

江姣,田凤国,徐元照,等.重庆市长寿区暴雨特征及基于“配料法”的暴雨预报模型研究[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(3):56-62.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



重庆市长寿区暴雨特征及基于“配料法”的暴雨预报模型研究

江 姣¹,田凤国^{1*},徐元照¹,方 丽²,高 松¹

(1.重庆市长寿区气象局,重庆 长寿 401220;2.重庆市万州区气象局,重庆 万州 404037)

摘 要:利用 2011—2018 年地面常规观测、高空探测等资料分析重庆市长寿区暴雨特征,研究表征暴雨过程中水汽、动力、热力、不稳定条件的比湿、散度、垂直速度等物理参数及暴雨发生时各物理参数的阈值,构建基于“配料法”的预报模型,并对模型进行试用、检验和评估。结果表明:长寿区暴雨多发生在 5、9 月,影响暴雨的主要天气系统按出现频率自高到低排列依次是高空槽、地面冷锋、西南涡、切变线、低空急流,32.1%的暴雨是在高空槽、切变线、西南涡和地面冷锋的共同作用下产生的,其他天气系统配置下较少产生暴雨。基于“配料法”的主观预报方法准确率较 EC 提高 27%,漏报率较其他模式明显减小,TS 评分较 EC 提高 0.15;客观方法准确率较 EC 提高 16%,TS 评分较 EC 提高 0.03。

关键词:配料法;暴雨;预报指标;模型

中图分类号:P456.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)03-0056-07

暴雨是我国主要的气象灾害之一,往往伴随着山洪、泥石流、城乡积涝等次生灾害的发生^[1]。长寿地处四川盆地东部、重庆中部,境内地势高低起伏,岭谷相间,局地小气候多样,降水有着独特的分布规律和特征^[2],暴雨预报是当地气象部门的工作重点和难点。关于暴雨的生成机制和预报方法研究,国内外学者开展了大量的工作,张淑敏等^[3]发现高空槽东移,副热带高压外围的暖湿气流与槽前西南气流合并,为暴雨提供有利条件,切变线、低涡及低空急流等是影响暴雨的主要天气系统。梁钰等^[4]指出,冷空气入侵可触发不稳定能量的释放,从而形成暴雨。早期暴雨预报方法主要是基于天气图预报,到 20 世

纪 90 年代,数值预报为暴雨预报准确率的提高带来了希望^[5],但由于数值模式的区域适应性及暴雨的复杂成因,使得暴雨预报与社会需求间存在较大差距。21 世纪初,国外的“配料法”在国内得到推广,张小玲等发展了基于“配料”的预报方法:暴雨的发生发展离不开充足的水汽、动力、热力及不稳定能量条件^[6-7],根据以上条件进行配料,找到有利于发生暴雨的条件进行预报^[8-14],不同地区、不同季节的暴雨预报指标及其阈值往往不同^[15-17],因此,找到本地暴雨预报阈值指标至关重要。除“配料法”外,高守亭等^[18]发现集合动力因子预报方法可以充分发挥多个动力因子的优势,较全面地反映暴雨过程的共性特征。徐迎春等^[19]运用线性倾向估计法和相关分析法,分析了武汉地区梅雨的气候特征,并建立预报方程。白晓平等^[20]运用改进的二元 Logistic 回归法和综合多指标叠加法建立预报模型,发现不同概念模型下二元 Logistic 回归模型试预报效果均优于综合多指标叠加模型。闫慧等^[21]研究集合预报方法在山西暴雨预报中的应用试验,发现本地统计量融合方法对

收稿日期:2022-09-07;修回日期:2022-11-03

基金项目:重庆市气象局 2018 年业务技术攻关面上项目:(YWJSGG-2018010)

作者简介:江姣(1990—),女,工程师,主要从事天气预报技术研究。
E-mail:458294084@qq.com

通信作者:田凤国(1972—),男,副高级工程师,主要从事天气预报与气候变化研究。E-mail:tianfengguo940272@cma.cn

暴雨的预报效果较好。邵元亭等^[22]通过统计分析暴雨发生时的高空观测资料,找出与短时暴雨相关性较好的预报因子,利用概率回归方法建立了短时暴雨预报方程。王宏等^[23]研究发现湿位涡对河北东北部的暴雨预报效果良好。

