

蔡晓芳,周晋红,李树文,等.太原雷暴大风潜势预报方法研究[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):14-21.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



太原雷暴大风潜势预报方法研究

蔡晓芳,周晋红*,李树文,刘圆渊

(太原市气象局,山西 太原 030082)

摘要:利用太原市7个国家观测站实况、探空以及MICAPS等资料,对1998—2018年5—9月太原市的雷暴大风进行天气学分型,选取雷暴大风的消空因子以及不同天气型下的预报因子并确定其阈值,利用指标叠套法,建立雷暴大风潜势预报方法,并进行预报检验。结果表明:(1)选取700 hPa温度露点差、850与500 hPa的温差、条件性稳定度指数和混合相层4个环境参数作为消空因子并确定了消空阈值。(2)将雷暴大风分为高空槽型、冷涡型、切变线型、西北气流型和副热带高压边缘型5类,选取了5类天气型下雷暴大风的预报因子,利用指标叠套法,建立了太原雷暴大风潜势预报方法。(3)运用雷暴大风潜势预报方法开展历史样本回报检验和2019—2020年试预报检验,取得了较好的预报效果。

关键词:雷暴大风;指标叠套法;潜势预报

中图分类号:P446

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)04-0014-08

太原市位于山西省中部的太原盆地,三面环山,地形特殊。每年春夏季强对流天气频发,雷暴大风是其中较为常见的一类,它具有突发性强、致灾性强的特点,是太原预报预警的难点。

目前对雷暴大风的研究已取得一些进展。Hookings^[1]通过研究表明,强雷暴大风能够产生在水滴尺度较小、液态水含量较大和下沉气流发源处湿度较低的环境中。Johns等^[2]提出对流层中下层环境温度直减率较大且对流层中层存在明显干层有利于对流风暴内产生强烈的下沉气流。费海燕等^[3]通过研究2004—2013年中国强雷暴大风天气指出,雷暴大风通常有明显的干层,500 hPa的温度露点差>10℃。方翀等^[4]通过研究华北雷暴大风天气得出,大多数的热力指标对雷暴大风的指示作用需要考虑

季节因素。马淑萍等^[5]研究了极端雷暴大风的关键环境参数特征,指出极端雷暴大风发生在对流层中层较干的情况下,且极端雷暴大风400~700 hPa的单层最大露点温度差和平均露点温度差均较普通雷暴大。杨晓霞等^[6]对2009—2016年4—9月山东雷暴大风进行了天气学分型,得出山东内陆和半岛地区各月雷暴大风的物理量参数特征。

近几年针对雷暴大风预报方法的探究也成为研究的难点和热点。Geerts^[7]研究发现大风指数(WINDEX)很难预测强的微下击暴流,提出了新大风指数(GUSTEX)来估计雷暴的极大风速值。吕晓娜等^[8]利用权重与概率统计结合的方法,建立了雷暴大风概率潜势预报方程。王毅等^[9]运用Logistic回归方法建立了江淮地区夏季干、湿两种环境条件下的区域雷暴大风的潜势预报模型。严仕尧等^[10]针对2005—2010年夏季华北地区的典型雷暴大风过程,选取了雷暴大风发生时的动力或热力指标并确定其阈值,利用指标叠套法计算了2011年华北地区两次不同类型发生雷暴大风的潜势。

从研究成果来看,国内对雷暴大风的研究多以个例研究为主^[11-17],对雷暴大风预报方法的研究仍

收稿日期:2021-01-04;修回日期:2022-01-17

基金项目:山西省气象局青年基金项目(SXKQNTQ2019);山西省气象局面上基金项目(SXKMSTQ20195626)

作者简介:蔡晓芳(1990—),女,工程师,主要从事短期天气预报和强对流天气研究。E-mail:1014460217@qq.com

通信作者:周晋红(1968—),女,正高级工程师,主要从事天气预报技术研究。E-mail:1014460217@qq.com

然较为有限。为建立太原雷暴大风天气预报思路,利用雷暴及雷暴大风资料,基于指标叠套与天气学相结合的方法研究太原雷暴大风潜势预报方法,以期为该地区雷暴大风天气的预报预警提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

利用地面报表、重要天气报、常规观测和MICAPS资料,建立1998—2018年太原7个国家观测站普通局地雷暴、普通区域雷暴和雷暴大风样本。利用雷暴大风发生前最近12 h内探空资料,对雷暴大风的环境参数进行分析。

