

川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征 与典型滑坡形成机理

郭长宝^{1,2}, 杜宇本³, 张永双^{1,2}, 张广泽³, 姚鑫^{1,2}, 王珂¹, 刘健^{1,2}
GUO Changbao^{1,2}, DU Yuben³, ZHANG Yongshuang^{1,2}, ZHANG Guangze³,
YAO Xin^{1,2}, WANG Ke¹, LIU Jian^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;*

3. *China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China*

摘要:在对川滇地块鲜水河断裂活动习性、地质灾害发育特征、典型地质灾害实例和稳定性等分析的基础上,探讨了鲜水河断裂带地质灾害的发育特征与大型滑坡形成机理。认为鲜水河断裂对该区内地质灾害有明显的控制作用:①断裂带内岩体结构破碎程度高,导致滑坡沿断裂带呈带状分布,约32.5%的地质灾害发育于距断裂带0.5km范围内,19.77%的地质灾害发育于距断裂带0.5~1.0km内,15.22%的地质灾害发育于距断裂带1.0~1.5km内,滑坡的滑动方向多垂直于断裂走向;②八美“土石林”是在断裂活动作用下形成的碎裂岩体,该类岩体力学强度低,稳定性差,滑坡灾害发育密度大;③断裂带内地震滑坡发育,在强震作用下形成的部分滑坡滑动彻底,现今稳定性较好;在地震作用下部分滑坡处于裂而未滑状态,在适当的外力作用下可发生失稳滑动;④断裂带穿越的斜坡或古地震滑坡,在断裂持续活动作用下,稳定性差并多次发生活动;⑤强降雨在一定程度上加速了断裂带坡体变形和地质灾害的发生频率。

关键词:鲜水河断裂带;大型滑坡;构造土石林;内外动力耦合作用;地震滑坡

中图分类号:P642;P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)01-0121-14

Guo C B, Du Y B, Zhang Y S, Zhang G Z, Yao X, Wang K, Liu J. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1):121-134

Abstract: With the geological hazard effect of the active fault as the main study object and on the basis of the development and activity characteristics of the Xianshuihe fault, geo-hazards distribution characteristics, typical geohazards characteristics and stability analysis and other aspects, this paper deals with the geohazard distribution characteristics and formation mechanism of main typical big landslides. The findings indicate that the Xianshuihe fault exerts significant controlling effect on landslides: ①the rock is of highly broken along the fault zone, resulting in zonal distribution of landslides along the fault, and about 32.5% of the geohazards are developed less than 0.5km from the fault zone, 19.77% developed 0.5~1.0km from the fault zone, and 15.22% developed 1.0~1.5km from the fault zone, with the landslide sliding direction mainly perpendicular to the fault; ②Bamei soil-stone forest is composed of shattered rocks formed under the faulting effect, characterized by low rock mass mechanics strength, poor stability and high landslide development

收稿日期:2014-09-04;修订日期:2014-11-13

资助项目:中国地质调查局项目(编号:12120113038000)、“十二·五”科技支撑计划课题(编号:2011BAK12B09、2012BAK10B02)、科技基础性工作专项(编号:2011FY110100-2)、中铁二院科研计划(编号:二院科字201303)和国家自然科学基金项目(批准号:41402321)

作者简介:郭长宝(1980-),男,博士,副研究员,从事工程地质与地质灾害方面研究。E-mail:guochangbao@163.com

density; ③the seismic landslides are well developed in the fault zone, some landslides slide thoroughly in the earthquake and show good stability; some landslides are partially in crack-sliding state formed in the earthquake, and are likely to slide under some external force; ④under the sustained activity of the fault, the slopes or the ancient seismic landslides penetrated by the fault are in poor stability and might experience several times of activities; ⑤to a certain extent, the heavy rain could accelerate the fault slope deformation and increase the frequency of geohazards.

Key words: Xianshuihe fault; large-giant landslide; tectonic soil-stone forest; coupling effect mechanism of endogenic and exogenic geological process; seismic landslides

中国西南地区多为高山峡谷区,地质构造复杂、新构造运动强烈,在内外动力耦合作用下,一系列大型崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害在该区密集分布^[1-3]。在复杂的地质背景条件下,地质灾害形成机制复杂,除与降雨、人类工程活动等因素密切相关外,活动断裂及其地震、蠕滑等活动特性是重要的影响因素,如1989年发生的华蓥山溪口滑坡、2000年西藏易贡滑坡,2008年汶川地震诱发的大光包滑坡、谢家店子滑坡等,均与活动断裂展布及活动性具有密切的关系。近年来,关于活动断裂的地质灾害效应研究受到国内外学者的普遍关注^[3-8],断裂构造的运动方式和活动强度对斜坡体稳定性的影响较大,是内外动力耦合作用下地质灾害的主要表现形式^[3,5]。在断裂构造对斜坡体应力场的影响下,坡体结构更易被破坏,从而产生规模更大、破坏性更强的滑坡、崩塌等地质灾害,特别是对于大型—巨型滑坡的形成与稳定性具有重要的影响。

位于青藏高原东南缘的鲜水河断裂带地处川西高山、高中山区,地质构造复杂,断裂活动性强,沿断裂带历史地震频发,加之破碎的岩土体及其软弱的力学性质,导致鲜水河断裂带内大型—巨型滑坡极为发育,危害严重,如1995年康定白土坎滑坡,多次滑动并堵塞折多河^[9],炉霍县55道班滑坡引起川藏公路G317路基失稳、改道^[10]等。滑坡活动频繁、危害严重,炉霍县泥石流频发并沿断裂带呈带状分布^[11],沿鲜水河断裂带发育的地质灾害已严重影响了该区的工程规划建设^[12]。本文在揭示鲜水河断裂带地质构造背景与断裂带发育特征的基础上,对鲜水河断裂带大型滑坡的分布特征进行了分类讨论,探讨了鲜水河活动断裂带地质灾害效应的主要表现形式,并对与断裂活动密切相关的大型滑坡发育特征和发生机制进行了探讨,研究结果对于活动构造带大型滑坡的成灾机理研究和防灾减灾工作具有重要的意义。

1 地质背景

通常所说的鲜水河断裂带北起甘孜东谷附近,向南经过炉霍、道孚、康定一线,至石棉县安顺场一带逐渐减弱消失(图1),全长约350km,总体走向320~330°,呈略向北东凸出的弧形^[13-16],在区域上与甘孜—玉树断裂共同构成川滇地块的北边界和巴颜喀拉地块的西南边界^[17]。已有研究表明,鲜水河断裂带是古生代形成发展起来的,至第四纪经历了复杂的构造演化^[18-19],是中国西南山区现今活动强烈的大型左旋走滑断裂带,具有规模大、活动强、地震频度高等特点。该断裂带分段活动性强,总体上由炉霍、道孚、乾宁、雅拉河、中谷、康定、折多塘、磨西等分支断裂组成(图1),全新世以来以左旋走滑为主,兼具一定的逆冲运动,以乾宁惠远寺一带为界,鲜水河断裂带北西段和南东段的活动速率有所差异,北西段活动速率为10~20mm/a,南东段小于10mm/a,一般为5mm/a左右^[20]。自1725年有地震记载以来,沿鲜水河断裂带共发生 $M_s \geq 7.0$ 的地震8次, $M_s 6.0 \sim 6.9$ 的地震14次,约占整个川西地区地震总数的1/2^[20],如1967年炉霍朱倭 $M_s 6.8$ 地震、1973年炉霍 $M_s 7.6$ 地震等。

2 地质灾害发育特征

鲜水河断裂带沿线岩土体结构破碎强烈,部分地段断裂破碎带宽几百米至数千米,在地震、断裂蠕滑、强降雨等因素作用下,该区大型—巨型滑坡、泥石流等地质灾害强烈发育,危害极大。根据资料收集、遥感地质解译和野外地质调查,沿鲜水河断裂带两侧各10km的范围内发育有崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害点683个,地质灾害发育密度大(图2-a)。对地质灾害与活动断裂进行距离分析可知:①地质灾害的发育分布与断裂活动关系密切,约32.5%的地质灾害发育于距断裂带0.5km的范围内(图2-b),19.77%的地质灾害发育于距断裂带0.5~1.0km范围内,

