

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 6 - 749 - 08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000182

地基 GPS 反演泥石流流域局地降水水汽特征 ——以云南东川蒋家沟为例

王源程^{1,2,3} 苏鹏程^{2,3*} 陈聪⁴ 倪长健¹

(1. 成都信息工程学院 大气科学学院 四川 成都 610225; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041;
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041; 4. 四川省地震局 四川 成都 610041)

摘 要: 在暴雨型泥石流预警预报中,如何准确获取有效的降水信息是关键问题。基于蒋家沟流域内布设的地基 GPS 观测站和流域内 3 个雨量站点,对比分析大气可降水量(PWV)和站点实际降水,发现 PWV 变化趋势与降水的发生有较好的对应关系,降水一般发生在 PWV 的峰值处或滞后于峰值发生;根据 PWV 过程中的极小值将长序列 PWV 过程划分为数组短序列 PWV 过程,引入前期 PWV 和有效 PWV,通过有降水的前期累积 PWV 和有效累积 PWV 的散点函数拟合确定降水发生时的 PWV 临界线, PWV 临界线将为泥石流流域的降水预警提供依据,同时可证明地基 GPS 反演 PWV 对泥石流流域尺度下的降水预警具有重要价值,其反演得到的 PWV 不仅是降水预报中的重要因子, PWV 临界线的确定亦为降水的准确性和时效性提供参考。

关键词: 地基 GPS; 泥石流流域; 大气可降水量(PWV); 降水预警

中图分类号: P642.23; P426.615

文献标志码: A

暴雨型泥石流是山区分布和危害最广的泥石流。在四川攀(枝花)西(昌)地区,其灾害数量和造成的损失可以达到灾害总数的 90% 和 95% 以上^[1]。作为暴雨型泥石流预警预报中的关键因子,获取可靠的降水信息是提高预警预报准确率的前提条件之一。由于缺乏对中小尺度天气过程的物理机制的理解,对其“突发”、“转折”的关键时刻难以捕捉,目前对于降水信息的获取,尤其是泥石流流域局地强降水信息的获取是预警预报研究中的难点,而与泥石流流域尺度(绝大部分泥石流流域的面积都 < 10 km²^[2])相匹配的降水信息的获取仍存在困难。

降水的监测和预报分为四类,卫星监测多用于大区域降水分布监测^[3-6],但在短历时、小尺度的降

水监测上则具较大误差;雷达监测主要通过 Z-I 关系定量确定降水量^[7-9],能较好地反应区域降水的空间不均匀性,但因地区、季节和降水类型等不同而存有较大差异性,为降水的估测带来一定偏差。雷达站监测因自身信号的衰减和地形的阻挡作用增加了定量估测降水在小尺度区域的误差^[10-12];雨量站监测则一般作为降水真值使用,但受站点布设限制,难以满足小尺度监测需求。由于现有的探测手段仍难以满足小尺度过程的监测需要,这就使得关于小尺度的大气运动方程存在一定问题,造成数值预报在小尺度范围的准确率较低。

考虑大气中的水汽含量对于降水的发生和维持有着极好的指示意义^[13-14],将水汽值引入降水预报

收稿日期(Received date): 2014 - 02 - 08; 修回日期(Accepted): 2015 - 04 - 15。

基金项目(Foundation item): 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金; 中国科学院西部之光博士项目(Y4R2090090) [Open Foundation of Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process; the Doctor Project of Western Light, Chinese Academy of Sciences (Y4R2090090)]

作者简介(Biography): 王源程(1989 -),女,硕士研究生,主要从事气象防灾减灾研究 [Wang Yuancheng(1989 -), female, M. Sc. candidate, major in meteorological disaster prevention and mitigation] E-mail: wangyuancheng10@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 苏鹏程(1981 -),男,博士,主要从事山地灾害风险评估与预警预报方面的研究 [Su Pengcheng(1981 -), male, Ph. D. major in mountain hazards risk assessment and prediction] E-mail: supengcheng@imde.ac.cn

已成为提高其精度的技术手段之一。当前对于水汽的探测主要以无线电探空仪探测,卫星遥感和地基 GPS 信号反演为主。大量的研究已表明^[15-18],利用地基 GPS 反演水汽不仅能够获得测站上空的水汽发展情况,通过地基 GPS 观测网还能获得三维水汽时空分布特征;并且随着水汽应用于降水预报中,其精度有了一定程度的提高。

虽然地基 GPS 技术为水汽提供了高时空精度的监测数据,但在水汽与降水的关系探讨上,尤其是在定量关系上仍无准确定论,基于小流域的水汽-降水关系探讨更是近乎空白。正是在这一背景下,本文希望通过地基 GPS 数据反演大气可降水量(Precipitable Water Vapor, 亦称水汽,简称 *PWV*),寻找大气可降水量转化为实际降水的条件,结合已发生的泥石流案例,分析与诱发泥石流的降水过程相关的水汽信息,为激发泥石流等山地灾害形成的降水信息的获取,进而为寻找合理的雨量阈值提供依据。

