

# 都江堰龙溪河流域典型泥石流物源 演化特征遥感监测

姚维益<sup>1,2</sup>, 常鸣<sup>3</sup>, 李为乐<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059; 2. 都江堰市国土资源局, 四川 都江堰 611830;  
3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:**2008 年“5·12”汶川地震致使都江堰龙溪河流域产生了大量的碎屑体,为震后暴雨泥石流的发生提供了丰富的固体物源物质。2010 年 8 月 14 日,都江堰龙溪河流域暴发大型泥石流,堵塞龙溪河致使河水改道,威胁城镇居民的生命财产安全。为研究泥石流物源的演变特征,选取 5 条泥石流及覆盖其范围的 5 期高精度影像,结合野外详细调查,通过 ArcGIS 空间分析发现,地震前这些泥石流流域内植被良好,未发现大规模的地质灾害,均属于清水沟。汶川地震后崩塌滑坡体的面积由震前的 0.10 万 m<sup>2</sup> 增加到地震后的 41.28 万 m<sup>2</sup>,崩塌滑坡个数由震前的 1 个增加到汶川地震后的 283 个。2010 年“8·13”泥石流后,受降雨地表径流的冲刷侵蚀作用影响,部分崩塌滑坡扩大及新产生,经统计研究区泥石流流域内扩大及新增滑坡个数 47 处,崩塌滑坡体的面积在暴雨后与地震相比增加了 8.29 万 m<sup>2</sup>,比例达 16.72%。同时经过 5 期新增及扩大崩塌滑坡体增长率统计,发现随着时间的推移其增长速度逐年降低,有力证明了震后研究区泥石流内崩塌滑坡体逐步稳定,生态环境得到有效恢复。

**关键词:**汶川地震; 泥石流; 滑坡; 动态演变; 遥感监测

中图分类号:P642.4; P642.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0205-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20171211.002

## Dynamic Evolution Characteristics of Material of Typical Debris Flow Using Remote Sensing Technology, in Longxi Catchment, Dujiangyan, China

YAO Weiyi<sup>1,2</sup>, CHANG Ming<sup>3</sup>, LI Weile<sup>3</sup>

(1. School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Dujiangyan Bureau of land and resources, Dujiangyan, Sichuan 611800, China; 3. State Key Laboratory of GeoHazard Prevention and GeoEnvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:**After ‘5·12’ Wenchuan Earthquake, the massive loose solid matters were produced in Longxi River, Dujiangyan, which provides the rich materials for debris flows. On 14<sup>th</sup> August, 2010, debris flows occurred in five valleys, which thrust in farmland and jammed the Longxi River diversions, threatened the old Longchi town. In order to research the dynamic evolution of source, we selected five debris flows as study examples and five high precision image covering the study areas, compared the evolution characters of the valleys by ArcGIS. The results indicated that: before ‘5·12’ earthquake, the study area cover was good, geologic hazards were not found, the basin stream all belonged to the clear ditch; after ‘5·12’ Earthquake, the number of landslide was 283 and the area was 41.28 hm<sup>2</sup>; after ‘8·13’ debris flow event, the number of landslide was 47 and the area was 8.29 hm<sup>2</sup> due to rainfall, surface runoff scouer erosion, expansion and new generation of partial collapse and the landslide. After five periods of high resolution remote sensing interpretation of the landslides, the growth rates of landslides were declining year by year, the ecological environment gradually recovered.

**Keywords:** Wenchuan Earthquake; debris flow; landslides; dynamic evolution; remote sensing monitoring

收稿日期:2017-05-15

修回日期:2017-08-22

资助项目:四川省地理国情与资源环境承载力监测工程技术研究中心项目(GC201505);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自由探索课题(SKLG2014Z004);成都理工大学中青年骨干教师培养计划(JXGG201507)

第一作者:姚维益(1981—),男,四川省阆中市人,工程师,在读博士,从事地质灾害监测预警研究工作。E-mail:93701403@qq.com

通信作者:李为乐(1982—),男,安徽省安庆市人,副研究员,在读博士,从事地质灾害防治与地质环境保护科研和教学工作。E-mail:why-lwl01@163.com

