

文章编号: 1008-2786-(2019)2-240-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000418

# 基于证据权模型的川藏铁路加查 ——朗县段滑坡易发性评价

郭长宝<sup>1,2</sup>, 唐 杰<sup>3</sup>, 吴瑞安<sup>1</sup>, 任三绍<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 活动构造与地壳稳定性评价重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘 要:** 川藏铁路加查至朗县段地处西藏自治区东南部, 该区新构造活动强烈, 地质构造复杂且历史强震频发, 一系列大型—巨型滑坡在该区密集分布。本文基于滑坡遥感解译和野外地质灾害调查, 建立了川藏铁路加查—朗县段的滑坡空间数据库, 选取高程、坡度、坡向、平面曲率、地层岩性、距河流距离、距断裂带距离、距道路距离、植被归一化指数(NDVI)以及年平均降雨量等 10 个滑坡影响因子, 基于 ArcGIS 软件平台和证据权模型, 进行滑坡易发性评价。根据滑坡易发性指数(LSI)的分布特征, 结合野外地质调查的认识, 将研究区内的滑坡易发程度划分为 4 个级别, 即极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区, 分别占研究区总面积的 17.43%、22.64%、32.21% 和 27.72%。分析表明, 极高易发区和高易发区主要分布在人类工程活动较多的研究区西南部, 沿着雅鲁藏布江及其支流呈带状分布, 中、低易发区主要分布在植被覆盖率较高、人类工程活动相对较少的东北部。极高易发区和高易发区内发育的滑坡数量约占已调查识别滑坡总数的 88%, 研究结果与已知滑坡的分布情况较吻合, 采用成功率曲线对易发性评价结果进行检验, 正确率达到了 83%, 具有较高的精度。易发性评价结果较好地反映了研究区内滑坡发育分布现状, 可以为该区重大工程规划建设和防灾减灾提供理论指导和参考依据。

**关键词:** 川藏铁路; 滑坡; 易发性评价; 地理信息系统; 证据权模型

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

我国是世界上地质灾害发育最为严重的国家之一, 其中滑坡作为最常见的地质灾害, 已严重影响和威胁着人类生命财产安全, 制约社会经济的发展<sup>[1-3]</sup>。地质灾害易发性评价是指通过对某一地区地质灾害调查研究的基础上, 对该区地质灾害易发条件和空间发生概率的预测评价<sup>[4-6]</sup>, 是地质灾害防治的重要依据<sup>[9, 10]</sup>, 也是国际地质灾害领域的研究热点问题<sup>[7-9]</sup>。

川藏铁路加查至朗县段地处青藏高原中部, 区内多为高山峡谷地貌, 地质构造复杂、新构造运动强

烈, 在内外动力耦合作用下, 崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害在该区密集分布<sup>[2, 10]</sup>, 特别是滑坡灾害频发, 给当地人民生活造成了重大损失, 如 1998 年 8 月, 加查县八邛线拉绥乡三村发生滑坡, 毁坏道路约 70 m, 致使交通中断十余天<sup>[11]</sup>; 2001 年 8 月, 朗镇其子村东侧滑坡发生大变形, 直接威胁 8 户村民的生命安全<sup>[11]</sup>。滑坡已对该区正在规划建设的铁路、高速公路和城镇等造成了重大威胁, 亟需开展滑坡易发性评价工作, 划分滑坡易发区, 制定有效的防灾减灾措施。因此, 本文在遥感解译和野外地质调查的

**收稿日期**(Received date): 2017-07-05; **改回日期**(Accepted date): 2019-02-10

**基金项目**(Foundation item): 中国地质调查局项目(DD20190319, 20190505, 12120113038000); 国家自然科学基金项目(41731287, 41877279)。  
[China Geological Survey Project(DD20190319, 20190505, 12120113038000); National Natural Science Foundation of China(41731287, 41877279)]

**作者简介**(Biography): 郭长宝(1980-), 男, 山东日照人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 工程地质与地质灾害。[GUO Changbao(1980-), male, born in Rizhao, Shandong province, Ph. D., associate professor, specialized in engineering geology and geological hazards] E-mail: guochangbao@163.com

基础上,建立了滑坡灾害空间数据库,综合分析了该区影响滑坡发育的10个主要因素,并基于ArcGIS软件平台和证据权模型,对研究区的滑坡易发性进行了分析评价,以期对铁路、公路等重大工程、城镇规划建设和防灾减灾提供科学依据。

## 1 地质背景

### 1.1 地质构造

川藏铁路加查至朗县段地处青藏高原中部,雅鲁藏布江中游(图1),南北跨越喜马拉雅板块北缘和冈底斯—念青唐古拉板块南缘<sup>[12-13]</sup>。研究区大地构造背景复杂,新构造活动强烈、地震频发,地震大多发生在近南北向、北东向断裂带及其与近东西向断裂带的交汇复合部位;地层岩性复杂,主要出露中生代和新生代地层,岩体受构造活动影响,挤压变形和风化强烈;地形起伏度大,深切峡谷发育,区内年均降雨量较大,多年平均降雨量为509 mm,主要集中在每年5—9月的雨季。区内各级河流坡降大、丰水期水流急,不断侵蚀两岸坡脚,也是诱发区内崩塌、滑坡发生的重要原因。

### 1.2 地质灾害

本文调查研究的范围主要位于川藏铁路加查至朗县段及两侧区域,总面积为1749 km<sup>2</sup>,根据遥感解译和现场地质灾害调查结果,区内共发育有224个滑坡(图1),滑坡所占面积为91.1 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的5.21%。典型滑坡主要有日阿莫滑坡、古朗杰滑坡、热堆村滑坡等(图2),其中规模最大的滑坡为拉岗村古高速远程滑坡(图2(e)),面积达2.95 km<sup>2</sup>,最小面积为1274.1 m<sup>2</sup>,大多数滑坡沿着

