

四川省德昌县群发性泥石流的特征和成因

苏鹏程^{1,2,3}, 韦方强^{1,2}, 顾林康⁴, 倪化勇⁵

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 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; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

4. 凉山州气象局, 四川 西昌 615000; 5. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 地处川西南的德昌县近年来由局地暴雨诱发的泥石流造成了严重的经济损失。通过德昌群发性泥石流事件中局地暴雨过程和地面条件的分析, 探讨了泥石流形成过程中的雨地耦合关系。根据 TM 遥感影像 (30 m) 解译, 德昌泥石流分布具有明显的区域规律, 以安宁河及其支流茨达河流域最为集中, 安宁河支流老碾河流域次之。根据泥石流的分布特征, 结合流域的高程、坡度、地层岩性等信息, 分析了泥石流易发区域的流域坡度以及 NDVI 特点, 并将两者结合起来进行泥石流易发区的判别, 准确率达 92%。因此, 遥感影像的光谱差异可以作为识别群发性泥石流地区的遥感标志之一。此类泥石流易发区的下垫面判别准则有两条: (1) 流域平均坡度大于 20°; (2) NDVI 介于 0.1~0.3。将泥石流易发区的下垫面识别与诱发泥石流的局地暴雨过程结合起来分析, 泥石流灾害的时空分布取决于暴雨中心落点及移动路径, 以德昌 2004-08-24 群发性泥石流进行了实验验证, 结果表明泥石流最终的暴发相对于局地暴雨的峰值过程约有 1 h 的滞后时间, 此时段正是实施临灾预警的关键时间。据此, 提出了群发性泥石流的减灾思路。

关键词: 局地暴雨; 群发性; 泥石流; 成因

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流是西南山区常见的自然灾害之一, 常由局地暴雨引起。在四川攀西地区, 由暴雨引发的泥石流灾害, 其数量和造成的损失可以达到灾害总数的 90% 和 95% 以上^[1]。而由局地暴雨引起的群发性泥石流是此类灾害发生的极端形式, 由于多沟并发, 容易叠加造成更为严重的破坏。如 1999-12-16 在高强度暴雨激发作用下, 委内瑞拉北部沿加勒比海地区的数十条沟谷暴发了泥石流, 这次群发性泥石流灾害共造成了 3 万余人死亡, 其中纳依瓜塔市的小镇卡门德乌里亚几乎完全被泥石流摧毁^[2]。群发性泥石流在成灾过程中由于点多、面广的特点, 其破坏性极强, 是泥石流防灾减灾工作的难点。地

处四川省凉山彝族自治州 (简称凉山州) 南部的德昌县, 近年发生了多起群发性泥石流灾害, 造成了严重的损失^[5-7]。因此, 分析此类灾害的特征和成因, 对今后泥石流灾害预警和防治工作具有重要的意义。

1 研究区概况

德昌县县城所在地德州镇距离凉山州府西昌市 68 km, 全县面积 2 284 km², 辖 3 镇 20 乡 (图 1)。境内地形北高南低, 螺髻山与耗牛山东西对峙, 安宁河由北向南贯穿全境, 地形相对高差达 3 244 m, 巨

收稿日期 (Received date): 2009-05-27; 改回日期 (Accepted): 2010-07-29。

基金项目 (Foundation item): 国家科技支撑计划课题 (2008BAK50B04)、公益性行业 (气象) 专项 (GYHY201006039) 资助, 及科技部国际合作项目 (09B2420420) 资助。 [Supported by the national Science and Technology Program of China (2008BAK50B04) and also by Special funds for Meteorological Commonweal Project (GYHY201006039) and International collaboration program of the Ministry Science and Technology (09B2420420).]

作者简介 (Biography): 苏鹏程 (1981-), 男, 安徽桐城人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事山地灾害风险评价与预测方面的研究。 [Su Pengcheng (1981-), male, was born in Tongcheng Anhui province, Ph.D student, assistant researcher, majoring in mountain hazards risk assessment and prediction.] E-mail: supengcheng@imde.ac.cn

大的地形差异造就了德昌气候特征为以亚热带高原季风气候为基带的立体气候。依据成都水文地质工程地质中心完成的《四川省凉山彝族自治州德昌县地质灾害区划报告》德州镇(海拔 1 380 m)多年平均降水量 1 049 mm, 年均气温 18℃, 无霜期 300 d 以上, 常年日照数为 2 147 h。县境南部的茨达、宽裕至永郎、锦川、老碾一带是德昌的多雨区, 多年平均降雨量超过 1 400 mm (见图 1)。德昌属于长江上游林区, 森林覆盖率为 59.9%, 境内主要水系有雅砻江、安宁河及其支流茨达河与老碾河。

德昌位于扬子准地台内的凉山隆褶带, 属于康滇古陆攀西裂谷系的中段, 基底由前震旦系会理群变质岩系构成近东西向的构造线, 盖层构造线则呈南北展布。自下古生代以来, 由于构造运动影响, 部分地层缺失, 断裂发育, 岩浆活动频繁。印支运动期, 不但复活了南北向断层, 还产生了一些东西向的横断层, 导致区内断层、褶皱发育, 构造运动表现明显, 并以上升为主。河谷深切, 岩体节理、裂隙十分

发育, 阶地较狭窄, 并以基座阶地为主。域内除志留系、泥盆系和石炭系地层缺失外, 从前震旦系至第四系地层均有出露。从地层岩性的分布情况来看, 前震旦系地层主要分布于安宁河谷的小高、乐跃、金沙、锦川、老碾、南山以及茨达河流域的宽裕、茨达等地, 岩性以千枚岩、变质砂岩为主, 岩层较为破碎。侏罗系、三叠系地层则广泛分布于雅砻江至牦牛山一带。第四系地层则分布于安宁河河谷地区。

2 群发性泥石流灾害及其特征

德昌县近年来发生了多起群发性泥石流事件, 2004-08-24 境内 9 条沟谷同时暴发了泥石流灾害, 给当地居民造成了重创^[6]。2006-09-18 永郎镇永春村暴发泥石流, 造成 5 人失踪^[5]; 2009-08-18 暴雨致使茨达乡政府驻地后方的大沟、烧房沟和郑打铁沟暴发泥石流, 造成 45 户房屋倒塌和受损^[7]。上述群发性泥石流事件中, 尤以 2004-08-

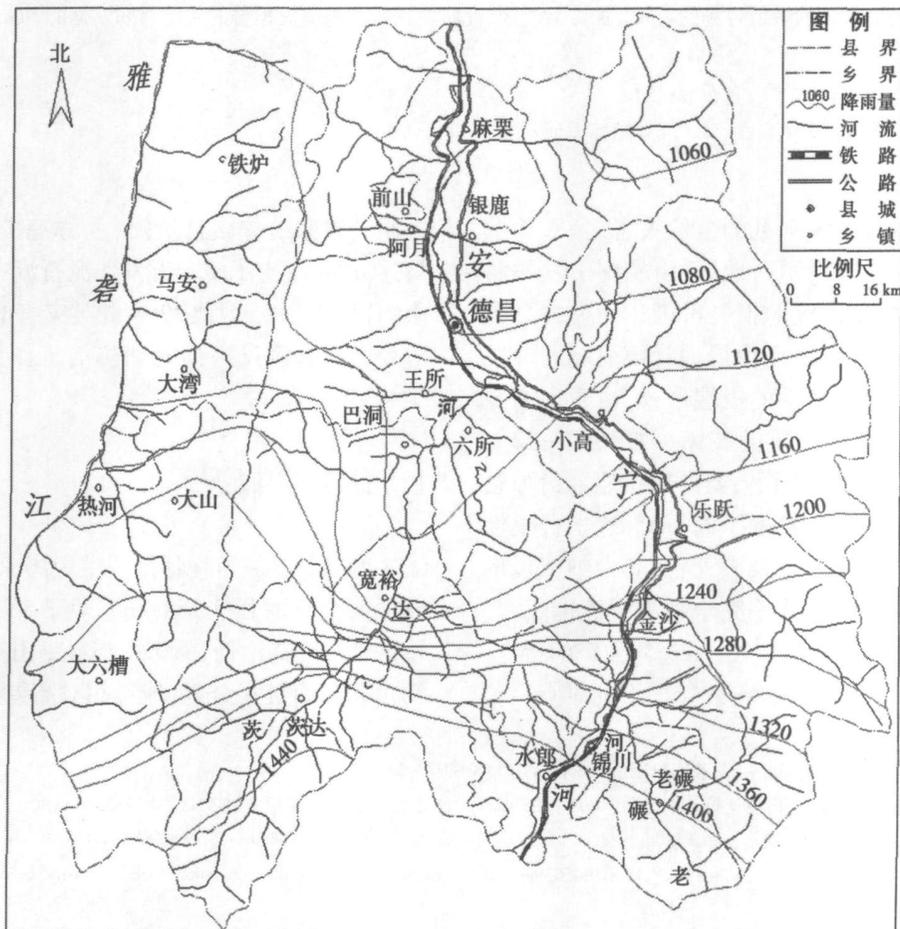


图 1 德昌行政区划与多年平均降雨等值线分布图

Fig 1 Administration division and distribution of rainfall isoline of Dedang County