1 研究区概况

选择云南省昆明市东川区蒋家沟流域作为研究区(图 1)。蒋家沟流域面积 48.6 km²,主沟长 13.9 km²,最高海拔 3 269 m,最低海拔 1 042 m。该流域季风气候显著,干湿季分明;雨季(5—10 月)降水量占全年降水量的 85% 以上;旱季(11 月至次年 4 月)降水量不足全年的 15%。同时雨季多暴雨,暴雨和降雨量约占年总降水量的一半以上,暴雨中心大多出现于流域内海拔 2 500~3 000 m 的地带。据统计,东川山区年降水量随海拔增加而增多,降水递增率在海拔较低处(2 300 m 以下)为 13.8 mm/(100 m),海拔较高处(2 300 m 以上)为 30.5 mm/(100 m),自下而上整个山区降水递增率为 22.1 mm/(100 m)^[19-20]。蒋家沟每年雨季发生泥石流 12~20 余次,每一次泥石流历时长达 3~4 h,甚至数十小时。蒋家沟泥石流类型齐全,过程完整,流态多样,是进行泥石流观测研究最理想的基地。

2 地基 GPS 反演 *PWV* 数据来源及分析

2.1 数据来源

地基 GPS 测站和自动气象站位于 103°08′E, 26°14′N, 本文涉及分析的 GPS 数据皆来源与此站实地测量。为更可靠地分析流域 *PWV* 和实际最终

降雨的关系,同时选取位于流域上游的李家垭口和王家垭口雨量站作为雨量数据来源(图 1)。

2.2 地基 GPS 反演 *PWV* 基本原理

GPS 卫星信号由于受到电离层和中性大气层的折射而造成信号的延迟,根据信号的延迟即可延迟计算 *PWV*^[21]。一般电离层延迟可忽略不计,因此只考虑中性大气层延迟亦称对流层延迟(Zenith Total Delay, 简称 *ZTD*); *ZTD* 分为静力学延迟(Zenith Hydrostatic Delay, 简称 *ZHD*)和湿延迟(Zenith Wet Delay, 简称 *ZWD*),即

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

此外 *ZWD* 与测站上空 *PWV* 有如下关系

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (2)$$

式中 Π 为转换因子,依赖于大气加权平均温度^[22]。

2.3 反演 *PWV* 步骤

研究所需地基 GPS 数据来自东川蒋家沟观测站的自建地基 GPS 观测仪器,采用 GAMIT 软件进行数据解译。

2.4 不同气象数据来源 *PWV* 对比

考虑到地基 GPS 仪器因不可抗因素(如掉电重启等)产生无法正常传输数据的情况,进一步引入地面经验公式求解 *PWV*,经验公式如下^[23]

$$PWV = \alpha_0 + \alpha_1 e \quad (3)$$

式中 *PWV*(cm); *e* 为水汽压(hPa); α_0 、 α_1 为与地理纬度和测站海拔有关的经验系数,经计算 $\alpha_0 = 0.0149$ 、 $\alpha_1 = 0.1869$ 。

据此,选取拥有完整的地基 GPS 数据和气象观测数据的 2013-08-01—10 共计 10 d 的数据进行解算,分别求解得到 *PWV*₁、*PWV*₂ 和 *PWV*₃(时间精度为 60 min,图 2);其中 *PWV*₁ 和 *PWV*₂ 由地基 GPS 数据反演求得(气象数据来源分别为 *PWV*₁ 由自动气象站提供, *PWV*₂ 由 GPT 模型提供), *PWV*₃ 由地面经验公式求得。

由图 2 可以看出, *PWV*₁ 和 *PWV*₂ 随时间其变化趋势基本保持一致,峰值处对应基本一致,二者只存 10 mm 的差值;同 *PWV*₁ 和 *PWV*₂ 相比, *PWV*₃ 波动复杂,峰值处虽有部分重合,但整体变化趋势并不吻合。通过三者对比,认为由地面经验公式求解得到的 *PWV* 与 GAMIT 求解的 *PWV* 存在显著差异,地面经验公式法难以准确计算 *PWV*,因此在 GPS 站数据缺测时,不将其作为数据补充使用;同时,由 *PWV*₁ 和 *PWV*₂ 对比可知,气象数据来源对于 *PWV* 的时间

