中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

廖小平，徐风光，蔡旭东，周文皎，魏家旭

Development characteristics and susceptibality zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

LIAO Xiaoping, XU Fengguang, CAI Xudong, ZHOU Wenjiao, and WEI Jiaxu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-15

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146

基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析

Analysis of development characteristics of high-elevationchain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

李军, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 42-50

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

西藏波密茶隆隆巴曲高位地质灾害类型及发育特征

Types and development characteristics of high geological disasters in Chalonglongbaqu gully, Bomi , Tibet

张田田, 殷跃平, 李滨, 贺凯, 王猛, 赵超英, 刘晓杰　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 9-16

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-15

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

廖小平[1,2], 徐凤光[1], 蔡旭东[2], 周文皎[3], 魏家旭[4]
（1. 中铁科学研究院有限公司，四川 成都 610036；2. 福州大学环境与资源学院，福建 福州 350100；3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所，北京 100081；4. 云南省建设投资控股集团有限公司，云南 昆明 650000）

摘要: 针对香丽高速公路边坡地质灾害，在详细的道路工程勘察设计文件的基础上，结合现场踏勘调查，系统地研究了其边坡地质灾害的主要类型、发育特征和分布规律；提出高速公路等线性工程边坡灾害的基本地质条件、自然诱发因素、人类工程活动和灾害历史记录等完整信息评价指标。采用层次分析法、专家评分法与因素累积法相结合的研究方法，建立了线性工程边坡地质灾害易发性评价模型，并基于 GIS 平台完成了香丽高速公路边坡地质灾害的易发性区划。为指导香丽高速公路地质灾害的危险性评价及科学防治提供了重要依据，对类似山区道路等线性工程边坡地质灾害危险性评价研究与实践具有一定的示范作用和参考价值。

关键词: 高速公路；线性工程；边坡灾害；易发性评价；灾害区划
中图分类号: P694　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2021)05-0121-09

Development characteristics and susceptibality zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

LIAO Xiaoping[1,2]，XU Fengguang[1]，CAI Xudong[2]，ZHOU Wenjiao[3]，WEI Jiaxu[4]
（1. *China Railway Academy Co. Ltd.*, *Chengdu* , *Sichuan* 610036, *China*；2. *School of Environment and Resources*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* , *Fujian* 350100, *China*；3. *Railway Engineering Research Institute*, *China Academy of Railway Sciences Co. Ltd.*, *Beijing* 100081, *China*；4. *Yunnan Construction and Investment Holding Group Co. Ltd.*, *Kunming* , *Yunnan* 650000, *China*）

Abstract: Focus on theslope geological hazard of Xiangli expressway, systematic study was carried out to find the main types, development characteristics and distribution of slope geological hazards on the basis of detailed road engineering survey.A complete information evaluation index of linear engineering of expressway, including basic geological conditions, natural induced factors, human engineering activities and historical records of slope disasters, was put forward. The susceptibility evaluation model of slope geological hazards of linear engineering was established through the combination of Analytic Hierarchy Process (AHP), expert investigation method and factor accumulation method. The susceptibility zoning of the slope geological hazards in Xiangli expressway was completed, in terms of the GIS platform, which provided an important basis for the risk evaluation and scientific prevention of geological hazards in Xiangli expressway.This paper plays a certain demonstration role and provides reference for the research and practice of slope geological hazard assessment of linear engineering such as mountainious roads.

Keywords: expressway；linear engineering；slope hazards；susceptibility evaluation；hazard zoning

收稿日期: 2020-09-16; **修订日期:** 2020-09-22
基金项目: 红层地区线性工程穿越切割的地质体失稳机理和成灾模式项目 (2018YFC1504901); 香丽高速公路复杂边坡灾变特征及防治新技术研究项目(云交科教 2018-35)
第一作者: 廖小平 (1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事边坡防护加固工程、滑坡灾害整治工程的勘察设计、咨询评估和监测预警技术等方面的的科学研究与工程实践工作。E-mail: xiaoping.liao@126.com

0 引言

香丽高速公路起于香格里拉县城，止于大丽高速公路白汉场立交，全长 140 km。由于沿线工程地质条件复杂，生态环境脆弱，在工程建设过程中，受人工开挖卸荷、大气降雨等影响，边坡地质灾害将严重危害和威胁工程建设及运营安全，开展边坡地质灾害区划研究与应用具有十分重要的现实意义和学术价值。

