

文章编号: 1004-4965 (2005) 06-0642-09

浙江省滑坡、泥石流气象条件分析及其预报研究

杜惠良¹, 钮学新², 殷坤龙³, 谢剑明³, 刘礼领³

(1. 浙江省气象台, 浙江 杭州 310021; 2. 浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310021;
3. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 根据 1949~2001 年浙江省淳安、磐安、庆元和永嘉县滑坡、泥石流与降雨量的统计分析, 将滑坡泥石流发生区划分成台风影响区和非台风影响区, 提出了累计有效降雨量的概念及其计算式, 确定了台风影响区和非台风影响区的临界累计有效降雨量。针对滑坡、泥石流应用 MM5 中尺度预报模式进行本地化研究, 研究 48 小时的雨量预报。经 2003 年和 2004 年试报, 雨量预报和滑坡、泥石流预测有较好的预报能力。

关 键 词: 滑坡; 泥石流; 气象条件; 分析预报

中图分类号: P694

文献标识码: B

1 引 言

气象因素是地质灾害发生的主要因素之一, 其中降水与地质灾害形成关系最为密切, 降水量大小、强度、时间长短等均影响地质灾害的形成程度。据统计, 我国地质灾害 70% 以上发生在雨季。因此确定地质灾害和降雨的关系成为地质灾害预报的关键问题, 许多学者对此进行过大量研究^[1~11]。这些研究或者只以一次降雨量作为地质灾害大量发生的依据, 或者虽考虑了前期降雨的累积作用, 但把发生前不同日降雨的重要性等同看待。而且许多模式只使用水文或气象部门雨量站的实际观测雨量作为当日降雨量, 降低了预测的时效性。浙江省每年都要受到地质灾害影响, 每年受地质灾害的直接经济损失少则数百万元人民币, 多则数亿元人民币, 并出现一定数量的人员伤亡, 有时对影响地区甚至是毁灭性的。据 2003 年浙江省国土资源厅向公众发布的《浙江地质环境公报》公布: 目前浙江省已知的地质灾害点共有 5 480 处, 威胁人口 13.44 万人, 潜在财产损失 20.63 亿元。因此很有必要进行地质灾害的预测预报研究。分析浙江省滑坡、泥石流与降水之间的关系, 发现滑坡、泥石流与发生前一段时间的降水量有关, 但又不是简单的雨量累计, 因而本文以临界累计有效降雨量作为地质灾害发生的判据, 并利用 MM5 中尺度模式预报未来降雨量, 将预报雨量考虑到滑坡、泥石流预报方程中, 进而开展地质灾害气象条件发生预报, 以期提高预报方法的合理性和预报的时效性。

收稿日期: 2004-06-28; 修订日期: 2004-10-18

基金项目: 浙江省科技厅重大攻关项目“浙江省突发性地质灾害预警预报系统及应用示范”; 重点项目“浙江省暴雨预报系统研究”课题联合资助

作者简介: 杜惠良(1962-), 男, 浙江东阳人, 高级工程师, 学士, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: dhuil@yahoo.com.cn

2 浙江省 4 县滑坡、泥石流产生的气象条件分析

分析 1949~2001 年由浙江省地质部门的地质灾害普查资料,发现滑坡、泥石流是浙江省最主要的地质灾害,而浙江省北部的淳安县、中部的磐安县、南部的庆元县和东南沿海的永嘉县等为高发区。这 4 县共发生了 356 次滑坡、泥石流,对应气象雨量站资料配合的有 246 次。下面以这 4 县为研究对象进行分析研究。

滑坡、泥石流发生时间主要集中在 5 月下旬~9 月,这对应于浙江省 5 月下旬~7 月上旬的梅汛期和 8、9 月份的台汛期。由于台风降水和梅汛期降水性质不同,梅雨降雨持续时间长,降水强度相对较小;台汛期降雨强度大,影响时间相对较短;此外,台风降水主要影响浙江省东部和浙江省南部地区,而梅汛期降水主要集中在浙江省中北部地区;因而将位于浙江省东南沿海的永嘉县划分为台风影响区,其他 3 个县划分为非台风影响区。

2.1 滑坡、泥石流与累计降雨量和不同降雨持续时间的关系

滑坡的发生与累计降雨量和持续降雨日是密切相关的。共有样本数为 246,其中台风影响区样本为 98,非台风影响区样本为 148。

为了分析若干时间内的累计日降雨量与滑坡、泥石流发生的关系,对滑坡、泥石流发生次数与其发生前的不同累计日降雨量进行了逐步回归和相关性分析(表 1)。

表 1 累计日降雨量与滑坡、泥石流发生次数的相关性分析(*显著性水平为 0.001)