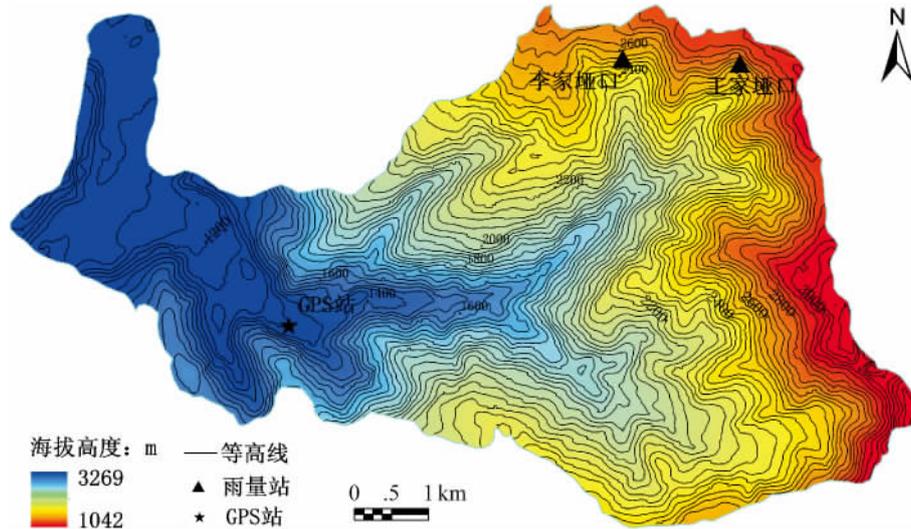


图 1 蒋家沟流域地形图

Fig.1 Topographic map of Jiangjia Gully

变化趋势并无较大影响,因此,在后续分析中直接引入 GPT 模型,即地基 GPS 反演 PWV 时,气象参数由 GPT 模型提供。

3 地基 GPS 反演激发泥石流的降水过程

根据中科院东川泥石流的实地观测记录,2013-08-25 蒋家沟北支沟门前沟暴发了泥石流,但泥石流并未冲出到流域下游;据此,选取 8 月 1—26 日的地基 GPS 数据进行 PWV 解算(注:8 月 11—15 日地基 GPS 数据缺失),并与实际降水进行对比分析。其中,降水数据分别来自地基 GPS 测站旁的自动气象站、李家埡口测站和王家埡口测站 3 站。共解算 3 组 PWV 数据,时间精度分别为 60 min、30 min 和

10 min。

3.1 PWV 与降水对比

将 PWV 与对应时刻降水进行对比(时间精度为 60 min,图 3),由图 3 可以看出, PWV 在 8 月 1—26 日间呈现出一定的周期起伏,降水基本与 PWV 峰值相对应;8 月 21 日后, PWV 出现了一次较明显的下降过程,且于当晚 21 时降至连日来的最小值(19.35 mm);此后, PWV 一直在 22 mm 附近波动;自 8 月 24 日 0 时至 8 月 25 日 4 时, PWV 开始持续的增加,平均增量达到 0.79 mm/h,并于 24 日 23 时开始出现持续降水;25 日 4 时 PWV 达到了自 8 月 1 日来的最大值(46.91 mm),此后, PWV 在 45 mm 左右高值区波动,并直至 25 日 23 时降低至 35 mm 左右。紧随其后,测站和门前沟上游的李家埡口和王家埡口站

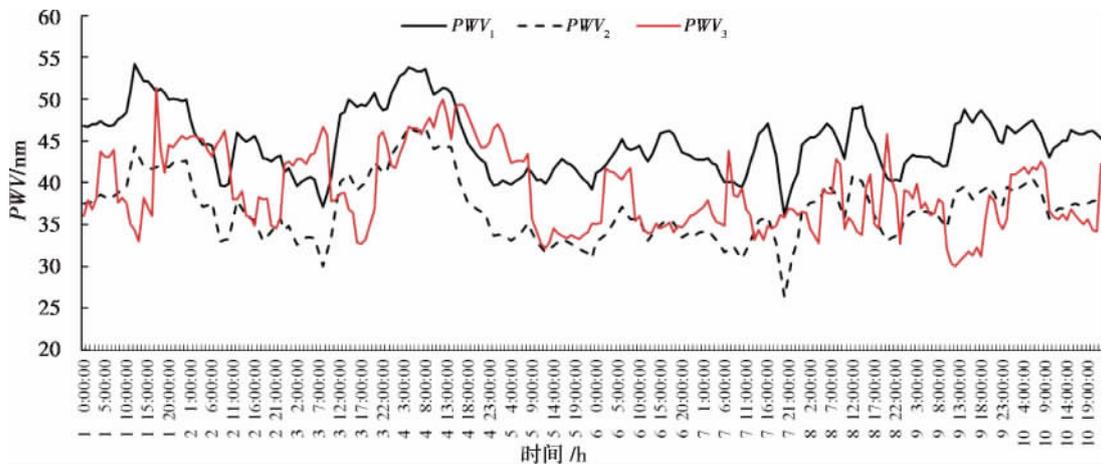


图 2 2013-08-01—10 蒋家沟大气可降水量对比

Fig.2 Plot of PWV in Jiangjia Gully (1-10 August 2013)

分别出现了自8月1日以来最大的一次降水过程(也正是这次降水于26日凌晨0时激发了泥石流);其中,李家垭口测站和王家垭口测站同时监测到了自8月1日以来60 min最大的降水值,分别为12.5 mm/h和10.6 mm/h;最后,随着持续性降水的结束,PWV在26日14时降至30 mm附近。

通过分析可以看出,PWV在无降水发生时,其值在35 mm附近振荡;>1 mm的降水多发生在>37 mm时。同时,3站实际降水间均与PWV的波峰相对应,在李家垭口测站和王家垭口测站缺乏相应PWV的情况下,可参考地基GPS测站的PWV值。

