

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0121

王小东, 罗园, 付景保. 基于 GIS 的白龙江引水工程水源区地质灾害易发性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1231-1239. WANG X D, LUO Y, FU J B. Geological hazard susceptibility assessment based on GIS in water source area of Bailongjiang river water diversion project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1231-1239. (in Chinese)

# 基于 GIS 的白龙江引水工程水源区 地质灾害易发性评价

王小东<sup>1</sup>, 罗园<sup>1</sup>, 付景保<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 河南工程学院南水北调与黄河流域生态环境研究中心, 郑州 451191)

**摘要:**以甘肃省白龙江引水工程水源区为实例, 研究新建水库影响范围内的地质灾害发育状况, 为水库安全建设与运营管理提供支撑。在遥感解译和野外勘察的基础上, 选取高程、坡度、坡向、距断层距离、岩层倾向与坡向的关系和距水系距离 6 个地质灾害易发性评价因子, 分析各因子与地质灾害的内在关系, 基于 GIS 空间分析技术和层次分析法进行地质灾害易发性评价。结果表明: 中高易发区主要集中分布在河流两侧, 地质灾害点数量占 95.65%, 评价结果与历史地质灾害分布情况基本吻合, 较好地反映了研究区地质灾害发育特征。

**关键词:** 地质灾害; 易发性评价; 层次分析法; 空间分析; GIS

中图分类号: TV221 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



地质灾害是在自然或人为因素的作用下形成的对人类生命财产安全或环境造成破坏的地质作用或地质现象<sup>[1]</sup>。因此, 开展地质灾害易发性评价, 不仅可为库区防灾减灾工作提供基础, 而且能为水库安全建设与运营提供支持。随着地理信息系统 (geographical information system, GIS) 和遥感 (remote sensing, RS) 技术的发展, 地质灾害评价也变得更加高效、准确和简便, 极大地加快了该领域的研究进程。地质灾害的评价方法主要有层次分析法、信息量法、频率比法、证据权重法、人工神经网络、随机森林法以及多种模型耦合的方法等<sup>[2-8]</sup>。其中: 成陆等<sup>[9]</sup>以河北武安市为研究区, 从洪涝灾害的致灾危险性、灾害敏感性和防减灾能力 3 个方面选取 9 个评价指标, 采用层次分析法和加权综合评价法得出洪涝灾害风险评价结果; 陈立华等<sup>[10]</sup>以广西北流市为研究区, 基于 ArcGIS 分析筛选了 9 个评价因子, 运用信息量模型进行易发性区划; 徐瑞池等<sup>[11]</sup>选取

山地灾害的本底因子利用频率比法计算静态危险度, 采用因子叠加法实现山地灾害的动态危险性评价, 再结合动态易损性评价指标对横断山区山地灾害进行动态风险评价; 周超等<sup>[12]</sup>通过证据权重法, 选取 8 个评价指标, 实现矿山地质灾害易发性区划, 又以不同频率的年最大日降雨量做动态因素, 提出不同降雨频率下的矿山地质灾害危险性评价方法, 根据不同承灾体的特征制作易损性分布图, 结合地质灾害危险性和承灾体易损性构建矿山地质灾害风险评价模型; 施紫越等<sup>[13]</sup>以湘西州为研究区, 选取 9 个影响因子, 采用 BP 神经网络和信息量法构建土质滑坡易发性模型, 探讨土质滑坡易发性的主导因素和空间分布特征; 杨硕等<sup>[14]</sup>选取乌江龙溪—石朝门段高陡岸坡为研究区, 选取 8 个评价因子采用随机森林模型进行滑坡地质灾害易发性评价与精度分析, 并对各评价指标因子的贡献程度进行分析; 邓念东等<sup>[15]</sup>以陕西省洋县为研究区, 选取 9 个

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2022-06-28 网络出版时间: 2022-10-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221014.1010.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077449; U1704124; 51879130); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目 (2019QZ-KK0904); 河南省教育厅哲学社会科学重大攻关招标项目 (2020-YYZD-04)

作者简介: 王小东 (1980—), 男, 河南辉县人, 副教授, 博士, 主要从事地质灾害、地理信息系统方面的研究。E-mail: [wxdyaner@foxmail.com](mailto:wxdyaner@foxmail.com)

通信作者: 付景保 (1966—), 男, 河南南阳人, 教授, 硕士生导师, 主要从事区域生态环境保护与治理研究。E-mail: [fujingbao@126.com](mailto:fujingbao@126.com)

滑坡影响因子,采用频率比模型、随机森林模型及两者的耦合模型绘制滑坡易发性分区图。在传统地质灾害易发性评价中,大多采用一种方法或多种方法的耦合对不同区域进行地质灾害易发性评价的研究,但是不同区域地质灾害的诱发因素存在差异性,评价地质灾害易发性的方法选择上也无法达成共识,因此需要因地制宜,针对研究区地质灾害发育特征选取合适的评价因子和评价方法,构建符合研究区的地质灾害易发性评价指标体系。

