

台风强降雨诱发地质灾害的雨量特征分析

徐 晶¹ 李伟华²

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国气象局公共气象服务中心)

提 要: 台风的特大暴雨可以引发山体滑坡和泥石流等地质灾害,造成严重的人员伤亡。高分辨率资料的应用是地质灾害精细化预报的基础。选定频繁遭受台风袭击,同时受地质灾害影响严重的浙江乐清市作为研究区域,利用雷达联合雨量计估计降雨技术,以0414台风云娜、0505台风海棠和0509台风麦莎导致的群发性地质灾害为例,研究雷达估计降雨在监测地质灾害方面的适用性以及台风降雨和地质灾害发生之间的关系。结果表明,雷达估测降雨较好地反映地质灾害触发雨量特征。台风诱发地质灾害需要的持续时间短,有效雨量更小,临界雨强大。

关键词: 台风 地质灾害 雷达估计降雨 临界雨强

Characteristics of Rainfall for Typhoon Rainstorm Induced Geological Hazards

Xu Jing¹ Li Weihua²

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. CMA Public Weather Service Center)

Abstract: Typhoon rainstorm can induce geological hazards such as landslides and debris flows and cause serious casualties consequently. High-resolution data are essential for high-resolution geological hazard prediction. Yueqing in Zhejiang Province is selected as the studied area, which is frequently attacked by typhoons and is seriously influenced by geological hazards. Geological hazards induced by typhoon No. 0414, No. 0505 and No. 0509 are taken as samples. Applicability of radar rainfall estimation is assessed for the studied area. Relations between typhoon rainstorms and geological hazard occurrences are carefully studied by use of radar-raingauge rainfall estimation. The results show that the radar rainfall estimation can reflect the characteristics of triggering rainfall of geological hazards in great details. Typhoon induced geological hazards need shorter rainfall duration, smaller effective rainfall, but higher critical rainfall intensity.

Key Words: typhoon geological hazards radar rainfall estimation critical rainfall intensity

项目资助: 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200706037)资助

收稿日期: 2008年9月9日; 修定稿日期: 2009年4月3日

引 言

对于地质状况脆弱地区,台风特大暴雨极易引发山体滑坡、泥石流和崩塌等地质灾害,造成严重财产损失和人员伤亡。如 2005 年 9 月 1—3 日,0513 台风泰莉(Tali)在我国台湾和福建登陆后向内陆移动的过程中,在江西庐山和安徽大别山等地区发生了当地有气象记录以来的最大暴雨,日降雨量达到 940mm,造成 3000 多处泥石流、滑坡灾害;2004 年 0414 强台风云娜(Rananim)因地质灾害仅在浙江就造成 44 人死亡,1996 年 7 月 31 日—8 月 1 日,台风 Herb 在台湾触发滑坡 1315 处、泥石流 20 多处,致使 73 人死亡、463 人受伤,财产损失达 10 亿美元^[1]。

台风诱发地质灾害主要表现为台风活动期间,由于伴随着狂风暴雨,山体地表径流与土壤渗水量同时增加,导致地下水位和土壤含水量增加,同时孔隙水压力增加。当孔隙水压力超过临界值时滑坡失稳^[2]。与持续性降雨诱发地质灾害的条件相比,台风诱发的地质灾害往往需要相对较小的前期有效雨量和较大的临界雨强。已有的工作^[3-5]通过分析全年主要天气影响系统,将浙江东南部的庆元和永嘉定为台风影响区,将中西部淳安和磐安作为非台风影响区。对两个区域内地质灾害降雨触发条件统计分析表明,台风区诱发地质灾害的降雨持续时间要远小于非台风区,台风区的地质灾害与灾害发生前 4 天的累计雨量有关,而非台风区的地质灾害与 5 天累计雨量有关。对非台风区有效雨量的衰减系数为 0.8,而台风区则只有 0.7。

台风和非台风诱发地质灾害中,地质灾害滞后最大雨强的时间也不同。对台湾 5 个台风期间不同地质条件下地质灾害发生时间与峰值雨强的滞后关系研究表明^[6],大多数泥石流发生在降雨过程中小时最大雨量(峰