1.2 个例统计及天气学分型方法

以08时(北京时)为日界,1 d内太原市7个国家观测站中有 ≥ 1 站出现平均风力 ≥ 6 级(≥ 10.8 m/s)或阵风 ≥ 8 级(≥ 17.2 m/s)并伴有雷暴,定义为1个雷暴大风日;有3站或以上出现雷暴大风则记为1个区域雷暴大风日;出现3站以下雷暴大风记为1个局地雷暴大风日。1日内国家观测站中只要有1站出现雷暴且7站均无大风,定义为1个普通雷暴日,3站或以上出现雷暴且7站均无大风记为1个普通区域雷暴日,3站以下出现雷暴且7站均无大风记为1个普通局地雷暴日。

利用1998—2018年5—9月MICAPS资料,按照《山西省中尺度天气分析规范》,对雷暴大风进行天气学分型和中尺度环境场分析。具体方法为以500 hPa影响系统为主,700、850 hPa和地面系统为辅,进行天气分型,按照山西中分析规范进行中尺度环境场分析。

1.3 消空方法

首先对雷暴大风进行中尺度环境场分析,根据雷暴大风形成的环境特征,直接选取消空因子,再通过计算来选取消空因子,方法如下:分别计算环境参数在普通局地雷暴和普通区域雷暴、普通区域雷暴和雷暴大风中的最大、最小值以及平均值的差值,两种情况下差值正负一致且绝对值较大表明其对雷暴或雷暴大风较为敏感,选为消空指标。

1.4 预报因子选取及指标叠套方法

雷暴大风和普通区域雷暴预报因子的数值范围交集越少,该环境参数对雷暴大风的指示作用越好^[17]。分别对普通区域雷暴、雷暴大风两者的环境参数进行归一化消除量纲后求取平均值、25%分位值和75%分位值后做差;差值绝对值较大表明该环境参数能较好区分普通区域雷暴和雷暴大风,差值正

负一致表明大部分因子的数值满足此规律,选取差值表现一致且差值或相对差值较大的作为备选预报因子,再从备选预报因子中选取预报因子。

进行天气判定时,首先判断是否满足消空条件,不满足消空阈值则认为不会产生雷暴大风,预报结束;若满足消空阈值,则进行天气型判定,环境参数值满足对应天气型的预报因子阈值记为1,不满足记为-1,无数据的记为0。将对应天气型所有预报因子的标记值相加,得到叠加值。叠加值的范围为 $(-N \sim N)$ (N 为预报因子数),叠加值越大,出现雷暴大风概率越高;若叠加值低于指标叠套法的叠加阈值则认为产生雷暴大风可能性低。

2 雷暴大风的天气学分型及环境条件分析

1998—2018年5—9月太原共出现135 d雷暴大风(包含局地雷暴大风和区域雷暴大风),根据 $30^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$, $95^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$ 区域出现的关键影响系统,按照天气分型方法分为高空槽型、冷涡型、切变线型、西北气流型和副热带高压边缘型5类,分别占比29%、10%、47%、8%和6%。选取不同天气型的典型个例进行中尺度环境场分析(图1),图中红色边界突出显示的区域为山西省。

2.1 高空槽型

产生雷暴大风的高空槽(图1a)主要分为两类,一类是河套或山西境内存在东北—西南或南北向的西风槽,太原位于槽前,槽快速东移影响太原或槽线压在太原且移动缓慢。另一类是横槽型,由中高纬东路冷空气分裂南下,在脊前形成横槽,横槽南压或转竖带动冷空气南下,有时地面伴有冷锋,冷锋南下触发对流引起雷暴大风。

从环境场配置(图1a)来看,此类雷暴大风通常中高层较“干”,低层或近地层存在温度露点差($T - T_d$) $\leq 4^{\circ} \text{C}$ 的湿区,500 hPa常有“干舌”,河套或山西境内有温度槽,中低层有温度脊,850与500 hPa温差($\Delta T_{850-500}$)通常较大,“上干冷下暖湿”,层结不稳定。山西位于西风槽前或槽线压在山西境内且移动缓慢,对应中低层存在切变线,动力条件较好。

2.2 冷涡型

产生雷暴大风的冷涡(图1b)主要分为三类:一类为西北冷涡。多为西南涡北上东移形成,或为西风槽东移加强形成。冷涡位于河套地区,直接影响山西。第二类为蒙古冷涡型。山西位于冷涡底部。第三类为东北冷涡型,此类环流经向度都较大,山西位于脊前冷涡底部,冷涡较强,通常受冷涡分裂出的西风

槽影响。

由环境场配置(图1b)可知,500 hPa常有干舌,对流层中低层 $T-T_d$ 相对西风槽型较小,有时850 hPa存在湿舌,层结为上干下湿。河套或山西或内蒙古一带,500 hPa有温度槽,低层常有温度脊,“上冷下暖”,层结不稳定性强。中低层一般对应应有切变线,有时为“人字型”切变,动力抬升条件好。地面常伴有冷锋或切变线或辐合线,有时有“干线”。

