

强震区电网降雨型地质灾害暴发 识别模型研究

卜祥航, 刘凡, 曹永兴, 范松海, 陈凌, 吴驰, 朱轲, 薛志航
(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610041)

摘要:以汶川地震强震区岷江干流及渔子溪沿岸的42个泥石流为研究对象,提取泥石流流域中物源存储量、暴发频率、流域面积等7个重要因子,运用CRITIC法建立电网降雨诱发泥石流灾害识别模型,将识别结果划分三级:15条泥石流流域属于高易发性泥石流灾害;11条泥石流流域属于中易发性泥石流灾害;16条泥石流流域属于低易发性泥石流灾害。然后,选取研究区内26条泥石流曾经一次冲出物源量来验证电网泥石流灾害识别模型的可行性。最后,通过ARCGIS平台生成电网泥石流灾害易发生分区图。

关键词:降雨型泥石流;识别模型;电网

中图分类号:P 694 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0062-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230510

Research on Identification Model of Rainfall Induced Geological Hazard Outbreak for Power Grid in Strong Earthquake Area

BU Xianghang, LIU Fan, CAO Yongxing, FAN Songhai, CHEN Ling, WU Chi, ZHU Ke, XUE Zhihang
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Taking 42 debris flows along the main stream of Minjiang River and Yuzixi catchment in strong earthquake area of Wenchuan as research objects, seven specific characteristics, such as storage capacity of material sources, occurrence frequency, catchment area etc., are selected for the evaluation of debris flow scale. Critic method is adopted to set up the identification model of rainfall induced debris flow for power grid. And the identification results are divided into three levels: high, medium and low prone areas of debris flow are 15 catchment basins, 11 catchment basins and 16 catchment basins respectively. Then the once outflow volume of 26 debris flows in the study area is selected to verify the feasibility of the proposed identification model of rainfall induced debris flow for power grid. Finally, the zone map where debris flows are prone to occurrence are generated through ArcGIS platform.

Key words: rainfall induced debris flow; identification model; power grid

0 引言

电网具有距离传输性和电流的高速性。电网一旦遭遇灾害事故,瞬间就可以造成大面积的停电损失,如汶川震区某110 kV输电线路46号塔处于大型灾害体上且塔体出现严重变形,一旦倒塔将会造成线路停运,使马尔康、金川等地全面失去供电。汶川地震诱发了至少56 000处崩塌、滑坡^[1],为泥石流的暴发提供了大量物源^[2-3]。在震后多年的雨季

中,泥石流灾害频繁发生、表现活跃^[4-5],因此震后强降雨过程诱发的泥石流灾害已经成为震区最主要的地质灾害之一^[6]。文献[7]分析地震灾区地质灾害已从震后的崩塌、滑坡为主转为了以泥石流为主。2010年8月14日强降雨诱发岷江干流沿岸产生至少22条群发性泥石流,都汶高速被摧毁、阻断,其中映秀镇附近红椿沟暴发的泥石流灾害,使新建的映秀镇遭受特大洪涝灾害^[7-8];渔子溪沿岸肖家沟暴发大型泥石流,冲毁303省道、堵塞河流,下游的映秀镇遭受洪灾。2013年7月10日岷江干流沿岸张家坪沟暴发大型泥石流,直接经济损失约980万元。可见,震区泥石流灾害对社会影响越来越大。

基金项目:国家重点研发计划“国家质量基础设施体系”专项项目(2022YFF0610603)

国内对泥石流敏感性的分析早在谭炳炎对泥石流严重程度的分析中体现出来^[10],国外学者早在1988年分析泥石流堆积厚度中,亦探讨了泥石流敏感性^[11]。汶川地震之后,学者们对泥石流的活动特征及敏感性评价研究工作逐渐增多。文献[12-13]通过野外调查建立了震区泥石流冲出模型,并预测泥石流的相对活跃期至少5~10 a,影响时间可能更长;文献[14]通过层次分析法和信息熵的因子权重重组,对乌东德地区26条泥石流的敏感性进行分区;文献[15]利用地理信息系统GIS提取Catalan Pyrenees地区泥石流的地形地貌参数,并验证了逻辑回归法运用到敏感性评价中效果较好;文献[16]利用概率数学方法,建立了龙溪河流域48条泥石流的敏感性评价模型;文献[17]通过层次分析法,对四川苏保河流域泥石流进行敏感性分析。

