

安徽省近 10 年降水预报性能评估及应用对策

安晶晶¹, 叶金印¹, 刘高平¹, 郝莹^{1,2}

(1. 安徽省气象台, 合肥 230031; 2. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:对降水预报进行性能评估及应用对策研究可以更好地发挥降水预报在防汛抗旱中的决策支持作用。基于安徽省气象台近 10 年汛期(2007—2016 年 5 月 1 日—9 月 30 日)24~168 h 共 7 个预见期降水预报和地面降水观测资料,采用正确率、TS 评分、概率统计、ROC 曲线以及 CTS 等方法评估安徽省降水预报性能,并分析其在防汛抗旱中的应用对策。结果表明:(1)近 10 年中雨到暴雨量级降水预报性能逐步提高;降水预报性能随预见期缩短而逐步提升;降水预报总体性能随降水强度增加呈下降趋势;皖北平原降水预报性能优于皖南山区及大别山区;(2)降水预报与实际量级整体相差不大,存在过度预报现象且对强降水中心预报能力不足,但对于强降水过程仍有较好的指示意义。当预报有降水过程时,防汛抗旱要关注降水空间分布的不均匀性和不确定性;(3)长预见期降水预报不确定性大,短预见期降水预报可信度较大,尤其是短预见期的强降水过程以及转折性天气过程预报性能相对于长预见期有明显提高;在具体应用时要长中短预见期预报相结合,并根据最新降水预报进行防汛抗旱方案调整。分析结果表明降水预报可为防汛抗旱提供有价值的决策支持信息。

关键词:降水预报;性能评估;安徽省;洪水风险管理;水资源调度;应用对策

中图分类号:P457.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0327-07

Evaluation of Precipitation Forecasts and Application Countermeasures in Anhui Province in Nearly 10 Years

AN Jingjing¹, YE Jinyin¹, LIU Gaoping¹, HAO Ying^{1,2}

(1. Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China; 2. State Key Laboratory on Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The evaluation of precipitation forecasts and corresponding researches related to application countermeasures can better play the role of precipitation forecasts in flood control and drought relief. Based on the precipitation forecasts with 7 lead times (24~168 h) and the observation precipitation data in flood season during the period from 2007 to 2016, five evaluation methods (Percentage Correct, Threat Score, Probability Statistics, ROC curve, CTS) were introduced to estimate the precipitation prediction skill and analyze the application countermeasures in flood control and drought relief. The results indicate that: (1) the forecast skill of moderate rainfall and the above intensity increased gradually in the recent 10 years; the precipitation forecast performance was improved with the shortening of lead time, however, decreased with the increase of rainfall intensity; normally, the forecast skill in the plain area in north Anhui was better than that in southern mountain area of Anhui Province and Dabie Mountain area; (2) overall, even though the rainfall predictions were well consistent with observations, the over forecast and forecast deviation of strong precipitation center still existed; in aspect of heavy rainfall processes, precipitation forecasts were of strong indication significance; according to the above results, heterogeneity and uncertainty of the spatial distribution of precipitation should be concerned in flood and drought prevention operation; (3) compared to forecasts with long lead time which had great uncertainty, forecasts with short lead time were more reliable and had better performance in heavy precipitation processes and transition weather. In practical application, the combination of precipitation forecasts with different forecast periods and the latest forecasts was strongly suggested to be

utilized to adjust the flood control and drought relief operation. All statistic results proved that the usability of precipitation forecast in flood season and the research results could be valuable reference of flood risk management and water resource distribution.

Keywords: precipitation forecast; performance evaluation; Anhui Province; flood risk management; water resource distribution; application countermeasures

降水多寡是导致一个地区洪涝或干旱最直接的因素,降水预报是洪水风险管理和水资源调度重要科学依据^[1-2]。有效利用天气预报是防汛抗旱重要非工程措施之一^[3-4]。选用不同预见期降水预报信息,采用气象水文相结合的方法可延长洪水预报的预见期,为洪水资源利用、防汛抗洪物资调配以及水资源调度提前提供决策支持信息,可为抗洪抢险赢得宝贵时间,为抗旱灌溉节省大量人力物力^[5-10]。根据降水预报信息可预测旱情或土壤墒情发展变化,并确定是否进行灌溉或根据降水预报确定灌溉量,以最大限度地节约水资源和人力物力成本^[11-13]。准确把握降水预报性能并有效利用降水预报信息,对保障人民生命财产安全和发挥经济社会效益有重要价值^[14-16]。

