

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210210001

甘肃岷县中寨沟流域内泥石流发育差异的 主控因素分析*

万飞鹏^{1,2,3}, 杨为民^{1,2}, 渠敬凯^{1,3}, 张田田^{1,2,3}, 吴季寰^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081; 2. 新构造运动与地质灾害重点实验室,北京 100081;
3. 中国地质大学,北京 100083)

摘要: 中寨沟流域位于甘肃省定西市岷县中寨镇,是青藏高原东北部地区具有代表性的极高敏感性泥石流流域之一,该流域内泥石流发育受地形条件及地质条件控制明显。基于野外调查、遥感解译等,结合已有成果资料,系统总结中寨沟流域内泥石流的形成条件,深入剖析中寨沟流域主沟及各支沟泥石流分布发育特征、类型、发育规模、程度等,提出以流域单位面积的泥石流一次最大冲出物质量贡献值为标准来表征泥石流的发育程度,从而探讨流域面积、断裂活动、坡度、地层岩性等因素对泥石流发育的控制作用。研究表明:中寨沟流域内泥石流发育规模差异的主控因素为流域面积及断层活动;发育程度差异的主控因素为坡度及地层岩性。

关键词: 岷县中寨沟流域; 泥石流发育程度; 主控因素; 一次最大冲出物质量; 地层岩性; 断裂活动
中图分类号: P694;P642.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0683-12

Analysis on Main Controlling Factors of Debris Flow Development Difference in Zhongzhai Gully Basin of Minxian County, Gansu Province

WAN Feipeng^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,2}, QU Jingkai^{1,3}, ZHANG Tiantian^{1,2,3}, WU Jihuan^{1,2,3}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Beijing 100081, China;
3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Zhongzhai gully basin is located in Zhongzhai Town, Minxian County, Dingxi City, Gansu Province. It is one of the representative areas which are extremely sensitive to debris flows in the northeast Qinghai-Tibet Plateau. The development of debris flow in this basin is obviously controlled by the topographical and geological conditions. Based on the field investigation, remote sensing interpretation, etc., and combined with the existing data, this paper systematically summarizes the formation conditions of debris flows in Zhongzhai gully basin. The distribution, development characteristics, types, development scale and degree of debris flows in the main and branch gullies of Zhongzhai gully basin are analyzed. The maximum discharge mass contribution value per unit area is put forward

* 收稿日期:2021-02-10;修回日期:2021-05-09

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)资助

作者简介:万飞鹏(1997—),男,硕士研究生。主要从事地质灾害、工程地质调查等方面的研究。

E-mail:1947384989@qq.com

通讯作者:杨为民(1965—),男,研究员,博士。主要从事地质灾害、工程地质、构造地质等方面的研究。

E-mail:snon_72@163.com

to characterize the development degree of debris flow. Then the controlling factors, including basin area, fault activity, slope and stratum lithology, on the development of debris flow are discussed. The results show that: the main factors controlling the development scale difference of debris flow in Zhongzhai gully basin are basin area and fault activity; the main factors controlling the development degree difference are slope and formation lithology.

Keywords: Zhongzhai gully basin in Minxian country; development degree of debris flow; main controlling factors; maximum discharge mass; formation lithology; fault activity

引 言

岷县是甘肃省泥石流灾害高发区之一,境内共有泥石流灾害隐患点148处,历史上曾发生多次泥石流灾害,如1988年6月20日,茶埠镇大竜村发生暴雨泥石流,死亡17人;1995年6月6日,马坞乡上玖庄发生暴雨泥石流灾害,死亡31人;2012年5月10日,岷县暴发群发性山洪泥石流,造成59人死亡或失踪。特别是“2010.5.10泥石流”事件发生后,区内泥石流灾害的形成原因、发育特征、危险性评价、防治措施等方面引起国内众多学者和专家的关注^[1-4]。中寨沟发育于洮河右岸,是岷县地区极高敏感性泥石流流域之一。历史上,中寨沟流域也曾发生过多次严重的泥石流灾害,特别是在2013年岷县-漳县地震后,该流域内泥石流沟积累了大量的松散固体物质,在遭遇极端降雨的条件下,具有再次暴发大型泥石流的可能性,严重威胁沟内村庄及沟口处的中寨镇人民生命财产安全。

有关泥石流发育差异的主控因素分析,国内外成果丰硕^[5-9]。如四川岷江流域上游地区,地质条件和降雨条件大致相同,因地形条件的不同,导致一个区域的沟谷暴发泥石流的频率有着明显不同,表明地形条件是控制泥石流发育的关键因素之一^[10]。在以川西地区17条泥石流沟为样本的研究中,岩石硬度的差异对泥石流发生频率具有显著影响,据此预测单沟泥石流暴发频率,准确率可达74.36%^[11]。众多研究表明,地形、地质、降雨、人类活动等因素对泥石流形成、分布发育影响迥异^[12-14],这些因素中往往存在一个或多个因素对泥石流的发育控制作用尤为明显。野外科学考察表明,中寨沟流域内泥石流发育,各支沟泥石流特征差异明显,与流域面积、地形差异、不同的地层岩性区及断裂的差异活动等因素密切相关。因此,本文从中寨沟泥石流发育的条件入手,深入剖析中寨沟流域泥石流特征,

探索控制该流域泥石流发育的主控因素,以期对研究区泥石流防灾减灾提供科学依据。

1 中寨沟流域泥石流的环境背景条件

中寨沟流域位于甘肃省定西市岷县中寨镇北侧,地貌类型为高原形态山区,地形起伏变化大,隶属温带半湿润向高寒湿润气候过渡带,降雨集中,短时强降雨频发,受临潭-宕昌断裂活动影响,区内岩体破碎。诸多因素导致流域内泥石流灾害频发,除中寨沟主沟泥石流发育外,流域内共发育有9条支沟泥石流沟。

1.1 地质条件

甘肃省岷县地质构造复杂,其北部发育有区域性大断裂西秦岭断裂,南部有临潭-宕昌断裂带与礼县-罗家堡断裂、光盖山-迭山断裂带与两当-江洛断裂、迭部-白龙江断裂带与康县-略阳断裂带、塔藏断裂带与哈南-青山湾-稻畦子断裂带,断裂活动导致该地区地震频发。据对岷县周边150 km范围内的地震统计,公元前193年至2014年5月,区内共发生4.7级以上地震114次,其中4.7~4.9级地震21次,5.0~5.9级地震59次,6.0~6.9级地震26次,7.0~7.9级地震6次,8.0~8.9级地震2次^[15]。较高频率中强震的发生对岷县地区岩土体的稳定性产生了极大的影响,地震活动产生了大量的破碎岩土体及不稳定坡体,在降雨作用下易导致崩塌、滑坡灾害的发生,同时也为岷县地区泥石流灾害频发奠定了物源基础。

