

余洋,万蓉,付志康,等,2024. 基于 GNSS 水汽和地面假相当位温观测的短时强降水阈值预报方法研究[J]. 气象,50(5):603-615. Yu Y, Wan R, Fu Z K, et al, 2024. Development of a threshold prediction model for short-time severe precipitation based on GNSS-derived PWV and pseudo-equivalent temperature[J]. Meteor Mon, 50(5):603-615(in Chinese).

基于 GNSS 水汽和地面假相当位温观测的 短时强降水阈值预报方法研究^{*}

余 洋 万 蓉 付志康 向怡衡

中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 基于 2019 年和 2020 年 6—7 月 GNSS 水汽监测网大气可降水量(PWV)资料和并址气象站的地面雨量、温、压、湿等同步观测数据,利用临界成功指数(CSI)和命中率(POD)两个检验指标,探索建立了基于 PWV、6 小时水汽增量(PWV^{*})及假相当位温距平(θ_{se}^*)的短时强降水阈值预报方法,并利用 2021 年 6—7 月降水样本对该预报方法进行检验,结果显示 CSI 和 POD 分别为 0.167 和 0.593,其评分高于目前常规业务方法对短时强降水的客观预报评分,其中约 48% 的短时强降水发生在预警之后的 24 小时内,约 78% 发生于 48 小时内。研究区域内 78.6% 的短时强降水样本发生在连续 15 小时 PWV^{*} 的累积值($\sum PWV^*$) ≥ 75 mm 且连续 24 小时 θ_{se}^* 累积值($\sum \theta_{se}^*$) ≥ 30 K 的条件下;PWV 高值区叠加 $\sum PWV^*$ 和 $\sum \theta_{se}^*$ 的大值区对梅雨期短时强降水以及暴雨发生区域有较好的指示性。

关键词: 短时强降水, GNSS, 大气可降水量, 假相当位温, 客观预报

中图分类号: P457, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.032801

Development of a Threshold Prediction Model for Short-Time Severe Precipitation Based on GNSS-Derived PWV and Pseudo-Equivalent Temperature

YU Yang WAN Rong FU Zhikang XIANG Yiheng

China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: Using the precipitable water vapor (PWV) data from Global Navigation Satellite System (GNSS) meteorological network and the time series of hourly precipitation, temperature, pressure and relative humidity from the adjacent meteorological stations in Hubei Province from June to July in 2019 and 2020, we build a new threshold prediction model of short-time severe precipitation on the basis of PWV, 6 h PWV tendency (PWV^{*}) and pseudo-equivalent temperature anomaly (θ_{se}^*) in this study. The critical success index (CSI) and probability of detection (POD) are used to determine and validate the thresholds for the three predictors. This new model is tested by the precipitation data in June and July, 2021. The results show that CSI and POD scores are 0.167 and 0.593, respectively, which are higher than the objective forecast scores for short-time severe precipitation by conventional operational methods. About 48% of the short-time severe precipitation events are successfully predicted with a lead time of 24 h, and 78% occur

^{*} 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金培育项目(2022CFD122)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J010)共同资助

2023 年 4 月 8 日收稿; 2024 年 4 月 2 日收修定稿

第一作者: 余洋, 主要从事大气探测研究. E-mail: yuyang718@foxmail.com

通讯作者: 万蓉, 主要从事大气探测研究. E-mail: wanrong@whihr.com.cn

within 48 h. The analysis results show that 78.6% of the severe precipitation occur under the condition of the 15 h cumulative value of $PWV^*(\sum PWV^*) \geq 75$ mm and the 24 h cumulative value of $\theta_{se}^*(\sum \theta_{se}^*) \geq 30$ K. This finding could be positively indicative of severe rainfall in Meiyu season and torrential rains with the PWV high-value zone superimposed to the high-value zones of $\sum PWV^*$ and $\sum \theta_{se}^*$.

Key words: short-time severe precipitation, Global Navigation Satellite System (GNSS), precipitable water vapor (PWV), pseudo-equivalent temperature, objective forecast

引 言

作为降水的必要条件,大气可降水量(PWV)阈值对降水发生和发展的指示性一直备受关注。当今全球卫星导航系统(GNSS)水汽监测网及其探测技术日益成熟(Wolfe and Gutman, 2000),连续、高时空分辨率的 PWV 可更好地刻画强降水过程前后的水汽演变特征。研究发现,暴雨是在大气饱和比湿、水汽总量等达到相当大的数值时形成的(毕研盟等, 2004;谷晓平等, 2005;孔繁艳等, 2012;郝丽萍等, 2013;张武龙等, 2021;Champollion et al, 2004;van Baelen et al, 2011)。PWV 超过阈值的降水时数占总体降水时数的 75% 以上,且 PWV 阈值对暴雨及大暴雨事件预报具有很好的指示性(陈娇娜等, 2009)。然而, PWV 与降水两者之间并不是简单的因果关系,水汽充沛的情况下不一定产生降水。短时强降水发生时间短、降水效率高,1 h 雨量达到或超过 20 mm(孙继松等, 2014;周晓敏等, 2023),其物理机制较一般性降水更为复杂,受到水汽、大气动力、热力条件等多要素的共同影响(孙继松, 2017)。有必要对短时强降水过程中水汽、动力和热力等多因子的综合作用做进一步探索。

水汽变化量和假相当位温(θ_{se})作为水汽和热力条件的物理特征参数,可用于短时强降水的环境条件研究。目前对强降水潜势研究,不仅关注了 PWV 本身的量值,也关注了 PWV 的升降趋势及幅度(郝丽萍等, 2013;张芳等, 2022;Zhao et al, 2018),几乎每次强降水过程发生前 PWV 均有明显的跃升(曹云昌等, 2005;张恩红等, 2015;Yao et al, 2017;Zhao et al, 2018),降水发生前 21 h 内 PWV 开始逐渐增加, PWV 持续激增 12~13 h 可很好地预示其后的强降水天气(李国平等, 2009;李青春等, 2007;陈娇娜等, 2009;廖敏等, 2012)。 θ_{se} 是一个表征大气温度、气压、湿度的综合特征量,其分布可反

映大气中能量的分布。降水前 θ_{se} 较高或伴随着快速增长,表明能量存在明显的快速积累过程;随着降水的产生,能量释放, θ_{se} 会迅速下降(李国翠等, 2007;2013b)。

短时强降水的监测和预报一直是气象科研和业务工作中的重点和难点。目前,短时强降水的临近预报(0~2 h)主要基于天气雷达回波和卫星云图特征的识别和外推, Z-R 关系及回波移动方向的不确定性导致预报准确率随着时间的延长快速降低,一般认为该方法的可用预报时效上限为 2 h(俞小鼎等, 2012;俞小鼎, 2013)。短期预报(0~3 d)技术主要依赖于数值模式产品的直接应用、“配料法”、集合预报法等(杨波等, 2017;金荣花等, 2019;Yu et al, 2019),预报效果主要取决于模式性能。介于临近预报和短期预报之间的短时预报(0~12 h)目前大多采用上述两种方式的融合,相对而言,针对短时强降水的短时预报预警仍然缺乏有效客观预报手段。通过观测数据探索短时强降水发生时其敏感要素变化特征,并给定适当的阈值,可为短时强降水的客观预报提供补充和参考。

本研究将基于临界成功指数(CSI)和命中率(POD)等检验指标,以湖北省作为代表性区域,利用 2019—2021 年梅雨期(6—7 月)GNSS 水汽监测网 PWV 资料和同时期相应地面雨量、温、压、湿等观测数据,探索建立长江中游梅雨期短时强降水的 PWV、6 小时水汽增量(PWV^*)及假相当位温距平(θ_{se}^*)阈值预警方法。结合多参量阈值,将 GNSS 水汽观测资料有效应用于强降水的预警,并通过 PWV、 PWV^* 和地面 θ_{se}^* 在短时强降水中的观测特征,分析水汽、地面热力等条件对短时强降水的影响。

1 数据及其预处理

湖北省位于长江中游,面积 18.6 万 km^2 。该省

地基 GNSS 水汽监测网从 2016 年开始建立,目前已建成覆盖全省各地区的 48 个 GNSS 水汽监测站(图 1),每个 GNSS 水汽监测站均有同址地面气象站提供逐小时降水量、温、压、湿等常规观测数据。

