

DOI:10.13866/j.azr.2026.05.04
CSTR:32277.14.AZR.20260504

陇东黄土高原冰雹天气学分型与物理量特征

张可心¹, 朱柏臻¹, 苟尚², 张洪芬¹, 何敏³, 王娟¹

(1. 甘肃省庆阳市气象局, 甘肃 庆阳 745000; 2. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020;

3. 甘肃省白银市气象局, 甘肃 白银 730900)

摘要: 利用常规气象观测资料、冰雹实况资料和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料, 采用 K-means 聚类分析法对 2012—2023 年陇东黄土高原 53 次冰雹过程进行天气学分类, 并总结不同类型冰雹物理量潜势特征及阈值。结果表明: (1) 陇东冰雹天气的大尺度环流可分为低槽型 (20.8%)、低涡型 (22.6%) 和西北气流型 (56.6%); 700 hPa 切变线及地面辐合线与各类冰雹的落区均有较好的对应。(2) 低槽型主要发生在春末夏初 (5—6 月), 低涡型主要发生在夏季 (6—8 月), 西北气流型 4—10 月均有发生, 6 月占比最多 (37%)。(3) 物理量诊断结果表明, 3 类冰雹天气环境场特征差异显著, 低槽型表现为“强层结不稳定弱切变”, K 指数大, 特殊层高度低; 低涡型表现为“高能中切变”, 对流有效位能 (CAPE) 大, 低层水汽充沛且特殊层高度高; 西北气流型表现为“低能强切变”, 中低层层结干, 0~6 km 垂直风切变 (SHR) 平均值 $>12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 0 °C 和 -20 °C 层厚度薄。(4) 选取 9 个参数构建了陇东冰雹物理量预报阈值, 经检验具备应用参考价值, 可为陇东冰雹潜势预报提供量化参考指标。

关键词: 冰雹; 天气分型; 环境参数; 预报阈值; 陇东黄土高原

冰雹产生于强烈发展并具有组织化的中尺度对流系统, 具有较强的致灾性^[1]。导致冰雹产生的中小尺度对流系统具有突发性强、时空尺度小的特征, 因此冰雹的预报预警具有较大的难度, 一直是天气预报服务中的重点和难点^[2]。冰雹天气的天气系统配置和物理量特征存在明显地域差异, 基于天气学分型分析其大气环境参量及阈值, 可为冰雹潜势预报提供关键指标^[3-5]。近年来, 国内外专家学者对冰雹发生的天气学特征及影响环境因素展开了深入研究。García-Ortega 等^[6]利用 NCEP 再分析资料, 对西班牙埃布罗河谷的冰雹天气进行了研究, 将 260 个冰雹日分为 5 种环流形势, 发现中高层 (500 hPa) 斜压扰动与低层 (850 hPa) 暖湿输送的协同作用是该地区冰雹发展的核心条件。Sfičá 等^[7]将罗马尼亚东北部冰雹天气分为弱平流模式和强平流模式, 5 月、6 月主要由弱平流模式决定, 6—8 月强平流模式更常见, 且冰雹发生在对流有效位能大于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和对流层低层风切变较大的地方。朱乾

根等^[8]基于 500 hPa 环流形势与低层动力/热力条件的协同作用将中国典型的冰雹天气环流形势分为高空冷槽型、高空冷涡型、高空西北气流型和南支槽型, 为我国冰雹天气预报建立了标准化的理论基础和分析框架, 在此基础上, 诸多学者结合区域气候特征进行了深化研究, 得出了本地化的天气分型及预报指标, 显著提升了冰雹预报的精准度^[9]。袁潮等^[10]研究表明, 渤海湾北部地区冰雹天气可以分为高空干冷空气强迫型和斜压锋生型, 除了中低层温度直减率、中层干层等常用指标外, 湿球 0 °C 层高度以及逆温层高度也具有较好的指示意义。王培涛等^[11]研究发现, 滨州市降雹形势主要有 5 种类型, 选取的 4 类 13 种物理量均具有较好的代表性, 且不同月份不同类型天气形势, 物理量具有较明显的差异。莫丽霞等^[12]将广西的冰雹过程分为冷空气影响型和暖区型, 并从不稳定能量、水汽条件、对流触发条件、垂直风切变、0 °C 层高度等方面归纳了两类环流形势下的预报指标。

收稿日期: 2025-08-27; 修订日期: 2025-10-04

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (24JRRM008, 25JRRM009); 庆阳市科技计划项目 (QY-STK-2024A-098)

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

通讯作者: 苟尚. E-mail: goushang-talent@163.com

陇东地区地处黄土高原东部,地形复杂,汤兴芝等^[13]分析了全国冰雹灾害特征,发现该地区是我国的降雹高发区及大冰雹高发区之一。有不少学者对陇东冰雹展开了各方面的研究,黄玉霞等^[14]、张可心等^[15]对陇东冰雹气候特征进行了详细分析,路亚奇等^[16]、雷瑜等^[17]针对冰雹发生时雷达回波特征进行研究,建立了雷达产品短临预警阈值标准,提高了冰雹0~3 h预警水平。然而陇东冰雹天气物理量场特征及潜势预报研究十分匮乏。路亚奇等^[18]分析了2008—2013年陇东冰雹过程,利用崆峒站探空数据对冰雹发生前期的物理量潜势特征进行了研究,得出700 hPa与500 hPa温差、K指数、-20℃及0℃高度层等物理量指标对陇东冰雹的潜势预报具有参考价值。王若升等^[19]研究了平凉的降雹日崆峒站的探空层结特征,发现对流层上层的不稳定能量明显,500 hPa与300 hPa的温差在25℃以上,K指数>25.9℃,SI指数<0℃。上述针对陇东冰雹天气学分型均基于主观分型,且物理量场研究均基于单站探空数据,但主观分型具有一致性差、可重复性低的缺点,并且冰雹属于中小尺度系统的产物,陇东地区面积广阔,利用单站探空资料对环境阈值进行分析具有较大的局限性。当前,西北地区气候已呈现显著暖湿化趋势,导致冰雹产生的环境条件发生改变^[20]。因此,亟须针对气候暖湿化背景下的冰雹天气进行研究,尤其是开展天气学及物理量场特征的研究。

鉴于此,本文以近年来陇东黄土高原的冰雹个例作为研究对象,基于高时空分辨率的再分析资料,通过客观分型法对陇东冰雹天气进行分型并建立概念模型,同时诊断关键物理量特征,以期提升该区域冰雹灾害的监测预警能力、制定科学防御策略提供理论依据和技术支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