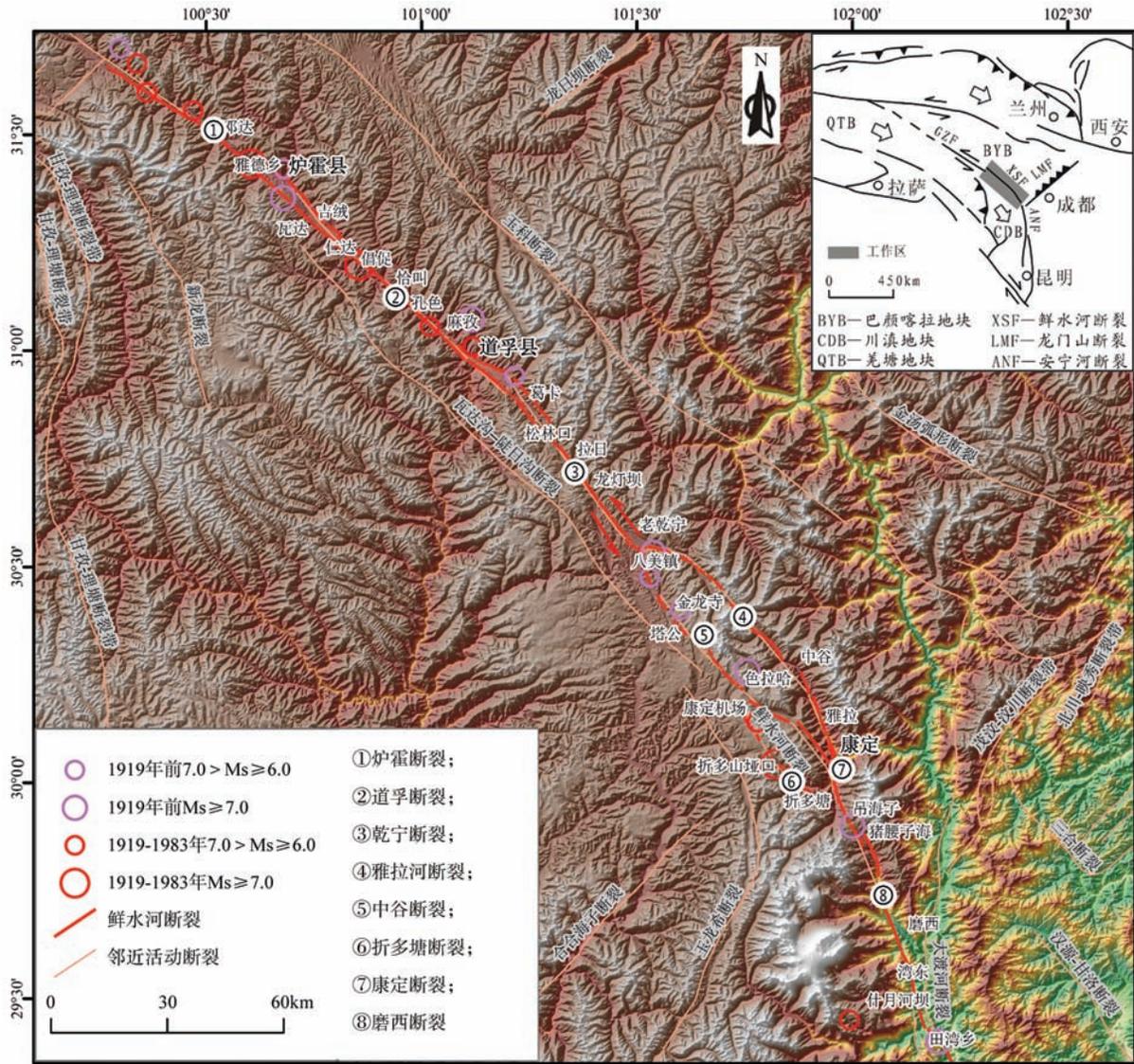


图 1 川西鲜水河断裂带空间展布特征

Fig. 1 Spatial distribution characteristics of Xianshuihe fault

BYB—巴颜喀拉地块;CDB—川滇地块;QTB—羌塘地块;
XSF—鲜水河断裂;LMF—龙门山断裂;ANF—安宁河断裂

15.22%的地质灾害发育于距断裂带 1.~1.5km 处,随着远离断裂带,地质灾害的数量和密度变小;②地质灾害分布密度大的区域主要集中在炉霍县朱倭乡一道孚县孟拖乡一带、康定县城周边等地;在八美一带,地质灾害较发育,主要受该区发育的八美构造土石林影响;③该区古地震滑坡发育,部分滑坡发生失稳复活,如 G319 国道 55 道班滑坡等,对公路的安全运营造成影响;④鲜水河断裂直接穿越部分滑坡、泥石流等灾害体,并控制其稳定性。

3 鲜水河断裂带大型滑坡典型实例分析

3.1 断裂带岩体结构控制的滑坡实例

3.1.1 鲜水河断裂居日村—麻孜乡带状发育的滑坡

一般情况下,断裂活动造成断裂带内岩体破碎程度高、岩土力学性质差,从而导致地质灾害发育密度大。遥感解译和野外调查表明,沿鲜水河断裂两侧、鲜水河两岸发育一系列滑坡,分布密度大(图 2)。以居日村至麻孜乡一带为例,滑坡的滑动方向多垂直于

