

# 云南滑坡泥石流灾害的气象成因与监测

解明恩<sup>1</sup>, 程建刚<sup>1</sup>, 范 菠<sup>2</sup>

(1. 云南省气象局, 云南 昆明 650034; 2. 云南省思茅市气象局, 云南 思茅 665000)

**摘 要:** 根据云南滑坡泥石流灾害资料, 分析了其形成环境与分布特征, 给出了典型降水滑坡泥石流灾害事件, 研究了滑坡泥石流灾害与气象环境的关系。云南滑坡泥石流灾害主要出现在盛夏 7~ 8 月, 主要影响天气系统有切变线、冷锋、西风槽、西南涡、孟加拉湾风暴、南海西行台风和两高辐合区。诱发滑坡泥石流灾害的前期降水类型有 3 种, 即暴雨型、中~ 大雨型和连阴雨型。得出了云南滑坡泥石流发生的区域临界雨量指标, 提出了滑坡泥石流灾害的气象监测预警方法。

**关键词:** 滑坡; 泥石流; 气象; 降水; 监测预警

**中图分类号:** P114. 3

**文献标识码:** A

云南地处云贵高原, 国土面积  $39.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 山地面积占 94%, 地形陡峻、切割破碎, 地质条件复杂, 地震活动频繁, 降水集中, 生态环境脆弱, 是我国滑坡、泥石流灾害最严重的地区之一。特别是 20 世纪 80 年代以来, 云南山区开发速度加快、规模加大, 导致滑坡、泥石流灾害发生频率和强度日趋增大, 频发的山地地质灾害严重制约了云南经济的发展。滑坡泥石流灾害形成的主要自然因素包括地形地貌、地质环境和气候环境, 其中强降水是诱发滑坡、泥石流灾害发生的最直接因素。我国于上世纪 60~ 70 年代开展了滑坡、泥石流调查和野外观测, 80~ 90 年代开展了滑坡、泥石流预测预报方法研究, 出版了一大批山地灾害研究的专著<sup>[1-7]</sup>。有人对山地地质灾害的监测预警进行了研究<sup>[7-15]</sup>, 本文重点研究了云南滑坡、泥石流灾害与气象的关系, 提出了气象监测预警方法。

## 1 云南滑坡泥石流灾害概述

### 1.1 灾害的严重性

云南是我国地质灾害严重, 多发的省份, 滑

坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、石漠化是云南常见的地质灾害类型。其中滑坡、泥石流点多面广、活动强烈、突发性强, 是云南最主要的山地地质灾害。据 1949~ 2000 年资料统计, 全省地质灾害造成 9 000 余人死亡、21 000 人受伤, 直接经济损失近 72 亿元。20 世纪 90 年代以来, 地质灾害年均直接经济损失达 4.5 亿元, 年均因灾死亡 169 人 (图 1、2)。全省 129 个县级政府驻地中, 受到地质灾害危害的有 41 个; 全省 1 419 个乡镇政府驻地中, 有 160 个受到滑坡、泥石流危害和威胁, 其中 79 个危害严重。有近 5 000 个自然村约 30 余万农村人口处于地质灾害威胁和危害之中。1986 年以来, 怒江州碧江县城因滑坡撤销县制, 耿马、镇沅、元阳、西盟等 4 个县城易地搬迁重建, 盐津和镇康 2 县城因灾局部搬迁。

矿产资源开采是对地质环境扰动最剧烈的人为工程活动, 矿山及其周围地区是滑坡、泥石流的高发区。云南受到滑坡、泥石流危害的大中型矿山约有 150 个, 小型矿山则数以千计。云南受到滑坡、泥石流危害的铁路路段有 480 km, 公路路段达 3 000 km, 严重影响了公路雨季的畅通。全省有

收稿日期 (Received date): 2005- 02- 05; 改回日期 (Accepted): 2005- 05- 21。

基金项目 (Foundation item): 云南省自然科学基金重点项目“云南重大气候灾害形成机理研究” (2003D0014Z) 资助。[It is supported by key project of Yunnan Natural Science Foundation “The formation mechanism of severe climatic disasters in Yunnan” (2003D0014Z).]

作者简介 (Biography): 解明恩 (1966- ), 男, 汉族, 云南通海人, 正研高工, 主要从事天气气候与灾害研究。[Xie Ming'en (1966- ), male, the Han Nationality, born in Tonghai of Yunnan, major in weather and disaster.]

