

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.03

基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价

杨华阳, 许向宁, 杨鸿发

(四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队, 四川 成都 611830)

摘要: 2017 年 8 月 8 日四川省北部九寨沟县暴发了 Ms7.0 级地震, 是继 2013 年“4·20”芦山 Ms7.0 级地震后再次发生在巴颜喀拉块体边界的强烈地震, 地震诱发了近 1 880 处滑坡, 通过地理信息系统与遥感技术, 选取与高程、坡度、坡向、与水系距离、峰值加速度(PGA)、与震中距离、岩性、与断裂距离等 8 个因素作为九寨沟地震滑坡危险性评价因子, 采用加法和减法 2 种证据权方法, 对九寨沟地震滑坡危险性进行评价。结果表明: 基于加法证据权的评价模型的准确率为 88.29%, 基于减法证据权的评价模型的准确率为 87.31%。利用自然断点法, 将研究区按滑坡危险性程度分为极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区与极低危险区。其中, 基于加法证据权所计算的极高和高危险区面积之和约 300.17 km², 占研究区总面积的 33.84%, 发育的滑坡面积占滑坡总面积的 91.10%; 基于减法证据权所计算的极高和高危险区面积之和约 214.35 km², 占研究区总面积的 24.17%, 发育的滑坡面积占滑坡总面积的 85.04%。评价结果可为震后地质灾害防治、基础设施重建, 特别是九寨沟自然风景区的灾后重建工作提供重要的参考。

关键词: 九寨沟地震; 证据权; 滑坡危险性评价

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0020-10

The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method

YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa

(405 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 611830, China)

Abstract: On August 8, 2017, the Ms 7.0 earthquake struck Jiuzhaigou City, north of Sichuan Province, which is another strong earthquake happened in the margin of the Bayan Har block after 2013 “4. 20” Lushan earthquake. 1880 landslides were triggered by the 2017 Jiuzhaigou earthquake. In this paper, eight factors influencing landslide occurrence, including elevation, aspect, slope, distance from river, peak ground acceleration (PGA), distance from epicenter, lithology and the distance from faults are selected as landslide hazard assessment factors. Based on Geographical Information System technology, two types of landslide hazard mapping are derived using two “weight of evidence” methods. The success rate of Add “weight of evidence” method is 88.29%, and that of Subtract “weight of evidence” method is 87.31%, which are both comparatively high precise data. The landslide hazard assessment maps are divided into five categories, including extremely high, high, moderate, low, and extremely low, respectively, with the application of Natural Breaks method. It is found that the extremely high and high risk zones range 300.17 km² by means of add “weight of evidence” method, which account for 33.84% of the whole study area. 91.10% of the total

收稿日期: 2019-11-25; 修订日期: 2019-12-16

基金项目: 四川省自然资源厅重大科技支撑研究课题(KJ-2018-21); 四川省地矿局 2019 年科技创新项目

第一作者: 杨华阳(1990-), 男, 四川郫县人, 地质工程专业, 硕士, 中级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 449594946@qq.com

通讯作者: 许向宁(1971-), 男, 云南永胜人, 地质工程专业, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质工程及地质灾害研究工作。E-mail: 470762660@qq.com

landslides are distributed in these area. And that of Subtract “weight of evidence” method range 214.35 km², which account for 24.17% of the whole study area. 85.04% of the total landslides are distributed in these area. The assessment results provide a basis for the prevention, mitigation of geo-hazards, and especially for the recovery and reconstruction of Jiuzhaigou National Park.

Keywords: Jiuzhaigou earthquake; weight of evidence; landslide hazard assessment

0 引言

2017年8月8日21时19分46秒,四川省阿坝州九寨沟县暴发了Ms7.0级地震(据中国地震台网数据)。此次地震的震中(103.82°E,33.20°N)位于塔藏断裂、岷江断裂、虎牙断裂3条全新世活动断裂的交汇处,震源深度20 km^[1]。四川、甘肃、青海、宁夏等多省震感明显,据四川省抗震救灾指挥部通报,截至2017年8月13日20时,九寨沟地震已造成25人死亡,6人失踪,525人受伤。

山区强震往往会诱发大量崩塌滑坡地质灾害,造成巨大的经济财产损失和严重的人员伤亡,受到地球科学领域专家的广泛关注,据统计2008年汶川地震触发了近20万处滑坡地质灾害,而由滑坡造成的死亡人数约占地震总伤亡人数的1/3^[2-4]。2017年九寨沟地震发生后,众多学者也进行了大量地质灾害方面的相关研究工作。FAN等^[5](2018)、WANG等^[6](2018)通过遥感技术进行震区地质灾害解译,统计出地质灾害与各类因素的关系,进行地质灾害分布规律研究;刘甲美等^[7](2017)、陈晓利等^[8](2018)利用灾前地形、区域地质等资料,运用Newmark累积位移模型提出了九寨沟地震应急快速地质灾害评价方法。

地震发生后,地震滑坡危险性评价是地震滑坡的一个重要研究方向^[9-12],对地震灾区的防灾减灾、灾后重建具有重要意义。当前,常用的地震滑坡危险性评价方法主要包括基于简单力学原理的Newmark简易模型方法^[13-14]和基于数学模型的统计分析方法。

随着GIS的发展,近年涌现了大量基于数学模型的地震滑坡危险性评价统计分析方法。该类方法假设的前提是未来发生地质灾害的条件和过去相同,利用已发生的地震滑坡,建立这些滑坡与相关滑坡影响因子(包括水文因素、人类活动因素和地貌因素等)的数学模型,再将建立的数学模型应用于整个地震区的区域性评估^[15-16]。但评价因素的选取及其权重值的确定一直是制约该学科发展的一个瓶颈,直接决定了地震滑坡危险性评价结果的好坏以及分区精度的高低。证据权法作为一种数据驱动的计算方法,较好地避免

