

青海省河湟谷地地质灾害易发性评价

赵东亮^{1,2}, 兰措卓玛^{1,2}, 侯光良^{1,2}, 许长军^{3,4}, 李万志⁵
ZHAO Dongliang^{1,2}, LANCUO Zhuoma^{1,2}, HOU Guangliang^{1,2}, XU Changjun^{3,4}, LI Wanzhi⁵

1. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008;

2. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008;

3. 青海省地理空间信息技术与应用重点实验室, 青海 西宁 810008;

4. 青海省地理信息中心, 青海 西宁 810008;

5. 青海省气候中心, 青海 西宁 810008
1. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China;

2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, Qinghai, China;

3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Xining 810008, Qinghai, China;

4. Geographic Information Center of Qinghai Province, Xining 810008, Qinghai, China;

5. Qinghai Climate Center, Xining 810008, Qinghai, China

ZHAO D L, LANCUO Z M, HOU G L, et al., 2021. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 83-95. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.009

Abstract: The Yellow River and Huangshui Valley, located at the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau, are prone to geological disasters due to violent geological activities, large elevation difference and strong hydraulic power. In order to clarify the zoning of susceptibility of geological disasters in this area, an assessment index system is built by selecting factors such as geomorphology, slope, slope height, vegetation, lithology, rainfall, distance from faults, rivers and roads, using the information model to calculate the susceptibility index of collapse, landslide, debris flow and comprehensive geological disasters. The susceptibility of geological disasters in the study area can be divided into five grades: extremely high, high, medium, low and extremely low. The result shows that the extremely high susceptible areas are mainly in the valley areas, accounting for 2.03%, including the middle and lower reaches of the Yellow River and the Huangshui River in Guide county, Huangzhong county and Ledu county. The high susceptible areas are mainly in the areas on small and moderately undulating mountain basins, accounting for 21.2%. The medium susceptible area are mainly in the moderately undulating mountain areas, accounting for 23.45%, which belong to the transition areas of high and low susceptible areas. The low susceptible areas are mainly in moderately and sharply undulating mountain areas, accounting for 42.1%. The extremely low susceptible areas are mainly on the mountains such as the Lenglong mountain, Laji mountain and Xiqing mountain, accounting for 11.23%. The research result is of great significance to the disaster prevention and reduction in the Hehuang Valley and to the sustainable development of society.

Key words: geological disasters; susceptibility; Hehuang Valley; information model; assessment

基金项目: 青海省地理空间信息技术与应用重点实验室基金 (2019-002)
第一作者简介: 赵东亮 (1995-), 男, 在读硕士, 主要从事灾害风险评价研究. E-mail: zdl19950604@163.com
通讯作者: 兰措卓玛 (1980-), 女, 博士, 主要从事环境变化与人类活动、灾害风险评价研究. E-mail: lczm1980@163.com
收稿日期: 2020-02-22; **修回日期:** 2020-04-03; **责任编辑:** 范二平
引用格式: 赵东亮, 兰措卓玛, 侯光良, 等, 2021. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 83-95. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.009

摘要:地处青藏高原东北缘的黄河与湟水谷地, 由于剧烈的地质活动、较大高差与强烈水力作用等, 使得地质灾害非常频繁, 为明确该区域的地灾易发性区划, 选取地貌、坡度、坡高、植被、岩性、降雨量和距断层、距河流、距道路等因子构建评价指标体系, 采用信息量模型计算崩塌、滑坡、泥石流及其综合地质灾害易发性指数, 将研究区地质灾害易发性划分为极高、高、中、低、极低五级易发区。结果表明: 极高易发区主要位于河谷地区, 占 2.03%, 包括贵德县、湟中县、乐都县的黄河及湟水等河流中下游地区; 高易发区主要位于中小起伏山间盆地地区, 占 21.2%; 中易发区主要位于中起伏山地地区, 占 23.45%, 属于高、低易发区的过渡区域; 低易发区主要位于大中起伏山地地区, 占 42.1%; 极低易发区主要位于冷龙岭、拉脊山、西倾山等山地, 占 11.23%。研究结果对河湟谷地的防灾减灾及社会可持续发展意义重大。

关键词: 地质灾害; 易发性; 河湟谷地; 信息量模型; 评价

中图分类号: X43; P694 **文献标识码:** A

0 引言

青藏高原内动力作用强烈, 是现今中国境内地质构造最为活跃的地区, 也是崩塌、滑坡、泥石流地质灾害 (以下简称崩滑流地灾) 高发区, 尤其是湟水河流域 (崔鹏等, 2015)。地处青藏高原东北缘的黄河与湟水谷地 (简称河湟谷地), 是高原上人口、城镇、经济活动最为密集的区域 (沈镭和姚建华, 1995)。该区占青海省 72.77% 的人口和 60% 的耕地 (青海省统计局, 2016), 且人口和经济高度集聚在地灾频发的河谷洪积-冲积平原, 严重威胁该地区生命财产安全和工程建设。以往对该区域地质灾害易发性的研究仅限于小流域尺度的单体地质灾害 (徐媛, 2013; 魏刚等, 2013; 刘玄, 2014; 寇丽娜等, 2017; 郭邦梅和权开兄, 2019), 缺乏该区地质灾害易发性综合评价, 尚未从宏观层面掌握崩塌、滑坡、泥石流易发性区划与综合易发区之间的联系; 此外, 还普遍存在评价指标较少与人工勾画易发区导致误差较大等问题。因此, 开展该区崩滑流地灾综合研究有助于更全面地服务于区域防灾减灾及社会可持续发展 (葛全胜等, 2008)。

目前地质灾害评价的方法较多且没有形成统一的评价标准 (张春山等, 2008), 常用的方法有 AHP 法 (刘洋等, 2013; 倪晓娇和南颖, 2014)、信息量模型 (范林峰等, 2012; 袁湘秦等, 2017; 张向营等, 2018; 周静静等, 2019)、逻辑回归模型 (唐川和马国超, 2015)、熵值法 (魏章进等, 2017; 吴博等, 2018) 等。其中, 信息量模型可以较好地避免主观判断, 使得评价结果客观合理,

并且该模型的计算精度略高于逻辑回归模型, 步骤简单易行 (廖丽萍等, 2019), 但信息量模型并未考虑各影响因子所占权重。鉴于此, 本文引入熵值法确定各因子权重, 以河湟谷地 15 个县 (市) 为研究对象, 将信息量模型和熵值法相结合, 通过评价崩滑流地灾易发性区划, 最终集成该区域的综合易发性区划, 希冀为该区域地质灾害的防治提供参考。

1 研究区概况

1.1 孕灾环境概述

河湟谷地位于青藏高原东北缘 (35.01°~37.87°N; 100.38°~103.07°E), 海拔 1658~5197 m, 该区北枕冷龙岭, 西靠日月山, 南依西倾山, 东至甘青交界, 地处青藏高原与黄土高原连接处, 东部季风区与西北干旱区过渡区 (贾鑫等, 2019) (图 1)。其行政单元包括西宁市 (西宁市区、大通县、湟中县、湟源县)、海东市 (平安区、乐都县、民和县、互助县、化隆县、循化县)、海北州的门源县和海晏县、黄南州的同仁县与尖扎县以及海南州的贵德县等 15 个县 (市), 辖 222 个乡镇, 土地面积近 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