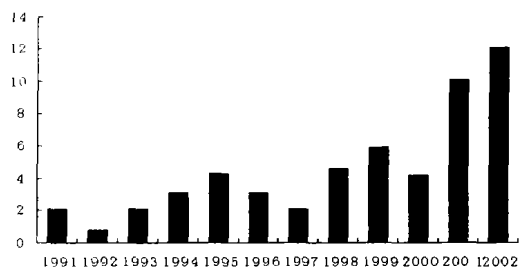


图1 1991~2002年云南地质灾害直接经济损失(亿元)

Fig. 1 Economic losses by geological disasters in Yunnan from 1991 to 2002 (Unit: hundred million Yuan)

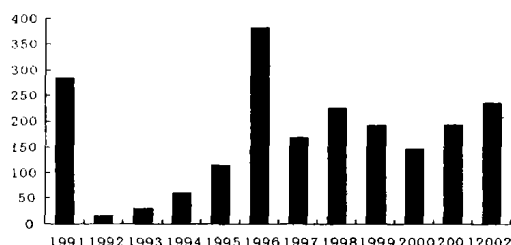


图2 1991~2002年云南地质灾害因灾死亡人数(人)

Fig. 2 Deaths number by geological disasters in Yunnan from 1991 to 2002 (Unit: person)

1 000余座水库和电站受到地质灾害严重危害,有13 000  $\text{hm}^2$ 农田因泥石流灾害而沙石化。

## 1.2 滑坡泥石流灾害的形成环境与分布特征

云南属典型的山区省份,地处6大水系的上游或源头区,地质环境复杂,新构造运动活跃,受其影响,形成群山起伏、江河深嵌、斜坡高陡的地貌特点。山地面积占全省的94%, $\geq 25^\circ$ 的陡坡面积占全省的39.3%,大多数斜坡处于准稳定状态,一经触发,极易失稳,为滑坡、泥石流灾害频发提供了地形条件。

云南地处欧亚板块与印度洋板块碰撞带东缘附近,地壳抬升幅度大,活动断裂密集,破坏性地震频繁,不稳定岩土体分布广泛,脆弱的地质环境为滑坡泥石流灾害的形成和发展提供了物质基础。

云南所处纬度和地形条件决定了气候类型多样,降雨季节性强、降水集中、局地暴雨多的特点,局地性高强度降雨过程是激发滑坡、泥石流灾害的主要自然因素。

云南近代人口数量增幅较快,较重的人口密度加重了环境负荷,陡坡垦殖,天然植被减少和工程

建设中对地形地貌的强烈扰动,文化素质偏低、经济水平落后、社会贫困面大、人为环境灾害意识不强和不当的经济、生产活动加剧了滑坡、泥石流的活动和危害。

根据地面调查和卫星遥感资料统计,云南记录在案的滑坡点有6 012个,泥石流沟3 349条。云南滑坡、泥石流灾害分布密度总体上有滇西高于滇东,滇北高于滇南的基本特征。在山岭台地与断陷盆地及谷地的过渡部位和活动断裂槽谷区,滑坡、泥石流灾害相对密集。在城镇、居民点和矿山周围,铁路和公路沿线以及人口密度大、陡坡垦殖强烈的区域,滑坡、泥石流灾害呈点、片、环、带状发育。

水分是滑坡、泥石流发生的必要条件,连绵的阴雨易引起滑坡的发生,强度大的暴雨或大暴雨则是绝大多数泥石流发生的水动力条件。云南滑坡、泥石流灾害主要发生在主汛期6~8月和后汛期9~10月。丰水年山地地质灾害偏重发生,枯水年偏轻发生。云南滑坡、泥石流灾害强度分为极强活动区(34 080  $\text{km}^2$ )、强区活动区(113 280  $\text{km}^2$ )、中度活动区(100 800  $\text{km}^2$ )和轻度活动区(135 840  $\text{km}^2$ ),空间上分为11个活动亚区和15个严重危害地段。

## 1.3 典型滑坡泥石流灾害事件(表1)

# 2 滑坡泥石流灾害与气象因素的关系

## 2.1 滑坡泥石流灾害与气候类型

云南具有我国从海南岛到黑龙江的气候类型,气候带可分为北热带、亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带、温带和寒温带7种类型,滑坡在寒温带、中亚热带、北亚热带、南亚热带分布密度较高,寒温带为平均值的1.8倍;泥石流在北亚热带分布密度最高,中亚热带次之。

## 2.2 云南强降水的气候特征

岩土富水、强度降低和地下水位升高,往往会引起斜坡失稳。连绵的降水易引起滑坡的发生,强大的暴雨则是绝大多数泥石流发生必不可少的水动力条件。云南地处低纬高原季风气候区,干湿季节分明,雨季降水集中,多单点大雨、暴雨,是绝大多数滑坡、泥石流灾害产生的诱发因素。云南大雨以上强降水主要集中在主汛期6~8月(表2)。

表 1 云南 1965~ 2002 年典型降水滑坡泥石流灾害事件

Table 1 Typoical disaster events of landslide and debris flow caused by rainfall in Yunnan from 1965 to 2002

