

张玉荣,姚晓娟,白舜耀,等.1991—2020年暖季河套灌区强对流天气主要流型及环境参量特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):76–83.  
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 1991—2020年暖季河套灌区强对流天气 主要流型及环境参量特征分析

张玉荣<sup>1</sup>,姚晓娟<sup>2\*</sup>,白舜耀<sup>1</sup>,赵明明<sup>1</sup>

(1.巴彦淖尔市气象局,内蒙古 临河 015000;2.内蒙古自治区气象局,内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:**利用常规气象观测资料、区域自动站观测资料及ERA5再分析资料,对河套灌区1991—2020年542个冰雹个例和281个短时强降水个例主要流型及环境参量特征进行分析。结果显示:(1)短时强降水天气主要有新疆低槽(涡)、东北冷涡、蒙古冷涡、西南气流等4类流型,冰雹天气主要有蒙古冷涡、西北气流、东北冷涡、巴尔喀什湖冷涡等4类流型;(2)河套灌区短时强降水和冰雹各关键参数预报阈值均有差异,最低阈值的建议值采用箱线图25%百分位值,其中 $\Delta T_{850-500}$ 分别为26和33℃,K指数均值分别为27和35℃,CAPE均值分别为515和405 J·kg<sup>-1</sup>,0~6 km垂直风切变均为 $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,0℃层高度均值分别为4 656和4 069 m,-20℃层高度均值分别为8 070和7 054 m;(3)冰雹需要更大的K指数、 $\Delta T_{850-500}$ 以及更强的低层暖空气,同时冰雹有更低的0℃层和-20℃层高度,较低的0℃层高度可以防止冰雹下落过程融化。此外,下垫面因子对不同强对流天气的影响程度也不同,海拔高度是影响河套灌区冰雹分布的主要因素。

**关键词:**强对流天气;短时强降水;冰雹;物理量

**中图分类号:**P458.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-0799(2024)02-0076-08

在全球气候变暖的背景下,极端天气、水旱灾害不仅多发重发,其突发性、极端性、不可预见性也将日益凸显,尤其是冰雹和短时强降水会破坏农作物、引发洪水或山体滑坡,甚至造成人员伤亡。开展强对流天气研究,揭示短时强降水、冰雹的客观规律,对预防气象灾害有现实意义<sup>[1-5]</sup>。多年来科学家们对强对流天气已经进行了大量的研究,迄今为止,大多数研究都采用指标研究和机制研究<sup>[6-14]</sup>。在指标研究中,研究人员将对流层中、低层的温湿度特征与风变化相结合,总结了大气能量变化的相关指标<sup>[15]</sup>,从而探究强对流天气发生发展规律<sup>[16]</sup>,但这些指标大多

被用作评价大气状态的单项指标,其相关性往往并不清楚,导致强对流天气的早期预报预警的准确性并不高;在机理研究中,主要研究强对流天气系统的结构和发展机制,其机制与大气动力学和热力学密切相关,然而,动力变化和热力变化的特征因季节和地区而异,因此,很难提出单一的能够涵盖强对流天气的统一标准<sup>[17-18]</sup>。

河套灌区位于大陆深处,四季分明,雨热同季,是中温带大陆性气候与季风气候的交界区,也是亚洲最大的一首制自流引水灌区,受东亚夏季风影响,加之复杂的地质条件,极易引发山洪、农田渍涝等次生灾害。此外,阴山山脉横亘东西,山前为河套平原,山后是蒙古高原,受地形影响易形成强烈的上升气流,为强对流天气的形成发展提供有利条件,每年因雷雨大风、冰雹等气象灾害给农业造成较大的经济损失。

早期由于巴彦淖尔市观测站网稀疏,对本地强

收稿日期:2023-08-16;修回日期:2023-10-09

基金项目:内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202313)

作者简介:张玉荣(1989—),女,工程师,主要从事天气预报预测。

E-mail:bsqxj-zyr@163.com

通信作者:姚晓娟(1990—),女,工程师,主要从事预报预测。E-mail:

yaoxiaojuan90@163.com

对流天气的发生与不稳定能量的分布(热力条件)、水汽饱和程度(水汽条件)和一些触发抬升机制(动力条件)研究认识不足。近年来,区域自动气象站的建设和数值天气预报的大力发展,为强对流天气研究提供了很好的数据基础。本文针对当地短时强降水、冰雹两类主要的强对流天气,利用地面气象观测站数据、本地防雷作业记录、高程数据(DEM)和归一化植被指数(*NDVI*),对比分析短时强降水和冰雹天气主要流型及关键物理量指标差异,并对其原因进行初探,旨在提升当地预报员的认知水平和强对流潜势预报能力,为当地气象防灾减灾工作提供决策参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料选取