“5·12”汶川地震触发了大量的崩塌滑坡地质灾害,具备数量多、规模大、类型复杂等特点,直接为震后暴雨型泥石流的暴发提供了丰富的固体松散物质<sup>[1-2]</sup>。震后相邻汛期内暴发的泥石流灾害,已成为严重威胁震区人民生命财产安全的主要地震次生灾害。由此在今后开展震后暴雨诱发泥石流研究时,重点应针对震后泥石流沟内的物源情况进行综合分析归纳,以期泥石流物源的分布规律及动态变化特征,对今后震区泥石流的防灾减灾工作具有重要的指导意义<sup>[3-4]</sup>。

汶川地震后,四川境内出现大量泥石流活动事件。2010年8月13日,绵竹市清平绵远河流域大规模群发性泥石流暴发,其中文家沟泥石流最为严重,冲出约400万 $\text{m}^3$ 固体物质,淤平了下游近3.5 km的河道,迫使绵远河改道导致洪水泛滥淹没大量房屋和农田,大约超过6000人受灾<sup>[5-6]</sup>。同一时间内,汶川震中映秀镇周围也暴发大规模群体泥石流,威胁最大的为红椿沟泥石流,其冲出的固体堆积物进入岷江,堵塞岷江河道并迫使河水改道,淹没震后重建的映秀新城,迫使8000余人转移<sup>[7-8]</sup>。同一时刻,四川省都江堰市龙溪河流域同样暴发群体泥石流。伴随着大量松散固体物质汇集导致龙溪河整体抬升近5 m,沿河的大部分道路及房屋受到毁坏,造成了5.5亿多元的经济损失<sup>[9-11]</sup>。

在地质灾害的变化规律研究上,利用多期高分辨率遥感影像能够反映其变化规律,对灾害的动态发展趋势展开预测评估,能更好的服务于管理部门的决策。通过1999年4月、2001年6月及2004年7月三期遥感影像,对台湾大甲溪河斜坡的动态变化进行分析,建立增加滑坡随时间变化减少的模型,为台湾相关部门提供管理依据<sup>[12]</sup>。为确定台湾地区泥石流在汛期的警戒值,同样对台湾地区十年内泥石流流域内的崩塌滑坡变化展开解译,研究泥石流物源在暴雨后的变化规律,经过十年的对比解译分析其变化规律<sup>[13]</sup>。利用多期卫星影像数据对台湾集集地震震后1999—2005年6 a间里的滑坡进行解译,发现大部分滑坡已经开始植被恢复,结合野外调查发现植被覆盖率已达到89.69%<sup>[14]</sup>。本文选取都江堰龙溪河流域五条泥石流作为研究对象,获取研究区范围内2007年9月18日、2009年2月10日、2011年4月16日、2015年4月15日及2016年2月26日5期高精度的遥感影像,开展研究区泥石流流域内崩塌滑坡体的遥感解译工作,充分结合野外调查数据,研究震后几年间泥石流流域内物源的动态变化特征,指导当地居民

开展行之有效的避险及恢复重建工作,为政府提供科学的防灾减灾建议。

## 1 研究区概况

本文以都江堰龙池场镇龙溪河下游为起点,沿水系往上2 km至李泉太泥石流结束,在4.3  $\text{km}^2$ 内的研究区范围内共计5条泥石流沟被选为研究对象。研究区内的泥石流属于活动性较弱的低频泥石流沟,在地震前均为清水沟,在经历地震后受强降雨影响5条泥石流沟都相继暴发大规模泥石流。

龙溪河流域地形起伏复杂,地势整体上北高南低,流域相对高差2440 m。龙溪河流域长18 km,沟床平均纵比降达130%。流域内支沟呈树枝状分布,主沟两侧发育多条泥石流沟,沟纵比降在370%~580%。流域内山坡坡度在多在30°~70°。总体上龙溪河流域具有山高、坡陡和沟床比降大的地形特征,有利于降水的汇集和坡面上松散物质随地表径流的下泄运移。

区域属于中山剥蚀侵蚀山谷地貌,多由花岗岩、闪长岩、安山岩、凝灰岩及部分变质岩构成,龙溪河流域内出露的地层主要为震旦系下统火山岩组(Za)、三叠系须家河组( $T_3x$ )和第四系全新统残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )、崩积层( $Q_4^{col}$ )、滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ )、崩塌积层( $Q_4^{c+dl}$ )、泥石流堆积层( $Q_4^{sef}$ )、洪积层( $Q_4^{pl}$ )。