雅鲁藏布江及其支流两岸发育。

## 2 基于证据权模型的滑坡易发性评价方法

近年来,随着GIS软件在地学领域中的广泛应用,国内外不少学者对滑坡易发性评价开展了多层次的研究,如基于专家打分法<sup>[4]</sup>、层次分析法<sup>[5]</sup>、逻辑回归模型<sup>[6,9]</sup>、证据权<sup>[8,14]</sup>等方法的滑坡易发性评价研究。其中,证据权模型是一种综合各种证据来支持一种假设的定量方法,该方法以贝叶斯概率统计为基础,最初用于医疗诊断,后由加拿大地质学家Agterberg(1992)引入地质领域,并被用于地质灾害易发性评价研究中。该方法通过对影响地质灾害易发性的因子进行敏感性分析,计算出各因子的权重,再将各因子权重相加,得到研究区的滑坡易发性指数,该方法在一定程度上避免了因子权重赋值的主观性,具有较高的评价精度<sup>[8,14]</sup>。其计算公式如下:

$$W_i^+ = \ln\left(\frac{P\{B/L\}}{P\{\bar{B}/L\}}\right) = \ln\left(\frac{P(B \cap L)/P(L)}{P(\bar{B} \cap L)/P(L)}\right) \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{B}/L\}}{P\{B/L\}}\right) = \ln\left(\frac{P(\bar{B} \cap L)/P(L)}{P(B \cap L)/P(L)}\right) \quad (2)$$

$$W_{fi} = W_i^+ - W_i^- \quad (3)$$

式中, $P$ 表示概率, $P\{B/L\}$ 表示在 $L$ 发生的前提下 $B$ 发生的概率, $B$ 表示二级因子中发生滑坡的面积栅格数, $\bar{B}$ 表示二级因子中未发生滑坡的面积栅格数, $L$ 表示滑坡的总面积栅格数, $\bar{L}$ 表示研究区内未发生滑坡的栅格数。 $W_i^+$ 为正相关权重,表示在该

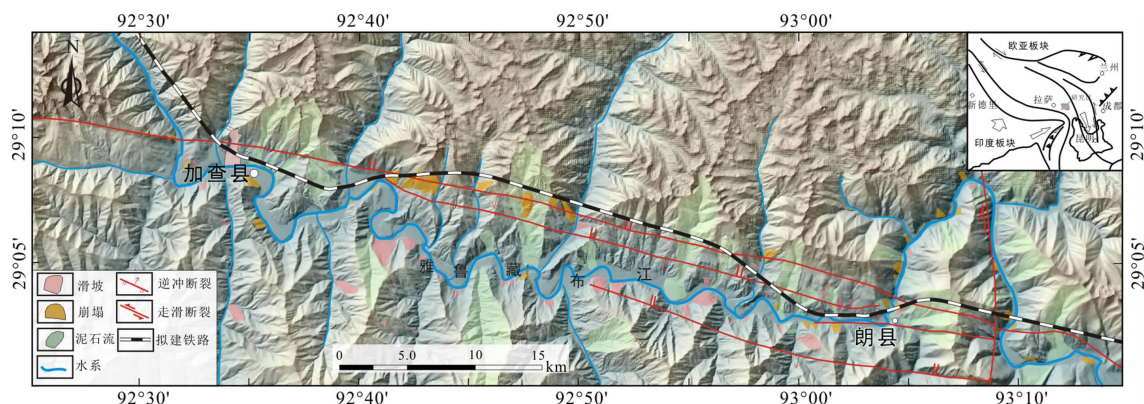


图1 川藏铁路加查至朗县段地质灾害发育分布图

Fig. 1 Geo-Hazards distribution along the Jiacha County to Lang County section of Sichuan-Tibet Railway





图2 西藏加查—朗县段典型滑坡发育特征图

Fig. 2 Typical landslide development characteristics along Jiacha County to Langxian County section, Tibet

二级因子影响下发生滑坡的概率,其值越大,滑坡的易发性程度越高, $W_i^-$ 表示没有该二级因子影响下滑坡发生的概率,为负相关权重,其值越小,滑坡易发性程度越低。 $W_i^+ = 0$  或  $W_i^- = 0$  时表示该二级因子与滑坡的发生无关。 $W_i$ 表示该二级因子对滑坡发生的权重值,反映了影响因子对滑坡的重要性。若该值为正,表明该二级因子有利于滑坡的发生;为负则表明其不利于滑坡的发生;零值则代表该二级因子与滑坡的发生无关。

### 3 滑坡影响因素分析

滑坡的发生受地形地貌、地层岩性、地质构造、降雨量和人类活动等多种因素的影响,本文在前人研究的基础上,结合研究区实际情况,选择了高程、地形坡度、地形坡向、平面曲率、距河流距离、工程地质岩组、距断裂带距离、距道路距离、归一化植被指数(NDVI)和年平均降雨量等 10 个因子开展相关性

分析,并进行滑坡易发性评价。在 ArcGIS 软件平台上,将矢量格式的影响因子图层栅格化为 25 m × 25 m 分辨率的栅格,面积为 1749 km<sup>2</sup> 的研究区共划分为 2773 801 个栅格。

### 3.1 高程对滑坡的影响

研究区具有海拔高、地势陡等特征,高程范围为 3026 ~ 5512 m,按照 500 m 一个级别将研究区地面高程划分为 < 3500 m、3500 ~ 4000 m、4000 ~ 4500 m、4500 ~ 5000 m、> 5000 m 等 5 个级别(图 3(a))。通过滑坡与地面高程的敏感性分析,可见滑坡发生最多的区域主要位于 3500 ~ 4000 m 范围内,约占滑坡总面积的 47.62%, $W_{fi}$  值高达 0.83(表 1、图 4(a)),而在高于 4000 m 的区域  $W_{fi}$  值低于 0,表明该区域不利于滑坡发育。

### 3.2 地形坡度对滑坡的影响

滑坡的发生与地形坡度有着直接的关系,滑坡发生的关键在于斜坡体是否具备有效临空面<sup>[15]</sup>。研究区内地形坡度变化明显,最大坡度超过 70°,根据研究区内地形坡度的分布情况,将斜坡坡度划分为 0 ~ 10°、10 ~ 20°、20 ~ 30°、30 ~ 40° 和 > 40° 等 5 个级别(图 3(b))。统计分析结果表明,该区滑坡主要发生在 10 ~ 30° 坡度范围内,在坡度过大(> 40°)与过小(< 10°)的区域内滑坡均很少发生,在坡度小于 10° 时, $W_{fi}$  值为 -1.60,表明该坡度下滑坡发育的可能性低。