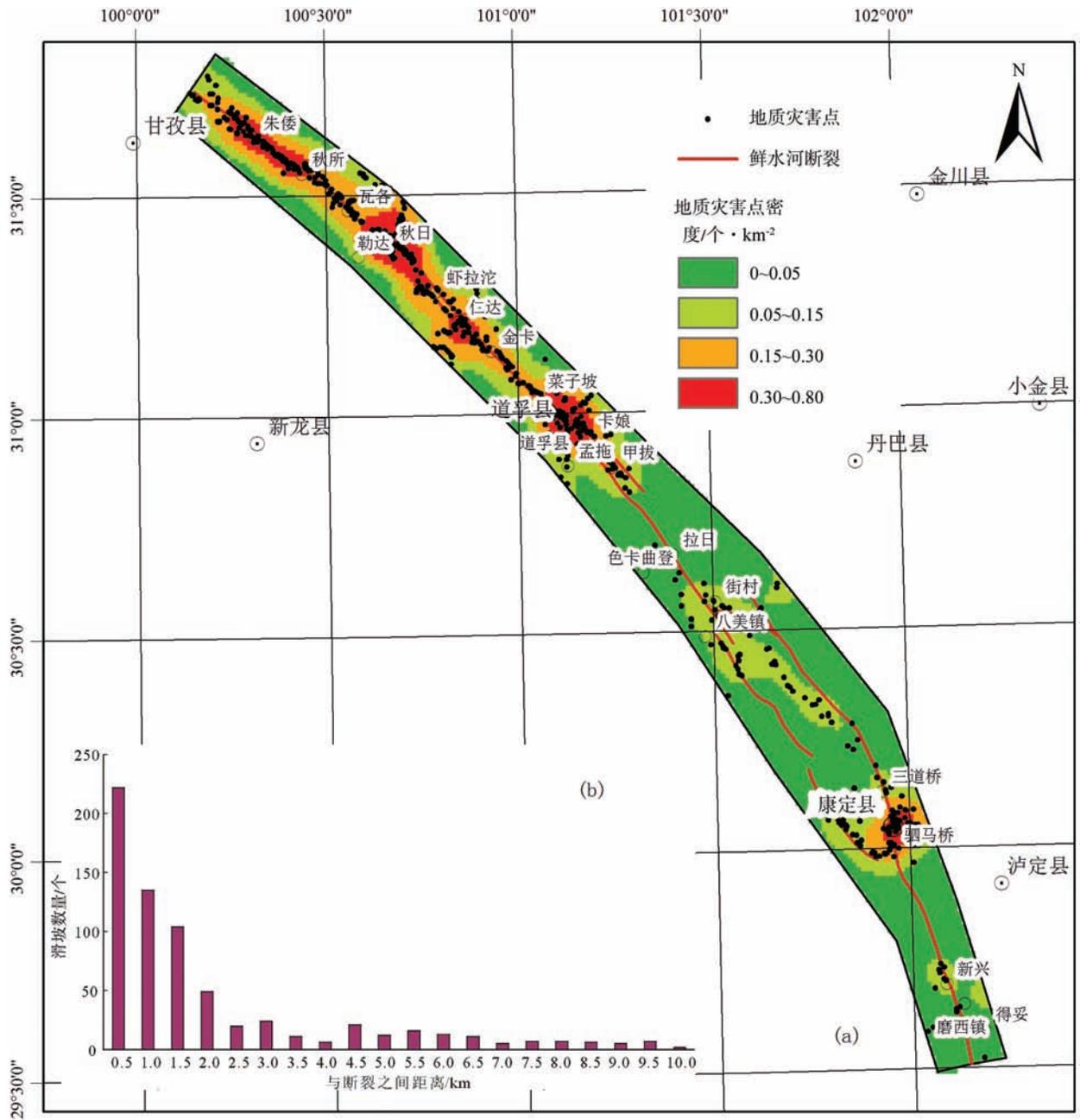


图2 川西鲜水河断裂带地质灾害空间发育分布特征
 Fig. 2 Spatial distribution characteristics of Xianshuihe fault

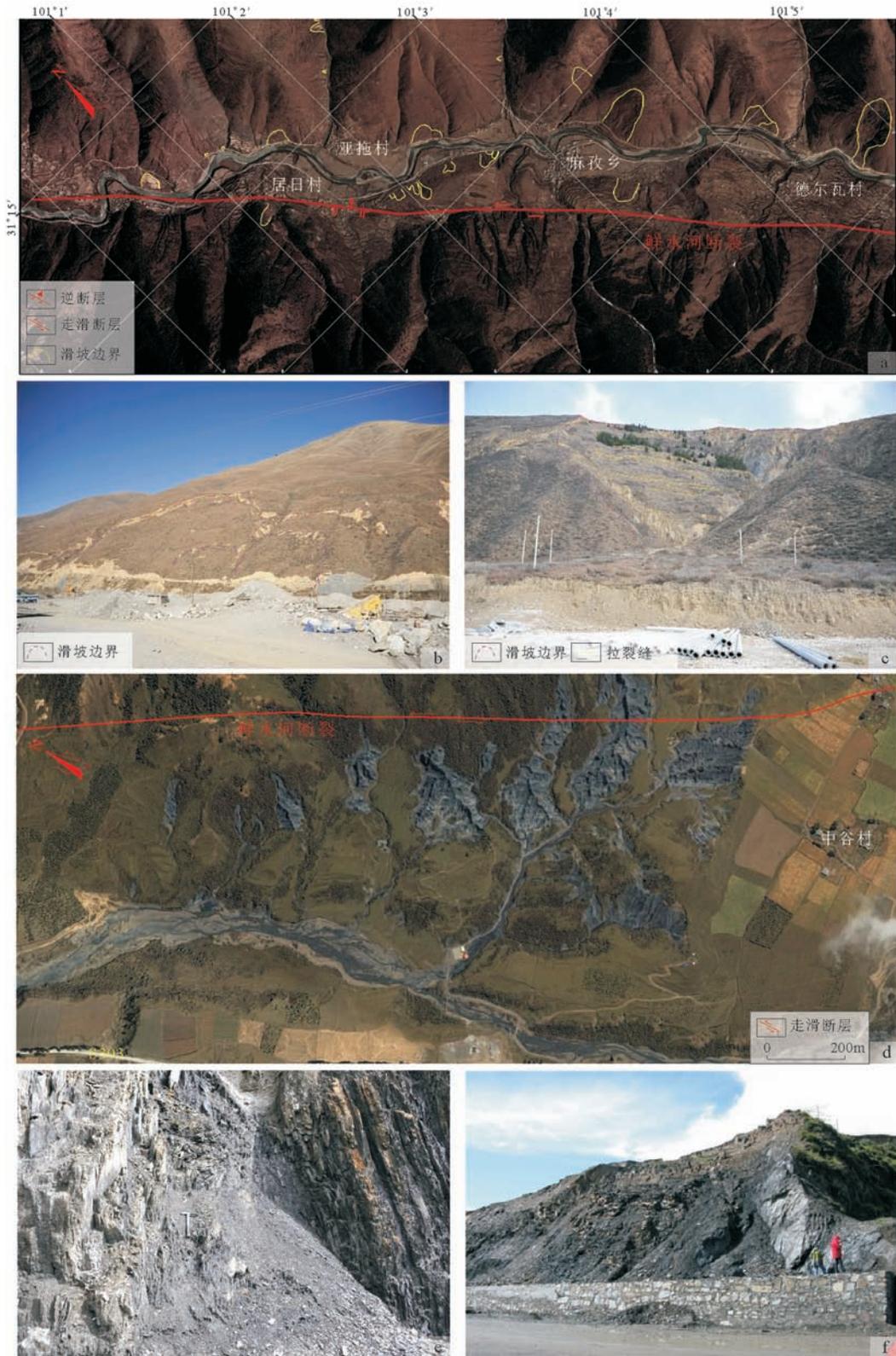
断裂走向和河流的流向(图版 I-a);在断裂带中,组成斜坡的岩土体结构松散、岩土力学性质差,常呈群状多次发生滑动(图版 I-b),部分滑坡呈倒葫芦状(图版 I-c),坡体内拉裂缝极为发育,稳定性差。

3.1.2 八美“土石林”不良工程地质特性及其灾害效应

鲜水河断裂带在地质历史时期曾处于挤压状

态,沿断裂带产生几十米至近千米宽的破碎带(图版 I-d)。挤压破碎带中常见砂板岩呈陡立状态(图版 I-e),破碎的岩块呈棱角状,部分尚能保持原岩的产状,部分层理已分辨不清,甚至成为糜棱岩化的粉末状,经淋滤呈石林状,常称“土石林”,主要由角砾岩和断层泥组成,原岩主要为中—上三叠统如年各组(T_3r^2)变质砂岩夹板岩。野外调查表

图版 I Plate I



a.居日村滑坡与活动断裂关系位置;b.亚拖村东南线性展布的滑坡群;c.麻孜乡东倒葫芦状滑坡;d.省道S303中谷村一带构造土石林、滑坡及泥石流灾害链;e.八美土石林中岩体破碎特征;f.S303省道三十六道班滑坡

明,“土石林”在八美、斯木乡、旦都等地呈群状出露地表,部分地段隐伏在地下。彭东等^[21]认为,旦都地区土石林属于脆性断裂,破碎产生的断裂破碎岩是重力和地震波联合作用的产物。

野外调查表明,土石林在构造破碎和风化后,岩土力学性质进一步弱化,滑坡、泥石流等地质灾害强烈发育,并形成滑坡—泥石流地质灾害链(图版 I-d,f)。土石林的基本物理力学指标测试结果表明,在天然状态下土石林的含水量较低,一般为8%~11.3%,孔隙比较大,为0.43~0.46,在天然状态下抗剪强度值较高,粘聚力 c 值为39.2~53.5kPa,在饱和状态下,其抗剪强度急剧降低, c 值仅为7.4~9.3kPa(表1),仅为饱水前的 $1/5\sim 1/6$,饱水后力学性质的急剧弱化导致土石林坡体中的滑坡、泥石流等地质灾害强烈发育。

3.2 断裂带剧烈活动(地震)诱发的大型滑坡实例

活动断裂对地质灾害的控制作用,还表现为粘滑作用下发生的强震,强震不仅能形成规模很大的地表破裂带,而且破坏斜坡的稳定性,形成大规模的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害链。