## 2 高精度遥感影像获取与分析

在收集到的影像数据中,由于不同卫星搭载的传感器不同,所获取的数据质量、格式和大小也存在差别,地物信息表达的侧重点也不一样,根据研究区泥石流流域内崩塌滑坡体分布特征,本文所选取的主要遥感影像为:地震前2007年9月1日获取的15 m的分辨率遥感影像;2009年2月10日获取的分辨率为2.5 m的法国Spot-5卫星影像;2011年4月26日获取的分辨率为0.61 m的Quickbird影像;2015年4月15日及2016年2月26日获取的分辨率为0.46 m的Worldview-2影像,覆盖整个研究区在内的5条泥石流沟,见表1。

结合遥感影像特征,本文以震后2009年02月10日分辨率为2.5 m的Spot-5影像为例,根据崩塌滑坡在遥感影像上的特征,建立研究区泥石流流域内滑坡的解译标志识别,现选取4条泥石流沟内典型的滑坡进行判识,见图1。

图1A是李泉太沟内的一个典型的大滑坡物源,滑

坡呈长条形,从航空影像上很明显的可以看出,在地震后已经发生滑动,由于滑坡体厚度比较深,有大量的堆积物堆积在滑坡体下段和泥石流的沟道内。从堆积物的影像结合 DEM 的立体显示方式,可以看出该滑坡厚度较厚,滑坡体产生的碎屑物质较多,大多拥堵在泥石流沟里,在纹理上有土体整体下滑的破碎纹理。

表 1 研究区泥石流获取的影像数据信息

影像类型	时间	分辨率/m	覆盖范围	覆盖沟数
Landsat-7	2007-09-01	15	整个研究区	5
Spot-5	2009-02-10	2.5	整个研究区	5
Quickbird	2011-04-26	0.61	整个研究区	5
Worldview-2	2015-04-15	0.46	整个研究区	5
Worldview-2	2016-02-26	0.46	整个研究区	5

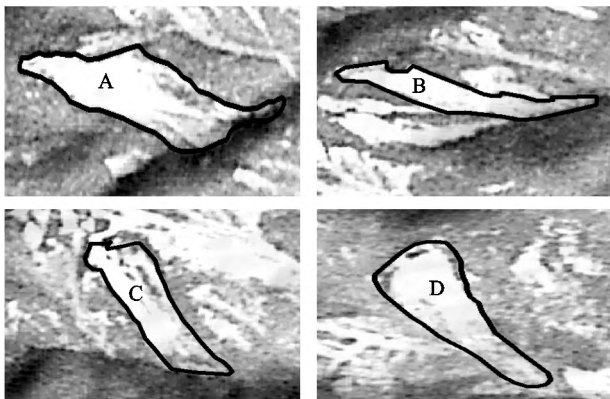


图 1 汶川地震后研究区内典型滑坡影像解译

图 1B 是沙子坪沟内的典型的大滑坡,从遥感影像中可以看出,滑坡体形态上呈长条形,后缘宽度较窄,沿滑动方向有横向逐渐变宽发展的趋势,从滑坡体后缘的影像中可以看出滑坡已经发生整体滑动,坡面纹理起伏不平,能够明显的分辨出堆积区和泥石流沟道相接。

图 1C 是麻柳槽沟内的大滑坡,滑坡表面形态呈簸箕形。从影像上初步判断,坡体表面堆积有大量绿色乔木,滑坡体厚度较厚,滑坡下部出现大量的松散堆积体,该滑坡物源方量较大。从影像上还可以很明显的分辨出,有大量的堆积物堆积在泥石流沟道内,在泥石流暴发时,可以很快转变为泥石流物源,进入泥石流沟道加入泥石流运动中。

图 1D 是水打沟泥石流内典型的大滑坡,滑坡后缘表面形态呈围椅形。从影像上很明显的可以分辨出,滑坡体的长度远大于宽度,坡体表面堆积有大量的松散固体颗粒。滑坡体表面滑动痕迹在纹理上表现明显,很可能发生再次滑动并加入泥石流活动中。

通过对 2007 年 9 月 18 日、2009 年 2 月 10 日、2011 年 4 月 16 日、2015 年 4 月 15 日及 2016 年 2 月 26 日五期高精度遥感影像的解译,得到随着时间的