安徽位于我国南北气候过渡带,汛期北方大陆性气团和南方暖湿气团在此交汇,亦常常受到内陆台风低压环流的影响,洪涝灾害频发;在夏季风偏强或偏弱的年份又容易形成干旱^[17-18]。同时,安徽地貌类型复杂多样,皖南山区和大别山区易受强降水影响导致山洪爆发,淮北平原受到排涝能力限制容易发生涝灾,淮北平原和丘陵区干旱现象时有发生^[19]。掌握天气预报的不确定性,更好地将其应用于防汛抗旱工作决策,对于做好安徽省洪水风险管理和水资源调度具有重要的现实意义。本文检验评估近 10 a 安徽省气象台制作发布的安徽省降水预报性能,并分析降水预报应用对策,以更好地发挥降水预报在洪水风险管理和水资源调度工作中的决策支持作用。

1 资料来源

2007—2016 年汛期 5 月 1 日—9 月 30 日的逐日全省各站点降水预报资料来源于安徽省气象台。逐日降水预报划分为 7 个预见期:0~24 h,24~48 h,48~72 h,72~96 h,96~120 h,120~144 h,144~168 h(北京时间 20 时为日界,下同)。地面降水观测资料采用安徽省气象信息中心提供的安徽省气象观测站的整编资料。安徽县级行政边界及 82 个国家级气象观测站点分布见图 1。

2 降水预报性能评估方法

采用正确率(Percentage Correct,简称 PC)、TS

评分(Threat Score,风险评分,简称 TS)、ROC 曲线(Receiver Operating Characteristic Curve,相对特征运行曲线)以及概率统计、转折天气评分(CTS)5 种方法评估无雨、小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨 7 个量级的降水预报。降水量分级采用中国气象局日降水量等级划分标准:小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)、暴雨(50~99.9 mm)、大暴雨(100~250 mm)和特大暴雨(>250 mm)。将全省 82 个气象观测站逐日预报中“有”“无”(某量级)降水和实况“有”“无”(某量级)降水结果构成预报与实况关系:NA 为有降水正确预报次数(预报有,实况有),NB 为预报空报次数(预报有,实况无),NC 为预报漏报次数(预报无,实况有),ND 为无降水预报正确次数(预报无,实况无)。

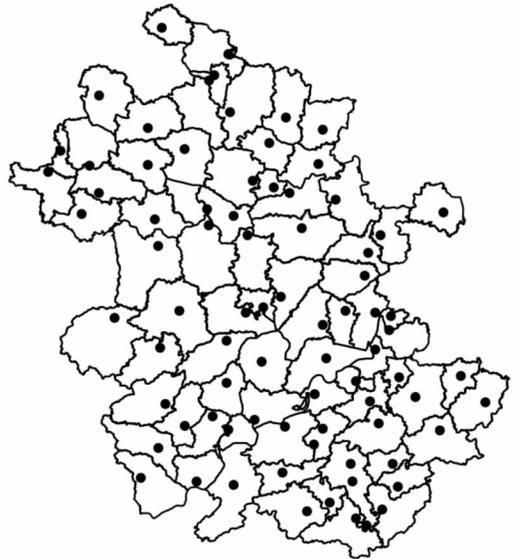


图 1 安徽县界及国家级气象观测站点分布情况

2.1 正确率(PC)

降水预报正确率计算公式为:

$$PC = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \times 100\% \quad (1)$$

式中:NA 为预报正确次数;NB 为空报次数;NC 为漏报次数;ND 为“无降水”预报正确次数。

2.2 TS 评分(TS)、漏报率(PO)以及空报率(FAR)

TS 评分(TS)、漏报率(PO)以及空报率(FAR)的计算公式如下:

$$TS_k = \frac{NA_k}{NA_k + NB_k + NC_k} \times 100\% \quad (2)$$

$$PO_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \times 100\% \quad (3)$$

$$FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \times 100\% \quad (4)$$

式中: k 代表降水量级。漏报率为实况量级高于预报量级在预报中的比例,说明了预报不足的现象,空报率为实况量级低于预报量级在预报中的比例,反映了预报过度的现象。TS 评分为实况与预报量级一致在预报中的比例,数值越大表明预报越准确。

2.3 概率统计(P)

各等级降水预报对应的实际降水量级概率(P)计算公式为:

$$P_k = \frac{N_{ki}}{N_k} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_k 为预报 K 等级降水次数; N_{ki} 为预报 K 等级降水预报时实际发生的 i 等级降水次数。

2.4 ROC 曲线

相对特征运行曲线(ROC 曲线)分析方法广泛应用于概率天气预报技巧检验^[13]。ROC 曲线就是以虚警率为横坐标,命中率为纵坐标绘制的曲线。命中率 R_{hit} 、虚警率 $R_{falsealarm}$ 计算公式如下:

$$R_{hit} = \frac{NA}{NA + NC} \times 100\% \quad (6)$$

$$R_{falsealarm} = \frac{NB}{NB + ND} \times 100\% \quad (7)$$

ROC 曲线和横坐标构成的面积为 AUC 值(Area Under Curve),ROC 曲线位于对角线上方时,命中率大于虚警率,即当 $AUC > 0.5$ 时,有正的预报价值。