目前，国内外关于地质灾害的区划研究已经较为普遍，最初大多是基于区域性的地质灾害区划研究，后来开始对重点公路区段内的边坡地质灾害风险评估进行研究。康钦勇以永川市实际地质灾害为依托，运用层次分析法，建立了永川市地质灾害易发程度分区评价指标体系[1]。宋世鑫[2]以陕西省定边县地质灾害工点为例，运用层次分析法建立易发性评价体系，并基于 GIS 系统，绘制了定边县区域内的地质灾害易发性分区图[2]。殷坤龙等[3]建立了滑坡灾害分区的信息分析系统，并结合重庆市的滑坡灾害进行了区划研究。聂忠权等[4]以大连市地质灾害工点为例，建立了一套基于 GIS 的地质灾害易发程度分区评价模型。1986 年交通部颁布《公路自然区划标准》(JTJ 003-86)，进行了一级和二级区划系统的划分，并编制了全国范围的区划图[5]。林灿阳等[6]基于山区高速公路边坡工程特点，从边坡易发性、危险性、易损性三个方面进行研究，并建立了相应的评价体系。张建伟等[7]根据大量运用高速公路边坡失稳特点，建立了一套运用高速公路边坡安全评价体系。彭小平等[8]以贵州省公路地质灾害为依托，利用 GIS 技术，进行了地质灾害危险性区划研究。齐洪亮等[9]采用因素叠加法，基于 GIS 软件，进行了中国公路地质灾害危险性区划。韦威[10]根据中国公路地质灾害的分布情况，对地质灾害影响因素进行了研究，采用专家打分法建立了分区综合评价模型。综上所述，目前对山区道路等线性工程的边坡地质灾害区划研究相对薄弱和滞后。

1 沿线地质概况

1.1 地形地貌

香丽高速公路位于青藏高原南东延横断山脉中段，属高海拔、高烈度和地质灾害高发区。沿线地貌主要有高原盆地地貌、构造剥蚀低中山地貌、河谷侵蚀深切高山峡谷地貌、构造侵蚀剥蚀中高山地貌。河谷多为“V”型，谷坡较陡，多为 30° ~ 50°。

1.2 地层岩性

沿线地层主要为第四系全新统坡残积层、冲洪积层、堆积层，更新统冰积层，三叠系中上统，二叠系中上统，泥盆系中上统，石炭系上统，等等。岩性以灰岩、板岩为主，局部揭露玄武岩和凝灰岩。

1.3 地质构造

场区构造复杂，断裂发育，新构造运动十分强烈，是我国大陆现今地壳构造运动最为强烈的地区。区内构造带为“歹”字型构造体系中的网状构造带和经向构造体系中的川滇南北向构造带，主要活动断裂带为大具-丽江断裂、丽江-剑川断裂、剑川-乔后断裂、中甸-龙蟠-乔后断裂、中甸断裂(含冲江河断裂、尼西断裂)等。

1.4 水文气象

香丽高速公路地处温带和寒温带季风气候区，年平均气温 5.4 ℃，年降雨量 618 ~ 960 mm，雨季大部分集中在 5—10 月，雨量充沛。

公路沿线河流密布，澜沧江、怒江、金沙江三江贯穿并流。以金沙江水系为主，金沙江一、二级支流水系较多，多成树枝状发育分布，总体上场区地表和地下水丰富。

2 边坡地质灾害

2.1 地质灾害类型

香丽高速公路沿线工程地质条件复杂，崩塌和滑坡等不良地质发育，第四系覆盖堆积厚度大，自然山体岩石破碎高陡，在降雨、地震、人类工程活动等作用下，沿线边坡地质灾害十分突出。根据详细的道路工程勘察、设计和施工文件等资料，结合工点现场调查及试验监测成果，统计共有 51 处较为严重的边坡地质灾害。其边坡地质灾害主要有滑坡和崩塌等两个基本类型，以及潜在不稳定斜坡变形体。由于不同成因、性质和规模的边坡工程地质灾害可能带来不同的危害程度和灾害后果，也必将采取不同的防护加固工程措施或者不同的整治工程对策。因此，本文又将边坡地质灾害细分为山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌、落石滚石、变形开裂等亚次类型(图 1)。其中山体滑坡 10 处，边坡滑坡 12 处，崩塌坍塌 17 处，落石滚石 5 处，高陡斜坡变形开裂 7 处。

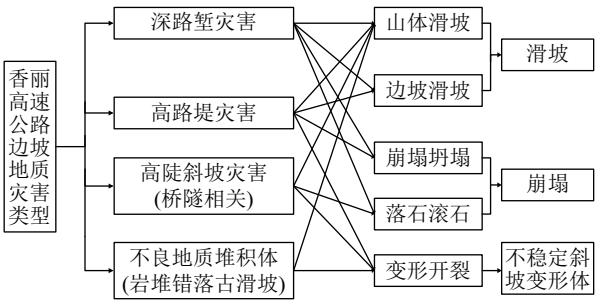

图 1 香丽高速公路边坡地质灾害类型

Fig. 1 Types of slope geological hazards in Xiangli expressway

2.2　地质灾害发育特征

（1）山体滑坡

山体滑坡占全线边坡地质灾害 19.6%，主要为沿不同时期或不同成因的堆积界面产生滑动的堆积层滑坡和在岩堆、错落和古老滑坡等堆积体的基础上产生滑动的不良地质堆积体滑坡两大类。

堆积层滑坡 4 处，自然斜坡多为 15° ~ 35°，较平缓，滑坡上部土体主要为含砾黏土、碎石土，土体松散、空隙大，遇水易软化，下伏三叠系中统板岩。受开挖卸荷和强降雨入渗影响，上部土体沿不同时期或不同成因的堆积界面产生滑动，坡脚剪出，后缘拉裂下错。