了滑坡危险性评价中评价因素的主观选择和权重值的主观评估,并在国内外得到了大量的应用^[17-20]。

本文采用加法与减法2种证据权方法客观定量地评价地震、地形和地质3大因素(8个因子)对滑坡发育的影响程度,并据此进行滑坡危险性评价因子的选取及九寨沟地震滑坡危险性评价研究工作,避免了对评价因子选择及其赋值的主观性,探讨了证据权方法对九寨沟地震滑坡危险性评价的适用性,以期更深入了解地震滑坡及其致灾因子间的关系,同时也为震后地质灾害防治、基础设施重建,特别是九寨沟自然风景区的灾后重建工作提供重要的参考。

1 九寨沟地震及诱发地质灾害

九寨沟县位于四川省阿坝州东北部、青藏高原东北缘、岷山山脉的东部以及龙门山山脉的西北部,地处青藏高原与四川盆地的两大地貌单元间过渡的深切峡谷地带。境内相对高差悬殊,为典型的高山深切河谷地貌类型。

根据区域构造纲要图,研究区附近主要包括岷江断裂、塔藏断裂和虎牙断裂的北西段(图1)。李渝生等^[21](2017)基于野外调查的地表和房屋变形,与震源构造动力学理论分析相结合的角度阐明九寨沟地震断层破裂机制,李忠权等^[22](2018)探讨了九寨沟地震发震构造背景与构造机制,推测可能发震断层位置为塔藏断裂与岷江断裂间的隐伏断裂。据中国地震台网中心数据可知,研究区内构造运动活跃,地震频发,距离此次地震震中200 km范围内近百年共发生5级以上地震49次,多次发生6.5级以上地震。

为掌握九寨沟地震所诱发地质灾害的数量、规模和空间分布特征,我单位协同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团队采用地震前后高精度遥感影像和无人机航拍影像对地震诱发的地质灾害进行了快速解译,解译区面积约为840 km²,共解译同震地质灾害1883处,总面积约8.11 km²(图1)^[23]。根据这些滑坡的空间分布位置,大体框定出滑坡区的分布范围,作为本文的研究区域(图1中黑圈部分),面积为886.95 km²。研究区内的高程为1634~

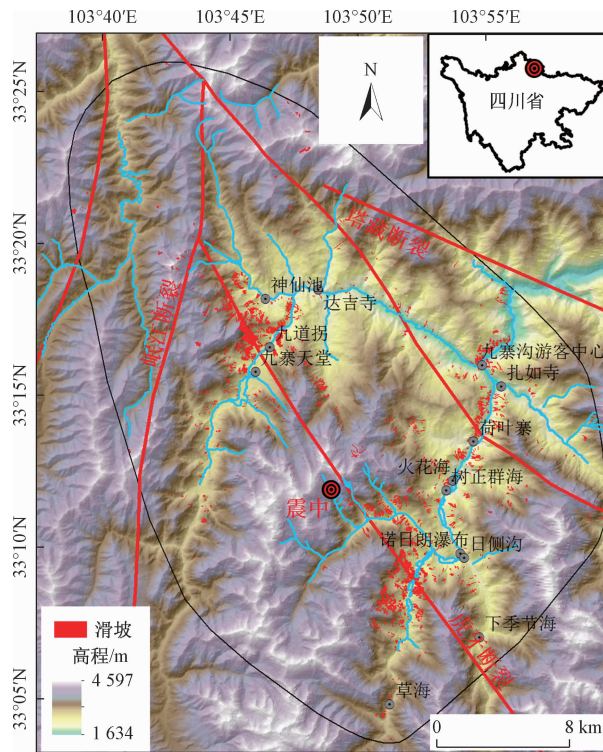


图1 研究区范围与九寨沟地震诱发滑坡分布图

Fig.1 The study area and spatial distribution of co-seismic landslides triggered by the 2017 Jiuzhaigou earthquake

4 597 m。研究区内滑坡面积占研究区面积的 0.914%。

研究区内的岩性数据来自于 1:20 万地质图,按照地层年代共分为 4 类岩组,主要包括三叠系(T)变质砂岩、板岩,二叠系(P)白云质灰岩、砂质板岩,石炭系(C)块状白云质灰岩,泥盆系(D)结晶灰岩夹石英岩状砂岩。主要河流有白河、九寨沟和日寨沟等。

2 滑坡影响因子图层制作

地震滑坡作为多种内动力和外动力因子综合作用的产物,其影响因素的选取是滑坡危险度区划的基础。结合九寨沟地震区的地质、地形、地震以及其他资料,综合考虑九寨沟地震滑坡的多种影响因素,选取地质、地形和地震 3 大因素(8 个因子)对九寨沟地震滑坡危险性进行了快速评价和分区,并分别对每个因子进行分级,分级结果见表 1 的第 1 列和图 2 所示。其中,选取震中距与 PGA 两种地震因子作为地震滑坡的外动力因子;而内动力因子包括地形因子、地质因子;选择高程、坡度、坡向、与水系距离作为地形因子;选择地层岩性、与断裂的距离作为地质因子。再基于上述滑坡影响因子,利用证据权方法对研究区内的滑坡危险性进行评价,利用 ROC 曲线验证评价结果的精度。

表 1 基于九寨沟地震滑坡的 8 个影响因子各个等级证据权计算

Table1 Computed weight-of-evidence classes of various data layers based on earthquake-induced landslides