降雨因子	4 县滑坡发生次数	台风影响区滑坡 发生次数	非台风影响区滑坡 发生次数
滑坡前累计日雨量/mm	单相关系数*	单相关系数*	单相关系数*
1 日降雨量	0.70	0.930	0.584
2 日降雨量	0.80	0.947	0.600
3 日降雨量	0.87	0.950	0.640
4 日降雨量	0.90	0.960	0.660
5 日降雨量	0.40	0.945	0.670
1 周降雨量	0.82	0.900	0.640
一次过程累计降雨量	0.77	0.730	0.550
1 月降雨量	0.69	0.770	0.580
2 月降雨量	0.60	0.690	0.490

不同性质的降雨持续日对滑坡的影响是不同的,选取了小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨等 7 项不同降雨强度出现的天数,分别进行了相关分析,其结果如表 2。

由表 1、2 可见:滑坡、泥石流与不同累计降雨量相关系数相差不大,因而不能用不同的累计降水量来预测滑坡的发生,需要进行进一步的分析。但大暴雨日数与滑坡的相关性系数最大,达到了 0.84,其次分别为暴雨和大雨日数。说明了大暴雨和暴雨日数对滑坡、泥石流灾害的影响是很大的,甚至是直接导致滑坡、泥石流发生的因素。

2.2 临界累计有效降雨量

2.2.1 不考虑地质条件的雨量分析

不考虑滑坡、泥石流发生的地形、地貌、岩性和构造等情况,只考虑滑坡、泥石流发生时累计降雨量与其关系,得到图 1。从累计降雨量和滑坡、泥石流关系曲线上可知:对于非台风影响区的滑坡

泥石流, 当一次降雨过程的累计降雨量达到 175 mm 时, 滑坡发生的次数明显增多, 说明达到这一降雨量时, 一些不稳定的、规模较小的滑坡会发生, 当累计降雨量达到 250 mm 时, 有大量滑坡、泥石流发生; 对于台风影响区的滑坡、泥石流, 当一次降雨过程的累计降雨量达到 200 mm 时, 滑坡、泥石流发生的次数明显增多, 当累计降雨量达到 425 mm 时, 曲线斜率增幅很大, 有大量滑坡、泥石流发生。

表 2 不同降雨日与滑坡、泥石流发生次数的相关性分析 (*显著性水平为 0.01)

降雨强度因子	4 县滑坡发生次数	台风影响区滑坡 发生次数	非台风影响区滑坡 发生次数
不同连续降雨天数 / d	单相关系数*	单相关系数*	单相关系数*
滑前连续降雨天数	0.45	0.30	0.27
≥0.1 mm 降雨天数	0.34	0.54	0.29
≥3 mm 降雨天数	0.42	0.55	0.33
≥10 mm 降雨天数	0.44	0.48	0.38
≥25 mm 降雨天数	0.56	0.67	0.52
≥50 mm 降雨天数	0.73	0.76	0.59
≥100 mm 降雨天数	0.84	0.57	0.61