不良地质堆积体滑坡 6 处，受桥梁、隧道、路基等工程影响，在不良地质堆积体中前部穿越切割和强降雨入渗的作用下，沿堆积界面或老滑动面产生滑动，引起不良地质堆积体复活变形和破坏。典型工点有洼里别隧道进口滑坡、昌格洛隧道出口巨型滑坡、K92 老滑坡等。

（2）边坡滑坡

边坡滑坡占全线边坡地质灾害的 23.5%，主要指公路边坡范围内岩土体沿一定滑动面产生单级或多级滑动变形破坏。沿线边坡滑坡主要为沿顺倾土岩界面滑动的二元结构滑坡和沿沉积岩层面、变质岩似层面等产生顺层滑动的顺倾层状滑坡。

二元结构滑坡主要特征为边坡上覆土层、下伏基岩、土岩界面顺倾，在工程开挖卸荷和降雨入渗的作用下，边坡上部土体沿土岩界面产生单级或多级边坡变形破坏。顺倾层状滑坡主要表现为边坡岩土体受风化和构造作用，岩土体风化强烈，岩体破碎，节理裂隙发育，受开挖卸荷作用和降雨影响，沿顺倾的灰岩层面和板岩似层面等结构面产生顺层滑坡。

（3）崩塌（坍塌）

崩塌（坍塌）占全线边坡地质灾害 33.3%，为全线边坡地质灾害发生数量最多。沿线自然斜坡较陡，多为陡倾直线坡，土体松散，岩体破碎，节理裂隙发育。破碎岩石边坡在自然或人为卸荷作用下，因降雨入渗软化结构面，使其沿结构面滑移崩解，堆积在坡脚形成松散堆积体，即崩塌灾害；另一部分边坡在坡面一定松弛范围内，受降雨入渗影响，坡面发生逐步由外至内的坍塌变形，坍塌后坡面上部较陡，下部较缓，略带内凹弧形。

（4）落石（滚石）

落石（滚石）占全线边坡地质灾害 9.8%，相对较少。一方面主要发育在桥梁修筑过程中，桥墩位于自然陡坡附近，为保护桥墩，在山侧开挖边坡时，引起边坡附近的孤石滚落；另一方面，在山谷、河谷附近的自然坡体受爆破开挖施工影响，引起边坡一定范围内岩体松弛破碎和坡顶岩体松动，使岩石脱离母体沿坡面滚落至坡脚，但滚落岩石尺寸较小。

（5）变形开裂

变形开裂占全线边坡地质灾害 13.8%，主要发育在沿线桥梁墩台边缘高陡边坡和隧道洞口侧坡、仰坡，此类边坡高陡，岩体破碎，节理裂隙发育，在人类工程活动和降雨入渗的作用下，边坡顶部附近发生局部卸荷变形开裂。路基沉降等引起的路堤边坡变形开裂病害较少发生。

2.3　边坡地质灾害分布规律

（1）空间分布

香丽高速公路边坡地质灾害沿线分布相对集中，主要分布在 K15 ~ K20、K35 ~ K47、K83 ~ K108 等河谷两侧构造剥蚀缓倾、陡倾直线坡地段和洼里别隧道—金沙江开达古隧道河谷深切高山峡谷地段。其中，K15 ~ K20、K35 ~ K47 段主要为山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌；K83 ~ K108 段主要为落石滚石、崩塌坍塌及不良地质体复活引起的山体滑坡；洼里别隧道—金沙江开达古隧道高山峡谷地段主要为不良地质体复活引起的山体滑坡和隧道洞口侧坡、仰坡的变形开裂。

（2）时间分布

根据现场调查和边坡施工资料，沿线边坡地质灾害发生时间主要集中在雨季 (6—8 月)。受连续强降雨影响，沿线边坡松散土体和破碎岩体迅速从非饱和状态转为饱和状态，使坡体内岩土体抗剪强度大幅降低，极易诱发崩塌坍塌、边坡滑坡、不良地质体复活等边坡地质灾害。

3　边坡地质灾害易发性评价

文章提出的边坡地质灾害易发性评价是一种多指标综合评价方法，即根据边坡地质灾害类型、发育特征和分布规律，提出易发性评价指标，并将评价指标从定性到定量转化，再结合层次分析法、专家评分法和因素累积法，建立易发性评价模型。

3.1　评价因子分析与选择

高速公路等线性工程跨越了不同的地貌单元和地质环境，边坡地质灾害具有分布广、种类多、成因复杂的特点，是多种内在因素和外在因素共同作用导致的，影响易发性评价因素多而复杂。为提高边坡地质灾害易发性评价的科学性，减少主观性和随意性，本文在选取评价指标时，遵循系统性、主次性、独立性和可操作