中寨沟构造上处于临潭-宕昌断裂带,流域内共发育有三条北西西向断裂(图1),均为临潭-宕昌断裂分支断裂,其中 F_1 断裂走向 106.5° , F_2 断裂走向 104° , F_3 断裂走向 115° 。诸多研究表明,临潭-宕昌断裂为第四纪活动断裂,断裂带内地震及构造运动

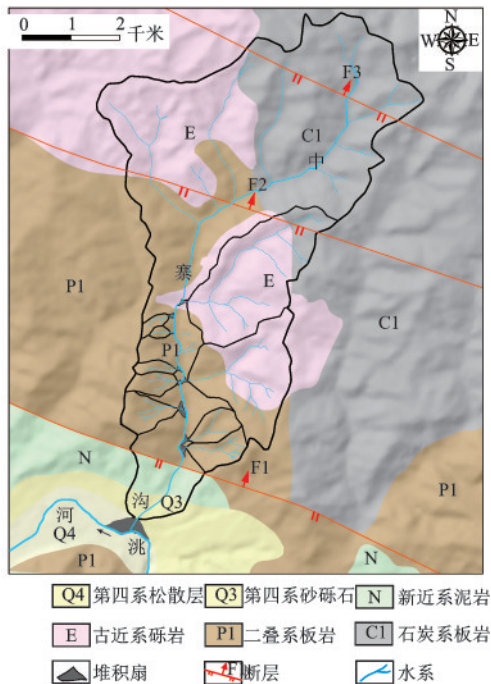


图1 中寨沟流域泥石流灾害地质略图

Fig.1 Geological sketch of debris flow disaster in Zhongzhai gully basin

频繁^[16-19]。中寨沟流域内三条分支断裂均表现出一定的活动性,且据实际调查,断裂活动性由北向南逐渐增强。在活动断裂的作用下,流域内泥石流物源丰富,断裂破碎带物源量明显高于断裂带外。

中寨沟主沟形成区地层岩性主要为石炭系板岩,少量板岩在风化作用下沿面理面剥离,坡体表层厚度不等的黄土在持续降雨的冲刷作用下产生面蚀,补给沟道,物源补给量较少。主沟流通区地层岩性以古近系砂砾岩、砾岩及二叠系板岩为主,上覆厚5~15 m的第四系黄土,黄土在降雨作用下浸润,自重加大,超过土岩接触面的抗剪强度后形成滑坡,滑坡体堆积于沟道内,流通区的物源补给显著增加了中寨沟的物源量;黄土下伏基岩主要为板岩及砾岩,流域内板岩强风化带厚度为1~5 m,强风化板岩在强降雨后极易剥离母岩体向下堆积,为沟道的主要物源之一;古近系地层在差异风化作用下产生裂隙,在雨后重力势能增加,厚层状砾岩以崩塌形式补给沟道。其次,F₁、F₂断层斜穿流域流通区,受断裂活动的影响,古近系砾岩岩体中节理裂隙发育,易发生较大规模的崩塌;而石炭系、二叠系板岩在构造应力作用下裂隙发育,岩体破碎,易风化剥落。因此,流通区段对主沟物源补给十分充足。

1.2 地形地貌

中寨沟流域地形高差起伏大,流域最高点海拔3 350 m,最低点2 217 m。图2为流域不同位置的地形剖面,其中AA'剖面显示中寨沟主沟沟谷纵向坡度为4.5°左右,主沟沟谷宽度较大,流域呈狭长型,为典型的河谷型泥石流沟;BB'剖面显示形成区发育的各冲沟横向坡度小;CC'显示在流通区,主沟存在部分横向坡度较大的地段,但整体形态仍呈“U”型。牙力沟靠近主沟形成区,该支沟沟谷形态从形成区到流通区,由“U”型向宽“V”型转变,纵向坡降与主沟近似,但横向坡度局部变化较大,左岸平均坡度为15°左右,右岸平均20°。DD'及EE'剖面为主沟流通区左右两岸支沟的地形剖面,除牙力沟外,各支沟沟谷形态均呈“V”型,为沟谷型泥石流沟。

中寨沟主沟及牙力沟地形较缓,但汇水面积较大,有利于降水发生时雨水在沟内大量汇流,为主沟泥石流的发生提供水动力条件,较大的横向坡度也为牙力沟物源供给提供了较大的动能优势。其余各支沟在横向坡度、纵向坡度均较大的条件下,不仅为物源供给提供了便利,也为降雨的快速汇集提供了条件。

1.3 降雨条件

中寨沟流域内多年平均降水量为555.7 mm,流域内月降雨量分配不均,但流域范围内各支沟降雨量差异较小。每年的7~9月降雨总量占全年的近40%,且多为连阴雨,降雨过程长,日降雨量和小时雨强差异大。以往研究及记录表明,当发生长时间强降雨或小时雨强超过32 mm时,极易发生泥石流。如据2020年8月份中寨镇塔沟村雨量监测站所记录的逐日降雨量资料,自8月4日以来,区内阴雨不断,在8.3~8.7、8.10~8.13、8.15~8.18、8.22~8.24、8.28~8.31各时段发生不同雨强的连续降雨,其中8.3~8.7期间最大日降雨量达到53.8 mm,8.15~8.18期间最大日降雨量达到32.3 mm,17日凌晨最大小时雨强达12 mm,最终在17日凌晨暴发泥石流灾害。

由于流域内基岩表层多为松散残坡积层和黄土,强降雨导致流域内土体失稳,为泥石流提供了大量的固体物质。此外,降雨对岩体的稳定性也有较大影响,流域内物源供给段主要岩性为板岩及砾

