

李建明,于怀征,韩永清,等.四种检验方法在山东暴雪预报中的应用对比[J].海洋气象学报,2024,44(2):90-97.

LI Jianming, YU Huaizheng, HAN Yongqing, et al. Comparative analysis on application of 4 verification methods for snowstorm forecasting in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 90-97. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231218001. (in Chinese)

四种检验方法在山东暴雪预报中的应用对比

李建明^{1,2}, 于怀征^{1,3}, 韩永清^{1,4}, 冀玉超^{1,2}, 马晓睿^{1,2}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.东营市气象局,山东 东营 257091;3.日照市气象局,山东 日照 276800;4.山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要 利用山东122个国家级地面气象观测站2017—2021年中1—3月和11—12月“24 h降雪量 $p \geq 10.0$ mm”的暴雪实况资料,采用二分类法、邻域空间检验法(以下简称“邻域法”)、时间偏移法和量级模糊法等4种方法对山东暴雪预报进行检验与对比。结果表明:(1)山东暴雪具有明显的时空分布特征,暴雪主要出现在半岛北部地区,鲁东南和半岛南部产生暴雪的概率最小;暴雪出现次数的年际变化和月际变化较大,最多年份出现98次,最少年份仅有5次,2月是高发月,占全年暴雪总次数的38.5%。(2)现行业务中应用最广泛的二分类法检验的预报命中率较低,其中24 h预报命中率仅为12.08%,主要原因是该方法受到空间、时间和量级的多重影响,不能精细准确地反映预报能力。(3)邻域法、时间偏移法和量级模糊法对24 h的暴雪预报命中率分别为14.40%、14.69%和30.05%;相较于二分类法,这3种检验方法的预报命中率均有较大幅度提高,空报率和漏报率均有较大幅度下降。(4)融合邻域法、时间偏移法和量级模糊法的综合检验法,能从空间、时间和量级3个维度区分出预报差异,检验结果更加精细准确,有利于引导预报员放下“检验评分低”的思想包袱,做出更加科学客观的预报,进一步提升预报服务效果。

关键词 暴雪;分布特征;预报;检验方法

中图分类号: P456;P457.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0090-08

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231218001

Comparative analysis on application of 4 verification methods for snowstorm forecasting in Shandong

LI Jianming^{1,2}, YU Huaizheng^{1,3}, Han Yongqing^{1,4}, JI Yuchao^{1,2}, MA Xiaorui^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Dongying Meteorological Bureau, Dongying 257091, China; 3. Rizhao Meteorological Bureau, Rizhao 276800, China; 4. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Using the actual snowstorm data (24-h snowfall $p \geq 10.0$ mm) at 122 national meteorological stations in Shandong from January to March and from November to December between 2017 and 2021, 4 methods are compared in the evaluation of snowstorm forecasting, including binary classification method, neighborhood spatial verification method, time migration method, and magnitude fuzzing method. The results are as follows. (1) Snowstorms in Shandong have obvious spatial and temporal distribution

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-01-25

基金项目:山东省气象局科研项目(2021SDYD41)

第一作者简介:李建明,男,高级工程师,主要从事信息技术与预报检验开发工作,350089739@qq.com。

通信作者简介:于怀征,男,正高级工程师,主要从事天气预报和气象防灾减灾工作,342099979@qq.com。

characteristics, and mainly appear in the north of Shandong Peninsula, while the probability of snowstorms occurring in the southeast of Shandong Province and the south of Shandong Peninsula is the lowest. The interannual and intermonthly variations of the occurrence of snowstorms are significant. The largest number of snowstorms that occur within one year is 98 and the smallest number is only 5; February is the peak month for the occurrence of snowstorms, accounting for 38.5% of the total number of snowstorms annually. (2) The probability of detection (POD) computed by the most widely used binary classification method at present is relatively low, with the POD of 24-h snowstorm forecasting only 12.08%. The main reason is that this method is affected by multiple factors, such as space, time, and magnitude, so it cannot accurately reflect the prediction ability. (3) The PODs of the neighborhood spatial verification method, time migration method, and magnitude fuzzing method for 24-h snowstorm forecasting are 14.40%, 14.69%, and 30.05%, respectively. Compared with the binary classification method, the PODs of these three methods significantly increase, while the false alarm rates and missing rates significantly decrease. (4) A comprehensive verification method that integrates the neighborhood spatial verification method, time migration method, and magnitude fuzzing method can distinguish the forecasting differences from three dimensions, namely space, time, and magnitude. The more precise and accurate verification results are conducive to guiding forecasters to put down the burden of low verification scores and make scientific and objective predictions, improving forecasting services.