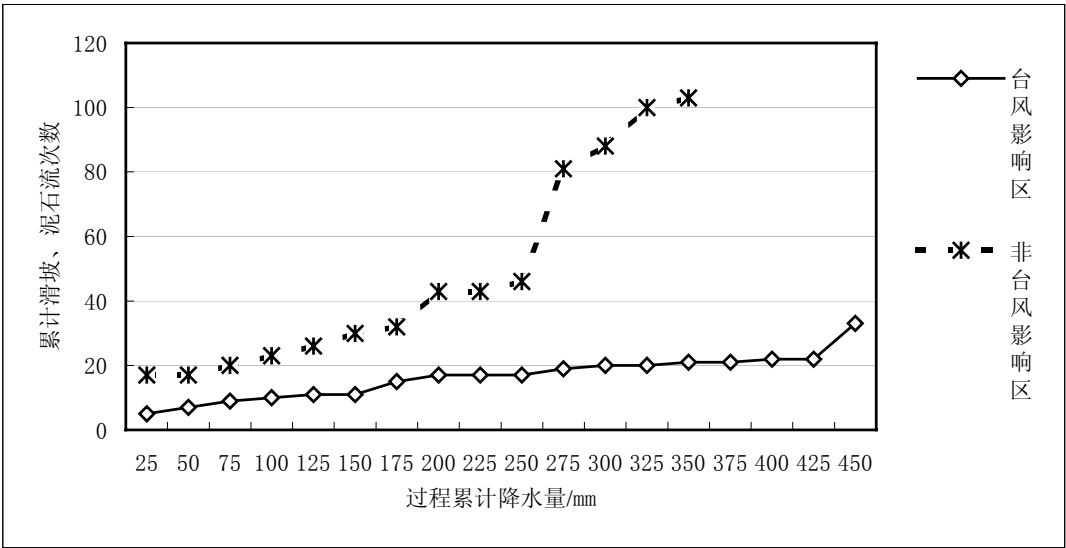


图 1 降雨过程的累计降雨量与滑坡、泥石流的关系

事实上一次降雨并不一定会导致滑坡、泥石流的发生, 只起部分作用, 累计降雨量显然不能作为临界降雨量。为此, 引入累计有效降雨量, 引起一定程度滑坡、泥石流发生的累计有效降雨量定义为临界累计有效降雨量。由表 1 可知, 前 3 日降雨量与滑坡、泥石流发生的相关系数大, 因此, 将滑坡发生前 3 日降雨量累计, 而以前的降雨量分别乘以一个系数 α , 系数采用幂指数时得到累计有效降雨量计算式(1)

$$Rc=R_0+R_1+R_2+\alpha R_3+\alpha^2 R_4+\cdots+\alpha^n R_n \tag{1}$$

式中 Rc : 累计有效雨量; R_0 : 当天降雨量; Rn : 第前 n 日的降雨量; n : 经过的天数, α 系数。

将 α ($0<\alpha<1$) 分别取不同的值, 计算累计有效降雨量和滑坡、泥石流发生次数的相关系数, 使

累计有效降雨量和滑坡、泥石流的相关系数达到最大时的 α 可以认为是最合理的。由表 1 可知, 2 个月(60 天)或 1 个月(30 天)的雨量对滑坡、泥石流的影响很小。所以在应用式(1)计算时, N 分别取 30 天和 60 天。计算结果如表 3。

由表 3 可见：对于非台风影响区的滑坡、泥石流, 采用幂指数系数时累计 30 天和累计 60 天相关系数相等, 因而实际计算取 30 天的降水； $\alpha=0.8$ 时幂指数计算的累计有效降雨量与滑坡、泥石流的相关系数最大, 两者均为 0.65。对于台风影响区的滑坡、泥石流, 取 30 天 $\alpha=0.7$ 的幂指数系数计算累计有效降雨量。按得到的累计有效降雨量计算公式计算并绘制了台风影响区和非台风影响区累计有效降雨量和滑坡发生次数的关系曲线。由图 2 可见：对于非台风影响区的滑坡、泥石流, 当累计有效降雨量达到 150 mm 时, 曲线斜率开始增大, 滑坡、泥石流发生的数量开始增多, 即临界累计有效降雨量为 150 mm, 当累计有效降雨量达到 200 mm 时, 有更多滑坡发生。对于台风影响区的滑坡, 当累计有效降雨量达到 175 mm 时, 曲线斜率突然增大, 滑坡、泥石流发生的数量开始增多, 即临界累计有效降雨量为 175 mm, 当累计有效降雨量达到 225 mm 时, 有更多滑坡发生。

表 3 不同系数情况下累计有效降雨量与滑坡、泥石流发生次数的相关性分析

α	非台风影响区		台风影响区	
	30 天	60 天	30 天	60 天
0.9	0.64	0.64	0.91	0.91
0.8	0.65	0.65	0.95	0.95
0.7	0.64	0.64	0.96	0.96
0.6	0.63	0.63	0.95	0.95
0.5	0.62	0.62	0.95	0.95
0.4	0.61	0.61	0.94	0.94