区内地层岩性复杂, 基岩主要为白垩系粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩等易滑岩层, 新生界第三系红土和第四系黄土典型发育, 地质构造属祁连褶皱系的一部分 (张忠孝, 2004), 褶皱断裂主要呈北西—南东向展布。区内新构造运动强烈, 主要表现为区域性地壳不均匀抬升、重力滑塌及地震等。地势自西北向东南逐渐降低, 北东—南西向岭谷相间分布, 呈典型的河流盆地地貌。该区地

貌形态以大中起伏山地为主 (占研究区 60.9%), 其间以拉脊山为分水岭, 以北为湟水谷地, 以南

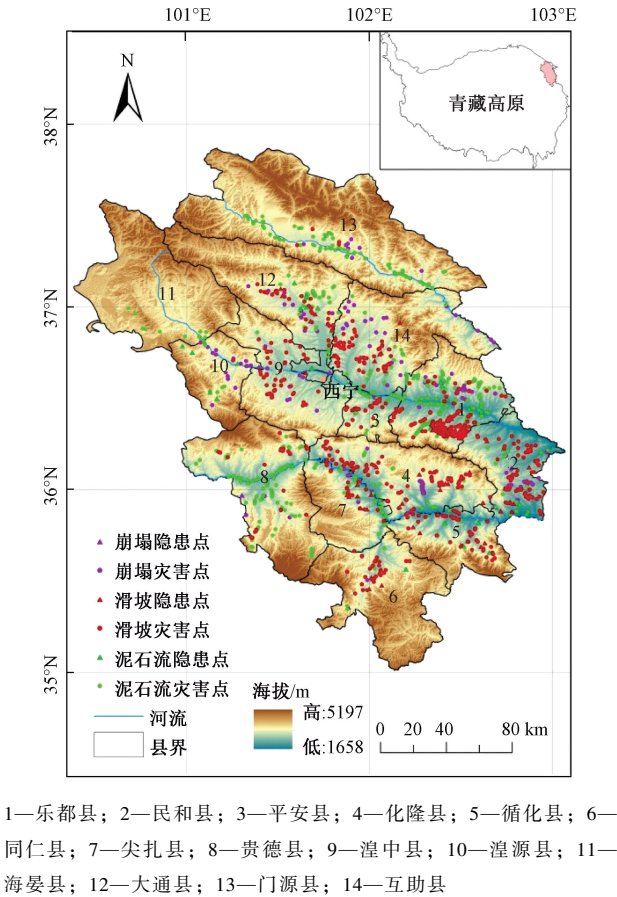


图 1 研究区灾害分布图

Fig. 1 Disaster distribution map of the study area

为黄河谷地 (董治平等, 1992)。区内降水量季节分配极不均衡且降水强度大 (张忠孝, 2004), 由于河流沿岸岩体破碎, 受暴雨侵蚀后极易形成崩塌滑灾害, 也为泥石流的发生提供了丰富的物源。因此, 地质灾害在各支沟广泛发育。

上述岩性、地形、气候等条件都为地质灾害的发育提供了必要的孕灾环境, 高发的地质灾害严重制约区内社会经济可持续发展。

1.2 地质灾害分布特征

该区地质灾害主要以滑坡、泥石流和崩塌为主, 其中滑坡主要为大型、特大型, 泥石流和崩塌以中小型居多。泥石流主要沿河流两岸发育, 滑坡和崩塌主要分布在山缘地带。2017 年, 区内共发育地质灾害隐患点 98 处, 威胁 45217 人的生命财产安全; 历史灾害点 1257 处, 其中以滑坡居多 (占地灾总量 45.3%), 其次为泥石流、崩塌 (分别占 42.6%, 12.2%; 表 1)。区内各县 (市、区) 地质灾害点以乐都县 (349 处) 最为严重; 隐患点以大通县 (20 处) 最多 (表 2)。

表 1 河湟谷地地质灾害类型统计

Table 1 Statistics of geological disaster types in the Hehuang Valley

类别	灾害点/处	百分比/%	隐患点/处	百分比/%
崩塌	153	12.2	4	4.1
滑坡	569	45.3	61	62.2
泥石流	535	42.6	33	33.7
合计	1257	100.0	98	100.0

表 2 2017 年河湟谷地各县 (市、区) 地质灾害点、隐患点及威胁人数统计

Table 2 Statistics on the number of geological disaster sites, hidden dangers and people at risk in the Hehuang Valley (2017)

县 (市)	崩塌 隐患点/处	滑坡 隐患点/处	泥石流 隐患点/处	崩塌 灾害点/处	滑坡 灾害点/处	泥石流 灾害点/处	崩塌威胁 人数/人	滑坡威胁 人数/人	泥石流威胁 人数/人
西宁市	1	1	2	0	0	0	0	915	13322
大通县	0	14	6	14	31	50	0	3797	1079
湟中县	0	2	0	8	42	2	0	340	0
湟源县	1	0	5	15	2	7	103	0	1177
平安区	0	0	1	1	35	23	0	0	150
民和县	0	7	4	18	70	14	0	1504	3364
乐都县	0	8	7	31	142	176	0	1152	1260
互助县	0	0	0	24	53	21	0	0	0
化隆县	0	12	0	18	80	20	0	2491	0
循化县	0	4	9	0	44	5	0	1017	4550
门源县	0	0	0	11	4	71	0	0	0
海晏县	0	0	0	1	0	12	0	0	0
同仁县	1	5	2	1	27	11	100	3570	1173
尖扎县	0	8	0	8	15	25	0	2023	0
贵德县	1	0	1	3	24	98	2000	0	130
合计	4	61	37	153	569	535	2203	16809	26205

2 研究数据与评价方法

2.1 数据来源与处理

研究使用的数据主要有影响因子数据、地质灾害数据、基础数据。

(1) 影响因子数据: 90 m 分辨率 DEM 数据、中国 1:250000 一级、三级、四级和五级河流分级数据集来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn>); 中国 1:1000000 植被类型空间分布数据 (1971—2000 年)、青海省 1:500000 地质图、中国 1:4000000 地貌图及青海省各级道路图来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>); 多年平均降雨量数据 (1971—2000 年) 来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://www.data.ac.cn>); 断层数据为全新世活动断层, 来源于董治平等 (1992) 研究成果。

(2) 地质灾害数据: 历史地质灾害数据 (1:100000) 来源于青海省地质环境监测总站; 省级重大地质灾害隐患点数据来源于青海省自然资源厅 (<http://zrzyt.qinghai.gov.cn>)。

(3) 基础数据: 人口数据来源于 2010 年国家统计局第六次人口普查结果; 青海省 1:250000 分县数字化行政区划图来自国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn>)。

在进行崩滑流地灾评价之前对部分数据进行了预处理工作。首先将不同比例尺的 DEM、降水等数据重采样成 100 m 分辨率。需要注意的是, 由于部分数据难以提高空间分辨率, 在评价结果中会存在一定误差, 例如根据气象站点将多年平均降雨量数据进行空间插值后, 其精度可能还是存在一定误差。其次, 对于点或者线数据, 按照地理坐标在 GIS 中进行矢量化, 例如将隐患点、人口数据以及活动断层数据通过已有调查报告、统计数据、图件等经矢量化而获得。

2.2 崩滑流地灾的影响因子

地质灾害的爆发是在一定的孕灾环境中, 通过诱发因子触控后引发的, 是内外部因子、自然与人为因子、主控与影响因子共同作用的结果。将地质灾害发生的影响因子归为孕灾因子和诱灾因子两类: 孕灾因子由地貌、高程、坡度、坡高、植被、岩性和距构造断层距离组成, 而诱灾因子为多年平均降