性原则，从基本工程地质条件、自然诱发因素、人类工程活动和灾害历史等因素综合分析，提出基本地质条件为主控因素，大气降雨、地震作用、人类工程活动和灾害历史为附加因素，并选择了 11 个评价因子(图 2)。

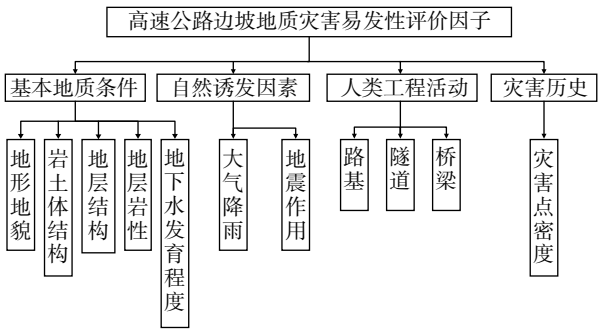

图 2　边坡地质灾害易发性评价因子树形结构图

Fig. 2　Tree diagrams of susceptibility evaluation factors for the slope geological hazards

3.2　评价因子细分与量化

根据前述评价因子，结合香丽高速公路沿线工程地质特点和山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌、落石滚石、变形开裂等 5 种边坡地质灾害特征，充分考虑评价因子的可操作性，参考国内外既有研究成果，基于专家评分法，将评价因子进行细分，并按 1 ~ 9 的标度进行量化，标度越大，易发性影响越大。

(1)基本地质条件

①地形地貌

按重力堆积和侵蚀剥蚀作用，将沿线地形地貌特征分为 18 种，并按不同边坡灾害类型对其量化，见表 1 和表 2。

表 1　重力堆积地形地貌易发性评价分值表

Table 1　Susceptibility evaluation scores of gravity accumulation topography and geomorphology

重力堆积地形地貌亚类细分	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
坡积裙	3	4	5	1	1
洪积扇	5	6	7	1	1
坡积台地	8	7	5	1	1
岩屑坡	4	5	6	9	6
岩堆	5	6	7	9	7
滑坡	9	9	9	1	1
泥石流	6	7	8	1	1
错落体	6	7	8	5	3

②地层岩性

地层岩性按其坚硬程度综合考虑分为土层、软岩、硬岩等 3 类，见表 3。

表 2　侵蚀剥蚀地形地貌易发性评价分值表

Table 2　Susceptibility evaluation scores of erosion topography and geomorphology

侵蚀剥蚀地形地貌亚类细分	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
平坦直线坡	1	1	1	1	1
缓倾直线坡	1	1	4	5	4
陡倾直线坡	1	4	7	9	7
凸形坡	1	2	4	5	2
凹形坡	4	7	9	7	6
台阶形坡	9	7	4	1	1
山顶	1	2	3	2	1
鞍部	4	3	3	4	4
洼地、谷地	1	1	1	1	1
陡崖	4	7	9	9	7

表 3　地层岩性评价分值

Table 3　Evaluation scores of formation lithology

地层岩性坚硬程度细分	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
土层	9	9	9	1	9
软岩	6	6	7	9	7
硬岩	2	2	3	5	2

③岩土体结构

岩土体结构主要考虑节理面、土岩界面、岩层层面、断层或软弱面等 4 类，按节理面发育程度和土岩界面、岩层层面、断层或软弱面与坡面的相互关系进行量化，见表 4、表 5、表 6、表 7。

表 4　节理发育程度评价分值

Table 4　Evaluation scores of joint growth level

节理发育程度	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
0条/10 m	0	0	0	0	0
1~2条/10 m	2	2	3	4	4
3~4条/10 m	4	4	6	7	7
≥5条/10 m	7	7	8	9	9

表 5　土岩界面评价分值

Table 5　Evaluation scores of soil-rock interfaces

土岩界面	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
顺倾(0° ~ 10°)	5	4	3	1	1
顺倾(10° ~ 35°)	9	8	7	1	1
顺倾(35° ~ 60°)	7	8	9	1	1
顺倾(60° ~ 90°)	4	7	9	1	1
反倾(0° ~ 90°)	1	1	1	1	1

表 6　岩层层面评价分值

Table 6　Evaluation scores of rock interfaces

岩层层面	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
顺倾(0° ~ 10°)	5	4	3	3	1
顺倾(10° ~ 35°)	9	8	7	7	2
顺倾(35° ~ 60°)	7	8	9	9	4
顺倾(60° ~ 90°)	4	6	8	8	8
反倾(60° ~ 90°)	5	7	9	9	9
反倾(35° ~ 60°)	2	4	8	8	8
反倾(10° ~ 35°)	1	1	1	1	4
反倾(0° ~ 10°)	1	1	2	2	2

表 7　断层或软弱面评价分值

Table 7　Evaluation score of fault or weak surface

断层或软弱面	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
顺倾(0° ~ 10°)	5	4	3	3	1
顺倾(10° ~ 35°)	9	8	7	7	2
顺倾(35° ~ 60°)	7	8	9	9	4
顺倾(60° ~ 90°)	4	7	9	8	8
反倾(0° ~ 90°)	1	1	1	1	1