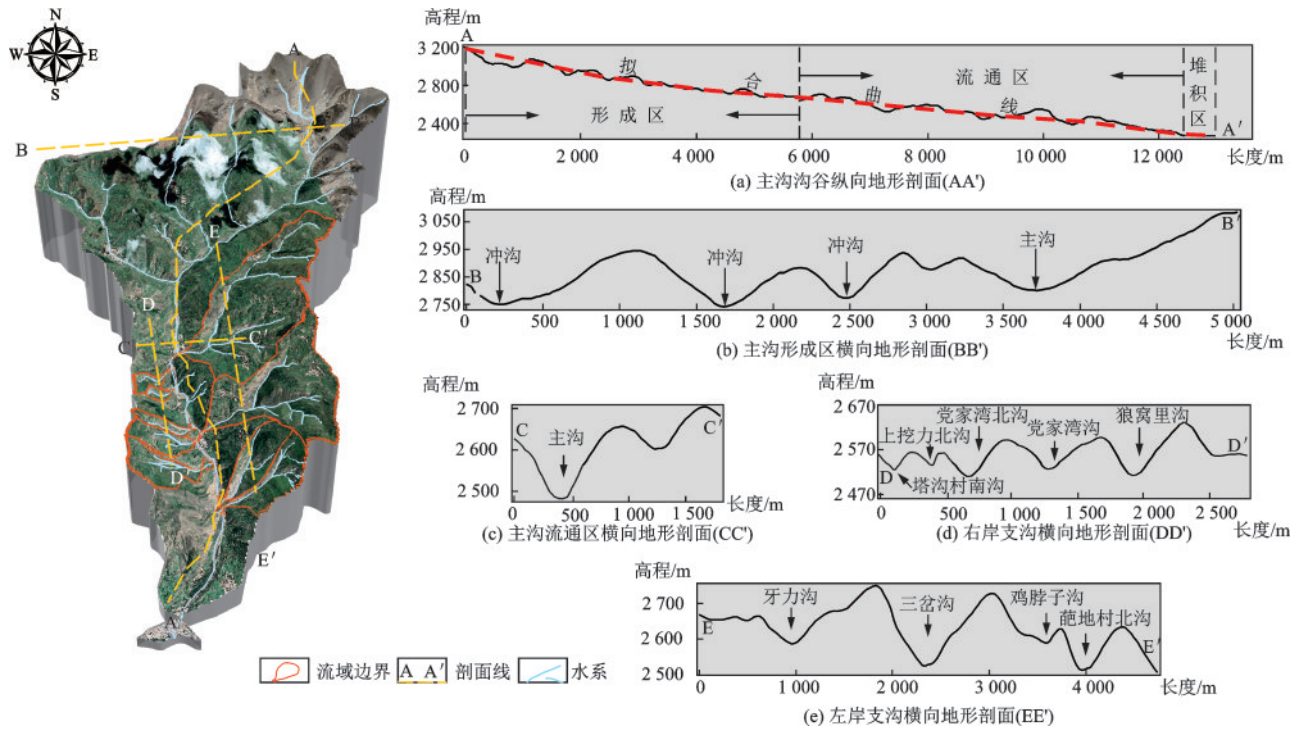


图2 中寨沟主沟及各支沟地形剖面

Fig.2 Topographic profile of main and branch gullies in Zhongzhai gully

岩,强风化带内板岩本身节理发育、岩体破碎,稳定性极差;砾岩中节理裂隙发育,雨水渗入板岩强风化带内及砾岩节理裂隙中后,不仅增加了岩体的自重应力,还降低了岩体间结合力,促进岩体产生破坏,导致崩滑灾害的发育。

由前述可知,中寨沟汇水面积大,降雨在支沟内的补给速度较快,且支沟较大的坡度为汇集后的雨水提供了强大的动能,为泥石流的起动力提供了水动力条件,降雨导致的一系列崩滑灾害同时为泥石流的发生提供了物源补给。

2 中寨沟泥石流特征

2.1 泥石流分布发育特征

中寨沟泥石流沟流域面积为 35.9 km²,主沟长 12.1 km,主沟纵比降为 200 ‰,流域内水系整体呈长条树枝状展布,除主沟中寨沟泥石流沟外,支沟泥石流十分发育,共 9 条泥石流支沟,自北向南,中寨沟左岸依次发育牙力沟、三岔沟、鸡脖子沟、葩地村北沟,右岸依次发育塔沟村南沟、上挖力北沟、党家湾北沟、党家湾沟、狼窝里沟、中寨沟(图 3),各泥石流沟的地貌形态参数见表 1。

如图 3 所示,在中寨沟主沟的形成区段,支沟泥



图3 中寨沟流域内泥石流沟及物源发育分布

Fig.3 Development and distribution of debris flow gullies and sources in Zhongzhai gully basin

石流发育不明显。9 条支沟泥石流沟均发育于流通区段,且主要位于流通区的中游及上游,呈现聚集式、东西向带状展布,其中主沟右岸发育有 5 条支沟泥石流沟,左岸发育 4 条。这与该流域内物源的分布基本吻合,图 3 显示物源集中分布在中寨沟的流通区

段,形成区内仅可见少数坡面流形式的物源补给。

依据表1统计结果,对比中寨沟主沟左右岸沟谷形态参数(图4)可知,左岸与右岸存在较大差别。右岸支沟平均流域面积 \overline{M}_1 为0.356 km²,左岸 \overline{M}_2 为2.242 5 km²,右岸平均流域面积明显小于左岸;右岸

支沟流域平均高差 $\overline{\Delta H}_1$ 为356.8 m,左岸 $\overline{\Delta H}_2$ 为481 m,右岸平均流域高差明显小于左岸;右岸沟谷平均长度 \overline{L}_1 为752 m,远小于左岸平均长度2 321.5 m;在沟床坡度上,右岸平均坡度 \overline{R}_1 为19.36°,为左岸的近2倍。

表1 中寨沟流域内泥石流主沟、支沟沟谷和堆积扇几何参数

Table 1 Geometric parameters of main gully, branch gullies and accumulation fans of debris flow in Zhongzhai gully basin

沟名	沟口 高程/ m	主沟 流向/ (°)	沟谷 长度/ m	流域 高差/ m	纵坡 降/ ‰	沟床 坡度/ (°)	流域 面积/ km ²	扇长/ m	扇径/ m	均厚/ m	面积/ m ²	堆积扇 方量/ 10 ⁴ m ³	扩散 角/ (°)	植被 覆盖 率/ %
牙力沟	2 489	235	3 750	546	74	4.2	4.8	60	150	2	4 500	0.9	40	8
塔沟村南沟	2 481	60	620	225	209	17	0.14	83	110	9	4 565	4.1	70	5
上挖力北沟	2 465	35	500	218	470	25	0.1	22	42	8	462	0.37	35	5
党家湾北沟	2 441	85	780	450	388	22	0.16	168	86	7	7 224	5.06	140	5
三岔沟	2 417	267	3 000	378	117	6.7	3.03	190	150	7	14 250	8	87	5
党家湾沟	2 417	267	660	451	380	18.8	0.63	106	55	5	2 915	1.46	110	8
狼窝里沟	2 393	83	1 200	440	250	14	0.75	300	220	15	33 000	24.75	75	5
鸡脖子沟	2 376	240	1 070	425	260	14	0.52	280	140	12	19 600	23.5	90	5
葩地村北沟	2 353	267	1 466	575	375	18.2	0.62	250	130	14	16 250	22.75	108	5
中寨沟	2 224	200	12 100	1 133	200	4.5	35.9	600	430	5	129 000	64.5	50	7

