

元谋大断裂对东山地区泥石流发育的控制作用

石建军¹, 李保珠¹, 李鹏², 黄杰²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: [目的] 研究元谋断裂对东山泥石流沟的控制作用, 为该区泥石流防治提供科学依据。[方法] 基于东山地区沿线沟谷的现场调查, 分析研究元谋断裂对东山泥石流沟的控制作用。[结果] 元谋断裂与泥石流沟空间位置关系对泥石流的发育存在着影响, 对东山地形地貌的形成起控制作用, 对东山地层岩性及其工程特性起控制作用, 对元谋县气候的形成起控制作用。[结论] 元谋断裂对东山地区泥石流的形成起到控制作用, 它决定了东山地区泥石流频发的特性。

关键词: 元谋大断裂; 元谋盆地; 演化; 影响规律; 构造运动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0058-05

中图分类号: P642.23

文献参数: 石建军, 李保珠, 李鹏, 等. 元谋大断裂对东山地区泥石流发育的控制作用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 58-62. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.010; Shi Jianjun, Li Baozhu, Li Peng, et al. Controlling effect of Yuanmou major fracture on debris flow development in Dongshan area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 58-62. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.010

Controlling Effect of Yuanmou Major Fracture on Debris Flow Development in Dongshan Area

SHI Jianjun¹, LI Baozhu¹, LI Peng², HUANG Jie²

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: [Objective] Studying the control effect of Yuanmou fracture on debris flow in Dongshan area, to provide scientific basis for debris flow control in this area. [Methods] Based on the investigation of the valley along the Dongshan area, the control effect of Yuanmou fracture on Dongshan debris flow gully was studied. [Results] The relative position of debris flow gully to Yuanmou fracture has influences on the development of the debris flow, which can control the formation of Dongshan topography and geomorphology, can control the lithology and engineering characteristics of Dongshan formation and can control the formation of climate in Yuanmou County. [Conclusion] The Yuanmou fracture plays a controlling role in the formation of debris flow in Dongshan area, the frequent debris flow in Dongshan area can be attributed to it.

Keywords: Yuanmou fault; Yuanmou basin; evolutionary; influence law; tectonic movement

东山即三台山脉江边至老城段, 该段山脉呈南北走向, 西侧坡面侵蚀作用强烈, 东西向沟谷发育, 各沟谷泥石流发育及活动特性受元谋断裂带影响显著。各沟谷均有泥石流暴发历史。其中老城河、大箐河、那控大箐、茂别干河等历史上均造成过严重灾情, 根据灾情记录, 共计造成 31 人死亡, 经济损失 6 637.9 万元, 因此泥石流防灾减灾的任务也愈发繁重。泥石流减灾的一条重要途径是加强泥石流基础理论研究。目前国内现行规范中未见活动断裂带对泥石流

影响的论述, 以致在治理中往往对泥石流规模估计不足。泥石流是山区特有的一种突发性的自然灾害现象, 多见于半干旱和半湿润山区以及处于退缩阶段的高山冰川的边缘地区^[1]。泥石流是发生在山区的一种严重的地质灾害问题, 具有暴发突然、来势凶猛、运动快速、历时短暂之特点^[2-4]。泥石流发生的动力机制是非常复杂的, 主要受特定的地质地貌与恶化的自然生态环境所影响, 并受异常降雨量的触发, 泥石流的发生是各种因素相互组合作用的结果^[5-6]。许

收稿日期: 2017-01-12

修回日期: 2017-02-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩溶—裂隙含水层地下水重金属迁移机理研究”(41562012)

第一作者: 石建军(1991—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文地质与工程地质。E-mail: 601972726@qq.com。

通讯作者: 李保珠(1973—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 副教授, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: yi987852@163.com。