目前,重庆市长寿区暴雨预报主要是参考各种模式预报结果,业务效果难以满足防灾减灾的需求,研究暴雨的本地化预报方法显得尤为必要。本文借鉴前人关于暴雨的预报方法,利用常规观测、高空探测等资料,运用“配料法”和逐步回归方法建立暴雨预报指标和模型,旨在提高本地暴雨预报服务水平。

1 资料和研究方法

1.1 资料

根据重庆市气象局关于暴雨的定义:长寿区内 22 个雨量站中任意 5 个站在 4 个任意时间段(02—02 时、08—08 时、14—14 时、20—20 时)出现 24 h 累计雨量 ≥ 50 mm 的天气过程即为一次区域暴雨(简称暴雨),筛选出 2011 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日长寿区 28 个暴雨个例。

平均雨量(24 h 累计雨量 ≥ 50 mm 以上站点的雨量平均值)资料来自重庆长寿国家基本气象站和区域自动气象站,建模及模型检验所用高空观测和探空资料来自重庆沙坪坝国家基本气象站(长寿区距该站不到 70 km),部分实况观测无法获取的资料来自 EC(欧洲中心)。

1.2 研究方法

1.2.1 预报模型建立方法

1996 年, Doswell 等^[24]提出了一种新的暴雨预报方法“配料法”,该方法认为降水累积量与降水持续时间和降水效率有关,而降水效率与水汽的垂直输送成正比,故某次降水 P 可表示为:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} E q w dt \quad (1)$$

式中: q 为比湿, w 为上升速度, E 为比例系数,该方法侧重暴雨发生发展过程中影响水汽垂直输送的动力、热力以及环境条件配置,对提高暴雨预报准确率做出重要贡献^[24-26]。本文将基于以上方法建立一套新颖的本地化暴雨预报方法,包括主观和客观预报方法。

(1) 基于“配料法”的主观预报方法:对水汽条件(R_1)、动力条件(R_2)、热力条件(R_3)和不稳定能量条件(R_4)的相关物理量指标进行诊断分析,达到阈值的指标个数越多,越有可能发生暴雨,因此计算达到

阈值的指标个数百分比 R_m , R_m 越大,发生暴雨的可能性越高。当 $R_m \geq 50\%$ 时,表示满足产生暴雨的条件,有可能产生暴雨;当 $R_m < 50\%$ 时,表示不满足产生暴雨的条件,结合与本地暴雨显著相关的“配料”因子,建立主观预报方法(表 1)。

$$R_m = \left[\frac{(\sum A_i)}{n} \right] \times 100\% \quad (2)$$

表 1 主观预报方法

序号	判定条件	结论
1	R_1, R_2, R_3, R_4 均 $\geq 50\%$	未来 12~24 h 一定会出现暴雨到大暴雨
2	R_1, R_2, R_3 均 $\geq 50\%$	未来 12~24 h 一定会出现暴雨
3	R_1, R_3 均 $\geq 50\%$ 且 $R_4 > 25\%$	未来 12~24 h 一定会出现暴雨
4	R_1, R_2 均 $\geq 50\%$ 且 $R_3 > 25\%$	未来 12~24 h 出现暴雨的可能性较高
5	R_2, R_3 均 $\geq 50\%$ 且 $R_1 > 25\%$	未来 12~24 h 出现暴雨的可能性较高
6	R_1, R_2 均 $\geq 50\%$ 或 R_2, R_3 均 $\geq 50\%$	未来 12~24 h 出现暴雨的可能性较高
7	R_1, R_2, R_3, R_4 仅其中一个 $\geq 25\%$	未来 12~24 h 出现暴雨的可能性很低