2.5 转折性天气评分(CTS)^[20]

转折性天气是指从无到有或者从有到无的转折性降水过程。若预报与实况一致,则判定转折性天气预报正确;预报出现转折天气而实况没有出现则判定为空报,实况出现了转折性天气而未能预报则判定为漏报。

转折性天气预报评分:

$$CTS = \frac{CNA}{CNS + CNY - CNA} \times 100\% \quad (8)$$

转折天气空报率

$$CFAR = \frac{CNY - CNA}{CNY} \times 100\% \quad (9)$$

转折天气漏报率

$$CPO = \frac{CNS - CNA}{CNS} \times 100\% \quad (10)$$

式中:CNS 为实况转折性天气的数量;CNY 为预报转折性天气的数量;CNA 为实况和预报均为转折性天气,并且转折过程类型相同。

3 降水预报评估指标分析

3.1 总体预报性能评估

对安徽省 82 个气象观测站点 2007—2016 年汛期(5 月 1 日—9 月 30 日)逐年实况降水数据以及 24~168 h 预见期全省各县降水预报数据分不同量级和预见期进行统计,降水实况与预报数据统计结果见表 1。如 2007 年“降水实况”观测实况为“无雨”7 585 站天,24 h 预见期的降水预报“无雨”为 6 036 站天,其他类推。

表 1 降水实况与预报数据列表

时效	量级	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
实况	无雨	7585	7386	7375	7360	7042	7948	6181	6925	7264	7475
	小雨	2933	2977	2990	3206	3395	2844	2072	3373	3133	2805
	中雨	797	877	811	906	838	733	604	965	925	520
	大雨	459	536	465	478	550	423	356	530	588	631
	暴雨	249	183	200	237	267	239	196	229	267	301
	大暴雨	64	53	75	53	48	53	48	48	66	108
24 h 预见期	无雨	6036	6017	6406	5968	5416	6885	5657	6408	6666	6440
	小雨	3949	3882	3666	4106	4197	3384	2284	3958	3369	3548
	中雨	1150	1043	972	1096	1383	1120	863	975	1110	1250
	大雨	606	685	397	410	679	476	310	426	574	601
	暴雨	346	385	475	660	539	370	305	303	486	393
	大暴雨	0	0	0	0	26	5	38	0	35	8
48 h 预见期	无雨	5899	5994	5777	5794	5124	6708	5644	6059	6732	6354
	小雨	4303	3875	4392	3954	4532	3354	2208	3902	3407	3806
	中雨	1082	1222	1023	1401	1630	1332	825	1283	1121	1215
	大雨	615	712	247	452	504	417	350	484	595	570
	暴雨	267	288	470	559	441	429	321	262	371	292
	大暴雨	0	0	0	0	9	0	32	0	14	3

续表 1

时效	量级	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
72 h 预见期	无雨	6075	6091	5850	5828	5244	6688	5530	5975	6822	6172
	小雨	4033	4042	4415	4135	4808	3516	2147	3893	3279	4151
	中雨	1145	1130	1016	1267	1398	1295	922	1365	1134	1254
	大雨	618	511	445	441	494	442	481	509	759	456
	暴雨	207	238	271	489	296	299	233	168	243	202
	大暴雨	9	0	0	0	0	0	0	0	3	5
96 h 预见期	无雨	5523	6139	6246	6187	5271	7002	5602	5779	7485	6390
	小雨	3679	4043	3996	4130	5095	3228	2105	4007	2979	3836
	中雨	1555	1362	1149	831	913	1133	1009	1457	1109	1201
	大雨	1048	657	379	717	658	261	265	421	466	424
	暴雨	282	37	427	375	223	536	439	165	200	389
	大暴雨	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
120 h 预见期	无雨	6098	6297	6582	6758	5733	7147	5710	5814	7952	6365
	小雨	3694	4277	3952	4024	5086	3261	1895	3910	2683	4012
	中雨	1252	1240	957	768	855	1008	955	1496	1022	1149
	大雨	682	411	362	541	537	348	377	358	415	395
	暴雨	361	13	344	149	109	396	328	171	156	319
	大暴雨	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0
144 h 预见期	无雨	6683	6524	6406	7232	5837	7400	5936	6237	7790	6562
	小雨	3208	4308	3666	3953	4916	3277	2087	4011	2863	3790
	中雨	1382	1205	972	493	968	922	789	1285	1079	1264
	大雨	623	268	397	465	359	289	273	232	331	418
	暴雨	191	13	475	97	80	192	259	61	173	206
	大暴雨	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0
168 h 预见期	无雨	6799	7422	6623	7808	6924	7761	6117	6661	7865	6868
	小雨	3467	3618	3858	3548	4132	3072	1545	3529	3071	3798
	中雨	1062	931	1156	446	831	845	758	1172	766	997
	大雨	642	107	238	409	388	313	377	267	326	402
	暴雨	117	0	322	30	45	169	236	38	130	175
	大暴雨	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0