考虑到湖北省 GNSS 观测数据时空分辨率较高,且有并址常规气象观测数据与之匹配,为便于综合分析短时强降水的 PWV 和 θ_{se} 相关阈值,本文以湖北省为代表区域进行研究。所用数据主要包括 2019—2021 年梅雨期(6—7 月)GNSS 监测网的 PWV,以及并址气象站同期的地面雨量、温、压、湿等数据。剔除缺测和未监测到短时强降水的测站,2019 年、2021 年参与研究的 GNSS 测站各 40 个,2020 年 45 个。

利用 GAMIT 软件对湖北省地基 GNSS 探测资料进行解算(Bevis et al,1994),反演得到时间分辨率 0.5 h 的 PWV 数据,其准确性已得到验证(付志康等,2017),反演结果与其他研究精度水平相当(Zhang et al,2019;Bai et al,2021;施闯等,2022)。

本研究采用 PWV 的 6 小时变化量 PWV^* ,即当前时刻 PWV 减去 6 小时前的 PWV,表征 PWV 升降趋势及幅度。 PWV^* 作为一个相对值,可有效避免 PWV 的系统误差。

基于地面气象观测站的气温、气压、相对湿度数据,可计算假相当位温(Bolton,1980):

$$\theta_{se} = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.2854(1-0.28r)} \times \exp \left[\left(\frac{3376}{T_L} - 2.54 \right) r (1 + 0.81r) \right] \quad (1)$$

$$T_L = \frac{2840}{3.5 \ln T - \ln e - 4.805} + 55 \quad (2)$$

式中: T, p, r 分别为绝对温度、气压、比湿, T_L 是抬升凝结高度处的绝对温度, e 为水汽压。 r, e 亦可由气温、气压、相对湿度计算得到(公式略)(盛裴轩等,2003)。

θ_{se} 具有明显的日变化特征。为更准确地分析 θ_{se} 与降水的关系,使用消除日变化影响的假相当位温距平(θ_{se}^*)参与研究,即分别对研究时段内各测站非降水日同一时次的 θ_{se} 求平均值,得到非降水日平均假相当位温($\overline{\theta_{se}}$)日变化序列,以 $\overline{\theta_{se}}$ 为标准,计算研究时段各时次的假相当位温的距平 θ_{se}^* ,并以此形成研究样本。若 $\theta_{se}^* > 0$,表明大气能量高于非降水平均态; $\theta_{se}^* < 0$,则表明大气能量低于非降水平均态。

文中涉及时间均为北京时。

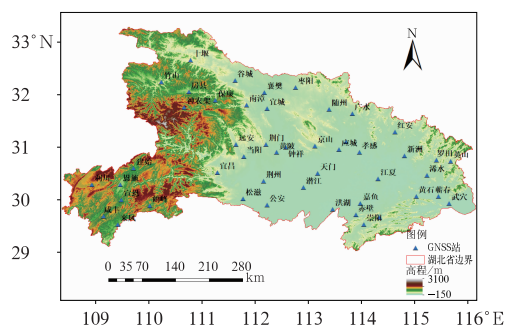


图 1 湖北省 GNSS 测站分布和地形

Fig. 1 Distribution of GNSS station and topography elevation in Hubei Province

2 短时强降水预警阈值检验指标

为获得短时强降水预警所需的水汽和能量相关的阈值,引入临界成功指数(CSI)和命中率(POD)两个预警效果评判指标(Li et al,2020)。阈值检验时,针对湖北省 GNSS 观测网的并址气象站进行站点对站点的预报结果统计,计算不同预警条件下各站短时强降水预警结果的 CSI 和 POD,并进行统计分析,优选合适的阈值。

考虑到降水的连续性,以及 PWV 具有快速时空变化的特性,为便于检验且符合实际需求,定义如下:

(1)对于降水,认为从出现降水到降水结束之后 12 小时内未发生降水计为降水出现一次;期间如果降水出现间断,但未满 12 小时,计为一次降水。若在此次降水中出现 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况,则为一次短时强降水。

(2)对于 PWV 超过阈值次数,考虑水汽的累积,定义超过短时强降水预警阈值,且持续时间 ≥ 8 小时为达到阈值一次。

3 短时强降水多参量预警阈值及检验

基于湖北省 2019 年和 2020 年 6—7 月观测数据,分析短时强降水的 PWV 和 θ_{se} 相关阈值,并利用 2021 年 6—7 月观测数据进行阈值预警效果检验。理论上而言,较高的阈值会增加漏报样本数量,较低的阈值则会增加空报样本数量,因此合适的阈值在减少漏报样本数量的同时也应该尽可能地控制空报样本数量,即 CSI 和 POD 均应该处于相对较高的水

平。首先联合分析各测站的平均临界成功指数($\overline{\text{CSI}}$)、平均命中率($\overline{\text{POD}}$)在阈值可能取值范围内的变化特征,当 $\overline{\text{CSI}}$ 高且 $\overline{\text{POD}}$ 也比较高时,对应的阈值为合适的值。其次,利用多个测站的 CSI 和 POD 分析阈值的普适性,合适的阈值适用于更多的测站,且使尽可能多的测站分布于 CSI 和 POD 的大值区域。

3.1 短时强降水的 PWV 预警阈值

水汽是产生降水的物质基础,充足的水汽是短时强降水发生的必要条件。GNSS 网对湿区的探测总是在时间上领先于自动站观测的降水(Seko, 1997),因此可利用 GNSS 反演的 PWV 数据研究短时强降水发生时所需的水汽条件。通常情况下,在同一季节、同一地区,短时强降水的 PWV 阈值高于降水的阈值,因此本研究拟在一般降水的 PWV 阈

值的基础上增加某一固定值(n)作为短时强降水发生时的 PWV 阈值。

3.1.1 一般降水的 PWV 阈值

当 PWV 超过某一阈值之后才具备降水条件(李国平等,2009;郝丽萍等,2013;Yeh et al,2018),但是关于阈值的选取却没有统一的方法或者标准(陈娇娜等,2009;郝丽萍等 2013;廖敏等,2012)。为获取最优的 PWV 阈值计算方法,参考前人的研究结果初步设计以下三种方案:方案一,取非降水时段的 PWV 平均值;方案二,取小时雨量 ≥ 0.5 mm 时 PWV 的最小值;方案三,取小时雨量为 0.1 mm 时 PWV 的平均值。以地处江汉平原的江夏站、西部山地的恩施站、山地与平原过渡带的宜昌站作为代表,统计三个测站 2019 年和 2020 年 6—7 月的降水时段数、PWV 超过阈值时的降水时段数以及在总降水时段中的百分比(过阈值占比),见表 1,并优选最佳方案。

表 1 宜昌、江夏、恩施站 2019 年和 2020 年 6—7 月降水 PWV 阈值方案比较

Table 1 Comparison of the methods for determining the PWV threshold of precipitation at Yichang, Jiangxia, Enshi stations from June to July in 2019 and 2020

测站	方案	2019 年				2020 年			
		PWV 阈值/mm	降水时段数/h	PWV 过阈值的降水时段数/h	过阈值占比	PWV 阈值/mm	降水时段数/h	PWV 过阈值的降水时段数/h	过阈值占比
江夏	方案一	43.2	142	134	94.4%	50.6	288	264	93.6%
	方案二	37.9	142	140	98.6%	29.9	288	282	97.9%
	方案三	53.8	142	109	76.8%	58.2	288	214	75.9%
宜昌	方案一	50.0	140	134	95.8%	53.0	344	338	98.3%
	方案二	46.3	140	125	89.4%	54.7	344	337	98.0%
	方案三	55.1	140	86	62.7%	63.6	344	252	73.3%
恩施	方案一	46.5	164	157	97.5%	49.8	356	334	93.8%
	方案二	40.9	164	161	98.2%	37.3	356	352	98.9%
	方案三	53.0	164	114	69.5%	59.0	356	254	71.3%

由表 1 可见,方案一和方案二的过阈值占比较高。由于部分降水过程中 PWV 的起伏较大,导致方案二计算的 PWV 阈值出现 <30 mm 的情况(如:2020 年江夏站方案二计算结果),代表性较差,过阈值占比的波动较大;相比之下,方案一则比较稳定,过阈值占比均保持在 93% 以上,该方案计算的 PWV 阈值对降水预报准确率的离散度更小,更具普适性。因此,将非降水时段 PWV 的平均值作为梅雨期降水的阈值较合适。