24 的泥石流灾害最为严重和典型。本研究拟重点针对此次灾害事件的特征和成因进行详细分析。

2.1 泥石流灾害特征

2004-08-23~25 德昌县境内出现大雨, 发生了一次严重的泥石流灾害事件。其中茨达、宽裕两乡达到了暴雨量级(8月24日白天~25日凌晨, 茨达乡雨量达到 70.9 mm, 锦川乡 54.2 mm; 宽裕乡 38.2 mm), 局地暴雨造成安宁河一级支流茨达河右岸的凉峰沟、龙板沟、改洞沟、凹米罗沟、麻湾沟、春碛湾沟、虎皮湾沟、文家沟、大陆槽沟、麻湾沟 9 条沟谷同时发生了泥石流。其最突出特点是群发性, 给当地居民造成了重创(图 2~3)。

2.3 泥石流分布特征

据调查, 德昌县境内分布有 37 条泥石流沟, 仅占山地灾害(包括滑坡)总量的 27%, 但其造成的人员死亡数量和经济损失分别高达 80.43% 和 88.75%¹⁾。德昌境内的 37 条泥石流沟谷基本参数见表 1, 其分布的地理位置见图 4。按水系划分, 泥石流灾害主要沿安宁河流域及其支流茨达河两岸分布。泥石流沟沿安宁河干流分布有 21 条, 沿茨达河分布有 13 条, 老碾河分布有 2 条, 在雅砻江流域仅 1 条。以泥石流沟谷分布密度而言, 茨达河右岸最为集中, 因而该区域也成为泥石流灾害最为严重的地区(见图 4)。

就形成条件而言, 流域的地形和物源条件是形成泥石流的内因, 而雨量条件属于外因。高程和坡度反映了地形条件, 地层岩性和气候条件组合影响着物源的风化和积累速度。因此, 本研究以 1:5 万的 DEM 为基础, 分析了德昌境内的泥石流沟谷分布与高程、坡度和地层岩性的关系(图 5~7)。从泥石流在高程和坡度图的分布情况看, 安宁河流域左岸的高程较境内其他流域都高, 地形更为陡峻, 坡度大于 20° 的区域主要分布于该地区, 并且泥石流流域的物源区都集中于此区域。从地层岩性来看, 泥石流主要发育于震旦纪(Z)、二叠纪(P)和三叠纪(T)地层区域, 岩性以千枚岩、变质砂岩为主, 岩层较为破碎。

3 群发性泥石流灾害成因

3.1 2004-08-24 泥石流气象成因

从形成泥石流的外因即雨量条件来看, 局地暴

雨是其中最活跃的激发因素, 它影响和决定着泥石流发生的时空分布和规模, 因而局地暴雨对泥石流灾害预报具有重要指示意义。

3.1.1 卫星云图云系

根据卫星云图分析(图 8), 2004-08-22 朝鲜经重庆到凉山有条稀薄的中低云带东南压, 并逐渐减弱, 青藏高原经四川盆地到凉山州大部有大片中低云云系覆盖, 至中午在原地减弱。13:00 昌都到九龙开始出现零星对流云团, 此云团发展东南移动。到 23T00 时, 凉山州南部出现对流云团持续到 12:00 才减弱, 造成了德昌的大雨天气。根据凉山州 15 个气象站的雨量监测数据, 此段时间暴雨中心位于凉山州南部的宁南一带(表 2)。08-23T14:00 昌都到九龙再次出现零星对流云团, 此云团逐渐发展并缓慢东南移, 24T00 时移至凉山州北部, 同时在凉山州南部德昌附近的对流云系在发展, 到 04:00 发展为中等范围的强对流云团, 位置少动, 此云团持续到 24T08:00 才开始原地减弱, 12:00 消散。正是此次强对流天气造成了德昌的大雨天气, 德昌县城所在的德州镇的雨量达到大雨量级, 茨达、宽裕两乡雨量达到暴雨量级。其中, 08-22T20:00~23T08:00 茨达乡、宽裕乡的降雨量分别达到 100.2 mm 和 76.8 mm; 08-23T20:00~24T08:00 茨达、宽裕乡的降雨量分别为 73.6 mm 和 84.1 mm, 并且降雨主要集中在凌晨的 2:00~3:00 降雨量也远高于德昌县城(图 9)。此段时间, 局地暴雨中心的位置正处于德昌境内的茨达乡一带。根据实地访问, 此次群发性泥石流灾害的发生时段正是在 08-24T03:00~04:00 这与局地暴雨的中心落点一致(见表 2)。08-24T16:00 凉山州东南部边缘为积云控制, 甘孜藏族自治州境内有对流云团发展, 此云团进一步发展并向东南方向移动, 在 25T01:00 移到凉山州以后处于停滞状态, 2:00 在原地发展成强对流云团, 此后范围扩大, 持续到 10:00 才减弱南移。此对流云团造成了凉山州的强降水天气, 并再次造成德昌茨达乡的暴雨天气。但此段时间雨量已经降低, 并且暴雨中心已移至攀枝花市境内的米易县以及凉山州北部的木里、喜德一带, 所以未造成泥石流灾害。通过上述卫星云图, 并结合地面的雨量监测, 在 08-22~24 的暴雨过程中, 伴随着大范围的降雨天气, 暴雨中心沿着宁南-茨达-米易由北向南转移(见表 2)。

1) 四川省地矿局成都水文地质工程地质中心. 四川省凉山彝族自治州德昌县地质灾害调查与区划报告. 2005. 6



图2 2004-08-24 泥石流导致大量固体物质淤塞沟道
 Fig.2 Many solid matter blocked main channel which was carried by debris flow on August 24, 2004

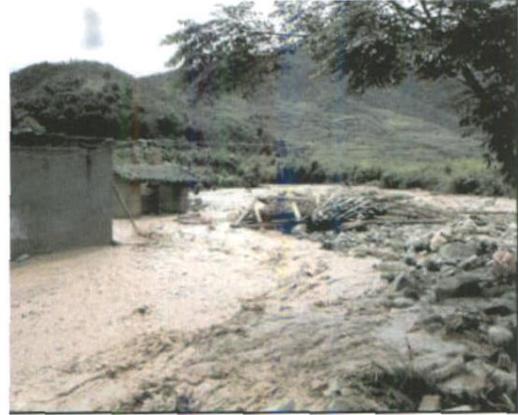


图3 2004-08-24 泥石流携带大量沙石淤埋民房
 Fig.3 Many mud and sand covered civil houses which was carried by debris flow on August 24, 2004