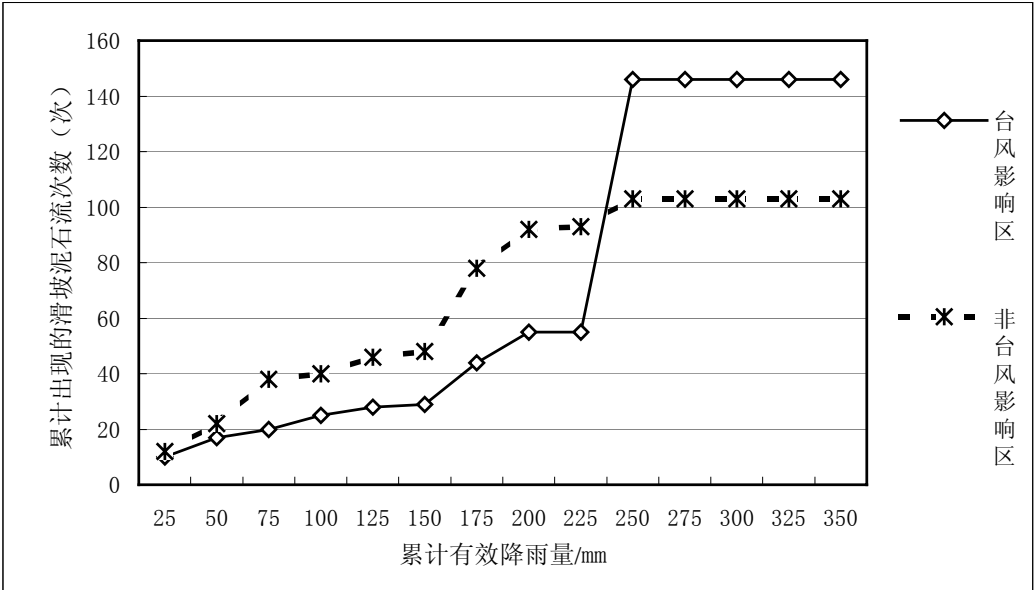


图 2 累计有效降雨量与滑坡、泥石流发生次数的关系

2.2.2 从地质和降雨结合来确定临界降雨量

浙江省的地形以切割破碎的丘陵山地为主要特色。按地质部门定义的滑坡、泥石流出现的规模分类, 统计 4 个县的滑坡、泥石流 97.7%为小型规模, 其他 2.3%为大中型规模, 已经发生的滑坡、泥石

流以浅层土质为主,岩质较少。考虑到大中型滑坡、泥石流样本较少,放在一起分析;小型滑坡、泥石流仍按台风影响区和非台风影响区进行分析。计算的累计有效降雨量公式同上。分别计算并绘制了累计有效降雨量和小型、大中型滑坡、泥石流的关系曲线,如图 3、图 4。