Keywords snowstorm; distribution characteristics; forecast; verification method

引言

在全球气候变暖的大背景下,极端天气、气候事件发生频率和强度都在增加,其中暴雪是对社会生产和生活影响较大的天气事件之一。国内学者对全国各地区的暴雪时空分布特征、演变趋势等进行了大量研究^[1-7],得出了一些有意义的结论。山东地形多样,中南部是山地丘陵,东部是半岛,东、北两面临海,受“海效应”与地形影响,降雪有明显的地域性特征。暴雪是山东冬半年的主要气象灾害之一,经常造成交通事故、运输中断、房屋及蔬菜大棚坍塌等,直接危害人民生命和财产安全^[8-9]。因此,加强对暴雪预报技术的研究,提高暴雪预报水平,增强暴雪的预报服务能力,对山东防灾减灾具有重要意义。作为引导预报方向的“指挥棒”,暴雪检验方法的科学合理性将直接关系到预报水平和服务效果评价,并反馈到预报技术的研究与运用中,从而提高预报质量。因此,有必要对暴雪检验方法的科学性进行评估分析。

国内很多专家对降水预报检验做了大量工作^[10-14],目前在气象部门广泛采用的检验方法是以目标命中率为核心的二分类检验法,这种方法根据天气现象是否发生对准确率、空报率及漏报率进行统计学的评价,对降水预报准确率有一定的指示意义。国家气象中心建设的“国家级天气预报检验分

析系统”和山东气象部门建设的“智能网格预报质量检验平台”对包含“暴雨(雪)以上”在内的降水检验均采用二分类检验法^[15]。在数值预报检验中,有些专家利用邻域空间检验法(以下简称“邻域法”)^[16-18]开展对降水预报的检验,这种方法在二分类法的基础上,将预报和实况空间尺度进行放大,通过不同尺度的偏移来降低预报和实况之间的匹配要求。符娇兰等^[19]利用邻域法对数值模式预报的降水目标、不同类型强降水的落区和强度误差进行了检验分析,发现邻域法对强降水目标的落区、强度及形态误差评估检验效果较好。邻域法能在降水观测实况资料和降水量预报产品中识别出雨带,并分析雨带的位置、强度、范围及其预报方法的误差特点^[18],寻找系统性偏差^[20-21]。赵滨等^[22]指出邻域法在预报检验中可以弥补“点对点”检验存在的不足,降低空间差异的影响。与一般性降水相比,暴雪出现频次较少,预报难度较大,传统的二分类检验法基于“点对点”检验,有时会出现服务效果较好但评分较低的情况,不能客观地反映预报能力^[23]。邻域法将预报和实况的空间尺度进行偏移,能弥补空间差异的不足,但无法体现时间和量级2个维度的差异。本文参考邻域法的思路,采取时间偏移法、量级模糊法2种方法来弥补时间和量级的差异,并对以上4种检验法进行对比分析,以期找到兼顾业务考核和服务效果的客观检验方法。

本文基于山东 122 个国家级地面气象观测站 2017—2021 年中 1—3 月和 11—12 月的暴雪实况资料,运用二分类法、邻域法、时间偏移法和量级模糊法对暴雪预报进行检验,并分析了山东暴雪的实况分布特征。其中量级模糊法参考降雨预报的跨量级检验方法而提出,时间偏移法是为减轻时间差异影响而提出的,这 2 种方法有一定的新意,可为预报检验方法的研究提供参考。

1 资料来源和处理方法

预报数据来源于各市气象台制作的短期天气预报,2019 年之前为城镇天气预报,2019 年后,山东实施智能网格预报业务,因此需对智能网格预报数据进行处理,通过“邻近点替代”方案^[10]筛选出相对应的站点预报,即选择距离观测站点最近的格点预报作为该点预报值(有多个距离相等的格点,优先选取东北方向格点)。

按照《中短期天气预报质量检验办法(试行)》(气发[2005]109号)^[24]中降水量等级划分规定,降雪量是指 24 h 内纯雪化为水的数值,将降雪量 $p \geq 10.0$ mm 统计为暴雪,降雪量 5.0~9.9 mm 统计为大雪。文中以 20 时(北京时,下同)为日界,统计了 2017—2021 年的 1—3 月和 11—12 月期间山东 122 个国家级地面气象观测站(图 1)的降雪数据,基于此数据对暴雪预报进行检验。所用资料为气象大数据云平台(天擎)通过质量控制后的观测数据,综合处理降水量、天气现象、积雪深度等要素后生成大雪及暴雪数据集。