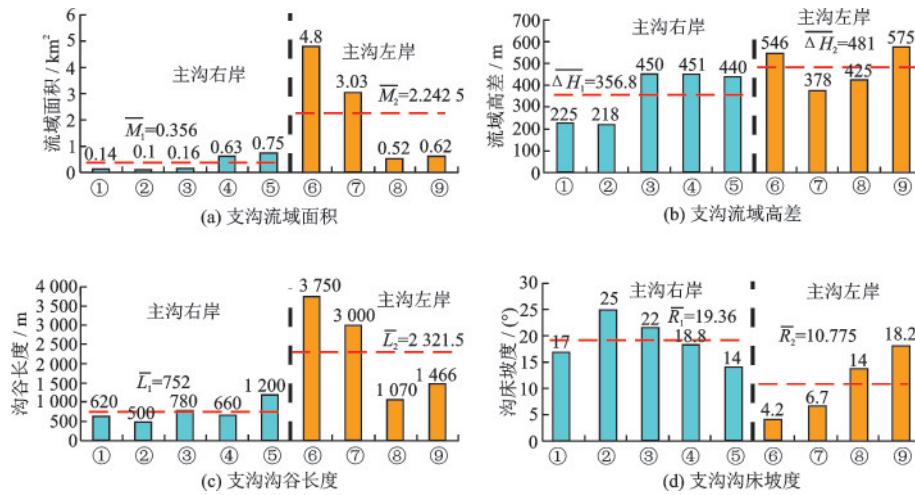


图4 中寨沟主沟左、右岸支沟形态参数对比

Fig.4 Comparison of morphological parameters of branch gullies on the left and right bank of Zhongzhai gully
注:①塔沟村南沟;②上挖力北沟;③党家湾北沟;④党家湾沟;⑤狼窝里沟;⑥牙力沟;⑦三岔沟;⑧鸡脖子沟;⑨葩地村北沟

综上,中寨沟流域内支沟泥石流集中分布于主沟流通区段,且与物源分布近于一致。以主沟为界,左右岸泥石流支沟形态参数差异显著,表现为右岸支沟流域面积、流域高差、沟谷长度小,但沟床坡度大;左岸支沟流域面积、流域高差、沟谷长度大,但沟床坡度小。

2.2 泥石流重度及类型

泥石流的重度是反映泥石流特征的重要参数。对于重度参数的获取,传统的方法有现场仿制法、基于流体固体物质粒径及含量的重度计算法等,前者在部分地区由于缺少目睹泥石流发生的人员指

导,无法正常开展;后者虽然能一定程度上还原泥石流发生时发生的重度,但在测试中仅机械的对应一定的粒径组成,忽略了泥石流发生时的各粒径固体物质含量的随机性与变化性^[20-24]。在中寨沟流域内,由于多处泥石流沟沟口处均有村庄,泥石流发生时目睹人数较多,故采用第一种方法更为合理。

通过对周围村民的采访以及现场调查取样得出各泥石流沟的重度参数,计算方式如下:

使用体积比法:

$$\gamma_{c1} = \frac{(d_s f + 1)\gamma_w}{1 + f} \quad (1)$$

式中, γ_{c1} 为泥石流流体重度(t/m^3); d_s 为固体物质相对密度,一般为2.4~2.7; f 为固体物质和水的体积之比; γ_w 为水的重度。

使用配浆法:

$$\gamma_{c2} = G_c/V \quad (2)$$

式中, γ_{c2} 为泥石流流体重度(t/m^3); G_c 为样品的总质量(t); V 为样品的总体积(m^3)。

表2 各泥石流沟泥石流流体重度

Table 2 Density of debris flow fluid in each debris flow gully

计算参数	牙力沟	塔沟村南沟	上挖力北沟	党家湾北沟	三岔沟	党家湾沟	狼窝里沟	鸡脖子沟	葩地村北沟	中寨沟
固体物质相对密度 d_s	2.4	2.5	2.5	2.5	2.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4
固体物质和水的体积比 f	0.5	1.5	1.5	1.5	1	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5
泥石流流体重度 $\gamma_{c1}/(t \cdot m^{-3})$	1.47	1.90	1.90	1.90	1.65	1.90	1.90	1.90	1.90	1.47
样品的总质量 G_c/t	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
样品的总体积 V/m^3	0.065	0.052	0.051	0.047	0.053	0.053	0.051	0.048	0.049	0.070
泥石流流体重度 $\gamma_{c2}/(t \cdot m^{-3})$	1.53	1.94	1.98	2.12	1.89	1.90	1.96	2.10	2.06	1.43
泥石流流体重度 $\gamma_c/(t \cdot m^{-3})$	1.50	1.92	1.94	2.01	1.77	1.90	1.93	2.00	1.98	1.45

各支沟泥石流重度按体积比法与现场配浆法(每条沟四个样品,取平均值)计算结果见表2,据调查及实验结果,参考泥石流灾害防治工程勘察规范^[25],综合计算出泥石流流体的重度 γ_c ,同时依据规范中按流体性质对泥石流类型分类的分类标准,从表2中各泥石流重度测定结果可知,牙力沟及中寨沟主沟为稀性泥石流沟;塔沟村南沟、上挖力北沟、党家湾北沟、三岔沟、党家湾沟、狼窝里沟、鸡脖子沟、葩地村北沟为黏性泥石流沟。

中寨沟流域内泥石流类型的差异主要由地形地貌、物源类型、地层岩性等的差异导致,中寨沟流域内上覆黄土厚度较大,主沟及牙力沟坡度较小,在降雨及重力作用下,表层黄土以崩滑及坡面侵蚀方式补给较少。支沟坡度大,降雨及重力作

用下,表层黄土补给强烈,为支沟提供了大量的细颗粒物。此外,二叠系板岩区易发育黏性泥石流,古近系砾岩及石炭系板岩区易发育稀性泥石流。

2.3 泥石流规模

采用规范推荐的经验公式^[26]及学者的研究成果^[27]计算不同概率下的泥石流流量、一次最大冲出物质量,计算公式如下,参数的选取见表3,计算结果见表4。

$$W = 0.278 \times Q_c \times T \quad (3)$$

$$Q_c = (1 + \psi) \times Q_B \times D \quad (4)$$

$$\psi = (\gamma_c - 10) / (\gamma_h - \gamma_c) \quad (5)$$

$$Q_B = C_p F^n \quad (6)$$

式中, W 为泥石流一次最大冲出物质量(m^3); Q_c 为

表3 泥石流历时、堵塞系数及清水流量计算公式的选取

Table 3 Selection of calculation formula for duration, blockage coefficient and water flow of debris flow