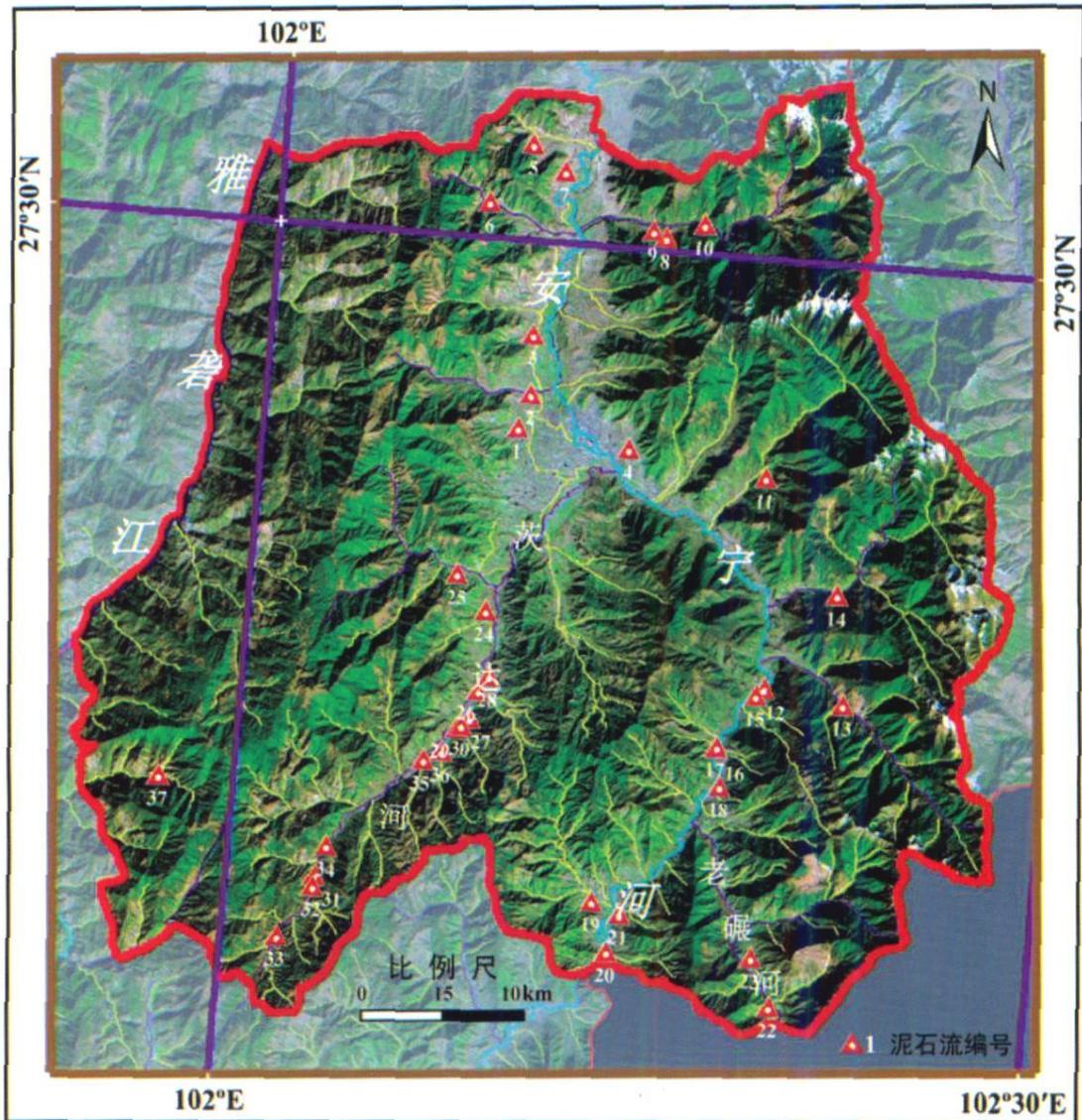


图4 德昌泥石流分布与水系关系图

表 1 德昌县泥石流沟谷统计表

Table 1 Statistical table of debris flow gullies in Dechang County

序号	沟名	所在行政区	流域面积 (km ²)	纵坡比降 (‰)	主河	岸别
1	沙湾沟	德州镇果园村桃园六社	13.5	207	安宁河	右岸
2	角半沟	德州镇角半村十社	47.1	167	安宁河	右岸
3	青龙沟	德州镇凤凰村四社	4.5	220	安宁河	右岸
4	白鹤沟	德州镇阿营村六社	1.2	400	安宁河	左岸
5	小湾子沟	前山乡光辉村五社	0.9	494	长沟	右岸
6	小沟	前山乡小沟村一、四社	17.0	191	安宁河	左岸
7	石岩沟	阿月乡福隆村五社	0.4	472	安宁河	右岸
8	干沟	银鹿乡干海村二社	1.5	467	鹿厂沟	右岸
9	毛羊厂沟	银鹿乡干海村一、二社	2.5	464	鹿厂沟	右岸
10	三锅庄沟	银鹿乡干海村六社	2.5	469	鹿厂沟	右岸
11	马厂沟	小高乡黄草村四社	1.7	349	群英沟	左岸
12	猪儿湾沟	乐跃镇腊鹅一社	1.2	526	安宁河	左岸
13	汪家沟	乐跃镇跑马村一、三社	6.0	452	乐跃沟	左岸
14	小湾子	乐跃镇铜厂村一社	0.5	546	二道沟	左岸
15	马家沟	乐跃镇大福村五社	3.8	393	安宁河	左岸
16	大沟	金沙乡观音堂村大沟社	1.8	423	安宁河	左岸
17	标水岩沟	金沙乡观音堂村标水岩社	12.2	261	安宁河	右岸
18	江家沟	锦川乡蒲坝村	1.3	500	安宁河	左岸
19	庙地沟	永郎镇永进村九社	5.3	157	可朗河	右岸
20	纸房沟	永郎镇永红村二社	6.0	247	安宁河	左岸
21	杨家沟	永郎镇永春村四社	4.1	263	安宁河	左岸
22	纸房楼沟	老碾乡纸房村三社	10.1	262	老碾河	右岸
23	河坝沟	老碾乡大村四社	7.0	624	老碾河	右岸
24	东瀛庙沟	巴洞乡前进村三社	3.3	291	茨达河	左岸
25	干沟	巴洞乡松柏村二社	1.4	300	松柏河	右岸
26	凉峰沟	宽裕乡花园村四社	21.0	103	茨达河	右岸
27	龙板沟	宽裕乡铁厂村八社	1.4	356	茨达河	右岸
28	改洞沟	宽裕乡花园村四社	2.6	244	茨达沟	右岸
29	老沟	宽裕乡铁厂村七社	8.3	251	茨达沟	右岸
30	凹米罗沟	宽裕乡铁厂村	0.5	105	茨达河	右岸
31	垮土湾	茨达乡和平村一社	0.4	550	茨达沟	右岸
32	麻湾沟	茨达乡和平村一社	0.6	461	茨达沟	右岸
33	沙石湾	茨达乡和平村四社	0.4	480	茨达沟	右岸
34	春碛湾沟	茨达乡新胜村 11 社	0.9	480	茨达沟	左岸
35	虎皮湾沟	茨达乡跃进村三社	12.9	167	茨达沟	右岸
36	文家沟	茨达乡跃进村六社	0.3	520	石家河	右岸
37	大陆槽沟	大陆槽乡大陆槽村二社	12.0	300	雅砻江	右岸

注: 表中编号带* 部分表示该沟谷在 2004-08-24 发生了泥石流。

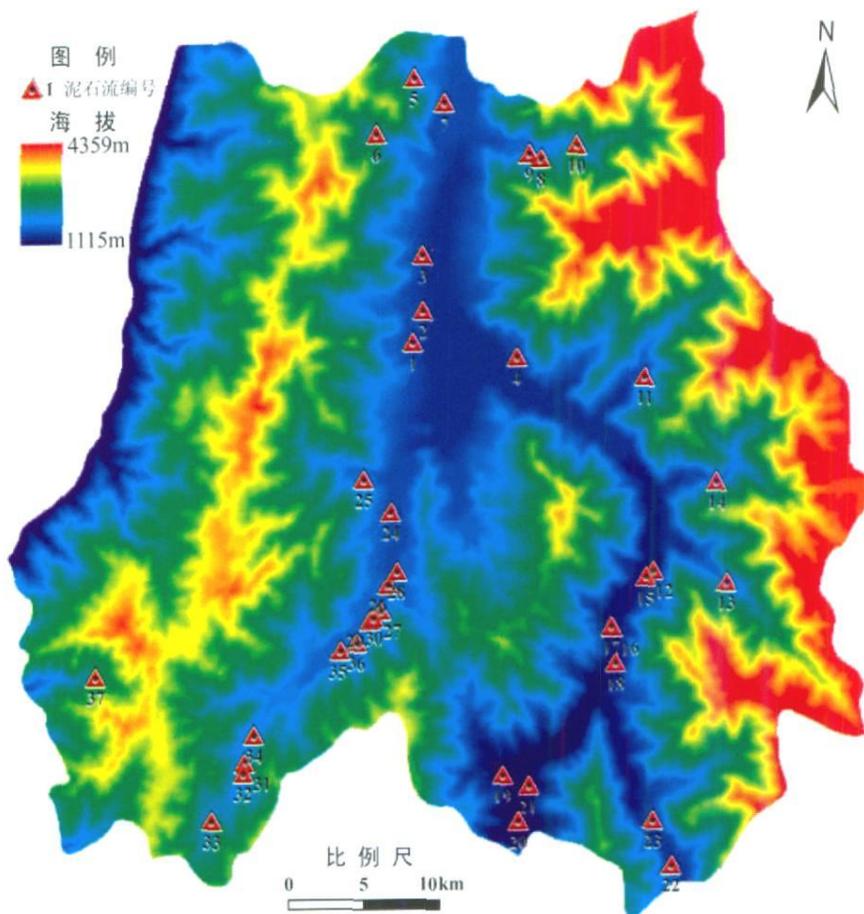


图 5 德昌泥石流分布与高程关系图

Fig 5 Distribution map of debris flow with elevation in Dechang County

表 2 德昌 2004-08-24 暴雨过程邻近站点雨量统计表 (mm)

