何爽爽，汪君，王会军. 2018. 基于卫星降水和 WRF 预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究 [J]. 大气科学, 42 (3): 590−606. He Shuangshuang, Wang Jun, Wang Huijun. 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (3): 590−606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18148.

基于卫星降水和 WRF 预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究

何爽爽[1,2] 汪君[1,4] 王会军[3,4,1]

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 南京信息工程大学气象灾害重点实验室，南京 210044
4 南京信息工程大学气象灾害预报及评估协同创新中心，南京 210044

摘 要 2017 年 6 月 18 日北京门头沟地区突发泥石流，造成 6 人伤亡。短时强降水是这起事件的主要诱发因素，但常规气象观测并没有很好地观测到此次降水过程，可见降水数据的准确性对于滑坡泥石流的实时预警及预报至关重要。近年来，卫星遥感估算降水发展迅速，WRF（Weather Research and Forecasting Model）模式关于降水的预报技巧也逐渐提高。本文以自动站降水资料为参考，首先利用定性方法和泰勒图、TS（Threat Score）评分等定量的方法比较了 CMORPH（CPC MORPHing technique）、GPM（Global Precipitation Measurement）和 PERSIANN-CCS（Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System）三种卫星降水资料以及不同起报时间的 WRF 预报降水对此次降水过程的表现能力，然后利用降水数据驱动滑坡泥石流统计预报模型，对此次事件进行了回报，分析不同降水数据在模型中的实际应用效果，最终为滑坡泥石流实时预警和预报系统的构建提供参考。结果表明，三种卫星降水资料基本上能反映出此次降水过程东北—西南向的带状空间分布形态，其中，CMORPH 与自动站资料的空间相关性最好，命中率也最高，但对降水量有一定的高估，GPM 对平均降水量的时间变化有较好的反映，体现了卫星降水在观测较少地区的良好利用价值，PERSIANN-CCS 的表现则相对差些。WRF 模式能预报出此次降水的带状空间分布特征，但降水中心的位置与实际有所偏差；此外，预报的最大降水量的峰值出现时间比实际上晚。由于此次降水的强局地性，只有空间分辨率均匀且质量相对较好的 CMORPH 卫星降水驱动模型可以回报出此次事件，而自动站点资料由于空间分布不均，则没有回报出此次事件，这表明了卫星降水在滑坡泥石流实时预警系统的构建中具有一定的优势。WRF 模式降水驱动模型可以提前做出预警，虽然预报的事件发生时间与实际相比偏晚 3～5 h，但 WRF 可以较好地预报 72 h 内的降水，因而可以延长灾害的可预见期。WRF 模式预报降水的时间和空间精度都需要进一步提高，但是仍具有很好的参考意义。

关键词 门头沟泥石流 卫星降水 WRF 模式 灾害预警
文章编号 1006-9895(2018)03-0590-17 **中图分类号** P49 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18148

Hindcast Study of “6.18” Mentougou Debris-Flow Event Based on Satellite Rainfall and WRF Forecasted Rainfall

收稿日期 2018-04-12；**网络预出版日期** 2018-05-02
作者简介 何爽爽，女，1993 年出生，硕士研究生，主要从事滑坡泥石流灾害研究。E-mail: heshuangshuang16@mails.ucas.ac.cn
通讯作者 汪君，E-mail: wangjun@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41605084，中国科学院国际合作局对外合作重点项目 134111KYSB20150016
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41605084), the External Cooperation Program of BIC (Bureau of International Co-operation), Chinese Academy of Sciences (Grant 134111KYSB20150016)

HE Shuangshuang[1, 2], WANG Jun[1, 4], and WANG Huijun[3, 4, 1]

1 *Nansen–Zhu International Research Centre*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

3 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044

4 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract On 18 June 2017, a debris-flow event suddenly occurred in Mentougou district of Beijing, and 6 people were dead or injured during this event. Short-term heavy rainfall is the main factor that triggered this event, while the routine meteorology observations didn’t report this event very well. It can be seen that accurate rainfall observation and forecast are crucial for early warning of landslides and debris flows. In recent years, satellite remote sensing technology for estimating rainfall has been developed rapidly, and the forecasting skill of precipitation by WRF (Weather Research and Forecasting Model) has also been gradually improved. Based on rainfall data collected at automatic weather stations (AWS), the performance of three satellite rainfall products—CMORPH (CPC MORPHing technique), GPM (Global Precipitation Measurement) and PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System) and WRF model forecasted rainfall during this event are evaluated using qualitative and quantitative methods such as Taylor diagram and Threat Score. These rainfall data are then used to drive the statistical landslide and debris-flow forecasting model to hindcast this event. The applicability of different rainfall data in the model is analyzed, which provides references for the construction of landslide and debris-flow real-time warning and forecasting system. Results show that these three satellite rainfall products can well reproduce the rain belt, which extended from northeast to southwest in the study area. CMORPH has the highest spatial correlation coefficient with the observations and its probability of detection (POD) is also the highest, yet it overestimates the rainfall. GPM can well describe the temporal variability of area averaged precipitation, and shows the potential application of satellite remote sensing on rainfall observations in areas with less observational stations. The performance of PERSIANN-CCS is not as good as the former two. WRF can forecast the spatial distribution of the rain belt, but the simulated rainfall center has a bias compared with the actual position. Besides, the occurrence time of the forecasted maximum precipitation appeared later than its actual occurrence time. Due to the locality of the heavy rainfall, the landslide and debris-flow model can accurately hindcast the event only when driven by CMORPH, which has a uniform spatial distribution and good quality. The observational rainfall from AWS cannot make an accurate hindcast due to its uneven distribution, which indicates that the satellite rainfall has certain advantages in the construction of landslide and debris-flow real-time warning system. The landslide and debris-flow model driven by WRF simulation can make early warning of the event, although the forecasted event occurs 3–5 h late. WRF can well forecast precipitation within 72 h, and thus prolongs the predictable period of the event. The spatiotemporal accuracy of WRF model still needs to be improved, but it is still crucial in early warning of disasters.

Keywords Mentougou debris-flow, Satellite rainfall, WRF model, Disaster warning

1 引言

北京时间 2017 年 6 月 18 日下午 14:00 许，北京市门头沟斋堂地区突降局地大暴雨，导致泥石流暴发，由于来势迅猛，造成 5 人死亡，1 人失踪。事件发生地点位于北京城区正西偏南，地势西北高、东南低；门头沟区内最大的过境河流永定河有 300 多条支流，流量不稳定，河道坡度大。这些都是导致该区域较容易发生滑坡泥石流的地质因素。

除了当地的地形地貌条件之外，短时强降水是这次泥石流的动力诱发因素，实际上，降水也是我国滑坡泥石流的主要诱发因子（李媛等，2004）。降雨数据的准确性对于滑坡泥石流灾害的预警至关重要。然而，有时降雨具有较强的局地性，灾害发生地点周围的气象站分布不均匀，在山区分布更为稀疏，因此对此类灾害进行及时且准确的预警较为困难。那么对于这种突发性强、历时短、强度大的降水过程，覆盖范围广、空间分辨率均匀的卫星资料表现如何呢？另外，数值模式如 WRF（Weather Research and Forecasting Model）能否提前预报出此次降雨？进而，若用卫星降水和 WRF 预报降水驱动滑坡泥石流预报模型，其实际应用效果如何？本

文将就以上问题进行分析和探讨。

近年来，卫星遥感技术估算降水发展较快，其算法也在不断改进（Kidd and Levizzani，2011；Gebregiorgis et al.，2018；Ma et al.，2018；Zhao et al.，2018）。卫星观测在时空连续性和分辨率方面比地面观测更有优势，为观测站较少的山区的降水资料问题提供了解决方法。同时，卫星实时资料的发布为滑坡泥石流实时预警提供了可能。目前比较常用的卫星降水数据有：CMORPH（CPC MORPHing technique）、GPM（Global Precipitation Measurement）和 PERSIANN-CCS（Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks–Cloud Classification System）等。

学者们对卫星降水资料在中国地区的适用性进行了多方面评估（Yu et al.，2009；Shen et al.，2010）。卫星反演降水在中国不同地区、不同时间尺度、不同海拔和不同季节的表现有所不同（成璐等，2014；Qin et al.，2014；Liu et al.，2015；金晓龙等，2016）。许时光等（2014）通过对 CMORPH 卫星降水资料在中国地区的评估，发现 CMORPH 对小雨的空报率较高，对其精度影响较大。张蒙等（2016）评估了 CMORPH、PERSIANN 和 TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）等卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性，其结果能较好地表征该地区的降水量。 Zeng et al.（2018）对 CMORPH、TRMM 和 PERSIANN 卫星降水在中国地区年平均、季节平均和月平均降水分别进行了评估分析。Wei et al.（2018）评估了 CMORPH、TRMM 等卫星降水在中国不同气候区的表现。除了对卫星降水质量的综合评估外，学者们对卫星降水在不同领域的应用方面也做了一些评估和研究工作，发现卫星估计降水在泥石流、洪水、台风降水、极端降水等方面都表现出了良好的应用潜力（傅云飞等，2003，2007；李德俊等，2010；Amitai et al.，2012；Jiang et al.，2018）。Chen et al.（2013）评估了卫星资料对台风 Morakot 降水的表现。Wang et al.（2016）通过评估卫星降水在舟曲泥石流事件中的表现，发现卫星估计降水在观测较少的山区具有很好的应用潜力。此外，将高分辨率的卫星资料应用于洪水和滑坡泥石流灾害预警领域，从而建立全球的洪水和滑坡泥石流灾害实时预警系统（Hong et al.，2007a），也取得了较好的实际效果。

中尺度天气预报模式 WRF 是由 NCAR（National Center for Atmospheric Research）、NCEP（National Centers for Environmental Prediction）等多所研究机构及大学共同开发的，由于其可移植性强、容易维护、高效率等特征而得到广泛应用（Skamarock et al.，2008；王晓君和马浩，2011）。近年来，WRF 模式预报降水也越来越多的应用于水文领域（殷志远等，2017）。

前人的研究大多针对多年的卫星降水资料进行比较（Hu et al.，2015；Zhang et al.，2015），对卫星降水在滑坡泥石流灾害实时预警系统中的实际应用研究则较少；此外，若要对滑坡泥石流灾害进行提前预报，WRF 模式预报降水在该方面的应用研究也要加强。因此，本文将基于卫星降水和 WRF 预报降水，对门头沟泥石流事件进行回报研究。首先比较 CMORPH、PERSIANN-CCS、GPM 卫星降水资料和 WRF 预报降水对此次事件中强对流降水过程的表现，然后用各个降水数据驱动一个滑坡泥石流统计预报模型，分析对此次事件的后报效果，以期为滑坡泥石流的实时预警和预报系统的建立提供参考。本文第二部分介绍了研究区域和试验设计、所用数据、方法和滑坡泥石流模型，第三部分通过与自动气象站 AWS（Automatic Weather Station）降水资料进行对比，评估了卫星降水、WRF 模式预报降水在此次事件中的表现，并用降水数据驱动滑坡泥石流统计模型，对此次事件进行后报，检验能否做出实时或提前预警，最后对结果进行了总结和讨论。