陇东黄土高原位于甘肃省最东部(34°54′~37°10′N, 105°20′~108°45′E)(图1),包括2个地级市15个县(区)^[21]。该区域是黄土高原向关中平原过渡地带,地势西北高、东南低,海拔高度在885~2857 m。地貌多样,包括黄土丘陵沟壑区、高塬沟

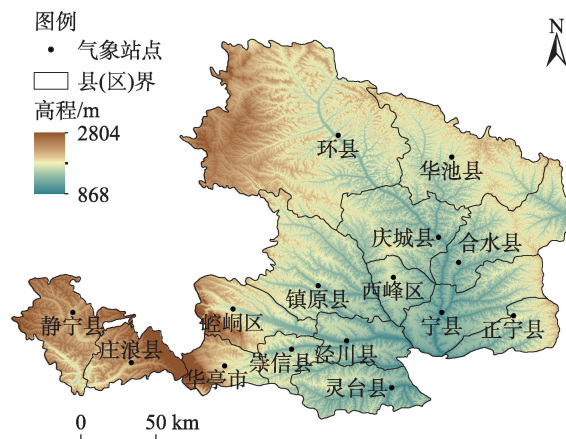


图1 陇东黄土高原地形与气象站点分布

Fig. 1 Topography and distribution of meteorological stations in the Longdong Loess Plateau

壑区和土石山地三大类型,其中庆阳市马岭以南以高塬沟壑为主^[22],如著名的董志塬,是我国保存最完整的黄土塬地之一,塬面宽阔平坦,气候适宜,是黄土高原降水较丰沛的区域,光热条件适宜,盛产冬小麦、玉米、苹果、花椒等作物,是重要的农业产区。平凉市静宁县特产“静宁苹果”是中国国家地理标志产品,是当地农民增收致富的特色产业^[23]。然而陇东黄土高原地形条件复杂、海拔落差大,是甘肃冰雹高发区之一,且冰雹多发于5—9月,正值各类农作物生长关键阶段,冰雹灾害直接导致生态脆弱性加剧、农业收入锐减,对陇东生态、经济发展造成巨大威胁。

1.2 数据来源

根据2012—2023年陇东15个国家基本站的重要天气报(WS报)、信息员上报冰雹实况及陇东灾情普查中的冰雹灾情资料,对冰雹天气进行统计。参考相关研究^[24],24 h内出现冰雹站次 $N \geq 5$ 称为一次大范围冰雹过程, $5 > N \geq 3$ 称为区域性冰雹过程, $N < 3$ 称为局地冰雹过程。考虑局地冰雹过程的环流形势一般不具有代表性,因此对统计的冰雹资料进行进一步筛选,挑选出 $N \geq 3$ 或特大冰雹 $N \geq 1$ 站次的过程,进行环流形势分类。经统计近12 a共出现大范围冰雹过程14 d,区域性冰雹过程38 d,特大冰雹过程3 d(其中仅1 d为单站特大冰雹),总计53 d。

大气物理量参数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)的逐小时数据,空间分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,选取500 hPa位势高度、温度、水平风场分析冰雹天气形势,并进行天气学分类。根据强对流及冰雹发生所需要的条件,选取水汽、热力及不稳定条件、动力抬升条件及特殊层高度,共4类14个参数进行物理量参数特征分析^[25-26]。再分析资料时间与观测资料时间保持一致。

1.3 研究方法

利用K-means聚类分析法将冰雹过程对应的ERA5再分析资料的500 hPa位势高度场和风场进行客观分型,结合预报员经验将陇东冰雹天气分为3类。该方法可避免主观经验的局限性,同时可以处理大样本数据^[27]。

再分析资料插值到观测站点采取最临近插值法,即在时间上选取距离冰雹发生最近的时次,空间上选取距离冰雹发生站点最近的格点数据。由于冰雹属于强对流天气过程,物理量参数在过程发生前才具有代表性,因此,物理量数据选取冰雹发生前一个时次。

物理量数据中,0℃层高度、-20℃层高度以及0℃和-20℃层高度差为下载的原始资料经过计算所得,计算方法如下^[28]:

$$H_i = \frac{H_{ij} - H_{ik}}{T_{ij} - T_{ik}}(T_i - T_{ik}) + H_{ik} \quad (1)$$

$$\Delta H = H_{(-20)} - H_0 \quad (2)$$

式中: H_i 为0℃层或-20℃层高度(m); i 为0℃层或-20℃层; H_{ij} 和 H_{ik} 分别为0℃层或-20℃层所在位置上下两个标准气压层高度(m); T_{ij} 和 T_{ik} 分别为0℃层或-20℃层所在位置的上下两个标准气压层的温度(℃); T_i 为0℃层或-20℃层的温度(℃); ΔH 为0℃和-20℃层高度差(m)。

预报效果检验采用命中率(Percent of Doom, POD)、空报率(False Alarm Rate, FAR)和临界成功指数(Critical Success Index, CSI)来进行评价^[29],命中率、空报率、临界成功指数计算所涉及的参数定义如表1,计算方法如下:

$$POD = \frac{X}{X+Y} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{Z}{X+Z} \quad (4)$$

$$CSI = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (5)$$

表1 冰雹预报与实况统计

Tab. 1 Hail forecast and observed statistics

| 冰雹预报 | 预报有冰雹 | 预报无冰雹 |
|-------|-------|-------|
| 实况有冰雹 | X | Y |
| 实况无冰雹 | Z | W |

2 结果与分析

2.1 冰雹天气学分型

采用K-means聚类分析法对2012—2023年陇东黄土高原53次冰雹过程进行分型,分为低槽型(I)、低涡型(II)、西北气流型(III)3类。

2.1.1 低槽型 低槽型500 hPa环流形势可以分为深厚低槽型和短波槽型(图2a),其中深厚低槽型表现为有明显高空槽东移(或横槽转竖),并有温度槽配合,温度槽往往落后于高度槽,且经向明显大于高度槽,陇东地区位于槽线后部,紧贴槽线,有明显的冷平流;短波槽型表现为深厚低槽在东移(或横槽在转竖)过程中分裂,形成了阶梯槽,前沿的短波槽有较强冷平流,陇东位于短波槽区。700 hPa高度上有较明显的切变,具有风向或风速辐合,有自北部或东北部向落区伸展的冷平流。冰雹落区位于高空低槽(切变线)东南部或地面辐合线附近(图2b)。

