its influencing factors. Utilizing hail observation and disaster records from 15 regional meteorological stations spanning from 1978 to 2023, along with ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, this study employs linear trend estimation, the Mann-Kendall test, and Morlet wavelet analysis to examine the spatial-temporal distribution of hail and its key drivers. The results indicate the following: (1) Hail days exhibit uneven spatial distribution, with higher frequencies in the northwest and southeast, and lower frequencies in the central and southern regions. Hail-prone zones are predominantly situated on downslope terrains, leeward mountain slopes, and the Ziwuling Mountains, while hail-scarce areas are concentrated in the flat loess plateau and southern Liupan Mountains. (2) Over the past 46 years, hail days have declined, with the sharpest decrease observed in spring. Hail predominantly occurs between May and August, accounting for 81.5% of annual hail events. (3) The diurnal variation of hail follows a single-peak pattern, with peak occurrences between 15:00 and 18:00. Hail events of short duration (0–9 minutes) and medium diameter are most frequent. Localized hail occurs more frequently than regional hail, though the incidence of the latter is increasing significantly. (4) A primary oscillation period of 3 years, and secondary cycles of 14 and 35 years, characterize hail frequency. (5) The principal meteorological drivers of hail vary seasonally, with convective available potential energy and the 0 °C isotherm height being the most influential. These findings provide a scientific basis for understanding hail occurrence patterns in Longdong and serve as a reference for enhancing forecasting and early warning systems, as well as for guiding artificial hail suppression strategies.

Keywords: hail; climatic characteristics; influencing factors; climate change; eastern Gansu Province