Table 2 Statistical table of rainfall around Dechang meteorological station during August 24, 2004 rainstorm (mm)

站点名称	20日水量	21日水量	22日水量	23日水量	24日水量	25日水量
西昌		7.9	16	4.4	5.6	46.6
德昌		5.5	6	38	42.6	34.5
普格	0.1	11.6	11	38.6	14.9	43.2
宁南		6.8	0.1	94.8	2	58
会理		0.9	1.4			42
木里	0.4			9.9		42.1
盐源	0.2	0.9	0.1			27.1
冕宁	2.8	7.1	36.8	38.9	22.2	17.9
越西	2.3	5	40.5	37.7	33.1	13.4
喜德	18.8	2.8	45	14.1	28.3	51
昭觉	0.9	2.3	22.3	5.4	0.2	32.2
会东	33.4	5		4.1		25.6
布拖		1.6	12	11.9	1.8	34.7
美姑	7.5	1.8	4.5	0.4	3.1	17.5
雷波	4.3	1	4.6		0.3	11.5

* : 表中粗体部分表示为当日雨量达到暴雨量级 (单位: mm)。

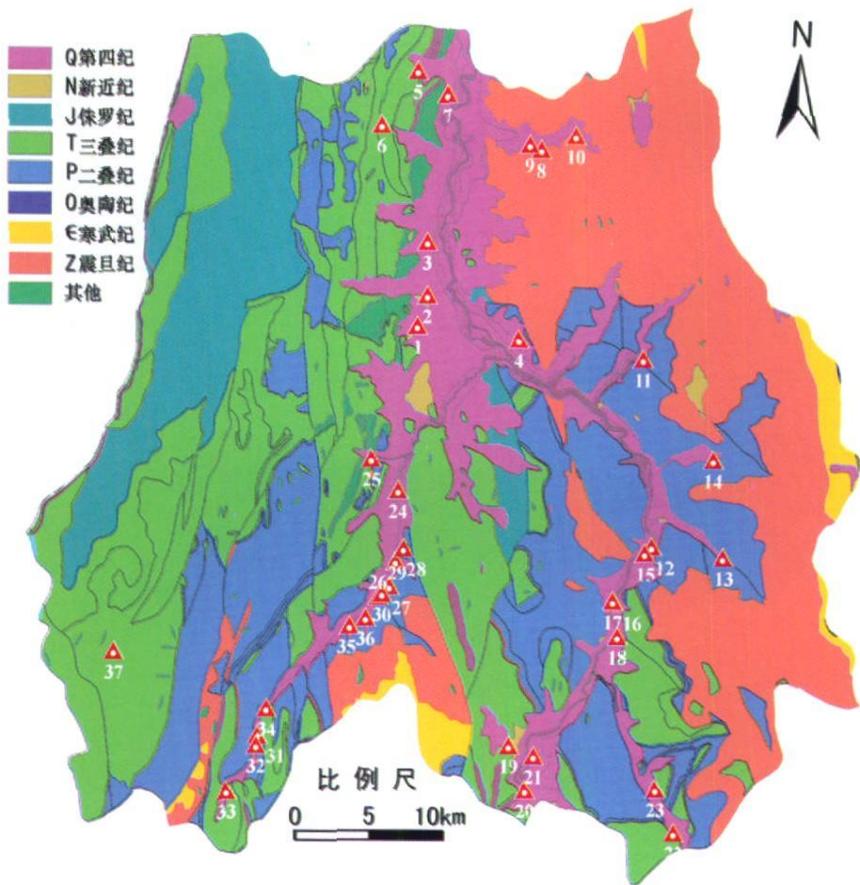


图 6 德昌泥石流分布与地层岩性关系图

Fig. 6 Distribution map of debris flow with formation lithology in Dechang County