2.1.2 低涡型 低涡型500 hPa高度上通常 60°N 以北的 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 附近有高脊(图2c),高脊东部冷空气补充南下;在东海海面上有强盛副高或台风阻挡,影响低涡向东南方向发展,造成了低涡系统的东移缓慢,其尾部甩下冷空气影响陇东。根据低涡的位置可以分为河套低涡、华北低涡或东北低涡。以河套低涡影响最为明显且持续时间长,500 hPa低涡位于河套北部或东北部,在旋转东移过程中冷空气不断补充、积聚,冷空气伴随横槽南压,陇东位于低涡底部西北气流控制的强冷平流区域;华北低涡或东北低涡主要表现在500 hPa高度上陇东处于低涡的后部,以西北气流为主,低涡缓慢东移南压,冷空气随之南下影响陇东;700 hPa高度上陇东上空有闭合低涡或气旋式辐合,有明显切变线,且以风向辐合为主,有冷空气自北向南渗透。冰雹落区位于700 hPa切变线及地面辐合线附近(图2d)。由于盛夏西太平洋副热带高压稳定,该类型降雹具有连续发生的特点,往往会持续3~5 d,如2015年7月16—19日连续4 d出现区域性降雹。

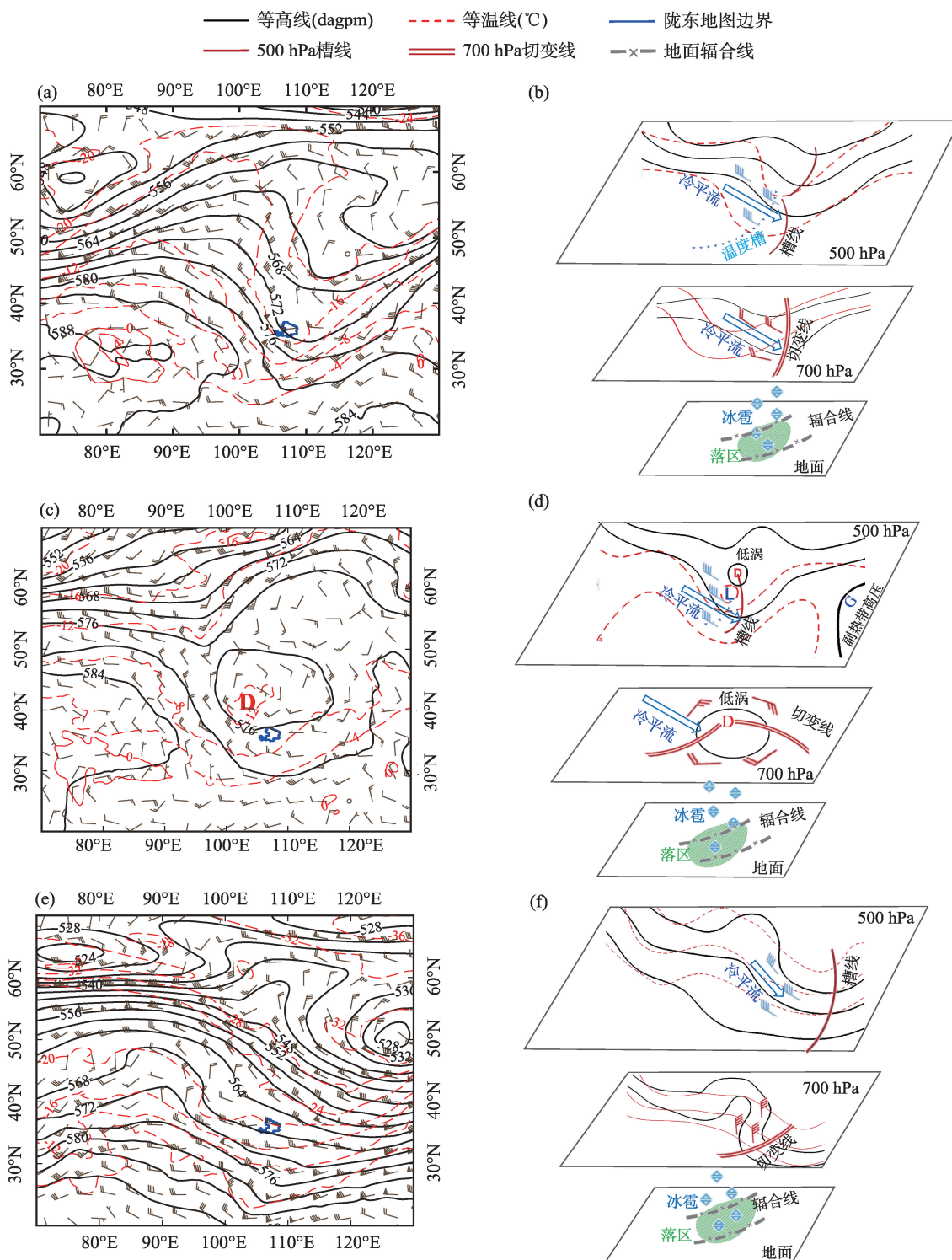


图2 陇东黄土高原低槽型(a、b)、低涡型(c、d)和西北气流型(e、f)500 hPa环流形势图(a、c、e)及概念模型(b、d、f)

Fig. 2 500 hPa circulation patterns (a, c, e) and conceptual models (b, d, f) of trough type (a, b), vortex type (c, d) and northwesterly flow type (e, f) over the Longdong Loess Plateau

2.1.3 西北气流型 西北气流型500 hPa高度上40°N以北多为西高东低的环流形势(图2e),新疆至贝加尔湖一带存在高压脊,低槽位于东部海面上或蒙古

东部至东北北部,陇东位于脊前或槽底的西北气流控制下,降雹前西北气流中有小波动东移,冷平流明显,槽线或切变线不明显。700 hPa高度上乌拉尔

山至新疆多为高脊,低槽或低涡在东海洋面上,陇东上游为一致的偏北风,有冷空气沿偏北气流下滑形成的风切变或辐合线。冰雹落区通常在700 hPa切变线及地面辐合线附近(图2f)。

2.2 各类型冰雹的统计特征

53 d冰雹过程中,西北气流型30 d,低涡型12 d,低槽型11 d,可见西北气流型为陇东冰雹天气的主要环流形势。月际分布显示(图3a),西北气流型4—10月均有发生,其中6月频率最高,占比37%;低槽型主要发生在春末夏初,即5—6月,占比达91%;低涡型主要发生在6—9月,其中夏季发生频率最高,占比达到92%。