2.3 切变线型

500 hPa 欧亚大陆中高纬环流平直多波动或为一槽一脊型。冷空气势力偏北或横槽稳定维持,山西多为偏西气流影响或为槽后西北气流影响。对应低层有切变线。

由环境场配置(图1c)可知,500 hPa常有“干舌”,山西为西北气流控制,低层有切变线,地面常有辐合线,中低层动力抬升条件较好, $\Delta T_{850-500}$ 通常较大,层结不稳定性较强。

2.4 西北气流型

500 hPa 欧亚中高纬为一脊一槽型或两槽一脊型(图1d)。环流经向度较大,脊发展较强。

太原上空500、700和850 hPa三层均为西北气流,中层风力较大,700 hPa有时存在偏北急流,动量较大,存在大的风速切变。温度场上,500 hPa存在温度槽,低层常有温度脊,“上冷下暖”,层结不稳定。地面常有辐合线。

2.5 副热带高压边缘型

500 hPa 欧亚中高纬为一脊一槽型或为两槽一脊型。主要分为两类,一类副热带高压呈块状,强烈西伸北上,河套或西北地区常有西风槽,山西位于副热带高压边缘偏南气流中。另一类副热带高压北上与大陆高压合并,高压两侧存在西风槽,形成阻塞形势。太原受阻高东侧的西风槽影响,产生对流天气。

副热带高压边缘型中低层水汽条件较好,700和850 hPa存在“湿舌”,低层存在切变线(图1e)。

3 消空因子及阈值计算

雷暴大风的出现属于小概率事件,为剔除一定数量非雷暴大风样本,将小概率事件转化为条件概率下的大概率事件^[19],首先选取消空因子来减少雷暴大风预报的空报率。

雷暴大风多为“上冷下暖”、“上干下湿”的层结结构,700 hPa温度露点差 $(T-T_d)_{700}$ 和 $\Delta T_{850-500}$ 能较好地反映该特征,直接选为消空因子。

根据消空因子计算方法,利用太原探空及地面观测数据计算与雷暴相关的共62个环境参数在雷暴大风、普通区域雷暴和普通局地雷暴样本中的值,剔除异常值后选取BI(条件性稳定度指数)、MH(混合相层高度)作为消空因子。