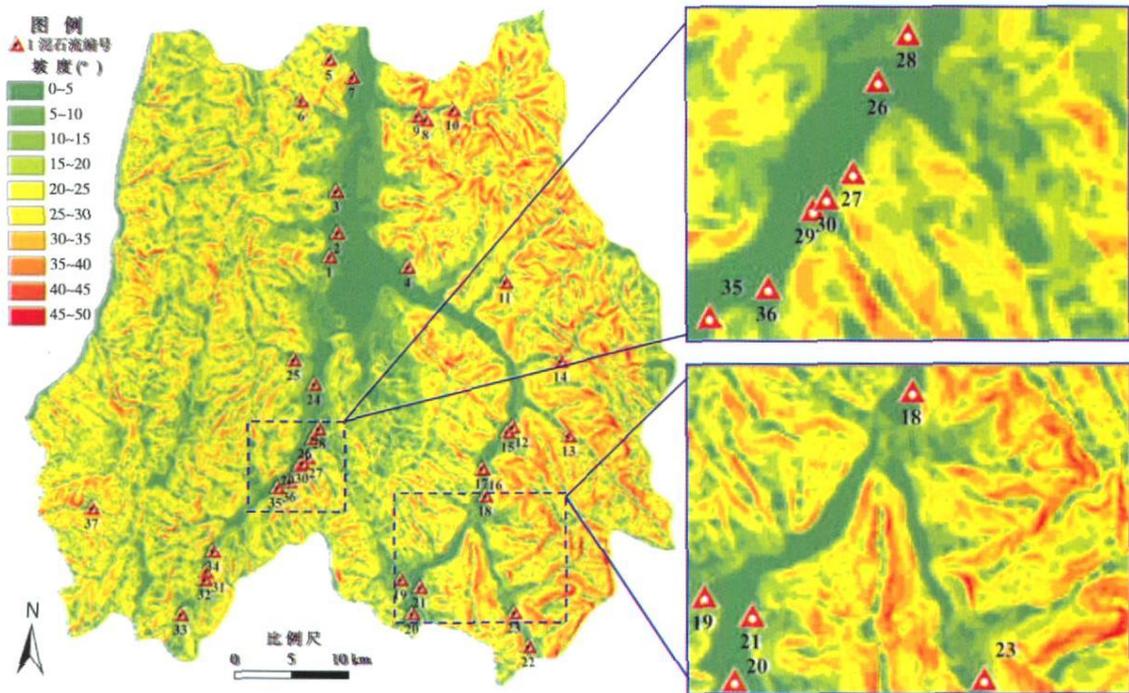


图 7 德昌泥石流分布与坡度关系图

Fig. 7 Distribution map of debris flow with slope in Dechang County

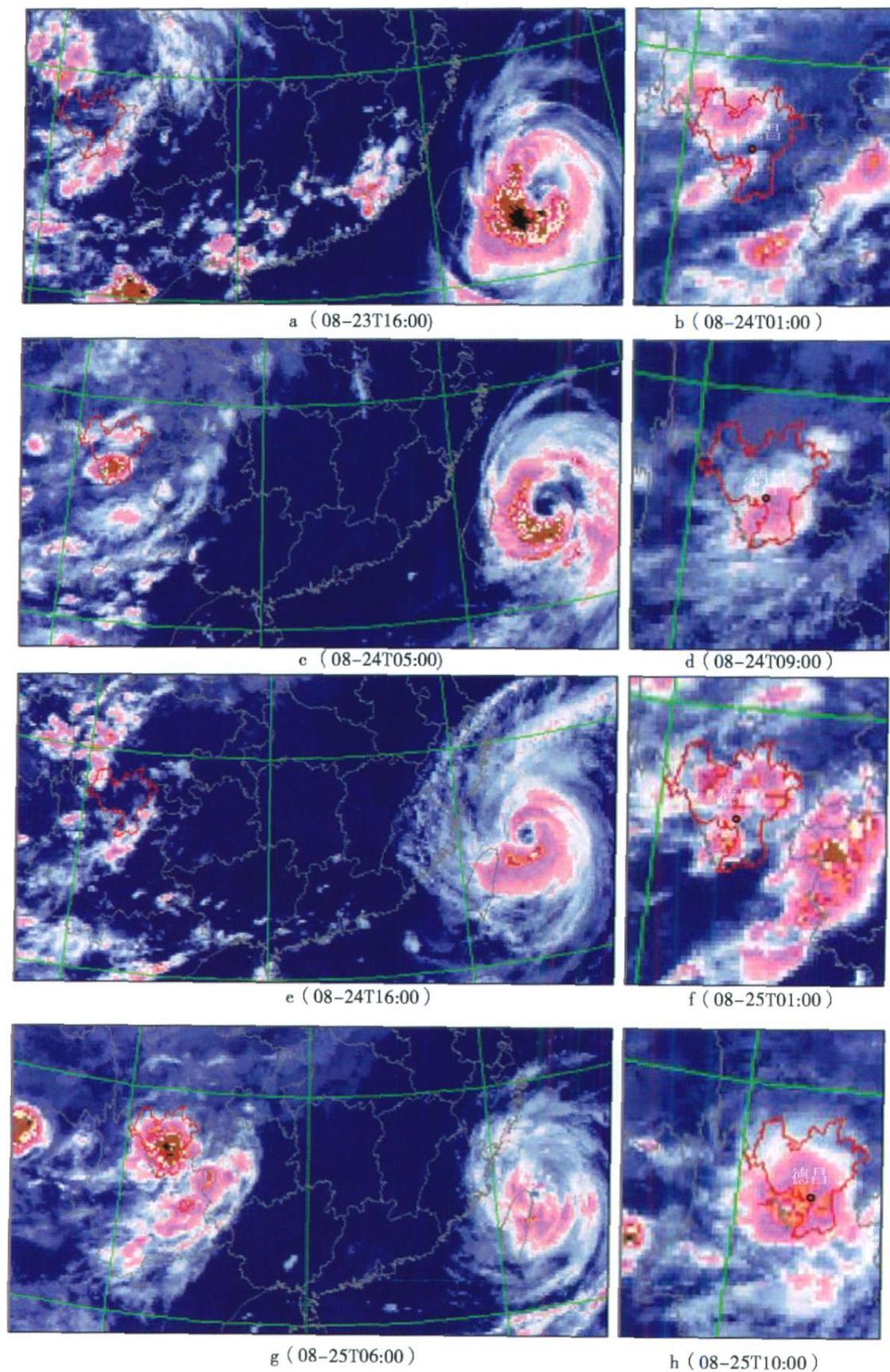


图 8 2004-08-22T12:00~08-25T10:00 卫星云图

3.1.2 天气形势

结合此次降水过程的天气形势, 08-23T08 00 高空上有弱切变系统影响凉山州天气, 台风“爱利”向西北方向移动, 于 25 日晚在东南沿海登陆。受其影响, 短期内副高高度场有所减弱, 但环流仍比较完整, 凉山州刚好位于副高西侧, 整个对流层都处于准饱和状态, 加之巴湖与贝湖的冷槽东移缓慢, 诱发高原波动生成。这种高原多波动与低层辐合流场结合的型式是研究区的多雨型式之一, 此段时间, 整个凉山州高低层都处于两高间的低值区, 此种形势非常有利于降水的持续。23T14 00 秦岭北部有弱冷空气南下并影响凉山州天气。08-24T08 00 凉山州仍然位于两高之间的低值区, 配合北部冷平流有利于形成强降水, 德昌南部当晚就暴雨成灾, 群发性泥石流就在此段时间暴发。08-25 西昌转为偏北气流, 对水汽输送不利, 降水明显减弱。至此, 德昌连续 3 d 的强降水趋于结束(图 10)。

3.1.3 灾害天气成因

通过对德昌 2004-08-24 泥石流发生过程中的卫星云图和天气形势进行分析, 结合地面的降雨监测结果, 并将其与泥石流暴发时间进行对应。结果显示, 德昌 2004-08-24 泥石流是一次小范围局地强暴雨诱发的。台风“爱利”西北推进使副高西伸, 使凉山州一直处于副高与青藏高原高压间的低值区, 是造成此次连续强降水天气过程的天气背景。

1. 将地面雨量监测与泥石流暴发时间对应分析, 24 日凌晨茨达乡雨量超过 70 mm 的局地暴雨是群发性泥石流的直接激发因素。从 20 日开始的持续降水, 尤其是 22 日夜间的暴雨为泥石流的发生提供了大量的前期有效降雨。08-22 夜间德昌县出现大雨, 但暴雨中心位置不在德昌, 因而没有造成灾害。23 日夜间~24 日凌晨德昌再次出现大雨, 暴雨中心正好位于德昌县南部的宽裕、茨达乡一带, 泥石流于 24T03 00~04 00 发生。

2. 分析卫星云图, 强对流云团发展最旺盛时间为 24T03 00~05 00 这与暴发泥石流时间非常吻合, 说明了强对流云团产生的强降水时段与泥石流暴发时间关系密切。从强对流云团的出现到泥石流发生, 有 1 h 左右的时间间隔。在进行泥石流短临时灾害预警时, 要充分利用这段宝贵的缓冲时间。

3.2 地面成灾条件

学者们利用不同来源的遥感卫星影像判别具备形成泥石流条件的沟谷, 即识别泥石流沟^[8-10]。究

其原因, 泥石流形成需要三个基本条件: 足够的固体松散物质、有利的地形条件以及水动力条件。泥石流沟谷分布受地质构造活动控制, 其形成与断层分布、地层岩性、地形地貌、气候以及激发条件(局地暴雨和冰川融化等)等密切相关。但最终这些影响因素都将通过形成泥石流的三个基本条件表现出来。因此, 可以通过分析泥石流沟谷形成的地质环境背景, 筛选出能够反映泥石流形成条件的替代因子建立泥石流易发性的判别模型, 从而可以为泥石流沟谷识别、易发性分区提供依据。

采用中国科学院科学数据库中的资源环境遥感数据库提供的 TM 遥感影像(30 m, 2000-10-24), 对德昌县泥石流灾害分布情况进行目视解译, 从图 4 图 11 中不难看出, 德昌县境内泥石流以茨达河及安宁河干流分布最为集中, 与地面调查结果一致(见表 1)。从遥感影像上不难看出, 2004 年茨达河流域发生群发性泥石流灾害的凉峰沟等 9 条沟谷: 在发生泥石流之前, 该区域影像的纹理和光谱特征与其周边地区有较大的差异, 其沟道中、下游流域形态在影像中清晰可辨, 并且沟道两侧岸坡植被覆盖率较低, 与茨达河左岸差异较大, 其沟内地物光谱的反射率介于河谷地带和高植被覆盖区之间(见图 11 右上)。此外, 与此现象形成鲜明对比的是, 位于德昌县东南部的老碾河流域下游几乎无泥石流分布, 从影像上判断, 该地区河谷两岸的植被覆盖率较高(见图 11 右下)。通过图 11 中茨达河右岸与老碾河下游的影像对比, 不难看出, 德昌境内泥石流易发地区与其周边地区尤其是无泥石流地区的植被覆盖率差异较大。由此, 我们尝试将植被覆盖情况作为泥石流形成的下垫面差异的影响因素之一, 并结合其他影响因素从多角度去寻找特定地区群发性泥石流的成因。

为对泥石流易发地区进行识别, 进而对德昌群发性泥石流灾害进行成因分析, 本研究拟采取归一化植被指数(NDVI)来进行泥石流灾害易发性的识别^[11]。在遥感研究领域, NDVI 常被用来监测植被覆盖度、土地覆盖、植被生长状态以及季节变化等。NDVI 的定义是近红外光波段(NIR)与可见光波段(R)数值之差除以这两个波段数值之和, 因而其取值范围为[-1, 1]。负值表示地表为雪(或云层)、水体或沙漠等覆盖, 对可见光高反射; 0 表示地表有岩石或裸土等; 正值表示地表有植被覆盖, 且随覆盖度增大而增大。本研究将其引入泥石流易发性判别