强^[7]通过对2010年清平乡“8·13”泥石流、映秀红椿沟泥石流以及龙池泥石流的分析,总结出“8·13”泥石流具有群发性、突发性、破坏性、灾害链效应等特点,同时还具有沿发震断裂呈带状分布、物源主要来自于汶川地震触发的崩滑堆积物、活动形式主要表现为“拉槽”侵蚀等显著特征。龙门山断裂带断裂褶皱及次生断裂褶皱发育,新构造活动较为强烈,岩体破碎,表层风化严重,残坡积或崩坡积松散物源丰富,为泥石流的形成提供了物源条件。梁京涛^[8-9]通过汶川地震,探讨了地震地质灾害的区域性分布规律,汶川地震龙门山断裂带附近的泥石流沿龙门山断裂带呈“带状”分布,尤其沿发震断裂成带状特征非常明显且沿河流水系成线状分布的特点。元谋县东山地区地质地形条件复杂,多处于构造运动强烈的构造侵蚀山区,同时山高谷深,沟床比降较大,地质构造活动强烈,区域内受元谋活动断裂带影响,岩体破碎。受地形地貌、岩体性质、地层构造、气候等因素影响,东山地区各种不良地质现象发育,泥石流分布广泛。因此,如何准确分析活动断裂区泥石流发育特征就成了当前研究亟待解决的问题^[10]。本文基于东山地区沿线沟谷的现场调查、分析,研究元谋断裂对东山泥石流沟的控制作用,从而对泥石流防灾减灾具有显著意义。

1 东山地区概况

1.1 地形地貌

东山位于元谋盆地以东,山脉呈南北走向。在元谋大断裂早期的逆冲运动抬升、地表风化、流水侵蚀等共同作用下,形成如今与西侧盆地相对高差约1300 m,东西向沟谷发育的构造侵蚀高中山地貌类型。东山地区各沟谷上游源头及两岸山脊多见断裂陡崖及断层陡坎。沟谷两岸横断面多呈V形,沟岸坡度以 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 为主,局部地段 $>40^{\circ}$,切割深度大,各箐沟内河床纵坡比降介于 $29.8\%\sim 168\%$,汇水面积介于 $1.5\sim 15.04\text{ km}^2$ 。为泥石流的形成提供了良好的孕育条件。而东山山前元谋及江边坝子地势平坦开阔,使泥石流具备了堆积条件。总体上,东山及山前元谋盆地共同构成利于泥石流暴发的地形地貌。

1.2 地层岩性

东山地区地区分布地层为白垩系—三叠系 K_2j , K_2m , J_3s , J_2z , J_1f 及 T_3s ,为“滇中红层”。该套地层多为硬质岩与软质岩互层,层与层的层面结合力差,当岩体解除约束力,出现临空面时,极易顺层面解体滑落;红层中的泥岩和泥质粉砂岩等软岩具备亲水性,透水性弱,在水的作用下易软化、塑变,吸水后岩

体膨胀,失水后岩体收缩,易崩解,抗风化能力弱,抗压抗剪强度低等特性。总体上东山地区分布的“滇中红层”为典型易滑、易崩塌地层。

1.3 气候条件

元谋盆地属南亚热带干热季风气候,具备典型的干热河谷气候特征。其特点主要表现为湿度上的干、温度上的热及降雨分散而集中的特点。元谋地区年均温 $21.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高温 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低温 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时数达到 $2\ 670.4\text{ h}$,年平均日照时数 7.3 h/d ,日照百分率 60% 。年平均气温为 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $7\ 796.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如此充沛的热量条件加剧了水分的蒸发,其全年的降水日仅为 91 d , 90% 以上的降雨均集中于6—10月。在以后长达半年以上的旱季中,其蒸发量为降水量的数10倍。空气相对湿度很小甚至达到0。在如此恶劣的气候条件下“植物的生长受到抑制”许多植物难以存活,尤其对人工栽植的幼树的威胁最大。导致森林植被一经破坏后难以恢复,缺水使大面积的土地荒芜,河谷坡面的表土大面积丧失,露出大片裸土和裸岩地。加剧了地表岩土体的风化。元谋地区年降雨量为 583.1 mm ,历年平均蒸发量 $4\ 146.5\text{ mm}$ 。旱季约6个月(11—4月)降水量不足 50 mm ,具有非常典型的干湿季节分明的特点,降雨在季节上分布不均,极为集中。除季节降雨分布严重不均外,短时间降雨量上更具有高度集中性,雨季降水往往在短时间内完成。频繁暴雨大量集中了全年的降雨量,有些年份的暴雨甚至占到年降雨量的 40% 以上。