最终选取 $(T-T_d)_{700}$ 、 $\Delta T_{850-500}$ 、BI和MH 4个环境参数作为消空因子。将4个环境参数在历史个例中

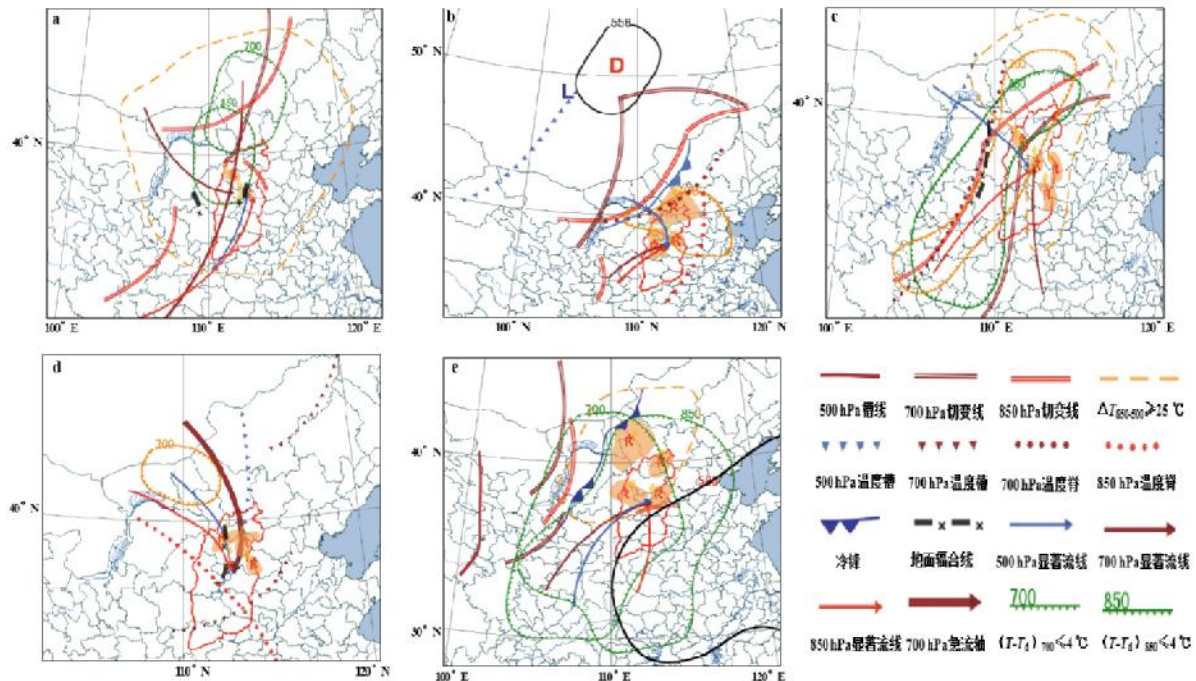


图1 1998—2018年5—9月不同天气型下雷暴大风典型个例中尺度环境场分析
(a为高空槽型,b为冷涡型,c为切变线型,d为西北气流型,e为副热带高压边缘型;阴影区为雷暴大风落区)

发生雷暴大风的最低门限作为消空因子的阈值,结果见表 1。

表 1 太原预报雷暴大风消空因子及阈值

消空因子	阈值
$(T-T_d)_{700}/^{\circ}\text{C}$	≥ 3.0
$\Delta T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$	≥ 23.0
$BI/^{\circ}\text{C}$	≤ -0.7
MH/m	$\leq 3\ 706.2$

4 不同天气型下的预报因子及阈值计算

将普通区域雷暴样本(共 534 d)分为高空槽型、冷涡型、切变线型、西北气流型和副热带高压边缘型 5 类。计算并选取不同天气型下雷暴大风预报因子,结果如表 2~6 所示。表 2~6 分别表示 5 类天气型雷暴大风和普通区域雷暴的备选预报因子的 75%、25%分位值和平均值差值、归一化后 75%、25%分位值和平均值差值以及两者 75%与 25%分位差值的差值,其中 $\Delta 75\%$ 表示雷暴大风与普通区域雷暴 75%分位差值, $\Delta 25\%$ 表示两者 25%分位差值, $\Delta 7525$ 表示两者 75%与 25%分位差值的差值,计算公式为 $\Delta 7525 = (75\% - 25\%)_{\text{雷暴大风}} - (75\% - 25\%)_{\text{普通区域雷暴}}$ 。备选预报因子是根据指标叠套方法结合数值分布情况,选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值大于一定数值且其归一化后 75%、25%分位值和平均值差值正负表现一致得到的。

$\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致,表明雷暴大风环境参数的 75%、25%分位值和平均值高于或低于普通区域雷暴,即有 75%的雷暴大风的环境参数值高于或低于普通区域雷暴,差值绝对值越大,两者环境参数值差距越大,对雷暴大风越有指示意义。75%与 25%分位差值能够表现环境参数大部分数值集中的范围大小,通常差值越小,表明大部分环境参数值集中程度越高, $\Delta 7525$ 为负,表明雷暴大风大部分环境参数值集中程度高于普通区域雷暴; $\Delta 7525$ 为正,若 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 值和平均值差值正负表现一致且其绝对值大于 $\Delta 7525$,表明该环境参数大部分数值集中程度低于普通区域雷暴但仍对雷暴大风有一定指示意义,反之则指示意义较小。

当 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致且差值较大时,若 $\Delta 7525$ 为负,可直接选为预报因子;若 $\Delta 7525$ 为正,且 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值的绝对值明显高于 $\Delta 7525$ 时也可作为预报因子。

4.1 高空槽型

按照备选预报因子选取方法,选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值 >0.1 的环境参数作为高空槽型雷暴大风备选预报因子,计算结果见表 2。

表 2 高空槽型雷暴大风与普通区域雷暴环境参数统计值分布

环境参数	均一化 $\Delta 75\%$	均一化 $\Delta 25\%$	均一化 均值差	$\Delta 75\%$	$\Delta 25\%$	平均值 差值	$\Delta 7525$
总指数	-0.12	-0.24	-0.19	3.5	-0.5	1.4	4.0
沙氏指数	0.29	0.19	0.24	1.4	-0.2	0.6	1.6
条件对流稳定 度指数	0.18	0.09	0.12	4.7	0.9	2.4	3.8
抬升凝结处 温度	0.14	0.18	0.12	-2.7	-3.4	-4.1	0.7
自由对流高度 处温度	-0.23	-0.05	-0.14	-7.3	-6.7	-5.4	-0.6
对流抑制有效 位能	0.32	0	0.15	150.9	0.0	63.2	150.9
气块向上冲击 速度	0.26	0	0.12	7.1	0.0	2.9	7.1
最大抬升指数	-0.13	-0.11	-0.11	0.1	-0.1	0.1	0.2
700 hPa 温度 露点差	0.33	0.2	0.21	7.0	5.0	4.7	2.0
500 hPa 风速	0.17	0.08	0.12	3.3	2.0	2.6	1.3
700 hPa 相对 湿度	-0.3	-0.24	-0.2	-29.5	-22.3	-20.2	-7.3
3 h 变压	-0.29	-0.11	-0.18	-5.8	-3.0	0.2	-2.8