随着交叉学科的发展,学者们也在尝试将不同数学方法引入到泥石流敏感性评价中,寻求效果更好的评价模型,同时促进了学者从不同角度对泥石流危险性研究的深入^[18-20]。国内外对电网泥石流灾害研究较少,下面选取汶川强震区电网泥石流为研究对象,探索适合类似该地质环境的简捷、快速的电网降雨型地质灾害暴发识别评价模型。

1 研究区概况

研究区位于中国四川省汶川县映秀镇附近,面积约460 km²,地处四川盆地和青藏高原的过渡地带,主要为深切峡谷,高程约860~3950 m。研究区属起源于西北山区的岷江水系,区内的渔子溪为岷江一级支流。岷江干流沿岸基岩以花岗岩、震旦纪火成碎屑岩、石炭纪石灰岩和三叠纪砂岩为主^[21];渔子溪沿岸基岩以晋宁—澄江期岩浆岩、古生界志留系茂县群板岩夹千枚岩为主。构造上属于NE-SW走向的龙门山断层带^[22],其中造成汶川“5·12”地震的“映秀—北川”断裂带贯穿研究区东南部^[23],倾向北西,倾角60°~70°,最大垂直错距约5 m,最大水平错距约4.8 m。解译2011年高精度Worldview-2卫星影像获得映秀地区崩滑体数量共6684处(其中滑坡5290处,崩塌1394处),为岷江干流、渔子溪沿岸42条泥石流的发展提供了大量的物源,如图1所示。泥石流物源数量随距断层的距离逐渐减少,经统计约90%的泥石流物源分布在距断层12 km

范围内。

研究区属于典型的亚热带湿润季风气候,年平均温度约12.9℃。在过去的30年内年平均降雨量约1253.1 mm,最大年降雨量为1964年的1688 mm,最大降雨强度为1964年的269.8 mm/d。每年的降雨周期主要集中在6~9月,占了近全年降雨量的70%。

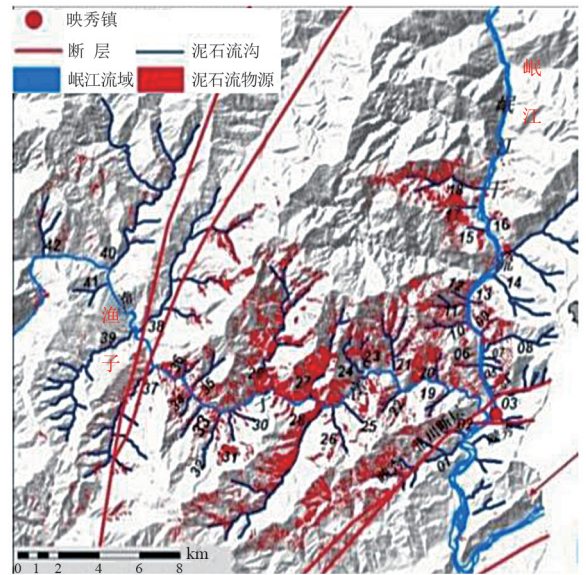


图1 研究区泥石流物源分布

2 评价方法—CRITIC法原理

CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation)法^[24]考虑各指标包含的信息量的同时,又以指标的对比强度和指标间的冲突性为基础,客观评价指标的权重。对比强度以标准差来表示,即相同指标不同类别间取值的差距;冲突性以各指标间的相关性来表示,两指标正相关性越强,冲突性越低。对比强度一定时,指标间冲突性与权重呈正相关关系。

1)为得到标准化矩阵,通过式(1)对原始数据进行无量纲化处理。

$$x_{aj} = \frac{f_j(a) - f_j^*}{f_j^* - f_j^{\#}} \quad (1)$$

式中: x_{aj} 为处理后的标准化值; $f_j(a)$ 为第 j 个指标变量 a 的原始值; f_j^* 为指标 j 的最小值; $f_j^{\#}$ 为指标 j 的最大值。