3.2.1 地震诱发滑坡的总体特征

由地震引起的崩塌、滑坡和泥石流灾害有时远远超过地震直接造成的灾害,在鲜水河断裂带内不乏实例。如1786年康定 $M_s7.5$ 地震、1973年炉霍 $M_s7.9$ 地震都曾诱发大量地震滑坡。由于鲜水河断裂近直立的断面和走滑运动方式的特点,炉霍 $M_s7.9$ 地震同震地质灾害沿断裂线性分布的特征十分突出^[22],大多数地质灾害集中分布于仁达—朱倭之间长70km,两侧各2km的范围内,断裂两侧滑坡的数量和规模无明显区别,分布范围与地表破裂带高度重合(图3)。

根据历史地震资料和野外地质调查结果,沿鲜

水河断裂带仍残留有历史地震形成的大量滑坡,具有以下特征:①滑坡形态特征明显,以基岩滑坡为主,平面以舌形、半圆形为主,滑坡边缘拉裂缝及陡坎清晰,如炉霍县克木村滚水坝滑坡(图4-a);②滑坡发育区地形高陡,滑坡顶趾高差一般在200m左右,滑前坡度一般在 30° 以上,滑后滑体坡度一般也超过 25° (图4-b);③地震滑坡规模较大,一般达到中型以上,部分为大型—特大型;在强震作用下,部分滑坡滑动距离大、滑体堆积在坡脚,目前稳定性较好,如摩岗岭滑坡、四十八道班滑坡等(图4-c);④地震作用下形成了大量“裂而未滑”的滑坡,该类滑体重拉裂缝极为发育,现今稳定性差,如道孚县东南足湾村滑坡(图4-d),在强降雨或再次地震作用下,极易发生整体滑动。

3.2.2 典型古地震滑坡发育特征

(1) 泸定县摩岗岭滑坡

摩岗岭滑坡位于四川泸定南35km的德威乡,大渡河右岸,滑坡地处活动强烈的Y字型构造中心,鲜水河断裂带的分支断裂磨西断裂从滑体中部穿过(图5-a,b),该滑坡由1786年6月1日四川省康定南发生的 $M_s7.5$ 地震诱发,发生滑动的岩体为元古界钾长花岗岩,被多组构造切割,岩体较为破碎。滑体长约1200m,宽1600m,最大厚度约250m,体积约 $1.8\times 10^8\text{m}^3$ ^[23,25,29]。滑坡发生后,滑体堵塞大渡河,坝高约167m,断流10日后河道溃决,洪水位到乐山仍高达十几米。由于溃坝及后期大渡河流的改造,局部残留的滑体体积约 $5700\times 10^4\text{m}^3$,在左岸保留较多。目前该滑坡总体稳定性较好^[24-25],对上下游水电工程、公路威胁较小。

(2) 道孚县孔色乡巨型古滑坡

在道孚县孔色乡东北侧(图6),发育一巨型复杂斜坡体(古滑坡),体积为 $2\times 10^8\sim 2.5\times 10^8\text{m}^3$,受鲜

表1 八美土石林基本物理力学性质及强度特性

Table 1 Basic physical and mechanical properties and strength characteristics of Bamei soil-stone forest

样品编号	取样地点	样品特征	含水 /%	密度 /g·cm ⁻³	干密度 /g·cm ⁻³	饱和度	孔隙比	液限	塑限	塑性 指数	有机质 含量	直剪试验			
												天然状态 c/kPa	天然状态 $\varphi/^\circ$	饱和状态 c/kPa	饱和状态 $\varphi/^\circ$
SCX141	八美土石林	灰黑色粉质 粘土夹碎石	8.1	2.00	1.85	0.50	0.43	20.4	11.7	8.7	2.8	39.2	32.2	7.5	28.7
SCX143-1	八美土石林	土石林土样	11.3	2.02	1.81	0.65	0.46	25.6	16.0	9.6	6.8	53.5	33.1	9.3	28.3
SCX143-2	景点	土石林土样	8.6	1.98	1.82	0.50	0.45	21.5	13.4	8.1	5.8	39.4	33.5	7.4	29.4

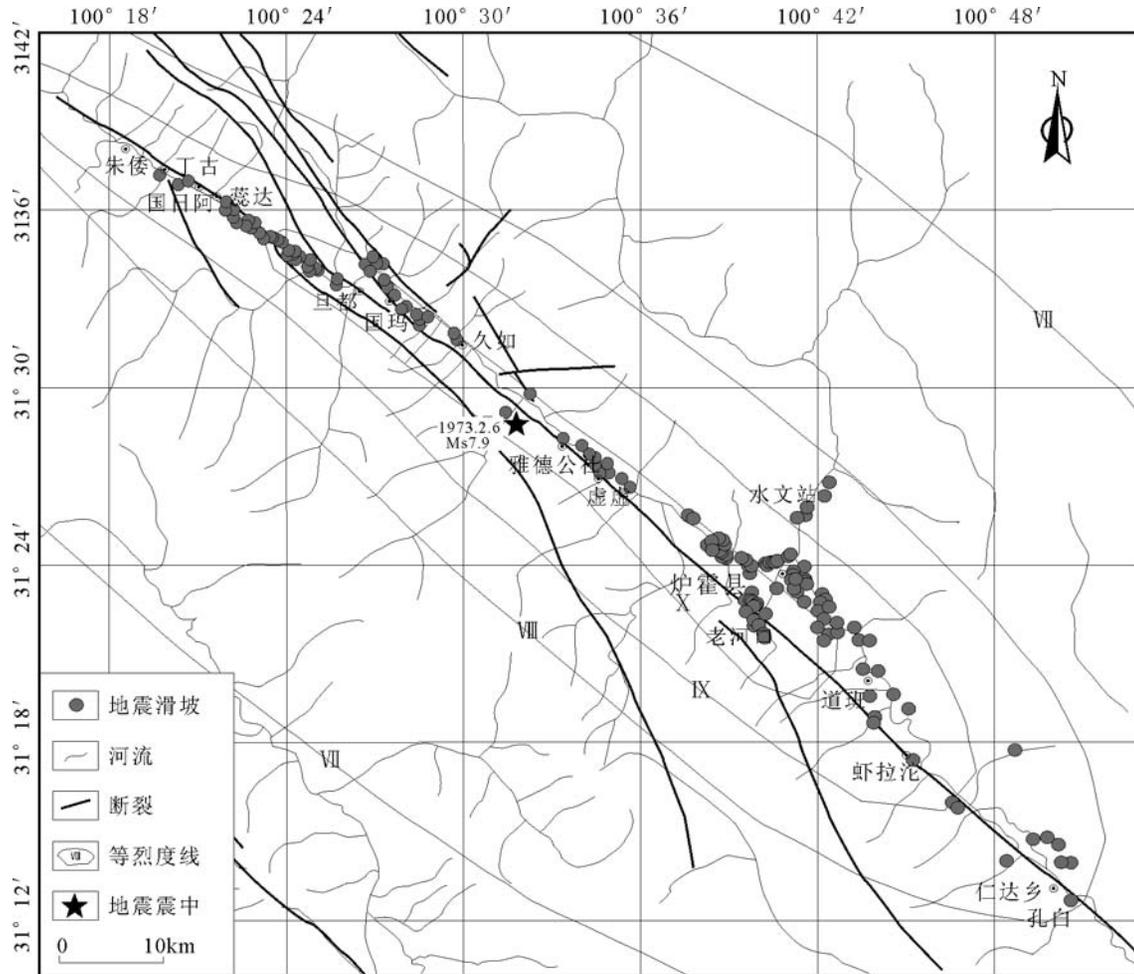


图3 1973年四川炉霍Ms7.9地震地质灾害分布图(据参考文献[27]修改)

Fig. 3 Seismic geohazard distribution of Luhuo Ms7.9 earthquake, 1973

水河断裂及其分支断裂影响,坡体南侧局部滑动,滑体物质堵塞鲜水河。推测该古滑坡为古地震作用下诱发的,目前整体处于稳定状态,但在鲜水河断裂蠕滑作用下,坡体内应力场复杂,局部易发生失稳滑动,但滑动方量较小,危害程度低。