④地层结构

边坡地层结构是指组成边坡地层的结构特征与组合规律。基于地勘钻孔及露头揭示覆盖土层 A、全至强风化岩层 B、弱至微风化岩层 C 的相对厚度及其组合关系，本文建立了 7 种地层结构模式，(图 3)。并根据不同灾害类型进行量化(表 8)。

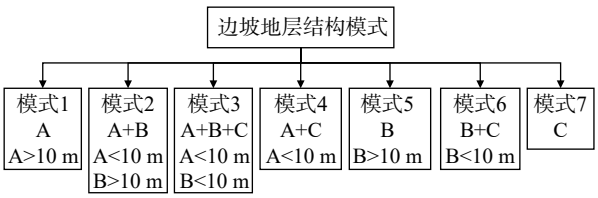

图 3　边坡地层结构模式分类图

Fig. 3　Classification of slope stratigraphic structure mode

⑤地下水发育程度

地下水发育程度评价根据不同地下水埋藏条件和发育程度分级量化，按类型取大值(表 9)。

(2)自然诱发因素

自然诱发因素主要考虑地震作用和大气降雨共 2 种，其中大气降雨主要考虑沿线地区最大日降雨量，地震按烈度考虑，地震对各种边坡地质灾害作用大小相同，见表 10、表 11。

表 8　岩层结构评价分值

Table 8　Evaluation scores of rock structure

边坡地层结构模式	不同边坡灾害类型评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
模式1	9	9	9	0	1
模式2	6	7	8	0	1
模式3	3	4	5	0	1
模式4	1	7	9	0	1
模式5	5	6	7	5	1
模式6	4	5	6	5	1
模式7	1	3	5	7	5

表 9　地下水发育程度评价分值

Table 9　Evaluation scores of groundwater development level

类型	发育程度	评价分值				
		山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
上层滞水	坡面干燥	1	1	1	1	1
	坡面潮湿	5	7	9	7	1
潜水	埋深>2 m	1	1	1	1	1
	埋深<2 m	4	5	2	1	1
	溢出泉	7	8	9	1	1
承压水	无承压水	1	1	1	1	1
	有承压水	7	5	2	1	1
	上升泉	9	5	2	1	1

表 10　地震作用评价分值

Table 10　Evaluation scores of seismic effect

地震作用(烈度)	≤Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	≥Ⅸ
评价分值	0	1	3	5	7	9

表 11　大气降雨评价分值

Table 11　Evaluation scores of rainfall

最大日降雨量/mm	评价分值				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
<5	0	0	0	0	0
5 ~ 25	1	1	1	1	1
25 ~ 50	2	3	5	3	2
50 ~ 100	5	6	7	6	5
100 ~ 200	6	7	8	7	6
>200	7	8	9	8	7

(3)人类工程活动

人类工程活动主要按线性工程特点进行细分，分为路基、桥隧、隧道，不同的工程对边坡地质灾害影响不同。本文将路基分为路堤和路堑，按不同填挖特征量化，桥梁主要按跨越的地貌特征量化，隧道穿越按相对位置量化 (表 12)。

表 12 人类工程活动评价分值

Table 12 Evaluation scores of human engineering activities

类型	发育程度	评价分值				
		山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
路堤	一般路堤	1	1	1	0	1
	高路堤	7	5	5	0	7
	软基路堤	5	7	7	0	9
	陡坡路堤	5	9	9	0	9
路堑	浅路堑	4	4	4	1	1
	深路堑	7	7	7	7	7
	超深路堑	9	9	9	7	9
桥梁(墩台)	一般斜坡	1	1	1	0	0
	陡坡	7	8	9	9	9
	不良地质	9	8	7	9	9
隧道	洞身	1	1	0	0	0
	洞口陡坡	7	8	9	9	9
	不良地质	9	9	9	9	9

(4)灾害历史

灾害历史是指高速公路等线性工程路线走廊带历史上曾发生的边坡地质灾害,按沿线每 km 走廊带发生的同类灾害点数计取(表 13)。

表 13 灾害点密度评价分值

Table 13 Evaluation scores of disaster point density

灾害点密度(个/km)	0	1	2	3	4	>4
评价分值	0	1	3	5	7	9

3.3 易发性评价模型

目前,用于边坡地质灾害易发性评价的主要方法有专家评分法、模糊评判法、神经网络法和层次分析法等。

本文根据前述 11 个评价因子,充分考虑评价因子相互逻辑关系及边坡地质灾害作用机理和影响程度,避免人为性、主观性、随意性。首先将评价因子分为基本地质条件主控因素,大气降雨、地震作用、人类工程活动和灾害历史为附加因素,各评价因素原则上相对独立。其中,灾害历史因素反映或体现其它因素的共同作用或综合作用效果,作为一种重要的附加因素是可行的,也是必要的。然后按前述 11 个评价因子的量化分值,对 5 类评价因素分别进行评价分值计算。其中基本地质条件和人类工程活动这两类评价因素采用层次分析法计算,其它三类评价因素为定量指标,直接按前述专家评分法赋值。本文的易发性评价是用于边坡地质灾害的灾势区划及其防治决策依据,不考虑防治工程等因素。