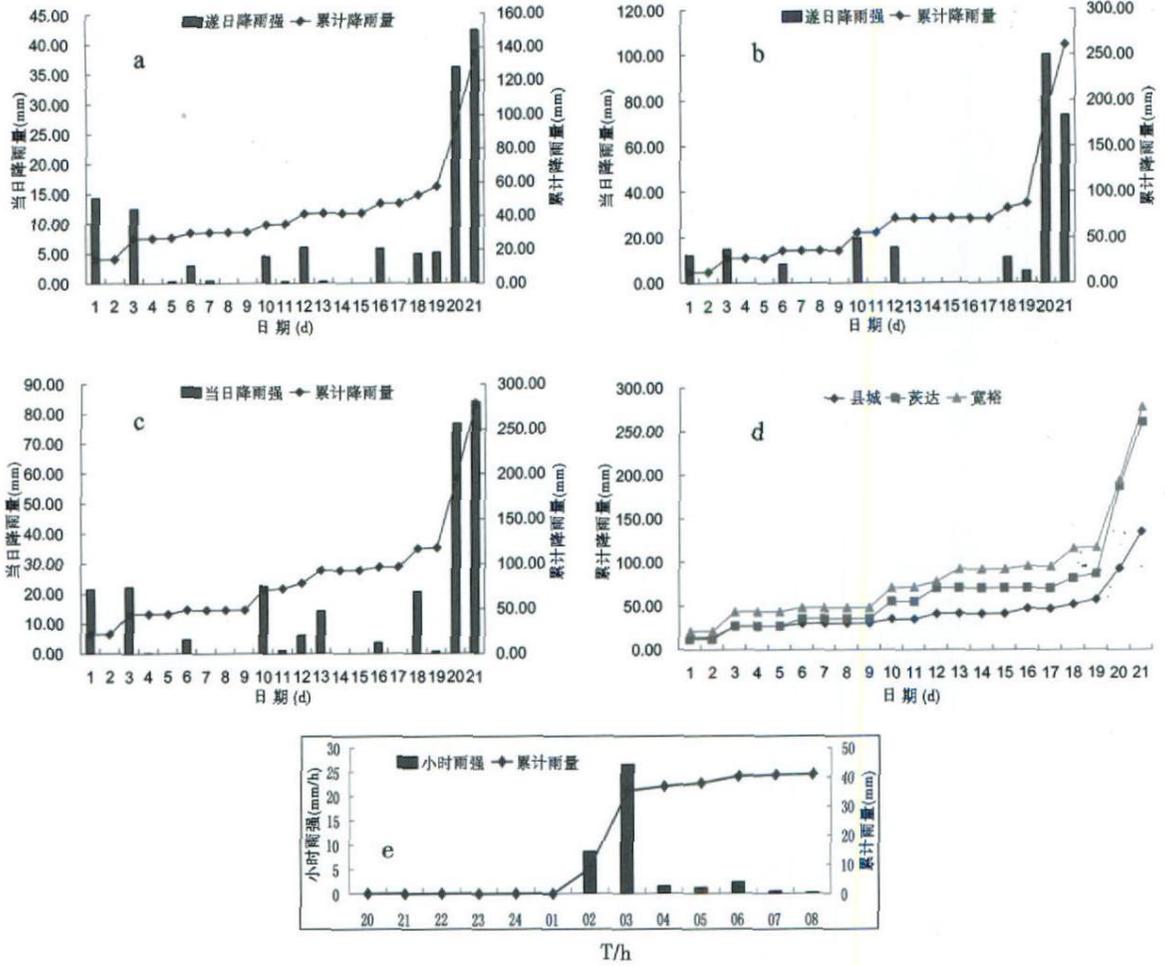


图9 2004-08-24 泥石流前 20 d 降雨过程(县城(a)、茨达乡(b)、宽裕乡(c)、对比(d))及县城 24 小时雨强(e)

Fig.9 Rainfall process and intensity before debris flow on August 24, 2004 in Dezhou, Cida, Kuangyu

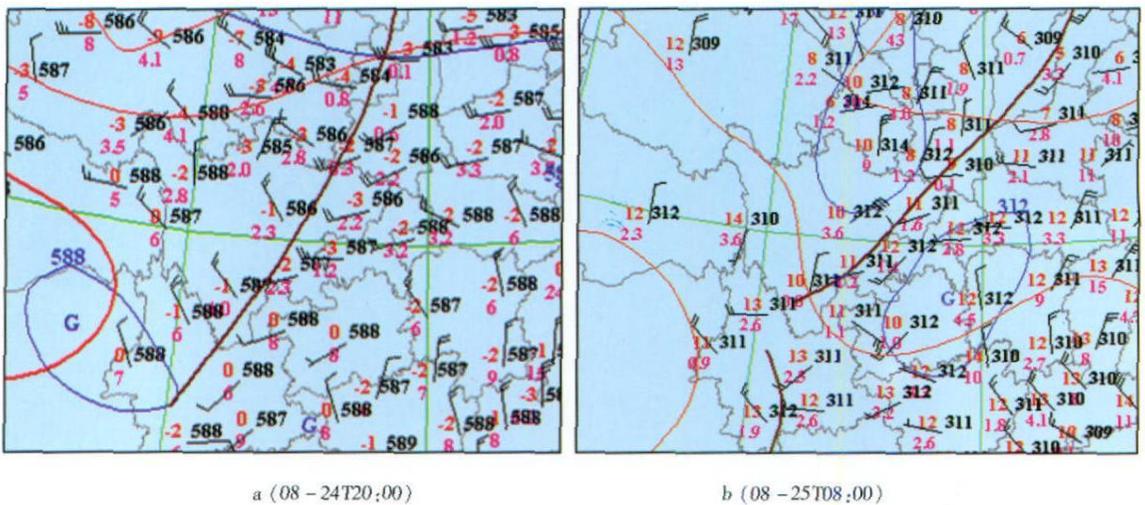


图 10 08-24T20:00 到 08-25T08:00 天气形势图

Fig. 10 Weather situation map from August 24, 2004 20:00 to August 25, 2004 08:00

的依据是, 泥石流的分布主要受地质、地貌条件控制, 但由于泥石流流域有大量的固体松散物质存在, 流域内尤其是沟道和上游崩塌滑坡处大多为裸地,

或表现为植被覆盖率较低。在周围地区植被覆盖率较高的情况下, 泥石流流域物源区和沟道的光谱特征与周边地区有一定的差异, 并且周边地区植被覆

盖率越高, 这种差异就愈明显 (见图 11)。

从 *NDVI* 的反演结果来看, 德昌县 *NDVI* 绝大部分超过 0.2 (图 12), 表明植被总体覆盖率较高。其中尤以雅砻江与安宁河两侧海拔超过 2 500 m 以上

地区植被覆盖率最高, *NDVI* 可达到 0.8。而安宁河河谷地带, 包括其支流茨达河沿岸 *NDVI* 多分布于 0 ~ 0.3 之间 (其中, 河谷地区 *NDVI* 分布于 0~0.1), 植被覆盖率较低。2004-08-24 暴发群发性泥石流

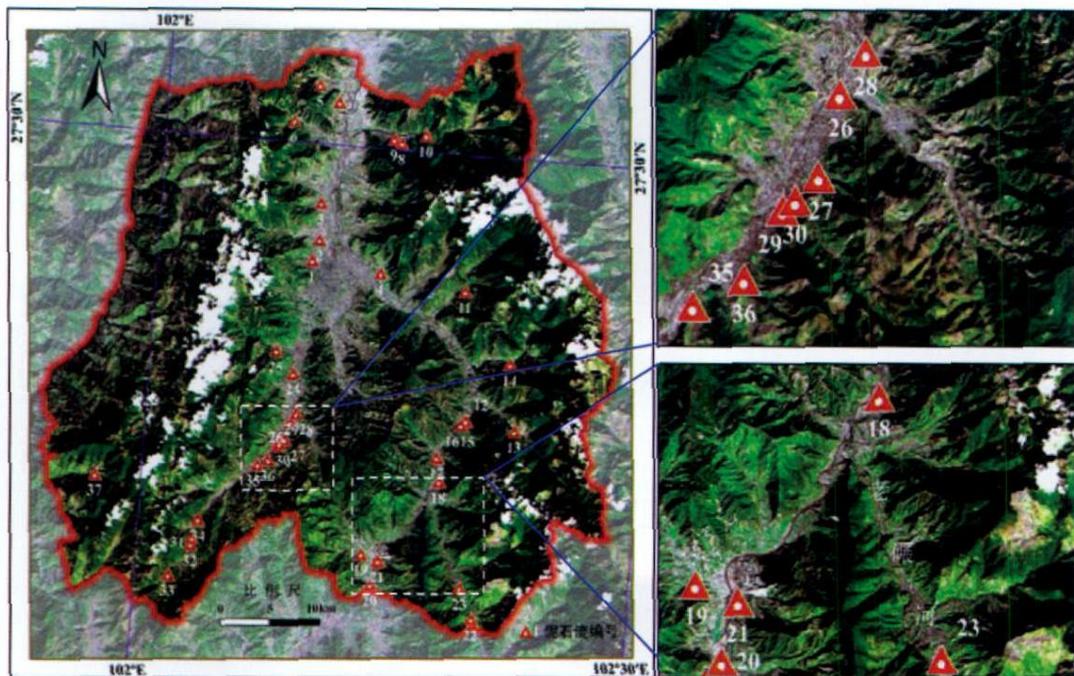


图 11 德昌县 TM (30 m) 遥感卫星影像 (资源环境遥感数据库提供)