短时强降水实况资料来源于全国综合气象信息共享系统(天擎),包括巴彦淖尔市1991—2020年9个国家气象观测站(临河区、磴口县、杭锦后旗、五原县、乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗、海力素、大余太)和2006—2020年160个区域自动雨量站逐日地面观测数据,将雨量 $\geq 20$  mm/h作为个案筛选标准,筛选出281个短时强降水个例。冰雹实况资料来源于1991—2020年巴彦淖尔市气象局防雷作业记录,筛选出542个降雹个例。同时利用地理空间数据云和资源环境科学与数据中心的90 m分辨率DEM数据和1 km分辨率的*NDVI*数据。

环境场和物理量数据来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析数据,其时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。它同化了来自地面风观测、无线电探空仪、空投探空仪、飞机测量以及气象卫星等数据<sup>[19]</sup>。

### 1.2 研究方法

本文采用强对流天气流型辨识方法<sup>[20]</sup>和基于配料法的预报方法<sup>[21]</sup>,采用逐个分析与统计分析相结合的方式研究环流背景和物理量特征。首先收集所有冰雹和短时强降水实况资料,逐个分析每一个研究对象的局地特征,然后总结它们的环境场和物理量指标。利用最邻近值方法做空间匹配,将ERA5数据匹配到站点数据上。

## 2 强对流天气气候特征分析

### 2.1 环流背景及天气分型

根据ERA5再分析资料,对281个短时强降水个例的500 hPa影响系统进行合成分析,发现主要

有新疆低槽(涡)(图1a)、东北冷涡(图1b)、蒙古冷涡(图1c)、西南气流(图1d)4类流型。其中,新疆低槽(涡)是河套灌区短时强降水的主要影响系统,占总过程的37.26%,500 hPa低槽(涡)在 $70^\circ \sim 100^\circ \text{E}$ 、 $45^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ 范围内;其次是东北冷涡,冷涡中心至少有2根闭合等高线,中高纬环流经向度较大,占总过程的16.62%;蒙古冷涡占总过程的10.07%,河套灌区位于冷涡底部,新疆至蒙古国均受低压带控制;而副高外围西南气流仅占总过程的7.08%,副高西伸北抬,新疆附近和蒙古为宽广低槽活动区。

根据ERA5再分析资料,对542个冰雹个例的500 hPa影响系统进行合成分析,发现主要有蒙古冷涡、西北气流、东北冷涡、巴尔喀什湖冷涡等4类流型(图1e~1h)。其中,蒙古冷涡是河套灌区冰雹的主要影响系统,占总过程的29.8%,500 hPa低槽(涡)在 $90^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 、 $45^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 范围内;其次是西北气流,500 hPa欧亚范围呈两槽一脊,中高纬环流经向度较大,位于 $70^\circ \sim 100^\circ \text{E}$ 、 $45^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ 范围内,占总过程的15.98%;东北冷涡占总过程的12.44%,冷涡中心有至少2根等高线,河套灌区位于涡后偏北气流中;而巴尔喀什湖冷涡仅占总过程的7.72%,冷涡形态完整,外围等压线密集,河套灌区位于涡前偏南气流中,偏南风较大。

### 2.2 时间变化特征

由1991—2020年河套灌区短时强降水和冰雹年度发生次数(图2a)可知,短时强降水年平均发生次数为7.4次,1997年和2001年发生次数最多,为13次。1993、1995、1999、2019年均发生12次,2006年11次,其余年均小于10次;冰雹年平均发生次数为2.1次,其中2006年发生最多,为12次,2020年7次,1997、2015年均均为6次,其余年小于5次,且冰雹年平均发生次数有减小趋势。由短时强降水和冰雹不同时次发生次数(图2b)可知,短时强降水多发生在凌晨、午后和傍晚,冰雹多发生在凌晨和中午。由图2c可知,短时强降水8月发生次数最多,为44次,7月次之;冰雹7月发生次数最多,为46次,8月次之。由短时强降水和冰雹不同地区发生次数(图2d)可知,短时强降水发生次数最多的地区是乌拉特前旗,为113次;其次是磴口县为53次,其余地区是18~26次;冰雹发生次数最多的地区是临河区146次,其次为五原县110次,乌拉特前旗90次,杭锦后旗和乌拉特中旗均为71次,乌拉特后旗仅为6次。