### 3.3 地形坡向对滑坡的影响

坡向表示斜坡面的倾向或朝向,取值范围是 0° 到 360°,由于不同坡向上受日照、降雨量影响的差异,其对滑坡的影响也具有一定规律性<sup>[16]</sup>。通过分析研究区内平坡 Flat(0°)、N 向(0 ~ 22.5°)、337.5 ~ 360°)、NE 向(22.5 ~ 67.5°)、E 向(67.5 ~ 112.5°)、SE 向(112.5 ~ 157.5°)、S 向(157.5 ~ 202.5°)、SW 向(202.5 ~ 247.5°)、W 向(247.5 ~ 292.5°) 和 NW 向(292.5 ~ 337.5°) 等 9 个坡向与滑坡的相关性(图 3(c)),可见研究区内滑坡易发程度较高的方向主要是 N 向、NE 向、W 向和 NW 向 4 个坡向(表 1、图 4(c)),其他方向内  $W_{fi}$  值一般低于 0。

### 3.4 平面曲率对滑坡的影响

平面曲率是坡度或坡向在某个方向上的变化率,也是影响滑坡稳定性的因素之一。曲率为正表示该处地势向上凸,曲率为负表示该处地势向下凹,

曲率为零表示该处地势平坦,没有起伏<sup>[17]</sup>。分析表明,研究区内趋于平坦的地方基本不发生滑坡,这一区域主要分布在加查至朗县的雅鲁藏布江河谷和两岸的盆地内,而在凹坡和凸坡滑坡发育面积和栅格数相近(图 3(d)、图 4(d)、表 1)。

### 3.5 河流对滑坡的影响

滑坡的发育与现代河流侵蚀切割作用密切相关,河流附近往往是深切峡谷带,具有很好的滑坡发育临空面,因此河流两岸成为滑坡等地质灾害的多发部位。基于 ArcGIS 软件平台将河流附近区域以 100 m 为单位进行分级,获取了 0 m 到 1000 m 的 11 个河流二级因子(表 1、图 3(e))。总体上,距河流越近滑坡发育面积越大,滑坡易发性程度越高(表 1、图 4(e))。当距离河流 1000 m 以上时, $W_{fi}$  值为 -0.85,表明距离河流越远,河流对滑坡的影响越弱。

### 3.6 地层岩性对滑坡的影响

地层岩性是地质灾害发生的物质基础,对滑坡的形成具有重要的影响<sup>[16, 18]</sup>,按照研究区内各个地层的岩性及其工程地质性质,将研究区内的地层划分为 7 类工程地质岩组(表 2)。统计结果表明,滑坡主要发生在岩组 3 和岩组 7 中(图 3(f)、图 4(f)),其中岩组 7 岩体结构较为破碎,与滑坡相关性最高。

### 3.7 活动断裂对滑坡的影响

活动断裂不仅造成岩体破碎,而且断裂活动及其对地下水的控制作用直接影响着滑坡的稳定性。通过对活动断裂进行缓冲区分析,按照 500 m 的分级标准,将距断裂带距离划分为 11 个级别(图 3(h))。统计表明,距断裂带 1500 m 以内发生了 70% 以上的滑坡,总体上距断裂带距离越近,越容易发生滑坡(表 1、图 4(h))。区域性断裂构造的交叉复合部位的岩体较为破碎,是滑坡形成和发育的有利构造条件。

### 3.8 道路对滑坡的影响

道路修建过程中不可避免的将进行削坡、开挖坡脚等施工,形成临空面并改变坡体内部应力场状态,从而造成滑坡的发生。在研究区道路分布特征分析的基础上,在 ArcGIS 软件平台上以 100 m 为递进距离对道路进行缓冲区分析(图 3(g))。相关性分析结果表明,距道路越近,滑坡发育面积越大,滑坡易发性程度越高(表 1、图 4(g))。

表 1 滑坡影响因子与滑坡空间关系统计

Tab. 1 The statistics of the influencing factors and landslide spatial relations

影响因子	二级因子 (影响因子分级)	二级因子 栅格数	占研究区总栅 格数比例/%	二级因子内滑 坡面积栅格数	占研究区总滑坡面 积栅格数比例/%	FR 值	$W_i^+$ 值	$W_i^-$ 值	$W_{fi}$ 值
高程/m	<3500	533 843	19. 25	40 346	36. 35	1. 89	0. 67	-0. 25	0. 92
	3500 ~ 4000	807 070	29. 10	52 855	47. 62	1. 64	0. 52	-0. 31	0. 83
	4000 ~ 4500	682 469	24. 60	12 192	10. 99	0. 45	-0. 83	0. 17	-1. 00
	4500 ~ 5000	515 446	18. 58	4611	4. 15	0. 22	-1. 53	0. 17	-1. 70
	> 5000	234 973	8. 47	979	0. 88	0. 10	-2. 30	0. 08	-2. 38
坡度/(°)	< 10	216 835	7. 81	1933	1. 74	0. 22	-1. 53	0. 07	-1. 60
	10 ~ 20	351 942	12. 67	19 643	17. 70	1. 40	0. 35	-0. 06	0. 41
	20 ~ 30	688 587	24. 79	40 530	36. 52	1. 47	0. 41	-0. 18	0. 58
	30 ~ 40	1 031 741	37. 14	34 320	30. 92	0. 83	-0. 19	0. 10	-0. 29
	> 40	488 572	17. 59	14 557	13. 12	0. 75	-0. 30	0. 06	-0. 36
坡向/(°)	Flat(0)	5931	0. 21	1	0	0. 00	-5. 51	0. 00	-5. 51
	N(0 ~ 22. 5, 337. 5 ~ 360)	274 623	9. 90	17 907	16. 13	1. 63	0. 52	-0. 07	0. 59
	NE(22. 5 ~ 67. 5)	314 893	11. 35	13 584	12. 24	1. 08	0. 08	-0. 01	0. 09
	E(67. 5 ~ 112. 5)	337 225	12. 16	9856	8. 88	0. 73	-0. 33	0. 04	-0. 36
	SE(112. 5 ~ 157. 5)	363 579	13. 11	13 489	12. 15	0. 93	-0. 08	0. 01	-0. 09
	S(157. 5 ~ 202. 5)	393 786	14. 20	14 067	12. 67	0. 89	-0. 12	0. 02	-0. 14
	SW(202. 5 ~ 247. 5)	378 412	13. 64	9842	8. 87	0. 65	-0. 45	0. 06	-0. 50
	W(247. 5 ~ 292. 5)	365 753	13. 19	16 140	14. 54	1. 10	0. 10	-0. 02	0. 12
平面曲率	NW(292. 5 ~ 337. 5)	339 599	12. 24	16 097	14. 50	1. 18	0. 18	-0. 03	0. 20
	凹坡	1297 272	46. 72	51 831	46. 70	1. 00	0. 00	0. 00	0. 00
	平坦	179 166	6. 45	5664	5. 11	0. 79	-0. 24	0. 01	-0. 26
工程地质岩组*	凸坡	1300 454	46. 83	53 488	48. 19	1. 03	0. 03	-0. 03	0. 06
	岩组 1	309 863	11. 16	14 257	12. 85	1. 15	0. 15	-0. 02	0. 17
	岩组 2	561 609	20. 22	32 491	29. 28	1. 45	0. 39	-0. 13	0. 51
	岩组 3	384 343	13. 84	27 197	24. 51	1. 77	0. 60	-0. 14	0. 74
	岩组 4	34 929	1. 26	2476	2. 23	1. 77	0. 61	-0. 01	0. 62
	岩组 5	1285 163	46. 27	29 805	26. 86	0. 58	-0. 56	0. 32	-0. 89
	岩组 6	185 985	6. 70	3489	3. 14	0. 47	-0. 78	0. 04	-0. 82
距河流 距离 /m	岩组 7	15 527	0. 56	1268	1. 14	2. 04	0. 76	-0. 01	0. 77
	< 100	363 967	12. 17	9907	8. 93	0. 73	-0. 32	0. 04	-0. 36
	100 ~ 200	314 454	10. 51	13 797	12. 43	1. 18	0. 17	-0. 02	0. 20
	200 ~ 300	294 444	9. 84	14 360	12. 94	1. 32	0. 29	-0. 04	0. 32
	300 ~ 400	272 896	9. 12	13 452	12. 12	1. 33	0. 30	-0. 03	0. 33
	400 ~ 500	249 146	8. 33	11 960	10. 78	1. 29	0. 27	-0. 03	0. 30
	500 ~ 600	222 606	7. 44	10 123	9. 12	1. 23	0. 21	-0. 02	0. 23
	600 ~ 700	195 620	6. 54	8226	7. 41	1. 13	0. 13	-0. 01	0. 14
	700 ~ 800	168 188	5. 62	6877	6. 20	1. 10	0. 10	-0. 01	0. 11
	800 ~ 900	139 780	4. 67	5654	5. 09	1. 09	0. 09	0. 00	0. 09
	900 ~ 1000	115 295	3. 85	4482	4. 04	1. 05	0. 05	0. 00	0. 05
	> 1000	654 464	21. 88	12 145	10. 94	0. 50	-0. 71	0. 14	-0. 85

