



基于层次分析法的水库蓄水后滑坡易发性评价

周秀全, 黄海波, 郑宁, 施晓旺

浙江泰达安全技术有限公司, 浙江 杭州 310000

摘要: 水库库区地形地质和水位地质条件复杂, 蓄水后受降雨和库水位变动影响容易产生滑坡、崩塌等次生地质灾害, 严重威胁水库安全运行和附近居民安全。本文依托层次分析法, 以某蓄水水库为研究对象, 在充分收集其地形地质和水文条件资料的基础上, 选取地形地貌、地层岩性、坡度、坡向、地灾点密度、地灾点面积、降雨、库水变动幅度和地震强度等 9 个致滑因子, 构建评价矩阵和滑坡危险性计算评价方法。依据评价成果划分 4 个滑坡危险性等级, 借助 MapGIS 软件生成库区潜在滑坡危险性分区图。该分区图与遥感解译的库区滑坡体分布点高度吻合, 验证了评价模型的合理性。

关键词: 层次分析法; 水库; 蓄水; 滑坡; 地质灾害

SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT OF LANDSLIDE AFTER RESERVOIR IMPOUNDMENT BASED ON ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

ZHOU Xiu-quan, HUANG Hai-bo, ZHENG Ning, SHI Xiao-wang

Zhejiang Taida Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China

Abstract: Reservoir areas are prone to secondary geological disasters such as landslides and collapses due to complex geological conditions involving topography and water level, which seriously threatens the safety of reservoirs and nearby residents. Taking a certain impoundment reservoir as the research object, 9 sliding factors including landform, stratum lithology, slope gradient, aspect, density and area of geohazard sites, precipitation, water storage variation and earthquake intensity are selected to construct the evaluation matrix and landslide risk calculation method on the basis of adequate data collection of topographic and hydrological conditions through analytic hierarchy process (AHP). Four landslide risk grades are divided according to the evaluation results, which then generate the potential landslide risk zoning map of the reservoir area by MapGIS. The zonation coincides highly with the distribution of landslide bodies interpreted by remote sensing, which proves that the evaluation model is effective.

Key words: analytic hierarchy process; reservoir; impoundment; landslide; geological hazard

0 引言

现阶段我国部分水库在蓄水后发生了一体系列次生地质灾害, 对当地环境和生产生活安全造成较大影响。根据现有文献研究^[1-3], 由于水库蓄水造成的滑坡、崩塌地质灾害已经成为库区地质灾害的主要来源, 并

且这类地质灾害受当地降雨特征和库水位变动影响, 具有复发性和周期性的特点。另外, 由于滑坡、崩塌等地质灾害发生机理复杂, 传统的勘察手段和分析方法无法精确预测滑坡破坏机理, 主流的滑坡防治手段仍然以预警和预防为主。滑坡一旦发生, 其量能巨大, 无

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-10-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 浙江省水利厅科技项目“基于水文水动力耦合模型的城市实时洪涝预警研究与应用”(RC1974).

作者简介: 周秀全(1979—), 男, 工程师, 主要从事水利水电建筑工程工作, 通信地址 浙江省杭州市拱墅区祥园路 28 号, E-mail/guikf703@sina.com

法通过人工干预阻止其继续发展,因此提前规避滑坡灾害及其影响区是最为经济的方案^[4-8]。

针对库水位滑坡地质灾害的发生特点,本文依托于层次分析法,以某水库滑坡体为研究对象,在对其地形地质和水文地质条件分析的基础上,开展滑坡至滑因子研究并建立滑坡易发性量化评价方法。

1 研究区概况

研究区水库位于山西省吕梁山脉西麓的南川河上,是一座以防洪灌溉为主,兼顾发电、养殖的年调节中型水库,控制流域面积 309 km²。随着社会经济的发展,水库下游乡镇、工矿企业的数量、规模迅速扩大,城市生活、工业用水量骤增,而且需水方式也发生了明显的变化,要求水库的调节方式必须适应发展的需要。由于库区水位变动幅度增大,现状条件下水库周边岩体稳定性受到一定程度影响,部分区域已经发生明显的崩塌滑坡迹象,一方面可能影响水库正常运行,另一方面威胁到附近居民的安全。