时 间	地 点	灾害类型	灾 情
1965- 11- 22~ 23	禄劝	滑坡	死亡 444 人
1969- 08- 11	盈江	泥石流	死亡 99 人, 伤 167 人, 损失 1 000 多万元
1979- 09- 26~ 10- 08	怒江州	滑坡、泥石流	死亡 143 人, 重伤 88 人
1983- 07- 02	巧家	泥石流	死亡 32 人, 伤 51 人
1984- 05- 27	东川	泥石流	死亡 121 人, 伤 34 人, 损失 1 100 万元
1990- 06- 29	永善	泥石流	死亡 52 人, 重伤 9 人, 损失 800 余万元
1991- 09- 23	昭通	滑坡	死亡 216 人, 伤 8 人, 损失 1 200 万元
1994- 07- 13	元阳	泥石流	死亡 58 人, 伤 347 人, 损失 1 多亿元
1995- 05- 30~ 31	威信	滑坡、泥石流	死亡 33 人, 重伤 48 人, 损失 1. 6 亿元
1995- 07- 24~ 25	彝良	滑坡、泥石流	死亡 41 人, 重伤 41 人, 损失 1. 3 亿元
1995- 08- 16	云龙	泥石流	死亡 29 人, 伤 10 人, 损失 820 万元
1996- 05- 31、06- 03	元阳	滑坡	死亡 372 人, 重伤 146 人, 损失 1. 6 亿元
1997- 05- 06~ 06- 08	昭通市	滑坡、泥石流	死亡 74 人、伤 133 人, 损失 2. 5 亿元
1998- 07- 02~ 03	景东	滑坡、泥石流	死亡 21 人, 重伤 18 人, 损失 300 万元
1998- 06~ 07	大关	滑坡、泥石流	死亡 23 人, 损失 610 万元
1998- 07- 13	彝良	滑坡、泥石流	死亡 40 人, 伤 178 人, 损失 1. 51 亿元
2000- 08- 13	盈江	滑坡	死亡 17 人, 伤 24 人
2001- 07- 03	金平	滑坡、泥石流	死亡 28 人, 重伤 15 人, 损失 6000 万元
2001- 07- 09	东川	滑坡	死亡 19 人, 伤 22 人, 损失 500 万元
2001- 08- 25	富宁	滑坡、泥石流	死亡 18 人, 重伤 5 人
2002- 08- 12	盐津	滑坡、泥石流	死亡 29 人
2002- 08- 14	新平	滑坡、泥石流	死亡 63 人, 伤 33 人

表 2 云南 127 个气象站大雨暴雨历年各月平均站次

Table 2 Heavy rain and rainstorm frequency in 127 weather stations of Yunnan

等 级	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
大 雨	5. 3	12. 1	14. 7	32. 7	115. 0	254. 0	305. 0	290. 0	166. 0	103. 0	47. 5	13. 6
暴 雨	0. 4	1. 1	2. 4	3. 7	20. 7	51. 0	63. 5	55. 8	30. 9	14. 9	8. 0	1. 5
大暴雨	0. 0	0. 0	0. 1	0. 1	1. 1	3. 3	4. 9	3. 4	1. 9	0. 7	0. 3	0. 0

根据全省 127 个气象站 35 a (1961~ 1995 年) 资料统计, 暴雨以上降水频率最高的是滇西南西盟, 达 337 次, 平均每年近 10 次; 其次是滇南的河口、金平、禄春、江城一带, 达 225 次, 平均每年近 6. 4 次; 还有罗平 (125 次)、华坪 (117 次)、盐津 (106 次) 等暴雨活动高频率区。

一个地区气候变化的久旱之后的久雨或久晴后的暴雨背景是最容易形成滑坡、泥石流灾害的气候环境。云南滑坡、泥石流灾害的发生是由产生大范围强降雨并出现区域洪涝灾害的有利天气系统造成的。造成云南大雨暴雨的主要天气系统有切变线、冷锋、西风槽、西南涡、孟加拉湾风暴、南海西行台风和两高压之间的辐合区 (表 3)。

表 3 1985~ 1998 年汛期造成云南大雨暴雨主要天气系统次数

Table 3 Main synoptic systems frequency caused heavy rain and rainstorm during rainy season from 1985 to 1998 in Yunnan

月	切变线	冷 锋	西风槽	西南涡	孟湾风暴	南海台风	辐合区
5	9	16	3	5	8	0	0
6	17	11	1	8	3	3	9
7	19	10	2	14	0	4	14
8	14	11	5	7	0	7	19
9	12	12	4	3	1	1	9
10	8	15	4	0	7	0	0
11	6	7	1	0	7	0	0
合计	85	82	20	37	26	15	51
比例 (%)	26. 9	26. 0	6. 3	11. 7	8. 2	4. 8	16. 1