续上表

影响因子	二级因子 (影响因子分级)	二级因子 栅格数	占研究区总栅 格数比例/%	二级因子内滑 坡面积栅格数	占研究区总滑坡面 积栅格数比例/%	FR 值	$W_i^+$ 值	$W_i^-$ 值	$W_{fi}$ 值
距断裂 带距离 /m	<500	668 826	22.36	40 920	36.87	1.65	0.53	-0.21	0.74
	500~1000	450 707	15.06	19 774	17.82	1.18	0.17	-0.03	0.21
	1000~1500	349 941	11.70	17 616	15.87	1.36	0.32	-0.05	0.37
	1500~2000	271 927	9.09	10 448	9.41	1.04	0.04	0.00	0.04
	2000~2500	238 101	7.96	6615	5.96	0.75	-0.30	0.02	-0.32
	2500~3000	209 544	7.00	5625	5.07	0.72	-0.33	0.02	-0.36
	3000~3500	175 125	5.85	3690	3.32	0.57	-0.58	0.03	-0.61
	3500~4000	141 185	4.72	1582	1.43	0.30	-1.22	0.04	-1.26
	4000~4500	107 841	3.60	1709	1.54	0.43	-0.87	0.02	-0.89
	4500~5000	59 813	2.00	949	0.86	0.43	-0.87	0.01	-0.88
	>5000	318 817	10.66	2055	1.85	0.17	-1.78	0.10	-0.88
距道路 距离 /m	<100	316 535	11.40	18 277	16.47	1.44	0.39	-0.06	0.45
	100~200	260 496	9.38	16 295	14.68	1.57	0.47	-0.06	0.53
	200~300	213 011	7.67	13 080	11.79	1.54	0.45	-0.05	0.50
	300~400	177 212	6.38	10 192	9.18	1.44	0.38	-0.03	0.41
	400~500	146 977	5.29	7918	7.13	1.35	0.31	-0.02	0.33
	500~600	125 234	4.51	6300	5.68	1.26	0.24	-0.01	0.25
	600~700	109 515	3.94	5273	4.75	1.21	0.19	-0.01	0.20
	700~800	98 209	3.54	4536	4.09	1.16	0.15	-0.01	0.16
	800~900	89 746	3.23	3940	3.55	1.10	0.10	0.00	0.10
	900~1000	81 650	2.94	3317	2.99	1.02	0.02	0.00	0.02
	>1000	1 158 374	41.71	21 855	19.69	0.47	-0.77	0.34	-1.11
NDVI	<0	500 403	9.50	13 622	12.27	1.29	0.26	-0.03	0.29
	0~0.05	241 479	4.58	6945	6.26	1.37	0.32	-0.02	0.34
	0.05~0.1	377 705	7.17	9873	8.90	1.24	0.22	-0.02	0.24
	0.1~0.15	572 033	10.86	13 897	12.52	1.15	0.15	-0.02	0.17
	0.15~0.2	841 407	15.97	20 725	18.67	1.17	0.16	-0.03	0.19
	0.2~0.25	1 252 813	23.78	28 662	25.83	1.09	0.08	-0.03	0.11
	0.25~0.3	973 770	18.48	12 499	11.26	0.61	-0.50	0.09	-0.59
	>0.3	508 775	9.66	4760	4.29	0.44	-0.82	0.06	-0.88
年均 降雨量 /(mm/a)	<450	240 572	8.67	4047	3.65	0.42	-0.89	0.06	-0.95
	450~500	416 142	15.00	13 689	12.33	0.82	-0.20	0.03	-0.24
	500~550	904 293	32.60	55 259	49.79	1.53	0.45	-0.31	0.75
	>550	1 212 986	43.73	37 988	34.23	0.78	-0.25	0.16	-0.42