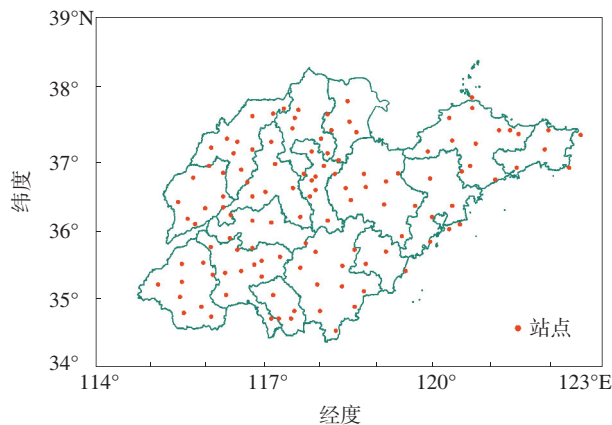


图 1 山东暴雪检验站点分布

Fig.1 Distribution of verification stations of snowstorms in Shandong

2 检验时段内暴雪分布特征

2.1 山东各市暴雪次数分布

按照“24 h 降雪量 $p \geq 10.0$ mm”为暴雪的标准,单个台站达到此标准记为 1 次暴雪,统计生成 2017—2021 年山东暴雪数据集。其间共出现 182 次暴雪(表 1),其中日降水现象全部为“雪”的有 115 次,日降水性质中除“雪”外还含“雨或雨夹雪”的有 67 次。基于此数据集开展暴雪分布特征和检验方法研究。

表 1 山东各市 2017—2021 年暴雪出现次数

Table 1 Frequency of snowstorms in Shandong from 2017 to 2021

区域	站数	不同年份暴雪出现次数/次					2017—2021
		2017	2018	2019	2020	2021	
济南	7	0	0	0	4	10	14
青岛	7	0	0	0	1	0	1
淄博	8	0	0	0	2	9	11
枣庄	5	5	0	3	1	1	10
东营	5	0	0	0	0	4	4
烟台	11	0	1	0	12	6	19
潍坊	9	1	0	0	9	7	17
济宁	11	2	0	1	2	7	12
泰安	5	0	0	0	1	3	4
威海	6	2	4	0	4	6	16
日照	3	1	0	0	4	1	6
临沂	10	1	0	2	1	4	8
德州	11	0	0	0	0	11	11
聊城	8	0	0	0	6	13	19
滨州	7	0	0	0	0	8	8
菏泽	9	2	0	0	12	8	22
全省	122	14	5	6	59	98	182

2.2 时间分布特征

2.2.1 日分布特征

全省 182 次暴雪分布在 21 d(表 2),其中 2017 年 2 d、2018 年 5 d、2019 年 1 d、2020 年 7 d、2021 年 6 d。1 d 内出现暴雪站数最多的日期为 2021 年 11 月 7 日,共 47 站,占总次数的 25.8%;其次为 2021 年 2 月 25 日,共 36 站。日暴雪站数不少于 3 个的有 13 d,占总暴雪日数的 61.9%;有 7 d 全省仅 1 站出现暴雪。

2.2.2 年、月分布特征

各年暴雪出现次数分布不均,其中 2021 年最多,为 98 次,占比为 53.8%;2018 年最少,为 5 次,占比仅为 2.7%(图 2a)。出现暴雪月份主要分布在 11 月、1 月、2 月,共出现 155 次,占总次数的 85.2%。2 月出现次数最多,为 70 次,占比为 38.5%;其次为 11 月,出现 47 次;3 月出现次数最少,仅为 9 次,占比为 4.9%(图 2b)。

表 2 2017—2021 年山东各台站暴雪日统计

Table 2 The number of snowstorm days in Shandong from 2017 to 2021

年份	暴雪日数/d	出现日期	暴雪站数/站
2017	2	2月21日	10
		2月22日	4
2018	5	1月10日	1
		2月8日	1
		3月4日	1
		12月7日	1
2019	1	12月11日	1
		1月31日	6
		1月7日	28
2020	7	2月15日	10
		2月28日	9
		12月14日	2
		12月15日	1
		12月29日	6
		12月30日	3
2021	6	1月7日	3
		2月25日	36
		3月1日	8
		11月7日	47
		12月17日	3
		12月25日	1

2.3 空间分布特征

由山东各台站出现暴雪的次数(表 3)可以看出:全省出现暴雪的区域分布极为不均,暴雪出现次数最多的台站为威海站,出现 6 次;其次为烟台、荣成、文登,各出现 5 次;出现 4 次的有 5 站(牟平、诸城、五莲、曹县、青州);出现 3 次的有 13 站、2 次的有 28 站、1 次的有 46 站;未出现暴雪的有 26 站。