由表 3 看出, 切变线和冷锋是云南汛期强降水的最主要天气系统, 也是云南最容易发生滑坡、泥石流灾害的天气系统, 其次是两高压之间的辐合区

和西南涡。从季节看，初夏（5~ 6 月）和秋季（10~ 11 月）主要天气系统是切变线、冷锋和孟加拉湾风暴，尤其孟加拉湾风暴往往造成滇西南甚至全省秋季严重的滑坡、泥石流灾害；盛夏（7~ 8 月）主要天气系统是切变线、冷锋和辐合区；西南涡和南海西行台风则主要集中于主汛期 6~ 8 月。另外，春季 3~ 4 月南支槽是造成怒江州滑坡、泥石流灾害的主要天气系统。

一个地区滑坡、泥石流的活动高峰主要受大气环流与局地气候变化的影响，尤其与区域降水量、区域性暴雨出现频次和单位时间内的雨强有关。大量滑坡、泥石流灾害的集中出现，往往是随这个地区的区域性稀遇暴雨、特大洪涝灾害同时或同期发生，表现出灾害群发性和叠加性，形成暴雨灾害链。

2 3 滑坡泥石流灾害与降水量的关系

滑坡、泥石流的发生是地形地貌、地质环境、水文气象及地震活动等多种因素临界耦合条件累计效应的结果。根据大量实例研究得出云南滑坡、泥石流发生的斜坡坡度临界耦合指标为：

1. 坡度 > 30° 极易发生滑坡、泥石流灾害；
2. 坡度 21°~ 30°，较易发生滑坡、泥石流灾害；
3. 坡度 10°~ 20°，少量发生滑坡、泥石流灾

害；

4. 坡度 < 10°，不易发生滑坡、泥石流灾害；

可看出，斜坡坡度 10°左右是滑坡、泥石流灾害开始发生的一个临界耦合坡度，斜坡坡度 21°左右是滑坡、泥石流灾害开始大量发生和突增的临界耦合坡度。

暴雨等强降水造成河流、水库水位迅速上涨，地下水位随之提高，使山体岩土体软化层力学特征发生变化，土壤渗透率增大使地表岩土体软化层向下扩大，地下水和上层土壤含水量增加共同作用，易引发滑坡、泥石流灾害。降雨量是滑坡、泥石流灾害发生的直接诱发和激发因素，其发生的临界雨量指标的确定是其发生预测的关键条件。滇西北泥石流发生的临界日雨量一般为 35~ 200 mm，滇西南为 50~ 200 mm，滇东为 100~ 300 mm。滇东南地区一日降雨量虽然达到暴雨标准，但因地质环境和地形条件不易成灾，或降雨时间长、强度小都往往不易引起滑坡、泥石流灾害；而在滇北和滇西地区，因地质环境脆弱，斜坡稳定性差，降雨量虽未达到暴雨标准，但因降雨强度大，雨势猛烈，往往也会引发滑坡、泥石流灾害。云南滑坡、泥石流发生的临界雨量指标存在明显的地域差异且与灾害发生地危险性等级有关。表 4 是云南“区域平均”临界雨量综合指标。

表 4 云南滑坡泥石流区域临界雨量综合指标（单位：mm）  
Table 4 Regional critical rainfall comprehensive index of causing landslide and debris flow in Yunnan (Unit: mm)

地形坡度	I 区	II 区	III区	IV区	V 区	VI区
> 30°	60~ 80	50~ 70				
21°~ 30°	80~ 100	70~ 100	80~ 100	80~ 100	80~ 100	
10°~ 20°	> 100	100~ 150	100~ 150	100~ 150	100~ 150	100~ 15°
< 20°		> 150		> 150	> 200	150~ 200

表中 I 区为滇西北泥石流特别发育，滑坡很密集区；II 区为滇东北泥石流很发育，滑坡较密集区；III 区为滇西南泥石流较发育，滑坡较密集区；IV 区为滇中局部泥石流较发育，滑坡稀疏区；V 区为滇南泥石流很少、滑坡极稀疏区；VI 区为滇东泥石流极少、滑坡很稀疏区。

云南干湿季分明，雨季（5~ 10 月）降水占全年总降水量的 80% 左右。大雨、暴雨主要集中在主汛期 6~ 8 月，多年大雨、暴雨最大站次数出现在 7 月。滑坡泥石流灾害主要发生在 5~ 10 月，但与暴雨集中出现在 6~ 8 月不同，山地地质灾害集中出现在 7~ 8 月，占全年总出现次数的 70%，高峰出现在 8 月；6 月和 9 月为次高发月，