注:此处仅对有无暴雨作定性判断。

式中: m 表示发生暴雨的第 m 个条件 ($m=1, 2, 3, 4$, 分别表示水汽、动力、热力、不稳定能量), n 表示四个条件的预报指标总个数, A_i 表示第 i 个指标, 当 A_i 满足第 i 个指标的阈值时, $A_i=1$, 不满足时, $A_i=0$ 。

(4) 基于“配料法”的客观预报方法:利用 Eviews9.0 逐步回归算法进行数学建模,暴雨个例的平均雨量作为因变量,相对湿度、比湿、涡度、垂直速度等物理参数作为自变量,运用逐步回归算法剔除非相关因子,建立数学方程,实现平均降雨量的客观预报(表 2),暴雨概率计算公示如下:

$$P = \left(\frac{i}{4} \right) \times 100\% \quad (3)$$

表 2 客观预报方法

平均雨量预报模型	相关性 R^2	F 检验	DW 值
$y_1 = 1.04x_2 - 12.23x_4 + 3.11x_6 - 3.57x_7 + 1.05x_8 + 0.75x_9 + 5.07x_{14} + 2.12x_{17} + 4.36x_{18} + 4.68x_{20} + 5.43x_{21} - 32.15x_{23} - 151.71$	0.903	0.000	0.16 2.029 82
$y_2 = -2.23x_1 + 2.02x_2 - 0.95x_3 - 19.37x_4 + 2.84x_6 - 6.32x_7 + 1.33x_8 + 1.17x_9 - 1.48x_{10} + 1.16x_{11} + 1.98x_{12} + 5.89x_{14} + 2.5x_{17} + 2.11x_{18} + 0.45x_{19} + 15.65x_{20} + 18.27x_{23} - 25.18x_{23} - 337.39$	0.966	0.000	166 2.498 79
$y_3 = -1.26x_1 + 1.85x_2 - 1.01x_3 - 18.4x_4 + 3.23x_6 - 5.25x_7 + 1.46x_8 + 1.05x_9 + 1.17x_{12} + 5.72x_{14} + 2.29x_{17} + 3.43x_{18} + 11.5x_{20} + 13.37x_{21} - 28.1x_{23} - 284.14$	0.933	0.000	08 2.171 50
$y_4 = 0.84x_2 - 5.33x_4 + 2.43x_6 - 3.11x_7 + 0.99x_8 + 0.69x_9 + 5.62x_{14} + 2.12x_{17} + 4.14x_{18} - 25.72x_{23} - 31.9$	0.877	0.000	007 1.874 88

注: $X_1, X_2, X_3 \cdots X_{23}$ 与表 1 的各物理参数对应,分别表示 700 hPa 相对湿度、850 hPa 相对湿度…垂直风切变。

其中: i 为 4 个模型中预报雨量达到暴雨的模型个数。

1.2.2 预报模型检验方法

运用主观检验方法对 EC、重庆中尺度、重庆 RUC、CMA-SH9、CMA-MESO 及基于“配料法”的主观预报模型进行暴雨预报准确率(预报准确次数/(漏报次数+准确次数))、空报率(空报次数/(空报次数+准确次数))、漏报率(漏报次数/(漏报次数+准确次数))和 TS 评分(准确次数/总次数)检验。

主观检验 EC、重庆中尺度、重庆 RUC、CMA-SH9 和 CMA-MESO 准确率的方法如下:模式预报 24 h 累计雨量 ≥ 50 mm 的落区覆盖到长寿区(全区或部分区域),实况出现 5 站以上的区域暴雨,则判定预报准确。对基于“配料法”的主观预报方法检验:表 2 的判定结论与实况相符则判定预报准确;对客观预报方法的检验:4 个方程预报的降雨量均值 ≥ 50 mm,实况出现暴雨则判定预报准确。

2 研究结果与分析

2.1 长寿暴雨特征分析

2011—2018 年长寿平均每年出现 3.5 次暴雨,2015 年(6 次)最多,2011 年(2 次)最少。从年内分布(图 1)可知,9 月(10 次)最多,占比 35.7%;其次是 5 月(8 次),占比 28.6%;8 月(1 次)最少,1—4 月和 11—12 月没有暴雨。可见,长寿暴雨多发生在 5 月和 9 月。