2 数据及方法介绍

2.1 研究区域和试验设计

图 1a 是 WRF 模式的模拟区域，其中红色方框内的区域为模式的嵌套区域（以下记为区域 2），也是本文 3.1 节中对降水数据进行比较的区域。区域 2 内的地形和河网分布如图 1b 所示。门头沟区位于北京城区正西偏南，北京太行山山区，98.5%的面积为山地；永定河是门头沟区最大的过境河流，河道长 1000 余公里，大小支流有 300 余条，主要包括刘家峪沟、湫河、清水河、下马岭沟、门头沟等。由于受上游河水不均匀的影响，流量极不稳定。区域内流域范围坡度陡，河道坡度大，水流湍急。

此外，为了更好地分析事件发生流域的降水情况，利用 ArcGIS 工具，根据 HydroSHEDS（Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives

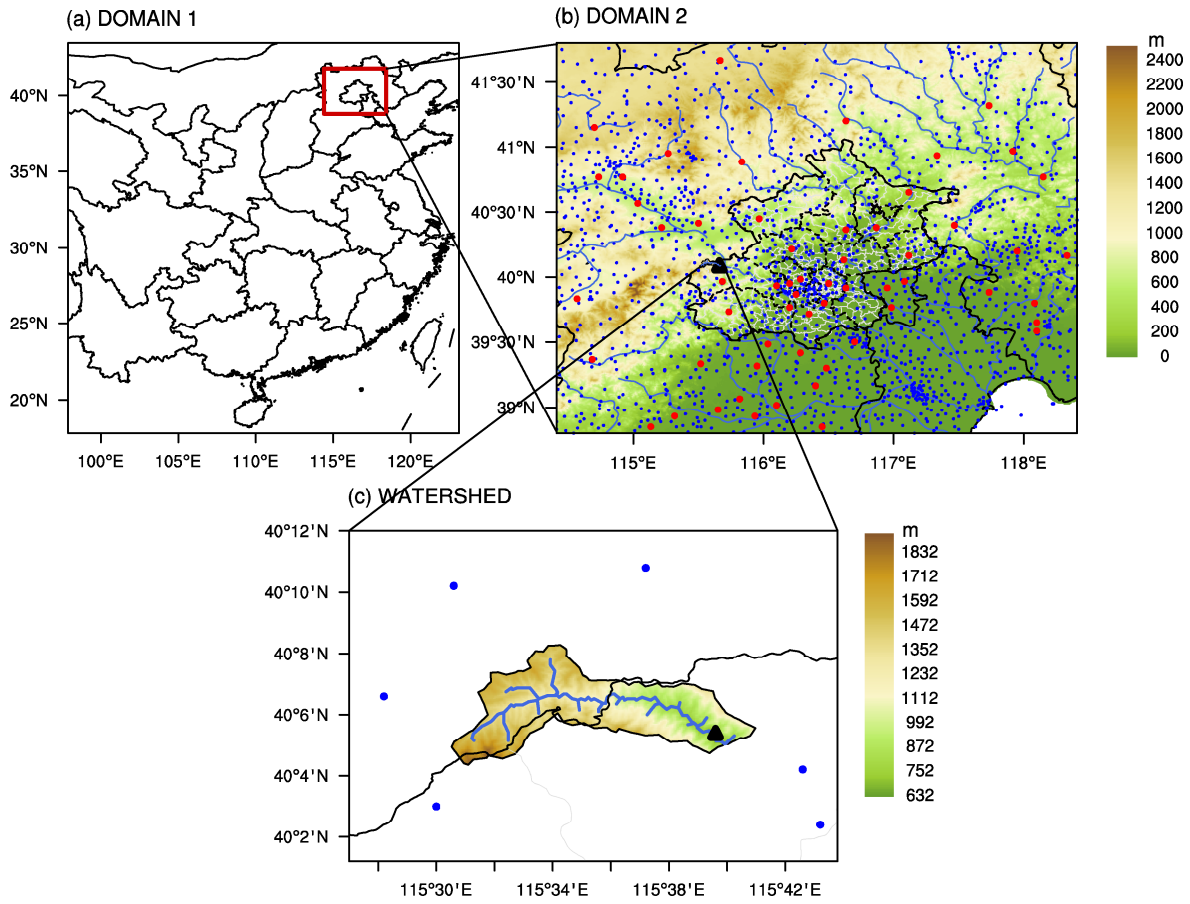

图 1　(a) WRF 双层嵌套模拟区域；(b) 区域 2 的海拔高度分布（填色图）和河网（蓝线）分布及北京市行政区划图；(c) 石羊沟流域图。黑色实线：省界，黑色虚线：区县界，白色实线：乡镇界，蓝线：河道，红色圆点代表气象站位置，蓝色圆点代表自动站位置，黑色三角代表事件发生位置

Fig. 1　(a) Double-nesting WRF domains; (b) elevation (shaded contours) and river network (blue lines) distribution of domain 2 and the administrative division of Beijing city; (c) watershed of Shiyanggou. Black solid line: provincial boundary, black dotted line: county boundary, white solid line: township boundary, blue solid line: river, red dots represent routine weather stations, blue dots denote automatic weather stations, the black triangle represents where the event occurred

at multiple Scales）提供的 3″分辨率的高程数据（Lehner et al.，2006），通过水文分析得到了事件发生地点即石羊沟的流域图，如图 1c 所示，石羊沟流域横穿河北省和北京市，是永定河的一个支流，上游位于河北省内，下游位于北京市，泥石流事件发生于该流域的下游。该流域最高海拔 1906 m，流域出口处的海拔 632 m，相对高程差 1274 m，流域面积为 43.7 km^2，主沟长 18 km，距离最近的气象站斋堂站 12 km，最近的自动站 5 km。

本文首先在区域 2（图 1b）内对各个降水数据进行比较分析，并使用降水数据驱动滑坡泥石流模型，得到滑坡泥石流的发生可能性分布图；此外，为了进一步分析流域周围的降水情况，在流域周围即图 1c 所示范围内进行了降水的具体细节特征分析。

2.2　降水数据

本文的研究时段为 2017 年 6 月 18 日 00:00～23:59（北京时，下同）。表 1 给出了所用降水数据的基本信息。观测数据包括从 58 个国家级气象站获取的每小时降水资料以及从 1181 个区域自动气象站获取的每小时降水资料，以下分别记为气象站和自动站。图 1b 同时也给出了事件发生地点周围气象站和自动站的分布。从图中可以看出站点分布不均匀，在海拔较高的山区分布稀疏，在平原地区则相对密集。除了站点资料，文中也使用了中国气象局陆面数据同化系统（CMA Land Data Assimilation System-V2.0，简称 CLSDA-V2.0）实时产品数据集作为参考，该产品的空间分辨率为

0.0625°×0.0625°，时间分辨率为 1 h（Shi et al.，2014）。该数据集提供的降水资料是质量较高的融合分析资料，中国区域内的降水是由 FY2/CMORPH 降水与地面自动站降水融合产品插值到分析格点而形成，结合了地面观测和卫星降水的优点，降水的时空分布特征更为合理准确（沈艳等，2013）。

CMORPH 是由美国气候预测中心 CPC（Climate Prediction Center）发布的，可提供全球 60°N～60°S 的降水数据。CMORPH 根据地球同步卫星半小时间隔的红外图像，来计算降水云系统的运动矢量，然后外推由微波估算的瞬时降水，得到连续的空间降水分布（Joyce et al.，2004）。文中所用的数据版本是 CMORPH Version 0.x，空间分辨率约为 8 km，时间分辨率为 30 min。PERSIANN-CCS 是由 UCI（University of California，Irvine）的水文气象遥感中心 CHRS（Center for Hydrometeorology and Remote Sensing）开发的，PERSIANN-CCS 系统主要基于红外亮温图像，根据图像上云高和范围的不同，进行云特征的分类，通过神经网络程序来估计降水量（Hsu et al.，1997；Hong et al.，2007b）。数据的空间分辨率为 0.04°×0.04°，时间步长有 1 h、3 h、6 h 和 24 h，文中所用的时间步长是 1 h。GPM 是 TRMM 卫星之后的新一代降水观测卫星，空间覆盖范围 60°N～60°S。GPM 的核心观测仪器有双频降雨雷达（Dual-frequency precipitation radar，简称 DPR）和微波成像仪（GPM Microwave Imager，简称 GMI）。文中选用的是基于微波红外的 IMERG（Integrated Multi-satelliteE Retrievals for GPM）算法的产品（Hou et al.，2014；Huffman et al.，2018）。数据的空间分辨率为 0.1°×0.1°，时间分辨率为 30 min。

WRF 模式采用双层嵌套，嵌套的两个区域如图 1a 所示，模拟区域 1 的空间分辨率约为 8 km，文中主要使用区域 2 的降水数据，其分辨率约为 2.67 km，WRF 模式于每天的 8:00 和 20:00 开始预报，向前预报 72 h，时间步长 1 h，文中分别选用了起报时间为 2017 年 6 月 16 日 20:00、6 月 17 日 08:00 和 20:00 的降水数据，以下分别简记为 WRF0616_20、WRF0617_08 和 WRF0617_20。

2.3 分析与比较

由于各个降水数据的分辨率不同，为了便于比较分析，将数据统一插值到了 0.04°×0.04°的网格上，共使用了三种插值方法：站点资料插值到格点采用 Cressman 客观分析法（Cressman，1959），低分辨率数据插值到高分辨率网格采用双线性内插法，高分辨率数据插值到低分辨率网格则采用面积加权平均法。

表 1 降水数据的时空分辨率及探测手段

Table1 Temporal and spatial resolutions of precipitation products and their detecting methods

数据资料及模式	空间分辨率	时间步长	探测手段
国家级气象站	不均匀（～50 km）	1 h	自动气象站观测
区域自动气象站	不均匀（～10 km）	1 h	自动气象站观测
CLSDA-V2.0	～6 km(0.0625°)	1 h	融合分析数据
CMORPH	～8 km(0.0728°)	0.5 h	微波、红外
PERSIANN-CCS	～4 km(0.04°)	1 h	红外
GPM	～10 km(0.1°)	0.5 h	微波、红外
WRF	～2.67 km	1 h	模式预报数据