值雨强)之前、当时或滞后 1 小时左右。

暴雨泥石流和滑坡的发生可直接从触发降雨过程的特征(雨型、降雨总量和强度等)中寻找规律^[7-10]。因此,尽可能准确地获得灾情点上的雨量数据对于分析诱发地质灾害的雨量特征至关重要。以往的研究多采用就近的雨量站点观测来代替灾害点的雨量^[11],或者通过绘制雨量等值线的方法来得到灾害点的雨量^[2]。但是这些方法往往会低估无雨量观测的地质灾害点的雨量,特别是低估山区受地形影响严重的局地强降雨。近年来随着雷达等非常规资料的应用研究不断推进,利用雷达估计降水量确定缺乏雨量观测的区域的降雨监测提供了较好的解决方案,大大弥补了山区强降雨观测的不足。

诱发地质灾害的降雨特征主要包括诱发地质灾害的降雨强度、降雨持续时间、降雨类型和有效雨量等。这里选定频繁遭受台风袭击,同时受地质灾害影响严重的浙江乐清市作为研究区域,利用雷达联合雨量计估计降雨技术,以 0414 台风云娜、0505 台风海棠和 0509 台风麦莎导致的群发性地质灾害为例,研究雷达估计降雨在监测地质灾害方面的适用性以及台风降雨和地质灾害发生之间的关系。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

浙江省乐清市行政隶属温州市,地理坐标为:27°57'34"~28°32'26"N,120°47'05"~121°15'19"E。地形属浙南低山区和沿海丘陵平原区。地势西高东低,境内最高峰为雁荡山主峰百岗尖,海拔 1056.6m。浙东南地质构造以强烈的断块活动为主,断裂十分发育。地层岩性从大类上来分主要有沉积层、侵入岩和脉岩,大部分地区被侏罗纪-早白垩世的中酸性火山岩所覆盖,并且受区域

构造应力、岩性等的影响,火山岩的内部断层和节理比较发育。部分地带受到多组节理的切割,岩层被切割支离破碎,历年来滑坡灾害经常发生,是地质灾害的多发区和重灾区。

研究区域频繁受台风影响,从 1950—2005 年每年影响该区域的台风有 0~3 个不等,登陆台风年均 0.5 个。台风期的暴雨是诱发研究区域地质灾害的主要因素。

1.2 影响研究区的三个台风及诱发地质灾害基本情况

主要选择记录较为完整的 0414 强台风云娜、0505 台风海棠和 0509 台风麦莎期间强降雨诱发的地质灾害(图 1)进行研究。

表 1 给出了三个台风的登陆时间、地带和强度以及地质灾害状况(灾害相关数据由浙江省温州市地质调查局提供)。三个台风中“云娜”、“麦莎”登陆时都达到强台风,台风强风雨诱发群发性地质灾害造成了大量人员伤亡。其中,台风云娜最大过程雨量达到

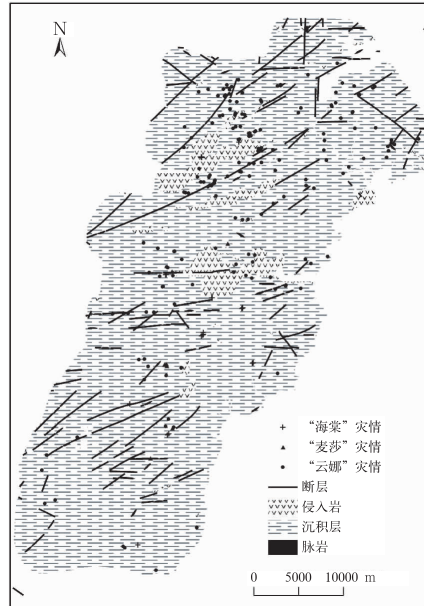


图 1 乐清地貌状况和台风云娜、麦莎、海棠造成的地质灾害分布

786mm,有记录的地质灾害达到 102 处,总共造成 44 人死亡。

表 1 2004—2005 年主要影响乐清市的台风诱发地质灾害伤亡状况

台风名称	登陆时间	登陆地点	登陆强度	过程最大雨量(水文站,mm)	发生地灾	总死亡失踪人数(人)
云娜(0414)	2004 年 8 月 12 日 20 时	浙江温岭市 石塘镇	中心气压 950hPa, 中心风力 $45\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	786	102	44
麦莎(0509)	2005 年 8 月 6 日 03:40	浙江台州市 玉环县干江	中心气压 950hPa, 中心风力 $45\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	577	22	5
海棠(0505)	2005 年 7 月 19 日 17:10	福建连 江黄歧	中心气压 975hPa, 中心风力 $33\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	671	8	2