对 7 个预见期内“有”“无”降水预报(不分量级)统计晴雨预报正确率,对各降水量级不分预见期计算 TS 评分、空报率和漏报率(图 2)。因特大暴雨出现的次数非常少,并且近 10 a 也未作过“特大暴雨”量级降水预报,为便于分析将“特大暴雨”“大暴雨”两个量级进行合并处理分析。

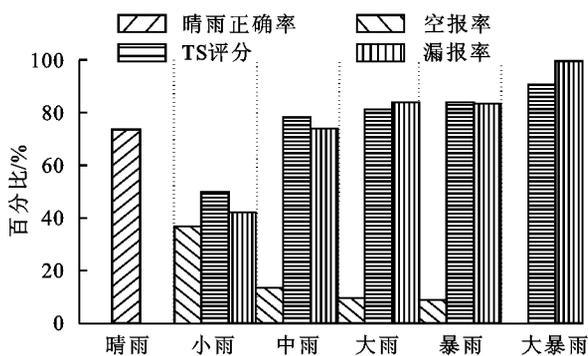


图 2 不同降水量级预报的 TS 评分、空报率和漏报率

晴雨预报正确率为 73.6%,表明在不考虑量级的情况下,对于晴雨预报的性能较高。小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨量级对应的 TS 评分分别为:36.8%, 13.5%, 9.5%, 8.9%, 0.4%,随着降水量级增大明显下降,空报率和漏报率明显提升。TS 评分是一种严苛的评估指标,它反映了降水预报与实况一致性程度,即预报量级与实况量级完全一致的样本数占有所有预报样本加漏报样本的比例,因而数值一般较低。降水范围与降水中心位置预报正确与否均会影响 TS 评分,整个降水落区的范围与大尺度天气系统相关,强降水中心位置与中小尺度对流系统相对应。由于中小尺度天气系统局地性和突发性强,导致强降水预报难度较高,对应的 TS 评分随之降低。

3.2 逐年预报性能分析

2007—2016 年逐年各量级降水预报 TS 评分(图 3)表明:近 10 a 安徽省小雨量级 TS 评分存在一定波

动(35%左右),但是中雨到暴雨量级的 TS 评分总体呈稳定上升趋势(中雨从 11.5%到 18.8%、大雨从 7.7%到 10.0%、暴雨从 7.2%到 10.0%)。强降水预报是天气预报难点之一,近 10 a 中雨到暴雨量级降水预报性能逐步提高。值得注意的是,大暴雨及以上量级降水属于小概率事件,从小样本统计计算的 TS 评分及其变化不能反映实际预报水平。

3.3 不同预见期预报性能分析

7 个预见期的降水预报 TS 评分及空报率漏报率(图 4)表明:降水预报性能随预见期延长呈现整体下降趋势。24~72 h 预见期,TS 评分较高且空报率、漏报率也较低;96 h 及以上预见期,对大暴雨基本没有体现出预报能力;96~168 h 预见期,中雨以上量级