雨量、距河流、道路 (主线与支线) 距离 (图 2)。

2.2.1 孕灾因子

(1) 地貌

地貌是地灾发生的控制条件 (熊昌利等, 2012)。区内地貌类型以高海拔大起伏山地为主 (占研究区 35.5%), 但地灾主要发生在中高海拔中起伏山地 (占地灾总量 45.4%), 原因是这里侵蚀沟谷较为发育, 人类活动干扰强度大, 而高海拔大起伏山地虽然存在良好的孕灾地形且面积广阔, 但因其海拔高, 人类活动干扰少, 对地质环境的影响较小, 因此地灾发生频率较低。

(2) 高程

地灾通常多发生在特定的海拔高度范围内。经高程分区后, 发现地灾集中分布在高程为 2400~2800 m 与 2000~2400 m 区间 (分别占 49.4%, 30.7%), 而这里也是人类活动密集区, 从而成为地灾频发区。

(3) 坡度

坡度是影响边坡滑动力的重要因素之一 (Dai et al., 2001; 孙艳萍等, 2018), 也是地灾的启动因素 (李郎平等, 2017), 坡度的增加会使应力卸荷带增大, 增加坡脚应力, 但并非与地灾的发生成线性关系, 较高的坡度并不利于地灾物源的堆积 (杨志华等, 2018), 在研究中, 地灾大都发生在 $<15^\circ$ 的区域 (占 74.3%), 主要原因是大量缓坡被开垦成梯田, 对地表改造强烈。

(4) 坡高

坡高是单位面积内最高点与最低点的高差 (程维明等, 2009), 反映地表起伏状况及其破碎程度。坡体内应力随坡高增大而增大, 斜坡稳定性降低。因此, 和坡度一样, 坡高被认为是引发地灾的重要因素之一 (刘洋等, 2013)。研究区大部分地灾集中在坡高 <100 m 的区域 (占 92.6%)。

(5) 植被

不同植被类型的水土保持、固坡能力不同, 且孕育不同的典型灾害, 例如地灾在灌丛、农业植被中较易发生 (曾令科等, 2010)。区内温带草原、灌丛、栽培植被的地灾占比最高 (分别占灾点总量 63.4%, 13.2%, 10%), 栽培植被分布在河谷沿岸, 其外围缓坡上依次广布温带草原、灌丛, 而在海拔较高、人类干扰较低的高寒草甸草原地灾基本不发育。

(6) 岩性

岩土体性质影响斜坡稳定性, 是地灾发生的

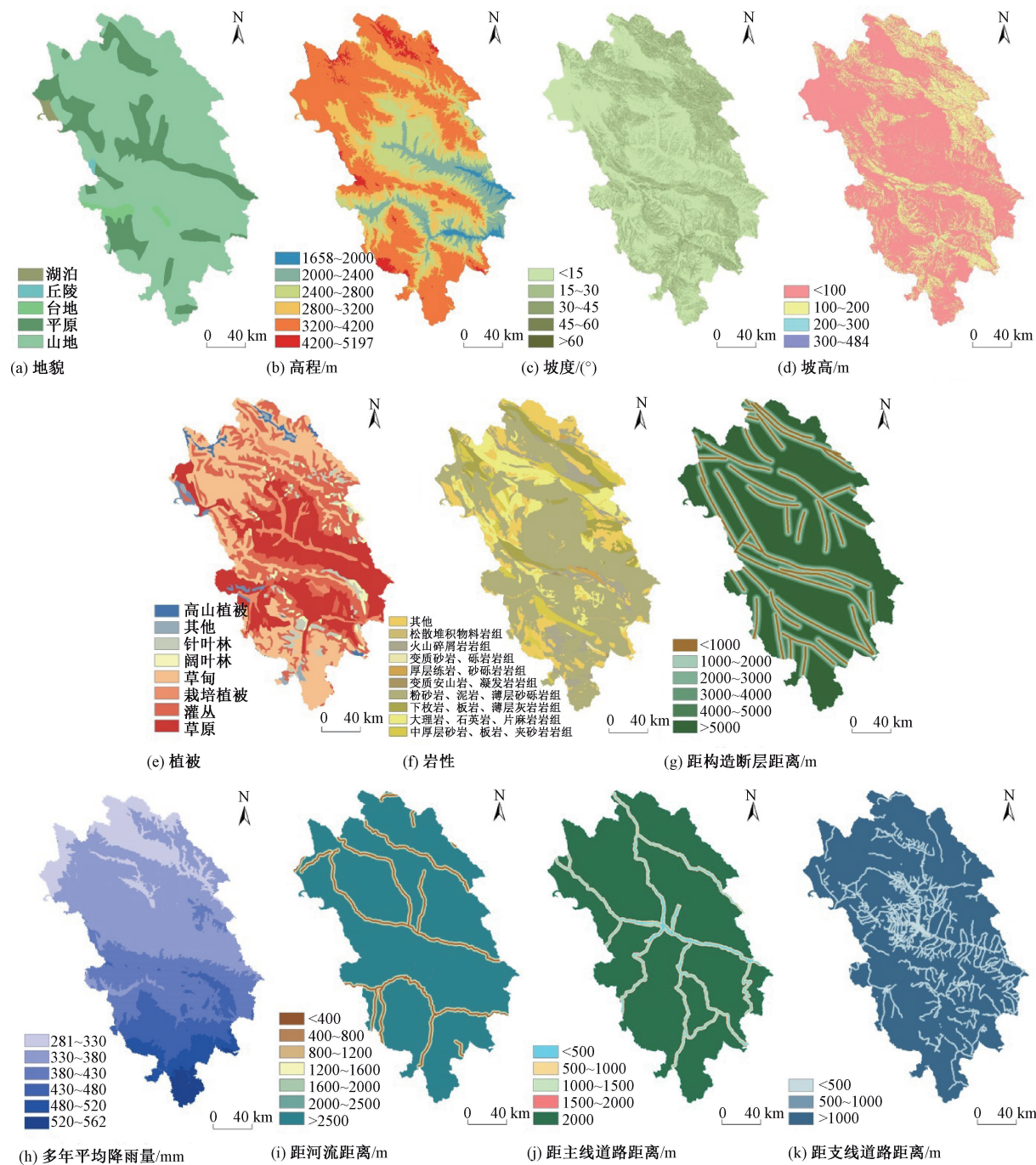


图 2 河湟谷地地质灾害易发性评价因子图

Fig. 2 Maps showing the factors in geological disaster susceptibility assessment in the Hehuang Valley

物质基础和主控因子（刘传正等，2007；黄润秋等，2008）。区内地灾高度集聚在粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩组（占 82.2%），主要是因其岩性为半胶结状极软岩，抗侵蚀能力弱，遇水易软化，受力易变形，易于发生地灾（谈树成等，2018）。

(7) 距构造断层距离

构造断层影响地质环境稳定性（李忠生，2003），其附近的岩土体受构造运动破坏，是地灾

发生的控制性因素。此研究中<5000 m 范围是灾点的相对密集区。

2.2.2 诱灾因子

(1) 多年平均降雨量

降雨会增加土体重力，润滑滑动面，是诱发地灾的重要动力因子（李郎平等，2017），通常降雨量的增加会导致地灾发生概率增加。该区在降雨量<430 mm 区间内，降雨量与地灾发生概率成

正相关,而在>430 mm后,该区域由于地貌起伏和缓,高原草甸广布,孕灾环境发育不充分,其发生率逐渐下降,尤其在>480 mm后下降至几乎为零。

(2) 距河流距离

研究区大部分河流处于中上游,这一阶段河流的侵蚀、侧蚀作用强烈,致使沟谷应力发生转移,斜坡卸荷拉裂,增加岩体不稳定性(王涛,2010)。该区400~800 m缓冲区内灾点密度最高(0.091个/km²),其他区域依次向两侧递减,说明河流对地灾的发生具有较明显的控制作用。