推移泥石流物源演化的动态规律。“5·12”汶川地震前,研究区滑坡体极少发育,数量有限,因此本文采用了 2007 年 09 月 01 日经波段融合后 15 m 的 ETM 影像,能够反映出震前滑坡的特征,见附图 1;“5·12”汶川地震后,研究区泥石流流域内的崩塌滑坡体特别发育,数量巨大,为此特意选取 2009 年 02 月 10 日 2.5 m 分辨率的 Spot-5 影像,能够清晰的勾勒出因地震诱发的崩塌滑坡体特征,见附图 2;“8·13”暴雨发生后,研究区泥石流流域内的崩塌滑坡体与震前相比新增及扩大显著,大部分地质灾害体在震前崩塌滑坡的基础上扩张形成,为了更加细微的区分别崩滑体动态变化,本文采用 2011 年 4 月 26 日分辨率为 0.61 m 的 Quickbird 影像,高分辨率的遥感影像能准确辨识出崩塌滑坡体的细微变化,见附图 3。

为了能够动态的探索研究区泥石流流域内崩塌滑坡体的演化规律,本文继续收集了研究区 2015 年 4 月 15 日及 2016 年 2 月 26 日获取的分辨率为 0.46 m 的 Worldview-2 影像,开展详细的地质灾害体解译,见附图 4、附图 5。本文利用五期遥感影像详细识别出不同时期研究区泥石流流域内的地质灾害体,对分布于泥石流流域范围内的厚度为数米的小型浅层滑坡以及厚度数百米的大型深层崩塌滑坡,都能够从影像上解译出来。

### 3 研究区泥石流物源动态演化特征

经过将“5·12”震前 ETM 影像、“5·12”震后 Spot-5 影像对比解译,发现大量的崩塌滑坡体在研究区泥石流沟道两岸集中分布,特别是一些浅层小规模滑坡体大量分布在离沟道两侧的下游区域,规模较大的深层滑坡也已经在泥石流流域内发育。一部分的崩塌滑坡体在震后“悬挂”在斜坡陡峭的后壁,在遇到极端的降雨条件下能够迅速发生滑动;一部分滑坡体堆积到泥石流沟道中,泥石流开始运移后,它们会扩大泥石流的规模和危险范围。经过调查统计,物源新增及扩大的面积由震前的 0.10 万  $m^2$  增加到汶川地震后的 41.18 万  $m^2$ ,增长率为 99.76%,见表 2;为了调查震后暴雨诱发崩塌滑坡体向泥石流转化的能力及崩塌滑坡体的动态演变特征,本文采用 2011 年 4 月 26 日 Quickbird 的全色遥感影像对暴雨后研究区泥石流流域内的崩塌滑坡体开展详细解译工作。结果发现在强降雨过程的影响下部分大型滑坡局部发生变形,这一类滑坡体的面积与原有滑坡体面积相比较产生明显的形变,促使松散固体物质逐渐推移到泥石流沟道中;同时,强降雨诱发大量新崩塌滑坡产生,土壤的孔隙水压力在降雨影响下显著升

高,降低了滑坡体的整体抗滑力,最终导致了滑坡体失稳。2010年暴雨诱发泥石流事件后,物源新增及扩大的面积在 41.18 万  $m^2$  基础上又增加了 8.29 万  $m^2$ ,增长率为 16.72%,见表 3;2007—2016 年研究区 5 条泥石流

各流域内崩塌滑坡体与总物源的新增及扩大的面积比率逐年下降,在暴雨条件下比率有所上升,但总体呈下降趋势,见表 3,结果表明震后这些年间崩塌滑坡体逐渐趋于稳定,生态环境得到有效恢复。

表 2 研究区泥石流流域内不同时期崩塌滑坡面积统计

编号	泥石流名称	物源新增及扩大面积/ $10^4 m^2$				
		2007-09-01	2009-02-10	2011-04-26	2015-04-15	2016-02-26
DF01	水打沟	0.00	7.90	1.41	0.00	0.51
DF02	白果堂沟	0.00	3.91	0.73	0.00	0.00
DF03	麻柳槽沟	0.10	19.38	3.48	0.00	0.21
DF04	沙子坪沟	0.00	4.55	1.12	0.00	0.00
DF05	李泉太沟	0.00	5.44	1.55	0.98	0.00
总计		0.10	41.18	8.29	0.98	0.72