空报率、漏报率较大。各预见期晴雨预报正确率均在 60%以上,表明对于降水范围的预报能力较高,但强降水中心预报能力相对较差。

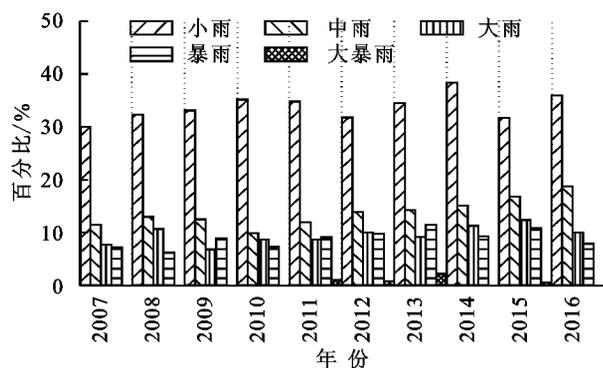


图 3 不同降水量级预报 TS 评分逐年统计

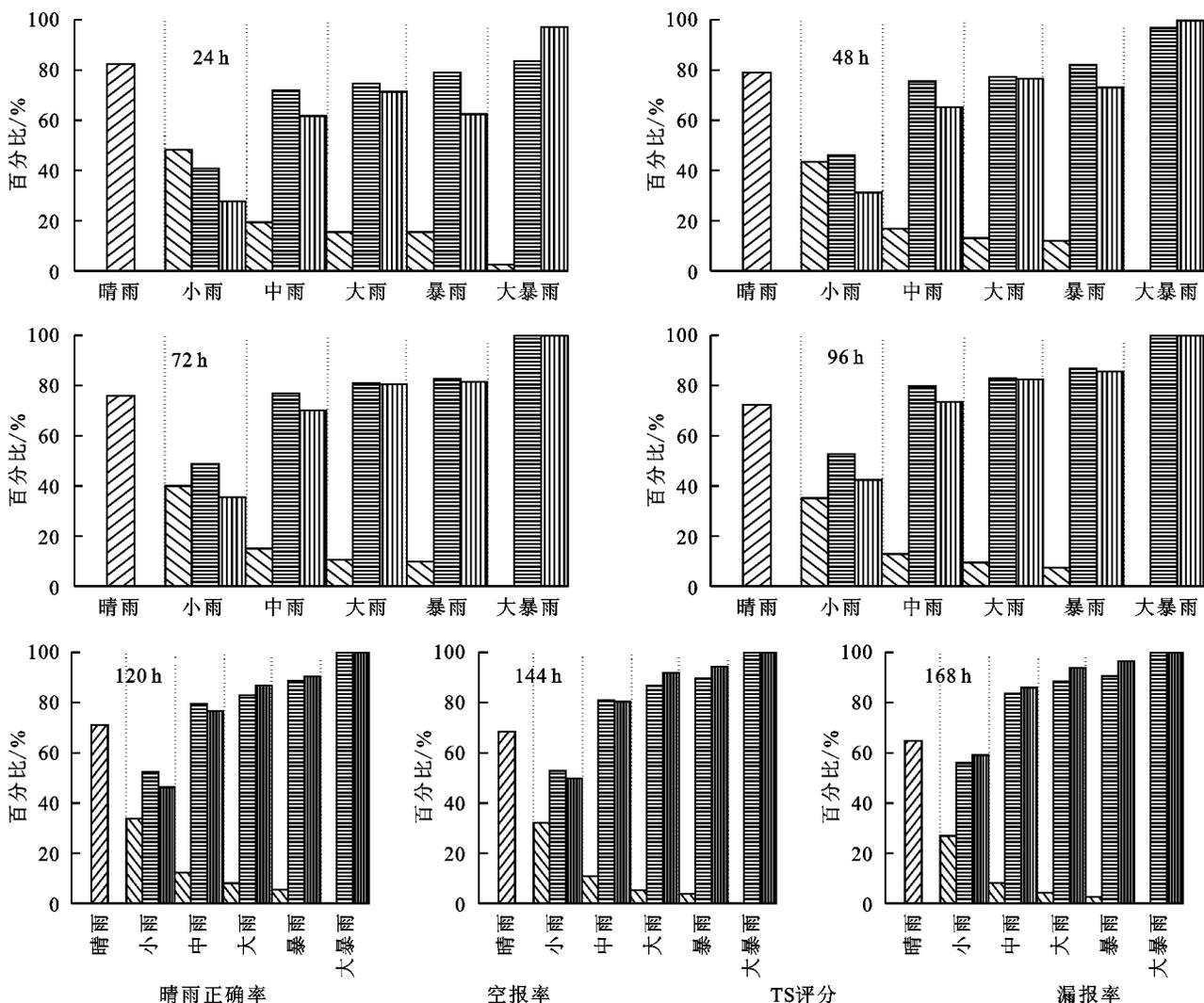


图 4 不同预见期各量级降水预报 TS 评分、空报率和漏报率

3.4 预报性能区域差异性分析

利用安徽省 82 个气象站各量级降水预报(包括:无降水、小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨)的命中数(NA,ND)、漏报数(NB)和空报数(NC)计算预报正确率,作为各个站点的综合预报得分(图 5),分析降

水预报性能的区域差异性。安徽省预报性能与地形高度呈反相关,皖南山区及大别山区普遍在 52%左右,存在两个明显极值低点(黄山光明顶站 49.74%、岳西站 51.34%),皖北平原地带,地形对降水影响小,对应综合预报得分比较高,普遍在 60%以上。由

于山区地形容易引发对流,迎风坡对于大范围降水也有加强作用,这种地形作用对降水的影响具有很大的不确定性,往往造成预报失误。

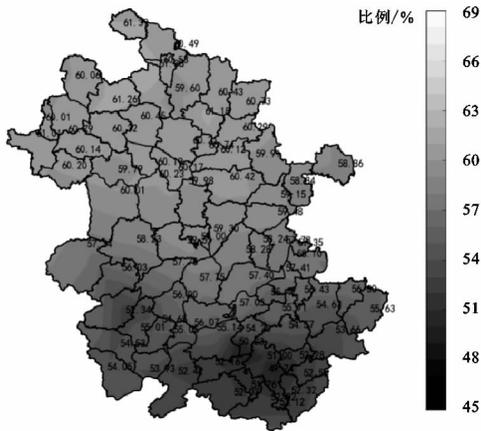


图 5 降水预报性能区域分布

4 降水预报应用对策分析

由于大气运动的复杂性,人类对大气运动机理的认识还有限,尽管现在天气预报的水平越来越高,但仍然存在偏差和不确定性。降水预报的误差和不确定性主要体现在量级预报偏差、降水过程开始和结束时间预报偏差,并且这种预报偏差和不确定性随预见期延长而增大。深入认识和理解降水预报的不确定性,发掘降水预报的有效性和确定性信息,可为洪水风险管理和水资源调度提供科学的决策支持信息。