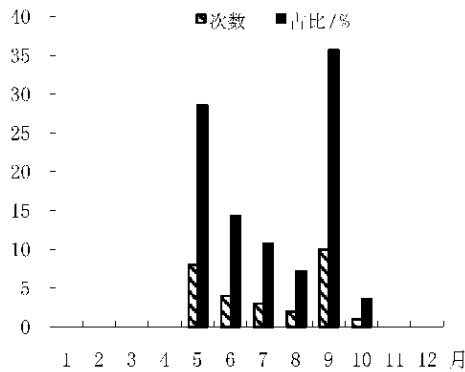


图 1 2011—2018 年暴雨年内分布

统计每次暴雨发生前(08 或 20 时)高空到地面观测实况出现的天气系统(图 2)发现,影响暴雨发生的天气系统有 500 hPa 高空槽、700 hPa 切变线、西南涡、低空急流和地面冷锋,92.8%的暴雨受 500 hPa 高空槽影响,64.3%受地面冷锋作用,60.7%与西南涡的活动有关,32.1%受切变线影响,仅 10.7%与低空急流有关,影响暴雨的主要天气系统按发生频

率自高到低排序依次是 500 hPa 高空槽、地面冷锋、西南涡、切变线、低空急流。

暴雨的发生往往是多个天气系统共同作用的结果,统计发现高空槽、西南涡、切变线和地面冷锋同时出现的暴雨占比为 32.1%,高空槽、切变线和地面

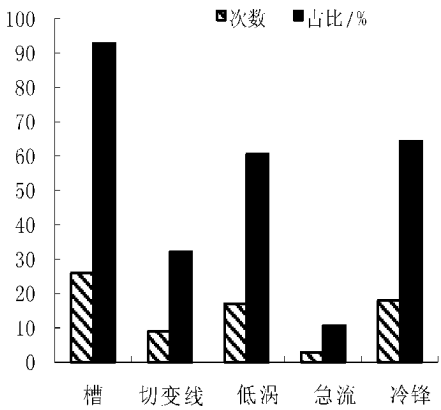


图 2 2011—2018 年影响暴雨的天气系统

表 3 暴雨预报指标和阈值

物理量指标		阈值			相关系数
		春季 (3—5 月)	夏季 (6—8 月)	秋季 (9—11 月)	
水汽条件	相对湿度/%	700 hPa ≥ 88.4	≥ 81.4	≥ 89.8	0.14
		850 hPa ≥ 78.4	≥ 73.1	≥ 91	0.30*
	水汽通量散度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)	700 hPa ≤ -7.1	≤ -5.2	≤ -3.7	0.52*
	比湿/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	700 hPa ≥ 10.0	≥ 10.9	≥ 10.6	0.24*
		850 hPa ≥ 13.8	≥ 14.5	≥ 14.4	0.25*
动力条件	温度露点差/ $^{\circ}\text{C}$	850 hPa ≤ 5.8	≤ 5.5	≤ 1.5	-0.22*
	低空急流/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	850 hPa ≥ 6.4	≥ 6.4	≥ 6.8	0.20
	相对涡度/ (10^{-6} s^{-1})	700 hPa ≥ 9.8	≥ 3.4	≥ 9.4	0.23*
		850 hPa ≥ 16.5	≥ 16.5	≥ 16.0	0.37*
	垂直速度/ ($10^{-3}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)	500 hPa ≤ -20.7	≤ -10.4	≤ -13.2	0.29*
热力条件		700 hPa ≤ -16.6	≤ -9.9	≤ -11.2	0.24*
	散度/(10^{-6} s^{-1})	700 hPa ≤ -8.0	≤ -2.0	≤ -2.5	0.27*
	假相当位温/ $^{\circ}\text{C}$	850 hPa ≥ 75.2	≥ 80.2	≥ 75.6	0.26*
	假相当位温 梯度/ $^{\circ}\text{C}$	500 hPa ≥ 1.8	≥ 1.6	≥ 1.3	0.26*
	总温度场 T_r	850 hPa ≥ 61.1	≥ 72.2	≥ 67.2	0.29*
不稳定能量条件	温度平流/ ($10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	850 hPa ≥ -0.4	≥ 0.4	≥ 1.6	0.39*
	500 hPa 和 850 hPa 的假相当位温差/ $^{\circ}\text{C}$	≥ 7.8	≥ 5.8	≥ 8.4	0.46*
	500 hPa 和 850 hPa 的温度差/ $^{\circ}\text{C}$	≥ 19.9	≥ 20.6	≥ 20.3	0.34*
	A	≥ 10.4	≥ 6.8	≥ 16.5	0.33*
	K 指数	≥ 40.8	≥ 37.3	≥ 37.0	0.14
	SI 指数	≤ -2.83	≤ 0.37	≤ 0.28	-0.12
	CAPE/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	≥ 262.8	≥ 533.4	≥ 274.2	0.18
	垂直风切变/ (10^{-3} s^{-1})	≥ 1.34	≥ 0.53	≥ 0.51	-0.40*