在边坡地质灾害易发性评价分析中,首先需要对各因素进行“归一化”处理,即各因素评分值分别除以最大标度 9,得到各因素的相对易发指数;然后将附加因素易发指数进行“1+x”换算,即换算为附加因素易发性增大系数;最后对主控因素和附加因素采用因素乘积法运算,本文称之为“因素累积法”,从而建立灾害易发性评价模型,如式(1)。

$$P=\frac{P_1}{9}\times\left(1+\frac{P_2}{9}\right)\times\left(1+\frac{P_3}{9}\right)\times\left(1+\frac{P_4}{9}\right)\times\left(1+\frac{P_5}{9}\right) \quad (1)$$

式中:P——边坡地质灾害易发指数;

P_1——基本地质条件评价分值;

P_2——人类工程活动评价分值;

P_3——大气降雨评价分值;

P_4——地震作用评价分值;

P_5——灾害历史评价分值。

“归一化”处理是把各因素评分值变为(0, 1)之间的小数,也可以理解为是把各因素变为无量纲表达式;“1+x”换算是为了把附加因素易发性增大系数控制在 1 ~ 2 倍,避免因单个附加因素评价分值为 0 或较低值而不合理地决定易发性指标的情况。“因素累积法”是基于风险评估中常用的“乘积法”,结合本文的“归一化”处理和“1+x”换算,既反映了主控因素的决定性和有效性(0, 1),又体现了附加因素的可控性和相对性(1, 2),从而保障边坡地质灾害易发性评价模型的科学性、客观性和准确性。

(1)基本地质条件评价

基地地质条件是边坡地质灾害发生的自有内在因素,包括地形地貌、地层岩性、地层结构、岩土体结构、地下水发育程度。不同因素对边坡地质灾害影响不同,同时对不同边坡地质灾害的作用大小也不相同,为确定基本地质条件下各评价因子对边坡地质灾害的作用大小,本文采用层次分析法,构建了基本地质条件评价的层次结构模型和判断矩阵。如表 14、表 15 为山体滑坡层次分析法判断矩阵,其他灾种类同。

表 14 山体滑坡基本地质条件层次分析法判断矩阵

Table 14 Judgment matrix in AHP for basic geological conditions of landslide

基本地质条件	地形地貌	地层岩性	地层结构	岩土结构	地下水
地形地貌	1	1/2	1/3	1/5	1/6
地层岩性	2	1	1/2	1/3	1/4
地层结构	3	2	1	1/2	1/3
岩土体结构	5	3	2	1	1/2
地下水	6	4	3	2	1

表 15　山体滑坡岩土体结构层次分析法判断矩阵

Table 15　Judgment matrix in AHP for rock-soil structure of landslide

岩土体结构	节理面	土岩界面	岩层层面	断层软层
节理面	1	1/3	1/4	1/5
土岩界面	3	1	1/2	1/3
岩层层面	4	2	1	1/2
断层软层	5	3	2	1

根据上述层次结构模型，结合香丽高速公路沿线边坡地质灾害发育特征，采用 AHP 软件构造了不同灾害类型的判断矩阵，并进行权重计算和一致性检验，基本地质条件数学计算模型如式(2)。

$$P_1 = \sum_{i=1}^{10} \alpha_i A_i \tag{2}$$

式中：P_1——基本地质条件评价分值；

α_i——因子权重系数；

A_i——具体评价因子分值，见表 16。

表 16　基本地质条件评价因子权重系数

Table 16　Weight coefficient of evaluation factor for basic geological conditions

评价因子	权重系数				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
地形地貌	0.055 8	0.057 8	0.042 4	0.042 8	0.054 8
节理发育	0.019 8	0.023 2	0.023 0	0.091 7	0.071 8
土岩界面	0.046 0	0.059 9	0.076 1	0.040 6	0.032 2
岩层层面	0.076 3	0.108 1	0.118 1	0.152 9	0.108 3
断层软层	0.126 4	0.114 0	0.123 8	0.163 1	0.143 0
地层岩性	0.096 0	0.090 3	0.081 4	0.098 2	0.115 3
地层结构	0.157 1	0.144 6	0.127 5	0.139 8	0.142 0
地下水	0.422 6	0.402 0	0.407 8	0.271 0	0.332 7