3.1.2 短时强降水的 PWV 阈值

以一般降水的 PWV 阈值为基础,探究同站短时强降水发生时 PWV 的高出部分(n),确定了 n 的数值即可确定短时强降水的 PWV 阈值。统计

PWV 的观测数据和降水数据,得到当 n 取不同值时各测站的 $\overline{\text{CSI}}$ 、 $\overline{\text{POD}}$ (图 2)以及各 CSI 和 POD 区间测站频数分布(图 3)。

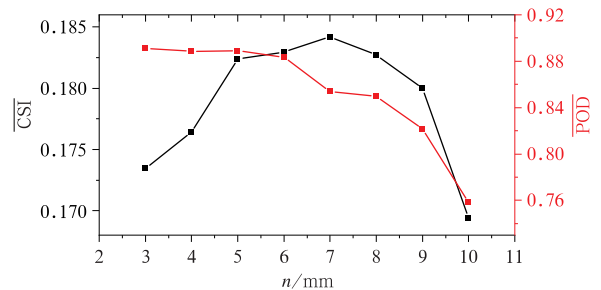


图 2 2019 年和 2020 年 $\overline{\text{CSI}}$ 、 $\overline{\text{POD}}$ 随 n 的变化

Fig. 2 Variation of $\overline{\text{CSI}}$ and $\overline{\text{POD}}$ scores of stations with different n values in 2019 and 2020

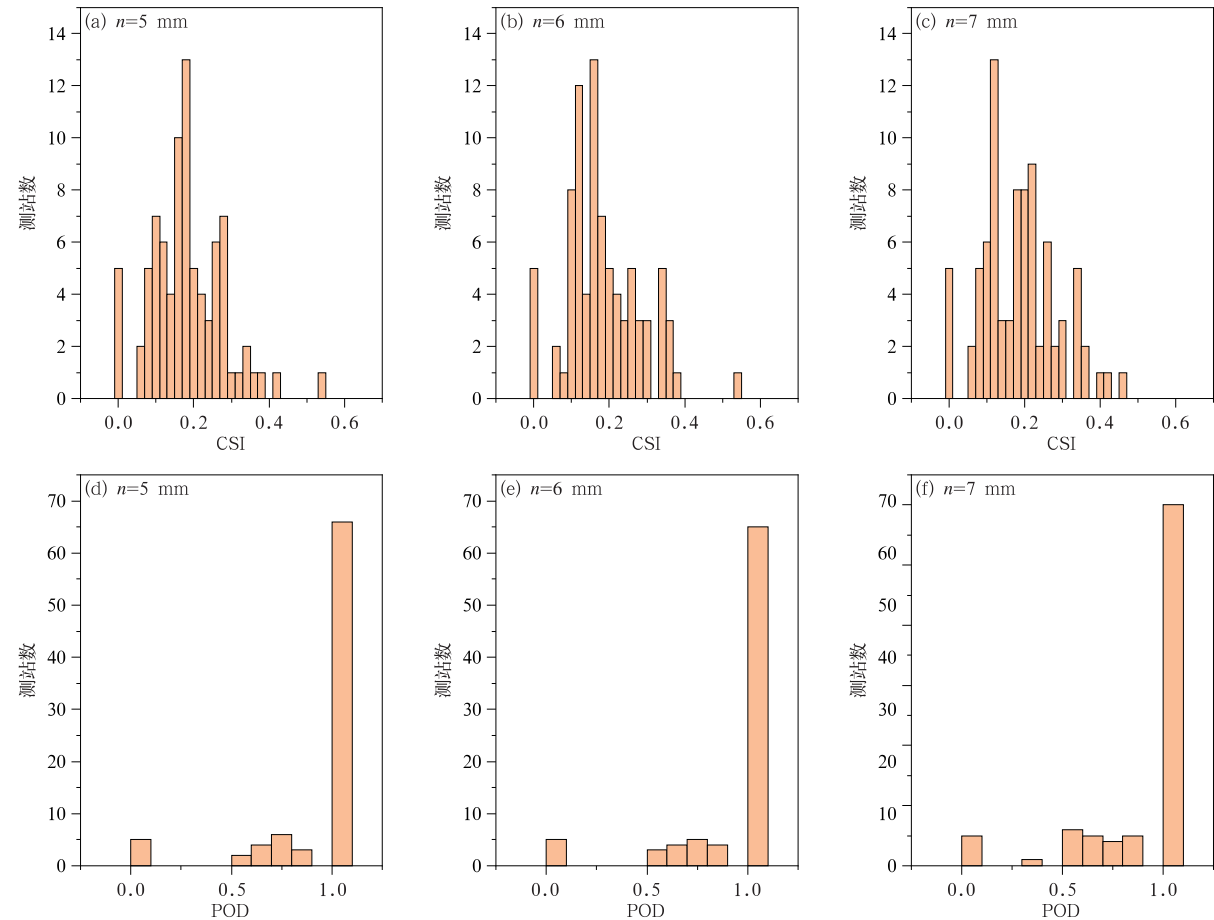


图 3 n 不同取值时 2019 年及 2020 年各 CSI、POD 区间测站数量
Fig. 3 Number of stations in each CSI and POD segment at different n values in 2019 and 2020

由图 2 可见, $\overline{\text{CSI}}$ 随着 n 的增加先增加后降低, $\overline{\text{POD}}$ 随着 n 的增加逐渐降低。 $n > 7$ mm 之后 $\overline{\text{CSI}}$ 和 $\overline{\text{POD}}$ 均出现明显的下降, 故 n 较合适的取值范围在 5~7 mm。从图 3a~3c 可以看出, 随着 n 的增加, 测站数量峰值区间向 CSI 的大值方向移动。目前业务工作中暴雨预报的准确率在 20% 左右, 参考该值, 统计 n 取值 5~7 mm 时 CSI 在不同区间 (<0.1 、 ≥ 0.2 、 >0.3) 的测站占比(表 2)。当 $n = 5$ mm 时测站的 CSI 偏小, 空报样本较多。当 $n = 7$ mm 时测站的 POD 较低, 漏报样本增多。

基于以上分析, 综合两年各测站的 $\overline{\text{CSI}}$ 和 $\overline{\text{POD}}$

以及各 CSI 和 POD 区间测站数量分布情况, n 取 6 mm 可最有效地在保证命中率的同时减少空报样本, 该 PWV 阈值下 $\overline{\text{CSI}} > 0.18$, $\overline{\text{POD}} > 0.85$ 。故梅雨期短时强降水的 PWV 阈值可确定为 6—7 月非降水时段的 PWV 平均值加上 6 mm。

利用武汉、宜昌站 2000—2019 年 6—7 月历史探空资料分析鄂东、鄂西地区 PWV 百分位分布, 根据 CSI 和 POD 最优化确定的短时强降水 PWV 阈值位于东、西两个区域的第 48 和第 49 个百分位, 本研究使用的短时强降水 PWV 阈值选取方法对于鄂东和鄂西地区具有一定的普适性。

3.2 短时强降水的水汽增量及假相当位温距平预警阈值

对流发展时 PWV 常呈现上升趋势, 通常会存在一个明显的 PWV 峰值接近于对流活动的峰值(谷晓平等, 2005)。PWV 持续 12~13 小时的激增可很好地预示其后的强降水天气(李国平等, 2009; 李青春等, 2007; 陈娇娜等, 2009; 廖敏等, 2012)。本

表 2 n 取不同值时 CSI 和 POD 区间测站占比(单位: %)
Table 2 Percentage of stations of CSI and POD intervals at different n values (unit: %)

n/mm	CSI			POD
	<0.1	≥ 0.2	>0.3	>0.85
5	22.4	38.8	8.2	76.7
6	18.8	38.8	11.8	75.6
7	21.2	47.1	11.8	69.8

研究利用连续 15 小时(共计 30 个数据)PWV* 的累积值 Σ PWV*, 量化 PWV 在一段时间内的变化趋势和幅度, 并以此探究短时强降水的水汽增量阈值。针对 Σ PWV* 绘制雨强 $<20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的样本箱线图(图 4), 从图中可以看出短时强降