### 2.3 空间变化特征

图3为河套灌区短时强降水和冰雹发生频次空

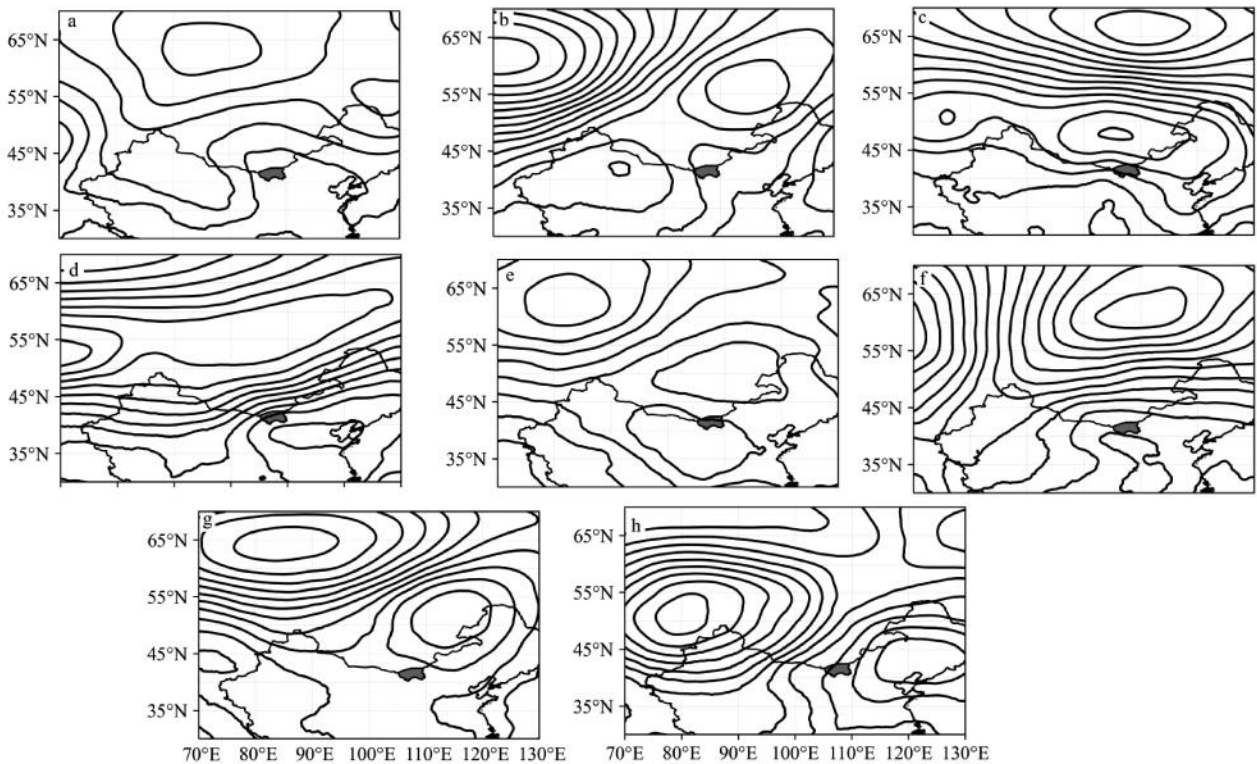


图1 河套灌区短时强降水天气500 hPa高度场新疆低槽(涡)(a)、东北冷涡(b)、蒙古冷涡(c)、西南气流(d)4类主要流型和冰雹天气500 hPa高度场蒙古冷涡(e)、西北气流(f)、东北冷涡(g)、巴尔喀什湖冷涡(h)4类主要流型

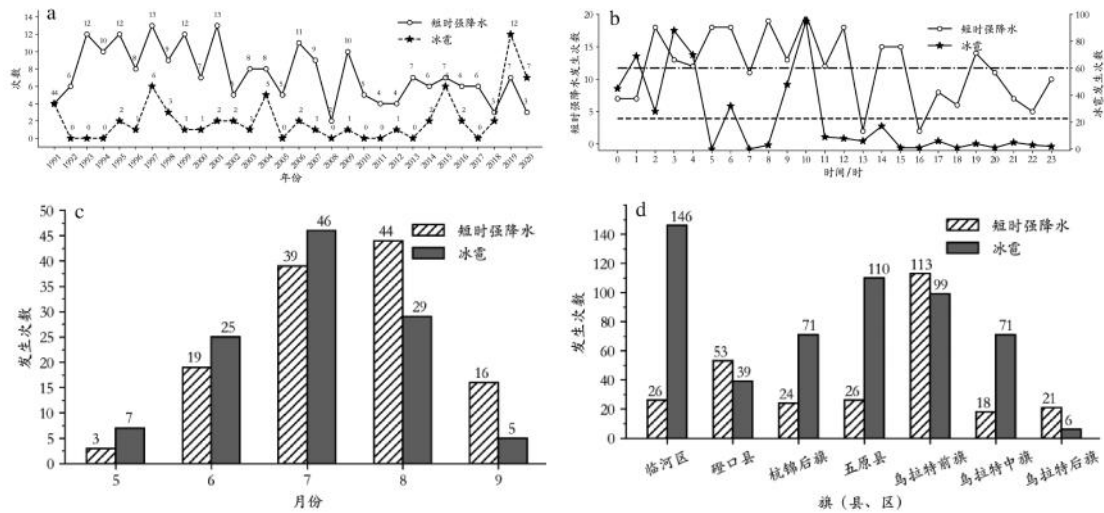


图2 河套灌区强对流天气的年(a)、日(b)、月(c)及区域变化(d)