(2)人类工程活动评价

山区道路等线性工程修筑过程中，高填深挖、半挖半填、半桥半路、桥隧相连十分普遍，不同工程类型对边坡地质灾害诱发因素不同。一部分只与单一的工程活动相关，如挖方、填方、桥梁、隧道，一部分是几种工程活动共同作用引起的。本文采用层次分析法，构建人类工程活动的层次结构模型，结合香丽高速公路沿线边坡地质灾害发育特征，采用 AHP 软件构造了不同灾害类型的判断矩阵，并进行权重计算和一致性检验，人类工程活动数学计算模型如式(3)。

$$P_2 = \sum_{i=1}^{4} \alpha_i A_i \tag{3}$$

式中：P_2——人类工程活动评价分值；

α_i——因子权重系数；

A_i——具体评价因子分值，如表 17。

表 17　人类工程活动评价因子权重系数

Table 17　Weight coefficient of evaluation factor for human engineering activity

评价因子	权重系数				
	山体滑坡	边坡滑坡	崩塌坍塌	落石滚石	变形开裂
路堤	0.134 7	0.155 8	0.142 9	0.124 6	0.107 8
路堑	0.404 2	0.467 4	0.428 6	0.498 6	0.431 2
桥梁	0.163 8	0.137 3	0.142 9	0.137 3	0.163 8
隧道	0.297 3	0.239 5	0.285 7	0.239 5	0.297 3

4　公路边坡地质灾害易发性区划

在上述边坡地质灾害易发性评价模型基础上，依托 ArcGIS 平台，对香丽高速公路边坡地质灾害进行了易发性分级区划研究。

4.1　区划方法

(1)基础资料

根据上述建立的边坡地质灾害易发性评价数学模型，需要收集的主要基础资料有公路沿线地形图(包含线位、示坡线)、勘察设计及施工资料、现场调查、最大日降雨量数据和地震烈度等。

(2)单元划分

山区线性工程跨越了不同的地区、地形地貌单元、地质环境，为提高易发性区划的准确性和便捷性，根据已收集的基础资料，以公路沿线 500 m 长为一单元的分段原则(根据需要可以更长或更短)，对公路进行单元划分。

(3)因子评价

在 500 m 长一单元划分的基础上，结合基础资料，按边坡地质灾害易发性评价模型包含的评价因子，对每个单元的基本地质条件、大气降雨、地震作用、人类工程活动、灾害历史等 5 类指标进行赋值。

(4)图件处理

将公路带状地形图(包含线位、示坡线)导入 ArcGIS 软件，按 500 m 一单元的原则在图件上进行单元离散。

(5)易发性评价指数

根据上述建立的山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌、落石滚石、变形开裂 5 类灾害易发性评价模型，首先在 ArcGIS 软件建立计算模型，然后将 500 m 一单元的评价因子分值导入 ArcGIS 系统进行计算，即可得每单元不同灾种的易发性评价指数。

(6)易发性分级区划

根据计算得到的易发性评价指数结果,采用间断点法,对不同灾害进行易发性分级区划,最后利用 ArcGIS 空间叠加功能,将山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌、落石滚石、变形开裂易发性评价指数结果图进行叠加,即可得到全线边坡地质灾害易发性分级区划图。

4.2 区划成果

本文按上述建立的易发性评价模型和分级区划方法,对香丽高速 K0+560 ~ K48+900 段进行了边坡地质灾害区划研究。

根据不同边坡地质灾害易发性评价指数计算结果,采用间断点法,按 4 级分级划分。即:(0 ~ 4)为不易发区、[4 ~ 8)为低易发区、[8 ~ 12)为中易发区、[12 ~ 16)为高易发区。

基于 GIS 软件,按上述划分分值,得到了香丽高速边坡地质灾害易发性区划图,见图 6(受图件大小限制,以 K0+560 ~ K7+060 段为例展示)。

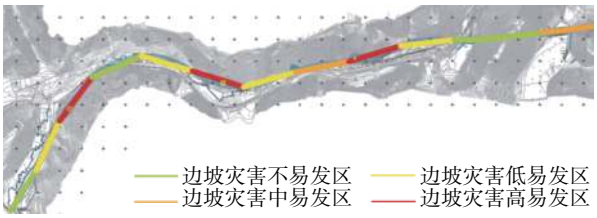

图 6 香丽高速公路 K0+560~K7+060 段边坡地质灾害易发性区划图
Fig. 6 Susceptibility zoning map of geological hazards at K0+560~K7+060 section of Xiangli expressway

根据上述区划图,为验证易发性评价模型、区划方法和结果的可靠性,本文将易发性区划图和现场调查的灾害工点分布进行了对比分析,得到已发生边坡地质灾害均位于易发性区划图的中易发区和高易发区,与现场调查结果基本吻合,统计结果见表 18。

表 18 香丽高速公路边坡地质灾害易发性分级区划结果
Table 18 Classification and regionalization results of geological hazard susceptibility on the slope of Xiangli expressway

危险性分区	不危险区	低危险区	中危险区	高危险区
区段长度/m	20 240	12 000	9 100	7 000
长度占比/%	41.9	24.8	18.8	14.5
山体滑坡/处	0	0	1	2
边坡滑坡/处	0	0	2	5
崩塌(坍塌)/处	0	0	0	9
落石(滚石)/处	0	0	0	0
变形开裂/处	0	0	1	0
合计/处	0	0	4	16
数量占比/%	0	0	20	80