(3) 距道路距离

高等级公路和铁路在修建过程中,其边坡开挖等工程活动会改变原有地质环境(贾贵义等,2014),进一步加剧边坡不稳定性,是地灾的重要诱因。该区灾点主要集中在<500 m的范围内,随着距交通线距离的增加,地灾发生概率依次递减,呈显著相关性。

2.3 评价方法

结合信息量模型与熵值法,分别计算河湟谷地崩塌、滑坡、泥石流及综合易发性指数,从而对研究区进行易发性区划。

2.3.1 信息量模型

采用信息量模型确定崩滑流地灾的易发性指数。信息量模型起源于信息论,由晏同珍首次运用到地质灾害预测中(黄润秋等,2008),其原理是将影响区域稳定性的实测值转换为信息量值,作为易发性区划的量化指标(阮沈勇和黄润秋,2001;王昌明等,2019)。在地质灾害易发性评价中,信息量模型将灾害点作为评价对象,而地质灾害的影响因子则是模型的评价指标,通过计算各因子易发性贡献度来评价其与研究对象的密切程度(黄润秋和李曰国,1991),信息量越高,则认为易发系数越高(王宁涛等,2012;邓越等,2016)。

综上所述,该模型的核心就是计算各二级影响因子(X_i)对崩滑流地灾(D)贡献的信息量 $I_i(D|X_i)$,计算过程如下:

$$I_i(D|X_i) = \frac{P(X_i|D)}{P(X_i)} \quad (1)$$

公式中: $P(X_i|D)$ 为地灾分布情况下出现 X_i 的概率; $P(X_i)$ 为研究区内出现的 X_i 的概率。

公式(1)是概念模型,但在实际运用时往往用下式计算:

$$I_i(D|X_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

公式中: S 为研究区评价单元总数; N 为研究区分布有灾害点和隐患点的单元数; S_i 为因子 X_i 的单元数; N_i 为在因子 X_i 内发生灾害点和隐患点的单元数。

2.3.2 评价因子贡献度的确立

熵值法是基于信息论中“熵是对不确定性度量”的概念形成的一种完全意义上的客观赋权法,较传统赋权法更有效可靠(孙炜锋等,2008),该方法降低了极端值对结果的影响,其结果为非线性函数关系(Ye,2011)。熵值法根据各指标变异程度确定贡献度,其原理是数据变异性越大,熵越大,则信息的效用越小,该指标贡献度就越小。由于各评价因子对地灾发生具有不同的贡献度,因此文中引入熵值法确定其贡献度,具体步骤如下:

(1) 定义熵,表达式如下:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n S_{ij} \ln(S_{ij}) \quad (3)$$

公式中: i 为各二级影响因子; j 为各一级影响因子; S_{ij} 为各一级影响因子中二级影响因子区域内灾点密度的归一化值,且 $S_{ij} \in [0, 1]$; E_j 为第 j 项一级影响因子的熵值; k 为常数, $k = 1/\ln(n)$,其中 n 为各二级影响因子数。

(2) 求熵权,公式为:

$$W_j = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (4)$$

公式中: W_j 为各一级影响因子权重系数, m 为一级影响因子数。

2.3.3 崩滑流地灾易发性区划

首先,由于信息量模型只考虑各因子的地灾易发性,未考虑各指标对地灾的贡献度,因此将公式(2)与(4)计算得到的各二级影响因子信息量值 I_i 与权重系数 W_i 通过公式(5)加权叠加,分别得到该区崩塌、滑坡、泥石流各二级影响因子加权信息量值 I (表3)。然后利用ArcGIS空间叠置及栅格计算器功能,分别集成崩塌、滑坡、泥石流易发性区划图,以此来弥补单纯信息量值的不足,使评价结果真实可靠,具体公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n (W_i \times I_i) \quad (5)$$

公式中: W_i 为第 i 项二级影响因子权重,其值实际为一级影响因子的权重 W_j ,为便于计算加权信息量而分配到其所属的二级影响因子, I_i 为第 i 项二

级影响因子的信息量值, $i = 1, 2, \cdots, 64$ 。其次, 考虑到河湟谷地崩滑流地灾发生的实际情况, 在征求多方专家意见基础上, 将崩塌、滑坡、泥石流图层赋予 0.15, 0.5, 0.35 的权重, 进而耦合成各评价单元地质灾害易发性综合评价指数 $I_{\text{总}}$, 其值范围在 $-2.62 \sim 0.59$ 之间。最后, 经多次调试, 以 $I_{\text{总}}$ 为 $-1.08, -0.35, 0.14, 0.42$ 为断点, 将研究区划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区和极低易发区, 最终得到该区地质灾害易发性综合区划。

表 3 崩塌、滑坡、泥石流各影响因子权重及加权信息量

Table 3 Weight and weighted information of each influencing factor in collapse, landslide and debris flow

一级影响因子	二级影响因子	崩塌		滑坡		泥石流	
		权重	加权信息量	权重	加权信息量	权重	加权信息量
地貌	湖泊		0		0		0
	丘陵		0.0767		0		0
	台地	0.072	0.0550	0.105	-0.0149	0.169	0.2565
	平原		0.0046		-0.0003		0.0988
	山地		-0.0029		0.0015		-0.0552
高程/m	1658~2000		-0.1134		-0.0071		0.1716
	2000~2400		0.1207		0.1008		0.1568
	2400~2800	0.119	0.1170	0.110	0.1302	0.112	0.0671
	2800~3200		-0.0013		-0.0705		-0.0364
	3200~4200		-0.5145		-0.4425		-0.3032
	4200~5197		0		0		0
坡度/ (°)	<15		0.0401		0.0233		0.0857
	15~30		-0.0625		-0.0191		-0.1992
	30~45	0.146	-0.1753	0.143	-0.2481	0.204	-0.4152
	45~60		0		0		0
	>60		0		0		0
坡高/m	<100		0.0168		0.0419		0.0341
	100~200	0.097	-0.0843	0.206	-0.2268	0.148	-0.2242
	200~300		0.0094		0		-0.1845
	300~484		0		0		0
植被	针叶林		-0.0269		-0.0517		0.0319
	高山植被		0		0		0
	栽培植被		0.0140		-0.0237		0.1032
	阔叶林	0.089	0.0232	0.092	0.0291	0.074	-0.0369
	灌丛		-0.0506		-0.0629		-0.0490
	荒漠		0		0		0.0283
	草原		0.0788		0.0859		0.0415
	草甸		-0.1690		-0.1681		-0.0887
岩性	A		0		0		0
	B		0.3238		0		0.0358
	C		-0.2090		-0.5209		-0.0293
	D		0		-0.2068		0.0011
	E	0.171	-0.0091	0.166	-0.3902	0.065	-0.0430
	F		-0.2941		-0.4215		-0.0380
	G		-0.0176		-0.1529		-0.0678
	H		0		0		0
	I		0.0324		0.0911		0.0242
距构造断层距离/m	<1000		-0.0148		-0.0082		-0.0063
	1000~2000		-0.0203		-0.0134		-0.0072
	2000~3000	0.019	-0.0073	0.016	-0.0141	0.011	-0.0023
	3000~4000		-0.0014		0.0015		-0.0007
	4000~5000		-0.0038		-0.0011		0.0024
	>5000		0.0056		0.0043		0.0019