3.2 短序列PWV过程分析

为进一步探讨8月1—26日间PWV与实际降水的关系,引入短序列PWV、前期PWV和有效PWV展开讨论。

3.2.1 短序列PWV

设 P_t 为 t 时刻对应下的PWV,则对应前一时刻为 P_{t-1} ,后一时刻为 P_{t+1} ;当 P_t 同时满足 $P_t < P_{t-1}$ 和 $P_t < P_{t+1}$ 时,记为 P_N ,为长序列PWV过程中的一个节点;根据 P_N 将长序列PWV过程划分为若干短序列过程,并结合实际降水,将短序列PWV过程划分为有降水发生和无降水发生两类。

据此,将8月1—26日长序列PWV过程(时间精度为10 min)划分为47组短序列PWV过程,结合3站降水,将47组分为下述3类(图4a):1.为测站有降水,流域上游(王家垭口、李家垭口有降水,下同)有降水,共计12组;2.为测站无降水,流域上游降水,共计11组;3.为测站无降水,流域上游无降水,共计24组。由图可知,3类短序列PWV过程存

在较明显的分界线,一类过程值偏高(30~45 mm),二类次之(30~40 mm),3类较低且跨度大(20~40 mm)。据此,将上述3类短序列PWV过程分别求其平均值(图4b),发现当短序列PWV过程大于35 mm时,蒋家沟流域内发生降水的概率增大,小于35 mm时,流域内基本无降水发生。

3.2.2 前期PWV和有效PWV

在激发泥石流的降水过程中,依据降水对泥石流发生的贡献,将降水过程划分为前期降水和有效降水两个部分^[24-25];参考降水过程的划分方法,引入“前期”和“有效”两个概念,将短序列PWV过程划分为前期PWV(P_{pre})和有效PWV(P_{eff}),进一步探寻PWV-降水间的关系。

1. 有降水短序列PWV过程

短序列PWV过程内,记降水发生初始时刻PWV为 P_{R0} ,终止时刻PWV为 P_{Re} ;记 P_{R0} 时刻前的PWV为 P_{pre} ;进一步得到前期累积PWV(S_{pre})为

$$S_{pre} = \sum P_{pre} \quad (4)$$

同时, P_{eff} 为降水开始(P_{R0})至终止时间(P_{Re})内所有PWV值(图5a);进一步得到有效累积PWV(S_{eff})为

$$S_{eff} = \sum P_{eff} \quad (5)$$

2. 无降水短序列PWV过程

参考有降水短序列PWV过程,假设 t_0 为过程中降水发生初始时刻,记为 P_{t0} ;则 P'_{pre} 为 t_0 时刻前所有PWV值;进一步得到前期累积PWV(S'_{pre})

$$S'_{pre} = \sum P'_{pre} \quad (6)$$

同时, P'_{eff} 为过程内所有大于等于 P_{t0} 的PWV值(图5b);进一步得到有效累积PWV(S'_{eff})

$$S'_{eff} = \sum P'_{eff} \quad (7)$$

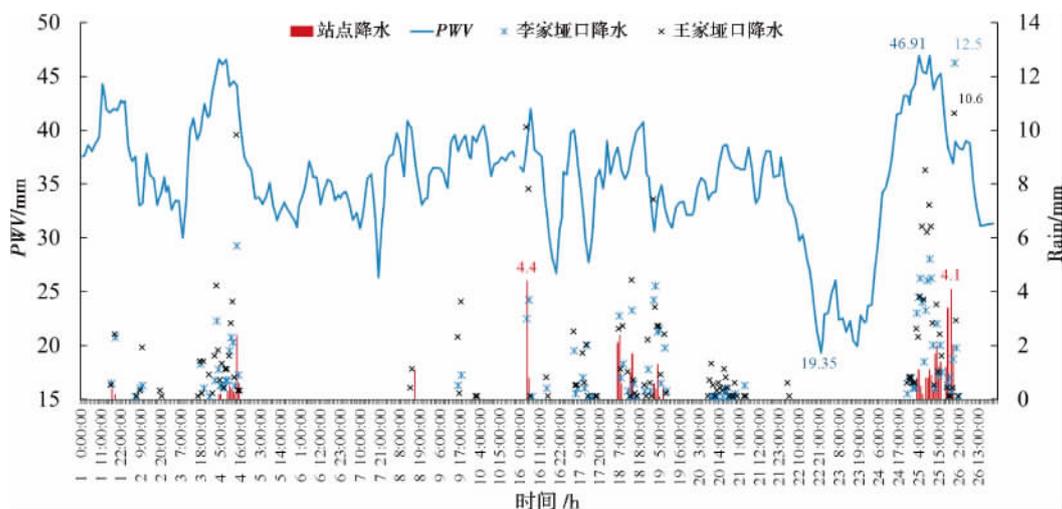
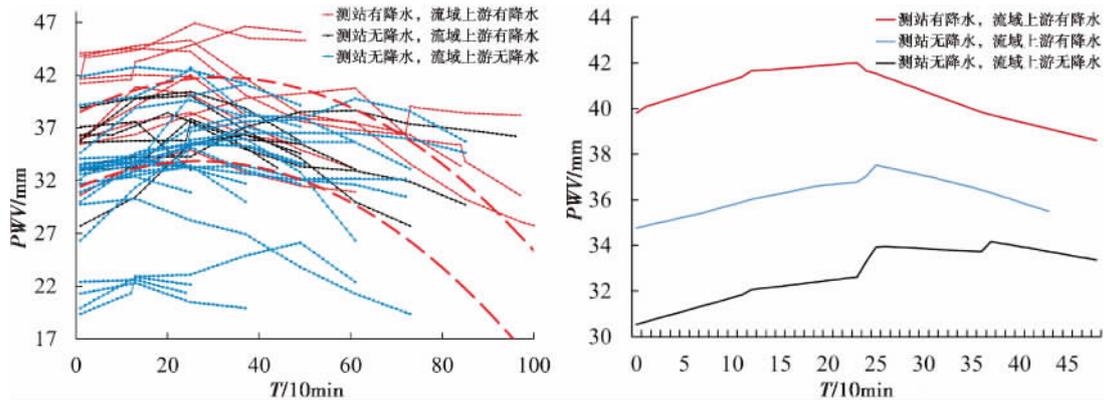