2 雷达联合雨量计估测台风降雨

利用雷达联合雨量计估测降雨,主要是利用地面降雨观测能够提供较为准确的点雨量,而雷达观测能反映降雨空间分布的特点,运用客观分析方法得到高时空分辨率的降雨场。研究表明,利用新一代多普勒天气雷达可以有效地反演得到台风强风雨的精细分布特征和演变规律,对于台风性质的判断、短时

预警和决策服务会起到积极的重要作用^[12-14]。

2.1 资料和样本采集

所采用的云娜(0414)、海棠(0505)、麦莎(0509)台风登陆期间雷达基数据来自浙江温州新一代雷达 CINRAD-SA,其探测距离 230km,分辨率为 1km。试验区内共有雨量计 375 个,台风路径见图 2 所示。三个台风期间,地质灾害总样本数为 137 个。

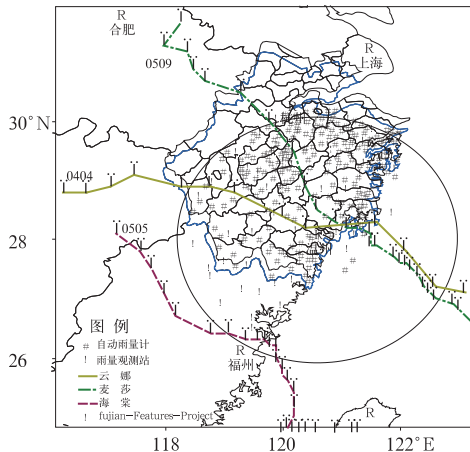


图 2 温州雷达覆盖范围图和三个台风路径
(黑色圆圈为温州雷达覆盖范围)

2.2 台风诱发地质灾害的过程雨量分析

直接利用雷达通过 $Z-R$ 关系确定的降雨强度受到雷达参数、 $Z-R$ 关系的不稳定以及暴雨时的衰减增大等影响,往往造成估测降雨误差较大,因此需要利用雨量计实时校准雷达估测降雨。现在主要采用的方法有 $Z-R$ 关系法、平均校准法、卡尔曼滤波法、最优插值法、变分校正法、平均法和最大集成法^[15]。分别采用以上 7 种方法求得雷达覆盖区域内逐小时雨量估计值,并对各种方法进行均方根误差检验发现,其中,变分校准法是各种方法中均方根误差最小的一种办法。变分校准法考虑了降雨的时空变化,从极值的观点使实际订正量与理论量更加接近一致。由于降雨是随机变化的,非均匀的,校准量是时空的函数,变分校准法充分考虑了降雨的这种特点,从时空意义上对雷达观测值进行校正,从而得到比较精确的结果。

雷达-雨量计估测降雨给出了三个台风登陆后在乐清地区过程雨量的精细分布。台风云娜的强降雨主要分布在乐清的西北部,最大雨量超过 500mm。乐清的雨量观测站(58656)位于乐清南部,过程累计雨量记录只有 357.9mm,此次台风地质灾害点多,主要集中在乐清中北部,位于累计降雨 400mm

以上的区域内。

台风海棠在乐清的强降雨主要集中在中部地区,累计雨量较台风云娜大,四都乡一带累计降雨超过 1000mm,降雨最大处雨量超过 1500mm,观测站监测雨量 608mm,由于此区域地势平坦,位势高差明显小于北部地区,此次台风过程造成的地质灾害数量明显少于台风云娜。

台风麦莎的累计雨量和台风云娜相当,整个区域累计雨量在 350~550mm 之间。由于前两次台风强降雨下造成的地质灾害较多,研究区很多不稳定的斜坡和沟谷在爆发后已经基本稳定,因此,“麦莎”引发的地质灾害较少,主要分布在乐成镇湖上岙、雁湖乡西厝村等地方。

3 研究区域诱发地质灾害降雨特点分析

诱发地质灾害的降雨特征主要包括诱发地质灾害的降雨强度、降雨持续时间、降雨类型和有效雨量等,根据不同的地质环境要素特征、地质灾害的规模,降雨要素阈值也不同。许多降雨参数以及这些参数之间的关系能反映地质灾害触发时的降雨特征^[6,16-20]。

3.1 前期降雨条件

对一般滑坡而言,前期降雨通过影响地下水水位和土壤含水量来影响斜坡稳定性。在台风活动期间的强降雨作用下,山体地表径流与土壤渗水量同时增加,从而引发山体滑坡和泥石流。与一般降雨型滑坡相比,由于暴雨的强力冲刷,台风往往导致小型的浅层滑坡,与其他降水诱发滑坡机制不同,需要重新考虑^[21]。