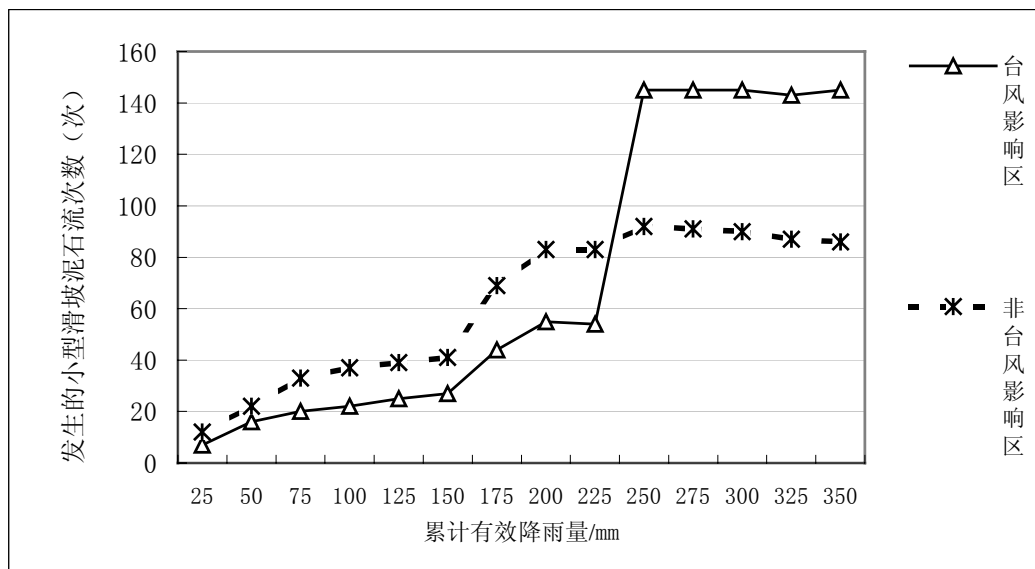


图 3 累计有效降雨量和小型滑坡、泥石流发生次数的关系

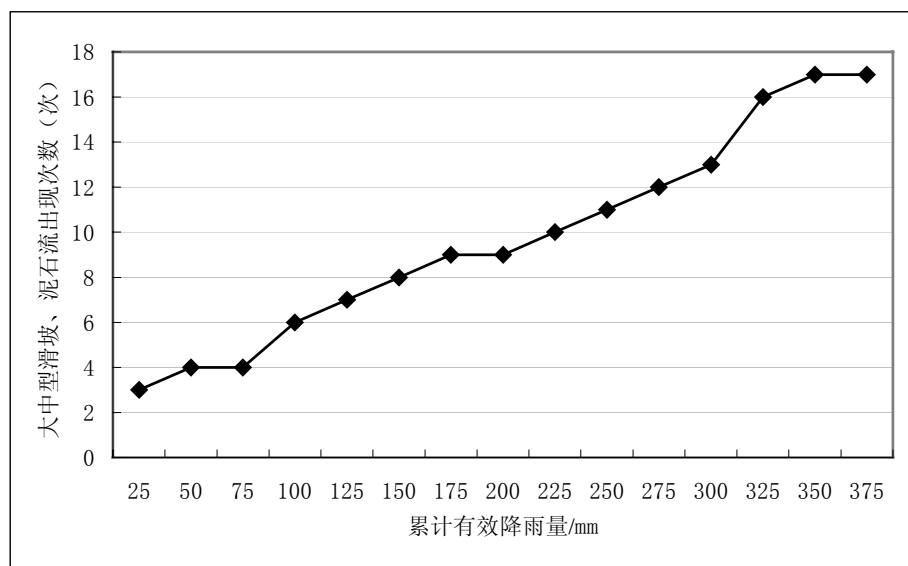


图 4 累计有效降雨量和大中型滑坡、泥石流发生次数的关系

从图中可以清楚地看出:对于小型滑坡、泥石流,当累计有效降雨量达到 125 mm 时,滑坡发生的次数明显增多,说明达到这一降雨量时,一些不稳定的、规模较小的滑坡会发生,因此临界累计有效雨量为 125 mm;当累计有效降雨量达到 225 mm 时,有大量滑坡发生,这是极危险的雨量指标。对于大中型滑坡,当累计有效降雨量达到 225 mm 时,滑坡发生的次数相对增多,因此以 225 mm 为临界累计有效雨量,当累计有效降雨量达到 325 mm 时,曲线斜率增幅较大,有大量滑坡发生,这是极危险的雨量指标。

3 中尺度 MM5 数值预报本地化研究

通过对历史上滑坡、泥石流与降雨量的分析可知,降水量对滑坡、泥石流的产生有很好的相关性,因而准确地预报出未来的雨量是问题的关键。MM5 中尺度数值模式是目前比较成熟的数值模式之一,但要正确地预报当地的雨量,特别是暴雨的预报,需要进行有关模式的本地化研究。

中尺度数值预报采用美国 MM5V3.6 版,计算采用非静力平衡,用三重嵌套,模式空间有 23 层,计算区域中心选在 29°N 、 120°E 。最外圈格距为 $135\text{ km}\times 135\text{ km}$,格点数为 55×73 ,时间步长 180 秒;中圈格距为 $45\text{ km}\times 45\text{ km}$,格点数为 55×67 ,时间步长 60 秒;内圈格距为 $15\text{ km}\times 15\text{ km}$,格点数为 61×61 ,时间步长 20 秒。地形采用 2 分资料,通过对数十例的浙江省梅汛期暴雨和台风暴雨个例采用不同物理参数化方案的模拟分析,发现积云对流参数化采用 BethsMiller 方案模拟浙江省暴雨比较有效。模式计算使用的初边场资料从 internet 网上下载的美国海军的 AVN 的初始场和预报场,考虑到下载到完整的 AVN 资料要经过一段时间,为了提高模式的预报能力,将 08 时地面、高空观测资料和 11 时地面资料加入模式进行三维同化处理;利用 20 时 AVN 资料将 20 时地面、高空的观测资料加入模式进行同化处理。模式的预报时效为 48 小时。为了给滑坡、泥石流预报提供方便,每 6 小时、12 小时、24 小时和 48 小时间隔输出一次雨量预报。

4 实际使用情况

2003 年 5 月 5 日~7 月 11 日的梅汛期在浙江省气象台投入每天的业务试验,在有台风影响浙江省时,也进行了试验。本系统本地化的 MM5 中尺度数值预报正确,基本预报出了 2003 年浙江省梅汛期的暴雨过程,预报的暴雨落区和量级基本与实况一致,基本无空报,预报时效 24 小时优于 48 小时。例如 2003 年 6 月 23 日 MM5 预报的 24 小时的雨量和对应的 24 小时实况的雨量分布(图 5),比较可知,开化 128.5 mm 的大暴雨中心落在预报的 100 mm 大暴雨的区域内,实况暴雨区与预报的区域一致,所以 6 月 23 日的预报是很成功的。