3.3 断裂蠕滑作用控制的大型滑坡实例

鲜水河断裂的强烈左旋走滑运动错断一系列水系、山脊,其错断活动在部分斜坡带也直接诱发或加速了滑坡灾害的发生。当活动断裂通过斜坡体时,断裂活动直接控制着坡体的稳定,并且在断裂的持续活动下,滑坡体多次发生滑动,危害严重,如康定县白土坎滑坡、炉霍县55道班滑坡等。

3.3.1 康定县白土坎古滑坡

白土坎古滑坡位于康定县炉城填白土坎村(图7-a、图8-a),该滑坡位于鲜水河断裂带的康定断裂

和雅拉河断裂的中间地带(图7-b、图8-a),历史地震多发,岩体极为破碎,结构松散。白土坎古滑坡总体上呈马蹄形,由南无寺滑坡和白土坎滑坡2个次级滑体组成(图7-b、图8),滑体后缘海拔约3160m,前缘剪出口海拔2520~2535m。古滑坡向南以母猪笼泥石流沟为界,向北以甘孜报社为界,滑体前缘和北侧均由断裂控制,滑体长550~650m,宽约1260m,面积0.80km²,相对高差470m,滑体厚50~55m,总体积2000×10⁴m³,在地表水侵蚀、重力等多种营力作用下,古滑体前缘部分保留不完整。

1995年6月15日,在强降雨作用下,白土坎古滑坡发生复活,前缘约6.00×10⁴m³滑体坍塌滑入折多河堵塞河道,7月7日白土坎滑坡前缘再次发生滑塌,方量9.60×10⁴m³的土体进入折多河道,给当地造成极大的经济和财产损失。



图4 鲜水河断裂带典型古地震滑坡发育特征

Fig. 4 Development characteristics of typical landslides induced by ancient earthquakes along Xianshuihe fault

a—道孚县足湾村滑坡; b—四十七道班滑坡; c—四十八道班滑坡; d—炉霍县克木村滚水坝滑坡

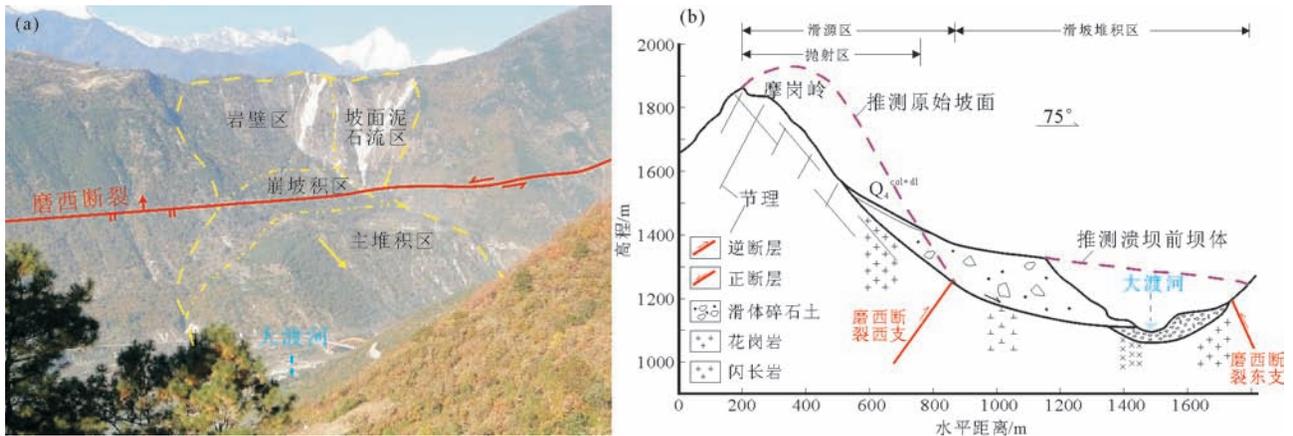


图5 四川泸定县德威乡摩岗岭滑坡全貌(a)和地质剖面(b)

(a、b分别据参考文献[29]、[25]修改)