影响因子及分级		栅格数	栅格数/%	滑坡栅格数	滑坡栅格数/%	比率	W+	W-	Wadd	Wsubtract
高程/km										
1	1.9~2.3	280 279	3.16	4 072	5.03	1.59	0.47	-0.02	0.45	0.49
2	2.3~2.6	697 611	7.87	11 152	13.77	1.75	0.57	-0.07	0.50	0.63
3	2.6~2.9	1 151 926	12.99	23 995	29.64	2.28	0.84	-0.21	0.62	1.05
4	2.9~3.2	1 535 215	17.32	25 252	31.19	1.80	0.60	-0.19	0.41	0.78
5	3.2~3.5	1 858 464	20.96	11 325	13.99	0.67	-0.41	0.09	-0.32	-0.49
6	3.5~3.8	1 737 821	19.60	3 130	3.87	0.20	-1.63	0.18	-1.45	-1.81
7	3.8~4.1	1 156 100	13.04	1 715	2.12	0.16	-1.83	0.12	-1.71	-1.94
8	4.1~4.5	448 734	5.06	324	0.40	0.08	-2.55	0.05	-2.50	-2.59
坡度/(°)										
1	0°~10°	336 189	3.79	640	0.79	0.21	1.33	0.03	-1.54	-1.61
2	10°~20°	1 084 736	12.23	2 364	2.92	0.24	2.50	0.10	-1.34	-1.54
3	20°~30°	2 354 847	26.56	9 203	11.37	0.43	3.28	0.19	-0.66	-1.04
4	30°~40°	3 351 472	37.80	26 757	33.05	0.87	3.63	0.07	-0.06	-0.21
5	40°~50°	1 435 672	16.19	29 738	36.73	2.27	2.78	-0.28	0.55	1.11
6	50°~60°	258 137	2.91	9 891	12.22	4.20	1.07	-0.10	1.36	1.57
7	60°~70°	40 071	0.45	1 970	2.43	5.38	-0.79	-0.02	1.70	1.74
8	>70°	5 026	0.06	402	0.50	8.76	-2.87	0.00	2.24	2.25
坡向/(°)										
1	平坦	5 188	0.06	10	0.01	0.21	-1.56	0.00	-1.56	-1.56
2	北	1 091 995	12.32	7 249	8.95	0.73	-0.32	0.04	-0.28	-0.36
3	北东	1 232 842	13.91	13 412	16.56	1.19	0.18	-0.03	0.15	0.21
4	东	1 209 525	13.64	18 392	22.71	1.66	0.52	-0.11	0.40	0.63
5	南东	1 056 532	11.92	16 851	20.81	1.75	0.56	-0.11	0.46	0.67

续表

影响因子及分级		栅格数	栅格数/%	滑坡栅格数	滑坡栅格数/%	比率	W +	W -	Wadd	Wsubtract
6	南	960 124	10. 83	6 567	8. 11	0. 75	-0. 29	0. 03	-0. 26	-0. 32
7	南西	1 185 068	13. 37	5 883	7. 26	0. 54	-0. 61	0. 07	-0. 55	-0. 68
8	西	1 162 667	13. 11	6 416	7. 92	0. 60	-0. 51	0. 06	-0. 45	-0. 57
9	北西	962 209	10. 85	6 201	7. 66	0. 71	-0. 35	0. 04	-0. 32	-0. 39
距离水系/km										
1	0 ~0. 5	2 015 370	22. 71	32 212	39. 73	1. 75	0. 57	-0. 25	0. 32	0. 82
2	0. 5 ~1. 0	1 627 576	18. 34	20 057	24. 74	1. 35	0. 30	-0. 08	0. 22	0. 38
3	1. 0 ~1. 5	1 329 671	14. 99	13 049	16. 10	1. 07	0. 07	-0. 01	0. 06	0. 09
4	1. 5 ~2. 0	1 128 435	12. 72	8 707	10. 75	0. 85	-0. 17	0. 02	-0. 15	-0. 19
5	2. 0 ~2. 5	880 945	9. 93	2 860	3. 54	0. 36	-1. 04	0. 07	-0. 97	-1. 11
6	2. 5 ~3. 0	620 764	7. 00	1 703	2. 11	0. 30	-1. 21	0. 05	-1. 15	-1. 26
7	3. 0 ~3. 5	428 976	4. 83	1471	1. 82	0. 38	-0. 98	0. 03	-0. 95	-1. 01
8	3. 5 ~4. 0	276 231	3. 11	531	0. 66	0. 21	-1. 55	0. 03	-1. 53	-1. 58
9	>4. 0	565 156	6. 37	434	0. 55	0. 09	-2. 47	0. 06	-2. 41	-2. 53
PGA/g										
1	0. 26	492 391	5. 55	9 788	12. 10	2. 18	0. 79	-0. 07	0. 72	0. 86
2	0. 24	2 290 230	25. 83	29 312	36. 23	1. 40	0. 34	-0. 15	0. 19	0. 49
3	0. 20	3 108 578	35. 06	29 975	37. 05	1. 06	0. 06	-0. 03	0. 02	0. 09
4	0. 16	1 398 004	15. 77	9 831	12. 15	0. 77	-0. 26	0. 04	-0. 22	-0. 31
5	0. 12	1 346 086	15. 18	1 836	2. 27	0. 15	-1. 91	0. 14	-1. 77	-2. 05
6	0. 08	230 736	2. 60	159	0. 20	0. 08	-2. 59	0. 02	-2. 57	-2. 62
与震中距离/km										
1	0 ~3	282 697	3. 19	1 398	1. 72	0. 54	-0. 62	0. 02	-0. 60	-0. 63
2	3 ~6	848 216	9. 56	9 028	11. 13	1. 16	0. 15	-0. 02	0. 14	0. 17
3	6 ~9	1 413 656	15. 93	25 206	31. 08	1. 95	0. 68	-0. 20	0. 48	0. 88
4	9 ~12	1 867 058	21. 04	29 069	35. 85	1. 70	0. 54	-0. 21	0. 33	0. 75
5	12 ~15	1 790 827	20. 18	11 694	14. 42	0. 71	-0. 34	0. 07	-0. 27	-0. 41
6	15 ~18	1 131 749	12. 75	2 840	3. 50	0. 27	-1. 30	0. 10	-1. 20	-1. 40
7	18 ~21	607 980	6. 85	725	0. 89	0. 13	-2. 04	0. 06	-1. 98	-2. 11
8	21 ~24	502 215	5. 66	814	1. 00	0. 18	-1. 74	0. 05	-1. 69	-1. 79
9	>24	428 726	4. 83	322	0. 40	0. 08	-2. 51	0. 05	-2. 46	-2. 55
岩性										
1	T	3 706 208	41. 77	15 522	19. 15	0. 46	-0. 79	0. 33	-0. 45	-1. 12
2	P	1 427 207	16. 08	4 658	5. 75	0. 36	-1. 04	0. 12	-0. 92	-1. 15
3	C	3 115 490	35. 11	58 851	72. 60	2. 07	0. 74	-0. 87	-0. 13	1. 60
4	D	624 219	7. 03	2 034	2. 51	0. 36	-1. 04	0. 05	-0. 99	-1. 08
与虎牙断裂距离/km										
1	0 ~2	1 336 750	15. 07	49 060	60. 50	4. 02	1. 42	-0. 77	0. 65	2. 19
2	2 ~4	1 457 382	16. 42	11 375	14. 03	0. 85	-0. 16	0. 03	-0. 13	-0. 19
3	4 ~6	1 576 003	17. 76	3 782	4. 66	0. 26	-1. 34	0. 15	-1. 19	-1. 49
4	6 ~8	1 648 839	18. 58	4 518	5. 57	0. 30	-1. 21	0. 15	-1. 06	-1. 36
5	8 ~10	1 449 648	16. 34	5 305	6. 54	0. 40	-0. 92	0. 11	-0. 81	-1. 03
6	10 ~12	831 681	9. 37	4 347	5. 36	0. 57	-0. 56	0. 04	-0. 52	-0. 61
7	12 ~14	388 684	4. 38	2147	2. 65	0. 60	-0. 51	0. 02	-0. 49	-0. 53
8	>14	184 137	2. 08	554	0. 68	0. 33	-1. 12	0. 01	-1. 10	-1. 13
与塔藏断裂距离/km										
1	0 ~2	1 797 006	20. 25	8 560	10. 55	0. 52	-0. 66	0. 12	-0. 54	-0. 77
2	2 ~4	1 373 134	15. 48	7 094	8. 75	0. 57	-0. 57	0. 08	-0. 50	-0. 65
3	4 ~6	979 620	11. 04	3 810	4. 70	0. 43	-0. 86	0. 07	-0. 79	-0. 93
4	6 ~8	836 888	9. 43	20 083	24. 76	2. 63	0. 98	-0. 19	0. 79	1. 17
5	8 ~10	817 936	9. 22	25 662	31. 64	3. 43	1. 26	-0. 29	0. 97	1. 54
6	10 ~12	770 881	8. 69	10 732	13. 23	1. 52	0. 43	-0. 05	0. 37	0. 48
7	12 ~14	702 153	7. 91	2 929	3. 61	0. 46	-0. 79	0. 05	-0. 74	-0. 84