图3 2013-08-01—26PWV与降水(3站)对比

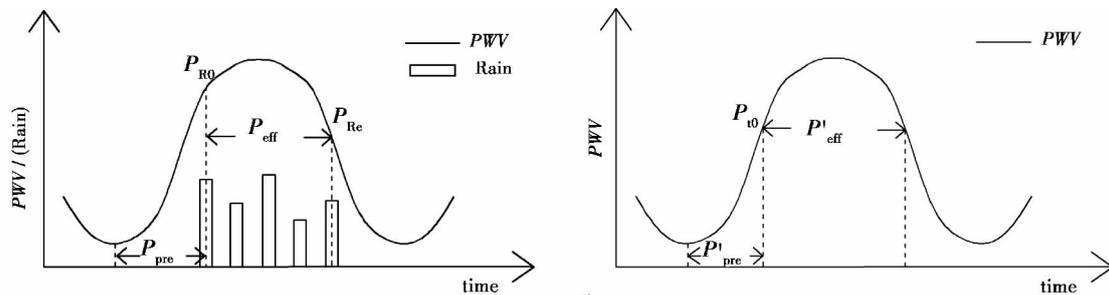
Fig. 3 The contrast of PWV with rain (3 stations) in Jiangjia Gully (1-26 August 2013)



a. The dividing of PWV short sequences
b. The average of PWV short sequences

图 4 短序列 PWV 过程(2013-08-01-26)

Fig. 4 The PWV short sequences(1-26 August 2013)



a. The previous PWV and the effective PWV (with precipitation)
b. The previous PWV and the effective PWV (without precipitation)

图 5 短序列 PWV 过程的前期 PWV 和有效 PWV

Fig. 5 The previous PWV and the effective PWV of short PWV sequences

3. PWV 临界线

不同地区不同时间尺度下的 PWV 分析均表明了 PWV 的变化趋势与实际降水在时间上有着较好的对应关系,且 PWV 在降水的预报中有着较好的指示作用^[17-18, 26-27]。据此,进一步探讨 PWV 对于降水的指示作用,对上文中降水的 S_{pre} 和 S_{eff} 进行函数拟合,发现二者间存在幂函数规律,即满足 $S_{pre} = k \cdot S_{eff}^n$, 并由此得到全流域有降水的 S_{pre} 和 S_{eff} 的散点拟合曲线(时间精度分别为 60 min、30 min、10 min,图 6)。60 min、30 min 和 10 min 的拟合优度分别为 0.618 0、0.666 7 和 0.708 6,函数的拟合效果随着时间精度的提高而提高。以拟合曲线作为 PWV 临界线,由图 6 可知,无降水发生时的散点多位于 PWV 临界线下方。通过 PWV 临界线的确定,即可由 S_{pre} 获得对应的 S_{eff} ,进而估算降水持续时间。另一方面,在已知 S_{pre} 情况下,可通过 PWV 的临界线确定有降水发生的最小 S_{eff} ,将其与实际有效 PWV 对比,即可为蒋家

沟流域降水的预警提供参考。

4. 降水预警

根据 PWV 临界线,通过计算前期累积 PWV 和有效累积 PWV 判断降水的有无。降水预警具体步骤如下:首先,确定预警时刻并完成该时刻前的地基 GPS 数据解算获取 PWV 过程;其次,确定 PWV 过程中预警时刻前 2 个 PWV 节点 P_{N1} 和 P_{N2} (图 7);然后以 P_{N1} 和 P_{N2} 之间的 PWV 累加为 S_{pre} ,预警时刻与 P_{N2} 之前的 PWV 累加为 S_{eff} ;最后,根据该点与 PWV 临界线间的关系,若该点位于 PWV 临界线上方,则判断有降水发生,发出预警,若该点位于 PWV 临界线下方,则判断无降水发生。在此,以 2013-08-27 T17:00 为预警时刻进行降水预警(PWV 时间精度为 10 min),经计算该时刻下的 S_{pre} 为 2 231.42 mm, S_{eff} 为 530.26 mm,该点位于 PWV 临界线下方,判断无降水发生,观测数据证明蒋家沟流域 2013-08-27 T17:00 之后的数小时内确实无降水发生。