为了定量地评估降水数据，采用了泰勒图的方法。泰勒图（Taylor，2001）可以简洁明了地给出相关系数 CC（Correlation Coefficient）、均方根误差 RMSE（Root Mean Square Error）和方差 SV（Standardized Variances）相对大小的综合信息，比较直观，公式如下：

$$\mathrm{CC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-Y_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

$$\mathrm{SV}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}{n-1}. \quad (3)$$

其中，X_i 为第 i 个格点上的自动站降水量，Y_i 为第 i 个格点上卫星/WRF 显示的降水量，n 为样本数。

此外，对降水产品的评估还采用了其它一些客观指标，包括命中率 POD（Probability of detection）、空报率 FAR（False alarm ratio）、TS（Threat Score）评分和准确率（ACCURACY）四项指标：

$$\mathrm{POD}=\frac{N_\mathrm{A}}{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{B}}, \quad (4)$$

$$\mathrm{FAR}=\frac{N_\mathrm{B}}{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{B}}, \quad (5)$$

$$\mathrm{TS}=\frac{N_\mathrm{A}}{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{B}+N_\mathrm{C}}, \quad (6)$$

$$\mathrm{ACCURACY}=\frac{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{D}}{N_\mathrm{A}+N_\mathrm{B}+N_\mathrm{C}+N_\mathrm{D}}, \quad (7)$$

其中，N_A 为自动站资料显示有雨，卫星/WRF 数据也显示有雨的格点数；N_B 为空报的格点数；N_C 为漏报的格点数；N_D 为自动站资料显示无雨，卫星/WRF 数据也无雨的格点数。文中对不同级别强度的降水进行了划分，根据我国的降水量等级标准，24 h 内小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨的阈值分别为 0.1 mm、10 mm、25 mm、50 mm 和 100 mm，当该格点上降雨量大于等于阈值时计入该阈值的评分。

2.4 滑坡泥石流统计预报模型

滑坡泥石流的发生主要取决于两类因素（Dai et al.，2002），一是静态因素，如海拔、坡度、土地利用类型、岩石类型等地质地貌因素，静态因素决定了哪些地方容易发生滑坡；二是动力因素，如降雨、地震、人类活动等，这些活动可以诱发滑坡泥石流的发生，决定了何时会发生滑坡泥石流灾害。降雨是滑坡泥石流灾害的主要诱发因素，因此目前大多数研究主要针对降雨型滑坡。汪君等（2016）通过计算滑坡泥石流敏感性地图，划分滑坡泥石流易发程度等级，并结合降雨阈值经验公式来预测滑坡泥石流何时发生，建立了一个滑坡泥石流统计预报模型，公式为

$$\mathrm{PI}=\frac{I}{R_{\mathrm{d}}}\times S, \qquad (8)$$

其中，R_{d}（单位：mm h^{-1}）为降水持续时间 D 小时内的实际降水强度，I 为根据降雨阈值公式计算的临界降水强度（单位：mm h^{-1}），S 为根据静态因素计算得到的滑坡敏感性，PI（Probability Index）为实际发生滑坡泥石流的可能性指数，PI 又进一步分为了 4 个等级，当 PI≥6 时，极其有可能发生滑坡；而当 5≤PI＜6，非常有可能；4≤PI＜5，有可能；PI＜4 则不太可能发生滑坡泥石流。关于降雨历时—强度的阈值关系式，目前已有多个全球或区域性的降雨阈值公式，本文使用的是 Hong et al.（2006）提出的一个全球阈值公式，公式为

$$I=12.45\times D^{-0.42}, \qquad (9)$$

其中，D 为降水持续时间（单位：h），I 的含义同公式（8）。根据汪君等（2016）对中国地区 2008～2011 年间的特大滑坡泥石流灾害的后报，该模型具有较好的预警能力。关于滑坡敏感性的计算方法等有关该模型更为详细的介绍见汪君等（2016），此处不再赘述。在本文中，该模型的空间分辨率为 0.01°×0.01°，将每小时降水数据经插值后驱动模型，从而得到每小时的模拟结果。

3 结果与分析

3.1 降水资料之间的比较

3.1.1 空间分布比较

本小节中以自动站降水为参考，对其余各个降水数据的空间分布特征进行比较，比较的空间范围为区域 2（即图 1b）。图 2 给出了 9 种降水数据在 2017 年 6 月 18 日原始分辨率的 24 h 累计降水量空间分布。从图 2a 中可以看出，由于气象站分布稀疏，尤其是图中西北区域的多山地区，只能粗略地看到在北京部分站点和河北东北部站点及西南部分站点有少量降水。而分布较稠密的区域自动站相对能较全面地反映出此次降水过程，降水主要呈现出东北—西南向的带状分布，结合地形图来看基本位于从平原向山地的过渡区，在图 2b 的东北区域有一个范围较大的降水中心，此外在事件发生地点西侧也有一个范围相对较小的降水极值区。陆面数据同化产品资料 CLSDA-V2.0 是由 FY2/CMORPH 降水与地面自动站降水融合插值到格点得到的，反映的信息与自动站基本相同（图 2c）。CMORPH 也反映出了此次降水东北—西南向的带状分布（图 2d），两个降水中心的位置与自动站、CLSDA-V2.0 基本一致，但是从范围和量级上看则略高估了此次降水。PERSIANN-CCS 对最大降水中心的位置反映较好，但对整个降水带的估计产生较大偏差，出现了几个小范围的降水极值区（图 2e）。GPM 反映出了东北区域较大的降水中心，但是没有反映出来位于事件发生地点附近的降水极值区，且高估了此次降水的范围（图 2f）。总体上看，三种卫星资料基本能体现此次降水过程的空间分布，但是估计的降水范围偏大，对部分无雨的区域产生了空报。三种不同起报时间的 WRF 预报降水的空间分布相似，也呈现出带状分布（图 2g–i），其中 WRF0617_20（2017 年 6 月 17 日 20:00 起报）的带状降水分布最明显，但是预报的最大降水中心位于西北区域，比自动站观测的范围大，且没有预报出东北区域的最大降水中心，对降水中心位置的预报出现了一些偏差（图 2i）。

为了定量地比较卫星降水和 WRF 预报降水的表现，将各个降水数据统一插值到 0.04°×0.04°的网格上，并采用命中率（POD）、空报率（FAR）、TS 评分和准确率（ACCURACY）四个客观指标进

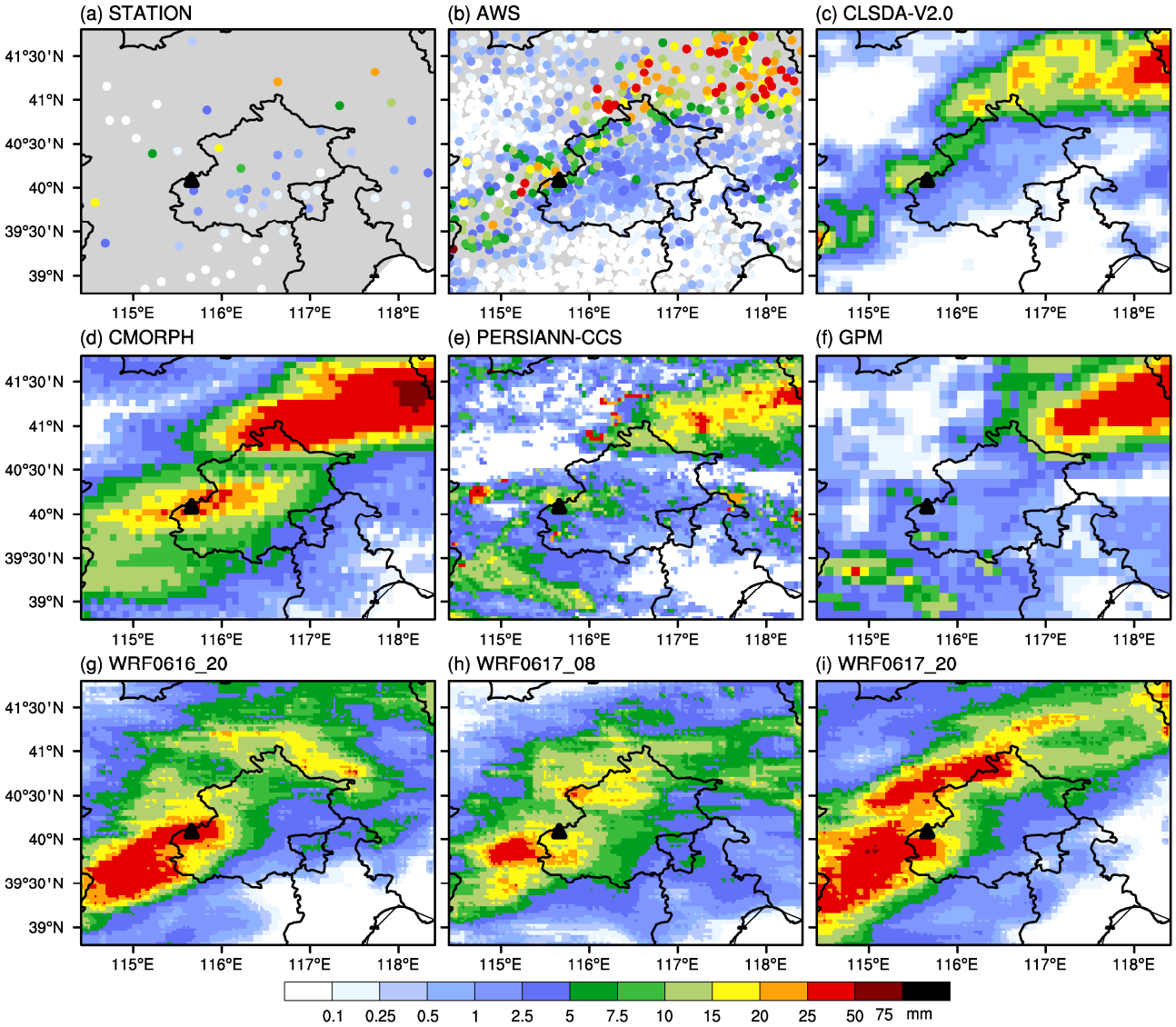

图 2 2017 年 6 月 18 日 00:00～23:59 各降水数据资料原始分辨率 24 h 累计降水（单位：mm）：（a）气象站（STATION）；（b）自动站（AWS）；（c）CLSDA-V2.0（CMA Land Data Assimilation System-V2.0）；（d）CMORPH（CPC MORPHing technique）；（e）PERSIANN-CCS（Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System）；（f）GPM（Global Precipitation Measurement）；（g）WRF0616_20；（h）WRF0617_08；（i）WRF0617_20