注: * 表示相关系数通过 0.05 的显著性检验。

冷锋同时出现的暴雨占比为 17.9%，高空槽、西南涡、地面冷锋同时出现的暴雨占比为 14.3%，其他天气系统配置下产生暴雨的概率较低。

2.2 建立暴雨指标

如表 3 所示,根据“配料法”,暴雨预报物理参数涵盖了水汽、动力、热力及不稳定能量 4 个方面的条件,共找出相对湿度、水汽通量散度、相对涡度等 19 个与暴雨相关的物理参数,通过计算暴雨个例的平均雨量 Y 与各物理参数间的相关系数发现,除 700 hPa 相对湿度、850 hPa 低空急流、 K 指数、SI 指数、垂直风切变与暴雨的相关系数未通过 0.05 的显著性检验外,其余均显著相关。取每个暴雨个例发生前(08 时或 20 时)各物理参数的 60%、70%、80%

百分位数进行敏感性实验,对比分析发现,取 80% 百分位值作为阈值最合理,且指标阈值存在明显的季节性变化特征,如夏季暴雨发生时,850 hPa 相对湿度在 73.1%以上,而秋季则需在 91%以上。

2.3 预报模型建立与试用

暴雨的发生与水汽、动力和热力条件的关系密切,因此,基于“配料法”的主观预报方法主要考虑以上 3 个条件,建立如表 1 所示的主观预报方法。

利用 2018 年 7 月 30 日 08 时(该个例不在建模数据库内)的高空观测、探空及 EC 预报资料对主观预报方法进行试用,如表 4 所示,综合预报结论与天气实况相符,判定此次暴雨天气过程预报准确。