2 元谋大断裂对东山泥石流的控制作用分析

东山地区的地形地貌、地层岩性及气候特点等条件均有利于泥石流的形成,通过查阅相关资料及调查分析研究,东山地区现有的泥石流频发的环境条件均与元谋大断裂有一定关联。

2.1 元谋盆地的演化过程

元谋盆地位于滇中高原北部,是一个在川滇南北大断裂构造带基础上发育起来的断陷盆地,长约 30 km ,宽约 8 km ^[11]。元谋盆地周围的夷平面和大姚、武定、昆明的夷平面高度上大致相似,海拔约 $2\ 600\text{ m}$,且本区的夷平面切割的最新地层是湖相层,有的地方切平了昆阳群或 K, J 地层,经区域对比认为夷平面形成时代为始新世晚期到中新世晚期。上新世时,因来自近东西向挤压作用,元谋断裂活动复活,元谋盆地因元谋断裂作用形成压陷盆地,盆地内部零星湖泊占据,主要分布在盆地西侧由基岩岗丘所

围成的洼地中,湖相地层厚度可达数 10 m。这套湖相地层在元谋断裂和金沙江深大断裂的共同作用下,由西北向东南缓倾抬升,小型湖泊沉积间断。

上新世末期,元谋盆地开始断陷,零散的小型湖泊连成一片,元谋地区发生了一次强构造运动,元谋盆地两侧山体缓慢而持久的上升,使基岩山麓和盆地中的一些低矮山梁顶部被河流、湖泊水淹没,至盆地西部和中部的纵向隆起的山梁开始抬升,盆地沉积相也由下部的湖泊沉积过渡到河湖交错相,造成区内洪积和冲积现象普遍,盆地东部地区继续断陷,元谋断裂北部东山开始加剧抬升。

大约 1.3 MaBP 发生的“元谋运动”引起了 Qp 层及同期的断陷盆地大规模缩小, Qp 层沉积结束。该次运动导致中生代地层以低角度推覆在 Qp 层之上,该期间内东山西山前区域滑坡、泥石流等灾害频发,并与间断式的盆地沉降相配合,形成盆地内较为典型的泥石流沉积山前洪积扇,洪积扇时代不尽相同,新、老洪积扇接触关系明显,老洪积扇扇头有切沟发育,新的洪积扇向老洪积扇下部迁移,规模比老洪积扇扇体小。主要顺冲沟两侧附近堆积。同时 Qp 内发生强烈的挤压褶皱变形,元谋盆地结束了大面积沉降运动转为区域抬升。在元谋运动过程中有过自南西北东的掀斜运动,这种掀斜运动可能使龙川江由南向北发育,并沿元谋断裂破碎带切穿了元谋盆地。经历 0.8 MaBP 的强烈挤压变形,川滇地区元谋断裂带控制的元谋盆地全面萎缩。随着元谋盆地的间歇性抬升,龙川江强烈下切,形成多期阶地,每期阶地形成之后都表现为区域稳定性,以致于在每期阶地上发育红色铁质风化壳。