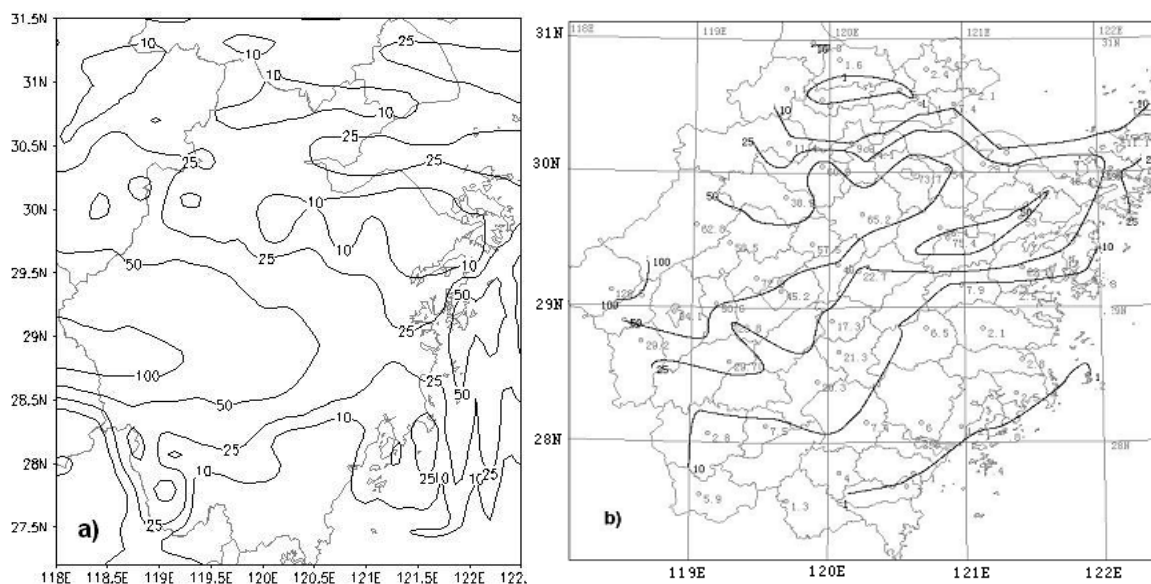


图 5 2003 年 6 月 23 日 08 时预报 (a)、对应实况 (b) 的 24 小时雨量

2003 年 6 月 24 日 MM5 预报的 24 小时的雨量和对应的 24 小时实况的雨量分布 (图 6), 比较可知: 大暴雨和暴雨基本能预报出, 有比较好的预报效果。

由预报未来 24 小时雨量, 再根据之前 29 天逐日的雨量, 由式 (1) 计算得到 4 个试验区的累计有效雨量, 比较累计有效雨量与临界累计有效雨量, 在 23、24 日均没有达到。预报没有滑坡、泥石流, 预测与实况一致。