利用客观预报方法(逐步回归算法挑选出 4 个

表 4 2018 年 7 月 30 日 08 时暴雨主观预报方法试用

物理参数		层次	2018 年 7 月 30 日 08 时 实况资料	阈值指标	诊断结果(0:未达 阈值;1:达阈值)
水汽 条件 (R_1)	相对湿度/%	700 hPa	77	≥ 81.4	0
		850 hPa	74	≥ 73.1	1
	水汽通量散度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)	700 hPa	-23	≤ -5.2	1
	比湿/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	700 hPa	9.27	≥ 10.9	0
		850 hPa	14.13	≥ 14.5	0
	温度露点差/ $^{\circ}\text{C}$	850 hPa	4.8	≤ 5.5	1
水汽条件(R_1)诊断结果			50%(有 50%的指标达阈值,下同)		
动力 条件 (R_2)	低空急流/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	850 hPa	5.7	≥ 6.4	0
	相对涡度/(10^{-6} s^{-1})	700 hPa	-6	≥ 3.4	0
		850 hPa	20	≥ 16.5	1
	垂直速度/($10^{-3}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)	500 hPa	-36	≤ -10.4	1
		700 hPa	-10	≤ -9.9	1
	散度/(10^{-6} s^{-1})	700 hPa	-22	≤ -2.0	1
动力条件(R_2)诊断结果			66.7%		
热力 条件 (R_3)	假相当位温/ $^{\circ}\text{C}$	850 hPa	77.94	≥ 80.2	0
	假相当位温梯度/ $^{\circ}\text{C}$	500 hPa	1.6	≥ 1.6	1
	总温度场 $T_{\text{w}}/^{\circ}\text{C}$	850 hPa	73.8	≥ 72.2	1
	温度平流/($10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	850 hPa	0.4	≥ 0.4	1
	热力条件(R_3)诊断结果	75%			
不稳 定能 量条 件 (R_4)	500 hPa 和 850 hPa 的假相当位温差/ $^{\circ}\text{C}$		9.55	≥ 5.8	1
	500 hPa 和 850 hPa 的温度差/ $^{\circ}\text{C}$		24.5	≥ 20.6	1
	A		9.8	≥ 6.8	1
	K 指数		37.4	≥ 37.3	1
	SI 指数		-0.61	≤ 0.37	1
	CAPE/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)		716.5	≥ 533.4	1
	垂直风切变/(10^{-3} s^{-1})		0.95	≥ 0.53	1
	不稳定能量条件(R_4)				
	诊断结果		100%		
	综合预报结论		由表 1, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均 $\geq 50\%$, 满足暴雨预报方法的第一条, 判断未来 12~24 h 一定会出现暴雨到大暴雨		
	天气实况		7 月 30 日 08 时—31 日 08 时, 长寿区普降大到暴雨, 邻封、渡舟等街镇 15 个站点达暴雨, 其中但渡镇兴同站雨量最大为 77.6 mm		

自变量与因变量显著相关的方程)建立客观预报模型,见表2, R^2 均在0.9附近,自变量与因变量显著相关;DW值在2.0附近,预报方程稳定;同时通过了F检验,预报方程可业务化试用。

利用2018年7月30日08时高空观测、探空和EC预报资料对客观预报模型进行试用(表5),4个预报模型均预报30日08时未来24 h平均降雨量 ≥ 50 mm,客观预报平均雨量为85.45 mm,实况平均雨量为64.70 mm,虽然量级预报偏大,但准确预报了暴雨的发生,为业务应用提供了重要参考。

表5 2018年7月30日08时暴雨客观预报方法试用

预报雨量/mm				预报雨量 平均 Y/mm	实况雨量 平均 y/mm
y_1	y_2	y_3	y_4		
88.06	80.33	86.13	87.29	85.45	64.70
暴雨发生概率 P				100%	

注:4个方程均预报平均雨量 >50 mm,因此判定暴雨发生概率为100%。

2.4 暴雨预报模型的检验和评估

利用2019—2021年汛期28次降雨天气过程进行暴雨预报多模式检验评估,如图3所示,EC、CMA-SH9、CMA-MESO和重庆RUC对长寿暴雨的预报准确率为43%~47%,漏报率为53%~56%,CMA-SH9的空报率最高(50%),CMA-MESO的空报率最低(8%)。重庆中尺度模式对暴雨的预报准确率较高(56%),空报率(35%)和漏报率(25%)均较低。基于“配料法”的主观预报方法预报准确率最高(71%),空报率(35%)和漏报率(25%)较低,TS评分最高(0.54)。基于“配料法”的客观预报方法预报准