约占全年总次数的 21%（图 3）。

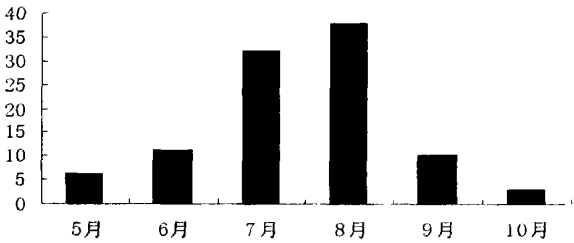


图 3 云南滑坡泥石流灾害的月际变化 (%)  
Fig. 3 Monthly variation of landslide and debris flow disasters in Yunnan (%)

通过对云南 525 个滑坡、泥石流灾害个例发生当日及发生前 39 d 的气象站逐日降水量分析, 诱发云南滑坡、泥石流灾害的前期降水类型主要有 3 种, 即暴雨型, 中~大雨型和连续阴雨型 (图 4)。

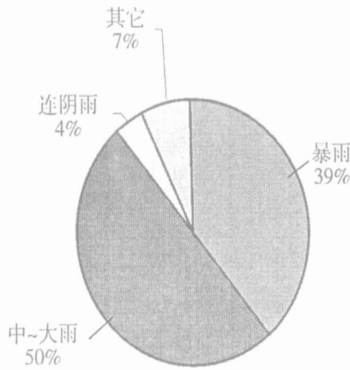


图 4 云南滑坡泥石流灾害的前期诱发降水类型

Fig. 4 Precipitation patterns in early days caused landslide and debris flow disasters in Yunnan

### 2.3.1 暴雨诱发型

山地地质灾害发生当日及前 5 d 中, 出现 2 d 或以上日降水量  $\geq 50$  mm 的暴雨; 或出现 1 d 降水量  $\geq 50$  mm 的暴雨, 且前 11 d 内, 出现过 4 d 或以上降水量  $> 10$  mm 的中~大雨为暴雨诱发型。地质灾害的发生不但与当日降水量有关, 还与前期的降水有直接关系。单日大暴雨只会造成山洪灾害, 而不一定能诱发山地地质灾害。降水类型又可根据灾害发生前期的降水情况分为 3 类, 即: 暴雨—暴雨型 (两次暴雨间隔在 10 d 内)、连续暴雨型 (连续 2 d 暴雨或以上)、多日中、大雨—暴雨型。暴雨诱发的地质灾害有 204 个, 占总数的 39%。一个地区的特大暴雨常常诱发滑坡、泥石流群发, 空间分布均有共同性, 即山地地质灾害都集中分布在暴雨量最大的中心区域内。例如 1992-07-12 昭通市出现特大暴雨, 中心最大日雨量 235 mm, 诱发滑坡、泥石流 142 处, 分布在日雨量等值线 50 mm 暴雨区内, 集中分布在以彝良为特大暴雨中心的 150~200 mm 范围内。

实例: 盐津县 2002-08-12 滑坡、泥石流灾害, 造成 29 人死亡。灾害发生当日降水量为 22.0 mm, 但前 3 d 出现了 101.9 mm 的大暴雨, 前 11 d 出现了 148.0 mm 的大暴雨。前 11 d 出现大暴雨时, 局部地区发生了洪灾。前 3 d 出现大暴雨, 局

部开始出现泥石流, 但未造成大的损失, 到 2002-08-12 出现 22.0 mm 降水, 大规模的滑坡、泥石流灾害暴发。

### 2.3.2 中~大雨诱发型

山地地质灾害发生的当日及前 12 d 中, 未出现 50 mm 以上的暴雨, 但出现了多日 (4 d 或以上) 10~50 mm 的中~大雨。此类型降水是诱发云南地质灾害的主要降水类型。在 525 个例中, 有 263 个前期降水情况可归纳为此型 (包括 12 d 内有暴雨出现的情况), 占总数的 50%。在 10 多 d 中, 多日出现中~大雨, 降水被土壤充分吸收, 土壤充分浸透, 在陡峻的坡地上形成了过饱和的土壤, 只要再有小雨出现, 就可诱发地质灾害。这种类型的前期降水, 即有一定的强度, 也有一定的持续性, 易造成大范围的滑坡、泥石流灾害。

实例: 2000-08-21 出现在保山, 造成 9 人死亡、4 人重伤和 2002-08-14 出现在新平, 造成 63 人死亡、33 人重伤的两次山地地质灾害, 灾前出现了两段降水, 第一段出现在前 7~14 d 内, 有 2~3 d 降水量 10 mm 以上中~大雨, 第二段出现在地质灾害发生的当日及前 6 d 内, 也有 2~3 d 的中~大雨。