Fig. 5 Full view of Mogangling landslide in Dewei Township, Luding County

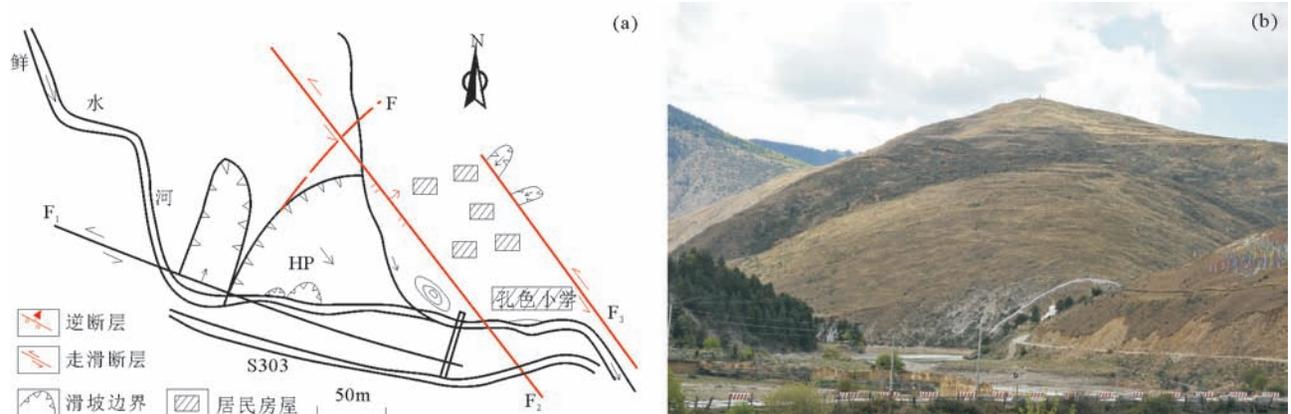


图6 四川道孚县孔色乡巨型古滑坡发育特征

Fig. 6 Characteristics of Kongse giant ancient landslide in Daofu County

a—孔色乡古滑坡与鲜水河断裂关系平面图;b—孔色乡巨型古滑坡全貌

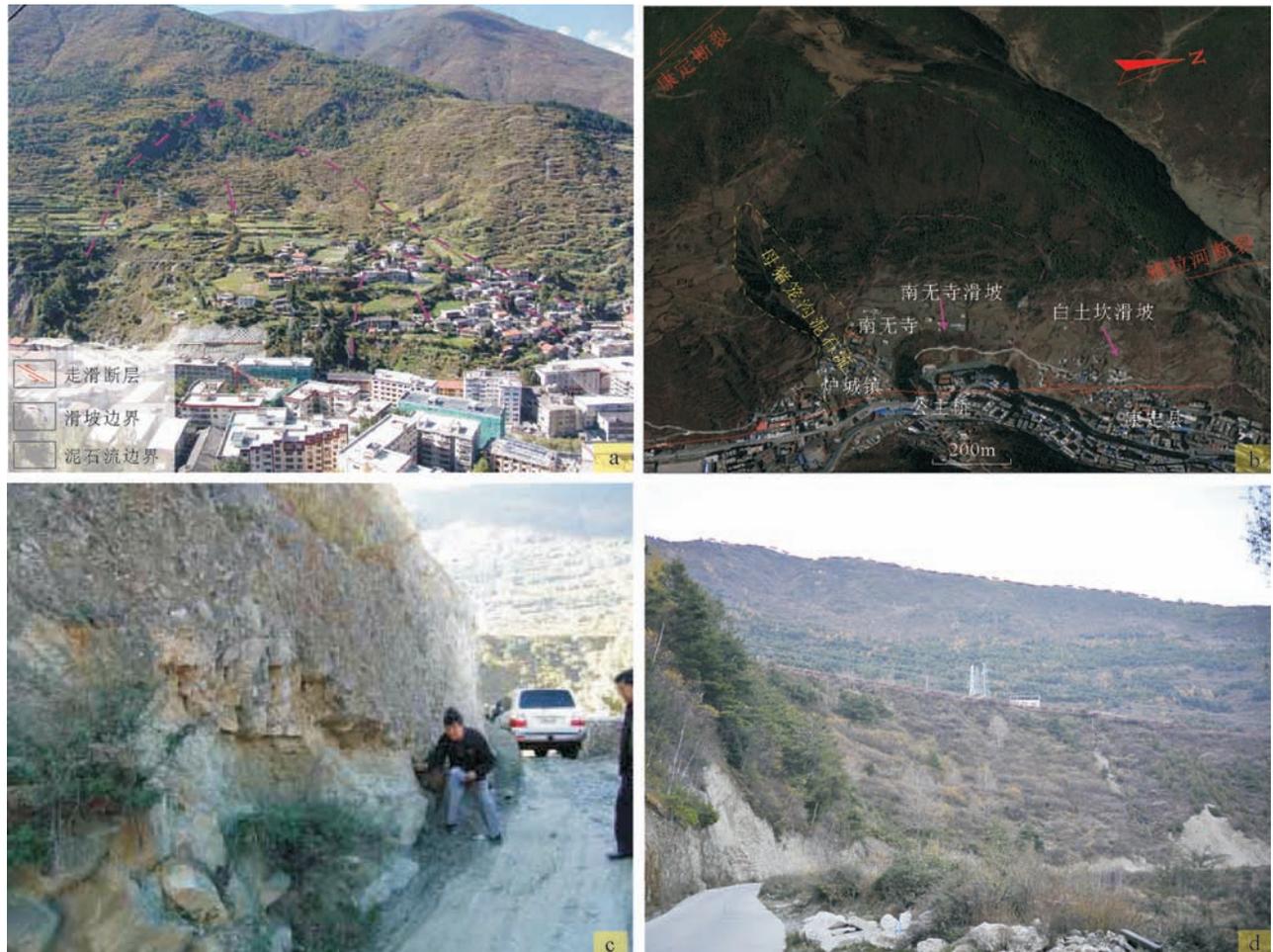


图7 白土坎滑坡的发育特征

Fig. 7 Characteristics of Baitukan landslide

a—白土坎滑坡全貌;b—白土坎遥感影像图;c—白土坎滑坡前缘滑带特征;d—南无寺滑坡前缘陡坎特征

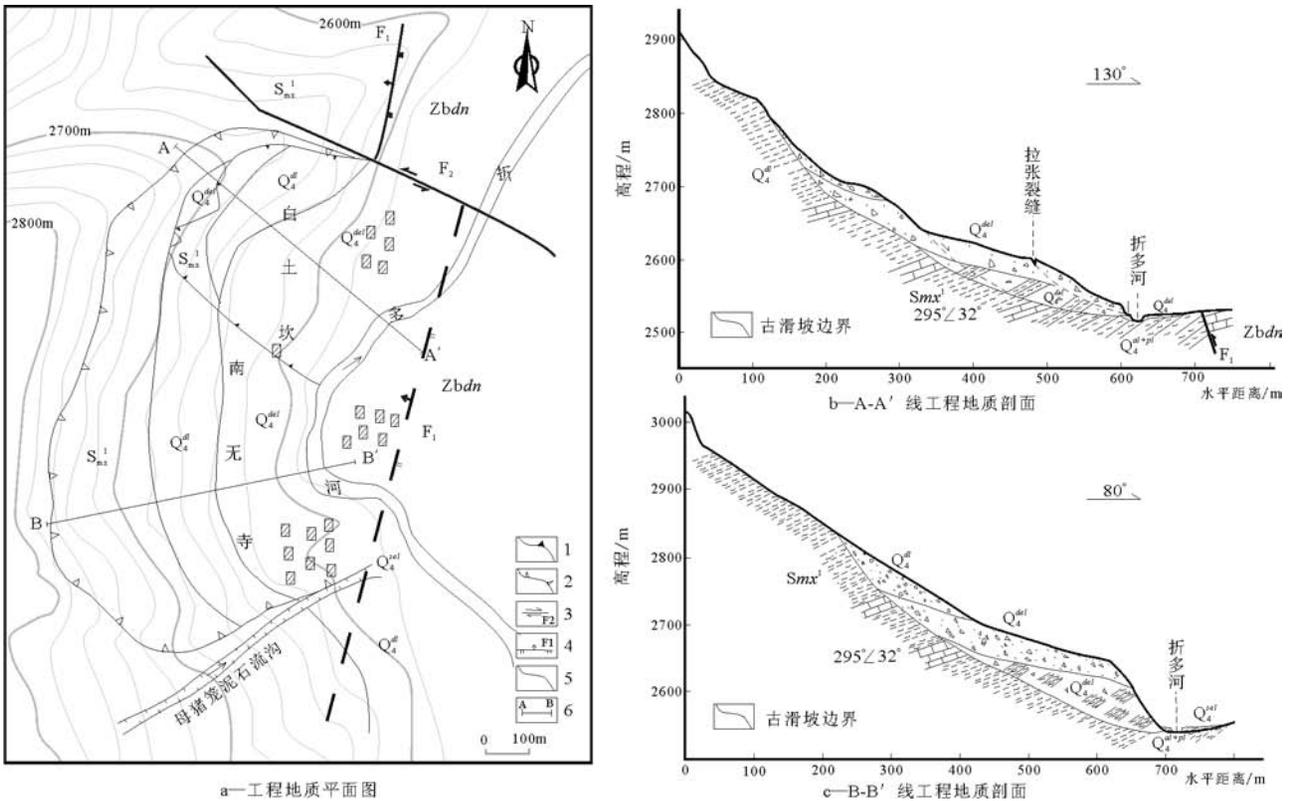


图8 白土坎滑坡工程地质图(据参考文献[9, 26]修改)

Fig. 8 Engineering geology map of Baitukan landslide

Q₄^{dl}—第四系崩坡积层; Q₄^{dl}—滑坡堆积层; Q₄^{nl}—泥石流堆积层; Q₄^{hpl}—冲洪积层;
 Smx¹—志留系茂县群上段; Zbdn—震旦系灯影组。1—复活滑坡边界; 2—古滑坡边界;
 3—走滑断层; 4—推测逆冲断层; 5—地表堆积物界线; 6—剖面线

(1)白土坎滑坡

白土坎滑坡是古滑坡北侧部分后期多次滑动而成的,平面上呈圈椅状(图7-a,b),滑壁后缘顶部海拔2810m,前缘海拔2535m,相对高差275m,滑体平均长约540m,宽约560m,据钻探成果揭露滑体厚度25~55m,滑体总方量 $995.60 \times 10^4 \text{m}^3$,滑坡后壁清晰,高20~40m,后壁基岩裸露,岩性以灰绿色千枚岩为主,岩体完整性极差,呈碎块状,中—强风化^[9,26]。滑体中、上部圈椅形地貌明显,可见三级平台(图8-b),滑坡主滑方向127°,在滑体前缘出露土黄色、灰绿色滑带土(图7-c)。白土坎滑坡结构复杂,由于断裂带内岩体破碎强烈,坡体内应力复杂,加之坡脚临空,虽经一期工程治理,受折多河下切作用的影响,该滑坡再次失稳的可能性极大,正在进行二期工程治理设计。

(2)南无寺滑坡

南无寺滑坡是白土坎古滑坡的一部分,位于白

土坎滑坡上游公主桥以北,平面形态呈“矩形”,后缘海拔2990m,前缘海拔2580m,相对高差410m,滑体长约550m,宽约750m,面积 0.45km^2 ,滑体厚48~50m,总方量约 $980 \times 10^4 \text{m}^3$ 。滑体呈上下陡、中部稍缓的特征(图7-d、图8-c),后缘坡度40~45°,前缘坡度60~70°,中部为平台,平均坡度10~15°。滑体由碎裂的千枚岩和碎石土组成,结构松散。