续表

影响因子及分级		栅格数	栅格数/%	滑坡栅格数	滑坡栅格数/%	比率	W+	W-	Wadd	Wsubtract
8	14 ~ 16	626 958	7.07	728	0.90	0.13	-2.07	0.06	-2.01	-2.14
9	16 ~ 18	561 183	6.32	1 331	1.64	0.26	-1.36	0.05	-1.31	-1.41
10	> 18	407 365	4.59	175	0.22	0.05	-3.07	0.05	-3.02	-3.11
与岷江断裂距离/km										
1	0 ~ 3	1 563 230	17.62	5 390	6.65	0.38	-0.98	0.13	-0.85	-1.11
2	3 ~ 6	1 457 453	16.43	21737	26.80	1.63	0.50	-0.13	0.36	0.63
3	6 ~ 9	1 169 500	13.18	7 573	9.34	0.71	-0.35	0.04	-0.30	-0.39
4	9 ~ 12	989 478	11.15	2 425	2.99	0.27	-1.32	0.09	-1.23	-1.41
5	12 ~ 15	964 671	10.87	5 105	6.30	0.58	-0.55	0.05	-0.50	-0.60
6	15 ~ 18	904 944	10.20	24 475	30.18	2.96	1.10	-0.25	0.85	1.36
7	18 ~ 21	768 554	8.66	12 482	15.39	1.78	0.58	-0.08	0.50	0.66
8	21 ~ 24	604 551	6.81	1 537	1.90	0.28	-1.29	0.05	-1.23	-1.34
9	> 24	450 743	5.08	372	0.46	0.09	-2.41	0.05	-2.37	-2.46