从“云娜”、“麦莎”和“海棠”三个台风期间,乐清雨量站(58656)的前期逐日降雨监测来看,三次台风的强降雨都集中在 1 天的时间内,过程前期 15 天并无明显降雨。即三次台风造成的地质灾害完全是由台风强降雨直接诱发。

3.2 地质灾害发生的滞后性

地质灾害的触发时间往往同时或略滞后于小时最大雨量(峰值雨强)。对由三个台风强降雨诱发的有精确发生时间记载的地质灾害与最大降雨强度、触发雨量,滞后时间、降雨持时以及触发地质灾害时的累计降雨量的分析表明,“云娜”、“麦莎”和“海棠”台风诱发地质灾害 80%以上都滞后峰值雨量 1~3h。龙西乡上山村、仙人坦村的泥石流发生在最大雨强出现的时候。另外,滞后时间的长短还和地质灾害的规模有关,滞后时间越长,引发的地质灾害规模越大。台风诱发滑坡泥石流都发生在降雨持续时间在 32~46h 之间,主要降雨累计时间 32~35h,累计降雨量在 450mm 左右,触发小时雨量基本在 9~14mm 之间,最大雨强在基本在 32~53 mm·h⁻¹之间。

3.3 台风降雨诱发地质灾害雨量阈值分析

雨量阈值一般选用临界降雨强度,前期降雨和降雨的持续时间,这些条件因为地区的不同而差异很大,往往与土壤参数和厚度等有很大关系^[18]。而对于频繁受热带系统影响的地区,前期降雨并不是主要因子^[21]。这里主要分析累计雨量、降雨持续时间、平均雨强、最大雨强和临界雨强。累计雨量是指从降雨时刻起到地质灾害发生时的雨量;降雨持续时间是指从降雨开始到灾害发生时的时间;平均雨强是指累计雨量除以降雨持续时间;最大雨强是指在地质灾害发生前的最大小时雨量。而临界雨强使用地质灾害发生前的小时降雨强度。

(1) 地质灾害频数与降雨的关系

图 3a 给出了三个台风期间,乐清地区地质灾害个数与累计雨量之间的关系,可以看出随着台风累计雨量增加,灾害个数增加。在总样本 107 个中,有 98 个出现在累计降雨 400mm 以上,当累计雨量达到 450mm 以上时,地质灾害大量出现,占到所有灾害的

85%。

台风最大雨强和灾害发生个数的关系(图 3b)体现出台风降雨的特点,所有地质灾害上的最大雨强都超过 30mm·h⁻¹,而在所有地质灾害样本中,90%以上出现在 40 mm·h⁻¹的雨强以上,随着雨强增大,灾害发生频率呈增多趋势。

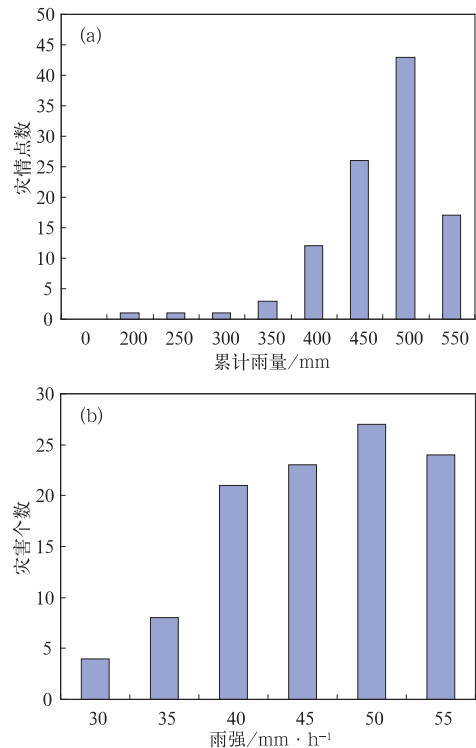


图 3 台风诱发地质灾害个数与累计雨量(a)及最大雨量(b)的关系

(2) 雨强、累计雨量和降雨持续时间之间的关系

由于雨强和持续时间反映了雨水入渗速率和滑坡失稳之间的关系^[22],因此建立雨强、累计雨量和降雨持续时间之间的结合关系是建立实时业务预警判据的重要手段,例如,通过建立雨量和持续时间之间的关系来预报美国旧金山海湾地区的泥石流的触发条件^[17]。