Fig. 2 Accumulated rainfall amounts (units: mm) with original resolutions of (a) routine weather station (STATION), (b) automatic weather station (AWS), (c) CLSDA-V2.0 (CMA Land Data Assimilation System-V2.0), (d) CMORPH (CPC MORPHing technique), (e) PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System), (f) GPM (Global Precipitation Measurement), (g) WRF0616_20, (h) WRF0617_08, (i) WRF0617_20 on 0000 BT–2359 BT (Beijing time) 18 June 2017

行比较分析。以自动站在 2017 年 6 月 18 日的 24 h 累计降水量作为参考标准，图 3 比较了其余降水产品的 POD、FAR、TS 评分和准确率。所有数据中，CLSDA-V2.0 具有较低的 FAR 以及最高的 TS 评分和准确率，其中准确率超过了 0.89，气象站资料也有较高的准确率，超过了 0.77。三种卫星资料中，CMORPH 的 POD 最高，但 FAR 也是最高的，除了对特大暴雨的空报率较低，其余均超过了 0.9，这与图 2 中 CMORPH 对降水的高估一致。GPM 的 FAR 也较高。PERSIANN-CCS 的 POD 最低，同时 FAR 也低。三种卫星资料对小雨的空报率都较高，与图 2 中空间分布的分析一致，很有可能与红外探测产生的空报有关。三种卫星的 TS 评分及准确率则差别不大，其中准确率均超过了 0.7。从 WRF 预报降水来看，WRF0617_20 有最高的 POD 和 TS 评分，但是 FAR 也最高，三种预报降水的准确率都超

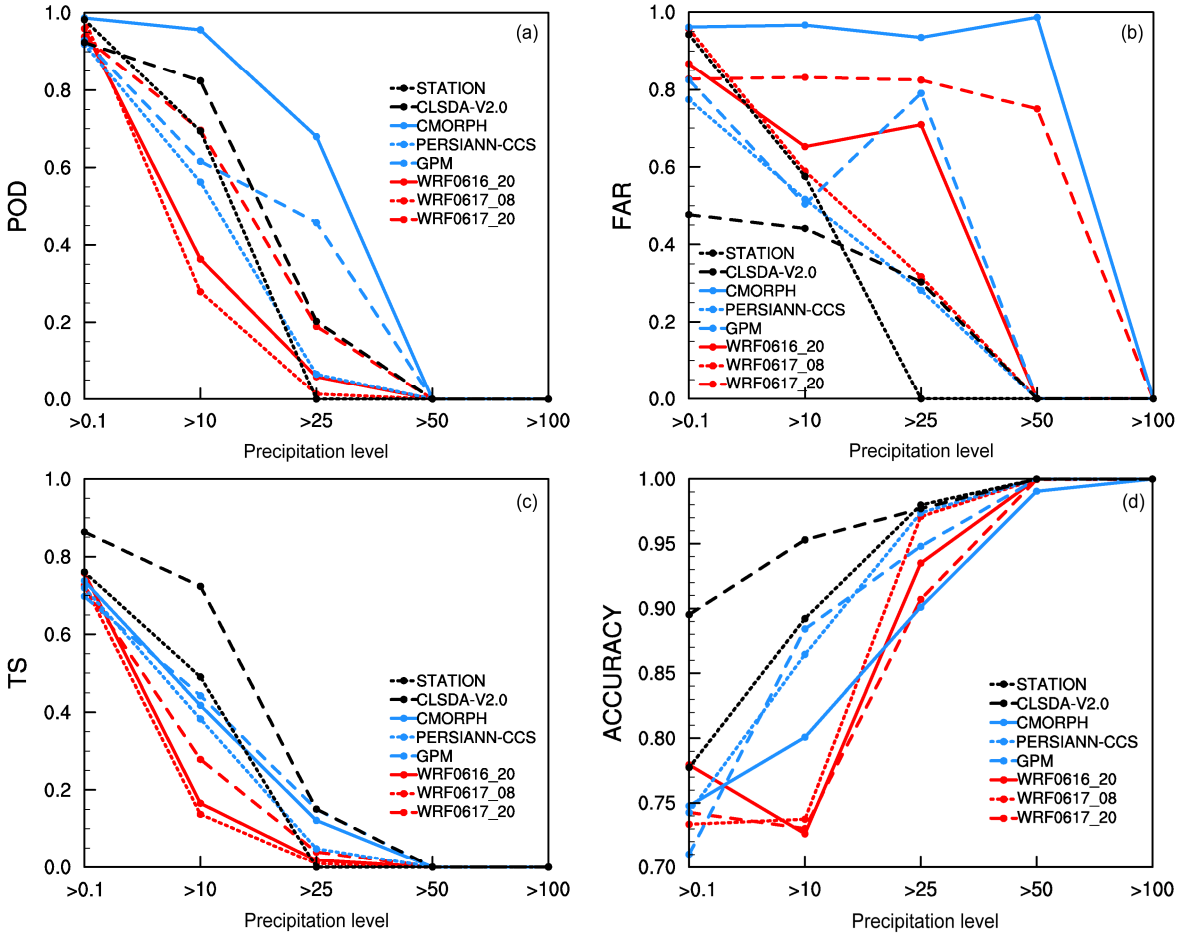

图 3　各个降水产品不同降雨等级下的（a）POD（命中率）、（b）FAR（空报率）、（c）TS（Threat Score）评分和（d）ACCURACY（准确率）比较。所有数据统一插值到 0.04°×0.04°网格

Fig. 3　(a) POD (Probability of detection), (b) FAR (False alarm ratio), (c) TS (Threat Score) and (d) ACCURACY with different precipitation level of various rainfall products. All data are interpolated to 0.04°×0.04° grid

过了 0.7，WRF0617_20 的准确率稍低于其余两者。

以自动站的 24 h 累计降水量为观测标准，对其余降水数据进行了空间相关系数、均方根误差的比较，图 4 给出了综合以上信息的泰勒图。图中某点到原点的连线与 X 轴的余弦和距离分别反映数据同参考标准的相关系数大小和同参考标准的方差之比，而该点与 X 轴上参考点（REF）的距离半径反映了数据与参考值的均方根误差的相对大小。从图 4 中可以看出，CLSDA-V2.0 与自动站降水资料的空间相关系数最高，接近 0.9，均方根误差最小。气象站资料均方根误差也较小，与自动站降水资料的空间相关系数为 0.7。三种卫星资料中，CMORPH 卫星资料与自动站降水的相关系数最大，约为 0.75，但均方根误差和方差也最大，GPM 与自动站降水的相关系数高于 PRSIANN-CCS，超过了 0.66，PERSIANN-CCS 与自动站降水的相关系数则低于 0.6。三种不同起报时间的 WRF 预报降水中，WRF0617_20（2017 年 6 月 17 日 20:00 起报）的相关系数最大，超过 0.37，均方根误差也最大。

图 5 是 9 种降水数据 24 h 累计降水量的概率分布图（Probability Distribution Function，简称 PDF），从图中可以看出，卫星资料及 WRF 降水与自动站的概率分布有较好的一致性。CLSDA-V2.0 和自动站资料分布最为接近，概率曲线上共有 3 个极大值，其中最大的极值即没有降水的区域占了研究区域总面积的 29%，其次是 0.5～1 mm 范围的降水占了 12%左右，10 mm 左右范围的降水占了 5%左右，24 h 最大降水量约为 50 mm。气象站资料在 0.1～20 mm 范围的降水概率分布均比自动站高 2%～3%，但在 20～50 mm 范围则比自动站低。从

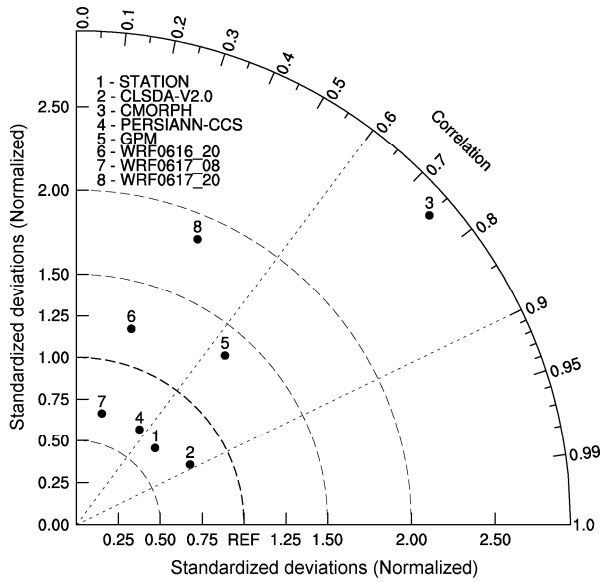

图 4 各个降水产品的泰勒图。所有数据统一插值到 0.04°×0.04°网格

Fig. 4 Taylor diagram of each individual rainfall products. All data are interpolated into 0.04°×0.04° grid

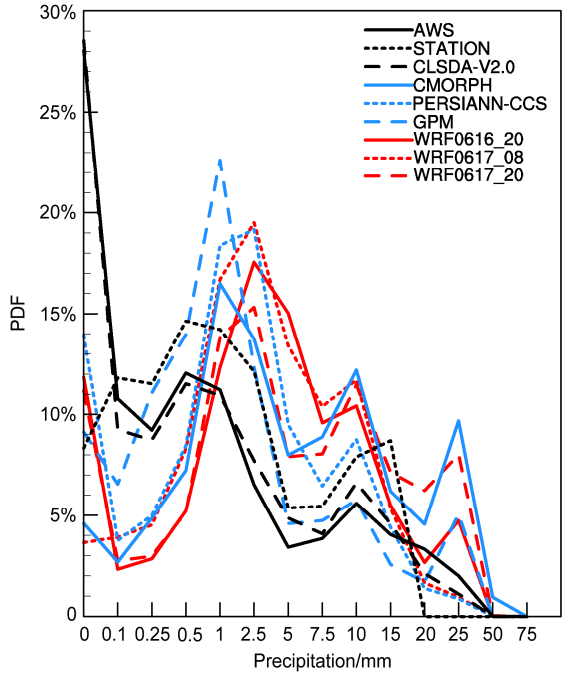

图 5 各个降水产品的 24 h 累计降水量的概率分布图（PDF）。所有数据统一插值到 0.04°×0.04°网格

Fig. 5 Probability distribution functions (PDF) of 24h accumulated rainfall amount for each individual rainfall products. All data are interpolated into 0.04°×0.04° grid