\*注:工程地质岩组划分见表2。

表2 研究区工程地质岩组分类表

Tab.2 Classification of engineering geological rock group

岩组序号	工程地质岩组	地层时代
岩组1	砂岩、泥岩夹灰岩、泥质灰岩	$T_3s$ 、 $K_1t$ 、 $K_2sm$
岩组2	灰岩、白云岩夹泥岩、千枚岩、板岩	$T_3j$ 、 $T_3jx$ 、 $T_3s$
岩组3	板岩、千枚岩与变质砂岩互层	$T_3j$ 、 $T_3jx$ 、 $T_3s$
岩组4	复砾岩、含砾砂岩夹细砂岩、粉砂岩	Rlb
岩组5	坚硬块状花岗岩、安山岩、闪长岩	$\gamma$ 、 $K_1\gamma\delta$ 、 $K_2\pi$ 、 $\eta$ 、 $\gamma\beta$ 、 $(J_3 - K_1)s$ 、 $K_2m$ 、 $E_2b$ 、 $E_2r$ 、 $E_2x$ 、 $E_2z$
岩组6	第四系松散堆积体	$Q^{apl}$ 、 $Q^{pl}$ 、 $Q^{el}$ 、 $Q^{dl}$
岩组7	断裂带碎裂岩	—



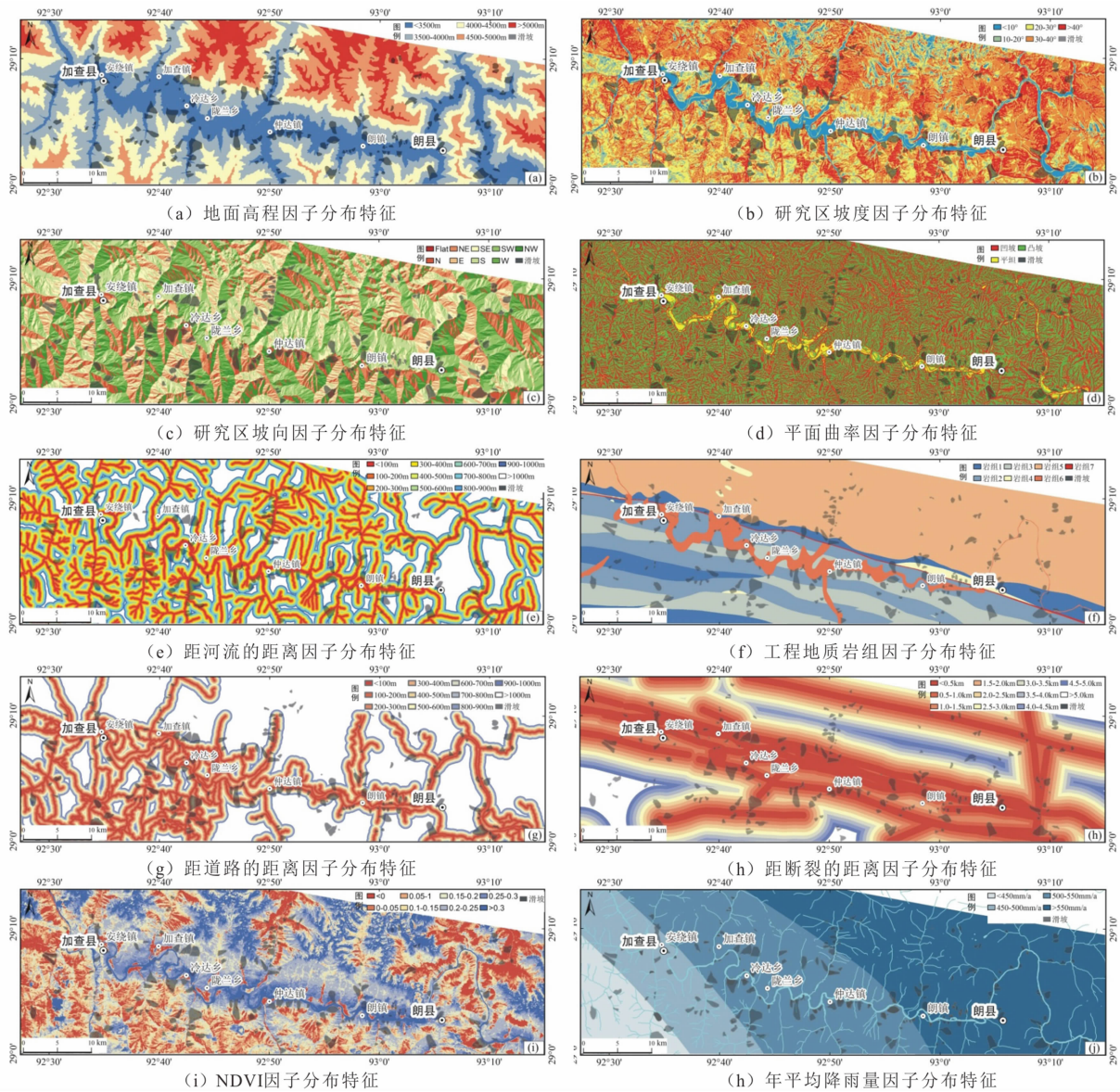


图3 研究区内各滑坡影响因素分级图

Fig. 3 Classification of landslide influencing factors in the study area

### 3.9 植被对滑坡的影响

地表植被覆盖影响着滑坡的发育和分布<sup>[19]</sup>,主要体现在植被的根茎对坡面具有一定的根固作用,有利于减缓坡面水流速度及下渗速度<sup>[20]</sup>。在地质灾害易发性评价中,多使用植被归一化指数(简称NDVI)进行地质灾害的敏感性分析,NDVI通常是采用ENVI软件对ETM遥感影像数据经过处理得到的,计算公式为:

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (4)$$

即:  $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$  (5)  
式中:IR/TM4表示近红外波段反射值,R/TM3表示红光波段反射值。

通过遥感影像分析计算,研究区内NDVI的取值范围为-0.54~0.62,本文将NDVI值划分为8个级别,分别是 $NDVI < 0$ 、 $0 \sim 0.05$ 、 $0.05 \sim 0.1$ 、 $0.1 \sim 0.15$ 、 $0.15 \sim 0.2$ 、 $0.2 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.3$ 和 $> 0.3$ (图3(i))。总体上,NDVI值较高的区域,滑坡的易发性程度较低(表1、图4(i))。