由表 2 可知,抬升凝结处温度($TCLT$)、自由对流高度处温度($LFCT$)、700 hPa 相对湿度(RH_{700})、3 h 变压(ΔP_3)满足预报因子筛选条件,可选为预报因子。考虑到探空资料中 $LFCT$ 部分数据存在缺测,可能对研究结果产生影响,因此选取 $TCLT$ 、 RH_{700} 和 ΔP_3 作为高空槽型雷暴大风潜势预报因子。将上述 3 个预报因子的 75%历史个例的参数统计值作为预报因子阈值,结果见表 3。

表 3 西风槽型雷暴大风预报因子及阈值

预报因子	阈值
$TCLT/^{\circ}\text{C}$	≤ 14.9
$RH_{700}/\%$	≤ 58
$\Delta P_3/10^{-1}\text{ hPa}$	≤ -15

4.2 冷涡型

选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值 >0.1 的环境参数作为冷涡型雷暴大风备选预报因子,结果见表 4。

由表 4 可知,总指数(TT)、500 hPa 比湿(Q_{500})、

整层比湿积分(IQ)和 ΔP_3 的 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致且 $\Delta 7525$ 为负应选为预报因子,但 Q_{500} 的 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值的绝对值 <1 ,实际预报中可操作性弱,因此剔除,选取 TT 、 IQ 和 ΔP_3 作为冷涡型雷暴大风潜势预报因子。另外,干暖盖指数(L_s)的 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致, $\Delta 7525$ 为正但其以上3值的绝对值高于 $\Delta 7525$ 也可作为预报因子。

表4 冷涡型雷暴大风与区域雷暴环境参数统计值分布

环境参数	均一化 $\Delta 75\%$	均一化 $\Delta 25\%$	均一化 均值差	$\Delta 75\%$	$\Delta 25\%$	平均值 差值	$\Delta 7525$
总指数	0.16	0.2	0.14	2.0	3.8	2.5	-1.8
对流稳定度 指数	-0.21	-0.25	-0.21	1.1	-3.4	-1.3	4.5
0℃层高度	0.42	0.27	0.27	10.1	84.1	-124.8	-73.9
整层比湿积分	0.27	0.21	0.19	-459.0	-121.0	-478.2	-338.0
干暖盖指数	-0.17	-0.35	-0.23	2.7	1.7	2.7	1.0
瑞士第二雷暴 指数	0.29	0.13	0.27	-0.9	0.1	-15.3	-1.0
粗理查逊数 切变	0.25	0.09	0.24	-6.5	0.7	-107.9	-7.1
风暴相对 螺旋度	-0.12	-0.23	-0.15	-0.1	0.1	-0.1	-0.2
500 hPa 比湿	0.21	0.08	0.18	-0.6	-0.2	-0.4	-0.4
850 与 500 hPa 假相当位温差	0.25	0.21	0.21	3.4	-1.1	1.3	4.5
3 h 变压	-0.46	-0.3	-0.32	-6.8	-2.3	-5.4	-4.5

选取 TT 、 IQ 、 ΔP_3 和 L_s 作为冷涡型雷暴大风潜势预报因子。将上述4个预报因子的75%历史个例的参数统计值作为预报因子阈值,结果见表5。

表5 冷涡型雷暴大风预报因子及阈值

预报因子	阈值
$TT/^\circ\text{C}$	≥ 48
$IQ/(\text{g/kg})$	≤ 2800
$L_s/^\circ\text{C}$	≥ -39
$\Delta P_3/10^{-1} \text{ hPa}$	≤ -19

4.3 切变线型

选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值 >0.1 的环境参数作为切变线型雷暴大风备选预报因子,结果见表6。

由表6可知,对流温度(T_g)、600 hPa 处下沉对流加速度($WDCAPE_{600}$)、 RH_{700} 和 ΔP_3 满足预报因子筛选条件,选为切变线型雷暴大风潜势预报因子。将