在强降雨作用下,滑体的抗剪强度发生弱化,加速了滑体的蠕滑变形,并进一步发生失稳。1995年,在古滑坡发生复活后,受雅拉河断裂活动的影响,该滑坡一直处于蠕滑状态,在白土坎滑坡的后缘形成拉裂缝,垂直位移30~50cm,水平位移20~40cm,其两侧形成羽状裂缝。

3.3.2 鲜水河水电站滑坡

在炉霍县仁达乡南约1500m,鲜水河水库大坝上游1000m,鲜水河左岸甲拉宗村发育有一大型一



图 9 鲜水河断裂附近鲜水河水电站滑坡

Fig. 9 Xianshuihe hydropower station landslide along Xianshuihe fault

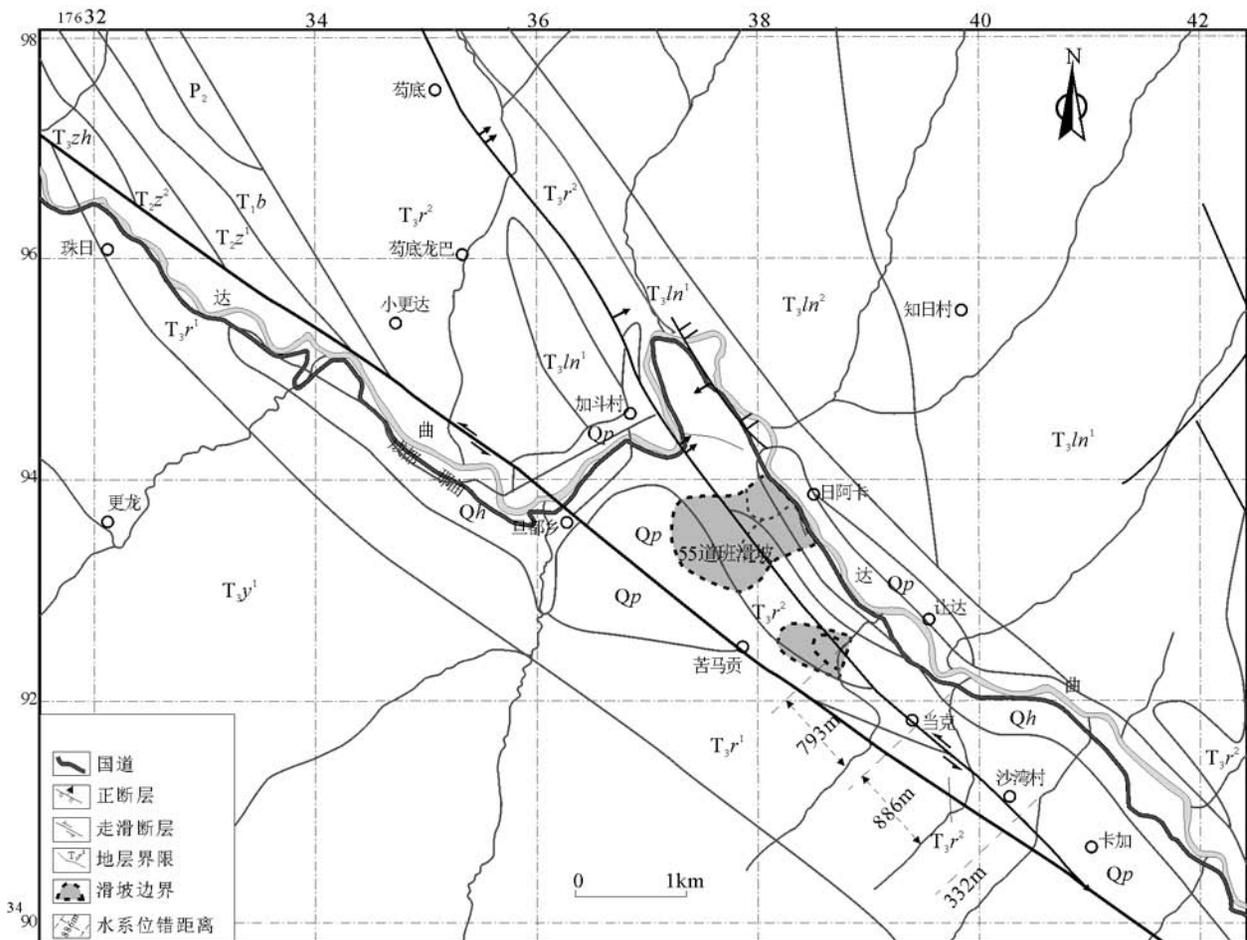


图 10 炉霍县 55 道班滑坡工程地质平面图

Fig. 10 Engineering geology map of No. 55 track section landslide, Luhuo County

巨型滑坡,鲜水河断裂从滑坡前缘通过(图9)。鲜水河断裂在经倡孜村槽谷后,NE向左旋错切一冲沟106m(图9)。断裂带上方斜坡呈圈椅状,为古滑坡产生的残留地貌。该古滑坡长800m,宽1300m,顶趾高差170m,平均坡度 17° ,滑体厚30m以上,不稳定滑体总方量约 $1000 \times 10^4 \text{m}^3$ 。滑坡边缘拉裂缝发育,并基本贯通为半圆状,后缘陡坎高差10m以上,拉裂缝宽度超过2m,表面发育多条平行陡坎,坡体北半部分表面破碎,可见构造挤压的黑灰色砂板岩小型滑塌体。该段断裂目前左旋走滑速率高达 10mm/a 以上^[20],前缘的走滑对滑坡整体产生了强烈的牵引作用,加速了滑坡的整体蠕变滑动。

3.3.3 炉霍县G317国道55道班古滑坡

炉霍县55道班滑坡位于国道G317旦都乡洛扎村段,亦称为老虎嘴滑坡^[10],滑坡发育于鲜水河右岸斜坡地带,构造上位于鲜水河断裂带炉霍断裂的2条分支断裂中部(图10)。滑坡区分布的基岩主要为如年各组(T_3r^2)绢云母板岩、变质砂岩等,岩体破碎强烈。地形地貌上,在旦都乡一日阿卡村一带,鲜水河

受到鲜水河断裂左旋走滑运动的影响,发生明显的S状弯曲;在鲜水河右岸苦马贡村—沙湾村一带,多条鲜水河支流出现同步左旋位错现象,最大位移可达793m、886m和332m(图10);在旦都村西南发育有断裂垭口,走向呈NW向,断裂破碎带宽厚。野外调查表明,55道班滑坡位于鲜水河断裂带北西段断层破碎带内,滑坡前部覆盖于达曲河二级阶地之上,¹⁴C测年结果表明该阶地形成年代为 $28000 \pm 1300 \text{a}$ ^[20]。

55道班滑坡在平面上总体呈舌型,可划分为3个区域(图11-a): I区,滑坡的后缘,鲜水河断裂从I区的东侧通过; II区,滑体的南侧,次级滑体后缘陡坎清晰,目前整体处于蠕滑状态; III区,位于滑体的北侧,整体稳定性差,由多个次级滑体组成。滑坡前缘高程3326.14m,后缘高程3489.42m,高差163.28m,滑坡平均长为647m,平均宽为635.5m,滑坡面积为 $41.12 \times 10^4 \text{m}^2$,平均厚度约25.5m,体积约 $1048.43 \times 10^4 \text{m}^3$,属于巨型中厚层滑坡。目前滑坡北侧前部发生复活,变形破坏迹象明显,特别是滑坡前缘变形较严重,引起地面隆起和挡墙开裂(图11-



图11 国道G317线55道班滑坡发育特征

Fig. 11 Characteristics of No. 55 track section landslide, Luhuo County

a—55道班滑坡发育全貌(镜向NW); b—III号滑体前缘挡土墙开裂; c—滑体北侧断层三角面

b),造成了国道G317发生损毁,国道G317新线路已绕行鲜水河左岸。目前,该滑坡仍处于不稳定状态,呈蠕滑状态,滑坡体中下部有多条拉裂缝,在断裂蠕滑和降雨作用下,该滑坡稳定性将进一步降低,并可能发生大规模滑动,滑体会堰塞鲜水河,并对G317新线的安全造成较大影响。