续表 3

一级影响因子	二级影响因子	崩塌		滑坡		泥石流	
		权重	加权信息量	权重	加权信息量	权重	加权信息量
多年平均降雨量/mm	281~330	0.133	-0.0293	0.113	-0.1560	0.082	0.0085
	330~380		0.0312		-0.0324		0.0142
	380~430		0.0428		0.0939		0.0082
	430~480		-0.3913		0.0114		-0.0391
	480~520		-0.1471		-0.4196		-0.2894
	520~562		0		0		0
距河流距离/m	<400	0.024	0.0148	0.014	-0.0091	0.023	0.0251
	400~800		0.0302		-0.0047		0.0326
	800~1200		0.0022		-0.0034		0.0323
	1200~1600		0.0157		-0.0045		0.0317
	1600~2000		0.0025		0.0095		0.0251
	2000~2500		-0.0026		0.0012		0.0047
	>2500		-0.0029		0.0001		-0.0097
距主线道路距离/m	<500	0.066	0.1161	0.001	0.0001	0.032	0.0448
	500~1000		0.0564		0.0002		0.0384
	1000~1500		0.0486		0		0.0166
	1500~2000		-0.0295		-0.0001		0.0175
	>2000		-0.0211		0		-0.0095
距支线道路距离/m	<500	0.063	0.0688	0.033	0.0272	0.081	0.1025
	500~1000		0.0055		0.0239		0.0302
	>1000		-0.0272		-0.0150		-0.0556

注：岩性中 A—变质砂岩、砾岩岩组；B—松散堆积物岩组；C—中厚层砂岩、板岩、夹砂岩岩组；D—厚层砾岩、砂砾岩岩组；E—千枚岩、板岩、薄层灰岩岩组；F—火山碎屑岩岩组；G—大理岩、石英岩、片麻岩岩组；H—变质安山岩、凝灰岩岩组；I—粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩岩组

3 易发性评价结果分析

3.1 崩塌易发性

河湟谷地崩塌极高易发区面积 598.77 km²，占 1.54%（表 4），主要沿西宁市、湟中县、平安区、民和县、贵德县、尖扎县、化隆县这些地区

表 4 崩塌、滑坡、泥石流易发性区划统计

Table 4 Zoning statistics of susceptibility to collapse, landslide and debris flow

灾种	极低易发区面积/ km ² （占比/%）	低易发区面积/ km ² （占比/%）	中易发区面积/ km ² （占比/%）	高易发区面积/ km ² （占比/%）	极高易发区面积/ km ² （占比/%）
崩塌	3506.95（8.99）	15927.88（40.85）	8839.18（22.67）	10121.09（25.96）	598.77（1.54）
滑坡	4339.59（11.13）	13684.30（35.09）	8790.36（22.54）	7089.72（18.18）	5089.87（13.05）
泥石流	6799.61（17.44）	13963.32（35.81）	13140.59（33.70）	4442.46（11.39）	647.87（1.66）

3.2 滑坡易发性

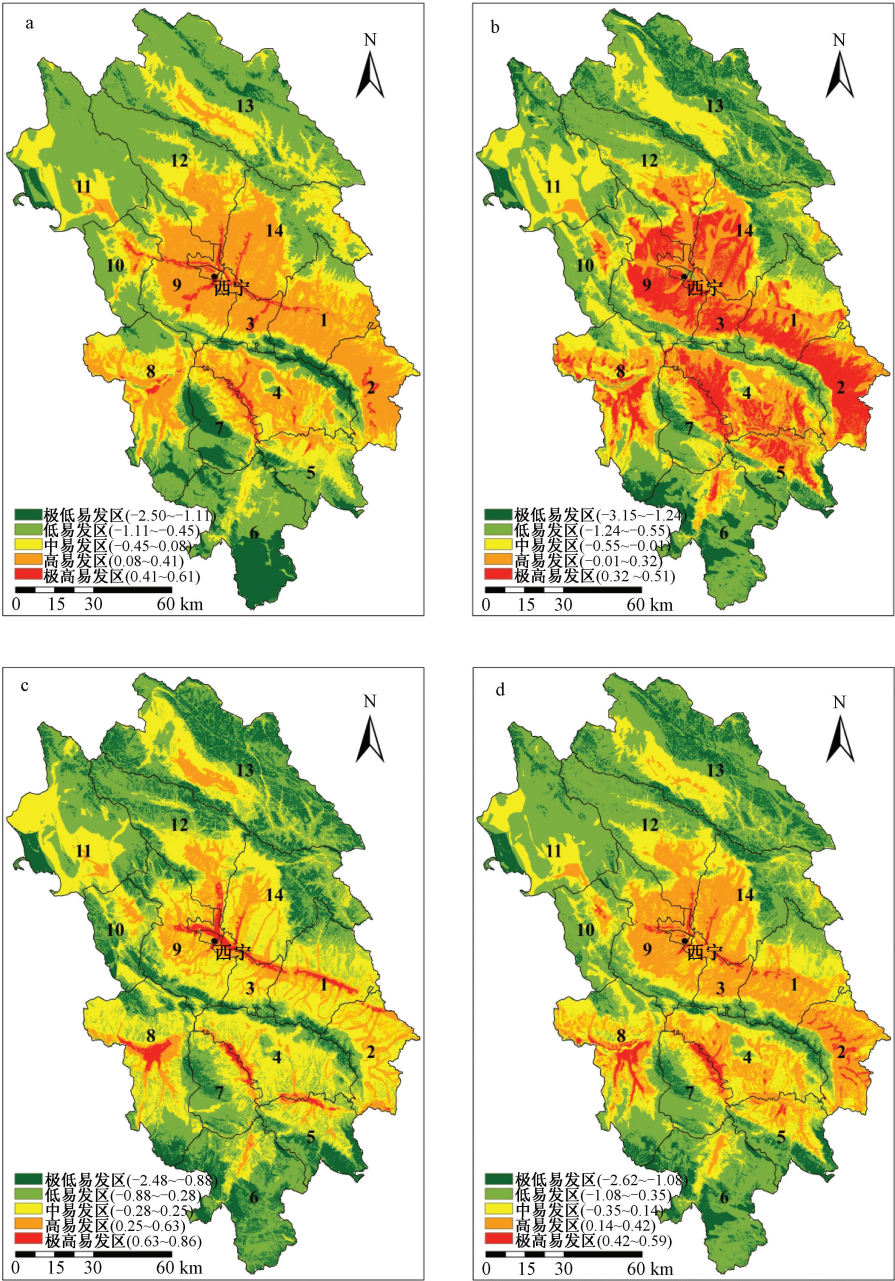
河湟谷地滑坡极高易发区面积 5089.87 km²，占 13.05%，主要连片分布在湟水、黄河及其支沟外围的中小起伏山地（图 3b）；高易发区主要分布在湟中县、民和县、化隆县大部，乐都县、贵德县中部、互助县西南部、大通县东南部以及循化县东北部的中海拔洪积-冲积平原；低易发区和极低易发区主要分布在门源县、同仁县大部、互助

的湟水、黄河、大通河河谷山前地带分布（图 3a）；高易发区主要分布在西宁市区、平安区、湟中县、民和县、化隆县大部，互助县西北部以及乐都县、贵德县中部中小起伏山地；低易发区和极低易发区主要分布在海晏县、同仁县、门源县大部，尖扎县中西部以及大通县西北部的高海拔大起伏山地。