间分布,同时结合 DEM 和 NDVI 进行分析。河套灌区短时强降水和冰雹年均频数分别为 7.4 和 2.1 次,其空间分布差异明显,短时强降水(图 3a)西南部多,东部少,高频区磴口县(>14 次)是低频区乌拉特前旗(<5 次)的 3.3 倍。冰雹(图 3b)主要发生在磴口县、临河区、杭锦后旗、五原县。下垫面的差异是影响强对流天气空间分布的重要原因,田晨等<sup>[2]</sup>将影响强对流天气的下垫面因素归纳为海拔高度、植被覆盖和地表特征等,本文主要针对前两项进行简要

分析。从地形高程(图 3c)和强对流天气的空间分布对比来看,冰雹的高频区对应着阴山沿山一线,主要由地形差异诱发的局地辐合<sup>[23]</sup>或环流强迫<sup>[24]</sup>等原因造成,同时与地形高度较高,冰相粒子来不及融化有关。进一步比较强对流天气频数和 NDVI(图 3d)的空间分布情况,发现高植被覆盖区更有利于对流天气发生,原因可能是植被覆盖率越高,越有利于增加层结不稳定并诱发一定的环流<sup>[25]</sup>。同时河套灌区下垫面复杂,有平原、河流、山脉和高原,复杂的下垫面条



件和地形是影响河套灌区冰雹分布的主要因素。

3 对流局地环境特征分析

3.1 参数选取与阈值对比分析

河套灌区雨热同季，短时强降水和冰雹多发生在暖季，影响对流天气发生所必须的 3 个基本要素为水汽条件、层结不稳定和对流触发条件，此外中层干冷空气的侵入、适当的 0℃层高度和-20℃层高度也是冰雹形成的重要指标。表 1 给出了短时强降水、冰雹发生前对流参数平均值及阈值。

由于河套灌区降水主要发生在 6—8 月，尤其集中在“七下八上”，对流天气多，且分布不均匀，常常

一场降水就会下到年降水量的 1/3 到 1/2，不同时间的降水特点明显不同，需要对各月的对流参数统计分析，表 2 和表 3 分别给出了 5—9 月各月冰雹和短时强降水发生前对流参数平均值及阈值。

3.2 静力不稳定

大气静力稳定度常用 850 和 500 hPa 之间的温差  $\Delta T_{850-500}$  表征，其值越大，表示条件不稳定性越强，由(图 4)可知，由短时强降水和冰雹发生前  $\Delta T_{850-500}$ ，短时强降水箱线图的 25%~75%百分位数在 20~30℃，平均 26℃；冰雹箱线图的 25%~75%百分位数在 30~35℃，平均 33℃。冰雹与强降水平均温差相差 7℃，表明冰雹天气所需的高层冷空气更强，主要是