### 3.10 降雨对滑坡的影响

降雨是边坡失稳的主要诱发因素,降雨作用会明显削弱边坡的稳定性,从而诱发滑坡<sup>[21]</sup>。研究区内年平均降雨量值分布的范围为390~596 mm,将其划分为<450 mm、450~500 mm、500~550 mm、>550 mm等4个级别(表1)。从降雨量与滑坡灾

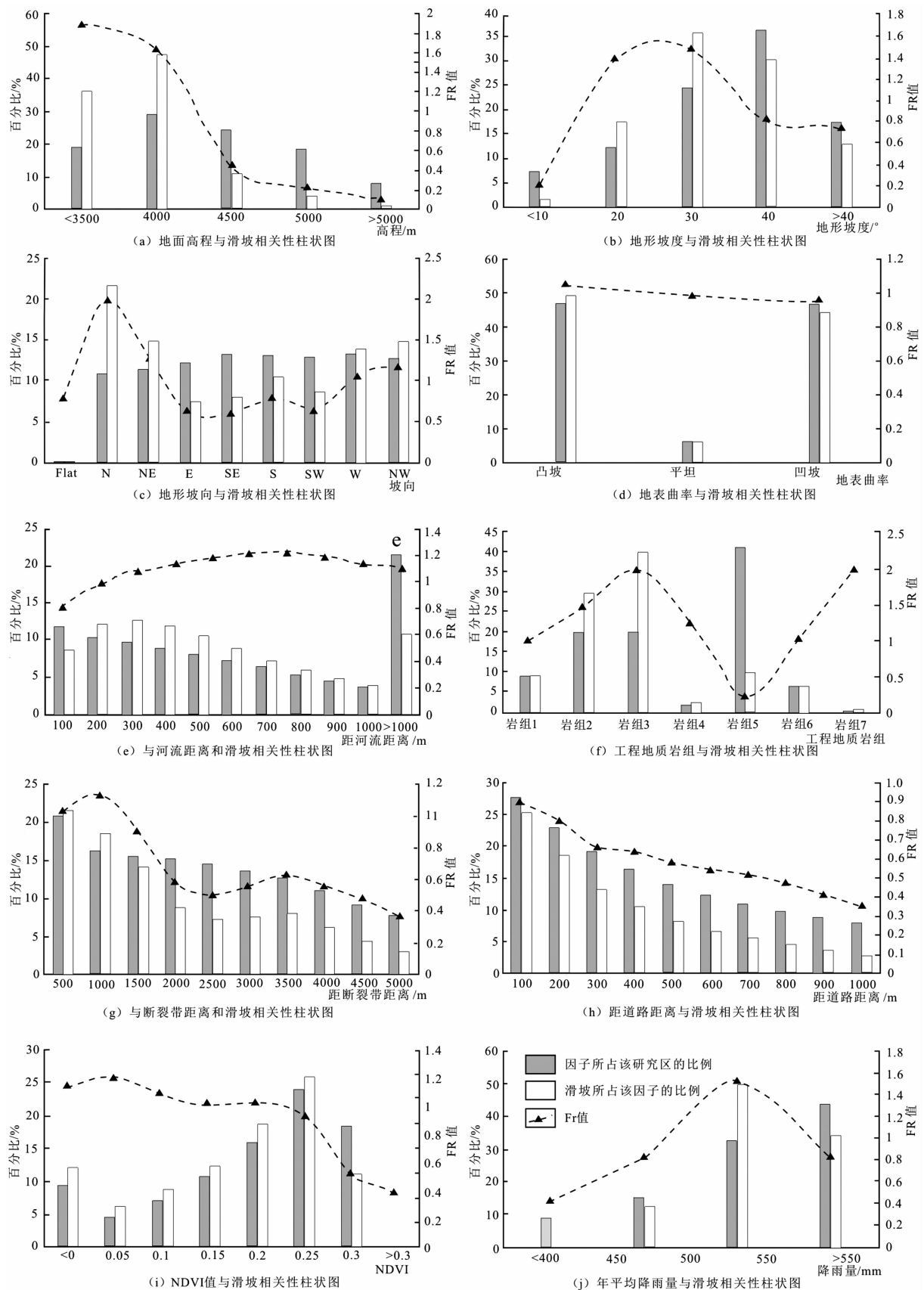


图4 滑坡影响因子与滑坡关系柱状图

Fig.4 The relationship between landslide and influencing factors



害分布相关性来看,降雨量越多,滑坡发育面积越大,年均降雨量为 500 ~ 550 mm 的区域内滑坡发育面积最大,也是最易引发滑坡的区域(图 3(j)、图 4(j))。这表明该研究区内降雨强度是引发滑坡的关键性因素。

4 滑坡易发性评价结果分析与检验

4.1 评价结果分析

根据滑坡易发性评价证据权重值计算公式(3),以及以上各影响因子的权重值计算结果,以  $W_{fi}$  作为因子权重,对加查至朗县段 10 个影响因子的权重进行叠加,得到滑坡易发性指数  $LSI$  (Landslide susceptibility index)。 $LSI$  计算公式见式(6),一般认为, $LSI$  值越大,该区域滑坡易发程度越高<sup>[6, 16, 18]</sup>。

$$LSI = \sum_{i=1}^n w_{fi} \tag{6}$$

式中, $i$  为高程、坡度、坡向等影响因子, $n$  为影响因子总数。

在本次研究中,将 10 个影响因子按照公式(6)

进行叠加,得到研究区内滑坡易发性评价指数  $LSI$  的取值范围为 -14.46 ~ 6.95,基于自然间断法将其分为 4 类,分别是极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区(图 5),分别占总面积的 17.43%、22.64%、32.21% 和 27.72%(表 3)。其中,极高易发区和高易发区内发育了目前已调查获取到的 88% 的滑坡,说明研究结果与已知滑坡的分布情况比较吻合,滑坡易发性划分具有较高的精度,极高易发区和高易发区主要分布在研究区西南部人类工程活动较多的区域,沿着雅鲁藏布江及其支流两岸呈带状分布,其中加查县的加查镇至仲达镇发生滑坡的概率最大,与野外调查结果一致,中、低易发区主要是分布在研究区东北部植被覆盖率比较高、人类工程活动相对较少的区域(图 5)。

4.2 评价结果检验

在滑坡易发性评价效果检验中,目前主要采用成功率曲线的验证方法<sup>[6, 18]</sup>。本文根据成功率曲线检验方法对滑坡易发性评价结果的要求,将易发性评价结果按照 1% 的面积间隔等分为 100 等份(图 6),分别求取各个级别内滑坡发生的百分比,构