参数	牙力沟	塔沟村南沟	上挖力北沟	党家湾北沟	三岔沟	党家湾沟	狼窝里沟	鸡脖子沟	葩地村北沟	中寨沟
历时 T/s	2 100	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	2 700
堵塞系数 D	1.5	2	2	2	2.5	2	2	2	2	1.5
清水流量 Q_B/m^3	$P=1\%, Q_B=13.5F^{0.7895}; P=2\%, Q_B=11.8F^{0.7835}; P=5\%, Q_B=8.93F^{0.7795}; P=10\%, Q_B=7.36F^{0.7713}$									

表4 不同发生频率下各泥石流沟流量及一次最大冲出物质量

Table 4 Maximum discharge mass and water flow of each debris gully under different occurrence frequencies

参数	牙力沟	塔沟	上挖	党家	三岔沟	党家湾	狼窝里	鸡脖子	葩地村	中寨沟	
		村南沟	力北沟	湾北沟		沟	沟	沟	北沟		
P=1%	$Q_{c1}/(m^3 \cdot s^{-1})$	109	15	12	19	199	47	57	48	53	504
	$Q_{B1}/(m^3 \cdot s^{-1})$	47	3	2	3	32	9	11	8	9	228
	W_1/m^3	63 448	6 166	4 897	8 111	82 828	19 544	23 609	20 156	22 268	37 843
P=2%	$Q_{c2}/(m^3 \cdot s^{-1})$	94	13	10	17	172	41	50	42	47	431
	$Q_{B2}/(m^3 \cdot s^{-1})$	40	3	2	3	28	8	9	7	8	195
	W_2/m^3	54 938	5 454	4 340	7 168	71 918	17 131	20 672	17 687	19 520	323 745
P=5%	$Q_{c3}/(m^3 \cdot s^{-1})$	71	10	8	13	130	31	38	32	35	322
	$Q_{B3}/(m^3 \cdot s^{-1})$	30	2	1	2	21	6	7	5	6	146
	W_3/m^3	41 316	4 160	3 315	5 464	54 185	12 988	15 662	13 420	14 800	241 519
P=10%	$Q_{c4}/(m^3 \cdot s^{-1})$	58	8	7	11	106	26	31	27	29	258
	$Q_{B4}/(m^3 \cdot s^{-1})$	25	2	1	2	17	5	6	4	5	117
	W_4/m^3	33 617	3 484	2 784	4 572	44 255	10 745	12 939	11 120	12 246	193 298

泥石流流量(m^3/s); T 为泥石流历时(s),按各泥石流沟发生过程具体取值; ψ 为泥沙系数; Q_B 为清水流量(m^3/s); D 为堵塞系数;根据沟道特征,按照规范要求具体取值; γ_c 为泥石流重度(kN/m^3); γ_h 为固体颗粒重度(kN/m^3); C_p 为概率为 P 时,随概率及地方变化的综合系数,参考前人的研究成果获得; F 为流域面积(km^2); n 为地区的经验指数。

泥石流的发育规模可按泥石流一次最大冲出物质量表示,通过调查结果及对泥石流发生时一次最大冲出物质量的计算,在中寨沟的形成区,支沟泥石流堆积物不发育,大部分堆积物被洪水冲走,流通区发育不同规模的支沟泥石流,主沟流通区泥石流发育规模大于形成区。在同一发生概率下,除鸡脖子沟及葩地村北沟外,左岸支沟泥石流一次最大冲出物质量整体大于右岸支沟。随着发生概率的增加,泥石流一次最大冲出物质量逐渐减小,但左右岸冲出量的差异性仍相同。

2.4 泥石流发育程度

泥石流的发育程度是将泥石流发育规模与易发程度综合分析得到的评判结果。在传统的地质灾害危险性评估规范中^[28],泥石流发育程度的量化方式是采用15项因子的评分值来评判泥石流发育程度等级,依据不同得分值将其划分为强发育、中等发育、弱发育三个等级。这些因子可分正相关与负相关两类,正相关因子是综合影响泥石流发育的诸多参数如泥沙沿程补给长度

比、河沟纵比降、构造影响程度、植被覆盖、岩性影响、松散物厚度、坡度、高差、河沟堵塞程度等14个因子,负相关因子为反映流域大小的流域面积参数。在此套评判标准中,虽评价因子全面,但量级划分粗糙,部分因子的评判仍为定性或半定量的方法。

采用泥石流一次最大冲出物质量参数可大致表示这些正相关因子对泥石流发育的控制作用,因为不论是植被覆盖、坡度、岩性、松散物厚度、河沟堵塞程度,还是其余的因子,都是为了表征对泥石流物源形成量与可冲出沟道量大小的影响。据此,可建立如下的泥石流发育程度定量表征公式:

$$N = 100 \times W / M \quad (7)$$

式中, N 为流域单位面积(以 $100 m^2$ 计)的泥石流一次最大冲出物质量贡献值($m^3/100 m^2$),简称为单位面积贡献值, N 值越大,则泥石流发育程度越高; W 为泥石流一次最大冲出物质量(m^3), W 值越大,则 N 值越大,泥石流发育程度越高; M 为流域面积(m^2), M 越大,则 N 值越小,泥石流发育程度越低。可以看出,各因子在式中的影响作用与规范中相同。

以流域单位面积的泥石流一次最大冲出物质量贡献值来作为泥石流发育程度衡量指标,计算结果表明(表5),在相同频率的泥石流发生条件下,除鸡脖子沟及葩地村北沟外,左岸支沟泥石流小于右岸支沟泥石流的单位面积贡献值,即右岸泥石流发

表5 不同发生频率下各泥石流沟单位面积贡献值

Table 5 Per unit area's contribution value under different occurrence frequencies

参数	牙力沟	塔沟村南沟	上挖力北沟	党家湾北沟	三岔沟	党家湾沟	狼窝里沟	鸡脖子沟	葩地村北沟	中寨沟
$P=1\%$	1.3	4.4	4.9	5.1	2.7	3.1	3.2	3.9	3.6	1.1
$P=2\%$	1.1	3.9	4.3	4.5	2.4	2.7	2.8	3.4	3.2	0.9
$P=5\%$	0.9	3	3.3	3.4	1.8	2.1	2.1	2.6	2.4	0.7
$P=10\%$	0.7	2.5	2.8	2.9	1.5	1.7	1.7	2.1	2.0	0.5