表 3 研究区泥石流流域内不同时期崩塌滑坡面积变化统计

编号	泥石流名称	物源新增及扩大面积变化比例/%			
		2007—2009 年	2009—2011 年	2011—2015 年	2015—2016 年
DF01	水打沟	100.00	15.15	0.00	5.19
DF02	白果堂沟	100.00	15.73	0.00	0.00
DF03	麻柳槽沟	99.49	15.16	0.00	0.91
DF04	沙子坪沟	100.00	19.75	0.00	0.00
DF05	李泉太沟	100.00	22.17	12.30	0.00
总计		99.76	16.72	1.94	1.40

同时物源新增及扩大的个数由震前的 1 个增加到汶川地震后 282 个,增长率为 99.65%,见表 4;通过影像解译还发现大量的崩塌滑坡体分布在泥石流沟道两侧上游,降雨发生后,长时间在雨水侵蚀下逐渐向泥石流形式转换,2010 年暴雨诱发泥石流事件后,物源新增及扩大的个数在 282 个基础上又增加了

47 个,增长率为 16.72%,见表 5;经过统计 2007—2016 年研究区内 5 条泥石流单沟内及总物源新增及扩大的个数比率逐年下降,在暴雨条件下虽有所上升,但总体呈下降趋势,统计结果表明汶川地震后随着时间的推移崩塌滑坡体逐渐趋于稳定,数量增长率逐年下降。

表 4 研究区泥石流流域内不同时期崩塌滑坡个数统计

编号	泥石流名称	物源新增及扩大个数				
		2007-09-01	2009-02-10	2011-04-26	2015-04-15	2016-02-26
DF01	水打沟	0.00	56.00	6.00	0.00	1.00
DF02	白果堂沟	0.00	33.00	3.00	0.00	0.00
DF03	麻柳槽沟	1.00	118.00	16.00	0.00	1.00
DF04	沙子坪沟	0.00	49.00	6.00	0.00	0.00
DF05	李泉太沟	0.00	26.00	16.00	4.00	0.00
合计		1.00	282.00	47.00	4.00	2.00

表 5 研究区泥石流流域内不同时期崩塌滑坡面积变化统计

编号	泥石流名称	物源新增及扩大个数变化比例/%			
		2007—2009 年	2009—2011 年	2011—2015 年	2015—2016 年
DF01	水打沟	100.00	9.68	0.00	1.59
DF02	白果堂沟	100.00	8.33	0.00	0.00
DF03	麻柳槽沟	99.16	11.85	0.00	0.74
DF04	沙子坪沟	100.00	10.91	0.00	0.00
DF05	李泉太沟	100.00	38.10	8.70	0.00
合计		99.65	14.24	1.20	0.60

## 4 结论

(1) “5·12”汶川地震对研究区范围内的居民生产生活造成严重的影响,本文获取了研究区范围内个时期高精度的遥感影像,经过几何校正后分析崩塌滑坡体的主形态、色调、阴影及纹理等特征,建立研究区泥石流流域内崩塌滑坡体的判识标志;

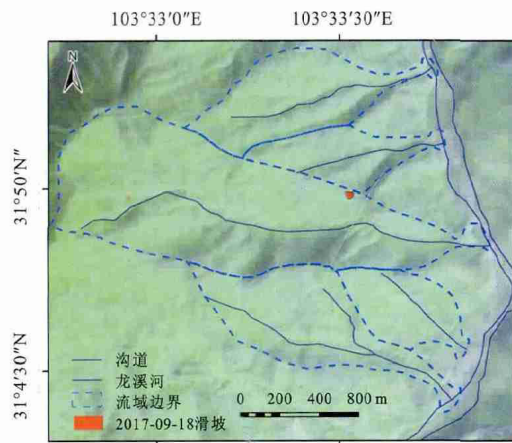
(2) 通过多期高分辨率遥感影像解译,汶川地震后崩塌滑坡体的面积由震前的 0.10 万  $\text{m}^2$  增加到 41.18 万  $\text{m}^2$ ,增幅达 99.76%;同时崩塌滑坡体个数由震前的 1 个增加了 283 个,增幅达 99.65%,统计结果表明地震促使大量的物源产生,面积比例增加很高,极大威胁了灾区群众的生命财产安全;