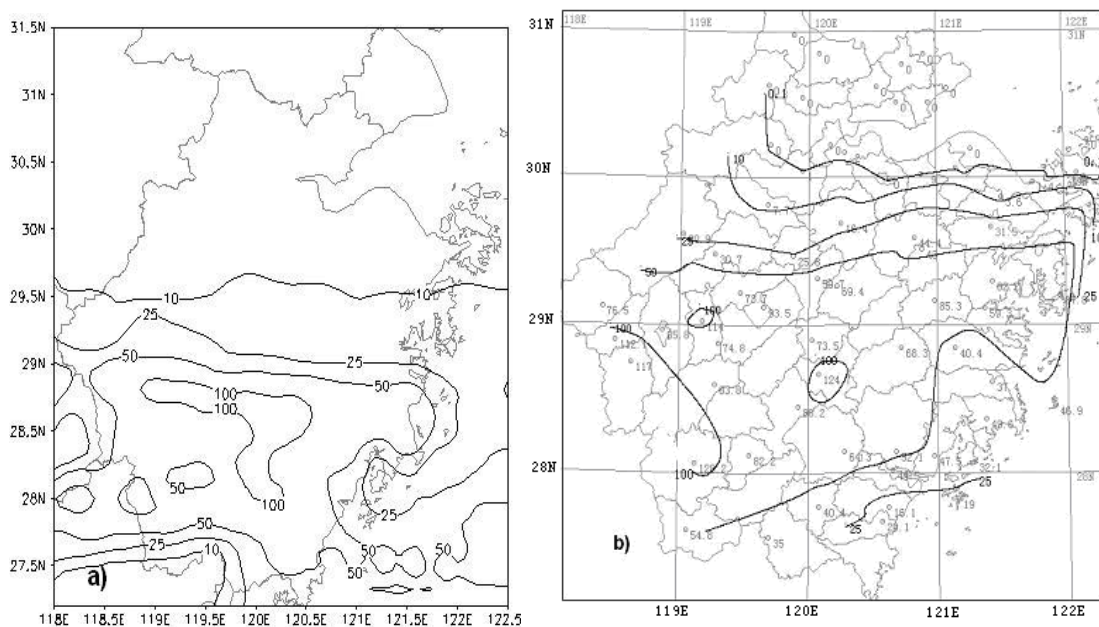


图 6 2003 年 6 月 24 日 08 时预报 (a)、对应实况 (b) 的 24 小时雨量

2004 年 5 月 12 日系统投入每天预报, 用当日 08 时之前 29 天逐日的实况雨量由公式 (1) 计算出累计有效雨量, 再加上由 MM5 计算得到的 24 小时预报雨量, 实况累计有效雨量和 24 小时预报雨量之和与发生地质灾害的临界累计有效雨量, 如果大于临界累计有效雨量, 则预报有地质灾害发生的可能, 反之则预报无地质灾害发生。

2003 年影响浙江省的台风有 0309 号和 0311 号, 0309 号在 2003 年 8 月 4~6 日影响期间雨量不大, 前期浙江省严重干旱, 在台风影响区的永嘉县 (97 mm) 达不到临界有效降雨量, 预报没有地质灾害, 实况也没有出现, 其他三站降水少。0311 号台风在台风影响区的永嘉县 2003 年 8 月 19~21 日三天的总雨量为 81.8 mm, 达不到临界雨量, 预报和实况均没有地质灾害, 其他三站降水更少。

2004 年 5 月 12~17 日、5 月 28 日~6 月 1 日是二个有明显降水的时段, 浙江省北部地区的淳安县, 5 月 16 日实况累计有效降雨量与预报雨量之和 (119 mm) 达不到接近临界雨量 (125 mm), 预报、实况均没有出现地质灾害。但在淳安县东部约 80 km 的浦江县 5 月 16 日实况累计有效降雨量与预报雨量之和 (135 mm) 达到临界雨量 (125 mm), 预报浦江县有地质灾害, 实况浦江县内于 5 月 16 日 5 点 40 分发生了一处山体滑坡, 预报正确。

位于浙江省中部地区的磐安县在这一段试验期内, 均达不到地质灾害发生的指标, 预报没有地质灾害发生, 实况也没有出现, 预报正确。

位于浙南山区庆元县的地质灾害预报如表 4。5 月 16 日前期实况有效雨量和预报雨量之和 (133 mm) 达到地质灾害发生的临界累计有效降雨量 (125 mm), 预报 24 小时有地质灾害, 实况 17 日 02 时在庆元县内安南乡发生 4 个点的山体滑坡。5 月 31 日达到预报指标, 预报 24 小时内有地质灾害, 6

月 1 日庆元县的黄田镇发生一处山体滑坡。6 月 1 日达到预报指标，预报 24 小时内有地质灾害，6 月 2 日在庆元县竹口镇发生一处山体滑坡。

位于浙南沿海的永嘉县在这一段试验期内，均达不到地质灾害发生的指标，预报没有地质灾害发生，实况也没有出现，预报正确。

2004 年 7 月 2~4 日 0407 号台风影响浙江省期间（7 月 3 日 9：30 在浙江省乐清登陆），浙江省降水少，永嘉县过程雨量 37.9 mm，没有达到临界有效雨量，预报、实况均没有地质灾害。

通过 2003 年和 2004 年梅汛期和台汛期的试验表明，本研究得到的临界累计有效雨量预报由降水引起的地质灾害有一定的预报能力。

表 4 庆元县地质灾害预报

日期/月.日	前期实况有效雨量/mm	24 小时预报雨量/mm	预报未来 24 小时地质灾害	实况出现的地质灾害
5.12	79.3	50	无	无
5.13	66.0	5	无	无
5.14	53.9	5	无	无
5.15	67.6	20	无	无
5.16	83.2	50	有	17 日 02 时发生 4 处滑坡
5.17	66.5	1	无	无
5.28	6.3	1	无	无
5.29	5.0	0	无	无
5.30	44.1	50	无	无
5.31	126.9	10	有	6 月 1 日早晨发生 1 处滑坡
6.1	113.3	10	有	6 月 2 日发生 1 处滑坡