育程度高于左岸。不同概率下,随着概率的增加,同一条沟的单位面积贡献值逐渐减小,即发育程度逐渐减小,这与实际情况相符。

3 泥石流发育差异的主控因素分析

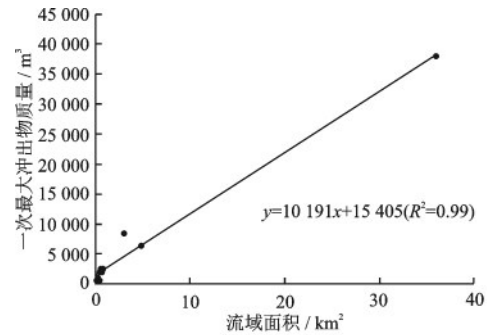
泥石流发育的影响因素主要包含地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文、植被覆盖、人类活动等,对同一小流域而言,在植被覆盖率差距较小,气象水文条件及人类活动近似相同的情况下,地形地貌、地层岩性、地质构造上的差异对泥石流发育起着主导作用,这些作用主要表现在对泥石流规模和发育程度的控制。

3.1 泥石流发育规模差异的主控因素

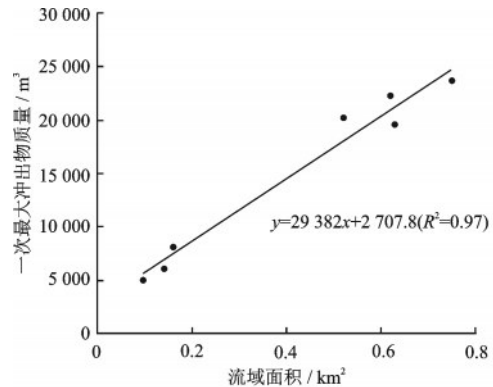
由前述可知,中寨沟流域内各支沟泥石流发育规模不同,表现为中寨沟主沟形成区的支沟泥石流不发育,流通区支沟泥石流发育,且随着流域面积的增大,泥石流的发育规模也在增大。泥石流发育规模主要受控于流域面积及断层活动。

3.1.1 流域面积对泥石流发育规模的控制

除鸡脖子沟及葩地村北沟外,中寨沟流域内左岸泥石流发育规模大于右岸,这主要由泥石流沟流域面积大小所决定。图5拟合了中寨沟流域内各泥石流沟流域面积与一次最大冲出物质量($P=1\%$)之间的关系,图5(a)的拟合结果表明,在中寨沟小流域内,地质条件存在一定差异的情况下,泥石流规模与流域面积大致呈线性相关,表明随流域面积增加,泥石流规模增大。排除岩性及构造条件的影响,即仅考虑在 F_1 及 F_2 断裂带内部的二叠系板岩区,舍弃中寨沟主沟、牙力沟、三岔沟这三条岩性及构造存在差异的泥石流沟,在相似的地质条件下,图5(b)的拟合结果依然符合这一规律。综合以上结果,表明了在中寨沟流域内,流域面积为泥石流



(a) 不同地质条件下流域面积与一次最大冲出物质量的关系



(b) 相似地质条件下流域面积与一次最大冲出物质量的关系

图5 泥石流规模与流域面积的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis on debris flow scale and basin area

发育规模差异的主控因素之一。

3.1.2 断层活动对泥石流发育规模的控制

如图1所示,流域内自南向北发育的三条断层,其活动性为 $F_1 > F_2 > F_3$ 。表6统计了遥感解译

表6 中寨沟流域内滑坡、坡面流分布面积统计

Table 6 Distribution area statistics of landslide and over-land flow in Zhongzhai gully basin

区段	F_1 以南	F_1 与 F_2 之间	F_2 与 F_3 之间	F_3 以北
滑坡面积/ m^2	11 731	354 883	0	0
滑坡占比/%	3.2	96.8	0	0
坡面流面积/ m^2	63 021	835 008	336 602	0
坡面流占比/%	5.1	67.6	27.3	0

获得的滑坡、坡面流分布情况,泥石流沟内所存在固体物质集中在 F_1 、 F_2 两条断层形成的断裂带之间,滑坡及坡面流分布占比分别为96.8%与67.6%;而 F_2 与 F_3 断层之间的物源分布则较少,以坡面流为主; F_1 以南物源分布较少, F_3 以北则无物源分布。这与由南向北断层活动性逐渐减弱这一特点所对应,活动强度大、频率高的 F_1 断层与活动性一般的 F_2 断层,在风化强烈的二叠系板岩及节理裂隙发育的古近系砾岩中,加剧了岩体的破碎,为泥石流提供了充足的物源。而活动性较弱的 F_3 断层与活动性一般的 F_2 断层,在遇到固结状态较好的三叠系板岩时,对岩体完整性的影响较小,使得形成区段内物源供给量较低,限制了泥石流的发育。因此,断层活动控制了断裂带及影响带内泥石流物源供给量的大小,从而间接控制了泥石流发育规模的大小,即断裂活动性越强,泥石流发育的规模越大。

表7 中寨沟流域内各泥石流沟发育程度与地形、岩性关系统计

Table 7 Statistics of the relationship between the development degree of debris flow gullies and topography as well as lithology in Zhongzhai gully basin

沟名	地形坡度/(°)		岩性占比/%	单位面积贡献值/ ($m^3 \cdot 100 m^{-2}$)
	纵向	横向		
牙力沟	4.2	15~20	古近系砾岩(70) 石炭系板岩(30)	1.32
塔沟村南沟	17	30~40	二叠系板岩(100)	4.4
上挖力北沟	25	30~40	二叠系板岩(100)	4.9
党家湾北沟	22	25~40	二叠系板岩(100)	5.07
三岔沟	6.7	25~35	古近系砾岩(50) 二叠系板岩(40) 石炭系板岩(10)	2.73
党家湾沟	18.8	25~35	二叠系板岩(100)	3.1
狼窝里沟	14	25~35	二叠系板岩(100)	3.15
鸡脖子沟	14	25~30	二叠系板岩(100)	3.88
葩地村北沟	18.2	25~40	二叠系板岩(100) 石炭系板岩(35) 二叠系板岩(30)	3.59
中寨沟	4.5	10~20	古近系砾岩(27) 新近系泥岩(5) 第四系砂砾石(3)	1.05