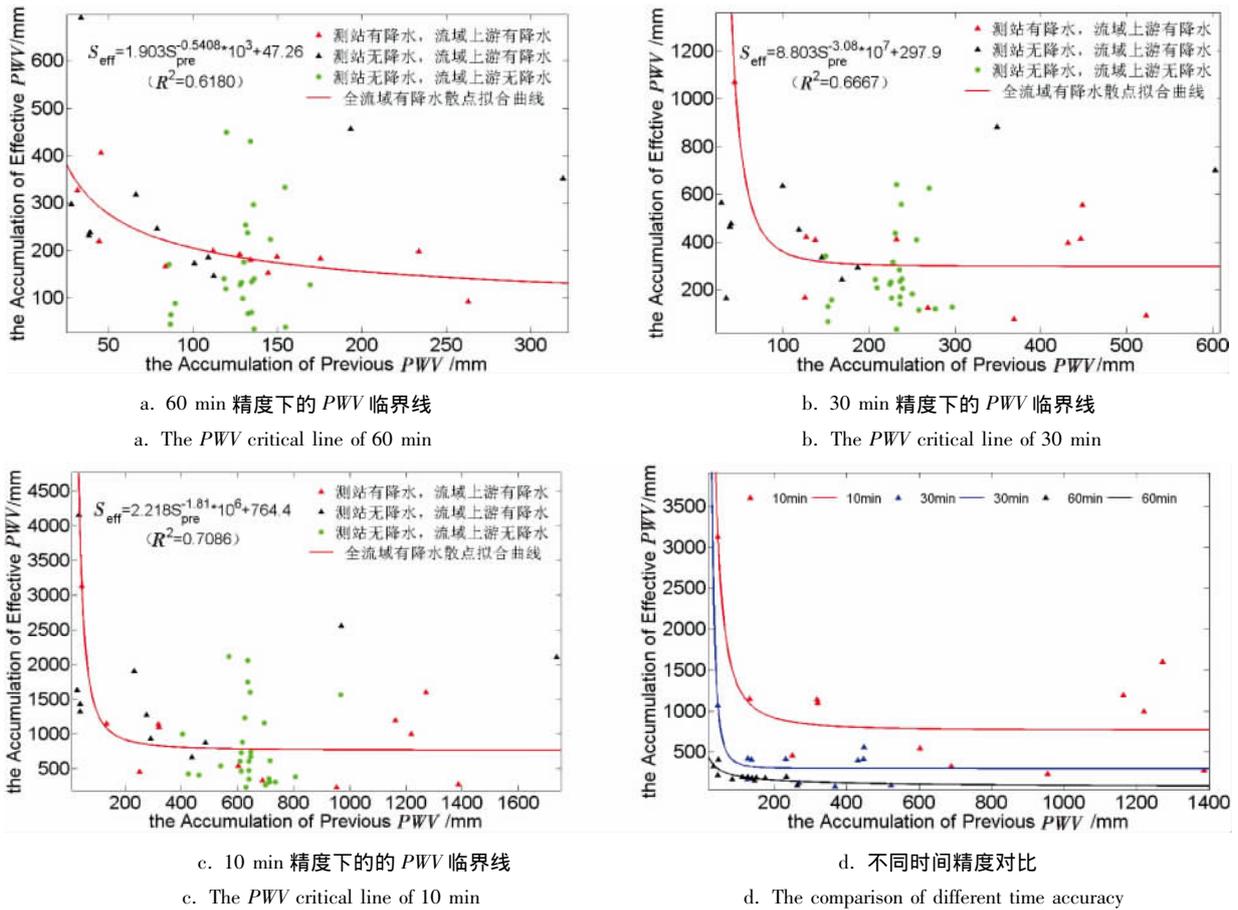


图 6 PWV 临界线(60 min、30 min、10 min)

Fig. 6 The PWV critical line(60 min ,30 min ,10 min)

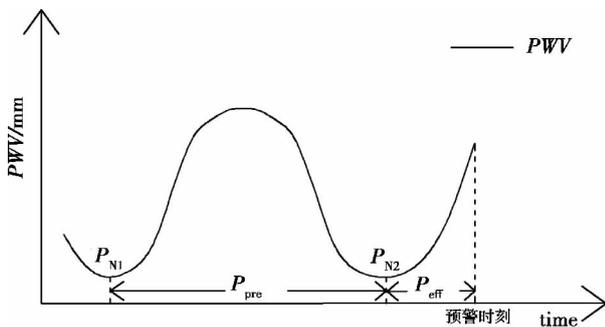


图 7 预警中的前期 PWV 和有效 PWV

Fig. 7 The previous PWV and the effective PWV of warning time

4 总结与讨论

对于暴雨型泥石流预警来说,如何获取准确、有效的降水数据是预警预报中的关键问题和难点。受山区地形影响和监测条件限制,常用的监测手段在获取山区局地降水的空间分布、降水过程和发展趋势信息中具有一定的局限性,并且难以对降水发生和变化趋势进行预警。本文通过在蒋家沟流域布设