白龙江引水工程水源区属长江上游汇源区,为深度切割侵蚀、剥蚀的中高山区地貌,近年来随着人类工程活动的增加,常有滑坡、崩塌、泥石流和碎屑流等地质灾害突发事件发生。本文以白龙江引水工程水源区为研究区,基于前人研究成果、遥感解译成果和野外调查结果,综合分析研究区域地质灾害发育特征,结合 GIS 技术和层次分析法,选取高程、坡度、坡向、断层、岩层倾向与坡向关系和距水系距离 6 个评价因子对研究区进行地质灾害易发性评价,为研究区水利工程安全建设与运行管理提供支持,为研究区地质灾害防治提供前提和基础。

## 1 研究区概况

白龙江引水工程水源区位于甘肃省甘南藏族自治州迭部县洛大乡境内,白龙江干流现有代古寺水库,距迭部县约 86 km。研究区属于深度切割侵蚀的中高山区地貌,两岸山体雄厚,沟谷纵横,地形复杂,无单薄分水岭及低邻谷分布,地形封闭条件较好。研究区地层岩性主要为卓乌组粉砂质板岩夹粉砂岩和炭质板岩,位于迭部-武都逆冲推覆构造带内,迭部-武都逆冲推覆构造带夹持在南部迭部-武都断裂带与光盖山-迭山南麓断裂带之间,带内褶皱构造为复式背斜构造,轴面北倾,呈逆冲叠瓦状排列。研究区内的代古寺水库和水泊峡水库属峡谷型水库,库区岸坡主要分为岩质岸坡和土质岸坡,河谷形态呈 V 形,河道蜿蜒曲折,两岸地下水位较高,地下水补给河水。研究区内地质灾害情况复杂,堆积体类型多为松散堆积体,组成物质为块石和碎石。通过前期资料收集,结合地质灾害的遥感解译成果,经过野外调查和复核,获得分布在研究区内的 115 处地质灾害点,其中滑坡 47 处,崩塌 36 处,泥石流 13 处,碎屑流 19 处,具体空间位置分布见图 1。

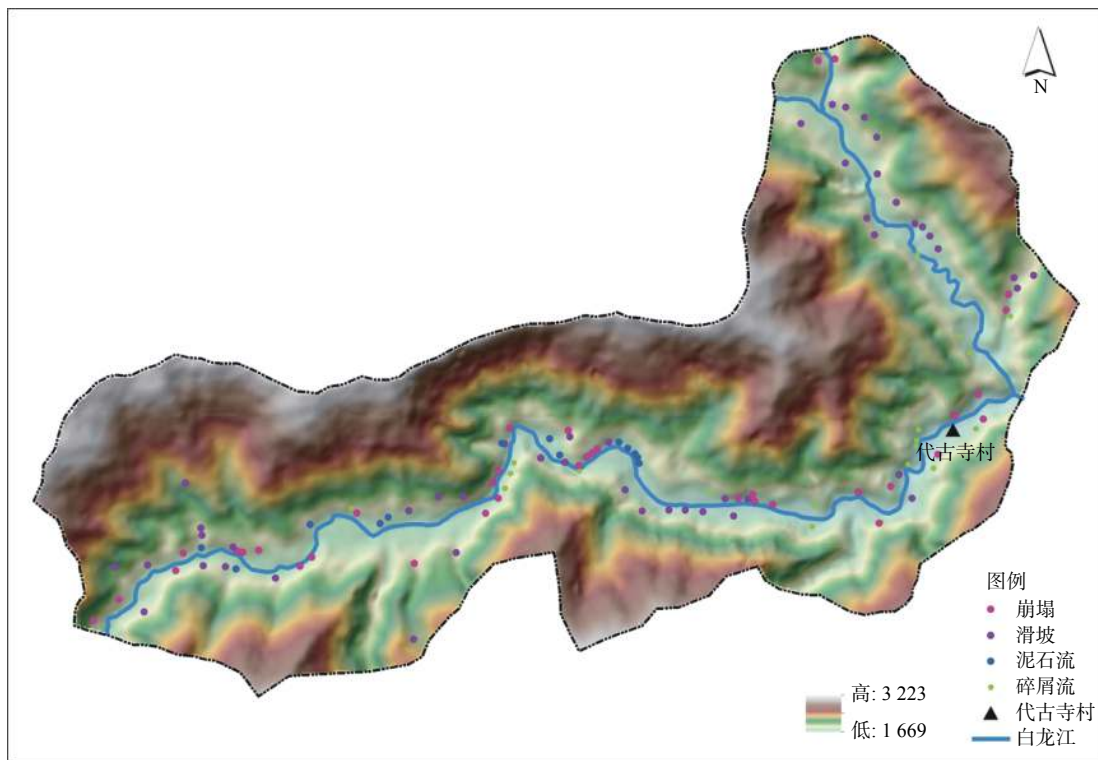


图 1 研究区地质灾害点分布

Fig. 1 Distribution of geological hazards in the study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

进行地质灾害易发性评价时,基础数据的来源、精度和处理方式都对评价结果有直接影响。主要

数据来源包括:分辨率为 30 m 的高程数据,用于提取高程、坡度和坡向等基本信息;断层等信息提取自白龙江流域地质图;野外调查和勘察资料,用于确定断层分布和地质灾害的分布情况。