卫星降水的概率分布曲线来看，三种卫星降水均低估了无雨和小雨的面积，CMORPH 的低估最明显，相应地高估了中雨和大雨的面积，CMORPH、PERSIANN-CCS 和 GPM 在 1～2.5 mm 范围出现峰值，分别比自动站资料高了 5%、8%和 11%，三种卫星降水在 10 mm 也出现了峰值，GPM 与自动站接近，CMORPH 和 PERSIANN-CCS 则比自动站高，此外 CMORPH 和 GPM 在 25 mm 左右范围的降水也出现了极大值。WRF 预报降水低估了无雨和 1 mm 以下量级的降水面积，在 2.5～5 mm 和 10 mm 分别有极大值，高出自动站 5%左右，WRF0617_20 对 20～25 mm 的降水也有明显高估。总的来说，各个降水数据与自动站降水的概率分布还是比较接近的，但是对无雨和小雨的概率面积估计偏低，而对小雨以上量级的估计偏高。

总的来说，从对 24 h 累计降水量的空间分布来看，三种卫星资料基本都能反映此次降水的东北—西南向的带状空间分布和主要降水中心。从与自动站的空间相关性上看，CMORPH 高于 GPM，GPM 高于 PERSIANN-CCS，此外，CMORPH 的命中率（POD）也是三种卫星资料中最高的。与自动站降水相比，WRF 模式预报降水总体高估了此次降水范围和量级，对最大降水中心位置的预报有偏差，WRF0617_20 有最高的命中率和 TS 评分，空间相关系数也最大，这说明起报时间距离事发时间越近，预报效果则越好。卫星资料及 WRF 降水与自动站的概率分布有较好的一致性。

3.1.2 时间序列分析

图 6a 是 9 种降水数据在 2017 年 6 月 18 日区域 2 内的逐小时平均降水量的时间序列图。从图中可以看出，CLSDA-V2.0 与自动站资料的区域平均降水量时间序列几乎重合，在 17:00～17:59 有降水峰值，气象站资料在 14:00～16:59 的降水量略高于自动站资料，分别在 15:00～15:59 和 17:00～17:59 有峰值。三种卫星降水资料中，GPM 的降水峰值出现在 17:00～17:59，其与观测资料区域平均降水量时间序列的相关系数最高，为 0.93，均方根误差也最小；CMORPH 平均降水量比观测降水高，仅在 15:00～15:59 有唯一峰值，相关系数为 0.84，均方根误差最大；PERSIANN-CCS 与观测资料的相关系数最低，为 0.6，最大峰值出现在 13:00～13:59。WRF 预报降水平均降水量峰值高于自动站资料，WRF0617_20 预报降水具有最高的相关系数，为 0.79，其最大峰值出现在 17:00～17:59，WRF0617_08 和自动站降水的时间相关系数为 0.6，峰值出现在 19:00～19:59。

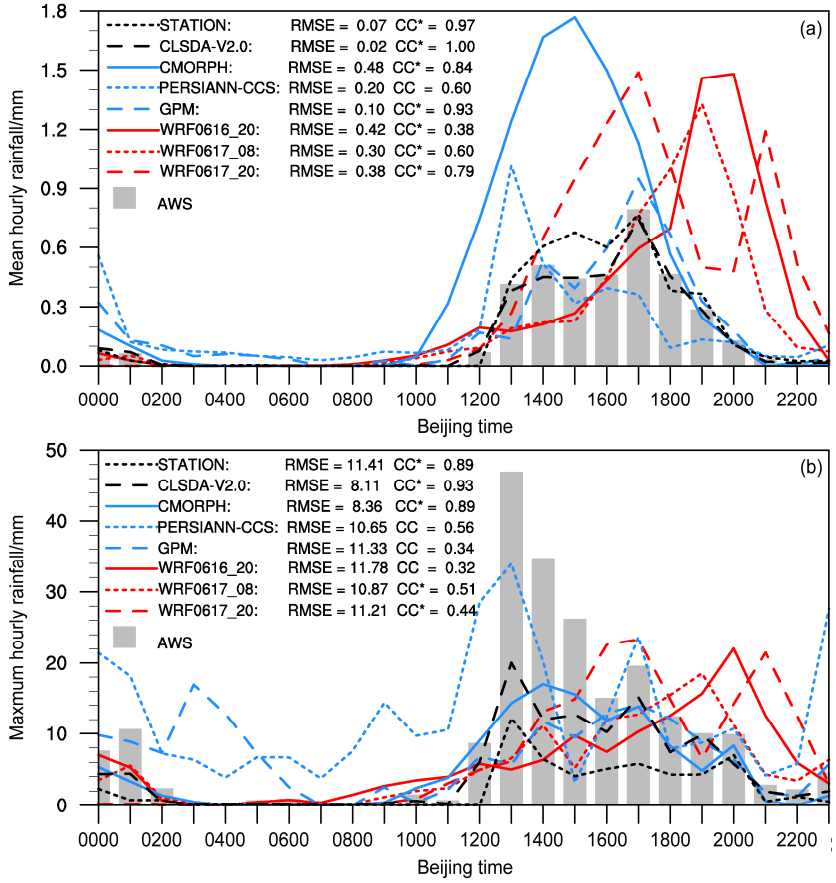

图 6　2017 年 6 月 18 日各个降水产品在区域 2 内逐小时的（a）平均降水量（单位：mm）和（b）最大降水量（单位：mm）的时间序列（“*”代表通过显著性水平为 0.01 的 *t* 检验）

Fig. 6　Time series of (a) average hourly rainfall (mm) and (b) hourly maximum amount of rainfall (mm) in domain 2 on 18 June 2017 for each individual rainfall products (“*” indicates significance at 0.01 level by the *t*-test)

图 6b 给出了各个降水产品在 2017 年 6 月 18 日区域 2 内的逐小时最大降水量的时间序列。从图中看出，自动站的区域最大降水峰值出现在 13:00～13:59，超过了 46 mm，CLSDA-V2.0 最大降水量变化曲线与自动站相近，相关系数为 0.93，但是整体低于自动站的最大降水量，这可能与该资料将自动站数据和卫星资料融合插值有关。气象站的最大降水量趋势与自动站相近，相关系数为 0.89。卫星降水数据中，与自动站相关系数最高的是 CMORPH，为 0.89，最大降水量值出现在 14:00～14:59；其次是 PERSIANN-CCS，相关系数为 0.56；GPM 的相关系数最低，仅为 0.34。三种不同起报时间的 WRF 降水相关系数最高的是 WRF0617_08，为 0.51，WRF 预报降水数据最大值的出现时间比观测资料晚，说明 WRF 模式对降水极值的预报能力和时间精度还需要提高。

从时间序列分析来看，三种卫星资料中，GPM 对平均降水量的时间变化估计最好，CMORPH 对降水极值的估计最好，PERSIANN-CCS 的表现稍差些。WRF 模式预报的降水极大值的出现时间比实际上晚，对降水极值和平均降水的预报能力还有待提高，起报时间越近，预报效果越好。结合空间和时间对比分析来看，CMORPH 卫星对此次降水的表现能力最好，其次是 GPM，PERSIANN-CCS 则稍差一些。这可能与 CMORPH 和 GPM 都以微波探测手段为主，并用红外图像弥补微波探测的技术有关，微波探测可以得到高质量高精度的降水，缺点是无法对同一地点连续观测，而红外观测可以得到时间连续的降水数据，CMORPH 结合这两者的优点，降水数据的质量较高；GPM 采用双频降雨雷达和微波成像仪等微波探测手段，微波与大气中的降水粒子有直接的物理关系；而 PERSIANN-CCS 主要靠红外亮温估计降水的间接方法（Yong et al.，2016），比如，遇到不降雨的冷卷云时，其云顶亮

温较低，当低于降水阈值时，错认为其有降水，产生空报。遇到产生降水的薄而暖的层云和对流云时，其亮温高于降雨阈值而很有可能导致漏报（Tuttle et al.，2008）。

3.2 泥石流事件的回报

对降水数据进行了定性和定量的比较分析之后，下面用降水数据驱动滑坡泥石流统计预报模型，对此次泥石流事件进行回报验证，来比较不同降水数据在滑坡泥石流灾害实时预警和预报系统构建中的作用。

图 7 是将 9 种降水数据输入滑坡泥石流模型，得到的 2017 年 6 月 18 日 14:00～14:59 的滑坡泥石流发生可能性等级分布图，区域范围同图 1b。从图 7 中可以看出，自动站降水资料、CLSDA-V2.0 降水资料驱动模型的结果中，虽然也回报出了滑坡泥石流事件，但是均没有准确的回报出事件的实际发生地点。其中在自动站资料驱动模型的回报结果中，在事件发生的实际位置西侧出现了较高的滑坡泥石流发生等级。CMORPH 降水资料驱动模型则可以准确回报出这次事件的实际发生地点，其发生