### 2.3.3 连阴雨诱发型

前期出现连续约 40 d 的小~中雨 (可有 4 d 以下间隔, 但 40 d 内有 25 个以上雨日), 其间有 3 个相对集中的降水时段, 有多个中雨以上雨日。山地地质灾害发生前 40 d 内无暴雨日, 但一直维持连绵阴雨, 由于降水强度不大, 降水被土壤完全吸收。降水的持续, 使土壤含水量达到过饱和状态, 原来稳定的土壤结构被破坏后, 产生了山地地质灾害。诱发此类型山地地质灾害个例 22 个, 占总数的 4%, 出现概率较小。但多诱发大面积滑坡灾害, 造成的损失较大。

实例: 2001-09-02 洱源山地地质灾害, 灾害发生的当日并无降水, 而在前 5~6 d、前 16~22 d、前 33~39 d 这 3 个时段内降水较集中, 降水强度也较小, 有 2 个以上 10 mm 以上降水日。

另外, 在分析研究的 525 个例子中, 有 36 例当日和前期当地气象站没有记录到强降水出现, 但发生地却有强降水发生。

## 3 预警气象信息的监测

云南早在 1961 年就在东川蒋家沟下游红山嘴

建立了泥石流观测站, 该站后来由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所负责, 于 1984 年建成全国唯一的半自动化泥石流观测站。主要观测项目是降水、泥位、流态、流速、冲淤、样品分析等。暴雨泥石流是否发生主要取决于流域前期含水量及本次降雨强度, 其次是固体物质的积累及补给状况。滑坡观测主要是边坡稳定性监测, 涉及降水、温度、地下水位、下沉、变形等。

强降雨是诱发云南山地地质灾害的最直接原因, 降水监测是滑坡、泥石流灾害预警的基础。通过建立云南综合气象监测系统, 建成覆盖全省、密度适宜、布局合理的三维立体大气监测系统, 实现对暴雨等中尺度灾害性天气的有效监测, 提供灾害性天气系统较为准确的位置及强度, 以及强降水面雨量和雨量极值监测, 提供满足滑坡、泥石流防御所需的 3~12 h 短时预报和 0~3 h 临近警报, 可提高滑坡、泥石流灾害的监测预警能力。目前存在的主要问题是云南汛期多中小尺度单点性强降水发生, 由于离气象观测站较远, 加之全省观测站只有 125 个, 空间分布较稀, 不一定能监测到强降水的发生, 给地质灾害的监测和预报带来了困难, 尤其是在山区, 气象监测基本还是空白。通过在全省布设时间和空间加密的气象站网可以实现对降水的有效监测。

### 3.1 多普勒天气雷达站网

多普勒天气雷达回波可反演定量测量降水和提供过程累计降水量信息, 能够连续跟踪监测突发性强对流和连续性大范围降水等灾害性天气过程, 提高短时预报预警能力。通过建设多普勒天气雷达, 可提高影响滑坡、泥石流灾害发生的强降雨和长时间降雨的预报准确率, 同时还能为滑坡、泥石流灾害发生后政府指挥救灾抗灾提供更及时的气象服务。目前云南气象部门已在昆明、昭通、文山、思茅、德宏和丽江建成了 6 部多普勒天气雷达站, 探测半径为 300 km, 雷达拼图基本实现了全省覆盖, 每 6 min 就可以得到一幅雷达体扫图像。

### 3.2 自动气象站和自动雨量站网

1. 自动气象站: 自动气象站可进行降水、气压、气温、湿度、风向、风速等项目的连续监测, 进行数据处理并及时通过通信网络完成实时观测信息的传送。通过建立自动气象站, 可弥补目前气象资料探测空间和时间分辨率的不足, 可以提高气象资料的监测密度, 从而提高滑坡、泥石流灾害预报

精度和预报准确率。在滑坡、泥石流灾害频发区, 自动气象站间距可设计为 20 km 左右。目前云南已建成 56 个自动气象站, 可实时传送气象观测资料。

2. 自动雨量站: 自动雨量站可对降水进行实时监测, 通过通信网络实时传送雨量信息。

自动雨量站作为自动气象站的补充, 主要用于天气雷达定量估测降水, 提高雨量监测精度。自动雨量观测站间距可设计为 15~20 km。在滑坡泥石流灾害频发区, 自动雨量站间距可设计为 5 km 左右。在全省 1 500 多个乡镇布设自动雨量站是既经济又实用的监测手段。

### 3.3 闪电定位监测站网

雷电活动往往与导致滑坡、泥石流灾害发生的暴雨等强对流天气现象密切相关。闪电定位监测仪通过对雷电辐射的声、光、电磁场信息的测量, 进而确定雷电放电的空间位置和放电参数, 实时监测探测范围内雷暴的发生、发展、移动方向等, 从而加强灾害性天气的监测和预报, 提高滑坡、泥石流灾害强降雨预报准确率。闪电定位监测与天气雷达相配合, 可以更好地发挥雷达的作用。闪电定位监测站间距可设计为 100 km, 在全省布设 20 部即可有效监测。