2)第 j 个指标生成的向量 $\mathbf{x}_j = \{(x_j(1), x_j(2), x_j(3), \dots, x_j(n))\}$ 均有标准差的特点 σ_j ,可以用来反映指标间的对比强度。

3) 计算第 j 和 x 个指标向量 \mathbf{x}_j 和 \mathbf{x}_k 间的线性相关系数 r_{jk} 。

4) 通过式(2)计算出第 j 个指标所包含的信息量大小 C_j 。

$$C_j = \sigma_j * \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (2)$$

式中, m 为泥石流沟编号。

5) 将 C_j 归一化后, 计算各指标的权重。

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad (3)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重; C_j 为第 j 个指标的信息量。

3 降雨型泥石流发生规模识别评价

3.1 因子选取及权重

震区泥石流活动较震前频繁、规模大, 考虑震后流域物源储备的丰富性、临界雨量的降低现象、震后山地地形的改变等, 结合野外调查及前人的研究成

果^[15-20,25-26], 选取松散固体物质储量 F_1 、泥石流暴发频率 F_2 、流域面积 F_3 、流域相对高差 F_4 、流域切割密度 F_5 、主沟长度 F_6 、激发雨强 F_7 等 7 个评价因子, 来划分 42 条泥石流发生的规模。例如 F_1 决定了流域物源的丰富程度, F_3 决定了流域的汇水能力, F_4 决定了流体携带固体物质的能量大小。因数据量较多, 仅列出 20 条典型泥石流沟参数, 如表 1 所示。

根据式(1)对研究区 42 条泥石流沟的影响因子进行无量纲化处理, 如图 2 所示; 并利用 spess 处理数据得到各因子的标准差及因子间相关系数矩阵, 进而通过式(2)求得各因子包含的信息量; 再利用式(3)得出各个因子的权重, 如表 2 所示。

根据空间几何分析学, 研究区内的泥石流敏感性组成 7 维空间内的一条直线, 不同泥石流的相同因子的一系列数据组合即为该因子在 7 维空间内的一个点, 点到直线的距离在 CRITIC 法中即表示为该因子的对比强度。由表 2 可知, 各个因子的对比强度不等, 说明各因子对泥石流的发生规模有不同程

表 1 研究区典型泥石流沟参数

流域	编号	沟名	评价因子						
			$F_1/(10^4 \text{ m}^3)$	$F_2/\%$	$F_3/(\text{km})^2$	F_4/km	$F_5/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	F_6/km	F_7/mm
岷江干流	DF01	牛圈	763.41	5.00	10.66	1.83	1.43	6.37	56.50
	DF02	张家坪	124.41	1.00	1.71	1.15	3.23	2.10	56.50
	DF03	红椿	384.00	1.00	5.35	1.26	1.82	3.55	56.50
	DF04	烧房	238.00	1.00	0.71	1.04	5.47	1.74	56.50
	DF08	磨子	690.00	5.00	5.33	1.60	1.96	4.23	56.50
	DF09	老虎嘴	75.00	35.67	0.36	0.94	9.54	1.15	56.50
	DF10	吴家河坝	346.00	49.25	2.73	1.74	2.63	2.57	56.50
	DF11	麻羊店	463.00	37.11	2.02	1.82	3.26	2.59	56.50
	DF17	兴文坪	253.00	35.45	1.71	2.02	3.69	2.44	66.00
	DF18	一碗水	1 633.00	46.67	7.18	2.48	1.66	4.82	66.00
渔子溪	DF19	干沟	66.70	39.77	1.43	0.54	3.59	1.04	66.00
	DF20	瓦司	528.00	31.52	1.52	0.42	3.49	0.73	56.50
	DF21	肖家 02	1 326.53	1.00	7.89	0.73	1.50	1.75	56.50
	DF22	大水 01	151.60	30.56	1.32	0.77	4.17	1.05	66.00
	DF26	羊香儿	254.34	58.49	3.89	0.62	2.3	1.42	56.50
	DF29	大阴	4 525.50	41.49	23.44	0.84	0.9	4.38	56.50
	DF30	下盐水	95.88	34.67	1.28	0.30	3.92	0.40	56.50
	DF31	上盐水	181.91	48.93	2.50	0.59	2.88	0.96	56.50
	DF33	青岗坪	668.55	43.50	3.36	1.00	2.69	1.75	56.50
	DF42	油桌坪	201.63	31.00	1.17	0.04	4.02	0.38	56.50