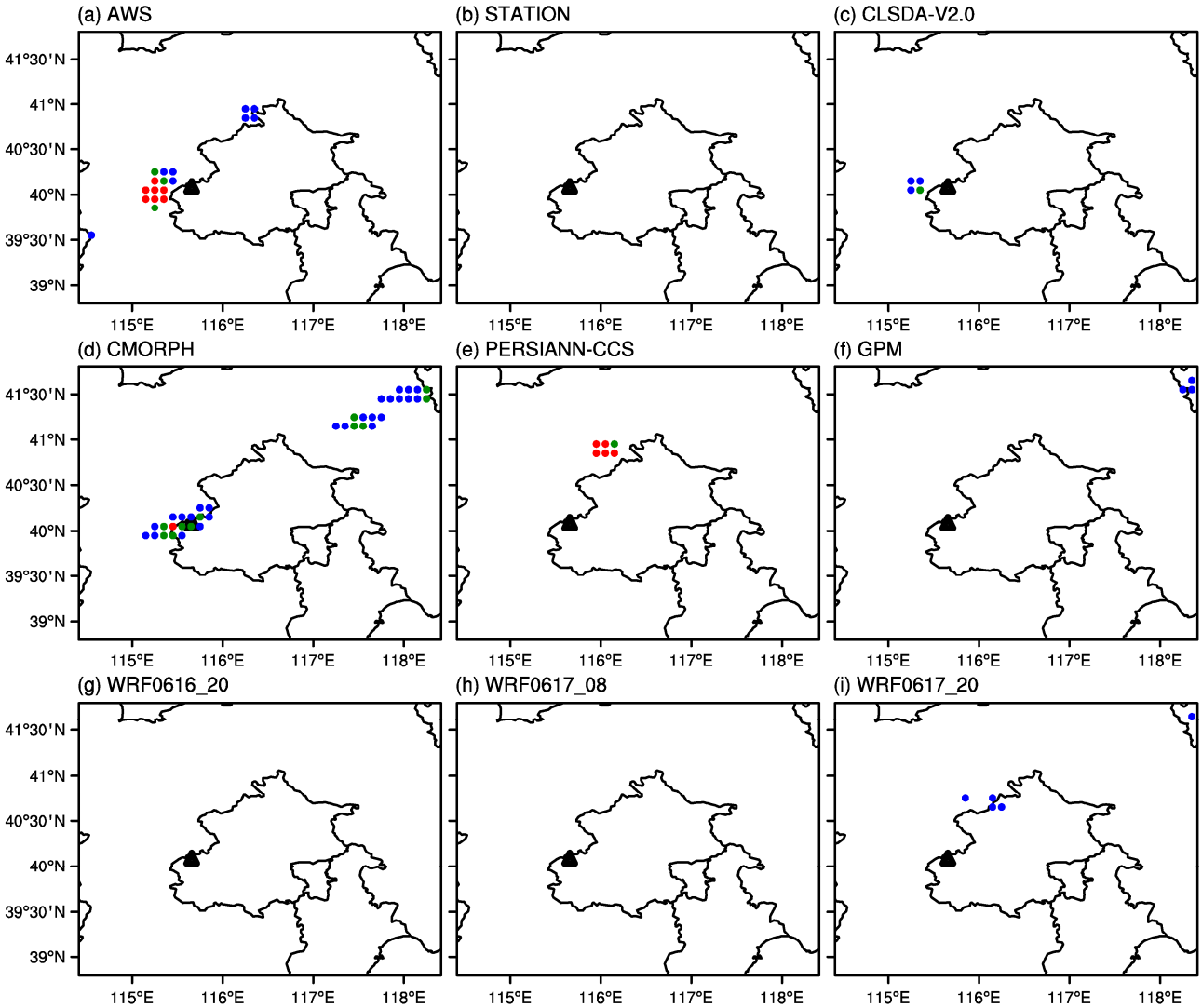

图 7 2017 年 6 月 18 日 14:00～14:59 使用不同降水数据驱动滑坡泥石流模型得到的滑坡泥石流发生可能性分布图：（a）气象站（STATION）；（b）自动站（AWS）；（c）CLSDA-V2.0；（d）CMORPH；（e）PERSIANN-CCS；（f）GPM；（g）WRF0616_20；（h）WRF0617_08；（i）WRF0617_20。蓝色点：有可能发生泥石流；绿色点：非常有可能发生泥石流；红色点：极有可能发生泥石流，黑色三角代表事件发生位置

Fig. 7 Possibilities of landslide and debris-flow occurrence obtained by driving the landslide and debris-flow model using rainfall from (a) routine weather station observations (STATION), (b) automatic weather station observations (AWS), (c) CLSDA-V2.0, (d) CMORPH, (e) PERSIANN-CCS, (f) GPM, (g) WRF0616_20, (h) WRF0617_08, and (i) WRF0617_20 on1400 BT–1459 BT June 18 2017. Blue dots: landslide and debris-flow is likely to occur, green dots: landslide and debris-flow is very likely to occur, red dots: landslide and debris-flow is extremely likely to occur, the black triangle represents where the event occurred)

等级为有可能（图 7d 中蓝色）和很有可能（图 7d 中绿色），PERSIANN-CCS 和 GPM 降水资料驱动模型则没有回报出事件的实际发生地点。WRF_61612 和 WRF_61700 驱动滑坡泥石流模型的结果显示，该区域没有滑坡泥石流事件的预警，而 WRF_61712 虽然做出预警，但是位置与实际事件发生地点不符合。从这张图中可知，质量相对较好的 CMORPH 卫星降水资料驱动滑坡模型可以成功回报出此次事件，其余两种卫星资料则没有，其中值得注意的是，虽然自动站、气象站和 CLSDA-V2.0 资料驱动模型没有成功地回报出事件实际发生地点，但是结果显示在事件实际发生位置的西侧有可能发生滑坡泥石流事件，而该位置处于事件发生地点的上游，根据已有的一些调研结果，猜测有两种可能，一是由于此次降水过程具有很强的局地性，尺度范围小，观测站由于在山区分布不均匀的原因，没有捕捉到灾害处的强降水，而卫星降水资料不受地形的限制，且根据 3.1 部分的分析比较，CMORPH 降水资料的质量是相对较好的，因而成功的捕捉到这次局地性较强的降水，并准确回报出此次事件；二是从当日的自动站累计降水量分析中（图 2b），可以得知强降雨集中在事件发生地点上游非常小的一片区域，那么在上游河道来水和本地降水的共同作用下，很可能导致或者加剧了此次泥石流事件。为了验证以上猜测，下面将分析范围进一步缩小，精细到事件发生的石羊沟流域及其周围地区，即图 1c 所示区域。

这里也需要指出的是，从图 7 中可以总结出该滑坡泥石流统计模型的两个缺陷：一是该模型产生一些空报，这有可能是由选用的降雨强度—历时阈值较低所造成的，文中使用的公式是根据收集的全球范围内已发生的滑坡泥石流灾害，通过获取灾害发生时的降水信息，利用分位数回归或逻辑回归等统计学方法得到的，因此阈值相对偏低，目前基于我国已发生的滑坡泥石流灾害信息从而建立降雨阈值公式的研究还很少，因此在今后的研究工作中有必要建立我国的降雨阈值，从而更好地进行滑坡泥石流灾害预警；二是该模型只能考虑本地的降水量，而无法考虑周围的水文情况，如上游来水、汇流等，因此有必要考虑将水文变量加入到滑坡泥石流统计模型中或者开发和研究更具有实际物理意义的动力滑坡泥石流预报模型，目前已有的动力模型如美国地质调查局 USGS（United States Geological Survey）开发的 TRIGRS（Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability）模型（Baum et al.，2008），该模型基于瞬态降水入渗原理，通过计算降雨后的水分渗入土壤导致土壤重力和摩擦力的变化，从而导致边坡失稳来预判滑坡发生，具有一定的预测能力。此外，还有 Liao et al.（2010）开发的 SLIDE（SLope-Infiltration-Distributed Equilibrium）模型，但是其中的部分水文过程是经过简化的，对持续性降水引发滑坡的过程还无法表征，因此相关的动力学过程也需要加强研究。当然关于滑坡泥石流灾害预警系统的改进还有较多工作需要完善，需要进一步深入研究。

图 8a 给出了根据当地的滑坡泥石流敏感性指数和降雨强度—历时阈值公式，反推得到的 1 h 累计降雨量阈值，当 1 h 内的降雨量超过该格点上的降雨量阈值时，则有可能发生滑坡泥石流，可以看出，引发石羊沟流域内发生滑坡泥石流的 1 h 降水量至少要达到 8 mm，最高则需要 20 mm。图 8b–i 分别给出了各个降水数据在 2017 年 6 月 18 日 14:00～14:59 的 1 h 累计降雨量，当某一站点（或格点）上的降水量超过降雨量阈值时，即有可能发生滑坡泥石流事件，用“＋”标记，由于气象站距离事件发生流域较远，这里不再给出气象站的降水资料图。从图 8b 中看出，石羊沟流域附近的 5 个自动站的实际监测降水量均没有达到降水阈值（图 8b 中以圆圈标出），图中东南角的两个自动站则只监测到少量降水，插值到格点后的降水量（图 8b 中填色图）在流域西南侧出现了“＋”，超过了降雨量阈值，同时可以看出，流域内上游的降水量高于下游。CLSDA-V2.0 资料在图中所示范围内没有达到降水阈值。CMOPRH 降水资料则在流域内大部分格点上的降水量超过了阈值，意味着有可能发生滑坡泥石流。此外，同自动站 5 个站点实际观测降水量相比，CMORPH 也体现出在西南方向降水量最大，其次是北边，而在图中东南角降水量小，说明 CMORPH 对降水量的空间特征体现的还是较好的，虽然存在一定的高估，但是 CMOROH 可以反映出在流域的局地降水特征，这是自动站点资料无法给出的。可以看出，降水高值区集中在流域附近及其西南侧，尤其是上游大部分区域。结合自动站资料，基本可以说明本地降水加上流域上游来水和周围汇流，加剧了此次泥石流事件的强度。

PERSIANN-CCS 的降水量最大为 5 mm 左右，显然低于降雨量阈值，GPM 则更低。对于 WRF 预报降水，可以看出，流域及其周围降水量很小，没有达到阈值；根据前面的分析，WRF 模式对此次降雨极值的出现时间也有偏差，那么预报的泥石流事件发生时间是否提前或者延迟，因此有必要分析一下流域周围降水量的时间序列。

图 9 给出了将各个降水数据输入滑坡统计预报模型中计算得到的滑坡泥石流发生可能性指数最大值的时间序列，当可能性指数 PI 大于等于 4 时，有可能发生滑坡。根据公式（9），该图也能反映出降水的时间变化信息，从图中站点资料及卫星资料可以看出，降水大概从 11:00 开始，在 18:00 结束。自动站资料在 14:00～14:59 达到滑坡可能性最高值；气象站资料在 14:00～14:59 达到最大值，但是滑坡泥石流可能性指数值小于 1；而 CLSDA-V2.0 在 15:00～15:59 达到最大，也没有超过临界值。CMORPH 降水资料驱动模型结果在 14:00～14:59 超过了临界值，而 PERSIANN-CCS 驱动模型得到的滑坡泥石流可能性指数最大值约为 2 左右，GPM 的驱动结果则在 17:00～17:59 出现了一个小于 1 的峰值。从 WRF 预报降水数据来看，WRF0616_20 和 WRF0617_20 预报的降水从 13:00 开始，WRF0617_08 则从 12:00 开始，WRF0616_20 降水