### 3.4 地球观测系统 (EOS) 站网

地球观测卫星可以对整个地球从陆地、海洋到大气层, 用可见光和红外光谱, 以 1~2 d 的全球覆盖周期进行全方位的系列观测, 包括地球表面特性、雷暴、云、辐射和气溶胶, 以及辐射平衡、森林植被和生态环境监测等, 具有视野广阔、快速、经济、动态性强的特点。建立地球观测系统 (EOS) 探测信息地面接收站, 将卫星数据实时处理成区域各通道图像、彩色合成图像等, 开发研制诸如植被指数、晴空亮温、云分类图、水汽分布图、洪水监测等多种卫星定量遥感产品。将其应用到滑坡、泥石流灾害预警中, 一方面可以开展水汽含量的定量反演, 对中短期天气进行监测预报, 提高滑坡、泥石流灾害预报准确率, 另一方面可以实时遥感监测滑坡、泥石流发生发展情况以及地表生态环境状况, 为各级政府指挥救灾提供技术保障。目前云南气象部门已在昆明建成 EOS 地面接收站。

### 3.5 静止气象卫星站网

FY 系列静止气象卫星可实现对中国区域的大气变化连续监测, 获取可见光和红外光云图, 云中

水汽含量、云顶温度等信息, 可反演得到降水量, 为滑坡、泥石流灾害的监测提供丰富的图像产品。目前云南气象部门已在昆明、大理、曲靖、西双版纳、保山、红河、临沧、怒江、楚雄建立了静止气象卫星地面接收站。全省 125 个气象台站可通过 PCVAST 通信实时接收每小时一次的静止气象卫星图像和数值, 反演制作 0~6 h 雨量等级预报。

### 3.6 土壤水分监测网

土壤水分监测仪通过探测器感应土壤水分的变化情况, 通过数据采集器自动、定时接收多支土壤水分探测器测定的土壤水分记录, 与通信网络连接, 将资料实时上传, 为滑坡、泥石流灾害预警提供资料情报。土壤水分监测站间距可设计为 40 km。在滑坡、泥石流灾害频发区, 土壤水分监测站间距可设计为 20 km 左右。

### 3.7 地基 GPS 水汽遥感监测网

水汽在滑坡、泥石流灾害预报应用中具有极其重要的作用, 通过地基 GPS 水汽遥感监测, 可以获得高时空分辨率、达到毫米精度的水汽资料, 以填补探空资料在时间空间分辨率上的不足, 提供快速变化的空中水汽信息。这种信息通过资料的四维同化, 对改进中尺度数值预报模式精度, 提高滑坡、泥石流预报准确率有很好的应用前景, 地基 GPS 水汽遥感监测站间距设计为 100 km。

### 3.8 中尺度数值模式

中尺度数值模式可给出分辨率达 10 km 左右的降水定量预报, 输出 6~48 h 间隔的雨量预报, 结合地质灾害危险区划, 可制作地质灾害等级预报。主要关键技术是模式中对上述资料的同化处理 and 高原复杂地形处理, 提高预报精度。

## 4 结论

1. 云南是我国地质灾害严重的省份之一。20 世纪 90 年代以来, 地质灾害年均直接经济损失 4.5 亿元, 年均死亡 169 人。

2. 云南滑坡、泥石流灾害有其形成的独特环境与分布特征。气候类型多样, 降雨季节性强, 降水集中, 局地暴雨多是激发滑坡、泥石流灾害的主要自然因素之一。

3. 云南滑坡、泥石流灾害主要出现在盛夏 7~8 月, 主要影响天气系统有切变线、冷锋、西风槽、西南涡、孟加拉湾风暴、南海西行台风和两高

辐合区。

4. 诱发云南滑坡、泥石流灾害的前期降水类型主要有 3 种, 即暴雨型, 中~大雨型和连阴雨型, 得出了滑坡、泥石流发生的区域临界雨量指标。

5. 提出了云南滑坡、泥石流灾害的气象监测预警方法, 即建立多普勒天气雷达站网、自动气象站和自动雨量站网、闪电定位监测站网、地球观测系统站网、静止气象卫星站网、土壤水分监测网、地基 GPS 水汽遥感监测网和中尺度数值模式。