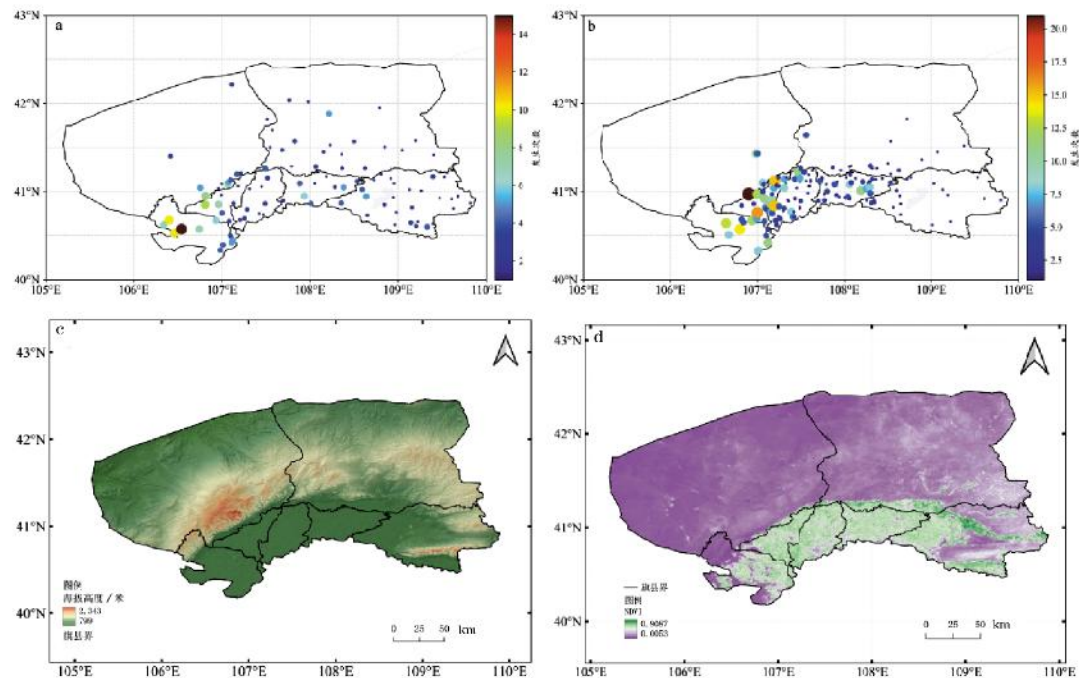


图 3 河套灌区短时强降水发生频次空间分布(a)、冰雹天气发生频次空间分布(b)、巴彦淖尔市高程地形(c)和 NDVI(d)

表 1 短时强降水、冰雹发生前对流参数平均值及阈值

| 物理量                                                                           | 冰雹发生前<br>平均值 | 冰雹发生前<br>阈值   | 强降水发生前<br>平均值 | 强降水发生<br>前阈值  |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$                                         | 33           | (30,40)       | 26            | (22,37)       |
| K 指数/ $^{\circ}\text{C}$                                                      | 35           | (29,41)       | 27            | (24,37)       |
| 总指数 $TT/^{\circ}\text{C}$                                                     | 51           | (38,57)       | 46            | (36,54)       |
| A 指数/ $^{\circ}\text{C}$                                                      | -18          | (-40,8)       | -17           | (-45,2)       |
| 对流有效位能/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$                                       | 405          | (26,2367)     | 515           | (0,2251)      |
| 0~3 km 垂直风切变/ $(10^{-3}\text{ s}^{-1})$                                       | 6            | (0,15)        | 8             | (1,23)        |
| 0~6 km 垂直风切变/ $(10^{-3}\text{ s}^{-1})$                                       | 7            | (0,28)        | 7             | (0,22)        |
| 0℃层高度/m                                                                       | 4 069        | (2 427,5 004) | 4 656         | (3 387,5 730) |
| -20℃层高度/m                                                                     | 7 054        | (5 242,8 713) | 8 070         | (6 090,9 103) |
| 地面至 500 hPa 水汽通量散度/ $(10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | -9           | (-272,291)    | -60           | (-592,253)    |

表 2 5—9 月各月冰雹发生前对流参数平均值

| 月份                                       | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$    | 33    | 33    | 32    | 32    | 32    |
| 0℃层高度/m                                  | 3 431 | 3 814 | 4 239 | 4 272 | 3 530 |
| -20℃层高度/m                                | 6 308 | 6 704 | 7 291 | 7 288 | 6 364 |
| K 指数/ $^{\circ}\text{C}$                 | 30    | 32    | 36    | 37    | 32    |
| A 指数/ $^{\circ}\text{C}$                 | -19   | -17   | -16   | -20   | -26   |
| 总指数 $TT/^{\circ}\text{C}$                | 52    | 51    | 51    | 52    | 52    |
| 0~3 km 垂直风切变/ $(10^{-3} \text{ s}^{-1})$ | 6     | 5     | 5     | 6     | 7     |
| 0~6 km 垂直风切变/ $(10^{-3} \text{ s}^{-1})$ | 11    | 6     | 7     | 8     | 7     |

表 3 5—9 月各月短时强降水发生前  
对流参数平均值

| 月份                                       | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$    | 29    | 29    | 26    | 25    | 25    |
| 0℃层高度/m                                  | 3 729 | 4 122 | 4 800 | 4 821 | 4 236 |
| -20℃层高度/m                                | 6 877 | 7 350 | 8 287 | 8 254 | 7 503 |
| K 指数/ $^{\circ}\text{C}$                 | 32    | 37    | 39    | 37    | 35    |
| A 指数/ $^{\circ}\text{C}$                 | -21   | -20   | -16   | -15   | -21   |
| 总指数 $TT/^{\circ}\text{C}$                | 47    | 49    | 47    | 45    | 46    |
| 0~3 km 垂直风切变/ $(10^{-3} \text{ s}^{-1})$ | 4     | 6     | 8     | 9     | 8     |
| 0~6 km 垂直风切变/ $(10^{-3} \text{ s}^{-1})$ | 5     | 6     | 6     | 8     | 6     |