4 鲜水河断裂带大型滑坡形成机理

鲜水河断裂对区内的滑坡、泥石流、不稳定斜坡体等地质灾害具有较强的控制作用,主要表现在以下几个方面。

(1)断裂活动控制斜坡结构的演化,断裂带内岩体破碎程度高、岩土力学性质差,致使大型滑坡发育,且稳定性较差,如鲜水河断裂炉霍段、道孚段沿鲜水河断裂两侧发育的滑坡、泸定县海子山滑坡等。

(2)沿鲜水河断裂道孚八美—炉霍旦都段,发育有构造土石林,其工程地质力学性质差,滑坡和泥石流等地质灾害发育较多。

(3)断裂的剧烈滑动(如地震)造成岩土体破碎,特别是原地发生多次历史强震,造成大型—巨型古地震滑坡发育密度大,既有一滑到底目前稳定性较好的滑坡,也有裂而未滑目前稳定性差的滑坡。

(4)断裂的蠕滑作用对滑坡和泥石流的控制作用明显,特别是当活动断裂直接穿越滑坡、泥石流等地质灾害体时,对地质灾害具有直接的影响和触发作用,如康定白土坎滑坡、炉霍县韩家沟泥石流、炉霍县格西乡月西沟泥石流等。

(5)强降雨在一定程度上加速了地质灾害的发生,如1995年6月15日,康定县爆发泥石流,泥石流流速达 $230\text{m}^3/\text{s}$,造成康定县城街道掩埋、房屋被毁,在强降雨作用下,诱发白土坎老滑坡复活,其前缘约 $6.00\times 10^4\text{m}^3$ 滑体坍塌滑入折多河堵塞河道^[9,26];1995年7月25日,在康定县舍联乡响水沟大渡河东岸发生山体滑坡,约 $10\times 10^4\text{m}^3$ 的岩石夹泥沙滚入大渡河,形成一条长200m、宽约15m、高约100m的堆石坝,造成大渡河断流,形成堰塞湖,2009年7月该处又发生特大泥石流灾害^[27-28]。

5 结论

断裂活动对地质灾害的发育分布具有显著的

控制作用,本文在资料收集、遥感解译和现场调查分析的基础上,对鲜水河断裂带的地质灾害效应进行了分析,并论述了典型滑坡灾害的发育特征和形成机理,取得以下主要结论和认识。

(1)鲜水河断裂带现今活动特征复杂,既有强震复发背景,又有持续左旋走滑运动特征,导致该区地质灾害形成机理复杂,特别是沿断裂带发育一些大型—巨型滑坡,具有发育密度大、复发频繁、危害大等特点。

(2)鲜水河断裂对滑坡的影响,主要表现为岩体结构对滑坡的控制、断裂带剧烈活动(地震)诱发、断裂蠕滑引起的滑坡等方面,滑坡滑动方向多与断裂走向呈大角度相交。约32.5%的地质灾害发育于距断裂带0.5km的范围内,19.77%的地质灾害发育于距断裂带0.5~1.0km内,15.22%的地质灾害发育于距断裂带1.0~1.5km内。

(3)沿鲜水河断裂带发育有八美“土石林”,在构造作用下,该类岩体结构差,呈碎裂化,力学性质差,滑坡、泥石流等灾害发育密度大。

(4)在古地震作用下形成的大型—巨型滑坡,目前部分形态保存较好,既有滑动彻底且目前稳定性较好的滑坡,又有裂而未滑目前稳定性较差的滑坡。部分滑坡直接跨越断层,受断裂活动作用影响,特别是鲜水河断裂北段(道孚段、炉霍段),由于断裂现今活动速率高,造成坡体内应力复杂,滑坡现今稳定性差,多个滑坡发生持续活动,危害大。

由于滑坡影响因素多,特别是在断裂活动作用下,一些大型—巨型滑坡的形成机理更加复杂,对活动断裂地质灾害成灾机理的研究还处于探索的过程,有待于进一步深入研究。

致谢:中国地质科学院地质力学研究所汪西海教授级高工、张瑞端和付晓晓硕士参加了部分野外地质调查工作,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心孙晓明副主任、中国科学院地质与地球物理研究所曲永新研究员对本文给予了指导,审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-451.
- [2]黄润秋, 许强, 等. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- [3]张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 131-141.
- [4]王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.
- [5]李晓, 李守定, 陈剑, 等. 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1792-1806.
- [6]Martel S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon [J]. Marine Geology, 2004, (23): 319-339.
- [7]Jian Chen, Fuchu Dai, Tongyan Lv, et al. Holocene landslide-dammed lake deposits in the Upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau and their ages[J]. Quaternary International, 2013, (198): 107-113.
- [8]郭长宝, 张永双, 孟庆伟, 等. 断裂构造对斜坡应力场影响的数值模拟及成灾机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 592-599.
- [9]唐小平, 郑万模, 杨学之. 康定白土坎滑坡特征及防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10(1): 29-34.
- [10]王东辉, 肖红勇, 李明辉. 滑坡滑前地质模型重建方法与思路——以鲜水河断裂带老虎嘴滑坡为例[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 111-116.
- [11]蒋瑜阳, 唐川, 杨泰平. 鲜水河地震带炉霍段泥石流特征初步研究[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 78-83.
- [12]姚令侃, 邱燕玲, 魏永幸. 青藏高原东缘进藏高等级道路面临的挑战[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 719-734.
- [13]钱洪. 鲜水河断裂带上潜在震源区的地质学判定[J]. 四川地震, 1988, 2: 20-28.
- [14]李海兵, 许志琴, 杨经绥. 青藏高原北缘和东缘造山带的崛起及造山机制[C]//许志琴, 杨经绥, 李海滨, 等. 造山的高原. 北京: 地质出版社, 2007: 276-294.
- [15]张岳桥, 陈文, 杨农. 川西鲜水河断裂带新生代剪切变形 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(7): 613-621.
- [16]熊探宇, 姚鑫, 张永双. 鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述[J]. 地质力学学报, 2010, 16(2): 102-113.
- [17]Wen Xueze, Jia Jinkang, Pan Mao, et al. Recent slip rates, earthquake recurrence intervals and strong seismic hazards on the north-western segment of the Xianshuihe fault zone[J]. Earthquake Research in China, 1988, 2(4): 432-451.
- [18]许志琴, 李化启, 侯立玮, 等. 青藏高原东缘龙门山—锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1262-1276.
- [19]Roger F, Calassou S, Lancelot, et al. Miocene emplacement and deformation of the Konga Shan granite (Xianshui He fault zone, west-Sichuan, China): geodynamic implications[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1995, 130(1/4): 201-216.
- [20]李天福, 杜其方. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估[M]. 成都: 成都地图出版社, 1997.
- [21]彭东, 范晓, 王兆成, 等. 鲜水河断裂带炉霍旦都士林构造初步研究[J]. 四川地质学报, 2012, 32(1): 6-9.
- [22]李明辉, 王东辉, 高延超, 等. 鲜水河断裂带炉霍7.9级地震地质灾害研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 37-41.
- [23]殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京: 中国大地出版社, 1997.
- [24]Wu Junfeng, Wang Yunsheng, Dong Simeng, et al. Genetic mechanism and failure process of the Mogangling seismic landslide[J]. Journal Geological Society of India, 2013, (82): 277-282.
- [25]张御阳. 强震触发摩岗岭滑坡成因机制及运动特性研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2013.
- [26]袁永旭, 郑万模, 郑勇, 等. 四川省康定城白土坎滑坡特征及其防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(s): 235-240.
- [27]刘传正. 四川康定“7.23”特大泥石流灾害[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, (3): 51.
- [28]王敏, 孙树峻. 甘孜州“7.23”特大泥石流灾害气象成因分析及防御对策研究[J]. 高原山地气象研究, 2009, (4): 77-81.