1.1 区域地质

在区域地质构造上,研究区跨越吕梁-太行断块之次级构造单元吕梁块隆的离石-中阳复向斜。该复向斜大致呈菱形,南北向展布,位于吕梁块隆中西部,西邻兴县-石楼南北向褶皱带,东接关帝山穹状隆起。该菱形复向斜大部分被第四系覆盖,基岩一般只出露于沟谷,向斜轴部地层为石炭系一二叠系,翼部地层为寒武系-奥陶系。

研究区出露的地层主要有太古宇吕梁群、寒武系中统徐庄组及新生界第四系。岩性包括变粒岩、混合花岗岩、黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩,总厚度大于 1000 m,在区内大面积出露,是构成基岩山体的主要地层。第四系地层是库周及库底的主要上部岩土层,分布于河道及沟谷,主要有棕红色低液限黏土、灰黄色低液限粉土、低液限粉土、级配不良砂及卵石混合土层,一般具二元结构,厚度 5~30 m。

1.2 库区地质

水库坝址位于南川河上,坝址以上河流长 30.2 km,河道纵坡 15.4%,坝址附近河道纵坡 12.2‰,河道稳定。南川河库区段整体走向 334°,河床宽 80~350 m。两岸发育有漫滩及 I 级阶地,在近坝区宽 30~60 m。库区沿河两岸除局部覆盖有第四系中、上更新统黄土外,

基本是由吕梁群混合花岗岩、变粒岩、混合岩化黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩构成基岩山体,山顶高程均在 1200 m 以上。

库区发育的地层主要为太古宇吕梁群、寒武系徐庄组及第四系。库区主要淤积物为级配不良砂、低液限黏土及低液限粉土,厚 1~17.5 m,主要分布于近坝库岸。坝体堆积物为低液限粉土、低液限黏土,偶含小砾石,结构松散,厚 0~36.5 m。

研究区地质构造较为简单,主要发育两条主要断层:F1 逆断层位于库区中庙附近,走向北北东并横跨河床,倾向南东东,地表处倾角约 75°,东岸庙后沟口可见断层上下盘均为太古宇变质岩,垂直断距大于 50 m;F2 逆断层位于坝轴线下游 600 m 处,走向北西并横跨河床,倾向西南,地表处倾角 62°,上盘为太古宇变质岩,下盘为寒武系页岩,接触处有角砾岩,断层带宽约 1 m,垂直断距大于 50 m。

库区内地下水可分为变质岩类裂隙水及松散岩类孔隙水两种类型。变质岩类裂隙水贮存于岩层风化带及裂隙中,补给主要为大气降水。排泄为向下游的径流或向沟谷的侧向径流。松散岩类孔隙水含水层岩性主要为全新统低液限粉土及卵石混合土,大气降水及两岸山体地下水是主要的补给来源,地下水径流方向与地形倾斜方向基本一致,向下游河谷低凹地带径流。

1.3 库区滑坡地质灾害

库区两岸支流和冲沟众多,库盆呈树枝状。

上游库段总体为较开阔的峡谷型库盆,正常蓄水位高程以上岸坡多较陡,覆盖层厚度变化比较大,基岩出露普遍,但风化强烈。库岸以岩质岸坡为主,局部为土质岸坡。两岸冲沟较多,且比较宽长。库尾(江边寨)、河流急转弯凸岸、支流和冲沟的出口交汇处等部位河谷谷底一般比较宽阔,形成比较开阔的库盆,沉积有较厚土层。该库段岸边村寨众多,居民房屋较多;同时,有多条高速公路及铁路通过库区,库岸失稳的危害性较大。

下游库段为比较狭窄的峡谷型库盆,正常蓄水位高程 910 m 以上基本为陡峻基岩岸坡,覆盖层较薄,基本为岩质岸坡。两岸冲沟少且短,右岸发育有谷顶河。河流急转弯凸岸、支流和冲沟的出口交汇处等部位不存在宽阔谷底。该库段的村寨多分布在两岸山顶,岸坡上居民房屋极少,也没有高速公路、铁路等通过,库

岸失稳的危害性很小.