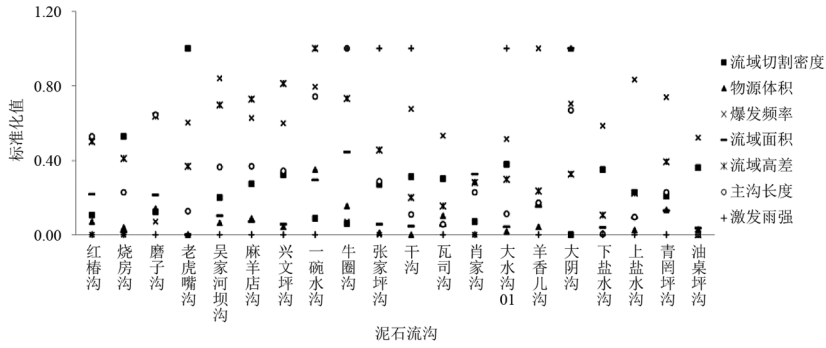


图 2 典型泥石流沟参数标准化值

表 2 因子间相关系数矩阵

编号	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
F_1	1.000	0.251	0.702	0.114	-0.439	0.612	-0.115
F_2		1.000	0.272	-0.203	-0.359	0.085	-0.265
F_3			1.000	-0.069	-0.594	0.841	-0.224
F_4				1.000	-0.021	0.362	0.165
F_5					1.000	-0.568	0.085
F_6						1.000	-0.070
F_7							1.000
σ_j	0.233	0.278	0.258	0.219	0.245	0.270	0.248
C_j	1.838	1.726	1.306	1.236	1.194	1.278	1.591
W_j	0.181	0.170	0.128	0.122	0.117	0.126	0.156

度的影响,因子的选取具有一定的合理性。

采用因子信息量综合反映因子的对比强度和冲突性, C_j 决定着因子权重的大小。因此 F_1 权重最大, F_5 最小, 各因子权重排序从大到小为 F_1 、 F_2 、 F_7 、 F_3 、 F_6 、 F_4 、 F_5 。

由于研究区的局限性,降雨量变化不大,因此泥石流的暴发受控于流域内物源情况;同时泥石流发生频率越高,则累计造成的危害性越大,因此 F_1 和 F_2 两个因子所占权重较高。

3.2 敏感性评价模型建立及验证

将研究区内泥石流的参数无纲量化处理,根据无纲量值计算出研究区泥石流 7 个评价因子的权重,从而根据式(1)建立研究区泥石流发生规模评价模型为

$$R = \sum_{i=1}^7 x_i(k) w_i \quad (4)$$

式中: i 为评价因子数量, $i=1, 2, \dots, 7$; R 为泥石流发生规模评价; $x_i(k)$ 为图 2 中的无纲量值; w_i 为表 2 中 7 个评价因子权重值。

结合野外调查和前人的相关研究,将研究区中 42 条泥石流的敏感性划分为 3 类: $R \leq 0.27$ 为高敏感性泥石流(红色); $0.27 < R < 0.35$ 为中敏感性泥石流(黄色); $R \geq 0.35$ 为低敏感性泥石流(绿色)。根

据以上划区标准,通过 ARCGIS 平台,绘制研究区泥石流敏感性的分区图,如图 3 所示。研究区内都汶高速岷江干流沿岸的 DF01、DF02、DF03、DF04、DF08 区域泥石流敏感性高,距映秀镇较近,特别是 DF03 和 DF04,一旦暴发泥石流冲毁道路、堵塞岷江干流,对映秀镇造成的危害无法想象。2010 年 8 月 14 日暴雨之后,DF01、DF02、DF03、DF04、DF08、DF21 区域均暴发大规模泥石流,并作为重点治理对象,这与所划分的高敏感性泥石流是相对应的。