4.1 降水分级预报应用策略

选择近 10 a 预报有降水以及实际发生降水的所有天气个例、所有预见期构成统计样本,分析各量级降水预报对应的实际降水量级概率(图 6)。

(1) 预报无降水时,出现无降水的概率较高为 57.8%,出现小雨概率为 27.5%,出现中雨以上量级可能性仅为 7%。这种晴雨预报或量级预报偏差大多是由局地强对流引起的小范围、短历时的降水。

(2) 预报降水量级主要分布在实况降水量级附近及以上,预报降水量级大于等于实况降水量级的概率超过 75%,预报量级上呈现了过度预报的特点。

(3) 随预报量级的增大,实况出现小雨或无雨的概率明显减小,而实况出现大雨、暴雨、大暴雨的概率明显上升,天气预报对强降水过程的预报总体水平较高,强降水空报率与漏报主要是由于量级误差造成的。

所有预见期的晴雨预报评分较高,但预报量级往往比实况量级偏大,预报量级在实况量级附近的概率超过 48%,预报量级低于实况量级的概率不超过 25%。对抗旱灌溉工作而言,若预报有中雨及以上量级降水时,可推迟人工灌溉的时间和降低人工灌溉

量。对洪水风险管理工作而言,当预报有降水过程时,防汛调度要关注降水空间分布的不均匀性和不确定性,需要防范大范围降水过程之中局地强降水可能造成的山洪、局部内涝等灾害。

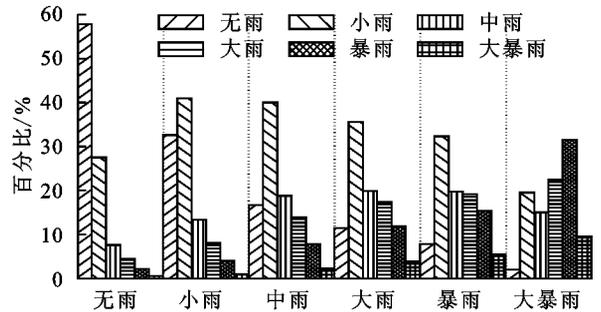


图 6 各降水量级预报对应实际发生的降水量级概率

4.2 不同预见期降水预报应用策略

利用降水预报和实况分别计算不同量级 NA, NB, NC, ND 值得到 ROC 曲线(图 7),以进一步检验不同预见期的不同量级降水预报性能。各时次各量级的降水预报 ROC 特征曲线都在对角线以上,表明降水预报对各量级的降水都有正预报技巧。但是各量级的 AUC 面积随时效增长显著下降,且大于 24 h 时效的降水预报下降趋势明显。

随着预见期缩短天气形势演变趋势逐渐清晰,降水预报效能随着预见期缩短而提升。对于洪水风险管理工作,预报出现中雨以上量级降水区域要做好早期预警,并关注最新降水预报进行抗洪排涝调度安排调整,或根据旱情提前做好人工灌溉工作安排和水资源调度。

4.3 转折天气降水预报应用策略

转折性天气是指从无降雨到有降雨或者从有降雨到无降雨的天气变化过程。转折性天气的降水范围和强度预报难度要高于稳定型天气,但是转折性天气对于洪水风险管理和水资源利用非常重要。对所有转折性天气个例分不同预见期分析 CTS 评分、空报率、漏报率(图 8)。

96 h 以上预见期预报 CTS 评分低于或者接近于 20%,空报率漏报率高于 60%,24 h 预见期空报率和漏报率均在 50%以下,CTS 评分也提高到了 37%,短预见期的转折性天气降水预报仍然有指示意义。主汛期即将来临,若预报进入降水集中期,应及时做好防汛抗洪工作安排和防汛物资调度等洪水风险管理工作。主汛期即将结束时,若预报久雨转晴,可提前做好蓄水安排和洪水资源化管理。干旱区域可参考天气预报提前进行水资源调度和人工灌溉策略制定和调整。