综合判断库区范围内产生的库岸失稳形式主要为塌岸、塌滑体,局部基岩陡壁存在小规模崩塌的可能.

2 基于层次分析法的评价思路

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)首先应用于安全与系统工程中的风险分析,其主要思路是将决策某事件发生的因素进行划分并量化,在此基础上进行决策分析^[9-10].层次分析法每一级矩阵代表一个影响事件发生的因子,通过实地调研分析对每个因子赋予权重值,然后进行打分从而得到事件发生的概率.层次分析法的基本工作流程如图 1.

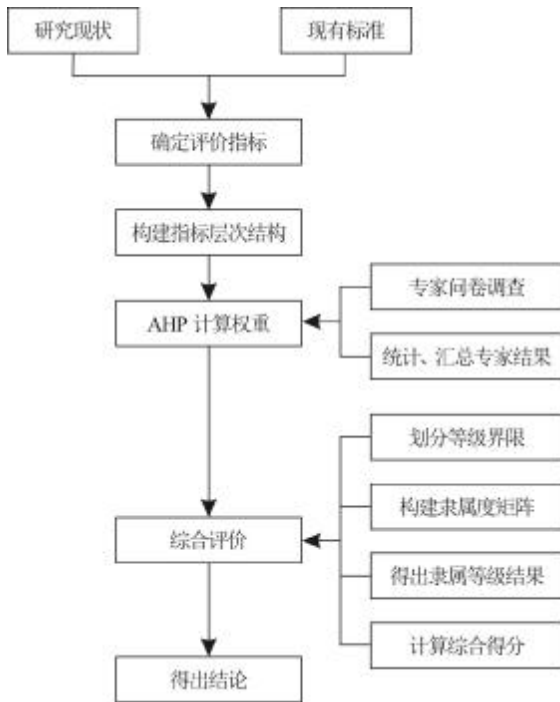


图 1 层次分析法工作流程

Fig. 1 Workflow of analytic hierarchy process

通过对该水库基本地形地质条件分析认为,影响滑坡稳定的灾害因素包括地形地貌、地质、气象、水文、构造以及水位变化等,其中库水位变化过程是影响研究区滑坡危险性的重要考量因素^[11-15].综合分析,库区主要的滑坡致害因子分为灾害发育程度、地形地质情况和诱发因子 3 个大类(分别用 B1、B2、B3 表示).其中,灾害发育程度包括灾害点密度和灾害发展面积;地形地质情况包括库区地层岩性、分布高程、坡向、坡度;诱发因子包括库水消落高度、地震、降雨强度(由 C1—

C9 表示,见图 2).

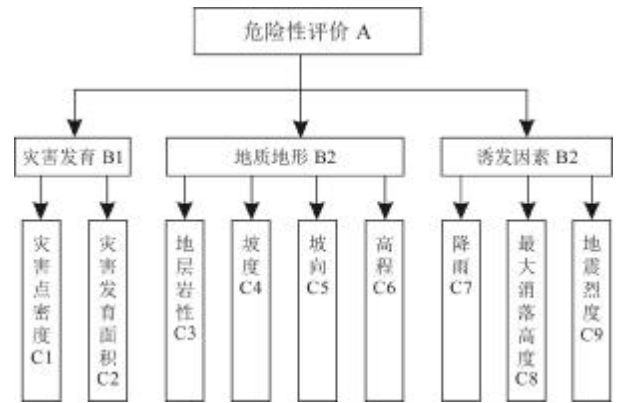


图 2 基于层次分析法的滑坡灾害因子指标

Fig. 2 Landslide hazard factor index based on AHP

3 基于层次分析法的库内滑坡稳定性评价

3.1 评价指标的确定

合理的评价指标是确保层次分析法精确度的重要前提.通过研究大量文献中有关库水位变动过程中的滑坡稳定性问题^[16],综合确定了影响库水位变动下滑坡灾害发生的 9 种主要因子并对其等级进行划分(表 1).