## 2.2 研究方法

国内外专家学者针对滑坡易发性评估提出多种研究方法,目前常用于地质灾害易发性分析的方法有层次分析法和信息量模型等。层次分析法能反映各要素间的关联程度,且方法简便、易操作,对受多因素影响的地区有较好的适用性<sup>[16]</sup>。本文采用层次分析法对研究区地质灾害进行易发性评价,计算各指标因子的权重。

层次分析法在 1971 年由 Saaty<sup>[17]</sup> 提出,是一种多层次并进行赋权的决策分析方法,主要过程为:首先建立多层次结构模型,依次为目标层、准则层和要素层;然后采用 1~9 标度法构建判断矩阵(表 1),对每一层的因素进行两两对比,计算各要素层与准则层的权重;最后进行一致性检验,利用一致性比率( $R_C$ )判断矩阵一致性。若  $R_C < 0.1$ ,则一致性较好;若  $R_C > 0.1$ ,则一致性检验不通过,需调整判断矩阵重新计算权重和一致性检验,至  $R_C < 0.1$  为止<sup>[18-21]</sup>。

表 1 判断矩阵标度及其含义

Tab. 1 Judgment matrix scale and its meaning

标度	含义
1	$i$ 和 $j$ 同样重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 极端重要
2 4 6 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若 $i$ 和 $j$ 重要性之比为 $B_{ij}$ ,则 $j$ 和 $i$ 重要性之比为 $1/B_{ij}$

计算判别矩阵的一致性检验指标

$$I_C = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

计算一致性比率

$$R_C = I_C / I_R \quad (2)$$

式中: $I_C$ 是判断矩阵的一致性指标; $\lambda_{\max}$ 是矩阵的最大特征根; $n$ 是判断矩阵的阶数; $I_R$ 是判断矩阵的平均随机一致性指标(表 2); $R_C$ 是一致性比率。

通过构建判断矩阵并对判断矩阵进行一致性检验后得出  $R_C$  值小于 0.1,说明该判断矩阵通过一致性检验,经过计算得到个指标因子的权重为 (0.241 5, 0.150 2, 0.081 5, 0.163 1, 0.096 6, 0.267 1)。

表 2 平均随机一致性指标

Tab. 2 Average random consistency index

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_R$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

## 3 评价指标体系的建立

### 3.1 评价单元的确定

进行地质灾害易发性评价时,需要选择合适的评价单元,目前常用的划分方法有栅格单元划分、自然斜坡单元划分、均一条件与行政单元划分等<sup>[22]</sup>。其中栅格单元划分与斜坡单元划分应用较为广泛,斜坡单元划分时斜坡的选择需要进行人工修正,降低了其应用性,而栅格单元原理简单,便于进行空间叠加分析,可根据精度要求灵活划分栅格,本文采用栅格单元作为评价单元,进行易发性评价。

### 3.2 评价因子的选取与分析

影响地质灾害易发性评价的因素类型复杂,因此在确定评价指标时,应综合考虑研究区内地形地貌,地层岩性,地质构造等因素的影响<sup>[23-25]</sup>。研究区地势总体呈北西高、南东低的态势,两岸地形陡峻,天然边坡一般为  $47^\circ \sim 65^\circ$ 且局部直立,位于造部-武都逆冲推覆构造带,河道弯曲、水流湍急,河谷形态呈 V 形且多为斜向谷的特征,同时由于研究区范围较小,岩性单一,所以选择高程、坡度、坡向、距断层距离、岩层倾向与坡向关系和距水系距离 6 个因子作为评价指标,对研究区进行易发性评价,并结合地质灾害点的分布验证易发性评价结果的准确性。根据各评价因子的特点和对地质灾害的贡献程度,结合众多学者对评价因子的量化分级方法,对研究区 6 个评价因子进行量化分级。各评价因子的分级与权重见表 3。

#### 3.2.1 高程

高程对地质灾害的发育影响体现在多个方面,不同高程地区有不同的植被覆盖率、植被类型、土壤类型和土壤含水率等。同时,高程越大的地区,受到人类工程扰动的可能性越低。对 DEM 数据进行分级,见图 2(a)。将地质灾害点分布与高程图叠加可知,地质灾害点主要集中在 2 000 m 及以下,随着高程的增加,地质灾害点的分布随之减少,见图 2(b)。

#### 3.2.2 坡度

坡度是地质灾害发育的重要因素之一。坡度不仅对斜坡内的应力分布、植被覆盖度、松散堆积物



有影响,而且对斜坡的地表水径流、斜坡地下水的补给与排泄等都有影响,控制着斜坡的稳定性。根据 DEM 数据提取坡度,见图 3(a)。将地质灾害点

分布与坡度图叠加并进行统计分析可知,地质灾害点主要分布在 15°~30°范围,且地质灾害点随着坡度的增加而减小,见图 3(b)。

表 3 评价因子分级与权重系数

Tab. 3 Evaluation factor classification and weight coefficient

评价指标	权重	指标分级			
		1	2	3	4
高程/m	0.241 5	>2 600	>2 300~≤2 600	>2 000~≤2 300	≤2 000
坡度/(°)	0.150 2	0~≤15	>45	>30~≤45	>15~≤30
坡向/(°)	0.081 5	>247.5~≤292.5	>292.5~≤337.5	>337.5~360,0~≤67.5, >202.5~≤247.5	>67.5~202.5
距断层距离/m	0.163 1	>1 500	>1 000~≤1 500	>500~≤1 000	<500
岩层倾向与坡向关系	0.096 6	垂直	-	反倾	顺倾
距水系距离/m	0.267 1	≥600	≥400~≤600	≥200~≤400	<200