由暴雪分布区域(图 3)可以看出,山东半岛北部地区出现暴雪的次数最多,其中有 1 个台站出现 6 次,3 个台站出现 5 次,全省出现 5 次以上的台站均分布在该区域。此区域出现暴雪次数较多,与山东独特的地形和地理位置有关,山东半岛是山地丘陵,北邻渤海,受渤海海效应影响导致降雪增多,被称为“雪窝子”^[25-28]。山东中西部的聊城、济南南部、淄博南部和潍坊西部地区的台站一般出现 2~3 次暴雪,少数台站出现 4 次。鲁北和鲁西北各台站出现暴雪次数为 1~2 次。受海气相互作用影响,青岛气温相对较高,大部分台站无暴雪。其他地区一般出现 2~3 次,仅少数台站出现 4 次。

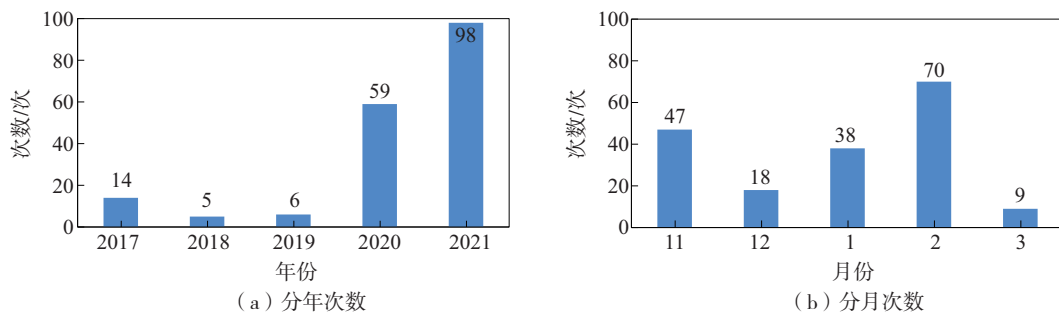


图 2 2017—2021 年山东暴雪出现次数分布情况
Fig.2 Distribution of frequency of snowstorms in Shandong from 2017 to 2021

表 3 2017—2021 年山东暴雪次数统计

Table 3 Statistical result of frequency of snowstorms in Shandong from 2017 to 2021

暴雪次数/次	站数/站	台站名
6	1	威海
5	3	烟台、荣成、文登
4	5	牟平、诸城、五莲、曹县、青州
3	13	聊城、成武、博山、东阿、茌平、单县、莱芜、昌乐、定陶、莘县、高唐、峄城、栖霞
2	28	潍坊、寿光、泰安、蓬莱、蒙阴、东明、章丘、济南、阳谷、商河、鄄城、菏泽、平阴、嘉祥、沾化、济宁、福山、滕州、薛城、临沭、长清、临清、金乡、沂源、郓城、微山、兰陵、台儿庄
1	46	高密、莒县、肥城、日照、临朐、梁山、淄博、桓台、临淄、即墨、巨野、邹城、泗水、新泰、沂南、河口、鱼台、费县、枣庄、莱州、平原、德州、武城、临邑、陵城、宁津、周村、淄川、禹城、长岛、惠民、阳信、庆云、无棣、乐陵、高青、齐河、济阳、邹平、龙口、夏津、垦利、利津、滨州、博兴、广饶

由台站出现暴雪的情况来看,2017—2021 年山东 122 个国家级地面气象观测站中有 96 站出现暴

雪,占比为 78.69%,未出现暴雪的台站有 26 个,占比为 21.31%。分析 182 次暴雪的降雪量发现,降雪

量在10.0~19.9 mm范围内的有146次,占比为80.2%;20.0~29.9 mm范围内的有29次,占比为15.9%;30.0~39.9 mm范围内的有6次,占比为3.3%;降雪量 $p \geq 40.0$ mm的有1次(2021年11月7日,出现在平原站,降雪量为41.6 mm)。

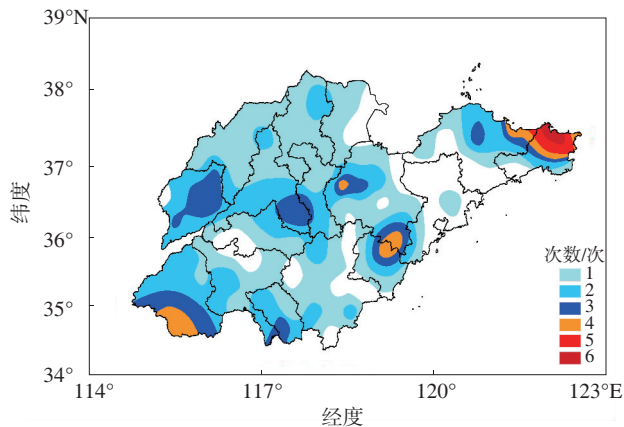


图3 2017—2021年山东各台站暴雪次数分布
Fig.3 Frequency of snowstorms at each station in Shandong from 2017 to 2021