表 1 致滑因子及其量化指标综合分类表

Table 1 Comprehensive classification of landslide factors and their quantitative indexes

指标大类	指标小类	量化等级与划分依据			
		1	2	3	4
灾害程度 B1	灾害点个数	0-3	3-6	6-9	大于 9
	灾害点面积	0-1	1-3	3-6	大于 6
诱发因素 B2	降雨强度/ (mm/d)	0-500	500-1000	1000-1500	大于 1500
	库水变动幅度	0-20	20-30	30-60	大于 60
地形地质 B3	地震烈度	V	VI	VII	VIII及以上
	地层岩性	坚硬岩	中硬岩	较软岩	软岩及覆盖层
	分布高程/m	0-1000	1000-1500	1500-2000	大于 2000
	地形坡度/(°)	0-15	15-30	30-45	大于 45
	坡面倾向/(°)	0-90	90-180	180-270	270-360

3.2 评价矩阵构建

本研究采用两层判断矩阵法,即构造 A-B 和 B-

C. 每个判断矩阵之间的相互关系通过以往水库区滑坡灾害的研究认识和遥感解译的统计分析成果来综合判断. 为了直观反映判断各个子因素 C1—C9 之间的关联过程,采用运筹学的标度法^[17-20](表 2).

表 2 运筹标度指标

Table 2 Scale indexes of logistics operation research

标度值 i	代表意义
1	两个子因子 C1 与 Ci 之间存在同等影响
3	两个子因子 C1 与 Ci 之间一方稍强
5	两个子因子 C1 与 Ci 之间存在明显一方更强
7	两个子因子 C1 与 Ci 之间,Cj 比 C1 影响非常强
9	两个子因子 C1 与 Ci 之间,Cj 比 C1 绝对强
2/4/6/8	两个子因子 C1 与 Ci 之间影响程度无法完全比较
1/i	两者之间存在反向关系

通过对灾害发育程度、地形地质和诱发因素 3 个 B 矩阵与危险性 A 之间的关联度分析,建立了 A-B 矩阵如下:

$$A-B = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 9 \\ 4 & 1 & 5 \\ 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

然后,分别将 B1—B3 矩阵与 C 之间的关系采用同样方法建立 B-C 矩阵:

$$B1-C = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$B2-C = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 \\ 0.5 & 1 & 1 & 5 \\ 0.5 & 1 & 1 & 5 \\ 0.5 & 2 & 2 & 5 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$B3-C = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 0.3 & 1 & 5 \\ 0.2 & 0.3 & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

其中,B1-C 表示灾害发育程度与灾害点分布、灾害点密度之间的相关性;B2-C 表示地形地质因素与地貌、岩性、坡度和坡向之间的相关性;B3-C 表示诱发因素与地震、降雨和库水变动之间的相关性.

为了证明该矩阵的合理性,通过单层排序法计算每个判断矩阵所产生的特征根及其特征向量,然后利用特征向量建立由 C 到 B、由 B 到 A 的层次单排序计

算. 最后,依据计算结果对每个判断矩阵进行一致性检验,若结果小于 0.1,表明该判断矩阵是合理可信的,若不满足小于 0.1 则重新调整矩阵结构和判断方式,直至完成一致性检验. 具体步骤如下.

1) 对矩阵 C 采用和积法对每列向量进行归一化处理:

$$C_g = C_{ij} / \sum_{i=1}^n C_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

2) 对归一化后得到的矩阵 C_g 相加求和:

$$C_h = C_{ij} / \sum_{i=1}^n C_g \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

3) 将求和的 C_h 矩阵再次归一化得到特征向量:

$$W_i = C_h / C_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

4) 利用特征向量 W 获取特征根:

$$\lambda = [\sum_{i=1}^n (A \times W) / C_{ij}] / n \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

5) 进行一致性检验,其判别公式如下:

$$R_c = \frac{W_i}{R} \quad (9)$$

其中, R_c 表示一致性检验计算比率, R 表示随机一致性指标,其取值参考表 3.