年冰雹日数显示(图3b),西北气流型冰雹每年均有发生,其中2015年、2016年、2020年、2022年场次最多,均为4 d;低槽型冰雹主要发生在2015—2017年、2020—2023年,其中2023年发生频率最高,达3 d;低涡型冰雹除了2013年、2018年、2020年

以外其余年份均有发生,2015年最多,达到4 d。

2.3 物理量参数选取

冰雹发生除了一般雷暴所需的层结不稳定、水汽条件和触发条件外,还需具备强而持久的上升气流、适宜的特殊层高度以及中层有干冷空气的侵入^[1]。基于以上条件,选取4类14个物理量参数,如表2所示。为了避免仅以平均值分析所带来的片面性,本文采用平均值(表2)与箱线图结合对上述物理量指标进行进一步评估。从冰雹类型统计特征可以看出,陇东低槽型、低涡型冰雹发生月份较集中,西北气流型虽然各月均有发生,但分月样本量较少,因此本文针对不同类型的冰雹天气物理量特征进行统计分析。

2.3.1 水汽条件 中低层的水汽条件对冰雹的产生具有重要的影响,水汽参数选取中低层500 hPa、700 hPa的比湿(Q_{500} 、 Q_{700})和相对湿度(RH_{500} 、 RH_{700})。 Q_{500} (图4a)和 RH_{500} (图4c)的中位数和平均

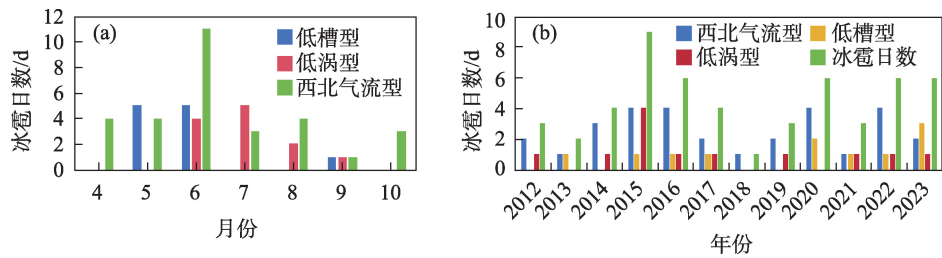


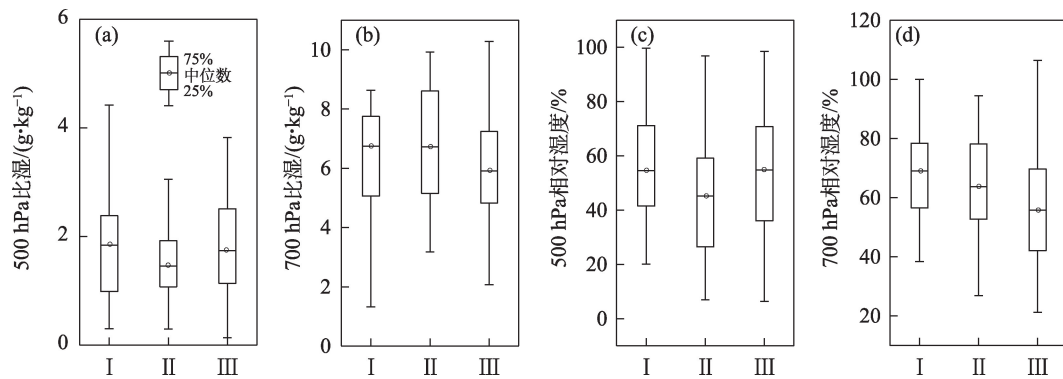
图3 2012—2023年陇东黄土高原冰雹日数月际变化(a)和年际变化(b)

Fig. 3 Inter-monthly (a) and inter-annual (b) variations in hail days over the Longdong Loess Plateau from 2012 to 2023

表2 2012—2023年陇东黄土高原冰雹天气物理量参数平均值

Tab. 2 Average values of physical parameters of hail weather in the Longdong Loess Plateau from 2012 to 2023

| 物理量 | | 表示方法 | 低槽型 | 低涡型 | 西北气流型 |
|-------|-----------------------------------|-------------|------|------|-------|
| 水汽参数 | 500 hPa 比湿/(g·kg ⁻¹) | Q_{500} | 1.9 | 1.6 | 1.8 |
| | 700 hPa 比湿/(g·kg ⁻¹) | Q_{700} | 6.3 | 6.9 | 6.0 |
| | 500 hPa 相对湿度/% | RH_{500} | 56 | 45 | 53 |
| | 700 hPa 相对湿度/% | RH_{700} | 69 | 64 | 56 |
| 不稳定参数 | 对流有效位能/(J·kg ⁻¹) | CAPE | 537 | 677 | 540 |
| | K 指数/℃ | K | 26 | 25 | 22 |
| | TT 总指数/℃ | TT | 46 | 45 | 46 |
| | 700 hPa 与 500 hPa 温度差/℃ | T_{75} | 17.6 | 17.7 | 19.1 |
| | 500 hPa 温度/℃ | T_{500} | -9.0 | -7.8 | -9.0 |
| 动力参数 | 700 hPa 温度/℃ | T_{700} | 8.6 | 9.9 | 10.1 |
| | 0~6 km 垂直风切变/(m·s ⁻¹) | SHR | 9.5 | 11.2 | 12.0 |
| 特殊层高度 | 0℃层高度/m | H_0 | 2852 | 3203 | 3213 |
| | -20℃层高度/m | $H_{(-20)}$ | 7049 | 7294 | 7112 |
| | 0℃层与-20℃层间厚度/m | ΔH | 4197 | 4091 | 3899 |



注: I 为低槽型; II 为低涡型; III 为西北气流型。下同。

图4 陇东黄土高原3类冰雹天气型水汽参数箱线图

Fig. 4 Boxplots of moisture parameters for three hail weather types over the Longdong Loess Plateau

值显示出3类冰雹天气的中层500 hPa均较干,中位数及平均值均不足 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低槽型相对较湿,比湿达到了 $1.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度达到56%,低涡型和西北气流型明显低于低槽型; Q_{700} (图4b)和 RH_{700} (图4d)的中位数和平均值显示,低槽型和低涡型的 Q_{700} 相近,中位数和平均值为 $6.3 \sim 6.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,西北气流型最低,约为 $6.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低槽型 RH_{700} 最大,为69%,低涡型次之,西北气流型最低,仅56%。相对湿度受气温和气压的影响,低槽型普遍发生在春末夏初,相比低涡型温度普遍偏低,因此虽然比湿略低于低涡型,相对湿度却明显偏高。