以泥石流的形成、运动、堆积等特征可以建立不

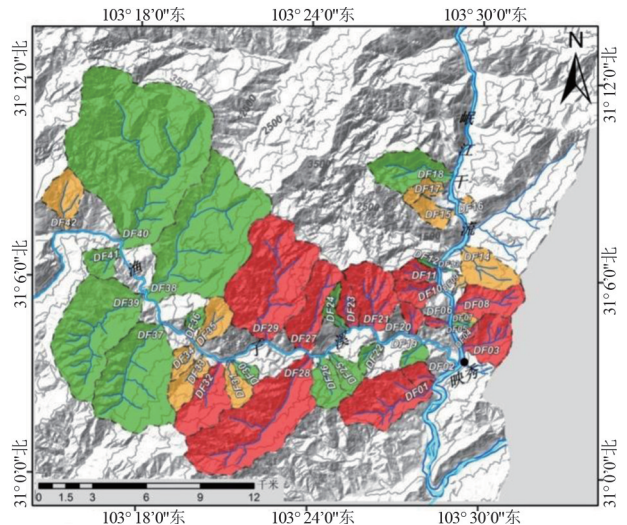


图 3 强震区公路泥石流敏感性分区

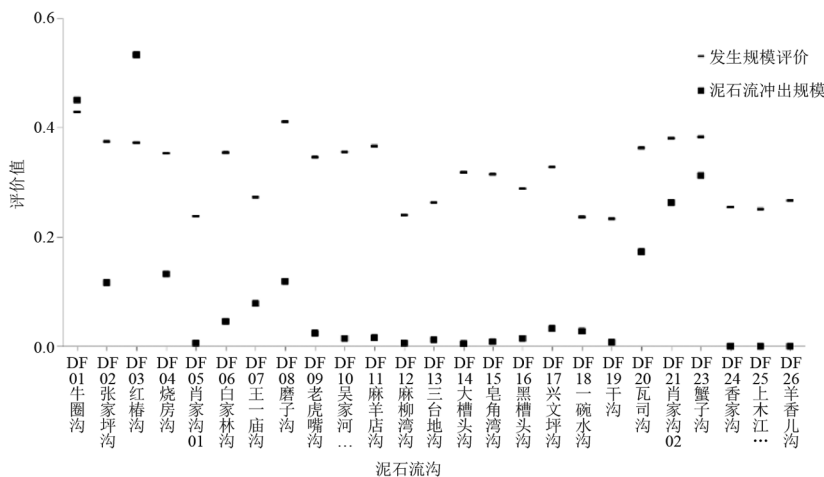


图 4 重点泥石流敏感性评价与泥石流冲出规模验证

同的泥石流分类系统。从泥石流的运动特征出发,通过野外现场调查和遥感解译,计算研究区内重点 26 条泥石流沟的一次泥石流冲出总量,将其作为验证泥石流敏感性评价模型的依据,建立重点沟的敏感性评价与泥石流冲出规模验证图,如图 4 所示。

由图 4 可知,泥石流敏感性评价模型计算结果与验证方法结果对比可知,研究区泥石流冲出规模与灾害暴发识别模型计算的泥石流敏感性吻合率达到了 81%,从而证明了降雨型泥石流暴发识别模型的可行性。

综上所述,震区映秀地区 42 条泥石流有高敏感性泥石流 15 条、中敏感性泥石流 11 条、低敏感性泥石流 16 条。渔子溪沿岸地质条件都是泥石流暴发的有利因素:岩性以花岗岩为主,沟谷切割较深、狭窄;斜陡的山坡不易植被生长,易于沟内汇集雨水;特别是汶川地震之后,泥石流流域物源条件丰富,沟道地貌突变,高差加大。

4 结 论

上面以汶川地震强震区岷江干流及渔子溪沿岸的 42 个泥石流为研究对象,提取泥石流流域中物源存储量、暴发频率、流域面积等 7 个重要因子,运用 CRITIC 法建立电网降雨诱发泥石流灾害识别模型:

1) 电网降雨型泥石流灾害暴发识别因子中松散固体物质储量和泥石流暴发频率最为主要。

2) 将研究区泥石流敏感性分为高敏感性、中敏感性、低敏感性三级,并绘制分区图。42 条泥石流分为高敏感性泥石流 15 条、中敏感性泥石流 11 条、低敏感性泥石流 16 条。2010 年 8 月 14 日暴雨诱发