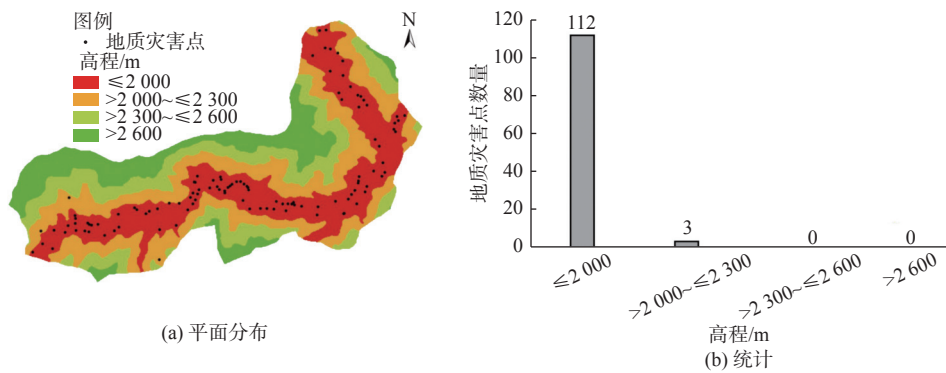


图 2 地质灾害分布与高程的关系

Fig. 2 Relationship between geological hazards distribution and elevation

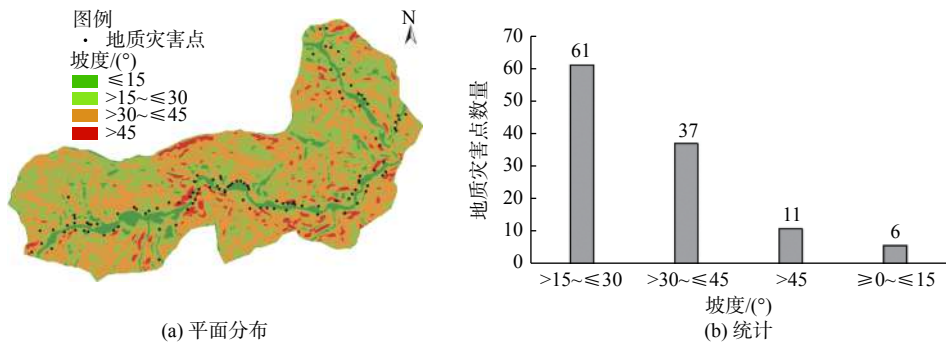


图 3 地质灾害分布与坡度的关系

Fig. 3 Relationship between geological hazards distribution and slope

### 3.2.3 坡向

坡向是影响斜坡承受太阳光照强度的决定性因素,不同的光照强度对斜坡表面的物质发育、斜坡的地下水分布及岩土物理力学性质的影响程度不

同,日照时间长的区域,斜坡内含水量低,风化程度高,地表物质较为松散,经过雨水冲蚀后,易发生滑动,导致不同坡向斜坡的稳定性存在差异。由 DEM 数据提取坡向,见图 4(a),将地质灾害点分布

和坡向图叠加可知,地质灾害点在各坡向都有分布,其中,东、东南、南方向为地质灾害发育的优势坡向,见图 4(b)。

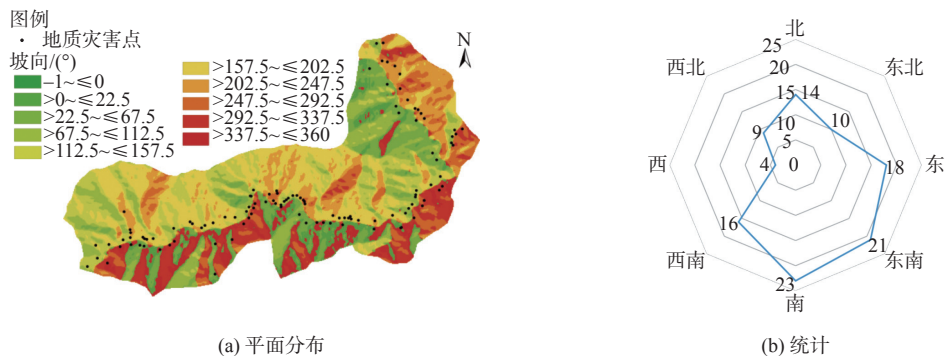


图 4 地质灾害分布与坡向的关系

Fig. 4 Relationship between geological hazards distribution and aspect

### 3.2.4 距断层距离

断层两侧通常是发生地质灾害的重点区域,断裂带上的岩石受到挤压而产生大量的碎屑物质,并且易被风化侵蚀,岩层的连续性和完整性遭到破坏。

从白龙江流域地质图和野外勘察获得断层缓冲区,见图 5(a)。将距断层距离图与地质灾害分布叠加可知,地质灾害点主要集中在距离断层小于 500 m 的范围内,共 102 处,占总地质灾害点的 88.7%,见图 5(b)。