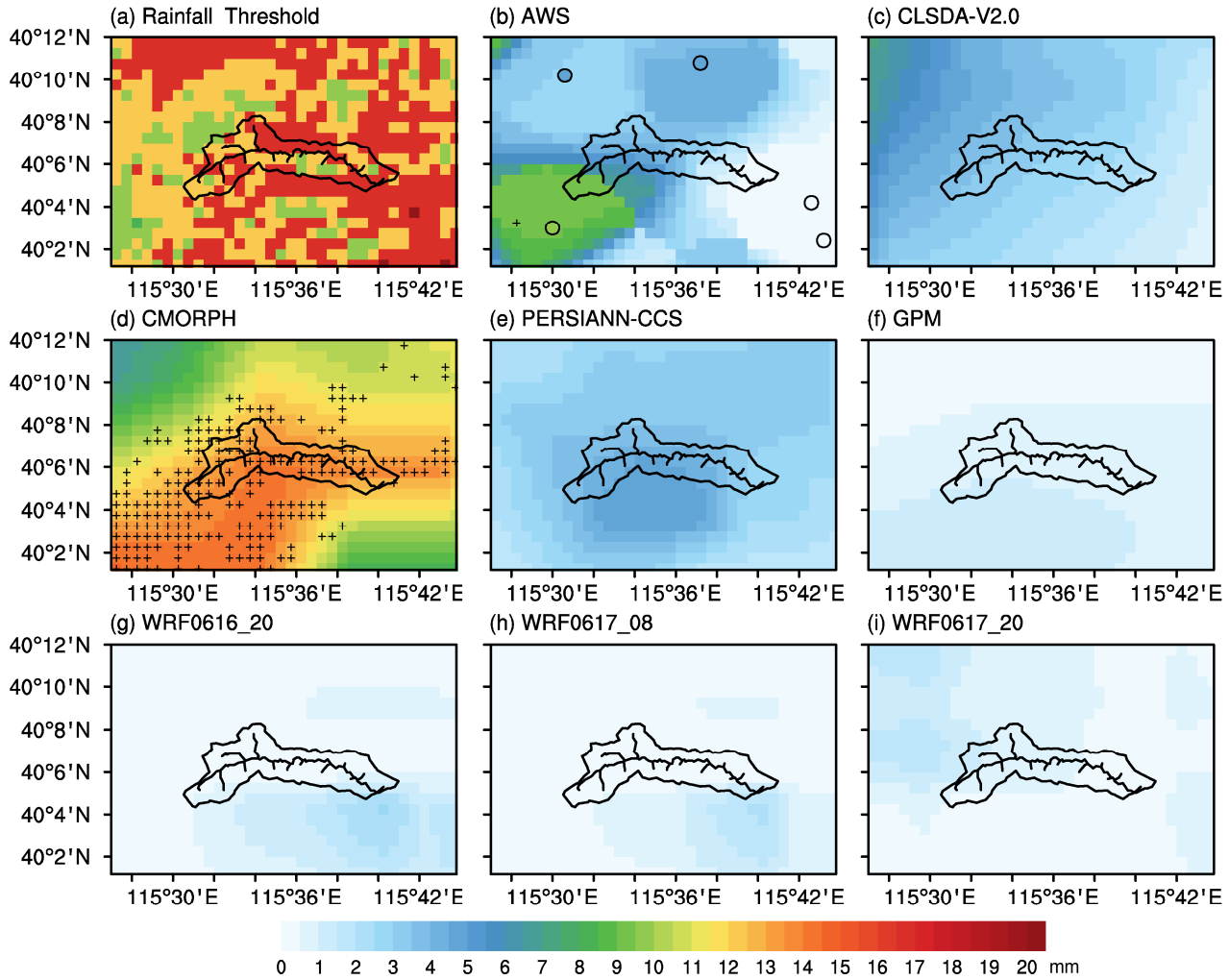

图 8 2017 年 6 月 18 日 14:00～14:59（a）石羊沟流域及周围触发滑坡泥石流的 1 h 降雨量阈值以及（b–i）各个降水数据的 1 h 降水量：（b）AWS；（c）CLSDA-V2.0；（d）CMORPH；（e）PERSIANN-CCS；（f）GPM；（g）WRF0616_20；（h）WRF0617_08；（i）WRF0617_20。（d）中“＋”号代表超过降水阈值，有可能发生滑坡泥石流；（b）中的 5 个圆圈代表自动站的原始降水量

Fig. 8 (a) 1-hour rainfall threshold for triggering landslide and debris-flow in the Shiyanggou watershed and hourly rainfall amount from (b–i) various products during 14:00～14:59 June 18 2017: (b) AWS, (c) CLSDA-V2.0, (d) CMORPH, (e) PERSIANN-CCS, (f) GPM, (g) WRF0616_20, (h) WRF0617_08, and (i) WRF0617_20. “+” in (d) represents that the rainfall exceeds the rainfall threshold, and landslide or debris-flow is likely to occur, the circles in (b) represent the observed rainfall at AWS

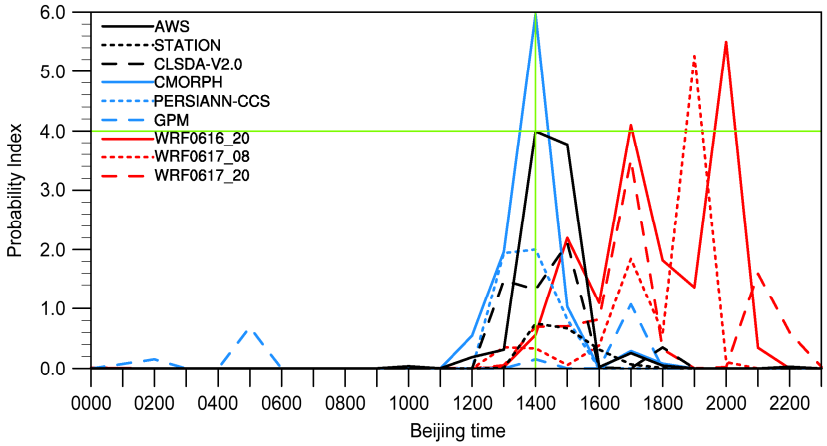

图 9　2017 年 6 月 18 日石羊沟流域发生滑坡泥石流的可能性指数（PI）的逐小时时间序列（绿色水平线为临界值，PI=4.0；绿色垂直线为实际上泥石流事件的发生时间：14:00～14:59）

Fig. 9　Probability index (PI) of landslide and debris-flow around the site of disaster on 18 June 2017. The green horizontal line is the critical value, PI=4.0; the green vertical line indicates the time when the debris-flow event occurred: 1400 BT–1459 BT

数据驱动模型得到的滑坡可能性指数在 17:00～17:59 和 20:00～20:59 均超过了临界值，由 WRF0617_08 得到的滑坡可能性指数在 19:00～19:59 超过了临界值，WRF0617_20 在 17:00～17:59 达到最高值，却没有超过发生滑坡泥石流的临界值，由此可以看出，WRF 模式预报的降水峰值出现的时间稍晚，但是也做出了滑坡泥石流预警，WRF 预报降水数据在时间准确度上有待提高，仍具有一定的参考意义。

总的来说，由于导致这次泥石流灾害的降水过程局地性较强，流域周围的自动站点观测降水驱动模型，并没有达到触发滑坡泥石流的预警值，而空间分辨率均匀、且质量相对较好的 CMORPH 卫星降水输入滑坡预报模型中后，则成功进行了回报，尽管 CMORPH 降水存在一定的高估，但是可以较详细地反映出石羊沟流域地区的降水特征，比自动站降水具有一定的优势，表明了卫星降水在滑坡泥石流预报模型构建中具有重要价值。由于这次降水分布的不均匀性，上游河道来水和周围的汇流加剧了此次泥石流事件的程度。WRF 模式降水驱动滑坡模型也能做出预警，虽然预警的事件发生时间比实际发生时间晚 3～5 h，但由于 WRF 模式比灾害发生时间分别提前 30 h（WRF0616_20）、42 h（WRF0617_08）进行降水预报，故可以延长灾害的可预见期。此外，提高 WRF 模式预报降水的能力对于滑坡泥石流灾害的准确预警也至关重要。

4　结论和讨论

本文以 2017 年 6 月 18 日门头沟的泥石流事件为研究对象，通过对降水数据的对比分析和对该事件的回报验证，探讨了卫星降水和 WRF 预报降水在滑坡泥石流灾害实时预警和预报系统的构建中的作用。以自动站降水资料为参考，首先分析了 CMORPH、PERSIANN-CCS 和 GPM 三种卫星降水和三种不同起报时间的 WRF 模式预报降水对引发此次事件的降水过程的表现能力，并驱动滑坡泥石流统计预报模型，分析了其实际回报效果，主要结论如下：

（1）卫星降水资料基本上都能体现此次降水过程的带状分布结构，CMORPH 是三种卫星降水中最接近观测的产品，其空间相关系数和命中率是三种卫星降水中最高的，但是对降水存在一定的高估，GPM 的表现次之，PRSIANN-CCS 稍差。三种不同起报时间的 WRF 模式预报降水也能基本反映此次降水的空间分布特征，以 WRF_061720 的空间相关系数和命中率（POD）最高，但对降水范围有一定的高估，最大降水中心的位置与实际有所偏差。卫星降水和 WRF 预报降水与自动站降水的概率分布有较好的一致性。

（2）对于区域平均降水量时间变化的估计，GPM 与自动站的时间相关系数最高，其次是 CMORPH，PERSIANN 最低，GPM 与自动站的均方根误差也最小，表现较好；对区域最大降水量的

时间变化而言，CMORPH 与自动站的相关性最高，GPM 和 PERSIANN-CCS 的表现相对差些。WRF_061720 与自动站观测的区域平均降水量时间序列的相关性最高，WRF_061708 与自动站降水极值的相关性最高，WRF 预报的此次降水极值的出现时间比实际上要晚。WRF 模式的起报时间越近，预报效果越好。

（3）CMOPRH 降水资料驱动滑坡模型可以回报出此次泥石流事件，而自动站和 CLSDA-V2.0 降水资料驱动滑坡泥石流统计模型模拟的事件发生地点比实际偏西，经分析，这可能与此次降水的局地性强有关，CMORPH 降水由于空间分辨率较高且空间分布均匀，捕捉到了事件发生地点石羊沟流域的局地强降水过程，表明卫星降水资料在滑坡泥石流实时预警系统的构建中的重要作用。WRF 模式预报降水驱动滑坡泥石流模型可以对此次事件做出提前预警，虽预报的事件发生时间比实际灾害发生时间晚 3～5 h，但若将 WRF 模式进行即时滚动预报，延长灾害的可预见期，则可以更好地应用于防灾减灾。WRF 模式预报降水在时间精度上需要提高，对滑坡泥石流灾害的预警有很好的参考意义。此外，滑坡泥石流统计模型本身也有一定不足，在下一步研究中可考虑将径流、土壤湿度等水文变量加入到统计模型中，以进一步改进该模型，另外，建立适用于我国地区的降雨历时—强度阈值公式也势在必行。

以上结果证明了在观测站分布不均匀且稀疏的山区，卫星降水为滑坡泥石流的预报和预警提供了较好的降水资料来源，尤其是对于局地性强的降水，卫星降水资料比自动站观测资料具有一定的优势。WRF 预报强降水的能力还需要提高，但是也有很好的参考意义。结合观测站点资料、卫星资料和 WRF 预报降水，可以建立更为完善的滑坡泥石流实时预警和预报系统，从而尽可能地减少由降水引发的滑坡泥石流事件所造成的损失。当然，滑坡泥石流统计预报模型自身存在一些问题，如无法考虑上游水文情况和降雨阈值公式的适用性不强等问题；另一方面，动力模型基于实际的物理过程来预测滑坡泥石流的发生，尽管存在高分辨率的基础水文参数数据获取困难、水文过程简化处理、局限于瞬态降水引发的滑坡泥石流等问题，但是动力模型更具有实际物理意义，具有较大的发展潜力。在未来的工作中，需要研究如何解决这些问题，改进模型，对滑坡泥石流灾害做出更准确的预警和预报。

参考文献（References）

Amitai E, Petersen W, Llort X, et al. 2012. Multiplatform comparisons of rain intensity for extreme precipitation events [J]. IEEE. Trans. Geosci. Remote Sens, 50 (3): 675–686, doi: 10.1109/TGRS.2011.2162737.