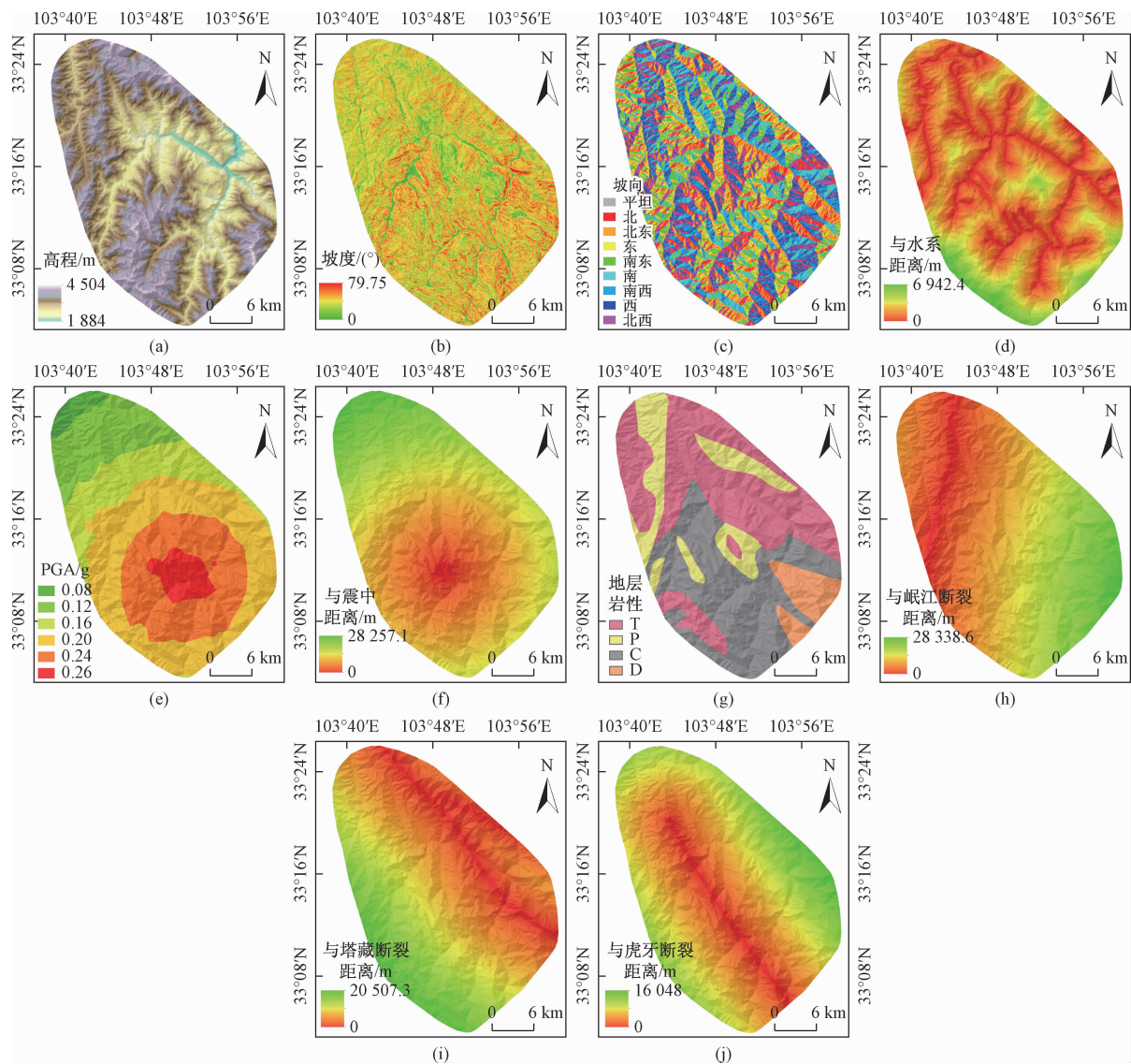


图2 评价因子分级图

Fig.2 Classification of assessment factors

a—高程分布图；b—坡度分布图；c—坡向分布图；d—与水系距离分布图；e—PGA；f. 与震中距离分布图；
g—地层岩性分布图；h—与岷江断裂分布图；i—与塔藏断裂距离分布图；j—与虎牙断裂分布图

3 证据权方法简介及证据权值计算

证据权方法是地震滑坡危险性评价的一种常用方法,该方法的数学表达式为:

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{F|L\}}{P\{F|\bar{L}\}} \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{F}|L\}}{P\{\bar{F}|\bar{L}\}} \quad (2)$$

$$W = (W_i^+ \pm W_i^-) \quad (3)$$

式中: $P\{F|L\}/P\{F|\bar{L}\}$ ——滑坡发生的充分率;

$P\{\bar{F}|L\}/P\{\bar{F}|\bar{L}\}$ ——滑坡发生的必要率;

W_i^+ ——该影响因子级别内滑坡发生的概率,为正权重,表示该影响因子级别与其内发生滑坡的正相关关系;

W_i^- ——该影响因子级别外滑坡发生的概率,为负权重,表示该影响因子级别内部发生滑坡的负相关关系。

根据九寨沟地震滑坡数据,使用式(1)与式(2)计算每个影响因子的滑坡危险性权重。

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3 + Npix_4}} \quad (4)$$

$$W_i^- = \ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3 + Npix_4}} \quad (5)$$

式中: $Npix_1$ ——该影响因子级别内发生滑坡的栅格数;

$Npix_2$ ——该影响因子级别外发生滑坡的栅格数;

$Npix_3$ ——该影响因子级别内未发生滑坡的栅格数;

$Npix_4$ ——该影响因子级别外未发生滑坡的栅格数。

最终的权重值分为两种情况计算(如公式(3)所示),一是将正权重值与负权重值相加,得到最终权重为:

$$W_{add} = (W_i^+ + W_i^-) \quad (6)$$

另一种是将两者相减,得到的最终权重为:

$$W_{subtract} = (W_i^+ - W_i^-) \quad (7)$$

证据权方法作为一种数据驱动的计算方法,假定影响因子间是互相独立,彼此不受干扰,不但考虑了由滑坡发生的充分率得到的正权重,而且还考虑了由滑

坡发生的必要率得到的负权重。最终得到的总权重(W_{add} 与 $W_{subtract}$)表明该影响因子级别对滑坡发生的敏感性,若总权重为正值,表明该级别有利于滑坡的发生,若为负值,则该级别不利于滑坡的发生。若权重值在0附近,表明该影响因子级别对滑坡的影响作用小。

本文采用了上述2种证据权方法对地震滑坡危险性进行评价,同时定量对比评价结果,探讨哪种证据权方法更适用于九寨沟地震滑坡危险性评价。图3为本文所涉及的8个因子的分级情况及其对应的权重计算结果,其证据权值可以得出该影响因子内哪些级别的滑坡危险性高。由图4可知,当坡度 $>40^\circ$ 时的总权重为正值,表明该分级利于滑坡的发生,而 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的坡度内不利于滑坡的发生;3200 m以下是地震滑坡发生的危险高程;坡度越大,滑坡危险性越高;距离水系越近,滑坡危险性越高;对于坡向而言,北东、东、南东的总权重值都为正值,而其他几个方向的总权重值都为负值,其中南东向的值最大,这可能跟地震波的传播方向为近南东向有关^[24-25];PGA值越大,斜坡受到的地震动影响越大,滑坡危险性越高;对于地层岩性而言,仅石炭系(C)岩层总权重值为正,该地层为块状白云质灰岩,经现场调查发现该地层岩体节理裂隙发育,岩体破碎,地震滑坡危险性高;但本次九寨沟地震滑坡危险性并没有随着震中距的增加呈现单调递减的趋势,而是在6~0 km分级范围内权重值最大,危险性最高;距离虎牙断裂越近,滑坡危险性越高,而滑坡危险性在距离塔藏断裂8~10 km范围时才达到最大值,在距离岷江断裂15~18 km范围时才达到最大值,说明虎牙断裂对九寨沟地震滑坡的控制作用更加明显,侧面证实了虎牙断裂为九寨沟地震的发震断裂。