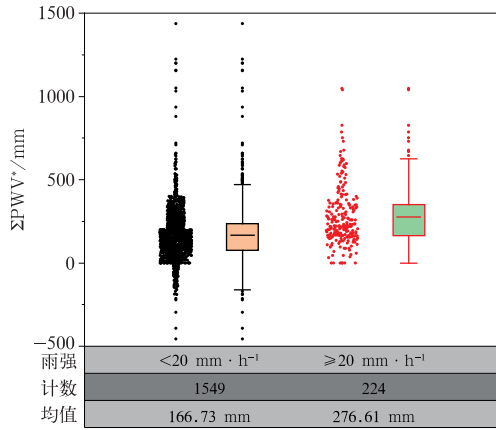


图 4 短时强降水与非短时强降水的 Σ PWV* 样本箱线图

Fig. 4 Box plot of Σ PWV* for rain intensity

$<20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

水的 Σ PWV* 均值比非短时强降水高 109.88 mm, 且短时强降水的下四分位数高于非短时强降水的中位数。因此以 Σ PWV* 探索短时强降水的水汽增量预警阈值具有可行性。

评估 PWV 超过阈值的时段内 Σ PWV* 对短时强降水的影响, 得到不同 Σ PWV* 条件下各测站的 $\overline{\text{CSI}}$, $\overline{\text{POD}}$ (图 5)以及各 CSI, POD 区间测站频数分布(图 6)。

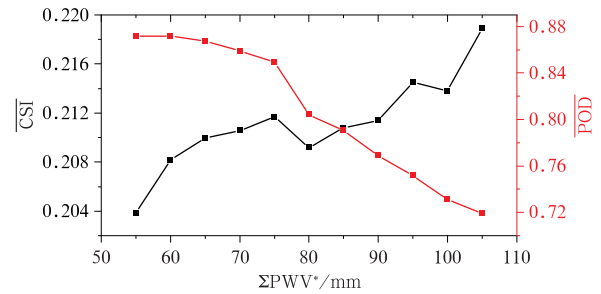


图 5 2019 年和 2020 年各测站 $\overline{\text{CSI}}$, $\overline{\text{POD}}$ 随 Σ PWV* 的变化

Fig. 5 Variation of $\overline{\text{CSI}}$ and $\overline{\text{POD}}$ scores of stations with different Σ PWV* values in 2019 and 2020

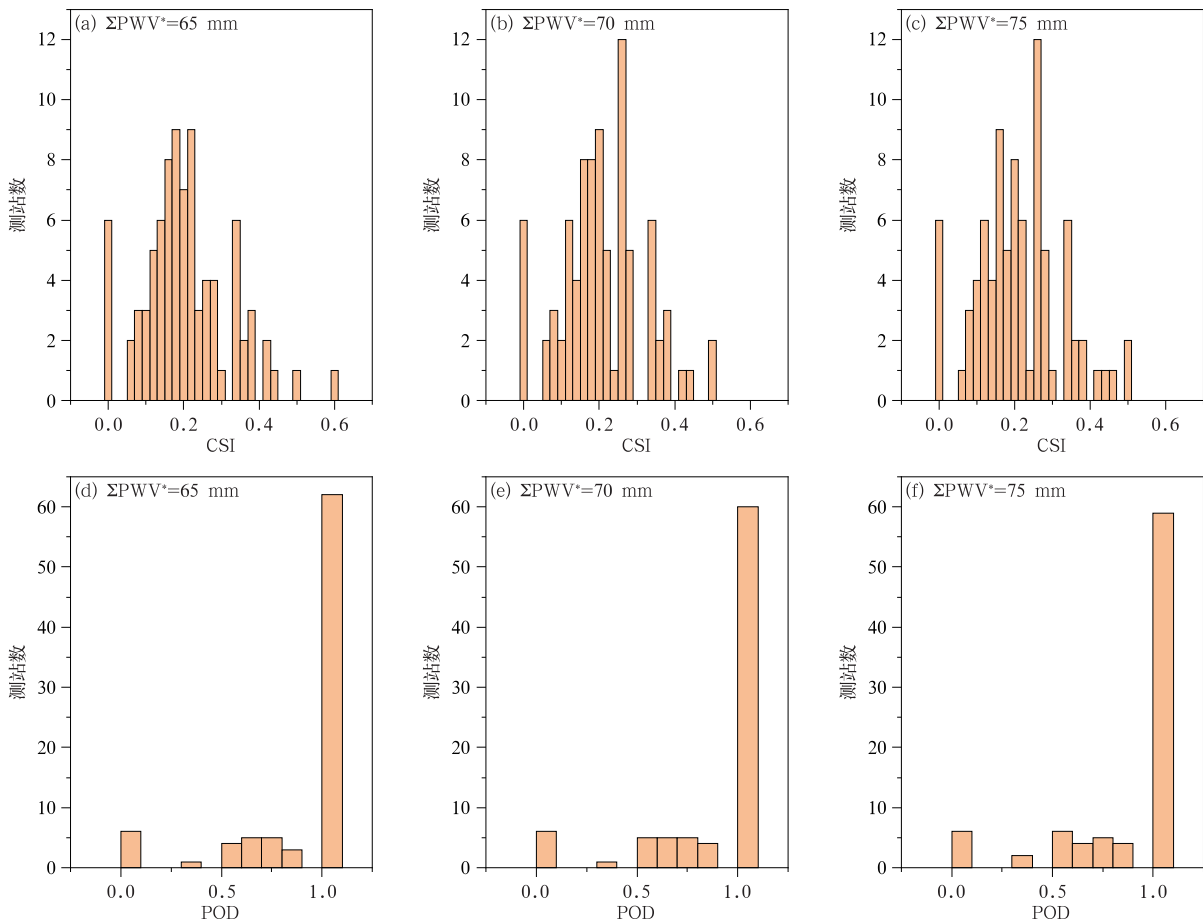


图 6 Σ PWV* 不同取值时 2019 年及 2020 年各 CSI, POD 区间测站数量

Fig. 6 Number of stations in each CSI and POD segment at different Σ PWV* values in 2019 and 2020

由图 5 可见,考虑水汽增量之后, $\overline{\text{CSI}}$ 整体上有明显提升, $\overline{\text{POD}}$ 略有下降。 ΣPWV^* 在 65~75 mm 时 $\overline{\text{CSI}} > 0.21$,且 $\overline{\text{POD}}$ 未出现明显下降, ΣPWV^* 作为水汽增量阈值的最适取值在该范围内。从图 6a~6c 可以看出,当 ΣPWV^* 在上述区间变化时,随着 ΣPWV^* 的增加,测站数量峰值区间从 0.18 左右变化到 0.26 左右,CSI 高于 0.2 的测站数明显增多。表 3 是在 ΣPWV^* 取不同值时 CSI 和 POD 不同区间测站占比,从中可见,CSI ≥ 0.2 的测站随着 ΣPWV^* 取值增大逐渐增多, $\Sigma \text{PWV}^* = 75$ mm 时可以最有效地提高整体 CSI。另外, ΣPWV^* 对测站 POD 的区间分布影响不大(图 6d~6f),POD > 0.85 测站占比随着 ΣPWV^* 的增加变化 $< 3.5\%$ (表 3)。

表 3 ΣPWV^* 取不同值时 CSI 和 POD 区间测站占比(单位:%)

Table 3 Percentage of stations with CSI and POD intervals at different ΣPWV^* values (unit: %)

$\Sigma \text{PWV}^*/\text{mm}$	CSI			POD
	< 0.1	≥ 0.2	> 0.3	> 0.85
65	16.3	51.2	18.6	72.1
70	15.1	54.7	17.4	69.8
75	16.3	55.8	18.6	68.6

综合上述分析,若在 PWV 阈值的基础上使用 ΣPWV^* 作为水汽增量阈值对短时强降水的发生条件做进一步约束,当 $\Sigma \text{PWV}^* = 75$ mm 时可以在保证命中率的前提下有效减少空报样本,此时各监测站的 $\overline{\text{CSI}}$ 提升到 0.21, $\overline{\text{POD}}$ 为 0.85。因此,可以将其作为梅雨期短时强降水的水汽增量阈值。