表 3 加查至朗县段滑坡易发性统计

Tab. 3 The statistics of Landslide susceptibility

滑坡易发性等级	各等级内预测栅格数	各等级内预测栅格数占研究区总栅格百分比/%	实际滑坡面积栅格数	实际滑坡面积栅格数占研究区总栅格百分比/%
极高易发区	484104	17.43	73800	66.20
高易发区	628807	22.64	24124	21.64
中易发区	894606	32.21	9843	8.83
低易发区	770178	27.72	3723	3.33

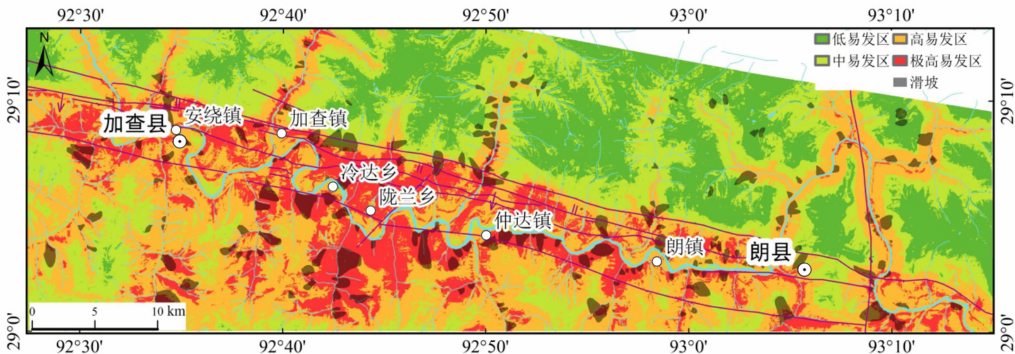


图 5 加查—朗县段滑坡易发性分区图

Fig. 5 The Landslide Susceptibility Zonal map along Jiacha County to Langxian County

建滑坡易发性面积百分比累计与实际滑坡面积百分比累计曲线,该曲线下的面积(简称 AUC)是很好衡量模型预测准确率的指标,其取值范围为 0.5~1,值越大表示模型判断力越强。本次评价结果的 AUC 曲线下的面积为 0.83,说明证据权滑坡评价模型的准确率为 83%,约有 87.8% 的滑坡发生在高易发区和极高易发区内,表明本次滑坡易发性评价结果具有较好的精度。

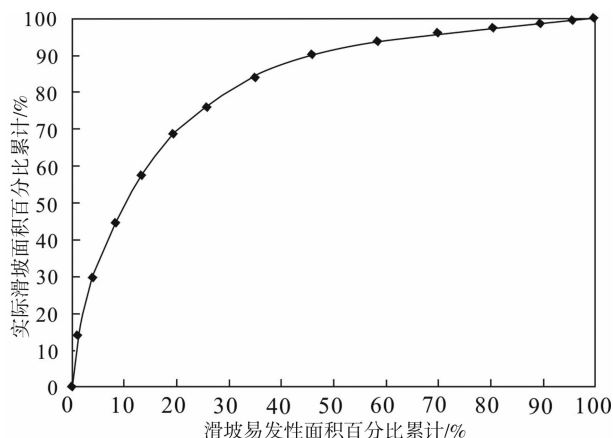


图6 滑坡易发性评价成功率曲线

Fig. 6 The success rate curve of landslide susceptibility evaluation

从铁路线路方案(图1)与滑坡易发性评价结果可见,铁路在不同路段仍穿越滑坡高易发区和极高易发区,并可能遇到日阿莫滑坡(图2(a))、古如朗杰滑坡(图2(b))等灾害隐患点,建议铁路在规划设计和施工过程中,优化地质选线,在滑坡灾害高易发和极高易发区内加强滑坡灾害调查、勘察和设计。

## 5 结论

本文在滑坡遥感解译和野外地质调查的基础上,建立了川藏铁路加查至朗县段的滑坡空间数据库,并分析了影响滑坡发育的10个主要影响因素,在 ArcGIS 平台上,采用证据权模型完成了研究区内滑坡易发性评价,得到了以下结论:

(1)川藏铁路加查至朗县段滑坡极为发育,共发育有224个滑坡,滑坡平面面积占研究区总面积的5.21%,滑坡灾害的发育已对研究区内的工程建设产生了重大危害和影响。

(2)研究区内滑坡主要发生在海拔4000 m以下、 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的斜坡中,滑坡主要沿着道路、河流、断

裂带呈带状分布,并且与道路、河流、断裂带的距离越近,滑坡发育的面积越大;滑坡容易发生滑坡 N、NE、W 和 NW 向斜坡中;在硬度较低的千枚岩、砂岩、碎裂岩区域滑坡易发性程度较高;滑坡主要发生在植被缺失或稀少的地方;滑坡的发生与降雨强度有很大关系。

(3)基于 GIS 平台,采用证据权模型,对滑坡影响因子进行空间分析和易发性评价,将研究区划分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区4类,分别占研究区总面积的17.43%、22.64%、32.21%和27.72%。其中,极高易发区和高易发区主要分布在研究区西南部人类工程活动较多的区域,沿雅鲁藏布江及其支流两岸呈带状分布,中、低易发区主要分布在研究区东北部植被覆盖率较高、人类工程活动相对较少的区域。

(4)采用成功率曲线的验证方法对评价结果进行检验,曲线下面积(AUC)达到了0.83,表明滑坡易发性评价结果具有较好的精度,并与现有滑坡的分布情况比较吻合,很好地反映了滑坡易发区分布特征,可以为该区重大工程规划建设和防灾减灾提供参考依据。

**致谢** 四川省地勘局九一五水文地质工程地质队侯利锋高工、侯军高工参加了部分野外地质调查工作;中铁二院工程集团有限责任公司张广泽教授级高工、杜宇本教授级高工和张敏高工等对本文进行了指导;中国地质科学院刘筱怡博士研究生、中国地质大学(北京)宿方睿硕士研究生等参加了部分野外地质调查和室内资料整理工作,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References)

- [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. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-451]
- [2] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 877-899. [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area [J]. Geoscience, 2017, 31(5): 877-899]
- [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. [ZHANG