## 参考文献 (References):

- [1] Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan, *et al.* Regional Forecasting of Debris Flow and Landslide under Rainstorm [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. 205~208. [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 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 205~208.]
- [2] Tang Bangxin, *et al.* Flood, Debris Flow, Landslide and Hazard Control [M]. Beijing: Science Press, 1994. 83~100. [唐邦兴等. 山洪、泥石流、滑坡灾害及防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 83~100.]
- [3] Wang Lixian, Yu Zhimin. Prediction on Damage of Mountain Torrent and Debris Flow [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House. 2001. 31~38. [王礼先, 于志民. 山洪及泥石流灾害预报 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001. 31~38.]
- [4] Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. Research and Prevention of Debris Flow [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 121~134, 249~262. [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 121~134, 249~262.]
- [5] Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Minister of Water Resource. Debris Flow in China [M]. Beijing: Commercial Press, 2000. 60~71. [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流 [M]. 北京: 商务印书馆, 2000. 60~71.]
- [6] Wang Jinglai, Yang Zihan. Yunnan natural disaster and reduction study [M]. Kunming: Yunnan University Press, 1998. 113~158. [王景来, 杨子汉. 云南自然灾害与减灾研究 [M]. 昆明: 云南大学出版社, 1998. 113~158.]
- [7] Tang Chuan, Zhu Jing, *et al.* Study on landslides and debris flow of Yunnan [M]. Beijing: Commercial Press, 2003. 101~154. [唐川, 朱静, 等. 云南滑坡泥石流研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2003. 101~154.]
- [8] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, *et al.* Debris Flow Observation and Research in Jiangjagou, Yunnan [M]. Beijing: Science Press, 1990. 197~212. [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社,

1990. 197~ 212.]
- [9] Qin Jian, Xie Mingen, Liu Yu, *et al.* Introduction to Meteorological Disasters in Yunnan Province [M]. Beijing: Meteorological Press, 2000. 130~ 191. [秦剑, 解明恩, 刘瑜, 等. 云南气象灾害总论 [M]. 北京: 气象出版社, 2000. 130~ 191.]
- [10] Yunnan Provincial Disaster Prevention Association. The 40 Years Investigation of Major Disasters in yunnan [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1999. 1~ 24. [云南灾害防御协会. 云南省四十年主要灾害调查 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1999. 1~ 24.]
- [11] Peng Guifen. The relationship between geological disasters and precipitation in Yunnan Province [A]. In: Collected papers of meteorological forecasting and warning technology on geological disasters [C]. Beijing: Meteorological Press, 2004. 172~ 176. [彭贵芬. 云南气象地质灾害与降水的关系 [A]. 见: 地质灾害气象预报预警技术文集 [C]. 北京: 气象出版社, 2004. 172~ 176.]
- [12] Zhang Hongbing, Jin Deshan. Some natural factors influencing on activity of landslide and debris flow in Yunnan Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, **31** (5): 38~ 41. [张红兵, 金德山. 影响云南省滑坡泥石流流活动的几个自然因素 [J]. 水文地质工程地质, 2004. **31** (5): 38~ 41.]
- [13] Tang Chuan. Investigation and analysis on regional features of debris flow hazards [J]. *Research on Yunnan Geographic Environment*, 1997, **9** (1): 1~ 10. [唐川. 云南泥石流灾害区域特征调查与分析 [J]. 云南地理环境研究, 1997, **9** (1): 1~ 10.]
- [14] Yao Xuexiang, Xu Jing. Multi discipline forecast and warning engineering system on sediment related disasters [J]. *Engineering Science*, 2004, **6** (6): 9~ 14. [姚学祥, 徐晶. 跨学科的地质灾害预警工程 [J]. 中国工程科学, 2004, **6** (6): 9~ 14]
- [15] Cui Peng, Liu Shijian, Tan Wanpei. Progress of debris flow forecast in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, **9** (2): 10~ 15. [崔鹏, 刘世建, 谭万沛. 中国泥石流监测预报研究现状与展望 [J]. 自然灾害学报, 2000, **9** (2): 10~ 15.]

## The Cause of Meteorological Formation and Monitoring on Landslide and Debris Flow Disasters in Yunnan

XIE Mingen<sup>1</sup>, CHENG Jiangang<sup>1</sup>, FAN Bo<sup>2</sup>

(1. Meteorological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650034, China;

2. Simao Municipal Meteorological Bureau of Yunnan Province, Simao 665000, China)

**Abstract:** The formation environmental background and distribution about landslide and debris flow disasters in Yunnan Province have been analyzed by using historical natural disaster data. It is shown for typical disaster events of landslide and debris flow caused by rainfall from 1965 to 2002, the relationship between landslide, debris flow disasters and meteorological environment has been studied. Landslide and debris flow disasters in Yunnan occur mainly in July and August in the midsummer, major influencing synoptic systems includes shear line, cold front, westerly trough, southwest vortex, storm of the Bay of Bengal, westward typhoon from the South China Sea and convergence area between two highs. There are three precipitation patterns in early days caused landslide and debris flow disasters in Yunnan which includes rainstorm, moderate heavy rain and cloudy rainy weather for several days. The regional critical rainfall comprehensive index caused landslide and debris flow disasters has been given: finally, the meteorological monitoring and warning technical methods with landslide and debris flow disasters are further discussed.

**Key words:** landslide; debris flow; meteorology; precipitation; monitoring and warning