表6 切变线型雷暴大风与区域雷暴环境参数统计值分布

环境参数	均一化 $\Delta 75\%$	均一化 $\Delta 25\%$	均一化 均值差	$\Delta 75\%$	$\Delta 25\%$	平均值 差值	$\Delta 7525$
对流稳定度指数	0.2	0.04	0.11	0.4	0.3	0.1	0.2
对流温度	0.09	0.2	0.14	1.1	3.6	2.3	-2.5
600 hPa 处下沉对 流加速度	0.23	0.15	0.17	-5.8	-3.5	-5.7	-2.3
A 指数	-0.04	-0.22	-0.11	-5.5	-13.0	-8.1	7.5
700 hPa 温度 露点差	0.19	0.09	0.16	5.0	4.0	4.8	1.0
700 hPa 相对湿度	-0.1	-0.17	-0.13	-18.0	-17.5	-17.3	-0.5
850 与 500 hPa 假 相当位温差	-0.05	-0.2	-0.11	-0.3	-0.4	-0.1	0.1
3 h 变压	-0.25	-0.22	-0.21	-2.5	-2.0	-2.6	-0.5

上述4个预报因子的75%历史个例的参数统计值作为预报因子阈值,结果见表7。

表7 切变线型雷暴大风预报因子及阈值

预报因子	阈值
$T_g/^\circ\text{C}$	≥ 30
$WDCAPE_{600}/(\text{m/s}^2)$	≤ -37.9
$RH_{700}/\%$	≤ 53
$\Delta P_3/10^{-1} \text{ hPa}$	≤ -17

4.4 西北气流型

选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值 >0.2 的环境参数作为西北气流型雷暴大风备选预报因子,结果见表8。

由表8可知, L_s 、 RH_{700} 和 $DCAPE_{600}$ 满足预报因子筛选条件,选为西北气流型雷暴大风潜势预报因子。将上述3个预报因子75%历史个例的参数统计值作为预报因子阈值,结果见表9。

4.5 副热带高压边缘型

选取环境参数归一化后雷暴大风与普通区域雷暴平均值差值的绝对值 >0.1 的环境参数作为副热带高压边缘型雷暴大风备选预报因子,结果见表10。

由表10可知, BI 的 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致且 $\Delta 7525$ 为负,可选为预报因子。500 hPa 温度露点差($T-T_d$)₅₀₀和 MH 的 $\Delta 75\%$ 、 $\Delta 25\%$ 和平均值差值正负表现一致, $\Delta 7525$ 为正但其以上3值的绝对值高于 $\Delta 7525$ 也可作为预报因子。因此,选取 BI 、 $(T-T_d)_{500}$ 和 MH 作为副热带高压边缘型雷暴大风潜势预报因子。将上述3个预报因子的75%历史个例的参数统计值作为预报因子阈值,结果见表11。

表 8 西北气流型雷暴大风与区域雷暴
环境参数统计值分布

环境参数	均一化 $\Delta 75\%$	均一化 $\Delta 25\%$	均一化 均值差	$\Delta 75\%$	$\Delta 25\%$	平均值 差值	$\Delta 7525$
K 指数	-0.22	-0.62	-0.36	-2.0	-5.0	-1.7	3.0
沙氏指数	0.43	0.12	0.26	0.8	-1.6	-0.7	2.4
Barber 对流不稳定 指数	-0.12	-0.48	-0.27	0.4	-14.3	-1.0	14.8
干暖盖指数	-0.18	-0.15	-0.2	1.8	3.4	4.1	-1.7
对流凝结高度 处温度	-0.22	-0.5	-0.28	-3.1	-6.9	-3.6	3.8
平衡高度	-0.05	-0.59	-0.2	-92.2	25.1	-46.6	-117.3
抬升凝结处温度	-0.12	-0.47	-0.2	-2.7	-7.8	-3.9	5.1
瑞士第一雷暴指数	0.6	0.3	0.44	0.5	-1.0	-31.1	1.5
瑞士第二雷暴指数	0.34	0.16	0.25	1.8	0.4	0.2	1.4
抬升指数	0.39	0.16	0.25	0.1	-1.1	-0.8	1.1
A 指数	-0.39	-0.35	-0.3	-13.0	0.0	-1.6	-13.0
700 hPa 相对湿度	-0.16	-0.24	-0.21	-13.0	-6.0	-9.2	-7.0
大风指数	0.29	0.14	0.22	0.0	4.1	0.4	-3.4
600 hPa 起始下沉 对流能	0.12	0.26	0.18	76.5	210.8	117.4	-134.3

表 9 西北气流型雷暴大风预报因子及阈值

预报因子	阈值
$L_f/^\circ\text{C}$	≥ -36.5
$RH_{700}/\%$	≤ 63
$DCAPE_{600}/(\text{J/kg})$	≥ 740.5