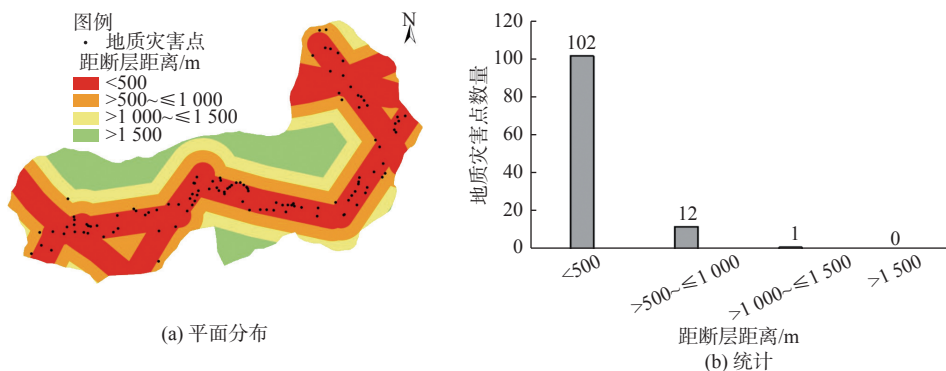


图 5 地质灾害分布与距断层距离的关系

Fig. 5 Relationship between geological hazards distribution and distance from fault

### 3.2.5 岩层倾向与坡向关系

研究区岩层倾向与坡向关系包括顺倾、反倾和垂直关系。顺倾关系主要分布在研究区东西走向区域的北部,反倾关系主要分布在研究区东西走向区域的南部,垂直关系分布在研究区的南北走向区域。通过野外勘察和坡向数据获得岩层倾向与坡向关系,见图 6(a)。由叠加地质灾害点分布可知,顺倾关系区域内共有地质灾害点 58 处,占总地质灾害点的 50.4%,由此可知顺倾关系对边坡稳定性的影响最大,见图 6(b)。

### 3.2.6 距水系距离

研究区内水系发达。河流对斜坡具有冲刷、侵蚀和软化的作用,距离河流越近的区域,水对岩石的侵蚀作用增强,斜坡体的稳定性下降,地质灾害发生的可能性增大。通过 GIS 缓冲区分析,获得距

水系距离影响范围,见图 7(a)。将距水系距离与地质灾害分布叠加可知,地质灾害点在小于 200 m 的范围内共有 77 处,距离水系越远,地质灾害点分布越少,见图 7(b)。

## 4 地质灾害易发性评价结果分析

在 ArcGIS 软件平台下,先分别基于高程、坡度、坡向、距断层距离、岩层倾向与坡向关系和距水系距离共 6 个地质灾害评价因子等级取值构建影响因子栅格图层,然后利用空间分析中的栅格计算工具对各评价因子的栅格图层进行加权叠加,得到研究区地质灾害易发性评价栅格图,最后采用 ArcGIS 中的栅格重分类工具,使用自然断点法将地质灾害易发性评价栅格图分为高易发区、中易发区、低易发区和极低易发区 4 个等级。由此得到研究区地质灾害易发性分区图,见图 8。

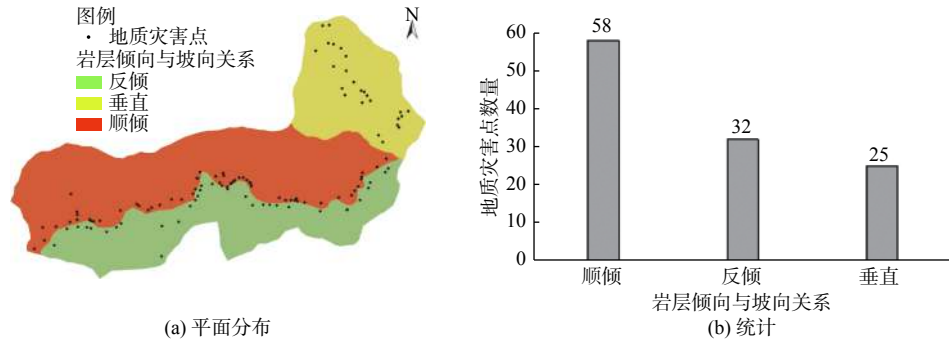


图 6 地质灾害分布与岩层倾向与坡向关系的关系

Fig. 6 Relationship between the distribution of geological hazards and the relationship between the dip and slope direction of rock strata