Fig. 11 TM remote sensing image of Dechang County (provided by science database, CAS)

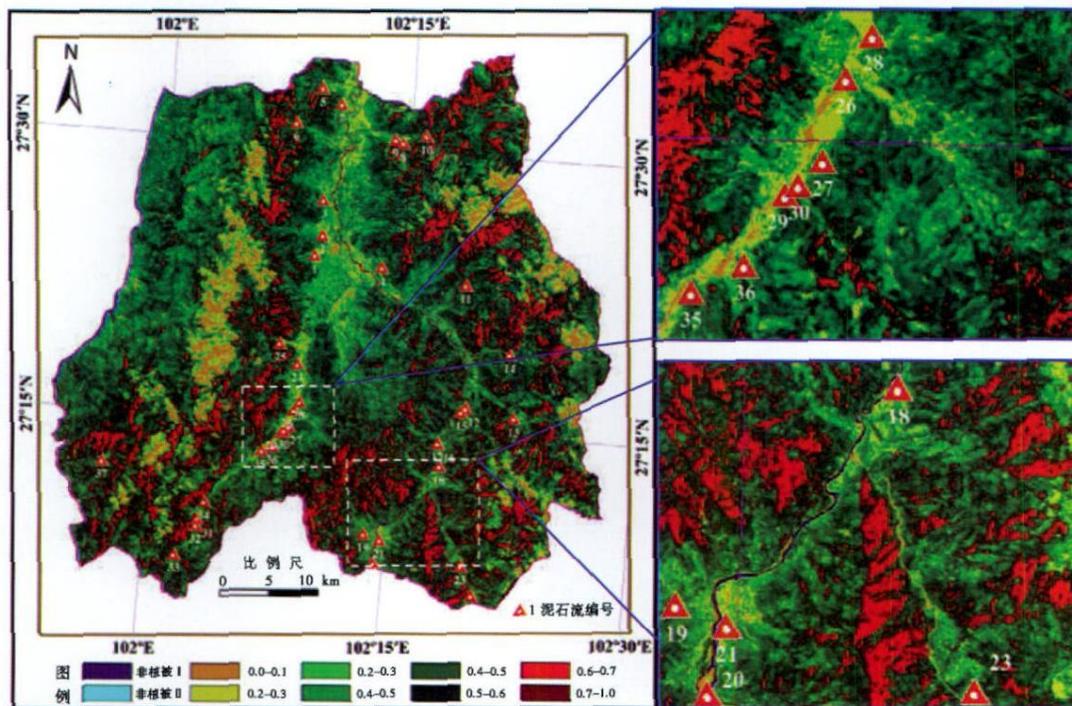


图 12 德昌泥石流分布与 *NDVI* 关系图

Fig. 12 Map of debris flow distribution and *NDVI* in Dechang County

灾害的茨达河流域右岸则介于 0.1~0.3 之间 (见图 12 右上), 而老碾河下游则在 0.6 以上 (见图 12 右下)。

由于 *NDVI* 指数在一定程度上能够识别泥石流流域内地表的裸露情况, 而泥石流形成区和沟道内常覆盖有大量的固体松散物质, 与裸地具有相似的光谱和纹理特征。因此, *NDVI* 从一定程度上反映了泥石流流域与周边地区的差异, 尤其是物源条件方面的差异。通过本文茨达河右岸和老碾河下游地区 *NDVI* 分布图对比, 可以看出 *NDVI* 在区别泥石流易发区与无泥石流地区上有较好的效果。因此, 可以将 *NDVI* 与流域海拔、坡度和地层岩性结合起来进行泥石流易发地区的识别和判断。

综合前述德昌境内泥石流沟谷分布地区的海拔、坡度和地层岩性特征, 结合泥石流易发地区的 *NDVI* 指数, 可以看出德昌境内泥石流沟谷的空间分布具有一定的规律。在海拔上, 泥石流全部分布于 3 500 m 以下的山区; 从流域坡度来看, 泥石流流域

形成区全部集中于坡度大于 20° 的区域。从地层岩性来看, 泥石流主要分布于以千枚岩、变质砂岩为主的震旦纪 (Z)、二叠纪 (P) 和三叠纪 (T) 地层地区。

从泥石流的形成条件来说, 海拔和坡度反映了泥石流流域的地形条件, 地层岩性和植被覆盖情况从一定程度上反映了流域内物源的形成条件。根据野外调查经验, 泥石流分布的海拔和地层岩性区域差异很大, 其组合具有随机性, 在特定区域有一定的可比性, 而不同地区难以直接对比, 因此难以成为量化指标。因此, 本研究拟从影响泥石流形成的上述 4 个因素中筛选出归一化综合植被指数 (*NDVI*)、流域坡度两个指标作为灾害易发性判别的基本依据。具体来说, 在德昌这类高植被覆盖地区, 泥石流易发区的两个判别指标为: (1) *NDVI* 介于 0.1~0.3 之间; (2) 流域内平均坡度在 20° 以上。若以此来判别, 德昌境内的 37 条泥石流沟有 34 条分布于符合上述条件的地区, 占总数的 92% (表 3)。2009-08-18 茨达乡发生的群发性泥石流也同样位于该区域内。

表 3 德昌泥石流分布特征统计表

Table 3 Statistical table of debris flow distribution in Dechang County

指标	海拔 (m)				流域坡度 (°)				地层岩性					<i>NDVI</i>									
	1000	3500	4500	500	10	20	30	40	Z	€	P	T	J	N	Q	-1.0	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6
分布 (个)	0	37	0	0	37	34	13	16	0	17	14	0	0	35	0	0	0	0	20	14	0	3	0
比例 (%)	0	100	0	0	100	92	35	43	0	46	38	0	0	95	0	0	0	0	54	38	0	8	0

4 群发性泥石流减灾对策

群发性泥石流由于多沟并发, 其破坏性极大。因此, 非常有必要针对此类灾害加强监测和预警, 确保当地居民的人身安全。其中, 对泥石流易发区域的判别是进行有效的灾害预警和制定正确的减灾对策的前提。对于此类群发性泥石流灾害的减灾对策概况起来包括 4 个步骤: 遥感影像初步判别、专家现场调查确认、灾害监测预警和制定临灾预案 (图 13)。具体来说: (1) 遥感影像的初步判别主要是借助多源的遥感影像数据对研究区域开展泥石流易发性的判别, 如本文借助 TM 影像, 通过目视判别解译, 借助 *NDVI* 和流域坡度对德昌县全境的泥石流易发区进行初步判断, 可以确定安宁河干流以及茨达河右岸为泥石流灾害易发区域; (2) 专家现场调

查确认是根据专家的经验知识, 对遥感解译的泥石流易发地区进行实地考察验证, 对遥感解译的结果进行确认; (3) 灾害的监测预警主要是重点关注泥石流灾害的诱发因素——暴雨, 通过气象部门的空中和地面多渠道监测是确定暴雨范围和暴雨中心转移路径, 结合地面的泥石流易发分区进行灾害预警, 在遭遇易诱发泥石流灾害的恶劣天气时对当地居民进行提醒, 在灾害发生时及时发布预警信息; (4) 制定临灾预案主要是针对泥石流灾害发生后及时疏导当地的居民, 提前规划避难路线, 确保当地居民的人身安全。上述步骤中, 前两个步骤主要是对形成泥石流形成的下垫面条件进行分析, 识别泥石流易发地区。后两个步骤主要对激发泥石流的雨量条件进行实时监测, 一旦遇险, 及时引导当地居民从正确的避险路线撤离。与此同时, 辅以必要的泥石流工程措施对危害严重的沟谷进行治理, 通过群策群防、设