大致在中更新世中晚期,区域性构造应力场发生改变,在 NW—NWW 向主应力方向的作用下,元谋断裂的活动方式由早期的逆冲逐渐转变为走滑,其左形走滑或剪切作用沿构造线发育了龙街、羊街、化同等盆地。通过对元谋盆地的演化分析、根据对现场研究调查可知,东山地区泥石流沟口堆积物分选差,岩性单一,主要为泥岩、砂岩等。堆积物充填“泥包石”,有粘性泥石流特征的流线构造、反粒级—混杂构造等宏观构造形态。从远处看,沟口古堆积体呈一定扇形体。崔之久^[12]认为较大规模泥石流暴发时,大量碎屑物质沿较长的河谷出口后,由于坡面开阔、平缓,往往形成扇形堆积体。综上所述元谋盆地为东山地区泥石流古堆积区。

2.2 元谋大断裂对东山地区泥石流形成影响分析

2.2.1 元谋断裂与泥石流沟空间位置关系

元谋断裂位于元谋盆地以东三台山山麓地带,向北越出境进

入四川称昔格达断裂,向南进入楚雄称绿汁江大断裂,总长达数百公里,为川滇块体内部次级地块的边界活动构造带^[13],并控制了沿线化同、羊街、元谋等多个盆地的演化^[14,16-17],对区域地质构造起着控制作用。断裂总体倾向东,元谋盆地倾向西,是晚新生代青藏高原与云南高原隆起过程中形成的众多断陷盆地之一,倾角 $74^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ^[18]。断裂破碎带明显,宽 50~150 m。西侧岩层倾角较陡,且有弱动力变质现象,属压扭性逆冲断裂。断裂东侧为中生界红层。西侧多为变质岩分布,并有多期火成岩侵入,褶皱密集,次一级断裂发育。该断裂为活动性断裂,主要表现为第四系早期的逆冲和晚期的左行走滑为主的两个明显阶段^[15-16]。早期逆冲构造现象在元谋构造带上发育普遍,主要表现为盆地东侧中生代“红层”逆冲至 Qp 层之上,并导致盆地东侧抬升。晚期的左行走滑为主的构造活动表现为局部挤压或张剪运动特征。早期逆冲活动构造线平行、斜向交汇在晚期晚期构造线的东侧,或两期构造线重合。通过详细调查及分析,元谋大断裂与各个泥石流沟的空间位置基本相似。综合选择工作区内老城河泥石流隐患点开展大比例尺工程地质测绘工作,依据典型性和代表性、危险性的原则,以该个泥石流为例阐述元谋断裂与东山地区泥石流的空间位置关系。通过调查分析可知,活动断裂带周围岩体较为破碎,孔隙率大,结构松散,入渗速率大,且多数处于不稳定状态,容易产生滑坡、崩塌,为泥石流储备了丰富的松散堆积物来源。

2.2.2 元谋大断裂对东山地形地貌的控制作用

上新世末期—中更新世中晚期元谋大断裂的逆冲作用使东山持续上升,元谋盆地下陷,尤其在“元谋运动”过程中,其形成现今元谋盆地及东山的地貌格局。后期,断裂多期构造运动导致的挤压、扭动,褶皱、断裂作用对“滇中红层”岩体结构造成破坏,加速岩体的风化,而后在风化剥蚀及流水侵蚀的作用下,形成东山地区如今利于泥石流暴发的地形地貌。即东山地区属于侵蚀构造中高山地貌,总体上地形陡峻,支沟沟床纵坡降均较大,且呈上游陡、下游趋缓的特点。流域水动力条件强大,输泥石能力较强。特别是流域内各支沟呈树枝状分布,再加上长度、纵坡降、沟道形态具差异性,为各支沟汇水形成洪峰叠加到达沟口奠定基础。同时,上游各支沟两岸及主沟中段左右两岸分布有较大面积的堆积物,呈残余的台地、扇地等形态分布,既具备汇水条件又具备丰富物源。而主沟中下游覆盖层发育较厚的崩坡积物,虽不利于形成地表径流,但物源极为丰富,若在水动力条件较强的条件下,极易形成特大型泥石流。