研究表明,暴雨在诱发地质灾害中,采用过程平均雨强与持续时间的关系要优于采用临界雨量和持续时间关系^[6],这是可以理解

的,因为在有限样本的情况下,由于降雨的不连续性,会造成临界雨强的差别加大。图4a给出台风强降雨在诱发地质灾害的平均雨强和降雨持续时间之间的关系,可以看出,降雨持续的时间越长,所需要的平均雨量越小。

利用三个台风强降雨诱发百余例地质灾害的平均雨强 I_{avg} 和降雨持时 D , 取平均雨强和持时关系的下限进行回归, 得到研究区域台风诱发地质灾害的平均雨强和持续时间关系式:

$$I_{\text{avg}} = 368.0D^{-1.127} \quad (1)$$

回归的阈值方程(1)和其他研究者^[16,23-25]提出的关于降雨诱发浅层滑坡和泥石流的平均雨强和降雨持续时间关系相比(图4a),最接近根据台湾5次台风引发地质灾害触发条件得出的平均雨强和累计雨量关系^[6](图4b)。可见,在同样的降雨持续时间情况下,研究区内台风强降雨诱发地质灾害需要更大的平均雨强。这也是台风高强度降雨在诱发地质灾害的特点之一。

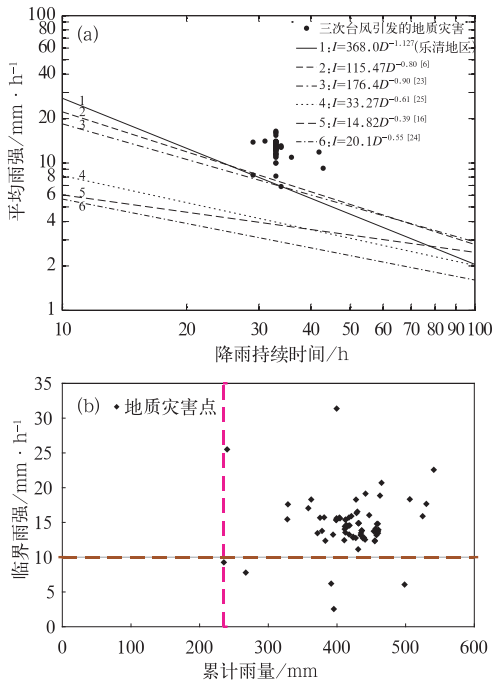


图4 平均雨强与降雨持续时间(a)和临界雨强与累计雨量(b)关系

另外,在诱发地质灾害的临界雨强和累计雨量的统计关系分析中可以看出,台风诱发地质灾害主要分布在临界雨强 $10 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,累计雨量 $400 \sim 500 \text{ mm}$ 之间,分布在这个区间的地质灾害总站总灾害的 90% 。而台风降雨诱发地质灾害的最小临界雨强是 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最小的累计雨量有 240 mm 。

4 小结和讨论

针对频繁受台风影响的浙江温州乐清市地质灾害特点,利用雷达联合雨量计获得的精细化雨量分布,对地质灾害与触发降雨的关系进行了详尽的分析,主要结论如下:

(1) 将雷达联合雨量计定量估计降雨结果用于台风强降雨诱发地质灾害的雨量特征分析,结果证明,雷达估测降雨较好地反映了台风降雨的精细化特征,灾害点上的估测的累计雨量和峰值雨量明显大于雨量站记录,同时能够较好地反映地质灾害触发雨量特征。

(2) 对影响研究区域乐清 0414 台风云娜、0505 台风海棠和 0509 台风麦莎强降雨诱发地质灾害特征分析表明,地质灾害发生前期 15 天内并无明显降雨,即三次台风造成的地质灾害完全是由台风强降雨直接诱发。研究区地质灾害滞后于最大雨强 $1 \sim 3 \text{ h}$ 。

(3) 通过统计回归建立了研究区台风地质灾害的平均雨强和累计雨量的关系,与台湾省的典型台风地质灾害相比,研究区域台风强降雨诱发地质灾害需要更大的平均雨强,台风诱发地质灾害的最小临界雨强是大于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最小的累计雨量为 240 mm 。

需要指出的是,雷达联合雨量计估计降雨结果本身存在一定的误差,无论采用哪种校准方法,一般而言,会存在小雨偏高,大雨偏低的系统性偏差。由于地质灾害的诱发机制往往因地而异,这种偏差对诱发地质灾害的雨量特征分析的影响也不尽相同。就目前的观测条件和校准技术而言,一种可行的减