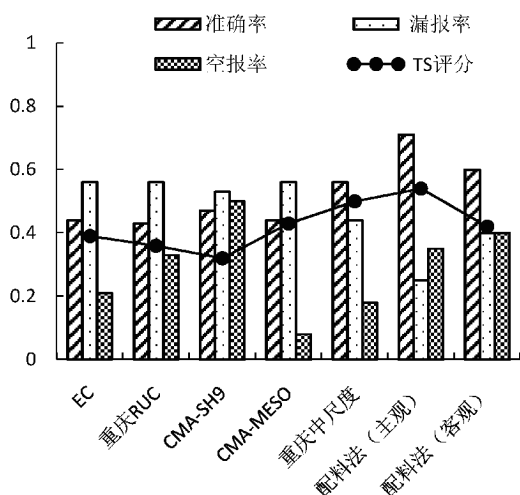


图3 2019—2021年预报模型检验及评估

确率为60%,空报率(40%)和漏报率(40%)较高。

综上,基于“配料法”的主观预报方法预报准确率较EC提高了27%,较重庆中尺度模式提高了15%,漏报率较其他模式明显减小,空报率较高,TS评分较EC和重庆中尺度分别提高了0.15和0.04。客观预报准确率较EC提高了16%,较重庆中尺度提高了4%,但漏报率和空报率较高,TS评分较EC提高了0.03。可见,基于“配料法”的主、客观方法在本地暴雨预报过程中具有一定的优越性,可为地方防灾减灾、农业、旅游等领域事业高质量发展提供科学参考。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)长寿暴雨多发生在5月和9月,影响暴雨的主要天气系统按出现频率自高到低排列依次是高空槽、地面冷锋、西南涡、切变线、低空急流,32.1%的暴雨是在高空槽、切变线、西南涡和地面冷锋的共同作用下产生的,其他天气系统配置下较少产生暴雨。

(2)暴雨的配料因子主要考虑水汽、动力和热力条件,预报指标阈值存在显著的季节性变化特征。

(3)基于“配料法”的主观预报方法预报准确率较EC提高了27%,较重庆中尺度模式提高了15%,漏报率较其他模式明显减小,TS评分较EC和重庆中尺度分别提高了0.15和0.04。

(4)基于“配料法”的客观预报方法预报准确率较EC提高了16%,较重庆中尺度提高了4%,但漏报率和空报率较高,TS评分较EC提高了0.03。

3.2 讨论

(1)该暴雨预报方法在本地化应用中有一定的优越性,但由于模型是基于逐步回归建立的,而暴雨的成因是一个复杂的物理过程,因此,一方面需增加暴雨个例,优化预报模型并长期检验,提高模型适应性;另一方面,可尝试利用机器学习、神经网络等非线性方法建立预报模型,并对两种方法建立的模型进行对比分析。

(2)本文侧重预报模型的建立及检验评估,预报过程需用到多个指标,计算复杂,事实上,若能简化预报指标和计算过程,可给预报员带来极大便利,因此,开展重点预报指标研究尤为必要。

(3)天气尺度系统对大范围暴雨具有较强的指示作用,而局部区域暴雨多受中小尺度天气系统或次级环流影响,该方法暂未涉及形成暴雨的物理机制研究,这将是下一步工作的重点之一。

参考文献:

- [1] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980.
- [2] 重庆市长寿区人民政府.长寿年鉴[M].北京:方志出版社,2021.
- [3] 张淑敏,淡会星,吴宁,等.“7·28”渭河区域性大暴雨天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(1):1-5.
- [4] 梁钰,邵宇翔,席世平,等.一次弱环境场下的郑州局地暴雨预报难点分析[J].气象与环境科学,2010,33(3):23-28.
- [5] 高守亭,周玉淑,冉令坤.我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J].大气科学,2018,42(4):833-846.
- [6] 陈鹏,刘德,周盈颖,等.一次重庆特大暴雨过程的中尺度分析[J].高原气象,2015,34(1):82-92.
- [7] 吴泽,范广洲,周定文,等.基于 WRF 模式的雅安暴雨数值模拟研究[J].高原气象,2014,33(5):1332-1340.
- [8] 张小玲,陶诗言,孙建华.基于“配料”的暴雨预报[J].大气科学,2010,34(4):754-766.
- [9] 欧坚莲,欧进泽,徐芳.基于“配料法”的桂东片区持续性暴雨预报方法[J].气象研究与应用,2011,32(Z2):56-58,67.
- [10] 来小芳,张艳玲,陆汉城,等.“配料法”用于长江下游暴雨预报[J].南京气象学院报,2007,30(4):556-560.
- [11] 刘国忠,黄开刚,罗建英,等.基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究[J].气象,2013,39(1):20-27.
- [12] 隋亚男,闫敏慧,董方有.基于物理量“配料法”的黑龙省暴雨预报研究[J].灾害学,2021,36(3):203-207.
- [13] 李强,纪晓玲,薛宏宇,等.配料法在宁夏暴雨预报中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):20-28.
- [14] 杨雪艳,秦玉琳,张梦远,等.基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究[J].大气科学学报,2018,41(4):475-482.
- [15] 周雪松,吴炜,孙兴池.山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J].气象,2014,40(6):744-753.
- [16] 许向春,张春花,林建兴,等.琼州海峡沿岸雾统计特征及天气学预报指标[J].气象科技,2009,37(3):323-329.
- [17] 施望芝,高琦,张萍萍.基于 T213 的 6—8 月湖北省暴雨落区(点)预报模型和指标研究[J].暴雨灾害,2007,26(3):217-222.
- [18] 高守亭,冉令坤,李娜,等.集合动力因子暴雨预报方法研究[J].暴雨灾害,2013,32(4):289-302.
- [19] 徐迎春,刘立,庞晶.武汉地区梅雨期暴雨预报方法初探[J].气象与减灾研究,2017,40(3):231-235.
- [20] 白晓平,靳双龙,王式功,等.基于 Logistic 回归和多指标叠加的短时强降水预报模型[J].气象科学,2018,38(4):553-558.
- [21] 闫慧,赵桂香,董春卿,等.集合预报方法在山西暴雨预报中的应用试验[J].干旱气象,2017,35(2):321-329.
- [22] 邵元亭,高省莉.三门峡市短时暴雨预报方法[J].气象与环境科学,2004(4):23.
- [23] 王宏,马凤莲,王万筠,等.湿位涡分析在河北东北部暴雨预报中的应用[J].干旱气象,2008,26(4):86-90.
- [24] DOSWELL C A III, BROOKS H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Weather and Forecasting, 1996, 11(4):560-581.
- [25] CHAPPELL C F. Quasi-stationary convective events [M]// RAY P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston: American Meteorological Society, 1986:289-310.
- [26] JOHNS R H, DOSWELL C A III. Severe local storm forecasting [J]. Weather and Forecasting, 1992, 7(4):588-612.

Rainstorm Characteristics and Ingredients-based Prediction Model Research in Changshou District of Chongqing

JIANG Jiao¹, TIAN Fenggou¹, XU Yuanzhao¹, FANG Li², GAO Song¹

(1.Chongqing Changshou District Meteorological Bureau, Changshou 401220, China;

2.Chongqing Wanzhou District Meteorological Bureau, Wanzhou 404037, China)

Abstract This study investigated the characteristics of rainstorms in Changshou by analyzing conventional ground observations and high-altitude detection data from 2011 to 2018. The study analyzed physical parameters such as specific humidity, divergence, and vertical velocity, which were indicative of water vapor, dynamic, thermal, and unstable conditions during rainstorms. The study investigated the threshold values of physical parameters indicating the occurrence of rainstorms. An ingredients-based prediction model was developed, implemented, tested, and evaluated. The results indicate that: (1) Rainstorms predominantly occur in May and September. (2) The primary weather systems influencing rainstorms include upper-level troughs, surface cold fronts, southwest vortices, shear lines, and low-level jet streams, with occurrence frequencies decreasing in that order. About 32.1% of rainstorms were influenced by a combination of upper-level troughs, shear lines, southwest vortices, and surface cold fronts, while rainstorms rarely occurred in other weather system configurations. (3) The subjective prediction method based on Ingredients showed a 27% higher accuracy than the EC model, significantly reducing the false alarm rate compared to other models, and obtaining a 0.15 higher TS score than the EC model. (4) The objective prediction method based on Ingredients demonstrated a 16% higher accuracy than the EC model, and achieved a 0.03 higher TS score than the EC model.

Key words ingredients-based forecasting methodology; rainstorm; forecasting index; model