富含水汽的大气必须经过冷却才能形成降水现象(孙继松,2014)。 θ_{se} 反映冷暖空气的活动情况,也可表征大气能量发展情况以及对流稳定度, θ_{se} 高值中心的移动和变化趋势与强降水落区及其发生发展阶段相关(易升杰等,2019;靳莉君等,2013;郭英琼和陈创买,1993)。 θ_{se} 剧增后的 48 小时内出现降水的概率在 70% 以上,强降水发生前 1~2 天地面 θ_{se} 会迅速上升并在高值维持(李国翠等,2007;2012;2013b;梁卓眉,1999)。

本文利用连续 24 小时(共计 24 个数据)的 θ_{se}^* 之和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 定量分析降水前能量累积情况,图 7 是研究时段内雨强 $< 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的样本相对于 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 的箱线图,短时强降水的 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 均值比非短时强降水样本高 121.84 K,且短时强降水的下四分位数明显高于非短时强降水的中位数。因此, $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 对短时强降水有较好的识别效果。

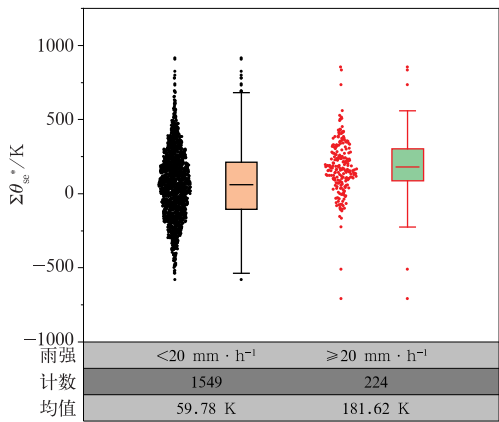


图 7 短时强降水与非短时强降水的 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 样本箱线图

Fig. 7 Box plot of $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ for rain intensity $< 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

使用类似的方法,在满足短时强降水 PWV 阈值的前提下检验其所需的 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 条件。分析发现,将 30 K 作为短时强降水发生时的 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 阈值可较好地降低空报和漏报样本数量,该阈值下 $\overline{\text{CSI}}$ 为 0.21, $\overline{\text{POD}}$ 为 0.74。

3.3 短时强降水阈值预警时效

联合 PWV、 ΣPWV^* 和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 阈值,对短时强降水样本进行预警检验,并分析预警时效。在 2019 年和 2020 年 6—7 月,该阈值方法可成功预报约 78.6% 的短时强降水。其中约 56.4% 的降水发生于预警的 12 小时内,约 72.9% 发生于 24 小时内,约 11.4% 发生于 48 小时之后(图 8)。

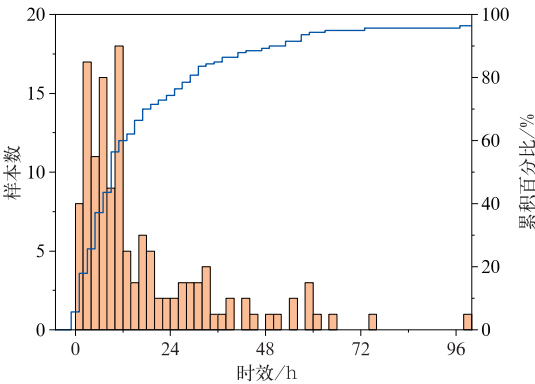


图 8 阈值预警时效频数分布(柱状)及累积百分比(折线)

Fig. 8 Frequency distribution (bar) and cumulative percentage (line) of the lead time of threshold prediction model

为了更好地确定短时强降水可能发生的时间范围,进一步分析三个要素阈值和预警时效的关系。图 9 统计了预警过程中最后超过阈值的要素及其对应的预警时效。PWV 和 Σ PWV* 阈值的预警时效大多在 12 小时左右,而 $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值的预警时效相对比较分散,处于第 24~72 小时的降水样本明显增多。因此,对于某次短时强降水,如果 $\Sigma\theta_{se}$ * 在阈值之上长时间维持,PWV 和 Σ PWV* 逐渐上升并超过阈值,那么短时强降水很可能在 12 小时之内发生;

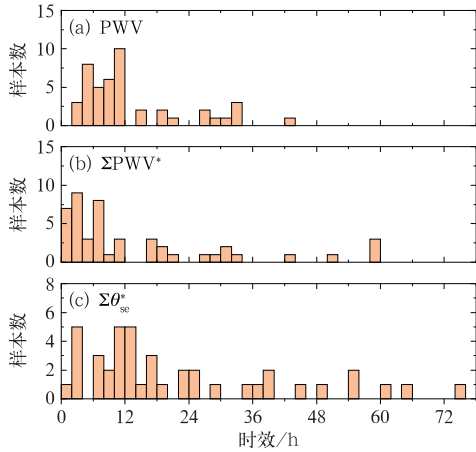


图 9 阈值方案中各要素预警提前时效频数分布

Fig. 9 Frequency distribution of the lead time of each predictor in the threshold prediction model

若水汽条件充足,地面能量不断堆积导致 $\Sigma\theta_{se}$ * 逐渐超过阈值,则应该将关注时效延长至 72 小时。

3.4 效果检验

为验证上述短时强降水预警阈值的有效性,利用 2021 年 6—7 月湖北省观测资料进行检验,结果见表 4。相比于仅使用 PWV 阈值,增加 Σ PWV* 和 $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值之后 CSI 评分提高约 0.040(约 31.3%),空报数减少约 53.8%,预警效果明显提升。统计预警时效显示,成功预警的短时强降水样本中约 48%发生于预警之后的 24 小时内,约 78%发生于 48 小时内。

常规业务中,短时强降水预报在第 1 小时的 CSI 评分 < 0.1 ,并随着时间延长递减(张蕾等, 2015;吴瑞姣等,2020;张华龙等,2021)。对于该研究时段内湖北省短时强降水,中央气象台客观预报产品逐小时 40 km 半径点对面预报效果检验的 CSI 为 0.080;武汉中心气象台融合雷达数据以及 CMA-MESO、武汉 RUC 等多尺度模式的强对流预报产品逐小时 40 km 半径点对面检验结果的 CSI 为 0.126;点对点的效果检验评分不足 0.020。本研究中联合 PWV、 Σ PWV*、 $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值对短时强降水预报的检验评分为 0.167,高于目前常规客观预报水平。

表 4 短时强降水阈值检验结果

Table 4 Comparison of CSI scores for short-time severe precipitation from the model using different thresholds

预警条件	样本数	正确数	漏报数	空报数	CSI 评分
PWV 阈值	595	76	15	504	0.128
PWV 阈值 + Σ PWV* 阈值	382	60	31	291	0.157
PWV 阈值 + $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值	501	70	21	410	0.140
PWV 阈值 + Σ PWV* 阈值 + $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值	324	54	37	233	0.167

4 分析与应用

4.1 不满足阈值条件的短时强降水成因分析

将 2019—2020 年 6—7 月超过 PWV 阈值的短时强降水样本,利用 Σ PWV* 阈值 75 mm 和 $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值 30 K 划分为 I~IV 共 4 个区域,如图 10。

I 区域内样本同时满足 Σ PWV* 阈值和 $\Sigma\theta_{se}$ * 阈值,该区域集中了 78.6%的短时强降水样本,说明 Σ PWV* 和 $\Sigma\theta_{se}$ * 条件对大部分短时强降水的发生潜势有较好的指示意义。

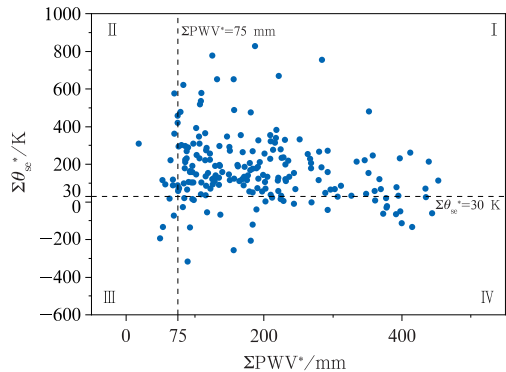


图 10 短时强降水样本的 Σ PWV* 和 $\Sigma\theta_{se}$ * 条件

Fig. 10 Condition of Σ PWV* and $\Sigma\theta_{se}$ * for different levels of short-time severe precipitation