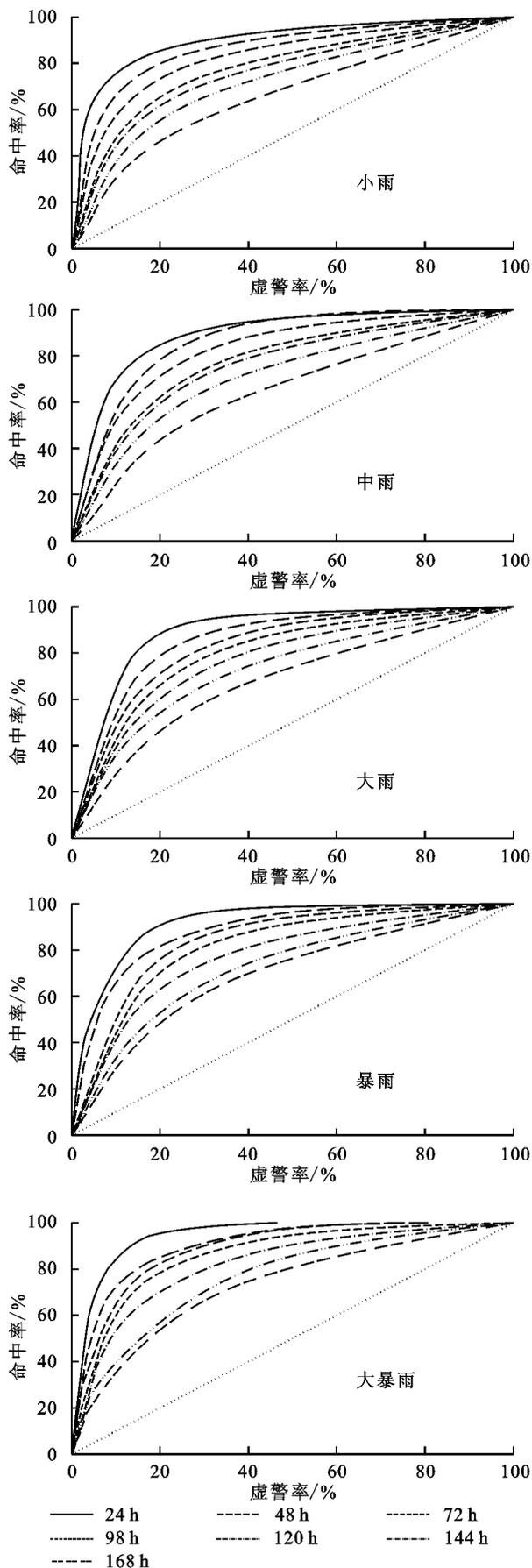


图 7 小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨及其以上量级降水预报 ROC 曲线

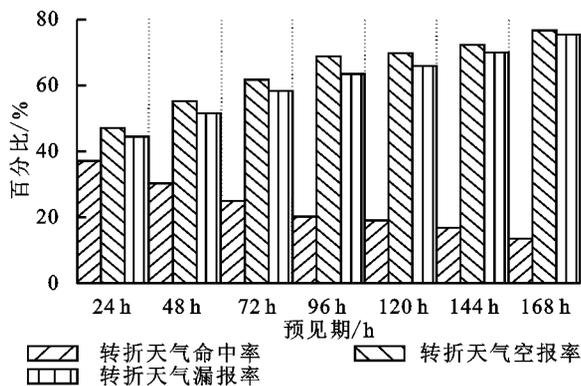


图 8 转折性天气 CTS、空报率、漏报率随预见期变化

5 结论

(1) 近 10 a 中雨到暴雨量级降水预报性能逐步提高;降水预报总体性能随降水强度增加、预见期延长呈下降趋势;皖北平原降水预报性能优于皖南山区及大别山区;预报有弱降水过程时,应注意防范局地强降水及其影响。

(2) 对于降水范围的预报能力较高,但强降水中心预报能力相对较差,预报量级往往比实况量级偏大。若预报有中雨及以上量级降水时,干旱期可推迟灌溉的时间和降低灌溉量。当预报有降水过程时,防汛抗旱调度要关注降水空间分布的不均匀性和不确定性,需要防范大范围降水过程之中局地强降水可能造成的山洪、局部内涝等灾害。

(3) 降水预报性能随着预见期缩短逐步提升,尤其是 72 h 内降水范围及强度预报确定性越来越大,可根据降水预报范围和强度做好应用对策调度。汛期强降水过程以及转折性天气过程是天气预报的难点和重点,同时也是防汛抗旱工作关键期,在应用降水预报时要注意长、中、短预见期预报相结合,并根据最新降水预报进行洪水风险管理工作部署和水资源调度方案调整。

参考文献:

[1] 张志彤. 关于 2014 年防汛抗旱工作的报告[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(1): 8-13.

[2] 李谢辉, 王磊, 苗长虹, 等. 河南省水旱灾害生态风险综合评价[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2308-2317.