地基 GPS 测站,结合流域内多个雨量站点的降水数据,对比分析表明地基 GPS 反演 PWV 在分析泥石流流域局地降水的变化和发展趋势中具有重要的参考价值。

1. 蒋家沟流域内,单点的 PWV 与流域内不同位置的雨量站监测数据均有着较好的一致性,即在泥石流流域尺度下,若流域内仅有布设单个地基 GPS 站点,可用单点 PWV 作为流域内水汽参考。

2. 对比短序列 PWV 与实际降水过程发现,短序列 PWV 过程可以分为 3 个区间,有降水发生的 PWV 过程区间最高,表明了降水的发生对应 PWV 高值区;同时,由于实际降水的发生相对于 PWV 过程具有数小时的延迟,又为降水以及泥石流灾害预警提供了重要的指示信息。

3. 进一步引入前期 PWV 和有效 PWV 两个概念,发现当有降水发生时,前期累积 PWV 和有效累积 PWV 二者在 60 min、30 min 和 10 min 三个时间尺度上均满足幂函数规律,据此得到 PWV 临界线;该临界线的确定为山区激发泥石流等灾害的局地降

水的前期预警提供了重要依据。

本文利用中科院东川泥石流观测站的基础条件开展了PWV转化为有效降水过程以及转化条件的初步分析并确定了PWV临界线的存在,为分析山区激发泥石流等灾害的降水的有无开展了探索研究,但对PWV能否定量确定降水、如何定量预测降水仍无明确定论,因此如何确定PWV-降水的定量关系并用于泥石流预警中,仍需要进一步的研究和探讨。

致谢:感谢四川省地震局顾铁工程师、徐锐副研究员在GAMIT软件解译过程中提供的帮助,感谢中科院东川泥石流观测站提供的试验场地和降水数据。

参考文献(Reference)

- [1] 谭万沛,王成华,姚令侃等.暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报——以攀西地区为例[M].成都:四川科学技术出版社,1994:149-183 [Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan. Prediction and forecast of precipitation debris flow and landslide—take West Sichuan as a case study [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994: 149-183]
- [2] 李泳,刘晶晶,陈晓清,等.泥石流流域的概率分布[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(6):36-40 [Li Yong, Liu Jingjing, Chen Xiaoping, et al. Probability distribution of debris flow valleys [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2007, 39(6): 36-40]
- [3] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1375-1386 [Ji Tao, Yang Hua, Liu Rui, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region [J]. Geographical Science Progress, 2014, 33(10): 1375-1386]
- [4] 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等.多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 343-348 [Liu Junfeng, Chen Shengren, Han Chuntan, et al. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover product [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 343-348]
- [5] 白爱娟,方建刚,张科翔. TRMM 卫星资料对陕西周边地区夏季降水的探测[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 41-45 [Bai Aijuan, Fang Jianguang, Zhang Kexiang. Summer rainfall in Shanxi and its neighborhood regions observed by TRMM satellite [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(2): 41-45]
- [6] Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D., et al. The TRMM multi-satellite precipitation analysis Quasi-Global, Multi-Year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale [J]. Journal of Hydro Meteorology, 2007, 8(1): 38-55
- [7] 刘晓阳,杨洪平,李建通,等.新一代天气雷达定量降水估测集成系统[J]. 气象, 2010, 36(4): 90-95 [Liu Xiaoyang, Yang Hongping, Li Jiantong, et al. CINRAD radar quantitative precipitation estimation group system [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(4): 90-95]
- [8] 李柏,古庆同,李瑞义,等.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析[及未来发展][J]. 气象, 2013, 39(3): 265-280 [Li Bai, Gu Qingtong, Li Ruiyi, et al. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(3): 265-280]
- [9] 高晓荣,梁建茵,李春晖. 雷达定量降水估计技术及效果评估[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 77-88 [Gao Xiaorong, Liang Jianyin, Li Chunhui. Radar quantitative precipitation estimation techniques and effect evaluation [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(1): 77-88]
- [10] 迟竹萍,刘欣,陈金敏. 春秋层状云降水过程 Z-I 关系计算与讨论. 气象, 2000, 26(1): 35-37 [Chi Zhuping, Liu Xin, Chen Jinmin. Calculation and analysis of Z-I relation among precipitation processes caused by sheet cloud in Spring and Autumn [J]. Meteorology, 2000, 26(1): 35-37]
- [11] 殷秀良,孙成志,袁群哲,等. 雨区衰减对双线偏振雷达测雨的影响研究. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 402-407 [Yin Xiuliang, Sun Chengzhi, Yuan Qunzhe, et al. Study on rain-in-clude attenuation effect on rainfall estimation using dual linear polarization radar [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(3): 402-407]
- [12] 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 251-261 [Hu Zhiqun, Liu Liping, Chu Rongzhong, et al. Comparison of different attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using X-band dual linear polarimetric radar. Acta Meteorologica Sinica, 66(2): 251-261]
- [13] 丁一汇,胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 129-145 [Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(2): 129-145]
- [14] 李英,陈联寿,徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 91-98 [Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(1): 91-98]
- [15] 毕研盟,毛节泰,李成才,等. 利用 GPS 的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1169-1176 [Bi Yanmeng, Mao Jietai, Li Chengcai, et al. Spatial distribution of water vapor observed with GPS along slant path in a storm system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1169-1176]
- [16] 宾振,吴瑶,邱璐,等. 江西地基 GPS 遥感大气可降水量变化特征及精度[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1503-1 [Bin Zhen, Wu Yao, Qiu Lu, et al. Variation characteristic and accuracy of precipitable water vapor from ground-based GPS remote sensing in Jiangxi [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 1503-1509]
- [17] 程航,程相坤,朱晶,等. GPS 遥感大气可降水量在大连地区 3 次降水过程中的应用[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(5): 38-48 [Cheng Hang, Cheng Xiangkun, Zhu Jing, et al. Application of precipitable water vapor from ground based GPS to three precipitation processes in Dalian Region [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 30(5): 38-48]