因为冰雹形成需要高层更低的温度。

3.3 水汽条件

对流天气发生需要丰富的水汽供应,图 5 为短时强降水和冰雹发生前地面(900 hPa)至 100 hPa 比湿( $Q$ )垂直廓线、相对湿度(RH)垂直廓线和温度露点差( $T-T_d$ )垂直廓线。从图中可以看出水汽主要集中在大气中低层,短时强降水在 400 hPa 比湿条件明显差于冰雹,但从相对湿度来看,短时强降水发生的相对湿度基本在 70%以下,而冰雹发生的相对湿度在 70%以上。在 700 hPa 以下,短时强降水的温度露点差接近 0,冰雹的温度露点差较短时强降水大一些,但也在 5℃以下,在 700 hPa 以上温度露点差显著增大。有利于强对流天气发生的上干下湿的环境条件较为明显,但冰雹的发生需要低层更湿的环境条件,可见水汽的垂直分布对区分强天气类型有很好的指示意义。

3.4 能量条件

对流有效位能(CAPE)是强对流天气预报的重要判据,CAPE 越大表明对流系统储存的能量越多。在系统性强降水天气中 CAPE 值较敏感,且与天气发生的地点和时间密切相关。此外,对流天气发生所需 CAPE 值逐月变化明显,其中 7、8 月最大。河套灌区冰雹发生的 CAPE 均值是  $405 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,极大值为  $2\,367 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;短时强降水发生的 CAPE 均值是  $515 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

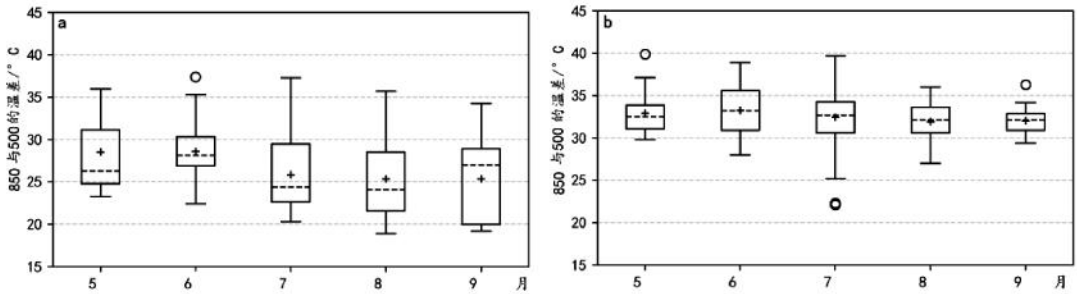


图 4 河套灌区 5—9 月短时强降水(a)和冰雹天气(b)的 850 hPa 与 500 hPa 温差箱线图

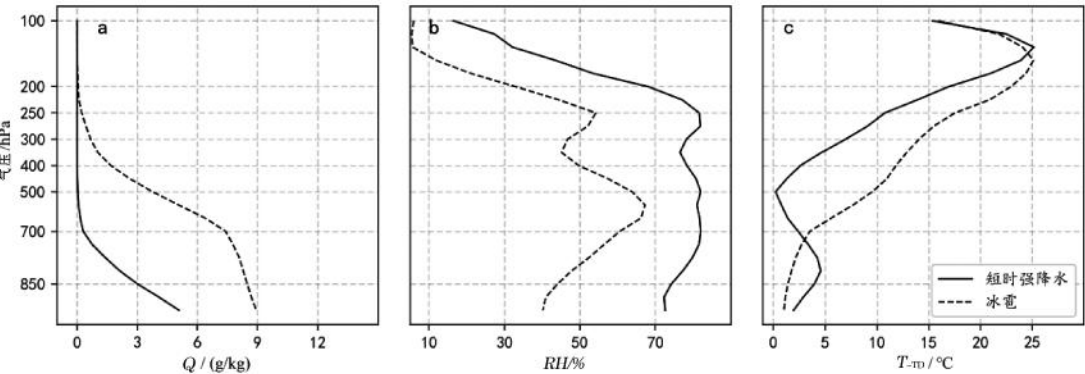


图 5 河套灌区比湿垂直廓线(a)、相对湿度垂直廓线(b)、温度露点差垂直廓线(c)  
(实线代表短时强降水,虚线代表冰雹)