通过调查分析可知,活动断裂带周围岩体较为破碎,孔隙率大,结构松散,入渗速率大,且多数处于不稳定状态,容易产生滑坡、崩塌,为泥石流储备了丰富的松散堆积物来源。

2.2.2 元谋大断裂对东山地形地貌的控制作用 上新世末期—中更新世中晚期元谋大断裂的逆冲作用使东山持续上升,元谋盆地下陷,尤其在“元谋运动”过程中,其形成现今元谋盆地及东山的地貌格局。后期,断裂多期构造运动导致的挤压、扭动,褶皱、断裂作用对“滇中红层”岩体结构造成破坏,加速岩体的风化,而后在风化剥蚀及流水侵蚀的作用下,形成东山地区如今利于泥石流暴发的地形地貌。即东山地区属于侵蚀构造中高山地貌,总体上地形陡峻,主支沟沟床纵坡降均较大,且呈上游陡、下游趋缓的特点。流域水动力条件强大,输泥能力较强。特别是流域内各支沟呈树枝状分布,再加上长度、纵坡降、沟道形态具差异性,为各支沟汇水形成洪峰叠加到达沟口奠定基础。同时,上游各支沟两岸及主沟中段左右两岸分布有较大面积的堆积物,呈残余的台地、扇地等形态分布,既具备汇水条件又具备丰富物源。而主沟中下游覆盖层发育较厚的崩坡积物,虽不利于形成地表径流,但物源极为丰富,若在水动力条件较强的条件下,极易形成特大型泥石流。

2.2.3 元谋大断裂对东山地层岩性及其工程特性的控制作用

(1) 发生于大约 1.3 MaBP 发生的“元谋运动”元谋大断裂逆冲作用导致中生代地层以低角度推覆在 Qp 层之上,该构造作用直接决定了东山地区的地层分布情况,即东山地区山体由中生代地层构成。

(2) 断裂多期构造运动导致的挤压、扭动,褶皱、断裂作用对岩体结构造成破坏,至使岩体节理、裂隙发育,加剧表层岩体的风化。

因此在构造的破坏作用下岩体节理、裂隙发育,亦利于风化与坡面侵蚀的发生。总体上,东山地区分布的“滇中红层”可为泥石流暴发提供良好的物源。

3.2.4 元谋大断裂对元谋县气候形成的影响 气候变化主要受大地地貌格局变化的影响。第四纪以来,特别是晚更新世以来,由于印度板块的北移,青藏高原及其横断山地区强烈隆起,处于横断山中南段滇中高原的元谋同样经历着强烈的抬升作用。在元谋大断裂逆冲作用下,形成了元谋盆地,盆地阻挡了外部水汽的进入,加之焚风效应强烈,进而形成现今元谋的气候条件。该地区的气候条件一方面加剧了地表岩土体的风化,带来严重的水土流失,间接为泥石流形成提供较好的物源条件;一方面为箐沟暴发泥石

流提供了充足的水动力条件。利于泥石流的暴发。元谋干热河谷特殊的地质与地形地貌以及气候环境,造成当地生态环境极为脆弱。随着元谋县人口的增加、社会经济的不断发展,人类活动范围较之以前不断扩大,甚至在以前人类较少开展经济活动的区域也逐渐得以开发。这为当地经济带来巨大推动力的同时,人类活动也在部分区域给生态地质环境带来负面影响。部分地方由于持续的、过度的开发已经造成生态地质环境的严重恶化。据张建平^[19-20]的研究显示,当前元谋干热河谷生态类型分布上限已达海拔 1 600 m,可见元谋的生态环境已十分的脆弱。元谋干热河谷现代地貌的形成与人类活动具有密切关系,负面的影响主要是由于乱砍滥伐、坡地开垦及超载放牧以及各类工程建设,经济开发等活动使得部分地方环境退化严重、造成泥石流灾害严重发育,威胁元谋县人民的人身安全和财产。