表 10 副热带高压边缘型雷暴大风与区域雷暴
环境参数统计值分布

环境参数	均一化 $\Delta 75\%$	均一化 $\Delta 25\%$	均一化 均值差	$\Delta 75\%$	$\Delta 25\%$	平均值 差值	$\Delta 7525$
大风指数	-0.13	-0.41	-0.23	8.8	4.3	7.4	4.5
干静力稳定度	0.44	0.14	0.29	-0.2	-0.2	-0.4	0.0
粗理查逊数切变	0.27	0.49	0.23	-2.2	4.2	0.9	-6.3
A 指数	-0.16	-0.51	-0.30	-5.3	-16.3	-8.6	11.0
500 hPa 温度露 点差	0.35	0.35	0.22	10.0	6.3	4.7	3.8
500 hPa 风速	0.29	0.33	0.25	-1.0	-0.3	0.0	-0.8
条件性稳定度 指数	0.18	0.16	0.18	-6.3	-3.7	-5.8	-2.6
混合相层	-0.08	-0.28	-0.15	-224.7	-308.1	-248.3	83.4
0 $^\circ\text{C}$ 层高度	-0.16	-0.33	-0.15	-262.8	-610.0	-316.0	347.2
700 hPa 比湿	0.28	0.17	0.19	0.2	-4.4	-2.2	4.7
850 hPa 比湿	0.06	0.19	0.16	-0.5	-4.2	-1.5	3.7
850 hPa 相对湿度	0.15	0.13	0.16	0.0	-20.5	-8.6	20.5

5 指标叠套及叠加值计算

指标叠套法在天气预报业务中已有诸多应用^[20-21],

表 11 副热带高压型雷暴大风预报因子及阈值

预报因子	阈值
$(T-T_d)_{500}/^\circ\text{C}$	≥ 9.3
$BI/^\circ\text{C}$	≤ -12.6
MH/m	$\leq 3\ 321.4$

对强对流天气具有较好的预报效果^[22-25]。对 1998—2018 年 5—9 月 5 类天气型雷暴大风进行指标叠套,计算结果见表12。

表 12 不同天气型雷暴大风预报因子叠加值及阈值

天气型	预报因子数	叠加值范围	叠加阈值	准确率
西风槽型	3	$(-3, 3)$	≥ 0	85%
			≥ 1	77%
			≥ 2	51%
冷涡型	4	$(-4, 4)$	≥ 0	92%
			≥ 2	77%
			≥ 3	46%
切变线型	4	$(-4, 4)$	≥ 0	83%
			≥ 1	77%
			≥ 2	52%
西北气流型	3	$(-3, 3)$	≥ 1	82%
			≥ 2	55%
副热带高压 边缘型	3	$(-3, 3)$	≥ 1	83%
			≥ 2	50%

经比较,分别选取准确率达到 85%、77%、83%、82%和 83%时 5 类天气型雷暴大风叠加值作为叠加阈值,选取结果如表 13 所示,叠加阈值分别为 0、2、0、1 和 1。

表 13 不同天气型雷暴大风预报因子叠加值及阈值

天气型	预报因子数	叠加值范围	叠加阈值
西风槽型	3	$(-3, 3)$	≥ 0
冷涡型	4	$(-4, 4)$	≥ 2
切变线型	4	$(-4, 4)$	≥ 0
西北气流型	3	$(-3, 3)$	≥ 1
副热带高压边缘型	3	$(-3, 3)$	≥ 1

6 预报效果检验

6.1 历史样本检验

对 1998—2018 年 5—9 月共 135 d 雷暴大风开展历史样本回报检验,经计算回报准确率 83%,正确 112 d,漏报 23 d;其中,实况出现区域雷暴大风 14 d,准确预报 12 d,区域雷暴大风回报准确率达 86%。

6.2 2019—2020年试预报检验

对2019—2020年5—9月出现的雷暴大风进行试预报检验。经检验,实况出现雷暴大风15 d,准确预报12 d,漏报3 d;其中,出现区域雷暴大风2 d,均预报准确。

但由于试预报样本较少,预报结果具有一定偶然性,后期还需更多样本进行验证。

7 结论

对1998—2018年5—9月太原市7个国家站的雷暴大风进行天气学分型,运用统计与环境场分析结合的方法以及指标叠套法,对雷暴大风进行了潜势预报,得到主要结论如下:

(1)选取 $(T-T_d)_{700}$ 、 $\Delta T_{850-500}$ 、 BI 和 MH 作为消空因子并确定了消空阈值。

(2)将雷暴大风过程分为西风槽型、冷涡型、切变线型、西北气流型和副热带高压边缘型5类,选取了5类天气型下雷暴大风潜势预报因子,利用指标叠套法,建立了太原雷暴大风潜势预报方法。

(3)对1998—2018年5—9月共135 d雷暴大风开展历史样本回报检验,经计算,回报准确率达83%,正确112 d,漏报23 d;其中,实况出现区域雷暴大风14 d,准确预报12 d,区域雷暴大风回报准确率达86%。