(3) 通过统计震后暴雨事件导致的崩塌滑坡的个数及面积,得到研究区物源新增及扩大滑坡面积为 8.29 万  $\text{m}^2$ ,增幅达 16.72%;个数增加了 47 个,增幅达 14.24%。证明了在极端降雨条件下可以诱发大量崩塌滑坡体,加剧了该区域泥石流暴发的强度及频率;

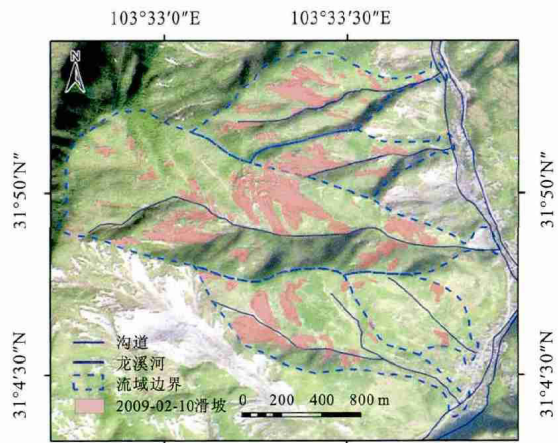
(4) 自 2008 年地震以来,通过对研究区 5 期遥感影像的高精度解译,发现崩塌滑坡体面积及个数的增长速率逐年降低,初步反映出这些物源逐渐趋于稳定,生态环境恢复良好。

### 参考文献:

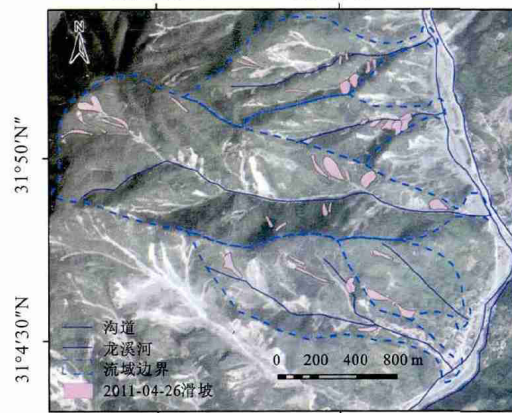
- [1] 余斌,马煜,张健楠,等.汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J].山地学报,2011,29(6):738-746.
- [2] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害发育分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):119-128.
- [3] 常鸣,唐川,李为乐,等.汶川地震区绵远河流域泥石流形成区的崩塌滑坡特征[J].山地学报,2012,30(5):561-569.
- [4] 梁京涛,唐川,王军,等.强震区小流域泥石流发育特征研究:以四川省绵竹市罗家沟泥石流为例[J].灾害学,2013,28(3):100-104.
- [5] Tang C, Van Asch T W J, Chang M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms [J]. *Geomorphology*, 2012,139(2):559-576.
- [6] Tang C, Zhu J, Chang M, et al. An empirical - statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. *Quaternary International*, 2012, 250(250):63-73.
- [7] Tang C, Zhu J, Ding J, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. *Landslides*, 2011,8(4):485-497.
- [8] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake. [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2009, 68(2):187-194.
- [9] 屈永平,唐川,刘洋,等.四川省都江堰市龙池地区“8·13”泥石流堆积扇调查和分析[J].水利学报,2015,46(2):197-207.
- [10] 常鸣,唐川,蒋志林,等.强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J].山地学报,2014,32(1):89-97.
- [11] 刘清华,唐川.都江堰市龙池镇“8·13”蜂桶岩泥石流灾害特征[J].成都理工大学学报,2012,39(6):636-642.
- [12] Chang C W, Lin P S, Tsai C L. Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2011,123:83-90.
- [13] Khattak G A, Owen L A, Kamp U, et al. Evolution of earthquake-triggered landslides in the Kashmir Himalaya, northern Pakistan[J]. *Geomorphology*, 2010, 115:102-108.
- [14] Lin W T, Lin C Y, Chou W C. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan[J]. *Ecological Engineering*, 2006,28:79-89.