3 东山地区泥石流空间分布及发育活动特征

3.1 东山地区泥石流分布特征

经现场调查,东山地区沿线共分布泥石流沟 22 条(图 1),东山泥石流成群、成带状广泛分布,且研究区内泥石流路线多经过高山峡谷区,易于泥石流发生发展,显著的地形地貌是研究区泥石流空间分布的重要影响因素之一。调查区内泥石流多发生在第四系全新统残坡积层和泥石流堆积层和东山地区分布的“滇中红层”。这是由于第四系松散物质较多,而“滇中红层”以砂岩为主,对活断层较为敏感,地表积累的松散物源丰富,容易形成泥石流。在垂向方向上,据调查统计,东山沿线泥石流多分布在 1 000~2 000 m 海拔区间上。在东山沿线,年平均降水量在 573.88 mm 左右能提供充沛的降水,且降水集中于主要集中在 6—9 月份之间;同时较高的海拔还给泥石流暴发提供了足够的势能,这些都为泥石流暴发提供了很好的条件。

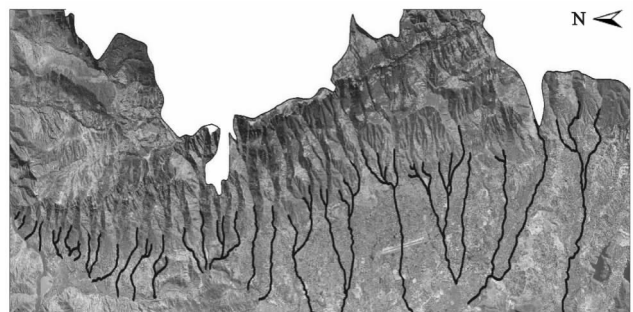


图 1 东山地区泥石流沟分布

3.2 东山地区泥石流发育活动特征

调查表明,研究区内 22 条泥石流均属沟谷型泥石流,且水动力条件均为暴雨,未发现坡面泥石流,泥石流规模以中型为主。东山沿线泥石流沟的流域面积差别悬殊。8 条泥石流沟道流域面积在 10~100 km²,12 条泥石流沟道流域面积在 5~10 km²,2 条泥石流沟道流域面积≤5 km²。泥石流沟流域面积最大的为老城河,约 77.8 km²,沟长约 27.5 km,相对高差约 1 545 m。泥石流沟流域面积最小的为江边小学泥石流沟,约 2.86 km²,沟长约 936 m,相对高差约 412 m。调查分析,东山沿线泥石流,汇水面积一般较大,坡降比较大,溪短流急,物源区、流通区较难区分,物质来源主要为两侧斜坡的残坡积层及下部风化碎石。该类泥石流具有如下特点:① 泥石流沟谷长、汇流面积大,多为长年有水沟谷;② 泥石流明显可分为物质来源区、流通区、堆积区。③ 物源区纵坡较大,地形陡峻,以侵蚀作用为主,固体物质来源主要来自于沟床和岸坡的松散堆积物,水动力主要由暴雨汇集提供。④ 流通区以侧向掏蚀作用和反复堆积作用为主,当堆积作用增加,沟谷纵坡减少,泥石流趋向稳定,反之趋势向剧烈。⑤ 堆积区一般纵坡小于 6%,为淤积段,堆积物混杂。该类沟谷型泥石流特征为突发性极强,危害性极大,应作为重点防范的地质灾害类型。

4 结论

(1) 从元谋大断裂在元谋盆地的演化历史来看,元谋大断裂不但对盆地的形成起到控制作用,同时也直接或间接的影响了东山地区的地形地貌、地层岩性及气候条件,并决定东山地区泥石流频发的特性。

(2) 东山地区因元谋断裂逆冲作用形成高中山地貌,该地貌沟谷发育,汇水面积大,河床纵坡比降大,横断面多呈 V 形,沟岸坡度陡峻,切割深度大,为泥石流暴发的有利地貌;