(4)对2019—2020年5—9月出现的雷暴大风进行试预报检验,实况出现雷暴大风15 d,准确预报12 d,漏报3 d;其中,出现区域雷暴大风2 d,均准确预报。

参考文献:

- [1] HOOKINGS G A. Precipitation maintained downdrafts[J]. J Appl Meteor, 1965(4): 190-195.
- [2] JOHNS R H, DOSWELL III C A. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 1992, 7(4): 588-612.
- [3] 费海燕,王秀明,周小刚,等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.
- [4] 方翀,王西贵,盛杰,等. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1368-1385.
- [5] 马淑萍,王秀明,余小鼎. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报, 2019, 30(3): 292-301.
- [6] 杨晓霞,尤莉,夏凡,等. 山东内陆和半岛雷暴大风的环境物理量特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6): 47-56.
- [7] GEERTS B. Estimating downburst-related maximum surface wind speeds by means of proximity soundings in New South Wales, Australia[J]. Weather & Forecasting, 2001, 16(2): 261-269.
- [8] 吕晓娜,牛淑贞,张一平,等. 基于概率与权重的雷暴大风潜势客观预报方法研究[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 20-29.
- [9] 王毅,张晓美,盛杰,等. 基于 logistic 模型的干、湿环境下江淮夏季雷暴大风潜势预报研究[J]. 气象科学, 2020, 40(2): 241-248.
- [10] 严仕尧,李昀英,齐琳琳,等. 华北产生雷暴大风的动力热力综合指标分析及应用 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 17-23.
- [11] 马鸿青,郭志强,李彦,等. 2017.6.21 致灾雷暴大风特征分析[J]. 农学学报, 2019, 9(10): 23-28.
- [12] 陈伟斌,农孟松,赵金彪,等. 广西2次雷暴大风天气过程的成因及异同分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 231-239.
- [13] 农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等. 两种雷暴大风的结构特征及其环境条件对比分析 [J]. 气象研究与应用, 2019, 40(2): 1-6.
- [14] 高建平,马中元,吴才明,等. 2017年8月江西上高雷暴大风雷达回波特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2): 55-62.
- [15] 唐钱奎,张涛. 成都一次雷暴大风的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(4): 338-345.
- [16] 陈云斌,许爱华,许彬. 江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析 [J]. 暴雨灾害, 2019, 38(2): 126-134.
- [17] 蔡荣辉,姚蓉,黄小玉,等. 洞庭湖区域雷暴大风分型及预报分析研究[J]. 气象, 2017, 43(5): 560-572.
- [18] 杨芳园,沈茜,周稀,等. 云南省一次飑线大风天气过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 48-56.
- [19] 郝莹,鲁俊. 雷暴大风、冰雹天气的预报方法研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(26): 299-304.
- [20] 张庆奎,项阳,王莹,等. 安徽阜阳市大雾天气的潜势预报方法[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 1045-1049.
- [21] 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.
- [22] 翟菁,周后福,张建军,等. 基于指标叠套法的安徽省强对流天气潜势预警研究 [J]. 气象与环境学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [23] 农孟松,祁丽燕,黄明策,等. 基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究[J]. 气象, 2008, 34(6): 46-52.
- [24] 王迪,牛淑贞,曾明剑,等. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. 气象, 2020, 46(5): 618-628.
- [25] 王培涛,王凤娇,张婷婷. 山东滨州市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.

Research on Potential Forecast Method of Thunderstorm Gale in Taiyuan

CAI Xiaofang, ZHOU Jinhong, LI Shuwen, LIU Yuanyuan
(Taiyuan Meteorological Bureau, Taiyuan 030082, China)

Abstract Based on the observation from 7 conventional sounding stations from May to September during 1998–2018 in Taiyuan, synoptic classification of thunderstorm gale was performed. The decreasing FAR factors and the forecasting factors of different synoptic patterns were chosen, and the corresponding threshold value was determined. The potential forecast method of thunderstorm gale was established and tested based on the method of overlapping sets of indices. It shows that: (1) Four environment parameters (depression of the dew point at 700 hPa isobaric surface, temperature differences between the isobaric surface of 850 and 500 hPa, conditional stability index and mixed layer height) can be used as the decreasing FAR factors and their threshold value were given. (2) The processes of thunderstorm gale were divided into five patterns, namely upper trough, cold vortex, shear line, northwest currents and edge of subtropical high. The forecast factors of thunderstorm gale under five synoptic patterns were chosen to establish the potential forecast method of thunderstorm in Taiyuan through the method of overlapping sets of indices. (3) The potential forecast method of thunderstorm gale was proven to have a good performance in historical sample return and the forecast verification from 2019 to 2020.

Key words thunderstorm gale; overlapping sets of indices; potential forecast