表 3 随机一致性指标 R 取值

Table 3 Random consistency index R value

阶数	1	2	3	4	5	6
R 值	0.02	0.07	0.55	0.82	1.12	1.30

通过以上分析步骤得到 10 个判断矩阵之间的特征向量和特征根如下:

A-B 矩阵中, W₁=(0.122, 0.503, 0.347), λ=2.97, 计算求得其 R_c 值为 0.01, 满足一致性检验条件;

B1-C 矩阵中, W₂=(0.45, 0.45), λ=1.99, 计算得 R_c=0.02, 满足一致性检验标准;

B1-C 矩阵中, W₃=(1.66, 0.99, 0.99, 0.50), λ=3.99, 计算的 R_c=0.004, 满足一致性检验标准;

B1-C 矩阵中, W₁=(1.82, 0.66, 0.35), λ=3.97, 计算求得 R_c=0.03, 同样满足一致性检验标准.

一致性检验合格后综合层次分析成果, 获取在危险性分析过程中 B1—B3 和 C1—C9 的权重值, 见表 4.

从表 4 可以看出, 对库区滑坡影响最大的权重因子分别为 C1(地灾点密度)、C3(地层岩性)和 C8(库水

表4 水库滑坡区至滑因子权重评估成果

Table 4 Weight evaluation results of landslide factors in reservoir landslide area

C层编号	B1层权重	B2层权重	B3层权重	C层权重
C1	0.45	0	0	0.27
C2	0.45	0	0	0.08
C3	0	0	0	0.21
C4	0	0.44	0	0.15
C5	0	0.23	0	0.15
C6	0	0.23	0.11	0.18
C7	0	0.35	0.13	0.08
C8	0.5	0.11	0.21	0.33
C9	0.5	0	0.5	0.05

变动幅度), 其权重值分别为 0.27、0.21 和 0.33. 这一规律在滑坡地灾分析的宏观文献上能够得到验证.

3.3 滑坡危险性分区

为了分析库区蓄水后不同滑坡的危险性, 建立基于层次分析权重的危险性定量评估模型:

$$M_i = \sum_{i=1}^n C_i \times \lambda_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

其中, M_i 表示库区不同部位的滑坡危险性评估值; C_i 表示不同因子的权重值; λ_i 表示不同影响因子的灾害危险性赋值.

为了进一步提高库区滑坡危险性评估成果的直观可视化程度, 建立库区基于滑坡危险性等级的指标, 库区滑坡发生概率分为极高、高、中等、低共 4 个等级, 然后利用 MapGIS 叠加功能生成滑坡区危险性分区图 (图 3). 从图 3 可以发现, 库区左岸中游与右岸中游为滑坡地质灾害极高危险地区; 水库中上游和库尾段为滑坡易发高危区, 库区上游两侧为滑坡地质灾害低发区.

为了验证计算模型设计的合理性, 调取研究区卫星遥感图像的地质灾害点解译成果 (见图 4), 可以看出, 研究区滑坡地质灾害极高危地段 (图中红色部位) 均存在地质灾害发生点, 说明滑坡危险性区划图能够较好地反映现状条件下库区潜在滑坡体可能的分布范围. 建议重点关注红色和黄色区域的地质灾害问题, 加强巡查并落实合理的滑坡治理措施.

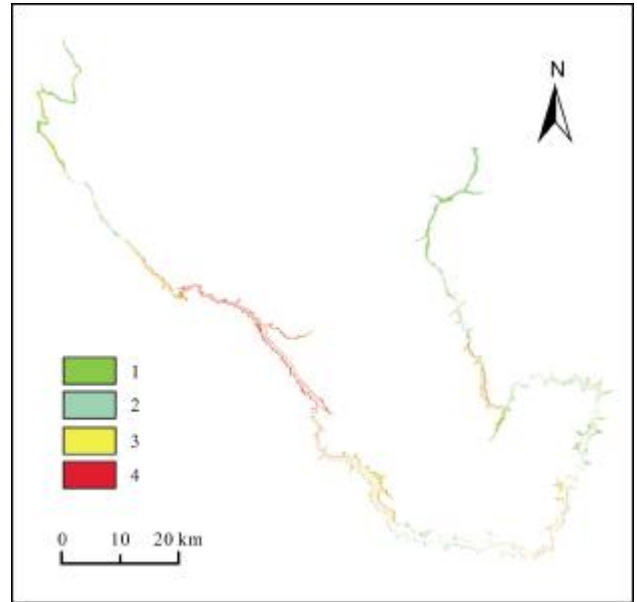


图3 基于层次分析法的库区滑坡危险性分区

Fig. 3 Landslide risk zoning in reservoir area based on AHP
1—低危险性 (low risk); 2—中危险性 (medium risk); 3—高危险性 (high risk); 4—极高危险性 (very high risk)