县东北部以及尖扎县西南部的高海拔大起伏山地。

3.3 泥石流易发性

河湟谷地泥石流极高易发区面积 647.87 km²，占 1.66%，主要呈树枝状分布在湟水及其支流北川河、沙塘川中下游，黄河及其支流西川、东川中下游（图 3c）；高易发区集中分布在西宁市、民和县大部、湟中县、贵德县、乐都县中部、化隆县、尖扎县交界处的湟水、黄河各支沟及大通河



1—乐都县; 2—民和县; 3—平安县; 4—化隆县; 5—循化县; 6—同仁县; 7—尖扎县; 8—贵德县; 9—湟中县; 10—湟源县; 11—海晏县; 12—大通县; 13—门源县; 14—互助县
a—崩塌易发性区划; b—滑坡易发性区划; c—泥石流易发性区划; d—地质灾害易发性综合区划

图 3 河湟谷地不同类型灾害易发性评价结果

Fig. 3 Assessment results of susceptibility to different types of disasters in the Hehuang Valley

中游沟谷两侧的斜坡; 低易发区和极低易发区主要分布在门源县东北部和西南部、大通县西北部、同仁县中南部、尖扎县西南部以及化隆县、乐都县、民和县交界处的大起伏山地。

3.4 综合易发性

河湟谷地地质灾害综合区划有如下规律 (图 3d, 表 5):

(1) 极高易发区。面积 790.58 km², 占 2.03%。呈带状分布在黄河、湟水两岸的沟谷地带。主要包括黄河贵德段中部及其支流东沟、西沟下游、湟水湟中县至乐都县段, 零星分布于民和县、循化县等地。其中, 湟水河及其支流在西宁市、平安区、乐都县流域以及黄河贵德段的主导灾害为泥石流, 原因可能是这里河流侵蚀作用强, 形成

众多的泥石流沟；民和县等地由于黄土的结构疏松，垂直节理发育，水土流失较为严重，岩性多为粉砂岩、泥岩等软性岩，导致这里的地质灾害以滑坡和崩塌为主；化隆县、尖扎县交界处地质环境复杂，以崩滑流地灾集群分布为主。区内河流主干侵蚀强烈，岩体破碎，人口密集，是本区主要城镇密集分布带，同时也是工农业、重大工程密集区，人类活动频繁。区内分布灾害点 117 处，灾点密度 0.148 处/km²。

表 5 河湟谷地地质灾害综合易发性区划统计
Table 5 Comprehensive susceptibility zoning statistics of geological disasters in the Hehuang Valley

易发性区划	灾害点/ 处	灾点 占比/%	面积 /km ²	面积 占比/%	灾点密度 /处/km ²
极低易发区	0	0.00	4378.83	11.23	0.000
低易发区	76	4.91	16413.8	42.10	0.005
中易发区	467	30.17	9144.4	23.45	0.051
高易发区	888	57.36	8264.61	21.20	0.107
极高易发区	117	7.56	790.58	2.03	0.148

(2) 高易发区。面积 8264.61 km²，占 21.2%。呈团块状分布于极高易发区外围的湟中县、民和县、平安区大部、大通县南部、互助县西南部、西宁市周边以及乐都县中部的中小起伏山间盆地，此外，零星分布在贵德县和化隆县等地。其中湟中县、民和县、乐都县、互助县、大通县等地与滑坡高易发区范围高度相似，这与滑坡在该区相对集中有关。区内各河流及其支流侵蚀强烈，岩体破碎，人口较密集，是区内主要城镇分布区，工农业、重大工程较密集，人类活动较频繁。区内分布灾害点 888 处，灾点密度 0.107 处/km²。

(3) 中易发区。面积 9144.4 km²，占 23.45%。紧密环绕在高易发区周缘的中起伏山地，是高、低易发区之间的过渡区域。植被以灌丛、耕地为主，工农业活动逐渐减少。区内分布灾害点 467 处，灾点密度 0.051 处/km²。

(4) 低易发区。面积 16413.8 km²，占 42.1%。呈片状分布在海晏县大部、湟源县中西部、大通县西北部、尖扎县、贵德县南部以及同仁县东南部等地的大中起伏山地、丘陵地带。区内海拔升高，属河流中上游，岩性以坚硬的大理岩、石英岩、片麻岩为主，植被以高山草甸为主，水土保持较好。该区属农牧交错区，人类活动影响较小，地灾发育程度较低。区内分布灾害点 76 处，灾点密度 0.005 处/km²。

(5) 极低易发区。面积 4378.83 km²，占 11.23%。呈斑块状分布在门源县东北部和西南部、海晏县、同仁县西南部、乐都县、民和县与化隆县交界处以及尖扎县中西部等地的冷龙岭、拉脊山、西倾山等山地。区内为河流源头，地质环境相对较好，植被主要为高寒草甸和沙地、裸地，人类活动微弱。灾点密度 0 处/km²。

3.5 评价精度检验

依据评价结果，对各类区划及灾点进行分区统计（表 5）。可以看出，绝大多数灾害点分布在极高、高以及中易发区，并且在面积占研究区 23.23%的极高、高易发区内集中分布 64.92%的灾害点，灾点密度也随易发性的增加而增加，说明此次区划结果与实际情况相符，信息量模型的预测精度为 95.09%。因此，该模型的评估结果较为准确。

4 讨论

目前对区内地质灾害的研究多以单灾种为主，综合评价相对缺乏，加之河湟谷地自然地理环境有一定的整体性，综合评价区域地质灾害易发性，既有利于把握致灾的总体规律，从宏观角度比较各区的危害程度，又能服务于防灾减灾生产实践，因此此次评价结果有较好地区综合性。例如，发现河湟地区的地质灾害以滑坡和泥石流占主导，并且在坡度较小以及人类工程活动密集区多发，应防止在道路建设中破坏斜坡体而引发滑坡。此外，目前对该区域地质灾害易发性的研究，未揭示单灾种易发性区划与综合区划之间的联系，为此文中不仅分析地质灾害的综合易发性，而且揭示各区的主导灾害类型。例如贵德县主导灾害类型为泥石流，民和县为滑坡，化隆县与尖扎县交界处呈崩滑流多灾并发的态势。这改进了只从地质灾害层面总体评价的方法，提高了地质灾害评价的系统性。当然文中不同程度地存在指标选取不全面、评估精度有待提高、地质灾害易发空间格局演化与主控因素分析不够等问题，这将在今后工作中进行深入研究。

5 结论

文中以河湟谷地历史地质灾害点及重大地质

灾害隐患点数据为基础,分析了地貌、地质、气候、人类活动等指标对该区地质灾害的控制作用,采用熵值法确定评价因子的贡献度,信息量模型计算易发性指数,最后进行易发性等级区划。取得如下结论。

(1) 河湟谷地地质灾害发生的主要影响因素为坡度、坡高、岩性、降水量。崩塌主要受岩性和坡度的控制;滑坡的主要影响因素为坡高和岩性;泥石流受坡度、地形和降雨量等因素影响较大。地质灾害在以下条件下高发:①坡度 $<15^{\circ}$;②岩性为粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩;③植被为温带草原;④距离道路500 m的范围内。

(2) 河湟谷地崩、滑、流极高易发区面积分别为 598.77 km^2 , 5089.87 km^2 , 647.87 km^2 ;分别占1.54%, 13.05%, 1.66%。其中崩塌主要沿湟水、黄河、大通河河谷山前地带分布;滑坡主要连片分布在湟水、黄河及其支沟外围的中小起伏山地;泥石流主要分布在湟水及其支流北川河、沙塘川中下游,黄河及其支流西川、东川中下游。

(3) 河湟谷地综合地质灾害易发性可分为极高、高、中、低以及极低易发区,对应的区划面积为 790.58 km^2 , 8264.61 km^2 , 9144.4 km^2 , 16413.8 km^2 , 4378.83 km^2 ;分别占2.03%, 21.2%, 23.45%, 42.1%, 11.23%。极高易发区主要集中在人口、工程活动密集的河谷(城镇)地区;高易发区主要分布在人口、工程活动较密集的中小起伏山间盆地地区;中易发区主要分布在中小起伏山地向大起伏山地的过渡区域;低易发区和极低易发区主要分布在人口稀少,以牧业活动为主的大起伏山区。从行政区划来看,地质灾害高易发县市(市)为乐都县、贵德县、西宁市,次之为民和县、湟中县、化隆县,较低的是门源县、海晏县、同仁县。文中易发性区划与灾点密度呈线性相关,评价结果较为可靠。

致谢: 青海师范大学研究生蒋荣给予英文指导,在此表示衷心感谢!