4.3 风险管理

根据上述香丽高速公路边坡地质灾害易发性分区结果,建立不同分级风险管理,采取不同的风险对策,能有效减少和避免边坡地质灾害的发生。

例如,边坡灾害高易发区主要位于深和超深路堑开挖、不良地质体等段落,建议通过优化线路平纵断面设计,减少路堑边坡高度,绕避不良地质体,降低边坡灾害风险。并且提高边坡防护加固工程等级,列为重点监测预警区段。

边坡灾害中危险区主要位于陡坡路基、路堑开挖、隧道洞口等段落,建议加强边坡防护加固工程对策设计,严格控制施工工序,确保主体工程质量,并加强边坡安全监测预警。

边坡灾害低危险区主要位于软基和一般斜坡桥梁跨越段落,要求明确软基处理方案,控制桥梁墩台基础施工土石方开挖,及时进行边坡安全防护。

边坡灾害不危险区主要位于一般路基和隧道洞身段落,采用普通防护工程设计,正常施工和质量控制,正常运营养护。

5 结论

总结提出了香丽高速公路沿线山体滑坡、边坡滑坡、崩塌坍塌、落石滚石和变形开裂五类地质灾害及其发育特征和时空分布规律,基于基本工程地质条件、地质灾害诱发因素和灾害历史,提出了地形地貌、岩土体结构、地层岩性、地层结构、地下水发育程度、大气降雨、地震作用、路基、桥梁、隧道、灾害历史五类 11 个地质灾害易发性评价指标及其量化方法。根据评价因子相互逻辑关系及其对边坡地质灾害作用和影响程度,按评价因子量化分值对五类评价因素进行评价分值计算,通过评价因素归一化处理、主控因素与附加因素的因素累积法计算,建立了香丽高速公路边坡地质灾害易发性评价模型,依托 GIS 平台给出了香丽高速公路边坡地质灾害易发性区划图,与香丽高速公路边坡地质灾害实际基本吻合。可为类似山区道路等线性工程提供一种实用的边坡地质灾害危险性评价方法。

参考文献(References):

[1] 康钦容. 地质灾害区划及管理信息系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007. [KANG Qinrong. Study on zoning of geological hazard and manage information system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese with English abstract)]

[2] 宋世鑫. 基于GIS的定边县地质灾害易发性评价[D]. 西

安：长安大学，2015.［SONG Shixin. The evaluation of the emergence about geological disaster in Dingbian County based on GIS[D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese with English abstract)］

［3］ 殷坤龙，柳源. 滑坡灾害区划系统研究［J］. 中国地质灾害与防治学报，2000, 11(4)：28－32.［YIN Kunlong, LIU Yuan. Systematic studies on landslide hazard zonation［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(4)：28－32.（in Chinese with English abstract）］

［4］ 聂忠权，盛丽君，范文. 基于GIS技术的地质灾害易发程度分区评价系统［J］. 公路交通科技，2005, 22(增刊1)：156－159.［NIE Zhongquan, SHENG Lijun, FAN Wen. The distriction and assessment system of geologic disaster occurrence level based on geographic information system-taken Dalian for example［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(Sup 1)：156－159.（in Chinese with English abstract）］

［5］ 中华人民共和国交通部. 公路自然区划标准：JTJ 003—1986[S]. 北京：中国标准出版社，1987.［Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard of climatic zoning for highway: JTJ 003 —1986[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)］

［6］ 林灿阳，廖小平. 高速公路边坡灾害评估与防控决策研究［J］. 路基工程，2014(5)：72－76.［LIN Canyang, LIAO Xiaoping. Study on disaster evaluation for highway slope and the countermeasures of control［J］. Subgrade Engineering, 2014(5)：72－76.（in Chinese with English abstract）］

［7］ 张建伟，廖小平，魏土荣. 高速公路运营期高边坡安全风险评估体系研究［J］. 路基工程，2015(6)：197－203.［ZHANG Jianwei, LIAO Xiaoping, WEI Turong. Study on safety risk assessment system for high slope of highway in operation［J］. Subgrade Engineering, 2015(6)：197－203.（in Chinese with English abstract）］

［8］ 彭小平，陈开圣，王成华，等. 贵州省公路地质灾害基本特征及危险性分区［J］. 中国地质灾害与防治学报，2009, 20(2)：46－51.［PENG Xiaoping, CHEN Kaisheng, WANG Chenghua, et al. Basic characteristics and risk zoning of highway geological hazard in Guizhou Province［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2)：46－51.（in Chinese with English abstract）］

［9］ 齐洪亮，尹超，田伟平，等. 基于ArcGIS的中国公路地质灾害危险性区划［J］. 长安大学学报(自然科学版)，2015, 35(5)：22－27.［QI Hongliang, YIN Chao, TIAN Weiping, et al. Risk regionalization of highway geo-hazards in China based on ArcGIS［J］. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(5)：22－27.（in Chinese with English abstract）］

［10］ 韦威. 基于GIS的公路地质灾害分区研究[D]. 西安：长安大学，2008.［WEI Wei. Research on the regionalization of highway geological disasters based on GIS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese with English abstract)］