3 预报检验

3.1 二分类法

3.1.1 检验方法

预报为“暴雪”且实况为“暴雪”时记为“ M_a (正确)”,预报为“暴雪”而实况为“非暴雪”时记为“ M_b (空报)”,预报为“非暴雪”而实况为“暴雪”时记为“ M_c (漏报)”,预报为“非暴雪”且实况为“非暴雪”时不评定。对检验时段的预报命中率(probability of detection, POD)、空报率(false alarm rate, FAR)和漏报率(missing rate, MR)等指标进行统计分析。检验算法如下:

$$V_{\text{POD-二分类法}} = \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c} \times 100\%, \quad (1)$$

$$V_{\text{FAR-二分类法}} = \frac{N_b}{N_a + N_b} \times 100\%, \quad (2)$$

$$V_{\text{MR-二分类法}} = \frac{N_c}{N_a + N_c} \times 100\%。 \quad (3)$$

式中: $V_{\text{POD-二分类法}}$ 、 $V_{\text{FAR-二分类法}}$ 和 $V_{\text{MR-二分类法}}$ 分别为二分类法的预报命中率、空报率和漏报率值, N_a 、 N_b 和 N_c 分别为 M_a 、 M_b 和 M_c 的总个数。

3.1.2 检验结果

分析二分类检验法的检验结果(表4),可以看

出24 h、48 h、72 h预报命中率较低,分别为12.08%、11.38%、3.69%。漏报率较高,分别为86.26%、86.81%、96.15%。进一步分析发现,72 h的暴雪预报命中率与24 h、48 h相比差异较大,原因有两方面:一是时效长、预报难度大,二是72 h的暴雪预报目前未进行相关考核,预报员投入的精力较少。

表4 二分类法检验结果

时效/h	N_a /个	N_b /个	N_c /个	POD/%	FAR/%	MR/%
24	25	25	157	12.08	50.00	86.26
48	24	29	158	11.38	54.72	86.81
72	7	8	175	3.69	53.33	96.15

3.2 邻域法

为充分考虑暴雪预报的区域差异,参考全国暴雨预报检验中“通过引入e指数构建暴雨预报评分基函数,预报检验点与观测站进行30 km半径范围的邻域匹配”^[15]的邻域范围,将预报站点30 km范围内的其他站点作为邻域实况站点,检验不再局限于“站点对应站点”的比较方式,而是采用“站点对应邻域内站点”的方式。经统计,山东122个国家级地面气象观测站中30 km范围内有邻域站点的台站数为83个,占比为68.03%,暴雪增加了67次,占比增加36.8%。

3.2.1 检验方法

预报为“暴雪”的情况下:如实况为“暴雪”时,记为“ M_a ”,得1分;如对应站点实况为“非暴雪”,邻域内的站点为“暴雪”时,记为“ M_{a-f} ”,得0.6分;如站点和邻域内的站点均为“非暴雪”时,记为“ M_b ”。站点实况为“暴雪”的情况下:如预报为“暴雪”时,记为“ M_a ”,得1分;如预报为“非暴雪”时,记为“ M_c ”。站点预报和实况均为“非暴雪”的情况不计算。检验算法如下:

$$V_{\text{POD}} = \frac{N_a + N_{a-f} \times 0.6}{N_a + N_{a-f} + N_b + N_c} \times 100\%, \quad (4)$$

$$V_{\text{FAR}} = \frac{N_b}{N_a + N_{a-f} + N_b} \times 100\%, \quad (5)$$

$$V_{\text{MR}} = \frac{N_c}{N_a + N_{a-f} + N_c} \times 100\%。 \quad (6)$$

式中: V_{POD} 、 V_{FAR} 和 V_{MR} 分别为预报命中率、空报率和漏报率值, N_a 、 N_{a-f} 、 N_b 和 N_c 分别为 M_a 、 M_{a-f} 、 M_b 和 M_c 的总个数。

3.2.2 检验结果

分析邻域法检验结果(表5)发现,相较于二分类法,24 h、48 h的预报命中率分别提高2.32%、3.12%,空报率分别下降16.00%、20.76%,漏报率分别下降3.63%、4.94%,说明邻域法对于降低空报率有明显作用。