Ⅱ、Ⅲ区域内的样本占总样本数量的 5.0%,且基本都接近水汽增量阈值,这说明短时强降水发生时 PWV 的增加是普遍存在的,但存在少数样本

PWV 增加不显著。为探究水汽增量较小情况下的短时强降水共性特征,对比分析Ⅱ、Ⅲ区域内降水样本信息(表5)。

表5 2019年及2020年不满足 $\sum \text{PWV}^*$ 条件的短时强降水
Table 5 Short-time severe precipitation samples without meeting the threshold of $\sum \text{PWV}^*$ in 2019 and 2020

序号	站名	短时强降水出现时间(年.月.日.时)	最大小时雨量/mm
1	利川	2019.6.21.22	28.6
2	神农架	2019.7.23.13	26.2
3	房县	2020.6.11.20	24.6
4	浠水	2020.6.12.16	24.3
5	咸丰	2020.6.13.05	20.1
6	咸宁	2020.6.21.21	25.7
7	崇阳	2020.6.22.23	22.1
8	黄石	2020.6.23.04	22.6
9	来凤	2020.7.6.01	40.2
10	黄石	2020.7.6.23	25.4

结合图1测站分布位置,可以看出这些测站均位于鄂西山地和鄂东喇叭口地形区。已有研究表明,地形作用不仅会对局地风场的变化产生影响,也会对水汽的分布和相变过程产生直接影响(孙继松和杨波,2008)。山地地形的阻挡作用会迫使气流爬升,喇叭口地区因地形收缩会导致气流的辐合加强(郭英莲等,2015)。受地形影响,这些测站发生短时

强降水时 PWV 增量低于地势平坦、海拔较低的地区。

Ⅲ、Ⅳ区域内集中了 16.4%的短时强降水样本,为探究近地面能量不足时短时强降水样本的特点,将 $\sum \theta_{\text{se}}^* < 30 \text{ K}$ 的短时强降水样本信息列表如下(表6)。

未达到 $\sum \theta_{\text{se}}^*$ 阈值的短时强降水样本发生时间

表6 2019年及2020年不满足 $\sum \theta_{\text{se}}^*$ 条件的短时强降水

Table 6 Short-time severe precipitation samples without meeting the threshold of $\sum \theta_{\text{se}}^*$ in 2019 and 2020

序号	站名	短时强降水出现时间(年.月.日.时)	序号	站名	短时强降水出现时间(年.月.日.时)
1	利川	2019.6.5.10	18	黄石	2020.6.23.04
2	咸丰	2019.6.5.12	19	鹤峰	2020.6.27.16
3	竹山	2019.6.5.14	20	宣恩	2020.6.27.21
4	钟祥	2019.6.5.17	21	罗田	2020.7.5.08
5	红安	2019.6.5.18	22	浠水	2020.7.5.08
6	新洲	2019.6.5.18	23	嘉鱼	2020.7.5.13
7	广水	2019.6.5.19	24	咸宁	2020.7.5.21
8	安陆	2019.6.5.23	25	公安	2020.7.5.23
9	孝感	2019.6.6.00	26	江夏	2020.7.6.02
10	黄陂	2019.6.6.01	27	黄石	2020.7.6.23
11	嘉鱼	2020.6.9.22	28	黄陂	2020.7.7.09
12	江夏	2020.6.14.02	29	天门	2020.7.7.10
13	新洲	2020.6.21.09	30	宣恩	2020.7.7.19
14	罗田	2020.6.21.12	31	新洲	2020.7.16.09
15	咸宁	2020.6.21.21	32	浠水	2020.7.18.01
16	江夏	2020.6.21.21	33	潜江	2020.7.26.09
17	崇阳	2020.6.22.23			

比较集中,大多在2019年6月5—6日、2020年6月21—23日、2020年7月5—7日。从降水发生时间和测站地理位置来看,2019年的样本基本符合自西向东依次发生的特征,这与天气系统移动规律相

似,2020年的样本集中在鄂东南喇叭口地形区,且呈东北—西南向带状分布与梅雨锋雨带落区吻合。由此可以推断对 θ_{se}^* 条件不敏感的短时强降水是由同一类天气系统主导,其所需的强上升运动可能主

要来自大尺度强迫或地形抬升。一旦迎风坡开始降水,对流层中上层由于潜热释放气温升高,近地面由于降水快速降温,使得边界层顶流向山坡方向的气流加速明显快于近地面层。因此,从地面至对流层下部、边界层顶部风速垂直切变与降水强度之间将出现明显的正反馈现象(孙继松和杨波,2008),这种正反馈作用可能对降水的增强起到重要作用。

Ⅲ区域的降水样本既不满足 ΣPWV^* 阈值也不满足 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 阈值。该区域内的短时强降水仅有 4 例,且雨强 $<26 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。水汽和能量条件均不足时发生短时强降水的可能性较小。

4.2 PWV 和 θ_{se} 双重参量增强对强降水落区的指示性

在有利的天气系统下,PWV 中心可以很好地指示短时强降水的落区(李国翠等,2013a),但是大多数短时强降水落区比 PWV 的高值区要小得多。前文分析指出,大部分短时强降水发生前 ΣPWV^* 和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 均有明显的变化特征,因此叠加 ΣPWV^*

和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 资料可以缩小 PWV 高值区中可能发生短时强降水的范围。

PWV 和 θ_{se} 双重参量对雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水以及累计雨量超过暴雨量级的区域均有较好的预报效果。图 11 是湖北省 2020 年 6 月 27 日一次降水过程,剔除由于设备故障数据缺失的测站,PWV、 ΣPWV^* 、 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 阈值成功预报出了 6 小时内的所有短时强降水事件,12 小时内的短时强降水事件命中率为 75.0% (3 次漏报)。对于空报样本,对比图 11f 和图 11a、11b 可以看出,其空间分布与 6 小时累计雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 以及 12 小时累计雨量 $\geq 30 \text{ mm}$ (暴雨量级)的区域分布接近。部分测站虽然对短时强降水产生了空报,但均发生了不同强度的降雨,其中 42.9% 的站点累计雨量达暴雨量级,出现中到大雨、小雨的测站分别占比 35.7% 和 21.4%。

PWV 在高值维持并且不断增长反映出水汽的积累和爆发过程,在该条件下若能量条件满足则可能发生强降水,反之,即使 PWV 超过阈值,降水强

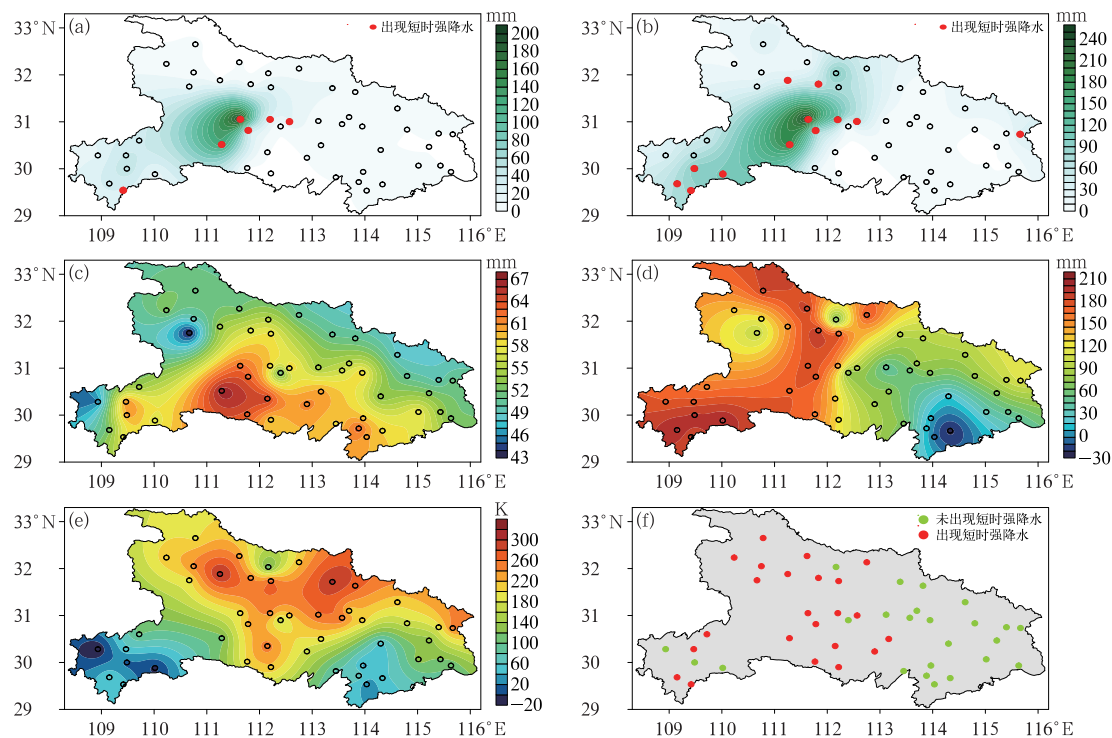


图 11 湖北省 2020 年 6 月 27 日 (a)10:00—15:00 降水量, (b)10:00—21:00 降水量, 10:00 的 (c)PWV、(d) ΣPWV^* 、(e) $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 和 (f) 短时强降水阈值预报结果