3.2.2 地层岩性对泥石流发育程度的控制

在中寨沟主沟流通区内,地形较缓,岩性以石炭系板岩为主,古近系砾岩及二叠系板岩次之,物源供给较少,泥石流不发育;在以古近系砾岩为主,

3.2 泥石流发育程度差异的主控因素

中寨沟流域内降雨、植被覆盖率、人类活动等条件相似,支沟泥石流均发育于 F_1 、 F_2 断裂带内,因此,中寨沟流域内泥石流发育程度差异主要取决于地层岩性与地形地貌。

3.2.1 地形对泥石流发育程度的控制

统计流域内各泥石流沟横向、纵向坡度(表7),结合各支沟单位面积泥石流一次最大冲出物质量贡献值大小,可分析二者之间的关系。如图6所示,泥石流发育于纵向坡度 $4^\circ \sim 25^\circ$ 、横向坡度 $10^\circ \sim 40^\circ$ 的沟谷,且沟谷纵向坡度、横向坡度越大,单位面积贡献值越大。进一步拟合二者关系,可见二者大致呈线性增长关系,表明随坡度增加,单位面积贡献值呈线性增长。两因子的相关性系数 R 的平方分别为0.82及0.81,表明二者相关性较高,拟合结果说明地形因素是中寨沟流域内泥石流发育程度的主控因素之一。

二叠系板岩及三叠系板岩为辅的流通区中游及上游,地形起伏较大,单位面积贡献值较大,泥石流发育程度一般;在以二叠系板岩为主的主沟流通区中游及下游,地形起伏大,单位面积贡献值大,泥石流

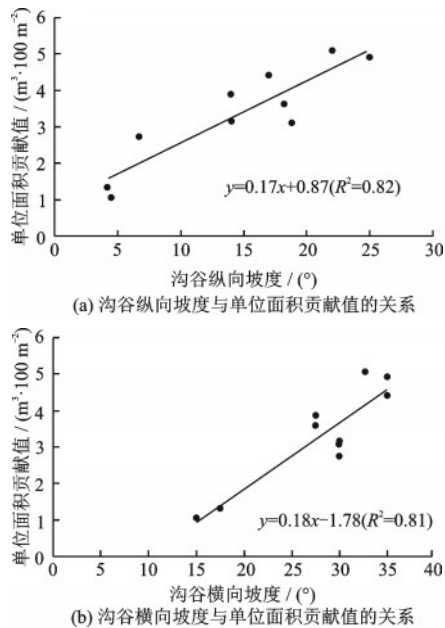


图6 沟谷坡度与泥石流单位面积贡献值相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between gully slope and per-unit area's contribution value of the maximum discharge mass

发育程度高。总体表现为:二叠系板岩区泥石流发育程度>古近系砾岩区>石炭系板岩区。

可见流域内岩性对泥石流发育程度的控制作用明显。首先,在古近系砾岩发育的区段内,泥石流沟谷的纵向及横向坡度均小于二叠系及石炭系板岩所控制的区段,这与砾岩和板岩的岩体特性密切相关,流域内砾岩节理裂隙发育,且节理裂隙多不规则,常在风化作用下以整体崩塌形式补给沟道,而流域内板岩的竖向劈理发育,在风化及卸荷作用下,板岩沿着劈理裂隙面发生竖向剥离,剥离后对地貌形态的改变较小。表明岩性差异导致地形地貌的差异,从而影响泥石流的发育。其次,二叠系板岩破碎,古近系砾岩完整性一般,石炭系板岩固结状态较好,导致其对泥石流的物源供给量依次减少。

4 结 论

(1)中寨沟泥石流是在特殊的地质环境、较大地形高差、降雨不均的条件下形成。受断裂活动影响,易风化剥落的二叠系、石炭系板岩为泥石流形成提供了丰富的物源,在强降雨或小时雨强超过32 mm时,流通区支沟沟谷易暴发泥石流灾害。

(2)中寨沟流域内支沟泥石流发育,集中发育

于流通区的中游及上游,其中右岸支沟流域面积、流域高差、沟谷长度小,沟床坡度大,左岸支沟流域面积、流域高差、沟谷长度大,沟床坡度小。除牙力沟及中寨沟主沟为稀性泥石流沟外,塔沟村南沟、上挖力北沟、党家湾北沟、三岔沟、党家湾沟、狼窝里沟、鸡脖子沟、葩地村北沟均为黏性泥石流沟。

(3)研究结果表明,泥石流一次最大冲出物质量参数可综合表征泥石流的发育规模和发育程度。不同概率下泥石流的一次最大冲出物质量的计算结果显示中寨沟流通区除鸡脖子沟及葩地村北沟外,左岸支沟泥石流一次最大冲出物质量整体大于右岸支沟,右岸支沟泥石流发育程度高于左岸。

(4)中寨沟流域内泥石流发育规模的主控因素为流域面积及断层活动。泥石流沟的流域面积越大,泥石流发育规模越大;断裂活动性越强,断裂破碎带宽度越大,泥石流发育规模越大。

(5)中寨沟流域内泥石流发育程度的主控因素为坡度及地层岩性。沟谷横向与纵向坡度越大,泥石流发育程度越高;地层岩性不同,泥石流发育程度不同,表现为二叠系板岩泥石流发育程度>古近系砾岩>石炭系板岩,这主要是因为地层岩性通过控制地形及物源供给量控制了泥石流的发育程度。

影响泥石流发育规模和发育程度因素众多,文中采用一次性最大冲出物质量来综合表征泥石流发育的规模和程度,虽然二者相关性较好,方法简单,但该方法难以准确反映具体泥石流特征的影响因子。因此,进一步开展各因子对泥石流特征影响权重大小计算,以更好地预测未来一段时间内泥石流发生的规模很有必要。

参考文献:

- [1] 郭富赞,孟兴民,尹念文,等.甘肃省岷县耳阳沟5·10泥石流基本特征及危险度评价[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):628-632.
Guo F Y, Meng X M, Yin N W, et al. Formation mechanism and risk assessment of debris flow of "5·10" in Eryang gully of Minxian county, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 628-632. (in Chinese)
- [2] 许禄世.甘肃岷县"2012.5.10"山洪泥石流灾害及防治措施[J].中国防汛抗旱,2014,24(增1):91-92.
Xu L S. Mountain torrent and debris flow disaster and prevention measures in Minxian County of Gansu Province on May 10, 2012[J]. China Flood & Drought Man-