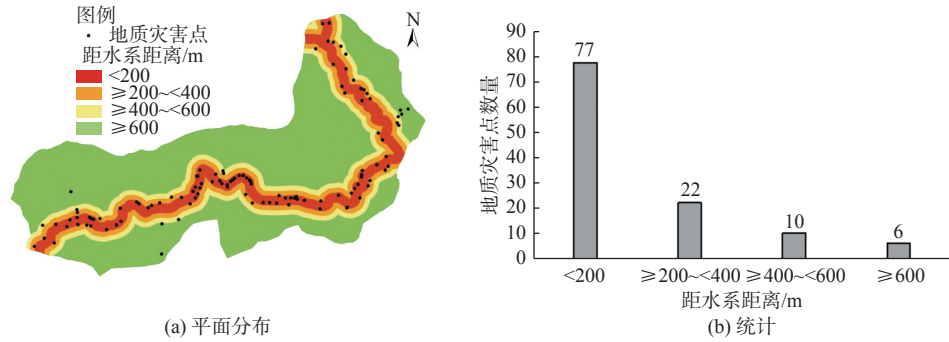


图 7 地质灾害分布与距水系距离的关系

Fig. 7 Relationship between geological hazards distribution and distance from the water system

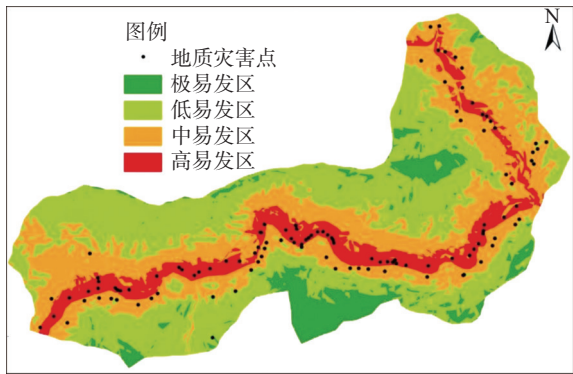


图 8 地质灾害易发性分区

Fig. 8 Geological hazard susceptibility zoning map

根据易发性分析结果(表 4)可知:高易发区面积为 9.6 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 10.91%,地质灾害点 60 处,灾害密度高,主要与研究区内的水库运行有关,受到库水位升降和河流冲刷的影响,并且该区域内断裂带分布密集,人类活动强烈;中易发区面积为 30.72 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 34.94%,地质灾害点 50 处,灾害密度较低,主要原因是该区域坡度大,岩土体风化程度高,受到人类活动干扰程度较高,植被覆盖率低;低易发区面积为 40.1 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 45.59%,地质灾害点 5 处,灾害密度低,主要分布在海拔相对较高、受河流影响小、坡度大和基本无断裂带通过的区域;极低易发区面积

为 7.52 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 8.56%,无地质灾害点分布,该区域主要分布在高程较高的位置,区域内坡度较缓,植被覆盖率高,覆盖物为林地和草地,受人类活动干扰程度小。将评价结果与易发性分区图对比,中易发区和高易发区占研究区的 45.85%,其中高易发区面积只占研究区面积的 10.91%,但地质灾害点却占总地质灾害点的 52.17%,表明该区域地质灾害分布密集,危险程度较高。

表 4 研究区地质灾害易发性分区统计

Tab. 4 Statistics on the susceptibility of geological hazards in the study area

易发性等级	分区面积/ km <sup>2</sup>	分区比例/ %	地质灾害数量/ 个	灾害比例/ %	灾害密度/ 100 km <sup>-2</sup>
极低易发区	7.52	8.56	0	0	0
低易发区	40.10	45.59	5	4.35	0.12
中易发区	30.72	34.94	50	43.48	1.63
高易发区	9.60	10.91	60	52.17	6.25

## 5 结论

在综合分析研究区地形地貌、地质构造以及地质灾害空间分布的基础上,采用层次分析法开展白龙江引水工程水源区地质灾害易发性评价,评价结果反映了研究区内地质灾害的发育特征,可为库区

防灾减灾提供决策依据,为水库安全建设与运行管理提供技术支持。主要结论如下:

构建白龙江引水工程水源区的地质灾害易发性评价指标体系,选取6个评价因子,运用层次分析法计算指标权重,以空间栅格叠加的方法,进行地质灾害易发性评价,为峡谷型水库进行地质灾害评价提供借鉴。

采用历史地质灾害分布与评价结果叠加的方法,检验评价结果的合理性,并分析研究区地质灾害分布发育特征。研究表明,区内历史地质灾害点主要分布在高程2300 m以下、坡度15°~30°、距水系200 m以内的区域,坡向对地质灾害的发生也有影响,其中南和东南方向的地质灾害分布相对较多。