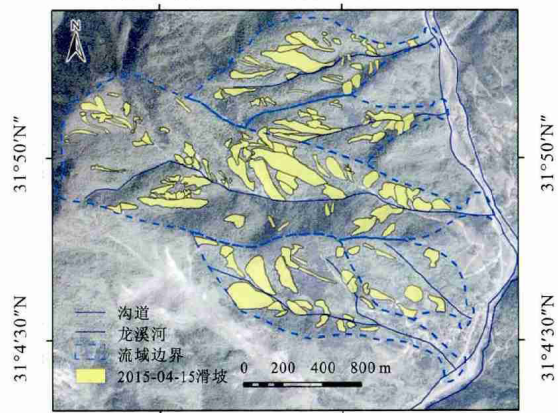
附图1 四川都江堰龙溪河流域2017年震前滑坡遥感解译结果



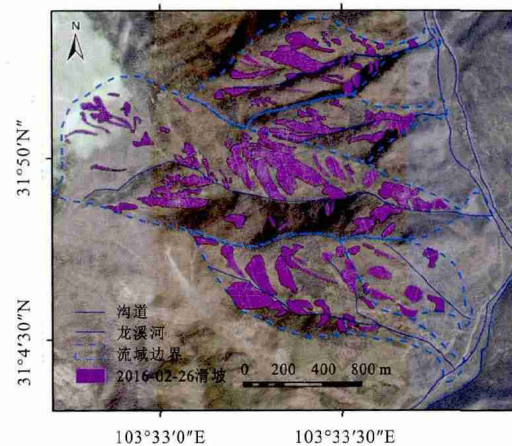
附图2 四川都江堰龙溪河流域2009年震后滑坡遥感解译结果



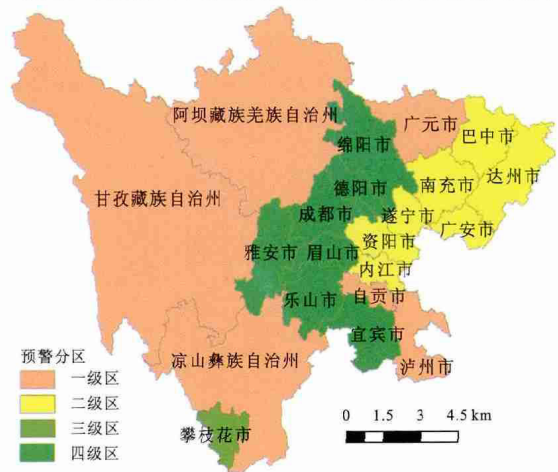
附图3 四川都江堰龙溪河流域2011年暴雨后滑坡遥感解译结果



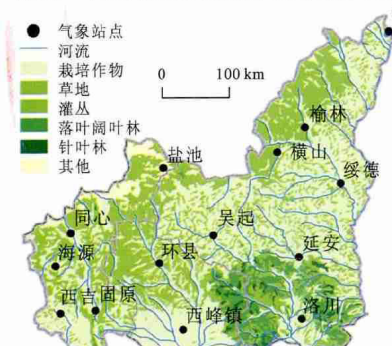
附图4 四川都江堰龙溪河流域2015年滑坡遥感解译结果



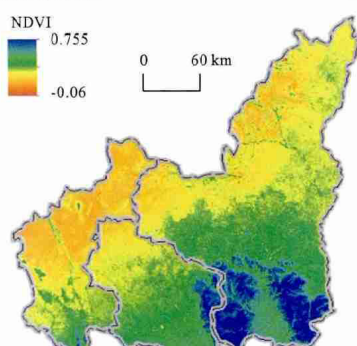
附图5 四川都江堰龙溪河流域2016年滑坡遥感解译结果



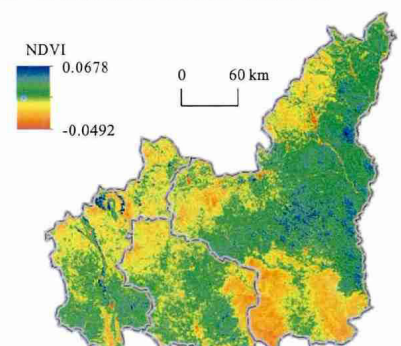
附图6 四川省耕地生态安全预警分区



附图7 陕甘宁地区植被类型及其气象站点分布



附图8 2000—2014年陕甘宁地区NDVI空间分布



附图9 2000—2014年陕甘宁地区NDVI变化趋势