- Yongshuang, SHI Jusong, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(2): 131–141]
- [4] 石菊松, 徐瑞春, 石玲, 等. 基于 RS 和 GIS 技术的清江隔河岩库区滑坡易发性评价与制图[J]. *地质前缘*, 2007, 14(6): 119–128. [SHI Jusong, XU Ruichong, SHI Ling, et al. ETM + imagery and GIS-based landslide susceptibility mapping for the regional area of Geheyan reservoir on the Qingjiang River[J] *China Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 119–128]
- [5] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S2): 3978–3985. [XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. Gis-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 3978–3985]
- [6] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 154–161. [TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 154–161]
- [7] LAN Hengxing, ZHOU Chenghu, WANG Lingjuan, et al. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China [J]. *Engineering Geology*, 2004, 76(1–2): 109–128.
- [8] TANGESTANI M H. A comparative study of Dempster-Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: an experience from Zagros Mountains, SW Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(1): 66–73.
- [9] LEE S, EANGELIST D G. Earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2006, (6): 687–695.
- [10] 周迪. 拉林铁路沿线崩塌地质灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011, 43–57. [ZHOU Di. Comprehensive assessment the risk of the geological disasters to railway from Linzhi to Lhasa [D] Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011, 43–57]
- [11] 杨宗富, 王新武, 龚淑云, 等. 西藏自治区朗县地质灾害调查与区划报告/西藏自治区加查县地质灾害调查与区划报告[R]. 深圳地质建设工程公司, 2004, 19–35. [YANG Zongfu, WANG Xinwu, GONG Shuyun, et al. Geological hazard survey and division report of Lang county, Tibet/ geological hazard survey and division report of Jiacha county, Tibet [R]. Shenzhen Geological Construction Engineering Company, 2004, 19–35]
- [12] 刘志飞, 王成善, 李祥辉. 西藏南部雅鲁藏布江缝合带的沉积——构造演化[J]. *同济大学学报*, 2000, 28(5): 537–541. [LIU Zhifei, WANG Chengshan, LI Xianghui. Sedimentary-tectonic evolution of the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet [J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(5): 537–541]
- [13] 吴新国, 贾建称, 崔邢涛. 雅鲁藏布江缝合带开合演化模式的探讨[J]. *现代地质*, 2005, 19(4): 488–494. [WU Xinguo, JIA Jiancheng, CUI Xingtao. Discussion on the model of evolution of open-close structure of the Yaluzangbu suture zone [J]. *Geoscience*, 2005, 19(4): 488–484]
- [14] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(3): 474–481. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence—a case study in Guizhou, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(3): 474–481]
- [15] 徐志文, 罗永忠. 三峡库区重庆市奉节县花乐村滑坡成因机制及稳定性分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 2002, 13(1): 29–33. [XU Zhiwen, LUO Yongzhong. The forming cause and the stability analyze of the landslide in huale village, Fengjie county, the city of Chongqing [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2002, 13(1): 29–33]
- [16] GUO Changbao, DAVID R. M., ZHANG Yongshuang, et al. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 93–110.
- [17] 郑明新. 滑坡泥石流与现代河流地质作用关系初探[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(4): 40–48. [ZHENG Mingxin. Rudimentary study on the relationship between landslides, debris flows and present geological processes of river [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5(4): 40–48]
- [18] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 660–676. [LIU Chunling, QI Shengwen, TONG Liqiang, et al. Great landslides in Himalaya mountain area and their occurrence with lithology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 660–676]
- [19] XU Chong, XU Xiwei, DAI Fuchu, et al. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region [J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(1): 97–120
- [20] 王文俊, 向喜琼, 黄润秋, 等. 区域崩塌滑坡的易发性评价——以四川省珙县为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(2): 31–38. [WANG Wenjun, XIANG Xiqiong, HUANG Ruiqiu, et al. Areal landslides susceptibility analysis – a case study in Hong county, Sichuan province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(2): 31–38]
- [21] 杨姗姗, 邓华锋, 黄坚, 等. 滑坡灾害与降雨关系研究[J]. *人民黄河*, 2010, 32(8): 128–130. [YANG Shanshan, DENG Huafeng, HUANG Jian, et al. Research of relativity between landslide and rainfall [J]. *Yellow River*, 2010, 32(8): 128–130]



## Landslide Susceptibility Assessment Based on WOE Model along Jiacha—Langxian County Section of Sichuan—Tibet Railway, China

GUO Changbao<sup>1, 2</sup>, TANG Jie<sup>3</sup>, WU Ruian<sup>1</sup>, REN Sanshao<sup>1</sup>

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

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment, Beijing 100081, China;*

3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*)

**Abstract:** The Jiacha to Lang County section of Sichuan—Tibet Railway is located in the southeast of Tibet, China, where the neotectonic activities are intense. Lots of large-huge scale landslides are distributed in the study area with complex geological structures and high frequent historical strong earthquakes. Based on remote sensing interpretation and field investigation, the landslides spatial database was established along Jiacha to Lang County section of Sichuan—Tibet Railway. Adopting the ArcGIS software and the Weight Of Evidence model (WOE), 10 impact factors were selected to evaluate landslide susceptibility, such as elevation, slope degree, slope aspect, planform curvature, lithology, distance to rivers, distance to fault zones, distance to roads, normalized difference vegetation index (NDVI) and annual average rainfall. According to the distribution characteristics of landslide susceptibility index (LSI) and field investigation results, the study area was classified into four zones with different landslide susceptibility level: landslide extremely high-prone area, landslide high-prone area, landslide moderate-prone area, and landslide low-prone area, and each level zonation accounted for 17.43%, 22.64%, 32.21% and 27.72% of the study area individually. The research result showed that the landslide extremely high-prone area and high prone-area were mainly distributed in the southwestern part of the study area with more human engineering activities along the Yarlung Zangbo River, and the landslide moderate-prone area and low-prone area were mainly distributed in the northeastern part with high vegetation coverage and less human engineering activities. The number of landslides in landslide extremely high-prone areas and high-prone areas accounted for about 88% of the total landslides that had been investigated and identified. The research results were in good agreement with the distribution of known landslides. The success rate curve (ROC) was used to check the evaluation results, and the accuracy rate reached 83%. The landslide susceptibility evaluation results obtained in this paper better reflect the distribution and development of landslides in the study area, which can provide theoretical guidance and references for the planning and construction of major project and disaster prevention and mitigation.

**Key words:** Sichuan-Tibet Railway; landslide; susceptibility assessment; geographic information system; weight of evidence model