表5 邻域法(30 km)检验结果

Table 5 Verification result of neighborhood spatial verification method (30 km)

时效/h	N_a /个	N_{a-f} /个	N_b /个	N_c /个	POD/%	FAR/%	MR/%
24	25	8	17	157	14.40	34.00	82.63
48	24	11	18	158	14.50	33.96	81.87
72	7	1	7	175	4.00	46.67	95.63

3.3 时间偏移法

3.3.1 检验方法

预报为“暴雪”的情况下:如对应时段站点实况为“暴雪”时,记为“ M_a ”,得1分;如站点对应时段内实况为“非暴雪”,时间段前后偏移12 h为“暴雪”,记为“ M_{a-f} ”,得0.6分;否则记为“ M_b ”。实况为“暴雪”的情况下:如对应时段站点预报为“暴雪”时,记为“ M_a ”,得1分;如对应时段前后偏移12 h的预报为“暴雪”,记为“ M_{a-f} ”,得0.6分;否则记为“ M_c ”。检验算法见公式(4)一(6)。

3.3.2 检验结果

分析检验结果(表6)发现,24 h预报为暴雪,实况对应前后偏移12 h内为暴雪共3次,占比为8.82%。实况为暴雪,对应预报偏移12 h为暴雪共6次,占比为17.65%。总时间偏移后为正确共9次,占比为26.47%。可以看出,相较于二分类法,时间偏移法对24 h检验结果影响较大,预报命中率提升了2.61%,空报率下降了10.71%,对48 h和72 h影响较小。

表6 时间偏移法检验结果

Table 6 Verification result of time migration method

时效/h	N_a /个	N_{a-f} /个	N_b /个	N_c /个	POD/%	FAR/%	MR/%
24	25	9	22	151	14.69	39.29	81.62
48	24	1	28	158	11.66	52.83	86.34
72	7	0	8	175	3.68	53.33	96.15

3.4 量级模糊法

3.4.1 检验方法

将预报和实况中的暴雪和大雪统一考虑,大雪实况按“24 h降雪量为5.0~9.9 mm”认定,出现“预

报为暴雪,实况为大雪”或“预报为大雪,实况为暴雪”时认定为预报正确并给予适当分数,具体检验方法如下。

预报为“暴雪”的情况下:如实况为“暴雪”,记为“ M_a ”,得1分;如实况为“大雪”,记为“ M_{a-f} ”,得0.6分;如实况为“非暴雪非大雪”,记为“ M_b ”。实况为“暴雪”的情况下:如预报为“暴雪”,记为“ M_a ”,得1分;如预报为“大雪”,记为“ M_{a-f} ”,得0.6分;如预报为“非暴雪非大雪”,记为“ M_c ”。检验算法见公式(4)一(6)。

3.4.2 检验结果

分析量级模糊法结果(表7)可以看出:相较于二分类法,量级模糊法对24 h、48 h、72 h这3个时效的结果均产生了较大影响。以24 h为例,量级模糊法较二分类法的预报命中率提高了17.97%,空报率下降了37.88%,漏报率下降了30.88%,结果为“ N_a ”和“ N_{a-f} ”总计87次。其中“预报和实况均是暴雪”共25次,占比为28.74%;“预报为大雪,实况为暴雪”共49次,占比为56.32%;“预报为暴雪,实况为大雪”共13次,占比为14.94%。“预报为大雪,实况为暴雪”和“预报为暴雪,实况为大雪”2种情况的次数是“预报和实况均为暴雪”次数的2.5倍,占总预报正确次数的近71%,说明在预报能力表现方面,量级模糊法比二分类法能够更精细和准确。

表7 量级模糊法检验结果

Table 7 Verification result of magnitude fuzzing method

时效/h	N_a /个	N_{a-f} /个	N_b /个	N_c /个	POD/%	FAR/%	MR/%
24	25	62	12	108	30.05	12.12	55.38
48	24	41	9	137	23.03	12.16	67.82
72	7	23	3	157	10.95	9.09	83.96

4 综合检验对比分析

对以上4种检验方法结果对比可以看出,相较于二分类法,另外3种方法的预报命中率均有不同程度提高,空报率和漏报率明显降低,其中量级模糊法最为显著。以24 h为例,邻域法、时间偏移法和量级模糊法检验结果为“ M_{a-f} ”的个数分别为8、9和62个,预报命中率在12.08%的基础上分别提高了2.32%、2.61%、17.97%,说明这3种检验方法能体现出空间、时间和量级的预报差异,其中量级模糊法对检验结果影响较大,说明预报员对降雪量的把握总体比较准确,但因为降雪量级差异原因导致检验评