- [18] 罗梦森, 曾明剑, 景元书, 等. GPS 反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系研究[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 418 - 423 [Luo Mengsen, Zeng Mingjian, Jing Yuanshu, et al. Change characteristics of GPS PWV and its relationship with precipitation [J]. Journal of Meteorological Sciences, 2013, 33(4): 418 - 423]
- [19] 杜榕恒, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 31 - 84 [Du Rongheng, Kang Zhicheng, Chen Xunqiang et al. Xiaojiang debris flow comprehensive investigation and prevention planning study [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Publishing House, Chongqing Branch. 1987: 31 - 84]
- [20] 张军, 熊刚. 云南蒋家沟泥石流运动观测资料集[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [Zhang Jun, Xiong Gang. Debris flow observational data sets in Jiangjia Gully Yunnan [M]. Beijing: Science Press, 1998.]
- [21] Bevis M, B U singer S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 15787 - 15801
- [22] 李国平, 等. 地基 GPS 气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 97 - 129 [Li Guoping, et al. Ground-based GPS meteorology [M]. Beijing: Science Press, 2010: 97 - 129]
- [23] 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 9 - 21 [Yang Jingmei, Qiu Jinheng. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(1): 9 - 21]
- [24] Sepulveda S A, Rebolledo S, Vargas G. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response [J]. Quaternary International, 2006, 158(1): 83 - 95
- [25] 苏鹏程, 刘希林, 郭洁. 四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 19 - 23 [Su Pengcheng, Liu Xilin, Guo Jie. Primary analysis of relationship between debris flows and rainfalls in Sichuan Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 19 - 23]
- [26] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 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, 2005, 16(1): 54 - 59 [Cao Yunchang, Fang Zongyi, Xia Qing. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(1): 54 - 59]
- [27] 郭洁, 李国平. 川渝地区大气可降水量的气候特征以及与地面水汽量的关系[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 344 - 350 [Guo Jie, Li Guoping. Climatic characteristics of precipitable water vapor and relations to surface water vapor column in Sichuan and Chongqing Region [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 344 - 350]

Precipitable Water Vapor in the Debris-Flow Watershed Inversed by Ground-based GPS

—A Case Study of the Jiangjia Valley in Yunnan Province

WANG Yuancheng^{1 2 3}, SU Pengcheng^{2 3}, CHEN Cong⁴, NI Changjian¹

(1. School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. Inst. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;

4. Sichuan Earthquake Administration, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Accurate and effective precipitation information is crucial for forecast of rainstorm debris-flow. The value of the water vapor, which has indicative significance for the occurrence and continual of the precipitation, has become the key factor of rainfall prediction. This study was aimed to interpret the process of Precipitable Water Vapor (*PWV*) being translated into the observed precipitation and analyze the characteristic of *PWV* when the precipitation trigger debris-flow. Based on the data from ground-based GPS station and three rainfall stations in the Jiangjia valley, a relationship between the trend of *PWV* and the occurrence of precipitation was found. Precipitation always occurred in or after the peak of *PWV* curve. The long *PWV* curve was divided into several short *PWV* curves by the minimum value of *PWV*. Then the preliminary *PWV* and effective *PWV* were defined. The critical *PWV* line was determined by fitting function of the preliminary *PWV* and effective *PWV*, which made a contribution to precipitation forecast. It was proved that the *PWV* inversed by ground-based GPS is of great significance to forecast of precipitation in the debris-flow watershed.

Key words: the Ground - Based GPS; debris-flow watershed; Precipitable Water Vapor (*PWV*); Precipitation forecast