4 九寨沟地震滑坡危险性索引图制作

根据得到的最终权重值,对每个影响因子的分级赋予相对应的权重值,并叠加各个影响因子层,获得九寨沟地震滑坡危险性索引(Landslide Hazard Index, LHI)图。公式如下:

$$LHI = W_{高程} + W_{坡度} + W_{坡向} + W_{水系} + W_{PGA} + W_{震中距} + W_{地层岩性} + W_{断裂}$$

因此,根据2种不同最终权重计算方法(W_{add} 与 $W_{subtract}$),得到了2个地震滑坡危险性评价索引图。结果表明:基于 W_{add} 方法得到的LHI范围为-13.509~6.594,基于 $W_{subtract}$ 方法得到的LHI范围为-14.4902~12.807。

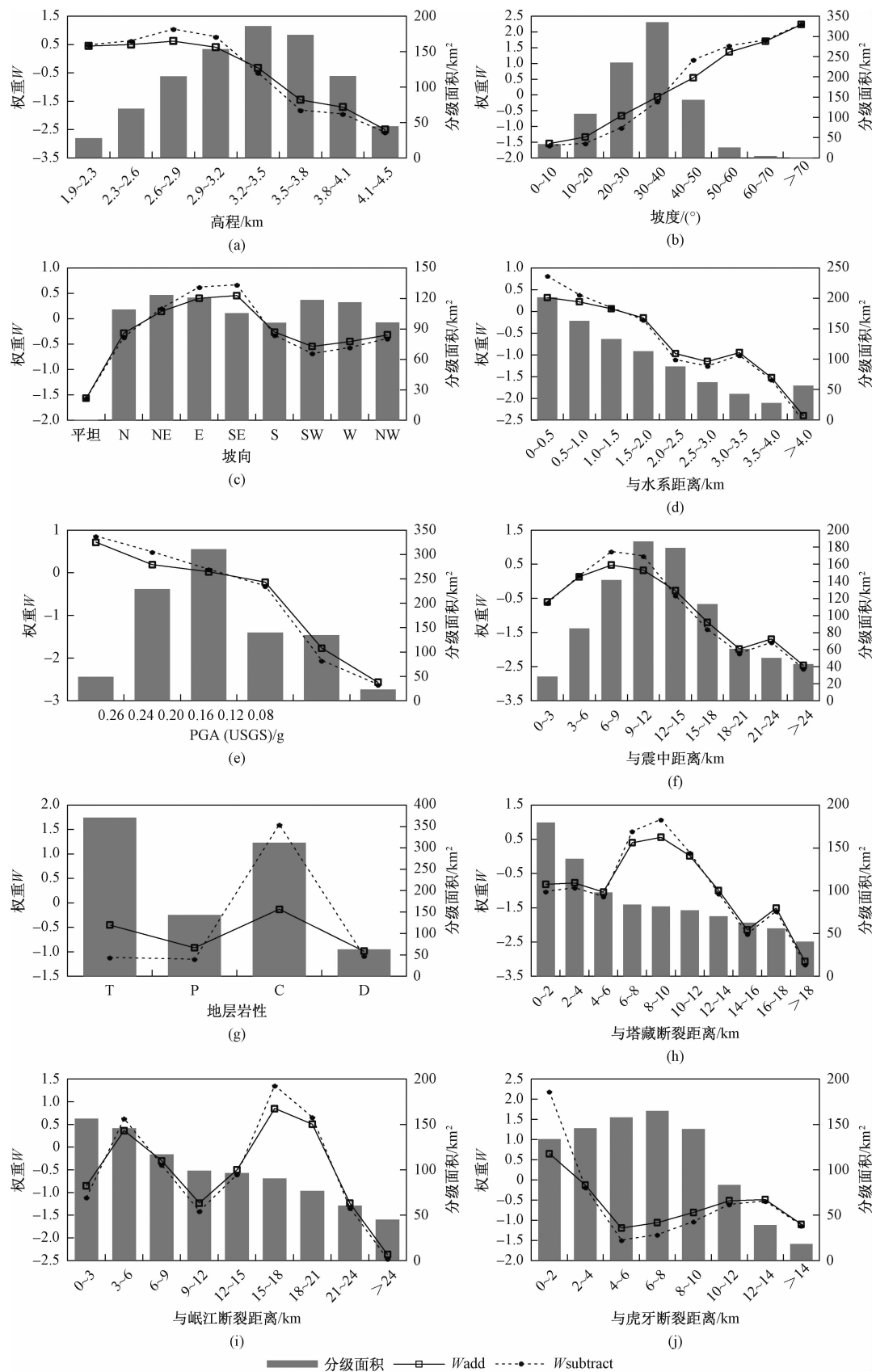


图3 权重计算结果图

Fig. 3 The calculated values of weight of evidence

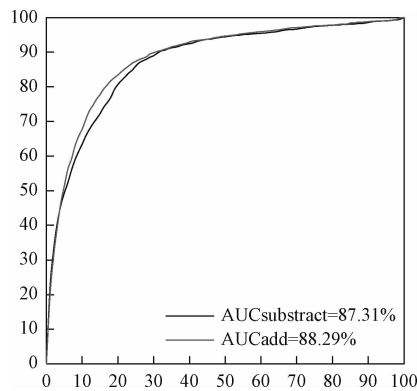


图 4 滑坡危险性评价结果评价曲线

Fig. 4 Success rate for landslide hazard assessment maps

运用滑坡面积百分比累积-危险性面积百分比累积曲线下面积方法^[26-29] (Area Under Curve, AUC) 定量检验 2 种结果的正确率。将危险性评价结果按 1% 的面积间隔由数值从高到低均分为 100 份,并分别求取这 100 个级别内滑坡发生的百分比,建立危险性结果百分比累加与滑坡百分比累积曲线(图 4)。由图 4 可见,基于 2 种证据权方法得到的曲线几乎重合。 W_{add} 对应的 AUC 为 88.29%, $W_{subtract}$ 对应的 AUC 值为 87.31%,数值相差很小, W_{add} 的正确率略大于