分较低,如果仅用二分类法的结果来衡量预报水平,那么并不能客观精细反映服务效果。

在二分类法的基础上,应用融合以上3种方法的综合检验法进行检验,即将邻域法、时间偏移法和量级模糊法进行梯次叠加检验。由检验结果(表8)可以看出,邻域法和时间偏移法叠加的结果与单独检验结果是一致的,没有重合的情况,说明这2种方

法能单独体现空间和时间差异。而量级模糊法在叠加检验后,与单独检验结果相比有所减少,如“ M_{a-t} ”的个数,24 h由62个减少到51个,48 h由41个减少到34个,说明量级模糊法与其他2种方法的结果有一定的重合。综合检验法有利于消除区域、时间和量级3个维度带来的影响,结果会更加准确客观。

表8 4种检验方法检验结果叠加对比

Table 8 Comparison of superposition results using 4 verification methods

时效/h	$N_a/\text{个}$	$N_{a-t}/\text{个}$			$N_b/\text{个}$	$N_c/\text{个}$	POD/%	FAR/%	MR/%
		+X	+Y	+Z					
24	25	—	—	—	25	157	12.08	50.00	86.26
	25	8	—	—	17	157	14.40	34.00	82.63
	25	8	9	—	14	151	17.00	25.00	78.24
	25	8	9	51	7	107	31.79	7.00	53.50
48	24	—	—	—	29	158	11.37	54.72	86.81
	24	11	—	—	18	158	14.50	33.96	81.87
	24	11	1	—	17	158	14.79	32.08	81.44
	24	11	1	34	4	137	24.45	5.41	66.18
72	7	—	—	—	8	175	3.68	53.33	96.15
	7	1	—	—	7	175	4.00	46.67	95.63
	7	1	0	—	7	175	4.00	46.67	95.63
	7	1	0	22	3	157	10.95	9.09	83.96

注:“+X”“+Y”“+Z”表示在二分类法基础上,分别叠加邻域法、时间偏移法和量级模糊法;“—”表示未叠加相应检验方法。

从检验结果对预报的反作用来分析,检验方法不合理会影响预报检验得分。预报员会优先选择有可能得分的预报结论,这种情况在暴雪预报中尤为明显。因为暴雪出现的总概率较低,用二分类法检验预报命中率仅为12.08%,而漏报率为86.26%。较高的漏报率一方面反映出预报员对于暴雪的预报把握不准,另一方面也反映出检验方法可能存在一定的不合理性。使用邻域法、时间偏移法和量级模糊法进行检验时,能体现空间、时间和量级的差异,特别是量级模糊法,24 h的空报率下降37.88%,漏报率下降30.88%,空报率和漏报率的降低有助于减少预报员的顾虑,在一定程度上促进预报命中率的提高和服务能力的提升。

5 结论与讨论

(1) 2017—2021年的1—3月、11—12月,山东122个国家级地面气象观测站的日降雪量为暴雪的总数为182次。暴雪分布具有明显的时空分布特征,主要出现在半岛北部地区,鲁东南和半岛南部产生暴雪的概率最小。出现次数的年际和月际变化特征明

显,最多年份出现98次,最少年份仅有5次,2月是山东暴雪的高发月,占全年暴雪总次数的38.5%。

(2) 现行业务中应用最广泛的二分类检验法对24 h暴雪检验的预报命中率较低,仅为12.08%,空报率、漏报率较高,分别达50.00%、86.26%,主要原因是该方法受到空间、时间和量级等因素的多重影响,不能精细准确地反映预报能力。

(3) 相较于传统二分类法,邻域法、时间偏移法和量级模糊法的预报命中率有较大幅度提高,空报率和漏报率均较大幅度下降。其中量级模糊法与二分类法检验结果差异最大,预报命中率提升17.97%,空报率下降37.88%,漏报率下降30.88%。从空间、时间和量级等3个方面看,上述3种检验方法能更好体现预报差异,更加精细准确地反映预报水平。

(4) 综合山东暴雪实况及4种检验方法结果可以看出,用传统二分类法检验存在空间、时间和量级差异带来的多种因素影响。融合邻域法、时间偏移法和量级模糊法3种方法的综合检验法,能从空间、时间和量级3个维度区分出预报差异,检验结果更加精细准确,有利于引导预报员放下“检验评分低”