[3] 张和喜, 迟道才, 王永涛, 等. 基于 NNBR 与蒙特卡洛算法的降雨量预报模型应用研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 106-110.

[4] 何秀恋, 沈龙喜. 福建诏安县水库库区强降水预报与防汛调度[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 4(2): 46-47.

[5] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验[J]. 气象, 2010, 36(12): 56-61.

- [17] 郭晓娜,苏维词,李强,等. 三峡库区(重庆段)地表起伏度及其对生态系统服务价值的影响[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(6):887-894.
- [18] 姜永华,江洪,曾波,等. 三峡库区(重庆段)土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析[J]. 水土保持研究,2008,15(4):234-237,243.
- [19] 国洪磊,周启刚. 三峡库区蓄水前后土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(5):222-228.
- [20] 严恩萍,林辉,王广兴,等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报,2014,34(20):5962-5973.
- [21] 张宝雷,张淑敏,周启刚. 土地利用和生态系统服务功能变化研究:以三峡库区大宁河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(2):181-185.
- [22] 姚玲,廖和平,邓春燕,等. 基于土地利用变化的三峡库区生态服务价值损益分析:以重庆市巫山县为例[J]. 西南大学学报:自然科学版,2012,34(5):91-96.
- [23] Feng Yingbin, He Chunyan, Yang Qingyuan, et al. Evaluation of ecological effect in land use planning using ecosystem service value method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(9):201-211.
- [24] 田耀武,黄志霖,肖文发,等. 基于 RS 和 GIS 的退耕还林模式对三峡库区黑沟小流域生态服务价值的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(3):97-100.
- [25] 李慧颖,李晓燕,贾明明,等. 2013年三江平原北部洪水对沼泽湿地景观的影响[J]. 湿地科学,2015,13(3):344-349.
- [26] 刘吉平,董春月,盛连喜,等. 1955—2010年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 地理科学,2016,36(6):879-887.
- [27] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [28] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [29] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.
- [30] 彭文甫,周介铭,杨存建,等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(7):1053-1062.
- [31] Chen F, Ge X P, Chen J F. Geostatistical analysis on human impact indexes for land use/cover in Fujian and Taiwan [J]. Tropical Geography, 2008,26(6):518-522.
- [32] 李月臣,刘春霞,熊德芳. 重庆都市区土地利用/覆盖变化驱动机制分析[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2010,27(1):36-41,46.
- [33] 段瑞娟,郝晋珉,张洁瑕. 北京区位土地利用与生态服务价值变化研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):21-28.

~~~~~

(上接第 333 页)

- [6] Van Steenberg N, Willems P. Rainfall uncertainty in flood forecasting: Belgian case study of Rivierbeek[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014,19(19):554-555.
- [7] Lin C A, Wen L, Lu G, et al. Real-time forecast of the 2005 and 2007 summer severe floods in the Huaihe River Basin of China[J]. Journal of Hydrology, 2010,381(1):33-41.
- [8] Diakakis M. Rainfall thresholds for flood triggering: The case of Marathonas in Greece[J]. Natural Hazards, 2011,60(3):789-800.
- [9] 陈红光,李晨洋,李晓丹. 基于风险分析的三江平原灌区多水源联合调度方案优化决策研究[J]. 水土保持研究,2013,20(4):277-280.
- [10] 刘义花,鲁延荣,周强,等. HBV 水文模型在玉树巴塘河流域洪水临界雨量阈值研究中的应用[J]. 水土保持研究,2015(2):224-228.
- [11] 张红英,宋燕,魏建军,等. 长治地区干旱分析和降水预报[J]. 气象科技,2006,34(4):426-431.
- [12] 姬晶,张洪波,刘攀. 泾惠渠灌区干旱预警体系研究[J]. 自然灾害学报,2016,25(1):45-55.
- [13] Rahiz M, New M. Does a rainfall-based drought index simulate hydrological droughts[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(9):2853-2871.
- [14] 张星星,朱成立,彭世彰,等. 降水预报准确度分析及其在提高降水利用率中的作用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2014(3):230-233.
- [15] 耿献辉,张晓恒,宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析:基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J]. 自然资源学报,2014,29(6):934-943.
- [16] Hubbard R M, Stape J L, Ryan M G, et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2010,259(9):1714-1721.
- [17] 于波. 安徽天气预报业务基础与实务[M]. 北京:气象出版社,2013:1-3.
- [18] 矫梅燕,姚学祥,周兵. 2003 淮河大水天气分析与研究[M]. 北京:气象出版社,2004:55-93.
- [19] 谢五三,田红. 安徽省近 50 年干旱时空特征分析[J]. 灾害学,2011,26(1):94-98.
- [20] 张冰,魏建苏,王文兰,等. 转折性天气降水预报检验方法及应用[J]. 气象科技,2012,40(3):411-416.