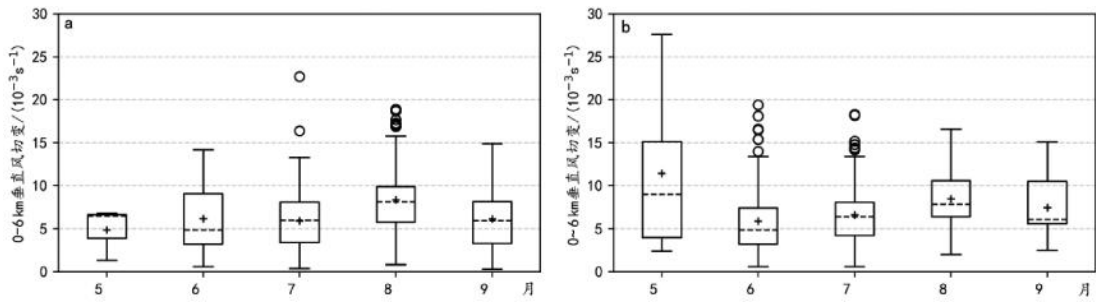


图 6 河套灌区 5—9 月短时强降水(a)和冰雹天气(b)的 0~6 km 垂直风切变箱线图

$\text{kg}^{-1}$ ,极大值为  $2\,513\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。短时强降水和冰雹所需  $CAPE$  值相当,且阈值跨度大,对区分强对流天气类型效果有限。

### 3.5 垂直风切变

垂直风切变是维系强对流发生发展的必要条件。巢纪平等<sup>[26]</sup>指出中纬度地区对流云在中低空主要靠凝结潜热维持,在高空由强风带中获得动能,高空急流下方风速垂直切变大的区域有利于对流发展。从表 1 可以看出,短时强降水和冰雹 0~6 km 垂直风切变均为  $7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。由图 6 可知,短时强降水在不同月份 0~6 km 垂直风切变箱线图 25%~75% 百分位差异不大,其中 8 月最大,平均为  $8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ;冰雹在不同月份 0~6 km 垂直风切变箱线图 25%~75% 百分位差异稍大,主要是 5 月的垂直风切变差异大,相差约  $11\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,这可能是因为 5 月水汽条件和能量条件不足,需要更大的垂直风切变来促进冰雹云的发展,从而确保雹胚增长。

## 4 总结和讨论

利用河套灌区国家地面气象观测资料、区域自动站资料、本地防雷作业记录以及 ERA5 再分析资料,对 281 个短时强降水个例和 542 个冰雹个例的主要流型和局地环境特征进行分析,给出河套灌区短时强降水和冰雹发生的环境参数特征和预报阈值:

(1)河套灌区强对流天气的主要流型因地理位置、地形及纬度不同,其中短时强降水分新疆低槽(涡)、东北冷涡、蒙古冷涡、西南气流等 4 类流型;冰雹分为蒙古冷涡、西北气流、东北冷涡、巴尔喀什湖冷涡等 4 类流型。

(2)短时强降水年平均发生次数为 7.4 次,冰雹年平均发生次数为 2.1 次。短时强降水 8 月发生次数最多,为 44 次,7 月次之;冰雹 7 月发生最多,为 46 次,8 月次之。河套灌区短时强降水和冰雹空间分布差异明显,短时强降水西多东少,冰雹南多北少。

冰雹的高频区对应着阴山沿山一线和植被覆盖率高的区域。

(3)河套灌区短时强降水和冰雹各关键参数预报阈值均有差异,最低阈值的建议值采用箱线图 25% 百分位值,其中  $\Delta T_{850-500}$  分别为 26 和 33  $^{\circ}\text{C}$ ,  $K$  指数均值分别为 27 和 35  $^{\circ}\text{C}$ ,  $CAPE$  均值分别为 515 和 405  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 0~6 km 垂直风切变分别均为  $7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ , 0  $^{\circ}\text{C}$  层高度的均值分别为 4 656 和 4 069 m, -20  $^{\circ}\text{C}$  层高度的均值分别为 8 070 和 7 054 m。

上述工作构成了河套灌区强对流天气短时预报基础,可以将上述结果集成到智能网格预报系统,以提高短时强降水、冰雹等灾害性天气的预报预警准确率。然而本文分析方法尚有一定的局限性,受区域自动气象站监测范围影响,无法观测到短时强降水发生的同时是否伴有冰雹、雷雨大风等其他强对流天气。在本文对河套灌区各类短时强降水潜势阈值的讨论中,对气候概率及触发机制没有进行讨论,今后还需进一步细致分析。

### 参考文献:

- [1] 吴迎旭,张慧君,周一,等.黑龙江省非典型天气系统下短时强降水和冰雹特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):59-67.
- [2] 谭丹,黄玉霞,沙宏娥.甘肃省强对流天气特征分析[J].自然灾害学报,2022,31(2):222-232.
- [3] 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.
- [4] WANG H, HE J, WEI M, et al. Synthesis analysis of one severe convection precipitation event in Jiangsu using ground-based GPS technology [J]. Atmosphere, 2015, 6(7):908-927.
- [5] OUYANG S. Weather evolution and structure prediction [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998.
- [6] 高晓梅,俞小鼎,王令军,等.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J].气象学报,2018,76(2):196-212.
- [7] 黄艳,俞小鼎,张云惠.新疆短时强降水天气主要流型及环境参量特征分析[J].气象科技,2022,50(1):85-93.