的思想包袱,做出科学客观的预报,提升预报服务效果。因此,建议在业务考核中采用融合邻域法、时间偏移法和量级模糊法3种方法的综合检验法代替二分类法。

受观测站点分布和观测手段的限制,仅对山东122个国家级地面气象观测站进行暴雪统计分析,如果增加固态降水仪等观测资料,选用更多的观测站点进行降雪统计,对暴雪的统计会更加精细客观。在检验方法上,对邻域范围、偏移时间和量级模糊区间的阈值有待于进一步分析研究,并将检验结果反馈到预报技术的研究与运行中,从而使评分方法更为客观。

参考文献:

- [1] 孙秀忠,罗勇,张霞,等.近46年来我国降雪变化特征分析[J].高原气象,2010,29(6):1594-1601.
- [2] 张志富,希爽,刘娜,等.1961—2012年中国降雪时空变化特征分析[J].资源科学,2015,37(9):1765-1773.
- [3] 周晓宇,赵春雨,崔妍,等.辽宁省不同等级降雪变化特征[J].冰川冻土,2017,39(4):720-732.
- [4] 周晓宇,赵春雨,崔妍,等.1961—2017年中国东北地区降雪时空演变特征分析[J].冰川冻土,2020,42(3):766-779.
- [5] 除多,洛桑曲珍,杨志刚,等.1981—2010年青藏高原降雪日数时空变化特征[J].应用气象学报,2017,28(3):292-305.
- [6] 李效收.1961—2010年新疆降雪的变化特征[D].兰州:西北师范大学,2013.
- [7] 陆桂荣,杨成芳,程攀,等.1961—2015年我国鲁东南地区降雪的气候特征分析[J].冰川冻土,2018,40(3):492-500.
- [8] 胡顺起,曹张驰,陈滔.山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J].高原气象,2017,36(4):984-992.
- [9] 王玉亮,胡顺起.1999—2018年鲁南地区暴雪天气的影响系统及环流特征[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(3):8-15.
- [10] 韦青,代刊,林建,等.2016—2018年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J].气象,2020,46(10):1272-1285.
- [11] 谭政华,陆忠艳,林海峰,等.2020年辽宁省汛期多模式降水预报评估[J].气象与环境学报,2023,39(1):10-16.
- [12] 王东东,孙丽,杨磊,等.台风“巴威”不同类型降水多模式预报与空间检验对比评估[J].气象与环境学报,2022,38(4):37-46.
- [13] 张旭,孙宝利,白佳宁,等.阜新地区东北冷涡多模式降水预报检验[J].气象与环境学报,2021,37(3):19-24.
- [14] 刘凑华,牛若芸.基于目标的降水检验方法及应用[J].气象,2013,39(6):681-690.
- [15] 韦青,李伟,彭颂,等.国家级天气预报检验分析系统建设与应用[J].应用气象学报,2019,30(2):245-256.
- [16] 朱晓彤,姚凯,李尚锋,等.SAL方法在东北地区台风降水预报检验中的应用[J].气象与环境学报,2023,39(3):31-39.
- [17] 贾旭轩,张立鹏,王赛,等.基于邻域法的区域模式环渤海短时强降水预报评估[J].气象与环境学报,2023,39(3):40-46.
- [18] 蔡义勇,危国飞,党皓飞,等.基于降水目标的主雨带识别及预报误差空间检验[J].气象与环境学报,2020,36(1):36-42.
- [19] 符娇兰,代刊.基于CRA空间检验技术的西南地区东部强降水EC模式预报误差分析[J].气象,2016,42(12):1456-1464.
- [20] 孔祥伟,张君霞,杨晓军,等.西北地区东部强降水大尺度数值模式预报空间偏差分析[J].高原气象,2022,41(5):1109-1123.
- [21] 孔荣,王建捷,梁丰,等.尺度分解技术在定量降水临近预报检验中的应用[J].应用气象学报,2010,21(5):535-544.
- [22] 赵滨,张博.邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J].暴雨灾害,2018,37(1):1-7.
- [23] 黄娟,赵放,李文娟,等.“SAL”方法在短时融合降水检验评估中的应用[J].科技通报,2019,35(10):33-38.
- [24] 中国气象局.中短期天气预报质量检验办法(试行):气发[2005]109号[Z].北京:中国气象局,2005.
- [25] 高留喜,杨成芳,刘畅.山东一次极端雨雪过程积雪特征分析及模式产品检验[J].海洋气象学报,2022,42(4):58-66.
- [26] 杨成芳,曹玥瑶.秋季渤海海效应降雨的统计特征及形成机理[J].海洋气象学报,2022,42(1):12-22.
- [27] 高晓梅,杨成芳,王世杰,等.莱州湾冷流降雪的气候特征及其成因分析[J].气象科技,2017,45(1):130-138.
- [28] 周雪松,杨成芳,孙兴池.基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):26-37.