References

CHENG W M, ZHOU C H, CHAI H X, et al., 2009. Quantitative extraction and analysis of basic morphological types of land geomorphology in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 11 (6): 725-736. (in Chinese with English abstract)

CUI P, SU F H, ZOU Q, et al., 2015. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in

Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 60 (32): 3067-3077. (in Chinese with English abstract)

DAI F C, LEE C F, LI J, et al., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau island, Hong Kong [J]. *Environmental Geology*, 40 (3): 381-391.

DENG Y, ZHOU T G, JIANG W G, 2016. Assessment of geological disaster hazard and potential impact in Dujiangyan City [J]. *Journal of Catastrophology*, 31 (2): 196-199, 212. (in Chinese with English abstract)

DONG Z P, YAO Z S, LEI F, 1992. Active faults and modern tectonic stress field in the region of eastern Qinghai [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 12 (4): 64-71. (in Chinese with English abstract)

FAN L F, HU R L, ZENG F C, et al., 2012. Application of weighted information value model to landslide susceptibility assessment: a case study of Enshi City, Hubei Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 20 (4): 508-513. (in Chinese with English abstract)

GE Q S, ZOU M, ZHENG J Y, et al., 2008. Integrated assessment of natural disaster risks in China [M]. Beijing: Science Press; 62-65. (in Chinese with English abstract)

GUO B M, QUAN K X, 2019. ArcGIS-based disaster risk assessment of Longwu River basin in Qinghai Province [J]. *Geology and Resources*, 28 (3): 289-292. (in Chinese with English abstract)

HUANG R Q, LI Y G, 1991. Numerical simulation of bank slope deformation and failure mechanism of horizontal strata in three gorges reservoir area [J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 2 (2): 23-31. (in Chinese)

HUANG R Q, XU X N, TANG C, et al., 2008. Geological environment assessment and geological hazards management [M]. Beijing: Science Press; 151-179. (in Chinese)

JIA G Y, QUAN Y Q, LI Z H, et al., 2014. Geo-hazards assessment for the Gansu segment in Bailongjiang River basin by using combination weighting method [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36 (5): 1227-1236. (in Chinese with English abstract)

JIA X, LEE H F, CUI M C, et al., 2019. Differentiations of geographic distribution and subsistence strategies between Tibetan and other major ethnic groups are determined by the physical environment in Hehuang Valley [J]. *Science China Earth Sciences*, 62 (2): 412-422.

KOU L N, BIAN J, ZHANG T T, et al., 2017. The application of GIS-based information method in susceptibility evaluation of regional geological hazards in Minhe County, Qinghai Province [J]. *Northwestern Geology*, 50 (2): 244-248. (in Chinese with English abstract)

LI L P, LAN H X, GUO C B, et al., 2017. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method [J]. *Geoscience*, 31 (5): 911-929. (in Chinese with English abstract)

LI Z S, 2003. The state of the art of the research on seismic landslide hazard at home and abroad [J]. *Journal of Catastrophology*, 18 (4): 64-70. (in Chinese with English abstract)

LIAO L P, YU M, WEN H T, et al., 2019. Evaluation on the susceptibility of collapse and landslide in Rongxian County, Southeastern Guangxi [J]. *Earth and Environment*, 47 (4): 518-

526. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, LIU Y H, WEN M S, et al., 2007. Research on the geo-hazards genesis and assessment in the Three Gorges reservoir of Changjiang River in China [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract)
- LIU X, 2014. Study on risk assessment of debris flow in Ashigong Gui De County, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, TANG C, FENG Y, 2013. Geological disaster risk assessment based on AHP information method [J]. Earth and Environment, 41 (2): 173-179. (in Chinese with English abstract)
- NI X J, NAN Y, 2014. Comprehensive assessment of geological disasters risk in Changbai Mountain region based on GIS [J]. Journal of Natural Disasters, 23 (1): 112-120. (in Chinese with English abstract)
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics, 2016. Qinghai statistical yearbook in 2016 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House. (in Chinese with English abstract)
- RUAN S Y, HUANG R Q, 2001. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 28 (1): 89-92. (in Chinese with English abstract)
- SHEN L, YAO J H, 1995. Industrial development and layout of Hehuang Valley in eastern Qinghai [J]. Economic Geography, 15 (3): 66-72. (in Chinese)
- SUN W F, TAN C X, WANG J M, et al., 2008. Geohazard susceptibility evaluation of Qianyang County, Baoji area, Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 27 (11): 1846-1853. (in Chinese with English abstract)
- SUN Y P, ZHANG S P, CHEN W K, et al., 2018. Risk Assessment of Landslides Caused by Wenchuan Earthquakes: A Case Study in the Wudu District and Wenxian County, Gansu Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 40 (5): 1084-1091. (in Chinese with English abstract)
- TAN S C, ZHAO X Y, LI Y P, et al., 2018. Risk assessment on the geological disasters based on GIS and information content model: Taking Qiubei County, Yunnan Province as an example [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 54 (1): 67-76. (in Chinese with English abstract)
- TANG C, MA G C, 2015. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic unit [J]. Scientia Geographica Sinica, 35 (1): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- WANG C M, HUANG J, LI Q, et al., 2019. Evaluation of geological hazard vulnerability in Lyuliang City in Shanxi Province based on coupling of information content model and Logistic regression model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 50 (3): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- WANG N T, PENG K, LI Q H, et al., 2012. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS&GIS analysis: a case study of Wufeng County, Hubei Province [J]. Earth Science Frontiers, 19 (6): 221-229. (in Chinese with English abstract)
- WANG T, 2010. Study on seismic landslide hazard assessment in Wenchuan earthquake severely afflicted area [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)
- WEI G, YIN Z Q, SHI L Q, et al., 2013. Zoning of geological disasters of Hualong County in Qinghai Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 24 (1): 86-92. (in Chinese with English abstract)
- WEI Z J, MA H L, TANG D L, 2017. Trend assessment of typhoon disasters based on the improved entropy method [J]. Journal of Catastrophology, 32 (3): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- WU B, ZHAO F S, DUAN Z, et al., 2018. Application of attribute recognition model based on coefficient of entropy to hazard degree evaluation of soil landslide in Shaanxi [J]. Journal of Catastrophology, 33 (1): 140-145. (in Chinese with English abstract)
- XIONG C L, CHEN L, WEI C L, et al., 2012. Main geohazard types in Longling segment of the Dali-Ruili railway, western Yunnan and their development characteristics [J]. Geological Bulletin of China, 31 (2-3): 396-405. (in Chinese with English abstract)
- XU Y, 2013. The geological hazards sensitivity assessment based on GIS in Huzhu County [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- YANG Z H, ZHANG Y S, GUO C B, et al., 2018. Sensitivity analysis on causative factors of geohazards in eastern margin of Tibetan plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 26 (3): 673-683. (in Chinese with English abstract)
- YE J, 2011. Fuzzy cross entropy of interval-valued intuitionistic fuzzy sets and its optimal decision-making method based on the weights of alternatives [J]. Expert Systems with Applications, 38 (5): 6179-6183.
- YUAN X Q, ZHAO F S, CHEN X J, et al., 2017. Zoning of geological hazards' susceptibility evaluation in Suide County of Shaanxi Province [J]. Journal of Catastrophology, 32 (1): 117-120, 125. (in Chinese with English abstract)
- ZENG L K, XU M, FANG Q, et al., 2010. Vegetation and development of geological hazards [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 21 (3): 97-100. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C S, HAN J L, SUN W F, et al., 2008. Assessments of geohazard danger zoning in Longxian County, Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 27 (11): 1795-1801. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X Y, ZHANG C S, MENG H J, et al., 2018. Landslide susceptibility assessment of new Jing-Zhang high-speed railway based on GIS and information value model [J]. Journal of Geomechanics, 24 (1): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z X, 2004. Geography of Qinghai [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House: 62-210. (in Chinese)
- ZHOU J J, ZHANG X M, ZHAO F S, et al., 2019. Research on risk assessment of geological hazards in Qinling-Daba mountain area, south Shaanxi Province [J]. Journal of Geomechanics, 25 (4): 544-553. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