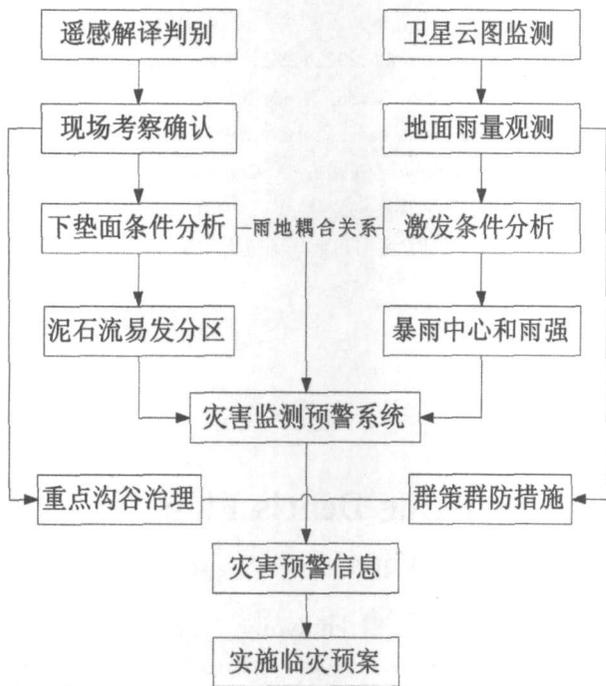


图 13 群发性泥石流防灾减灾思路

Fig 13 Mitigation idea of group-occurring debris flow for Dechang County

立专业的监测员等方式建立有效的群发性泥石流减灾模式。

5 结论与讨论

雨地耦合关系是局地暴雨诱发的泥石流灾害研究的关键和难点问题。准确的下垫面判别信息是泥石流灾害预警可靠性的前提,而精确的暴雨中心位置的确定是灾害预警能否成功的关键。本研究以德昌为例,分析了泥石流在不同海拔、坡度、地层岩性和 $NDVI$ 下的分布特征,并以 2004-08-24 暴雨泥石流灾害为例,结合 TM 遥感影像解译,对德昌泥石流易发区进行了成因分析,结果表明,泥石流易发区与非泥石流易发区遥感影像光谱差异明显,可以作为识别群发性泥石流地区的遥感识别标志之一。在此基础上,进一步分析 2004-08-24 局地暴雨中心位置(落点)及其迁移路径,与群发性泥石流发生过程也很吻合。通过综合考虑流域高程、坡度、地层岩性以及 $NDVI$ 等因素,可将德昌这类植被覆盖率较高地区的泥石流易发区判别标准定为 $NDVI$ 介于 0.1~0.3 坡度大于 20° ,此判断的准确率可达 92%。2009-08-18 茨达乡泥石流再次验证了这一结果。由此,以中分辨率的遥感卫星影像为基础,

利用 DEM 提取的流域坡度,并结合 $NDVI$ 进行泥石流易发区域的下垫面判别是可行的。(对于植被覆盖率较低的区域,仅利用可见光和红外波段的影像去识别比较困难。在这种情况下,可考虑利用多光谱遥感影像提取更多的信息来进行泥石流易发区域的判别)。

参考文献 (References)

- [1] Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan, et al. Regional Forecasting of Debris Flow and Landslide Under rain storm [M]. Chengdu Sichuan Science and Technology Publish House, 1994. [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.]
- [2] Wei Fangqiang, Xie Hong, Jose Luis Lopez, et al. Extraordinarily serious debris flow disasters in Venezuela in 1999 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(6): 580~582 [韦方强, 谢洪, Jose L. Lopez, et al. 委内瑞拉 1999 年特大泥石流灾害 [J]. *山地学报*, 2000, 18(6): 580~582.]
- [3] Yu Shuhua. Analysis of a heavy rain process causing mud-rock flow calamity in the Sichuan basin [J]. *Meteorological Monthly*, 2002, 28(8): 30~33 [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.]
- [3] Xu Shuangzhu, Jin Qi, Xiao Yanjiao, et al. Mesoscale analysis of a heavy rainfall causing mud-rock flow [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(3): 240~243 [徐双柱, 金琪, 肖艳娇, 等. 泥石流暴雨两个中尺度分析 [J]. *气象科技*, 2005, 33(3): 240~243.]
- [4] Song Guanqi, Li Yungui, Zhong Peilin. Discussion on the early warning of the geo-hazards based on the weather forecast: an example of Sichuan Province [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004(2): 33~36 [宋光齐, 李云贵, 钟沛林. 地质灾害气象预报预警方法探讨——以四川省地质灾害气象预报预警为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2004(2): 33~36.]
- [5] Liu Xilin, Zhao Yuan, Li Xuzhen, et al. Disaster risk assessment of typical debris flows in Dechang County of Sichuan [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(1): 11~16 [刘希林, 赵源, 李秀珍, 等. 四川德昌县典型泥石流灾害风险评估 [J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(1): 11~16.]
- [6] Netease news center. Two persons missing and two persons injured caused by debris flow occurred in Dechang [EB/OL]. <http://scnews.163.com/06/0920/08/2REUOGU0050007C.html> [网易新闻中心. 凉山德昌发生泥石流灾害造成 2 人失踪 2 人受伤 [EB/OL]. <http://scnews.163.com/06/0920/08/2REUOGU0050007C.html>]
- [7] Xichang online. Debris flow occurred in Cida Dechang county. No person was injured [EB/OL]. <http://www.xcdx169.net/2009/0820/1835.html> [西昌在线. 德昌茨达遭泥石流, 未造成人员伤亡 [EB/OL]. <http://www.xcdx169.net/2009/0820/1835.html>]
- [8] Wang Zhizhua. Reviewing and prospecting for applying remote sensing to landslide and debris flow investigation [J]. *Remote Sensing for*

- Land and Resources* 1999, 41(03): 10~ 15[王治华. 滑坡、泥石流遥感回顾与新技术展望[J]. 国土资源遥感. 1999, 41(03): 10~ 15]
- [9] Liu Guang Research on remote sensing information model of disaster coefficient of debris flow[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, 8(2): 50~ 52[刘光. 泥石流致灾系数遥感信息模型初探[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 50~ 52]
- [10] Zhang Minghua The Way of image recognizing and interpreting with remote sensing for geological disasters of highway engineering[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 233~ 237[张明华. 公路工程地质灾害遥感图像识别及解译方法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 233~ 237]
- [11] Zhu Xiaoxiao Zhou Xinzhong A new measurement to the influence factors of debris flow based on the MODIS techniques[J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2009, 30(1): 75~ 79[朱小晓, 周新志. 一种基于 MODIS 遥感技术的泥石流影响因子新测量方法[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 75~ 79]

Characteristic and Causes of Group-occurring Debris Flow in Dechang County, Sichuan Province

SU Pengcheng^{1, 2, 3}, WEI Fangqian^{1, 2}, GU Linkang⁴, NI Huayong⁵

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610041, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China;

4. Liangshan Meteorological Observatory, Xichang 615000, China;

5. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610082, China)

Abstract Rainfall-induced debris flows in recent years have brought about tremendous damages to Dechang County, the southwest of Sichuan. This paper explores the coupling of rainfall and the surface conditions that impacts the formation of debris flow. Interpretation of TM images (30 m) reveals the concentration of debris flow in rivers of Anning, Cila, Yabang and Laonian. It is shown that debris flow is closely related to the slope of valley and the NDVI among the factors including elevation, slope, strata and rock. And combination of slope and rock can be used to identify debris flow valley at accuracy up to 92%. For the study area of Dechang with high vegetation cover rate, the valley prone to debris flow satisfies the following conditions: (1) the average slope is bigger than 20°, (2) NDVI is between 0.1 and 0.3. Combining the surface conditions and the local rainstorm processes reveals that debris flow depends on the center and route of rainfall. This is well confirmed by the event group on August 24, 2004. It is also shown that the occurrence had a one hour lag after the rainfall peak, which is crucial for the forecasting. Finally, a new mitigation idea is proposed for group-occurring debris flow of Dechang county.

Key words local rainstorm; group-occurring debris flow; causes