Fig. 11 Accumulated precipitation (a) from 10:00 BT to 15:00 BT, (b) from 10:00 BT to 21:00 BT, the distribution of (c) PWV, (d) ΣPWV^* , (e) $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$, and (f) prediction result of the threshold prediction model at 10:00 BT on 27 June 2020 in Hubei Province

度一般也不大。从图 11 可以看出,累计雨量的大值区与 PWV 的大值中心接近,但并非水汽充足的地区都发生了较大强度的降水,此次过程全省共有 30 个测站 PWV 超过阈值,而降水的大值区主要分布在鄂中的宜昌、当阳、远安附近以及鄂西南的来凤附近。鄂东南地区 ΣPWV^* 为负值, $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 小于阈值,水汽和能量处于辐散和衰减状态,因此在 PWV 充足的条件下也未产生强降水。

5 结果与讨论

本文以湖北省为代表区域,使用 2019 年和 2020 年 6—7 月 GNSS 水汽监测网 PWV 资料和同时期相应地面雨量、温、压、湿等观测数据,对长江中游梅雨期短时强降水进行多因子影响分析,并利用 2021 年同期数据和典型个例进行检验,得到如下主要结论。

(1) 可将 6—7 月非降水时段的 PWV 平均值作为梅雨期一般降水的水汽阈值,此阈值提高 6 mm 可作为同站短时强降水的 PWV 阈值;以连续 15 小时 PWV* 的累积值 ΣPWV^* 表征水汽增减及变化剧烈程度,可将 $\Sigma \text{PWV}^* = 75 \text{ mm}$ 作为短时强降水的水汽增量阈值;以连续 24 小时 θ_{se}^* 累积值 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 表征能量的累积情况,则 $\Sigma \theta_{\text{se}}^* = 30 \text{ K}$ 可作为短时强降水预警的能量阈值。

(2) 检验结果显示,本研究中的阈值方法对短时强降水有较好的识别能力。研究区域内,在 PWV 阈值的基础上增加 ΣPWV^* 阈值和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 阈值之后对短时强降水预报的 CSI 评分提高约 31.3%,高于常规预报业务对短时强降水的客观预报评分。

(3) PWV、 ΣPWV^* 和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 的联合应用可成功预判 2019 年及 2020 年梅雨期 78.6% 的短时强降水。 ΣPWV^* 小于阈值的短时强降水样本均位于鄂西山地和鄂东喇叭口地形区,特殊的地形对降水有加强作用; $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 小于阈值的短时强降水样本很可能是由同一类天气系统产生,降水所需的强上升运动主要由大尺度强迫或地形抬升产生。

(4) PWV 水平分布的高值区叠加 ΣPWV^* 和 $\Sigma \theta_{\text{se}}^*$ 资料的大值区,对短时强降水以及暴雨的发生区域均有很好的指示性。超过阈值的测站与未来 6 小时累计雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 以及未来 12 小时累计雨量 $\geq 30 \text{ mm}$ 的区域分布接近。

本文探索了长江中游短时强降水的 PWV 和地

面 θ_{se} 阈值预警方法,并分析了不满足阈值条件的短时强降水的成因。该阈值预警方法对短时强降水的预报准确率优于以往 PWV 判据,且利用常规气象观测数据即可实现,便于推广应用。但是,强降水的成因非常复杂,本文的分析难免存在局限性,后续有待结合风廓线雷达、卫星资料等进行更加深入细致的分析。

参考文献

- 毕研盟,毛节泰,杨光林,等,2004. 地基 GPS 遥感观测安徽地区水汽特征[J]. 气象科技,32(4):225-228. Bi Y M, Mao J T, Yang G L, et al, 2004. Remote sensing of atmospheric water vapor characteristics in Anhui Province using ground-based GPS[J]. Meteor Sci Technol, 32(4):225-228(in Chinese).
- 曹云昌,方宗义,夏青,2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J]. 应用气象学报,16(1):54-59. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q, 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 16(1):54-59(in Chinese).
- 陈娇娜,李国平,黄文诗,等,2009. 华西秋雨天气过程中 GPS 遥感水汽总量演变特征[J]. 应用气象学报,20(6):753-760. Chen J N, Li G P, Huang W S, et al, 2009. The evolution features of precipitable water vapor derived from ground-based GPS during autumn rain weather process in West China[J]. J Appl Meteor Sci, 20(6):753-760(in Chinese).
- 付志康,万蓉,于胜杰,等,2017. 湖北地基 GPS 大气可降水量变化特征分析及应用[J]. 气象科学,37(4):553-560. Fu Z K, Wan R, Yu S J, et al, 2017. Analysis and application of ground-based GPS precipitable water vapor characteristics[J]. J Meteor Sci, 37(4):553-560(in Chinese).
- 谷晓平,王长耀,蒋国华,2005. 地基 GPS 遥感大气水汽含量及在气象上的应用[J]. 气象科学,25(5):543-550. Gu X P, Wang C Y, Jiang G H, 2005. The research on remote sensing water vapor by ground-based GPS and its application to weather prediction[J]. Sci Meteor Sin, 25(5):543-550(in Chinese).
- 郭英莲,王继竹,王海燕,等,2015. GPS 可降水量在湖北暴雨预报中的指示性[J]. 气象科技,43(4):666-674. Guo Y L, Wang J Z, Wang H Y, et al, 2015. Indication of GPS precipitable water vapor for rainstorm forecast in Hubei[J]. Meteor Sci Technol, 43(4):666-674(in Chinese).
- 郭英琼,陈创买,1993. 新假相当位温对大气不稳定性度的影响[J]. 中山大学学报论丛, (1):150-157. Guo Y Q, Chen C M, 1993. Impact of new potential pseudo-equivalent temperature on the atmospheric instability[J]. Suppl J Sun Yatsen Univ, (1):150-157(in Chinese).
- 郝丽萍,邓佳,李国平,等,2013. 一次西南涡持续暴雨的 GPS 大气水汽总量特征[J]. 应用气象学报,24(2):230-239. Hao L P, Deng J, Li G P, et al, 2013. Characteristics of GPS vapor in a persistent heavy rainfall related to Southwest Vortex[J]. J Appl