程维明, 周成虎, 柴慧霞, 等, 2009. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析 [J]. 地球信息科学学报, 11 (6): 725-736.

崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等, 2015. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策 [J]. 科学通报, 60 (32): 3067-3077.

邓越, 周廷刚, 蒋卫国, 2016. 都江堰市地质灾害危险性及潜在影响评估 [J]. 灾害学, 31 (2): 196-199, 212.

董治平, 姚政生, 雷芳, 1992. 青海东部活断层与现代构造应力场 [J]. 地壳形变与地震, 12 (4): 64-71.

范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 等, 2012. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用: 以湖北省恩施市为例 [J]. 工程地质学报, 20 (4): 508-513.

葛全胜, 邹铭, 郑景云, 等, 2008. 中国自然灾害风险综合评估初步研究 [M]. 北京: 科学出版社: 62-65.

郭邦梅, 权开兄, 2019. 基于 ArcGIS 的青海隆务河流域灾害风险性评价 [J]. 地质与资源, 28 (3): 289-292.

黄润秋, 李曰国, 1991. 三峡库区水平岩层岸坡变形破坏机制的数值模拟研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2 (2): 23-31.

黄润秋, 许向宁, 唐川, 等, 2008. 地质环境评价与地质灾害管理 [M]. 北京: 科学出版社: 151-179.

贾贵义, 全永庆, 黎志恒, 等, 2014. 基于组合赋权法的白龙江流域甘肃段地质灾害危险性评价 [J]. 冰川冻土, 36 (5): 1227-1236.

贾鑫, 李峯, 崔梦淳, 等, 2019. 河湟谷地藏族和其他主要民族分布的地理环境特征及其生产方式差异 [J]. 中国科学: 地球科学, 49 (4): 706-716.

寇丽娜, 边疆, 张婷婷, 等, 2017. 基于 GIS 的信息量法在青海民和区域地质灾害易发性评价中的应用 [J]. 西北地质, 50 (2): 244-248.

李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等, 2017. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价 [J]. 现代地质, 31 (5): 911-929.

李忠生, 2003. 国内外地震滑坡灾害研究综述 [J]. 灾害学, 18 (4): 64-70.

廖丽萍, 于森, 文海涛, 等, 2019. 广西东南部容县崩塌滑坡的易发性评价 [J]. 地球与环境, 47 (4): 518-526.

刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等, 2007. 长江三峡库区地质灾害成因与评价研究 [M]. 北京: 地质出版社.

刘玄, 2014. 青海省贵德县阿什贡泥石流群风险性评价 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).

刘洋, 唐川, 冯毅, 2013. 基于 AHP-信息量法的地质灾害危险性评价 [J]. 地球与环境, 41 (2): 173-179.

倪晓娇, 南颖, 2014. 基于 GIS 的长白山地区地质灾害风险综合评估 [J]. 自然灾害学报, 23 (1): 112-120.

青海省统计局, 2016. 青海统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社.

阮沈勇, 黄润秋, 2001. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用 [J]. 成都理工学院学报, 28 (1): 89-92.

沈镭, 姚建华, 1995. 青海东部河湟谷地工业发展与布局 [J]. 经济地理, 15 (3): 66-72.

孙炜锋, 谭成轩, 王继明, 等, 2008. 陕西宝鸡地区千阳县地质灾害易发性评价 [J]. 地质通报, 27 (11): 1846-1853.

孙艳萍, 张苏平, 陈文凯, 等, 2018. 汶川地震滑坡危险性评价: 以武都区 and 文县为例 [J]. 地震工程学报, 40 (5): 1084-1091.

谈树成, 赵晓燕, 李永平, 等, 2018. 基于 GIS 与信息量模型的地质灾害危险性评价: 以云南省丘北县为例 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 54 (1): 67-76.

唐川, 马国超, 2015. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究 [J]. 地理科学, 35 (1): 91-98.

王昌明, 黄健, 李桥, 等, 2019. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的山西吕梁市地质灾害易发性评价研究 [J]. 水利水电技术, 50 (3): 132-138.

王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等, 2012. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例 [J]. 地学前缘, 19 (6): 221-229.

王涛, 2010. 汶川地震重灾区地质灾害危险性评估研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.

魏刚, 殷志强, 史立群, 等, 2013. 青海化隆县地质灾害易发性区划 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 24 (1): 86-92.

魏章进, 马华铃, 唐丹玲, 2017. 基于改进熵值法的台风灾害风险趋势评估 [J]. 灾害学, 32 (3): 7-11.

吴博, 赵法锁, 段钊, 等, 2018. 基于熵权的属性识别模型在陕西土质滑坡危险度评价中的应用 [J]. 灾害学, 33 (1): 140-145.

熊昌利, 陈亮, 魏昌利, 等, 2012. 滇西大理至瑞丽铁路龙陵段主要的地质灾害类型及其发育规律 [J]. 地质通报, 31 (2-3): 396-405.

徐媛, 2013. 基于 GIS 的互助县地质灾害易发性评价研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).

杨志华, 张永双, 郭长宝, 等, 2018. 青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析 [J]. 工程地质学报, 26 (3): 673-683.

袁湘秦, 赵法锁, 陈新建, 等, 2017. 陕西省绥德县地质灾害易发性区划 [J]. 灾害学, 32 (1): 117-120, 125.

曾令科, 许模, 方琼, 等, 2010. 植被与地质灾害发育分布关系初探 [J]. 地质灾害与环境保护, 21 (3): 97-100.

张春山, 韩金良, 孙炜锋, 等, 2008. 陕西陇县地质灾害危险性分区评价 [J]. 地质通报, 27 (11): 1795-1801.

张向营, 张春山, 孟华君, 等, 2018. 基于 GIS 和信息量模型的京张高铁滑坡易发性评价 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 96-105.

张忠孝, 2004. 青海地理 [M]. 西宁: 青海人民出版社: 62-210.

周静静, 张晓敏, 赵法锁, 等, 2019. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究 [J]. 地质力学学报, 25 (4): 544-553.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）:

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