3类冰雹天气均具有上干下湿的特征,中层水汽条件差异较小,低层水汽具有低涡型>低槽型>西北气流型的特征。竹利等^[30]研究发现,高空西北气流通常源自高纬度内陆地区,本身空气干燥,且长时间陆面输送过程中水汽持续耗散,当此类气流控制时,低层大气缺乏持续的暖湿水汽补充,难以形成充足的水汽供应条件,且西北气流常与高压系统相伴,其下沉运动抑制了低层空气的上升和对流活动,这种稳定环境阻碍了地表水汽向高空的输送,导致低层水汽难以有效聚集,这与本文的研究结果相一致。

2.3.2 热力条件及不稳定能量 冰雹的发生需要一定的热力条件及较强的不稳定能量,选取对流有效位能(CAPE)、K指数(K)、总指数(TT)、700 hPa与500 hPa温度差(T_{75})、500 hPa温度(T_{500})和700 hPa温度(T_{700})对陇东冰雹热力及不稳定潜势进行分析。CAPE的中位数和平均值低涡型最大(图5a),平均值高达 $677 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;西北气流型次之,为 $520 \sim 540 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;低槽型最低,为 $424 \sim 537 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。K指数

中位数和平均值低涡型和低槽型相近(图5b),为 $25 \sim 27^\circ \text{C}$,西北气流型最低,为 $22 \sim 23^\circ \text{C}$ 。TT的中位数(图5c)和平均值三者均在 $45 \sim 46^\circ \text{C}$,差距很小。 T_{75} 西北气流型最大(图5d),达到 19°C ,其余2类均在 $17 \sim 18^\circ \text{C}$; T_{500} 的中位数和平均值低涡型最高(图5e),为 -7°C 左右,低槽型和西北气流型明显低于低涡型,均在 -9°C 左右; T_{700} 低槽型为 $8.6 \sim 9.3^\circ \text{C}$ (图5f),低涡型和西北气流型相近,约为 $10 \sim 11^\circ \text{C}$ 。

热力及不稳定能量总体为:低涡型>低槽型>西北气流型。除了TT以外,其余的参数在不同类型冰雹表现上均具有明显的差别,低槽型K指数较大,低涡型CAPE较大、 T_{500} 和 T_{700} 较高,西北气流型 T_{75} 较大。表明低槽型具有较强层结不稳定,低涡型具有较高能量条件,西北气流型具有较大温度直减率。究其原因主要与各类型多发时段有关,低槽型多发于5—6月,该时段陇东地区主要受大陆高压控制,低层空气迅速增温,而中层仍然受西风带冷空气影响,强垂直温度梯度增加了层结不稳定,且该时段锋面系统活跃,冷暖气团频繁交汇易触发不稳定能量的释放^[31];低涡型主要发生在夏季,陇东夏季高温多雨,大气不稳定能量明显增强,因此,该类冰雹普遍呈现出较高的中低层热力条件及对流有效位能。而西北气流型各月均有发生,尤其是4月和10月冰雹过程只有该类型,春、秋季节的热力条件及不稳定能量明显弱于盛夏,因此西北气流型热力及不稳定能量条件最弱。

2.3.3 动力条件 动力不稳定是对流能否发展和维持的关键因素,在表征动力不稳定的参量中,垂直风切变最具有代表性^[32]。对冰雹过程的0~6 km垂直风切变(SHR)进行分析发现(图6a),低槽型和低

涡型中位数和平均值分别为 $9.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $10\sim 11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,西北气流型大于 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,达到了中等强度垂直风切变标准。说明西北气流型强的动力抬升条件提升了强对流云团的组织发展,弥补了该类型较低的水汽及能量条件。

2.3.4 特殊层高度 适宜的 0°C 层和 -20°C 层高度是产生冰雹的关键因子,高度过低无法形成大冰雹,高度过高冰雹降落到地面的过程中有可能融化^[33]。而 -20°C 与 0°C 之间的厚度越小条件不稳定性越大^[34]。 H_0 的中位数和平均值低槽型最低(图