- [8] 刘艳杰,周玉都,马庚雪.河北廊坊冰雹天气特征统计分析[J].气象与环境科学,2018,41(1):108-15.
- [9] 仇娟娟,何立富.苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J].气象,2013,39(5):577-584.
- [10] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,2017,43(6):641-652.
- [11] 张一平,吴蓁,苏爱芳,等.基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J].高原气象,2013,32(5):1492-1502.
- [12] 吴蓁,俞小鼎,席世平,等.基于配料法的“08·6·3”河南强对流天气分析和短时预报[J].气象,2011,37(1):48-58.
- [13] 俞小鼎.关于冰雹的融化层高度[J].气象,2014,40(6):649-654.
- [14] 李崇,吉曹翔,夏传栋,等.沈阳地区强对流天气潜势预报环境参数特征分析[J].气象与环境学报,2016,32(6):43-51.
- [15] WEISMAN M L, KLEMP J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(6):504 - 520.
- [16] BLANCHARD D O. Assessing the vertical distribution of convective available potential energy [J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(3):870-877.
- [17] YU X, ZHOU X, WANG X. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3):311-337.
- [18] WANG H, WEI M, LI G, et al. Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: distribution and evolution characteristics in autumn [J]. Advances in Space Research, 2013, 52(4):656-667.
- [19] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730):1999-2049.
- [20] MADDOX R A, CHAPPELL C F, HOXIT L R. Synoptic and meso- $\alpha$  scale aspects of flash flood events[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1979, 60(2):115-123.
- [21] DOSWELL C A, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: An ingredients - based methodology[J]. Weather and Forecasting, 1996, 11(4):560-581.
- [22] 田晨,周伟灿,苗峻峰.中国地区下垫面特征对强对流天气影响研究进展[J].气象科技,2012,40(2):207-212.
- [23] 武文婧,翟丹华.基于数值模拟对重庆西部地区一次强对流天气过程的成因分析[J].气象与环境科学,2021,44(5):57-63.
- [24] 孙继松,石增云,王令.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,2006,11(1):76-84.
- [25] 郭建侠,杜继稳,郑有飞.陕北生态治理对当地降水影响的数值模拟[J].高原气象,2005,24(6):994-1001.
- [26] 巢纪平,周晓平.积云动力学[M].北京:科学出版社,1964.

## Characterization of Major Flow Patterns and Environmental Parameters of Strong Convective Weather in the Hetao Irrigation Area from 1991 to 2020

ZHANG Yurong<sup>1</sup>, YAO Xiaojuan<sup>2</sup>, BAI Shun Yao<sup>1</sup>, ZHAO Mingming<sup>1</sup>

(1. Bayannur Meteorological Bureau, Linhe 015000, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Bureau, Huhhot 010000, China)

**Abstract** This paper analyzed the primary flow patterns and environmental parameter characteristics of 542 hail cases and 281 short-term heavy precipitation cases in the Hetao Irrigation Area from 1991 to 2020 using conventional meteorological observation data, regional automatic station observation data, and ERA5 reanalysis data. The analysis results indicate that: The weather associated with short-term heavy precipitation is primarily characterized by four flow patterns, Xinjiang low trough (vortex), northeast cold vortex, Mongolia cold vortex, and southwest airflow. In contrast, hail weather is primarily associated with four flow patterns: Mongolia cold vortex, northwest airflow, northeast cold vortex, and Balkhash Lake cold vortex. Variations exist in the forecasting thresholds for key parameters of short-term heavy precipitation and hailstorms in the Hetao Irrigation Area. The suggested lowest thresholds are determined based on the 25th percentile values from box-and-line diagrams. Specifically, the mean values of  $\Delta T_{850-500}$  are 26 and 33 °C, the mean values of the  $K$ -index are 27 and 35 °C, the mean values of  $CAPE$  are 515 and 405 J·kg<sup>-1</sup>, the vertical wind shear from 0 to 6 km is  $7 \times 10^{-3}$  s<sup>-1</sup>, the mean values of the 0 °C layer heights are 4 656 and 4 069 m, and the mean values of the -20 °C layer heights are 8 070 and 7 054 m, respectively. Hailstorms require larger  $K$ -index values, greater  $\Delta T_{850-500}$ , and stronger low-level warm air for their development. Furthermore, hailstorms are associated with lower 0 °C layer heights and -20 °C layer heights, as the lower 0 °C layer heights can prevent hailstones from melting during their descent. Moreover, the impact of subsurface factors on different severe convective weather events varies, with altitude being the primary factor influencing the distribution of hailstorms in the Hetao irrigation area.

**Key words** convective weather; short-term heavy precipitation; hailstorm; physical quantities