5 结论与讨论

- (1) 引起滑坡、泥石流的临界累计有效降雨量，非台风影响区 125 mm，台风影响区 150 mm。
- (2) 从地质和降水结合来确定滑坡、泥石流的临界累计有效降雨量，小型滑坡、泥石流为 125 mm；大中型滑坡、泥石流为 225 mm。
- (3) 用本地化的 MM5 数值模式输出的 24 小时雨量预报，结合前期 29 天的实况雨量，确定累计有效降水量，当累计有效降水量大于临界有效降雨量时，预报未来可能发生滑坡、泥石流，累计有效降雨量比临界有效降雨量值越大，则越易发生滑坡、泥石流。由于本文是针对浙江省 4 个县的滑坡、泥石流的研究，要将结果应用到浙江省其他地区，应该首先分析预报区的地质构造，如果地质构造比较相似，可以直接使用，2004 年的试验也说明了这点。如不相似，则需要进一步的研究。
- (4) 经 2003 和 2004 年的实际试验，说明有一定的预报滑坡、泥石流的能力。
- (5) 由于地质灾害的发生所受因素较多，例如地质的构成、植被的分布、雨强等有关，因而需要进一步积累资料，进行细化研究，期望进一步提高地质灾害的预报水平。

参 考 文 献：

- [1] 谭万沛, 罗晓梅, 王成华. 暴雨泥石流预报程式[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 106-111.
- [2] 魏永明, 谢又予. 降雨型泥石流(水石流)预报模型研究[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(4): 48-54.
- [3] 文科军, 王礼先, 谢宝元. 暴雨泥石流实时预报的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 59-64.
- [4] 白永峰, 魏 鸿. 成昆铁路暴雨泥石流灾害预测模型的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4): 74-80.
- [5] 余 斌, 洪 勇, 何淑芬. 降雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 96-99.
- [6] 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.
- [7] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述[J]. 世界地质, 2000, 19(4): 370-374.
- [8] 马 力, 曾祥平, 向 波. 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 246-249.
- [9] 柳 源. 滑坡临界暴雨强度[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 43-45.
- [10] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报[J]. 中国地质灾害与防治学, 1998, 9(4): 81-86.
- [11] 李 军, 周成虎. 香港地区滑坡体积与前期降水关系分析[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 37-45.
- [12] 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等. 台风暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报, 2003, 19(S): 152-159.
- [13] 骆荣宗. 9012 号台风中尺度螺旋雨带与暴雨的观测分析[J]. 热带气象学报, 1997, 13(2): 173-179.
- [14] 郑庆林, 吴 军, 蒋 平. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究[J]. 热带气象学报, 1996, 12(4): 304-313.
- [15] 张福青, 蒋全荣, 党人庆. 8805 号登陆台风特大暴雨的数值模拟[J]. 热带气象学报, 1996, 12(3): 257-264.

METEOROLOGICAL CONDITION ANALYSIS AND FORECAST RESEARCH OF LANDSLIDES AND DEBRIS FLOWS IN ZHEJIANG PROVINCE

DU Hui-liang¹, NIU Xue-xing², YIN Kun-long³,
XIE Jiang-ming³, LIU Li-ling³

(1. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310021, China;
2. Zhejiang Research Institute of Meteorological Science, Hangzhou 310021, China;
3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this article, regions where landslides and debris flows often occur are divided into typhoon-impacting area and non-typhoon-impacting area. Based on the statistical analysis of the landslides, debris flows and precipitation at Chun'an, Pan'an, Qingyuan and Yongjia county in Zhejiang province from 1949 to 2001, we bring forward the concept of accumulated effective precipitation and give its calculation formula. Through this formula and the data analysis, critical accumulated effective precipitation in typhoon-impacting area and non-typhoon-impacting area are obtained separately. The mesoscale numerical model MM5 is localized to forecast the accumulated precipitation within 48 hours. And we use the results above to give the forecast of landslides and debris flows. Through trials in plum rain (sustained rain) periods from 2003 to 2004, the results are good.

Key words: landslide; debris flow; meteorological condition; analysis forecast