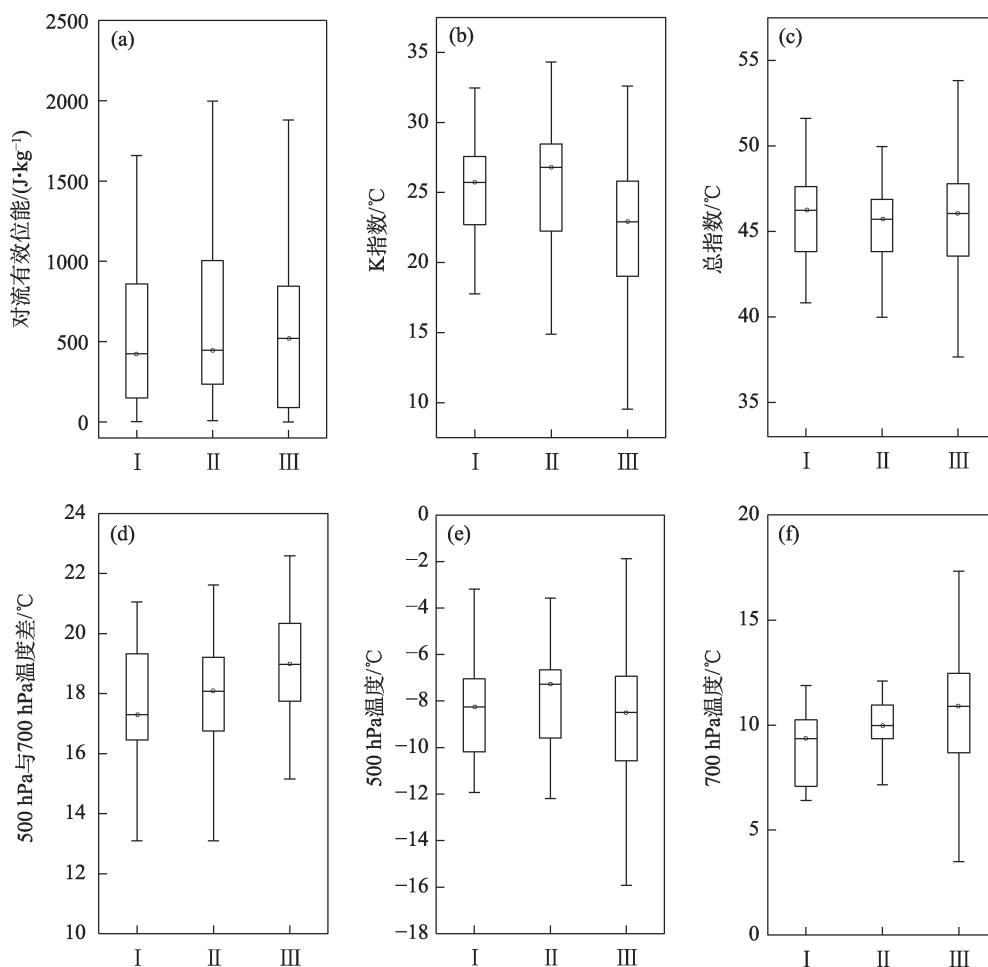


图5 陇东黄土高原3类冰雹天气型热力及不稳定能量参数箱线图

Fig. 5 Boxplots of thermal and instability energy parameters for three hail weather types over the Longdong Loess Plateau

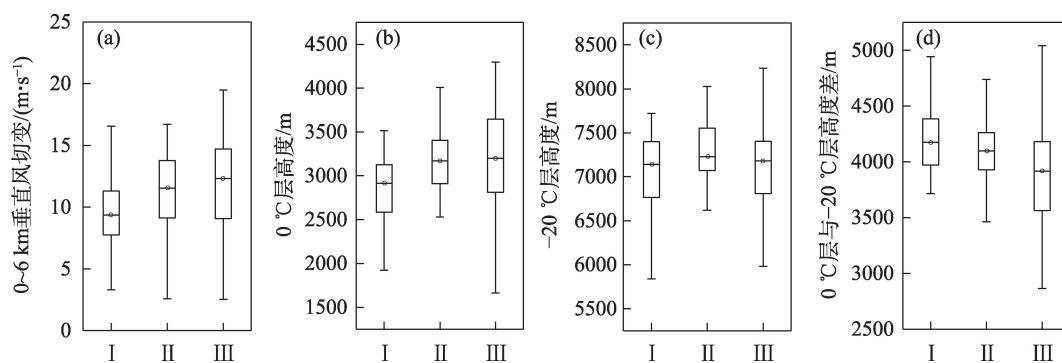


图6 陇东黄土高原3类冰雹天气型动力参数及特殊层高度参数箱线图

Fig. 6 Boxplots of dynamic parameters and special layer height parameters for three hail weather types over the Longdong Loess Plateau

6b), 约为 2800 m, 低涡型与西北气流型相近, 均为 3200 m; $H_{(-20)}$ 的中位数和平均值低槽型和西北气流型差距较小(图 6c), 均在 7100 m 左右, 低涡型最高, 约为 7300 m; ΔH 的中位数(图 6d)和平均值低槽型最厚, 达 4200 m, 低涡型次之, 约为 4100 m, 西北气流型不足 4000 m。

低槽型 H_0 和 $H_{(-20)}$ 高度低, ΔH 厚; 低涡型 H_0 和 $H_{(-20)}$ 高度高, ΔH 中等; 西北气流型 H_0 高, $H_{(-20)}$ 低, ΔH 最薄。理论上来说, ΔH 越厚, 冰雹增长空间充足, 有利于大冰雹的产生^[31], 然而冰雹直径与云中过冷水含量、上升气流强度及大气不稳定性等多种因子有关, 陇东地区西北气流型冰雹 ΔH 最薄, 在大冰雹中占比达 45%, 且特大冰雹中占比 66%; 可见陇东黄土高原大冰雹的出现需要适宜的 ΔH , 普遍在 3000~3800 m。

3 类冰雹天气物理量场存在显著的差异, 低槽型主要发生在“强层结不稳定弱切变”条件下, 具有较低的 H_0 和 $H_{(-20)}$ 以及较厚的 ΔH ; 低涡型主要发生在“高能中切变”条件下, 具有较充沛的低层水汽及较高的 H_0 和 $H_{(-20)}$; 西北气流型主要发生在“低能强切变”条件, 具有较干的中低层层结及较薄的 ΔH 。

2.4 冰雹潜势预报指标及效果检验

2.4.1 预报指标 若简单采用关键参数的最低、最高值作为物理量阈值, 则出现虚报的概率极大, 且选取的物理量因子不同, 预报效果也不同, 如选取的因子代表性不佳, 反而会对预报效果造成干扰。本文基于标准差、变异系数(表略)结合箱线图特征选取 14 个物理量中数据质量好, 具有代表性的物理量进行预报指标构建。

Q_{700} 、 RH_{700} 、 K 、 TT 、 T_{75} 、 H_0 、 $H_{(-20)}$ 、 ΔH 的变异系数均较小, 尤其是 TT 、 T_{75} 、 H_0 、 $H_{(-20)}$ 、 ΔH 的变异系数均低于 15%, 数据集中程度高, 保留以上 8 个参数; SHR 虽然变异系数在 31%~37%, 但作为冰雹发生的动力不稳定参数, 具有较强的代表意义, 因此也作为保留参数。以上 9 个物理量参数根据天气学分型进行分类统计, 计算 25%、75% 百分位值。与冰雹发生概率呈正相关的物理量, 阈值 $\geq 25\%$ 分位值, 如 Q_{700} 、 RH_{700} 、 K 、 TT 、 T_{75} 、 SHR ; 与冰雹发生概率呈负相关的物理量, 阈值 $\leq 75\%$ 分位值, 如 ΔH ; H_0 和 $H_{(-20)}$ 需要在适宜范围内才有利于冰雹产生, 因此阈值采用 25%~75% 分位值。以上述依据得出各个冰雹天气类型物理量参数预报阈值(表 3)。

表 3 陇东黄土高原冰雹天气物理量参量潜势预报阈值

Tab. 3 Potential forecast thresholds of physical parameters for hail weather in the Longdong Loess Plateau

| 物理量 | 低槽型 | 低涡型 | 西北气流型 |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| $Q_{700}/(g \cdot kg^{-1})$ | ≥ 5.1 | ≥ 5.2 | ≥ 4.8 |
| $RH_{700}/\%$ | ≥ 57 | ≥ 53 | ≥ 42 |
| $K/^\circ C$ | ≥ 23 | ≥ 22 | ≥ 19 |
| $TT/^\circ C$ | ≥ 44 | ≥ 44 | ≥ 44 |
| $T_{75}/^\circ C$ | ≥ 16.5 | ≥ 16.8 | ≥ 17.7 |
| $SHR/(m \cdot s^{-1})$ | ≥ 7.7 | ≥ 9.0 | ≥ 9.1 |
| H_0/m | 2585~3126 | 2910~3408 | 2813~3651 |
| $H_{(-20)}/m$ | 6766~7420 | 7070~7559 | 6808~7409 |
| $\Delta H/m$ | ≤ 4400 | ≤ 4270 | ≤ 4183 |