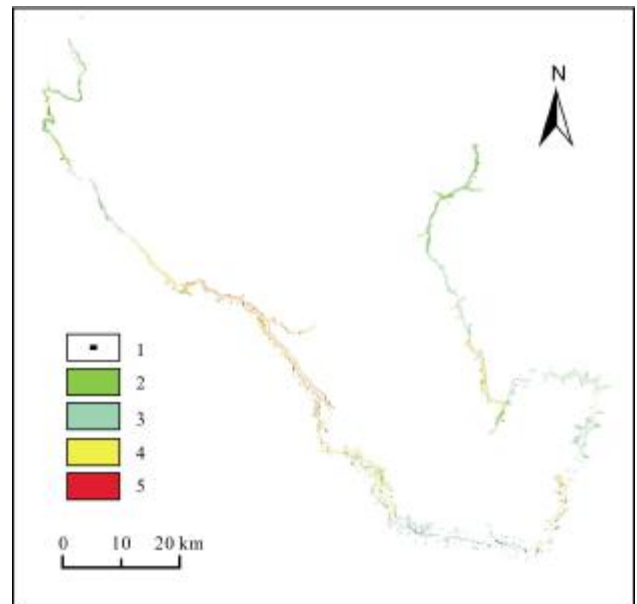


图4 研究区遥感解译地质灾害发生点分布图

Fig. 4 Distribution map of geohazard sites in the study area interpreted by remote sensing
1—地质灾害点 (geohazard site); 2—低危库岸段 (low-risk reservoir bank); 3—中危库岸段 (medium-risk reservoir bank); 4—高危库岸段 (high-risk reservoir bank); 5—极高危库岸段 (very-high-risk reservoir bank)

4 结论

为研究和分析水库蓄水后的库内滑坡地质灾害潜

在危险性和易发程度,开展了基于层次分析法的库区滑坡易发性评价研究,结论如下。

1) 库区上游库段总体为较开阔的峡谷型库盆,正常蓄水位高程以上岸坡多较陡,覆盖层厚度变化比较大,基岩出露普遍,但风化强烈。下游库段为比较狭窄的峡谷型库盆,村寨多分布在两岸山顶,岸坡上居民房屋极少,也没有高速公路、铁路等通过,库岸失稳的危害性很小。综合判断库区范围内产生的库岸失稳形式主要为塌岸、塌滑体。

2) 库区左岸中游与右岸中游为滑坡地质灾害极高危险地区,水库中上游和库尾段为滑坡易发高危区,库区上游两侧为滑坡地质灾害低发区。研究区卫星遥感图像的地质灾害点解译成果表明滑坡地质灾害极高危地段均存在地质灾害发生点,说明本研究获得的滑坡危险性区划图能够较好地反映现状条件下库区潜在滑坡体可能的分布范围。

3) 本研究为库区蓄水条件下的滑坡地质灾害易发性半定量研究提供了一定参考和借鉴,今后的研究中将进一步细化滑坡因子数量和权重值的计算合理性,为滑坡易发性评价提供更为丰富的计算参考。

参考文献(References):