$W_{subtract}$,两者的结果均用已有滑坡数据得到了很好的验证,说明 2 种评价模型的精度都较高。

利用 ArcGIS 提供的自然断点法(Natural Breaks),根据证据权值将滑坡危险性评价结果划分为极低、低、中等、高、极高 5 个等级,2 种评价模型得到的结果类似(图 5)。九寨沟地震滑坡的极高、高危险区主要沿虎牙断层北部延长线分布,在沿位于震中西部的岷江断层和东部的塔藏断层一带分布较少。在地理位置上主要集中在九寨天堂和九寨沟自然保护区一带,应加强这些区域的地质灾害排查预防工作。

5 结论

(1) 基于加法和减法 2 种证据权值结果得出:距离断层、震中、水系越近,坡度越大,九寨沟地震滑坡危险性越高;3 200 m 以下为九寨沟地震滑坡发生的危险高程;石炭系(C)岩层为块状白质云质灰岩,经现场调查发现该地层岩体节理裂隙发育,岩体破碎,地震滑坡危险性高;通过滑坡发育情况与断层距离的统计分析,侧面证实了虎牙断裂为九寨沟地震发震断裂。

(2) 采取加法与减法 2 种证据权方法,对九寨沟地震滑坡危险性进行了评价。其中,基于加法证据权

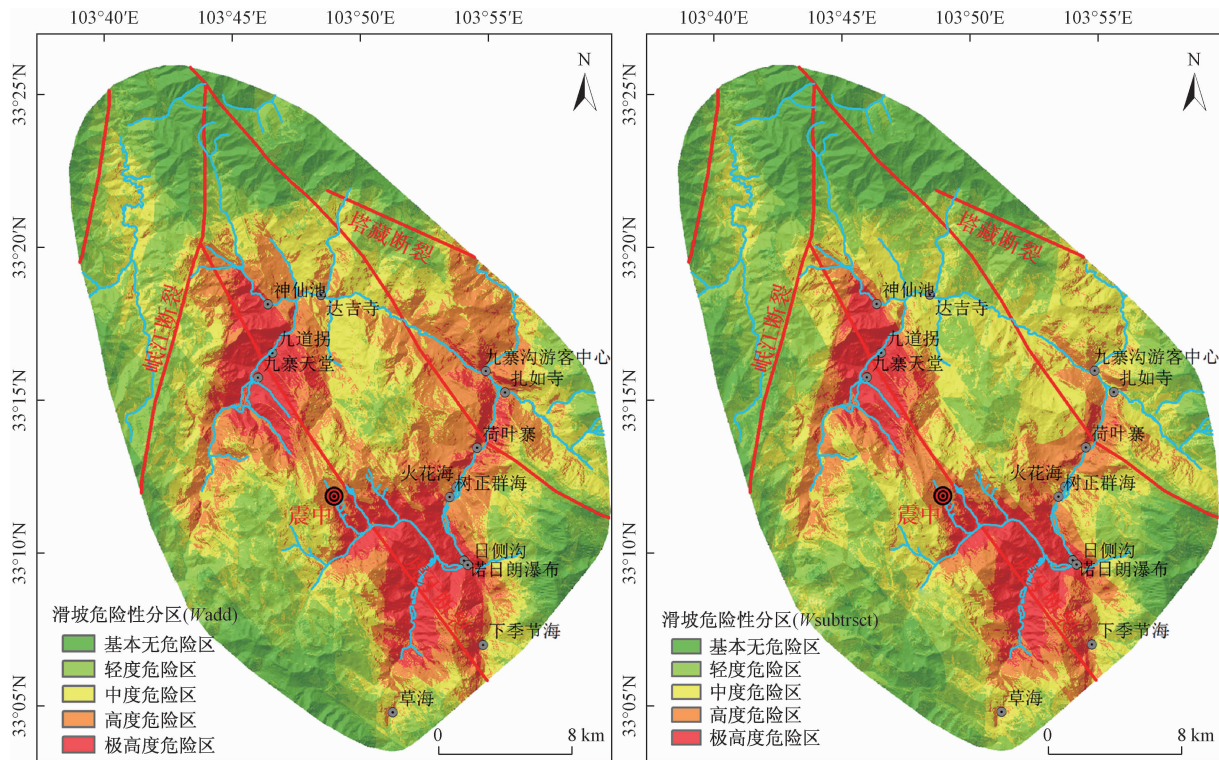


图 5 九寨沟地震滑坡危险性评价结果图(加法(左);减法(右))

Fig. 5 The landslide hazard assessment maps of the 2017 Jiuzhaigou earthquake-induced landslides (Wadd (left); Wsubtract (right))

的评价模型的准确率为 88.29%, 基于减法证据权的评价模型的准确率为 87.31%, 2 种评价模型的结果相差很小, 模型精度高, 说明证据权方法适用于九寨沟地震滑坡危险性评价。

(3) 利用自然断点法, 将研究区按滑坡危险性程度分为极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区与极低危险区。其中, 基于加法证据权所计算的极高和高危险区面积之和约 300.17 km², 占研究区总面积的 33.84%, 发育的滑坡面积占滑坡总面积的 91.10%; 基于减法证据权所计算的极高和高危险区面积之和约 214.35 km², 占研究区总面积的 24.17%, 发育的滑坡面积占滑坡总面积的 85.04%。

(4) 评价结果表明九寨沟地震滑坡的极高、高危险区主要沿虎牙断层北部延长线分布, 在沿位于震中西部的岷江断层和东部的塔藏断层一带分布较少。在地理位置上主要集中在九寨天堂和九寨沟自然风景区一带, 汛期应加强这些区域的地质灾害排查预防工作。