2.4.2 预报效果检验 针对 2024 年 4—9 月发生的 21 d 冰雹过程, 通过命中率(POD)、空报率(FAR)和临界成功指数(CSI)对预报指标的可用性进行检验(表 4), 21 d 冰雹过程中包括低槽型 4 d, 低涡型 7 d, 西北气流型 10 d。分型预报效果检验中, 低涡型预报效果最佳, POD 达到了 88%, 其次是西北气流型 75%, 低槽型最低 60%。西北气流型存在空报率较高的问题, 达到了 33%, 可能是由于西北气流型各月均有发生, 阈值设定相对宽泛, 后续研究中通过逐月样本的积累可进一步细化指标, 降低空报率; 低槽型命中率偏低, 主要由于历年低槽型多发于 5—6 月, 而 2024 年 4 月陇东较历年整体气温偏高, 有利于对流活动的发展, 且 4 月下旬冷空气活跃^[35], 该月低槽型冰雹占比达全年的 75%, 异常偏多, 受此影响该类型预报效果相对欠佳。冰雹潜势预报指标对 2024 年冰雹预报的整体命中率达到 78%, 空报率 25%, 临界成功指数 62%, 预报效果较好。

表 4 冰雹预报效果检验

Tab. 4 Verification of hail forecast performance

| | 命中率/% | 空报率/% | 临界成功指数/% |
|----------|-------|-------|----------|
| 2024 年冰雹 | 78 | 25 | 62 |
| 低槽型 | 60 | 0 | 60 |
| 低涡型 | 88 | 22 | 70 |
| 西北气流型 | 75 | 33 | 55 |

3 结 论

利用 2012—2023 年陇东冰雹观测资料及 ERA5 再分析资料对陇东黄土高原冰雹天气进行分型, 并对物理量参数进行对比分析, 得出如下主要结论:

(1) 陇东冰雹天气环流分型可分为低槽型、低涡型、西北气流型3类,西北气流型为该区域冰雹的主要环流型。环流特征上,低槽型表现为高空深厚低槽或短波槽东移伴随冷平流;低涡型为高空低涡东移伴随冷空气南下,低层常有闭合涡旋;西北气流型陇东高空为一致西北风,槽线及切变线不明显;3类冰雹的落区均位于700 hPa切变线及地面辐合线附近。

(2) 3类冰雹统计特征存在显著季节差异。月际分布上,低槽型主要发生在春末夏初,低涡型主要发生在夏季,西北气流型4—10月均有发生。年际分布上,西北气流型每年均有发生,低槽型和低涡型具有间断性发生的特征。

(3) 3类冰雹天气环境场差异显著。水汽参量特征显示,三者均为上干下湿的层结特征,中层普遍干燥,低层表现为低涡型>低槽型>西北气流型。热力及不稳定能量方面,表现为低涡型>低槽型>西北气流型。动力抬升条件西北气流型明显高于其余两类,达到了中等强度垂直风切变标准。特殊层高度显示,低涡型和西北气流型的 H_0 均高于3200 m,低槽型仅为2800 m;低槽型和西北气流型的 $H_{(-20)}$ 均为7100 m左右,低涡型高于7300 m;西北气流型的 ΔH 最薄,仅3900 m左右。分型特征显示,低槽型以“强不稳定弱切变”为特征,特殊层高度低且 ΔH 厚;低涡型表现为“高能中切变”,低层水汽充沛且特殊层高度高;西北气流型则对应“低能强切变”,中低层干燥且 ΔH 薄。

(4) 根据物理量参数的数据质量及代表意义,选取9个参数构建了陇东冰雹物理量预报阈值,并针对2024年21 d冰雹过程进行了预报效果检验,命中率达到78%,分型预报指标预报效果良好,具有较好的应用价值。

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] 刘新伟, 蒋盈沙, 黄武斌, 等. 基于雷达产品和随机森林算法的冰雹天气分类识别及预报[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 898-908. [Liu Xinwei, Jiang Yingsha, Huang Wubin, et al. Classified identification and nowcast of hail weather based on radar products and random forest algorithm[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(4): 898-908.]
- [3] 赵海英, 王秀明, 周晋红. 山西高原大冰雹与小冰雹的环境参量对比分析[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 417-426. [Zhao Haiying, Wang Xiuming, Zhou Jinhong. Comparative analysis of environmental parameters of severe and less severe hail events in Shanxi Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(2): 417-426.]
- [4] Beal A, Hallak R, Martins L D, et al. Climatology of hail in the triple border Paraná, Santa Catarina (Brazil) and Argentina[J]. Atmospheric Research, 2020, 234: 104747.
- [5] 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.]
- [6] García-Ortega E, López L, Sánchez J. Atmospheric patterns associated with hailstorm days in the Ebro Valley, Spain[J]. Atmospheric Research, 2010, 100(4): 401-427.
- [7] Sfiică L, Istrate V, Hrițac R, et al. The continental and regional synoptic background favorable for hailstorms occurrence in North-Eastern Romania[J]. Progress in Physical Geograph, 2023, 47(1): 3-31.
- [8] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 449-451. [Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Synoptic Principles and Methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 449-451.]
- [9] 钟敏, 郭英莲, 陈璇, 等. 基于客观分型的冰雹概率预报方法研究[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 934-944. [Zhong Min, Guo Yinglian, Chen Xuan, et al. Study on hail probability forecast method based on objective classification[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 934-944.]
- [10] 袁潮, 杨文艳, 易希延, 等. 渤海湾北部地区冰雹天气分型及预报方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 69-75. [Yuan Chao, Yang Wenyan, Yi Xiyen, et al. Basic synoptic situation classification and forecasting methods of hail in northern Bohai Bay[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(5): 69-75.]
- [11] 王培涛, 王凤娇, 张婷婷. 山东滨州地区冰雹天气分型和预报方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 33-40. [Wang Peitao, Wang Fengjiao, Zhang Tingting. Study on classification of synoptic systems and forecasting method of hail in Binzhou Shandong Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 33-40.]
- [12] 莫丽霞, 高宪权, 欧徽宁, 等. 基于数值模式产品的广西冰雹客观预报方法研究[J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 480-489. [Mo Lixia, Gao Xianquan, Ou Huining, et al. Study of objective forecast method of Guangxi hail based on numerical model product[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(3): 480-489.]
- [13] 汤兴芝, 黄治勇, 张荣, 等. 2010—2020年全国冰雹灾害事件时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(2): 223-231. [Tang Xingzhi, Huang Zhiyong, Zhang Rong, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of hail disaster events in China from 2010 to 2020[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(2): 223-231.]