(3) 元谋断裂逆冲作用导致东山地区主要构成地层为“滇中红层”,该套地层为硬质岩与软质岩互层,属典型的易滑、易崩塌地层,而东山形成后元谋断裂的多期运动亦导致该套地层岩体破碎,节理、裂隙发育,利于风化与坡面侵蚀的发生。可为泥石流暴发提供良好的物源。最后,元谋断裂逆冲作用形成了元谋盆地,盆地阻挡了外部水汽的进入,加之焚风效应强烈,进而形成现今元谋的气候条件,其具备降雨分散而集中的特点,为泥石流暴发提供良好的降雨条件。

(4) 元谋断裂对东山地区泥石流的形成起到控制作用。其决定了东山地区泥石流频发的特性。

[参 考 文 献]

- [1] 唐邦兴,杜榕桓,康志成. 我国泥石流研究[J]. 地理学报,1980,35(3):259-264.
- [2] Di Baofu, Chen Ningsheng, Cui Peng, et al. GIS-based risk analysis of debris flow: An application in Sichuan, Southwest China[J]. International Journal of Sediment Research, 2008,23(2):138-148.
- [3] 铁永波,唐川. 山区城镇泥石流灾害风险控制模式探讨[J]. 灾害学,2008,23(3):10-14.
- [4] 吴平,郑文晓. 泥石流的形成条件及其防治措施[J]. 西部探矿工程,2008(3):4-5.
- [5] Sun Ping, Zhang Yongshuang, Shi Jusong, et al. Analysis on the dynamical process of Donghekou rockslide-debris flow triggered by 5·12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2011,8(2):140-148.
- [6] 高速,周平根,董颖,等. 泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析[J]. 工程地质学报,2002,10(3):279-283.
- [7] 许强,四川省 8·13 特大泥石流灾害特征、成因与启示田[J]. 工程地质学报,2010,18(5):506-608.
- [8] 梁京涛,王军,汪友明,等. 汶川 8.0 级地震触发地质灾害发育分布规律研究[J]. 灾害学,2015,30(1):63-68.
- [9] 黄润秋,李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2585-2592.
- [10] 韩征. 活动断裂区高速公路泥石流致灾参数计算与防灾措施优化研究[D]. 湖南长沙:中南大学,2012.
- [11] 陈云. 元谋盆地的第四纪红土[J]. 海洋地质与第四纪地质,1994,14(1):75-86.
- [12] 崔之久. 泥石流沉积与环境[M]. 北京:海澱出版社,1996.
- [13] Nur A, Ron H, Scotti O. Kinematics and mechanics of tectonic block rotations[J]. Geophys Monogr, 1989,4(4):31-46.
- [14] 卢海峰,何仲太,赵俊香,等. 元谋断裂晚第四纪活动性定量分析[J]. 中国地质大学学报:地球科学,2008,33(6):852-860.
- [15] 申旭辉,汪一鹏. 云南元谋地区新构造运动基本特征[M]// 邓起东. 活动断裂研究. 北京:地震出版社,1991:131-139.
- [16] 卢海峰,王瑞,赵俊香,等. 元谋断裂晚第四纪活动特征及其构造应力分析[J]. 第四纪研究,2009,29(1):173-182.
- [17] 李庆辰,蒋复初. 元谋盆地晚新生代沉积相与环境演变[J]. 地理学与国土研究,1993,9(3):30-36.
- [18] 张叶春,李吉均,朱俊杰,等. 晚新生代元谋盆地演化与河谷发育研究[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1999,35(1):199-205.
- [19] 张建平. 元谋干热河谷区蒸发量减少原因的灰色关联分析[J]. 云南地理环境研究,1994,6(2):68-75.
- [20] 张建平,王道杰,王玉宽,等. 元谋干热河谷区生态环境变迁探讨[J]. 地理科学,2000,20(2):148-152.