#### 参考文献(References):

- [1] 解明礼,巨能攀,赵建军,等.区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(7): 1003-1014. (XIE M L, JU N P, ZHAO J J, et al. Comparative analysis on classification methods of geological disaster susceptibility assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1003-1014. (in Chinese)) DOI: [10.13203/j.whugis20190317](https://doi.org/10.13203/j.whugis20190317).
- [2] 陈菊艳,朱斌,彭三曦,等.基于AHP和GIS的矿区岩溶塌陷易发性评估:以贵州林歹岩溶矿区为例[J].*自然灾害学报*, 2021, 30(5): 226-236. (CHEN J Y, ZHU B, PENG S X, et al. Assessment of susceptibility to karst collapse in mining area based on AHP and GIS: A case study in Lindai karst mining area in Guizhou[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 226-236. (in Chinese)) DOI: [10.13577/j.jnd.2021.0522](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2021.0522).
- [3] 谭真艳,罗晓龙,陈怡,等.渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价:以巫溪县宁桥片区为例[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 70-78. (TAN Z Y, LUO X L, CHEN Y, et al. Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 70-78. (in Chinese)) DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-08](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-08).
- [4] 吴季寰,张春山,孟华君,等.抚顺西露天矿区滑坡易发性评价与时空特征分析[J].*地质力学学报*, 2021, 27(3): 409-417. (WU J H, ZHANG C S, MENG H J, et al. Temporal and spatial characteristics of landslide susceptibility in the West Open-pit Mining area, Fushun, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(3): 409-417. (in Chinese)) DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.03.037](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.03.037).
- [5] 闫怡秋,杨志华,张绪教,等.基于加权证据权模型的青藏高原东部巴塘断裂带滑坡易发性评价[J].*现代地质*, 2021, 35(1): 26-37. (YAN Y Q, YANG Z H, ZHANG X J, et al. Landslide susceptibility assessment based on weight-of-evidence modeling of the Batang fault zone, Eastern Tibetan Plateau[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 26-37. (in Chinese)) DOI: [10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.091](https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.091).
- [6] 田乃满,兰恒星,伍宇明,等.人工神经网络和决策树模型在滑坡易发性分析中的性能对比[J].*地球信息科学学报*, 2020, 22(12): 2304-2316. (TIAN N M, LAN H X, WU Y M, et al. Performance comparison of BP artificial neural network and CART decision tree model in landslide susceptibility prediction[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(12): 2304-2316. (in Chinese)) DOI: [10.12082/dqxxkx.2020.190766](https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2020.190766).
- [7] 孙德亮,马祥龙,唐小娅,等.基于不同因子分级的滑坡易发性区划对比:以万州区为例[J].*重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(5): 43-54. (SUN D L, MA X L, TANG X Y, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping based on different factor classifications: Taking Wanzhou district as an example[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 2021, 38(5): 43-54. (in Chinese)) DOI: [10.11721/cqnuj20210511](https://doi.org/10.11721/cqnuj20210511).
- [8] 潘汀超,戚蓝,田福昌,等.组合赋权-模糊聚类算法的改进及其在洪灾风险评价的应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 38-56. (PAN T C, QI L, TIAN F C, et al. Improvement of combination weighing-fuzzy clustering algorithm and its application in flood risk assessment[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 38-56. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0091](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0091).
- [9] 成陆,付梅臣,王力.基于RS和GIS的县域洪涝灾害风险评估[J].*南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 37-44,68. (CHENG L, FU M C, WANG L. Comprehensive flood risk assessment based on RS and GIS in a country area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 37-44,68. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0133](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0133).
- [10] 陈立华,李立丰,吴福,等.基于GIS与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J].*地球与环境*, 2020, 48(4): 471-479. (CHEN L H, LI L F, WU F, et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 471-