DF01、DF02、DF03、DF04、DF08、DF21,均为大规模泥石流,与所划分其属于高敏感性泥石流是一致的。

3) 由于研究区内降雨量差别不大,绘制的泥石流敏感性分区图可为将来该区泥石流的危险性分区提供数据支撑。由于研究区地域的局限性,关键因素降雨条件未能体现出来,因此评价模型的广泛适用性还需进一步研究。

参考文献

- [1] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquakes, China[J]. Journal of Asian Earth Science, 2011, 40 (4): 883-895.
- [2] ALEXANDER D. Urban landslides[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 1989, 13 (2): 157-191.
- [3] HÜRLIMANN M, COPONS R, ALTIMIR J. Detailed debris onhazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach[J]. Geomorphology, 2006, 78 (3-4): 359-372.
- [4] ZHOU W, TANG C. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China[J]. Landslides. DOI: 10.1007/s10346-013-0421-5.
- [5] 黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境, 2009, 20(3): 1-7.
- [6] 刘清华, 唐川, 常鸣. 汶川地震强震区映秀地区泥石流的危险性[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 592-598.
- [7] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145-151.
- [8] 唐川, 李为乐, 丁军. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(1): 172-180.

- [9] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [10] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51-57.
- [11] 高桥保, 中川一, 佐藤宏章. 扇状地における土砂泛滥灾害危険度の评价[J]. 京都大学防灾研究所年报, 1988, 31(B-2): 655-676.
- [12] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349.
- [13] 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): 63-73.
- [14] ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, WANG Qing, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods [J]. Nat Hazards, 2013, 66: 1073-1100.
- [15] CHEVALIER G G, MEDINA V, HÜRLIMANN M, et al. Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: application to the Central-Eastern Pyrenees [J]. Nat Hazards, 2013, 67: 213-238.
- [16] CHANG Ming, TANG Chuan, ZHANG Dan-dan, et al. Debris Flow Susceptibility Assessment Using a Probabilistic Approach: A Case Study in the Longchi Area, Sichuan Province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 1001-1014.
- [17] CHEN Xingzhang, CHEN Hui, YOU Yong, et al. Susceptibility assessment of debris flows using the analytic hierarchy process method-A case study in Subao river valley, China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015(4): 1-7.
- [18] JAKOB M, FRIELE P. Frequency and magnitude of debris flows on Cheekye River, British Columbia [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 382-395.
- [19] 匡乐红, 刘宝琛. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究[J]. 灾害学, 2006, 21(1): 68-72.
- [20] 孟凡奇, 李广杰, 李明, 等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2925-2929.
- [21] LI H B, FU X F, VAN DER WOERD J, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Acta Geol Sin, 2008, 82(1): 1623-1643.
- [22] BURCHFIEL B C, CHEN Z L, LIU Y P, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions central China [J]. International Geology Review, 1995, 37(8): 661-735.
- [23] TANG Chuan, ZHU Jing, DING Jun. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8: 485-497.
- [24] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method [J]. Computers & operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [25] LIN P S, LIN J Y, HUANG J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan [J]. Engineering Geology, 2002, 66(3-4): 295-313.
- [26] 郭晓军, 苏鹏程, 崔鹏. 7月3日茂县棉簇沟特大泥石流成因和特征分析[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 140-146.

作者简介:

卜祥航(1987), 男, 高级工程师, 研究电网地震及地质灾害防御工作。

(收稿日期: 2023-01-31)

(上接第55页)

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 徐建设, 陈以一, 韩琳, 等. 普通螺栓和承压型高强螺栓抗剪连接滑移过程 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 510-514.
- [5] 杜运兴, 欧阳卿. 高强螺栓承压型连接抗剪承载力计算 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 21-25.
- [6] 刘素丽, 陈传新, 魏文辉, 等. 承压型高强螺栓受力性能试验研究 [J]. 安徽建筑, 2013, 20(2): 211-212.
- [7] 陈绍蕃. 钢结构设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 国家电网有限公司科技创新部. 110 kV~1000 kV 架空输电线路施工及验收规范: Q/GDW 10115—2022 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [9] 汝元功, 唐照民. 机械设计手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母: DL/T 284—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

作者简介:

鄯秀庆(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电线路工程设计及管理工作。

(收稿日期: 2023-02-05)