少误差的方法是在校准过程中对地质灾害频发区域的雨量计观测赋予更多的权重,从而改善灾害触发雨量的估计,提高地质灾害预警的准确性。这方面的研究将在下一步的工作中继续深入。

参考文献

- [1] Lin M. L. and Jeng F. S. Characteristics of hazards induced by extremely heavy rainfall in Central Taiwan-Typhoon Herb [J]. *Engineering Geology*, 2000, 58: 191-207.
- [2] Dai, F. C., Lee, C. F. and Wang, S. J. Characterization of rainfall-induced landslides[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2003, 24: 4817-4834.
- [3] 杜惠良, 钮学新, 殷坤龙. 浙江省突发性地质灾害预警的气象条件研究[P]. 中国气象局预测减灾司编, 地质灾害气象预报预警技术文集(2004), 北京:气象出版社, 2004:125-126.
- [4] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(4).
- [5] 殷坤龙, 张桂荣, 龚日祥, 等. 基于 Web-GIS 的浙江省地质灾害实时预警预报系统设计[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 3:19-22.
- [6] Chen, C. Y., Chen, T. C., Yu, F. C., et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47: 715-724.
- [7] 张延治. 辽东半岛山洪泥石流与诱发暴雨[J]. *气象*, 1991,17(1): 43-47.
- [8] 郁淑华. 诱发泥石流灾害的四川盆地大暴雨过程分析[J]. *气象*, 2002,28(8): 30-33.
- [9] 单九生, 刘修奋, 魏丽, 等. 诱发江西滑坡的降水特征分析[J]. *气象*, 2004,30(1): 13-15.
- [10] 王锡稳, 陶建红, 冯军, 等. 陇南“5·31”特大泥石流灾害成因分析[J]. *气象*, 2004,30(10): 43-46.
- [11] Westen, C. J. van and Daag, A. S. Analyzing the relation between rainfall characteristics and lahar activity at Mount Pinatubo, Philippines [J]. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2005, 30: 1663-1674.
- [12] 赵放, 冀春晓, 任鸿翔, 等. 应用多普勒雷达制作近海台风临近预报技术研究[J]. *气象*, 2008, 34(5): 64-74.
- [13] 高拴柱, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 相关法雷达反演风场在台风监测和分析中的应用[J]. *气象*, 2007, 33(1): 38-44.
- [14] 钟卓约, 帅方红. 9914 号台风多普勒雷达资料分析[J]. *气象*, 2001, 27(7): 41-44.
- [15] 张培昌, 戴铁丕, 伍志芳, 等. 用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降雨量基本原理和精度[J]. *大气科学*, 1992, 16(2): 248-256.
- [16] Caine N. The rainfall intensity; duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Geogr. Ann. A; Phys. Geogr.*, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [17] Cannon S H and Ellen S D. Rainfall conditions for abundant debris avalanches San Francisco Bay region, California[J]. *California Geology*, 1985, 38(12): 267-272.
- [18] Wieczorek G F. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California [J]. *Engineering Geology*, 1987, 7: 93-104.
- [19] Keefer D K, Wilson R C, Mark R K, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall [J]. *Science*, 1987, 238: 921-925.
- [20] Crosta G and Frattini P. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow[P]. In: *Proceedings of the 2nd Plinius International Conference on Mediterranean Storms*, Siena, Italy, 2002.
- [21] Brand E W, Premchitt J and Phillipson H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[P]. In: *Proc. 4th Int. Symp. On Landslides*, Toronto, Ontario. BiTech Publishers, Vancouver, Canada, 1984, 377-384.
- [22] Campbell R H. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California[R]. U. S. Geological Survey Professional Paper 851, 1975, 1-20.
- [23] Guadagno F M. Debris flows in the Campanian volcanic soils (Southern Italy) [P]. In: Chandler RJ (ed.) *Proceedings of international conference on slope stability engineering*. Isle of Wight, UK, 1991, 109-114.
- [24] Ceriain M, Lauzi S and Padovan N. Rainfalls and landslides in the Alpine area of Lombardia region, central Alps, Italy[P]. In: *Proceedings of interpraevent*, Bran, Switzerland, band 2, 1992, 9-20.
- [25] Calcaterra D, Parise M, Palma B et al. The influence of meteoric events in triggering shallow landslides in pyroclastic deposits of Campania, Italy[P]. In: *Proceedings 8th international symposium on landslides*, Cardiff, 2000, 209-214.