- [14] 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.]
- [15] 张可心, 赵玉娟, 李美瑜. 1978—2023年陇东冰雹气候特征及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2025, 48(8): 1374–1384. [Zhang Kexin, Zhao Yujuan, Li Meiyu. Analysis of hail climate characteristics and influencing factors in eastern Gansu Province from 1978 to 2023[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(8): 1374–1384.]
- [16] 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.]
- [17] 雷瑜, 黄武斌, 黎倩, 等. 不同天气分型下甘肃河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.]
- [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] 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 climate features and radar echo of the hail weather in Pingliang of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 373–377.]
- [20] 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.]
- [21] 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. Analysis on the activity characteristics and influence factor of two kinds of summer thunderstorms in East Gansu[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(5): 64–70.]
- [22] 王立媛, 张勇. 甘肃省土地利用转型时空格局演化及多情景模拟[J]. 干旱区研究, 2025, 42(4): 695–707. [Wang Liyuan, Zhang Yong. Evolution of spatiotemporal patterns and multiscenario simulation of land use transition in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2025, 42(4): 695–707.]
- [23] 曹永华, 杨泽华, 尹晓宁, 等. 乡村振兴背景下静宁苹果产业链发展现状及对策[J]. 北方园艺, 2025(2): 123–129. [Cao Yonghua, Yang Zehua, Yin Xiaoning, et al. Development status and countermeasures of Jingning apple industry chain under the background of rural revitalization[J]. Northern Horticultural, 2025(2): 123–129.]
- [24] 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.]
- [25] 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]. Scientia Sinica (Terrae), 2024, 54(9): 2929–2947.]
- [26] 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.]
- [27] 贾浩松, 王璐璐. 驻马店市2016—2020年暖季极端短时强降水天气分型与物理量特征[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(6): 37–45. [Jia Haosong, Wang Lulu. Synoptic classification and physical characteristics of extreme short-time heavy precipitation in Zhumadian during the warm season of 2016–2020[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2024, 47(6): 37–45.]
- [28] 赵爱芳, 张明军, 孙美平, 等. 1960—2010年中国西南地区0℃层高度变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 994–1006. [Zhao Aifang, Zhang Mingjun, Sun Meiping, et al. Changes in 0℃ isotherm height of Southwest China during 1960–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 994–1006.]
- [29] 张世芬, 罗汉, 庞朝云, 等. 甘肃省东部冰雹特征及预警指标分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 120–127. [Zhang Shifen, Luo Han, Pang Zhaoyun, et al. Study on hail characteristics and forewarning indicators in the east of Gansu Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(2): 120–127.]
- [30] 竹利, 王厚伯. 川东北一次西北气流型强冰雹天气的成因分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(3): 242–247. [Zhu Li, Wang Houbo. Cause analysis on a heavy northwest airflow type hailstorm events occurred in the Northeast of Sichuan Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(3): 242–247.]
- [31] 林纾, 陆登荣. 西北地区初夏冰雹及其环流背景气候特征[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 400–404. [Lin Shu, Lu Dengrong. Climatic characteristics of hails and their circulation patterns in early summer over Northwest China[J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(4): 400–404.]
- [32] 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.]
- [33] 濮文耀, 李红斌, 宋煜, 等. 0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用[J]. 气象, 2015, 41(8): 980–985. [Pu Wenyao, Li Hongbin, Song Yu, et al. Analysis and application of the effect of 0℃ layer height on melting hail[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(8): 980–985.]
- [34] 魏勇, 彭军, 热苏力·阿不拉, 等. 新疆天山北坡中部一次冰雹天气成因分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 771–777, 802. [Wei Yong, Peng Jun, Resuli Abula, et al. Comprehensive analysis of a severe hail in the middle section on Northern slope of Tianshan Mountain in Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 771–777, 802.]
- [35] 严大春, 方翀. 2024年4月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2024, 50(7): 897–904. [Yan Dachun, Fang Chong. Analysis of the April 2024 atmospheric circulation and weather[J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(7): 897–904.]

Meteorological classification and physical parameter characteristics of hail in the Longdong Loess Plateau

ZHANG Kexin¹, ZHU Baizhen¹, GOU Shang², ZHANG Hongfen¹,
HE Min³, WANG Juan¹

(1. Qingyang Meteorological Bureau, Qingyang 745000, Gansu, China; 2. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Baiyin Meteorological Bureau, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: Using conventional meteorological observation data, hail observation data, and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 reanalysis dataset, the K-means clustering method was applied to classify the synoptic patterns of 53 hail events in the Longdong Loess Plateau from 2012 to 2023. Meanwhile, the characteristic features and threshold values of key physical parameters for different hail types were summarized. The results show that: (1) The large-scale circulation associated with hail events in Longdong can be categorized into three types: low-trough type (20.8%), low-vortex type (22.6%), and northwest airflow type (56.6%). The 700 hPa shear line and surface convergence line correspond well with the hail occurrence areas for all types. (2) The low-trough type mainly occurs in late spring and early summer (May-June); the low-vortex type mainly occurs in summer (June-August); and the northwest airflow type occurs from April to October, with the highest frequency in June (37%). (3) Diagnostic analysis of physical parameters indicates significant differences in environmental field characteristics among the three hail types. The low-trough type is characterized by strong stratification instability and weak shear, with a large K-index and a low special-layer height. The low-vortex type is characterized by high energy and moderate shear, with large Convective Available Potential Energy, abundant low-level moisture, and a high special-layer height. The northwest airflow type is characterized by low energy and strong shear, with dry stratification in the middle and lower levels, an average 0–6 km vertical wind shear $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and thin thickness of the 0℃ and -20℃ layers. (4) Nine parameters were selected to establish forecast thresholds for hail in Longdong. Validation results indicate that these thresholds have practical reference value and can provide quantitative reference indicators for hail potential forecasting in the region.

Keywords: hail; synoptic classification; environmental parameters; forecast thresholds; Longdong Loess Plateau