- agement, 2014, 24(Sup1):91-92. (in Chinese)
- [3] 杜国梁, 高金川, 胡新丽. 基于GIS和组合赋权的岷县板达沟泥石流危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4):235-241.
Du G L, Gao J C, Hu X L. Debris flow hazard assessment of Banda gully in Minxian county based on GIS and combination weighting method[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4):235-241. (in Chinese)
- [4] 王生辉. 甘肃省岷县特大雹洪泥石流灾害成因分析[J]. 水利规划与设计, 2014(9):22-23.
Wang S H. Analysis on causes of catastrophic hail flood debris flow disaster in Min County of Gansu Province [J]. Water Resources Planning and Design, 2014 (9) : 22-23. (in Chinese)
- [5] 王振涛, 吴和秋, 张明, 等. 新疆乌恰县泥石流分布规律与主控因素研究[J]. 人民长江, 2020, 51(8):44-49.
Wang Z T, Wu H Q, Zhang M, et al. Distribution and main controlling factors of debris flows in Wuqia County, Xinjiang autonomous region [J]. Yangtze River, 2020, 51(8):44-49. (in Chinese)
- [6] 赵春瑶. 藏东南冷曲干旱河谷泥石流形成运动特征与影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Zhao C Y. Study on the characteristics and influence factors of debris flow in Lengqu arid valley, Southeastern Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 苏琦, 梁明剑, 袁道阳, 等. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(10):1758-1770.
Su Q, Liang M J, Yuan D Y, et al. Geomorphic Features of the Bailongjiang River drainage basin and its relationship with geological disaster [J]. Earth Science, 2016, 41(10):1758-1770. (in Chinese)
- [8] Huang J C, Xu H J, Duan X W, et al. Activity patterns and controlling factors of debris flows in the Upper Salween Alpine Valley [J]. Natural Hazards, 2020, 103(1): 1367-1383.
- [9] Chen Hongey. Controlling factors of hazardous debris flow in Taiwan [J]. Quaternary International, 2006, 147(1):3-15.
- [10] 朱渊, 余斌, 亓星, 等. 地形条件对泥石流发育的影响——以岷江流域上游为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1):268-277.
Zhu Y, Yu B, Qi X, et al. Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Minjiang River [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 268-277. (in Chinese)
- [11] 鲁科. 泥石流暴发频率与其形成区岩性的相关性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
Lu K. Study the relationship between frequency of debris flows and the lithology in channels of debris flows [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 铁永波, 唐川. 四川省北川县暴雨泥石流的发育与汶川地震的响应特征[J]. 灾害学, 2011, 26(4):73-75, 81.
Tie Y B, Tang C. Response characteristics between Wenchuan earthquake and the rainfall induced debris flow in Beichuan country, Sichuan [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 73-75, 81. (in Chinese)
- [13] 胡卸文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞湖大水沟泥石流发育特征及堵江危害性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4):850-858.
Hu X W, Lyu X P, Huang R Q, et al. Development features and evaluation of blocking dangers of Dashui ditch debris flow in Tangjiashan dammed lake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 850-858. (in Chinese)
- [14] 沈娜. 四川省九龙县石头沟泥石流特征与防治工程措施研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
Shen N. The characteristics and prevention measures of Shitou gully in Jiulong county Sichuan province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [15] 王文丽, 胡明清, 马紫娟. 岷县地震活动性分析与评价 [J]. 甘肃科技, 2015, 31(16):57-60.
Wang W L, Hu M Q, Ma Z J. Analysis and evaluation of seismicity in Minxian County [J]. Gansu Science and Technology, 2015, 31(16) : 57-60. (in Chinese)
- [16] 李光涛, 程理, 吴昊, 等. 临潭—宕昌主干断裂南东段晚第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2):376-383.
Li G T, Cheng L, Wu H, et al. Geological and geomorphological evidence of late quaternary activity along the Southeastern Segment of the Lintan-Tanchang major fault, China [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2):376-383. (in Chinese)
- [17] 刘方斌, 曲均浩. 临潭—宕昌断裂及附近地区静态库仑应力变化及地震活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(9):886-890.
Liu F B, Qu J H. Research on static coulomb stress changes and seismicity in Lintan-Tanchang fault and the adjacent area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(9):886-890. (in Chinese)
- [18] 高明星, 陈桂华, 徐锡伟. 地貌参数指示的临潭—宕昌断裂带最新构造隆升差异与地震活动[J]. 地震地质, 2015, 37(3):709-718.

- Gao M X, Chen G H, Xu X W. Geomorphic indices indicated recent differential tectonic uplift of the Lintan-Dangchang fault and the Minxian-zhangxian earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(3): 709-718. (in Chinese)
- [19] 刘廷. 西秦岭临潭—宕昌断裂带断层泥及年代学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- Liu T. The research of fault gouge and its geochronology from Lintan-Dangchang fault zone in western Qin-Ling [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)
- [20] 蒋树, 文宝萍. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(3): 86-96.
- Jiang S, Wen B P. Comparison of methods used at home and abroad to estimate the key parameters of a debris flow [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(3): 86-96. (in Chinese)
- [21] 陈宁生, 杨成林, 李欢. 基于浆体的泥石流容重计算[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(2): 168-173.
- Chen N S, Yang C L, Li H. Calculation of the debris flow concentration based on debris flow slurry [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(2): 168-173. (in Chinese)
- [22] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 789-796.
- Yu B. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 789-796. (in Chinese)
- [23] 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. *中国科学E辑: 技术科学*, 2003(增1): 164-174.
- Chen N S, Cui P, Liu Z G, et al. Calculation of the debris flow density based on the content of clay particles [J]. *Science in China (Series E)*, 2003(Sup1): 164-174. (in Chinese)
- [24] 李培基, 梁大兰. 泥石流容重及其计算[J]. *泥沙研究*, 1982(3): 75-83.
- Li P J, Liang D L. Debris flow density and its calculation [J]. *Journal of Sediment Research*, 1982(3): 75-83. (in Chinese)
- [25] 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 郭富赞, 蔡桂星, 黎志恒, 等. 甘肃省地质灾害危险性评估规程[S]. 兰州: 甘肃省质量技术监督局, 2009. (in Chinese)
- Guo F Y, Cai G X, Li Z H, et al. Specification for risk assessment of geological disasters in Gansu Province [S]. Lanzhou: Gansu Administration for Market Regulation, 2009. (in Chinese)
- [27] 杨访弟. 甘肃省岷县小流域洪峰流量经验公式初步探讨[J]. *甘肃水利水电技术*, 2013, 49(2): 5-8.
- Yang F D. Preliminary discussion on empirical formula of flood peak discharge in Minxian small watershed of Gansu Province [J]. *Gansu Water Resource and Hydro-power Technology*, 2013, 49(2): 5-8. (in Chinese)
- [28] 地质灾害危险性评估规范: DZ/T 0286—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

(本文责编: 周小潭)