参考文献:

- [1] 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4018 - 4026. [XU X W, CHEN G H, WANG Q X, et al. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4018 - 4026. (in Chinese)]
- [2] KEEFER D K. Landslides caused by earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406.
- [3] XU C, XU X W, TIAN Y Y, et al. Two comparable earthquakes produced greatly different coseismic landslides: The 2015 Gorkha, Nepal and 2008 Wenchuan, China events [J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(6): 1008 - 1015.
- [4] RAO G, CHENG Y L, LIN A M, et al. Relationship between landslides and active normal faulting in the epicentral area of the AD 1556 M ~ 8.5 Huaxian Earthquake, SE Weihe Graben (Central China) [J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(3): 545 - 554.
- [5] HUANG R Q, FAN X M. The landslide story [J]. Nature Geoscience, 2013, 6(5): 325 - 326.
- [6] WANG J, JIN W, CUI Y F, et al. Earthquake-triggered landslides affecting a UNESCO natural site;

the 2017 Jiuzhaigou earthquake in the world National Park, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(7): 1412 - 1428.

- [7] 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等. 四川九寨沟 M_s7.0 级地震滑坡应急快速评估 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 639 - 645. [LIU J M, WANG T, SHI J S, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Jiuzhaigou M_s7.0 Earthquake, Sichuan, China [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 639 - 645. (in Chinese)]
- [8] 陈晓利, 单新建, 张凌, 等. 地震诱发滑坡的快速评估方法研究: 以 2017 年 M_s 7.0 级九寨沟地震为例 [J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 312 - 320. [CHEN X L, SHAN X J, ZHANG L, et al. Quick assessment of earthquake-triggered landslide hazards: a case study of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 312 - 320. (in Chinese)]
- [9] 许冲, 徐锡伟. 基于不同核函数的 2010 年玉树地震滑坡空间预测模型研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2994 - 3005. [XU C, XU X W. The 2010 Yushu earthquake triggered landslides spatial prediction models based on several kernel function types [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2994 - 3005. (in Chinese)]
- [10] 许冲, 徐锡伟. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划 [J]. 地质科技情报, 2012, 31(3): 116 - 121. [XU C, XU X W. GIS and ANN model for earthquake triggered landslides susceptibility zonation [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(3): 116 - 121. (in Chinese)]
- [11] XU C, DAI F C, XU X W, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. Geomorphology, 2012, 145/146: 70 - 80.
- [12] XU C, XU X W, DAI F C, et al. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. Computers & Geosciences, 2012, 46: 317 - 329.
- [13] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 271 - 289.
- [14] GALLEN S F, CLARK M K, GODT J W, et al. Application and evaluation of a rapid response

- earthquake-triggered landslide model to the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake, Nepal [J]. *Tectonophysics*, 2017, 714/715: 173 – 187.
- [15] GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. *Geomorphology*, 1999, 31 (1/2/3/4): 181 – 216.
- [16] OHLMACHER G C, DAVIS J C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(3/4): 331 – 343.
- [17] VAN WESTEN C J, RENGERS N, SOETERS R. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment [J]. *Natural Hazards*, 2003, 30(3): 399 – 419.
- [18] NEUHÄUSER B, TERHORST B. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany) [J]. *Geomorphology*, 2007, 86 (1/2): 12 – 24.
- [19] 王志旺, 李端有, 王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29 (8): 1268 – 1273. [WANG Z W, LI D Y, WANG X G. Zonation of landslide hazards based on weights of evidence model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29 (8): 1268 – 1273. (in Chinese)]
- [20] DAHAL R K, HASEGAWA S, NONOMURA A, et al. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(2): 311 – 324.
- [21] 李渝生, 黄超, 易树健, 等. 九寨沟 7.0 级地震的地震断裂及震源破裂的构造动力学机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 1141 – 1150. [LI Y S, HUANG C, YI S J, et al. Study on seismic fault and source rupture tectonic dynamic mechanism of JIUZHAIGOU M_s7.0 Earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1141 – 1150. (in Chinese)]
- [22] 李忠权, 韩倩, 芦建文, 等. 九寨沟地震震区周边构造特征及震源断裂 [J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2018, 45(6): 649 – 658. [LI Z Q, HAN Q, LU J W, et al. Study on the structural characteristics and seismogenic faults around the earthquake-stricken area of the Jiuzhaigou earthquake, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(6): 649 – 658. (in Chinese)]
- [23] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 1151 – 1164. [DAI L X, XU Q, FAN X M, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1151 – 1164. (in Chinese)]
- [24] CELEBI M. Topographic and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of 3 march 1985 earthquake [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1988, 77(4): 1147 – 1167.
- [25] FAN X M, SCARINGI G, XU Q, et al. Coseismic landslides triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake (Sichuan, China): factors controlling their spatial distribution and implications for the seismogenic blind fault identification [J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 967 – 983.
- [26] CONOSCENTI C, DI MAGGIO C, ROTIGLIANO E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4): 325 – 339.
- [27] KAMP U, GROWLEY B J, KHATTAK G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 631 – 642.
- [28] 许冲, 戴福初, 徐锡伟, 等. 基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价 [J]. *地球科学*, 2011, 36 (6): 1155 – 1164. [XU C, DAI F C, XU X W, et al. Earthquake triggered landslide susceptibility evaluation based on GIS platform and weight-of-evidence modeling [J]. *Earth Science*, 2011, 36 (6): 1155 – 1164. (in Chinese)]
- [29] 许冲, 徐锡伟, 于贵华, 等. 基于证据权方法的玉树地震滑坡危险性评价 [J]. *地震地质*, 2013, 35(1): 151 – 164. [XU C, XU X W, YU G H, et al. The Yushu earthquake triggered landslide hazard evaluation based on weight of evidence method [J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(1): 151 – 164. (in Chinese)]