479. (in Chinese)) DOI: [10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.060](https://doi.org/10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.060).
- [11] 徐瑞池, 李秀珍, 胡凯衡, 等. 横断山区山地灾害的动态风险性评价[J]. *山地学报*, 2020, 38(2): 222-230. (XU R C, LI X Z, HU K H, et al. A dynamic risk assessment for mountain hazards in the Hengduan Mountain Region, China[J]. *Mountain Research*, 2020, 38(2): 222-230. (in Chinese)) DOI: [10.16089/j.cnki.1008-2786.000504](https://doi.org/10.16089/j.cnki.1008-2786.000504).
- [12] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1782-1791. (ZHOU C, CHANG M, XU L, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782-1791. (in Chinese)) DOI: [10.13203/j.whugis20200261](https://doi.org/10.13203/j.whugis20200261).
- [13] 施紫越, 朱海燕, 王晶菁, 等. 耦合模型视角下的湘西州土质滑坡易发性探讨[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 377-383. (SHI Z Y, ZHU H Y, WANG J J, et al. Analysis on susceptibility assessment of soil landslide in Xiangxi prefecture from the perspective of coupling model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 377-383. (in Chinese)) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.20210111.001](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.20210111.001).
- [14] 杨硕, 李德营, 严亮轩, 等. 基于随机森林模型的乌江高陡岸坡滑坡地质灾害易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(4): 131-138. (YANG S, LI D Y, YAN L X, et al. Landslide susceptibility assessment in high and steep bank slopes along Wujiang River based on random forest model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(4): 131-138. (in Chinese)) DOI: [10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20200956](https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20200956).
- [15] 邓念东, 崔阳阳, 郭有金. 基于频率比-随机森林模型的滑坡易发性评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(34): 13990-13996. (DENG N D, CUI Y Y, GUO Y J. Frequency ratio-random forest-model-based landslide susceptibility assessment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(34): 13990-13996. (in Chinese)) DOI: [cnki:sun:kxjs.0.2020-34-006](https://doi.org/cnki:sun:kxjs.0.2020-34-006).
- [16] 李萍, 叶辉, 谈树成. 基于层次分析法的永德县地质灾害易发性评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 394-399, 406. (LI P, YE H, TAN S C. Evaluation of geological hazards in Yongde County based on analytic hierarchy process[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 394-399, 406. (in Chinese)) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.045](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.045).
- [17] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 22-71.
- [18] 崔志超, 王俊豪, 崔传峰, 等. 基于层次分析法和模糊数学相结合的甘肃东乡八丹沟泥石流易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(1): 44-50. (CUI Z C, WANG J H, CUI C F, et al. Evaluation of the susceptibility of debris flow in Badan Gully of Dongxiang County of Gansu based on AHP and Fuzzy mathematics[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(1): 44-50. (in Chinese)) DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.07](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.07).
- [19] 曾斌, 杨木易, 邵长杰, 等. 基于层次分析法的杭长高速岩溶塌陷易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(1): 29-38. (ZENG B, YANG M Y, SHAO C J, et al. Susceptibility assessment of karst collapse of Hangchang expressway projects based on analytic hierarchy process[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(1): 29-38. (in Chinese)) DOI: [10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2018.01.006](https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2018.01.006).
- [20] 胡致远, 罗文强, 晏鄂川, 等. 基于改进层次分析法的英山县地质灾害易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(4): 28-32, 40. (HU Z Y, LUO W Q, YAN E C, et al. IAHP-based evaluation of susceptibility of geological hazard[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(4): 28-32, 40. (in Chinese)) DOI: [10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2018.04.006](https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2018.04.006).
- [21] 刘宇恒, 邓辉, 熊倩莹. 基于层次分析法的茂县斜坡地质灾害易发性评价[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(5): 31-35. (LIU Y H, DENG H, XIONG Q Y. AHP-based evaluation of slope geo-hazard susceptibility of Maoxian County, Sichuan, China[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(5): 31-35. (in Chinese)) DOI: [10.11988/ckyyb.20160155](https://doi.org/10.11988/ckyyb.20160155).
- [22] 陈飞, 蔡超, 李小双, 等. 基于信息量与神经网络模型的滑坡易发性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 2859-2870. (CHEN F, CAI C, LI X S, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on information volume and neural network model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 2859-2870. (in Chinese)) DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2019.1094](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2019.1094).
- [23] 罗守敬, 王珊珊, 付德荃. 北京山区突发性地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 126-133. (LUO S J, WANG S S, FU D Q. Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 126-133. (in Chinese)) DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-17](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-17).



- [24] 唐兴港,王慧勇,黄豆,等.长江中下游地区滑坡的易发性评价:以江西省为例[J].*水土保持通报*, 2021, 41(3): 166-172. (TANG X G, WANG H Y, HUANG D, et al. Evaluation of landslide susceptibility in middle and lower reaches of Yangtze River: Taking Jiangxi Province as a case study[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 166-172. (in Chinese)) DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.02](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.02).
- [25] 祁于娜,王磊.层次分析-熵值定权法应用于山区城镇地质灾害易发性评价[J].*测绘通报*, 2021(6): 112-116. (QI Y N, WANG L. Application of AHP-entropy weight method in hazards susceptibility assessment in mountain town[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(6): 112-116. (in Chinese)) DOI: [10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0187](https://doi.org/10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0187).

## Geological hazard susceptibility assessment based on GIS in water source area of Bailongjiang river water diversion project

WANG Xiaodong<sup>1</sup>, LUO Yuan<sup>1</sup>, FU Jingbao<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Institute of Engineering Research Center of Resources Environment and Characteristic Tourism, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** The water resources in Gansu province are short and unevenly distributed in time and space, which does not match the economic and social development, population, and cultivated land distribution. The construction of water conservancy project is the key to solving this problem.

Taking the water source area of the Bailong River diversion project in Gansu Province as the research area, the development of geological hazards within the influence area of the new reservoir was studied, which could provide support for the safe construction and operation of the reservoir. Based on remote sensing interpretation and field survey, 6 evaluation factors of geological hazard susceptibility were selected, which include elevation, slope, aspect, distance from the fault, the relationship between rock dip and aspect, and distance from the water system.

Based on geographical information system (GIS) spatial analysis technology and analytic hierarchy process, the relationship between evaluation factors and geological disasters was analyzed, and the susceptibility of geological disasters was carried out.

The historical geological hazards are mainly distributed in the area below 2 300 m elevation, 15° and 30° in slope, within 200 m from the river, and in the south and southeast of the study area. The medium and high-prone areas in the study area accounted for 45.85% of the total area, and geological hazard points accounted for 95.65% of the total geological hazard points.

The susceptibility evaluation result is consistent with the distribution of historical geological hazards in the research, which could provide prerequisites for disaster prevention and mitigation work in the reservoir area, and provide technical support for the safe construction and operation of reservoirs.

**Key words:** geological hazards; susceptibility evaluation; analytic hierarchy process; spatial analysis; GIS