Baum R L, Savage W Z, Godt J W. 2008. TRIGRS, A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0 [R]. Open-File Report 2008–115, 75pp.

Chen S, Hong Y, Cao Q, et al. 2013. Performance evaluation of radar and satellite rainfalls for typhoon Morakot over Taiwan: Are remote-sensing products ready for gauge denial scenario of extreme events? [J]. J. Hydrol., 506: 4–13, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.026.

成璐, 沈润平, 师春香, 等. 2014. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验 [J]. 气象, 40 (11): 1372–1379. Cheng L, Shen R P, Shi C X, et al. 2014. Evaluation and verification of CMORPH and TRMM 3B42 precipitation estimation products [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (11): 1372–1379, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.010.

Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. Mon. Wea. Rev., 87 (10): 367–374, doi: 10.1175/1520-0493(1959)087<0367: AOOAS>2.0.CO;2.

Dai E C, Lee C F, Nagi Y Y. 2002. Landslide risk assessment and management: An overview [J]. Eng. Geol., 64 (1): 65–87, doi:10.1016/ S0013-7952(01)00093-X.

傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究 [J]. 气象学报, 61 (4): 421–431. Fu Y F, Yu R C, Xu Y P, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and IMI [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 421–431, doi: 10.11676/ qxxb2003.041.

傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征 [J]. 气象学报, 65 (3): 316–328. Fu Y F, Liu D, Wang Y, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 316–328, doi: 10.11676/qxxb2007.031.

Gebregiorgis A S, Kirstetter P E, Hong Y E, et al. 2018. To what extent is the Day 1 GPM IMERG satellite precipitation estimate improved as compared to TRMM TMPA-RT? [J] J. Geophys. Res. Atmos., 123 (3): 1694–1707, doi: 10.1002/2017JD027606.

Hong Y, Adler R F, Huffman G. 2006. Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (22): L22402, doi: 10.1029/2006GL028010.

Hong Y, Adler R F, Huffman G. 2007a. An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets [J]. IEEE. Trans. Geosci. Remote Sens., 45 (6): 1671–1680, doi: 10.1109/TGRS.2006.888436.

Hong Y, Gochis D, Cheng J T, et al. 2007b. Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network [J]. J. Hydrometeorol., 8 (3): 469–482, doi: 10.1175/JHM574.1.

Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. 2014. The global precipitation measurement mission [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95 (5): 701–722, doi: 10.1175/BAMS-D-13-00164.1.

Hsu K L, Gao X G, Sorooshian S, et al. 1997. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks [J]. J. Appl. Meteor., 36 (9): 1176–1190, doi: 10.1175/1520-0450(1997)036<1176: PEFRSI>2.0.CO;2.

Hu L, Deng D F, Gao S T, et al. 2015. The seasonal and interannual variation of diurnal precipitation over the Tibetan Plateau and its downstream regions observed by the tropical rainfall measuring mission [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 8 (6): 365–370, doi: 10.3878/AOSL20150034.

Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J. 2018. Integrated multi-satellitE retrievals for GPM (IMERG) technical documentation [R]. NASA.

Jiang S H, Liu S Y, Ren L L, et al. 2018. Hydrologic evaluation of six high resolution satellite precipitation products in capturing extreme precipitation and streamflow over a medium-sized basin in China [J]. Water, 10 (1): 25, doi: 10.3390/w10010025.

金晓龙, 邵华, 张弛, 等. 2016. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析 [J]. 自然资源学报, 31 (12): 2074–2085. Jin X L, Shao H, Zhang C, et al. 2016. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan mountains [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 31 (12): 2074–2085, doi: 10.11849/zrzyxb.20160057.

Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. J. Hydrometeorol., 5 (3): 487–503, doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487: CAMTPG>2.0.CO;2.

Kidd C, Levizzani V. 2011. Status of satellite precipitation retrievals [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15 (4): 1109–1116, doi: 10.5194/hess-15-1109- 2011.

Lehner B, Verdin K, Jarvis A. 2006. HydroSHEDS technical documentation [R]. Washington, DC: World Wildlife Fund US.

李德俊, 李跃清, 柳草, 等. 2010. 基于 TRMM 卫星探测对宜宾夏季两次暴雨过程的比较分析 [J]. 气象学报, 68 (4): 559–568. Li D J, Li Y Q, Liu C, et al. 2010. Comparative analysis between two summer heavy rain events in Yibin based on the TRMM data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (4): 559–568, doi: 10.11676/qxxb2010.054.

李媛, 孟晖, 董颖, 等. 2004. 中国地质灾害类型及其特征—基于全国县市地质灾害调查成果分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 15 (2): 29–34. Li Y, Meng H, Dong Y, et al. 2004. Main Types and characterisitics of geo-hazard in China—Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control (in Chinese), 15(2): 29–34, doi: 10.3969/j.issn.1003-8035.2004.02.005.

Liao Z H, Hong Y, Wang J, et al. 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets [J]. Landslide, 7 (3): 317–324, doi: 10.1007/s10346-010-0219-7.

Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. 2015. Evaluation of high-resolution satellite rainfall products using rain gauge data over complex terrain in southwest China [J]. Theor. Appl. Climatol., 119 (1–2): 203–219, doi: 10.1007/s00704-014-1092-4.

Ma Y Z, Yang Y, Han Z Y, et al. 2018. Comprehensive evaluation of ensemble multi-satellite precipitation dataset using the dynamic bayesian model averaging scheme over the Tibetan Plateau [J]. J. Hydrol., 556: 634–644, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.050.

Qin Y X, Chen Z Q, Shen Y, et al. 2014. Evaluation of satellite rainfall estimates over the Chinese Mainland [J]. Remote Sens., 6 (11): 11649–11672, doi: 10.3390/rs61111649.

Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 115 (D2): D02114, doi: 10.1029/2009JD012097.

沈艳, 潘旸, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 [J]. 大气科学学报, 36 (1): 37–46. Shen Y, Pan Y, Yu J J, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 37–46, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.005.

Shi C X, Jiang L P, Zhang T, et al. 2014. Status and plans of CMA land data assimilation system (CLDAS) project [C]//EGU General Assembly Conference. Vienna: EGU, 16pp.

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, doi: 10.5065/D68S4MVH.

Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 106 (D7): 7183–7192, doi: 10.1029/2000JD900719 .

Tuttle J D, Carbone R E, Arkin P A. 2008. Comparison of ground-based radar and geosynchronous satellite climatologies of warm-season precipitation over the United States [J]. J. Appl. Meteor. Clim., 47 (12): 3264–3270, doi: 10.1175/2008JAMC2000.1.

汪君, 王会军, 洪阳. 2016. 中国洪涝滑坡灾害监测和动力数值预报系统研究 [M]. 北京: 气象出版社, 121–124. Wang J, Wang H J, Hong Y. 2016. A Realtime Monitoring and Dynamical Forecasting System for Floods and Landslides in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 121–124.

Wang J, Wang H J, Hong Y. 2016. Comparison of satellite-estimated and model-forecasted rainfall data during a deadly debris-flow event in Zhouqu, Northwest China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 9 (2): 139–145, doi: 10.1080/16742834.2016.1142825.

王晓君, 马浩. 2011. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展 [J]. 地球科学进展, 26 (11): 1191–1199. Wang X J, Ma H. 2011. Progress of application of the Weather Research and Forecast (WRF) model in China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 26 (11): 1191–1199.

Wei G H, Lü H S, Crow W T, et al. 2018. Evaluation of satellite-based precipitation products from IMERG V04A and V03D, CMORPH and TMPA with Gauged Rainfall in three climatologic zones in China [J]. Remote Sens., 10 (1): 30, doi: 10.3390/rs10010030.

许时光, 牛铮, 沈艳, 等. 2014. CMORPH 卫星降水数据在中国区域的误差特征研究 [J]. 遥感技术与应用, 29 (2): 189–194. Xu S G, Niu Z, Shen Y, et al. 2014. A research into the characters of CMORPH remote sensing precipitation error in China [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 29 (2): 189–194, doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.2.0189.

殷志远, 王志斌, 李俊, 等. 2017. WRF 模式与 Topmodel 模型在洪水预

报中的耦合预报试验研究 [J]. 气象学报, 75 (4): 672–684. Yin Z Y, Wang Z B, Li J, et al. 2017. An experimental study on the prediction of flood using coupled WRF-Topmodel model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75 (4): 672–684, doi: 10.11676/qxxb2017.045.

Yong B, Wang J J, Ren L L, et al. 2016. Evaluating four multisatellite precipitation estimates over the Diaoyu Islands during typhoon seasons [J]. J. Hydrometeorol., 17 (5): 1623–1641, doi: 10.1175/JHM-D-15-0165.1.

Yu Z F, Yu H, Chen P Y, et al. 2009. Verification of tropical cyclone-related satellite precipitation estimates in mainland China [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 48 (11): 2227–2241, doi: 10.1175/2009JAMC2143.1.

Zeng Q L, Wang Y Q, Chen L F, et al. 2018. Inter-comparison and evaluation of remote sensing precipitation products over China from 2005 to 2013 [J]. Remote Sens., 10 (2): 168, doi: 10.3390/rs10020168.

张蒙, 黄安宁, 计晓龙, 等. 2016. 卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性分析 [J]. 高原气象, 35 (1): 34–42. Zhang M, Huang A N, Ji X L, et al. 2016. Validation of satellite precipitation products over Qinghai−Xizang Plateau region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35 (1): 34–42, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00152.

Zhang X X, Bi X Q, Kong X H. 2015. Observed diurnal cycle of summer precipitation over South Asia and East Asia based on CMORPH and TRMM satellite data [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 8 (4): 201–207, doi: 10.3878/AOSL20150010.

Zhao H G, Yang S T, You S C, et al. 2018. Comprehensive evaluation of two successive V3 and V4 IMERG final run precipitation products over Mainland China [J]. Remote Sens., 10 (1): 34, doi: 10.3390/rs10010034.