- Meteor Sci, 24(2):230-239(in Chinese).
- 靳莉君,任伟,周丹丹,2013. 假相当位温在黄河“7·21”雨洪分析中的应用[J]. 人民黄河, 35(6):25-26. Jin L J, Ren W, Zhou D D, 2013. Application of pseudo-equivalent potential temperature in the analysis of the “July 21” rainstorm in the Yellow River[J]. Yellow River, 35(6):25-26(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4):445-457(in Chinese).
- 孔繁艳,马国忠,殷世平,2012. 2011年7月31日黑龙江省暴雨天气诊断分析[J]. 气象与环境学报, 28(5):58-64. Kong F Y, Ma G Z, Yin S P, 2012. Diagnostic analysis of a heavy rain process on July 31, 2011 over Heilongjiang Province[J]. J Meteor Environ, 28(5):58-64(in Chinese).
- 李国翠,李国平,连志鸾,等,2007. 地基 GPS 水汽资料在石家庄一次暴雨过程中的应用[J]. 气象与环境科学, 30(3):50-53. Li G C, Li G P, Lian Z L, et al, 2007. Application ground-based GPS data during a heavy rainfall in Shijiazhuang Area[J]. Meteor Environ Sci, 30(3):50-53(in Chinese).
- 李国翠,李国平,杨荣珍,等,2013a. 华北一次强降水过程的分阶段对比分析[J]. 气象科学, 33(2):222-228. Li G C, Li G P, Yang R Z, et al, 2013a. Comparative analysis of different stages of a heavy rainfall in North China[J]. J Meteor Sci, 33(2):222-228(in Chinese).
- 李国翠,孙云,李国平,等,2013b. “20110809”石家庄西部大暴雨分析[J]. 气象与环境学报, 29(5):1-5. Li G C, Sun Y, Li G P, et al, 2013b. Analysis of heavy rain on August 9, 2011 in west of Shijiazhuang Area[J]. J Meteor Environ, 29(5):1-5(in Chinese).
- 李国翠,李国平,岳艳霞,等,2012. 副高边缘暴雨过程中的 GPS 可降水量和假相当位温分布特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 4(2):125-131. Li G C, Li G P, Yue Y X, et al, 2012. Characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor and ground pseudo-equivalent temperature during a heavy rain of Western Pacific subtropical high[J]. J Nanjing Univ Informat Sci Technol(Nat Sci Ed), 4(2):125-131(in Chinese).
- 李国平,陈娇娜,黄丁发,等,2009. 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 34(11):1328-1331. Li G P, Chen J N, Huang D F, et al, 2009. Real-time monitoring system of precipitable water vapor derived from ground-based GPS and its applications in meteorology[J]. Geomat Informat Sci Wuhan Univ, 34(11):1328-1331(in Chinese).
- 李青春,张朝林,楚艳丽,等,2007. GPS 遥感大气可降水量在暴雨天气过程分析中的应用[J]. 气象, 33(6):51-58. Li Q C, Zhang C L, Chu Y L, et al, 2007. Applications of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS to analyzing heavy rain event[J]. Meteor Mon, 33(6):51-58(in Chinese).
- 梁卓眉,1999. θ_{se} 和降水的统计关系[J]. 河南气象, (3):21. Liang Z M, 1999. The statistical relationship between θ_{se} and precipitation[J]. Henan Meteor, (3):21(in Chinese).
- 廖敏,邹海波,单九生,等,2012. 地基 GPS 水汽资料在江西一次大暴雨过程的应用分析[J]. 气象与减灾研究, 35(3):33-38. Liao M, Zou H B, Shan J S, et al, 2012. Application analysis of ground-based GPS PW data on a heavy rainfall event in Jiangxi[J]. Meteor Dis Reduct Res, 35(3):33-38(in Chinese).
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press(in Chinese).
- 施闯,周凌昊,范磊,等,2022. 利用北斗/GNSS 观测数据分析“21·7”河南极端暴雨过程[J]. 地球物理学报, 65(1):186-196. Shi C, Zhou L H, Fan L, et al, 2022. Analysis of “21·7” extreme rainstorm process in Henan Province using BeiDou/GNSS observation[J]. Chin J Geophys, 65(1):186-196(in Chinese).
- 孙继松,2014. 从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J]. 气象, 40(1):1-6. Sun J S, 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics[J]. Meteor Mon, 40(1):1-6(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何力富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法—中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:1-6. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Strong Convection Weather Forecast—Handbook of Strong Convection Weather Forecast for China[M]. Beijing: China Meteorological Press:1-6(in Chinese).
- 孙继松,2017. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 36(6):498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6):498-506(in Chinese).
- 孙继松,杨波,2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 32(6):1352-1364. Sun J S, Yang B, 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1352-1364(in Chinese).
- 吴瑞姣,邱学兴,周昆,等,2020. 安徽省 WRF 模式短时强降水的预报检验[J]. 气象科技, 48(2):254-262. Wu R J, Qiu X X, Zhou K, et al, 2020. Capability of forecasting short-term precipitation based on WRF in Anhui[J]. Meteor Sci Technol, 48(2):254-262(in Chinese).
- 杨波,郑永光,蓝渝,等,2017. 国家级强对流天气综合业务支撑体系建设[J]. 气象, 43(7):845-855. Yang B, Zheng Y G, Lan Y, et al, 2017. Development and construction of the supporting platform for national severe convective weather forecasting and service[J]. Meteor Mon, 43(7):845-855(in Chinese).
- 易升杰,郑飞,肖天贵,2019. 西南地区两次典型大暴雨环境场的对比分析[J]. 气候与环境研究, 24(1):73-85. Yi S J, Zheng F, Xiao T G, 2019. Comparative analysis of environmental fields of two typical rainstorm cases in Southwest China[J]. Climatic Environ Res, 24(1):73-85(in Chinese).
- 俞小鼎,2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3):202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展

- [J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张恩红, 曹云昌, 王晓英, 等, 2015. 利用地基 GPS 数据分析北京“7·21”暴雨水汽特征[J]. 气象科技, 43(6):1157-1163. Zhang E H, Cao Y C, Wang X Y, et al, 2015. Characteristics of water vapor in a heavy rainstorm based on ground-based GPS measurements in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 43(6):1157-1163(in Chinese).
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等, 2022. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 48(6):691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6):691-704(in Chinese).
- 张华龙, 伍志方, 肖柳斯, 等, 2021. 基于因子分析的广东省短时强降水预报模型及其业务试验[J]. 气象学报, 79(1):15-30. Zhang H L, Wu Z F, Xiao L S, et al, 2021. A probabilistic forecast model of short-time heavy rainfall in Guangdong Province based on factor analysis and its operational experiments[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):15-30(in Chinese).
- 张蕾, 王明洁, 李辉, 2015. 短时强降水临近预报相对准确率的探讨[J]. 广东气象, 37(2):1-6. Zhang L, Wang M J, Li H, 2015. Discussion of relative accuracy of short-range heavy rain nowcasting[J]. Guangdong Meteor, 37(2):1-6(in Chinese).
- 张武龙, 康岚, 杨康权, 等, 2021. 四川盆地不同强度短时强降水物理量特征对比分析[J]. 气象, 47(4):439-449. Zhang W L, Kang L, Yang K Q, et al, 2021. Comparative analysis on characteristics of physical quantity of flash-rain under different intensities in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 47(4):439-449(in Chinese).
- 周晓敏, 田付友, 郑永光, 等, 2023. 中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J]. 气象, 49(3):267-278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China[J]. Meteor Mon, 49(3):267-278(in Chinese).
- Bai J N, Lou Y D, Zhang W X, et al, 2021. Assessment and calibration of MODIS precipitable water vapor products based on GPS network over China[J]. Atmos Res, 254:105504.
- Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al, 1994. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. J Appl Meteor Climatol, 33(3):379-386.
- Bolton D, 1980. The computation of equivalent potential temperature [J]. Mon Wea Rev, 108(7):1046-1053.
- Champollion C, Masson F, van Baelen J, et al, 2004. GPS monitoring of the tropospheric water vapor distribution and variation during the 9 September 2002 torrential precipitation episode in the Cévennes(southern France) [J]. J Geophys Res Atmos, 109(D24):D24102.
- Li H B, Wang X M, Wu S Q, et al, 2020. Development of an improved model for prediction of short-term heavy precipitation based on GNSS-derived PWV[J]. Remote Sensing, 12(24):4101.
- Seko H, 1997. Variation of GPS retrieved precipitable water vapor (2)[J]. Kisyuu, 42:15463-15467.
- van Baelen J, Reverdy M, Tridon F, et al, 2011. On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(S1):204-223.
- Wolfe D E, Gutman S I, 2000. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: network design and results[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(4):426-440.
- Yao Y B, Shan L L, Zhao Q Z, 2017. Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application[J]. Sci Rep, 7(1):12465.
- Yeh T K, Shih H C, Wang C S, et al, 2018. Determining the precipitable water vapor thresholds under different rainfall strengths in Taiwan[J]. Adv Space Res, 61(3):941-950.
- Yu R C, Zhang Y, Wang J J, et al, 2019. Recent progress in numerical atmospheric modeling in China[J]. Adv Atmos Sci, 36(9):938-960.
- Zhang W X, Zhang H, Liang H, et al, 2019. On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China[J]. J Geod, 93(10):1897-1909.
- Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q, 2018. GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event[J]. J Atmos Solar-Terr Phys, 167:124-133.

(本文责编:戴洋)