- [1] Naithani A K, Nawani P C, Singh L G, et al. Engineering geological evaluation of the spillway of dam (II-B) of Bunakha hydroelectric project, Chukha Dzong, Bhutan[J]. Journal of the Geological Society of India, 2013, 81(6): 835-843.
- [2] Paraskevis N, Roumpou C, Stathopoulos N, et al. Spatial analysis and evaluation of a coal deposit by coupling AHP & GIS techniques[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 943-953.
- [3] 祝清, 谭衢霖, 周嘉琦, 等. 基于 GIS 和 AHP 的福建福安区域滑坡地质灾害危险性评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(5): 25-30.
Zhu Q, Tan Q L, Zhou J Q, et al. Risk assessment of regional geological landslide hazards based on GIS and AHP in Fu'an City[J]. Geomatics and Spatial Information, 2021, 44(5): 25-30.
- [4] 温金梅, 倪化勇, 王春山, 等. 砂泥岩互层斜坡演化及失稳特征研究——以三峡库区(长寿-丰都段)岸坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(S1): 76-84.
Wen J M, Ni H Y, Wang C S, et al. Study on the evolution and failure characteristics of the interbedded slope of sand and mud stones: Taking the Three Gorges reservoir area (Changshou-Fengdu) as an example[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(S1): 76-84.
- [5] 王治华. 大型个体滑坡遥感调查[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 516-523.
Wang Z H. Large scale individual landslide remote sensing[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(5): 516-523.
- [6] 王佳运, 王根龙, 石小亚. 陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 381-388.
Wang J Y, Wang G L, Shi X Y. Mechanical analysis of apparent dip creep-buckling failure of Shanyang super large-scale rockslide in Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 381-388.
- [7] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827-841.
Yin Y P, Wang W P, Zhang N, et al. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. Geology in China, 2017, 44(5): 827-841.
- [8] 高永志, 初禹, 薛广垠, 等. 黑龙江省矿山地质灾害遥感调查研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(2): 161-164, 189.
Gao Y Z, Chu Y, Xue G Y, et al. Remote sensing survey of geological hazards of mines in Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 161-164, 189.
- [9] 何光洪, 梁燕, 邓炎倩, 等. 基于层次分析法的泾阳南塬黄土滑坡影响因素综合研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 66-70, 148.
He G H, Liang Y, Deng Y Q, et al. Comprehensive research on influencing factors of loess landslides in southern Jingyang Plateau based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 66-70, 148.
- [10] Griffiths J S. Technical note: Terrain evaluation in engineering geology[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2017, 50(1): 3-11.
- [11] Kanik M, Ersoy H. Evaluation of the engineering geological investigation of the Ayvali dam site (NE Turkey) [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(3): 89.
- [12] 秦先燕, 彭苗枝, 焦团理, 等. 基于 GIS 的环巢湖地区地质环境承载能力评价[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 180-186.
Qin X Y, Peng M Z, Jiao T L, et al. Assessment of GIS-based geological environment carrying capacity in circum-Chaohu Lake area, Anhui, China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 180-186.
- [13] 唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 252-261.
Tang Y, Wang L J, Ma G C, et al. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 252-261.
- [14] 丁宇雪, 毛龙, 周向斌, 等. 基于高分影像的松嫩低平原地区生态

- 环境问题解析——以黑龙江省肇源县为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1240-1248.
- Ding Y X, Mao L, Zhou X B, et al. Analysis of eco-environmental problems in Songnen low plain based on high-score image: A case study of Zhaoyuan County of Heilongjiang Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4): 1240-1248.
- [15]余飞燕, 吕蒙, 杨军. 云南省镇雄县滑坡地质灾害主要致灾因子筛选及危险性分区[J]. 地质与资源, 2015, 24(2): 152-156.
- Yu F Y, Lyu M, Yang J. Risk zoning and disaster-inducing factor screening of landslide in Zhenxiong County, Yunnan Province [J]. Geology and Resources, 2015, 24(2): 152-156.
- [16]何满潮, 崔政权, 陈鸿汉, 等. 三峡库区巫山古滑坡系统构造形变场研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(2): 97-102.
- He M C, Cui Z Q, Chen H H, et al. Study of tectonic deformation field for Wushan paleo-landslide system in the Three-Gorges reservoir area [J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(2): 97-102.
- [17]赵力行, 范文, 柴小庆, 等. 秦巴山区地质灾害发育规律研究——以镇巴县幅为例[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 187-195.
- Zhao L X, Fan W, Chai X Q, et al. Study on the development regularity of geohazards in Qinling-Daba mountains: A case study of Zhenba County, Shaanxi Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 187-195.
- [18]房浩, 李媛, 杨旭东, 等. 2010—2015 年全国地质灾害发育分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 1-6.
- Fang H, Li Y, Yang X D, et al. Distribution characters of geohazards in China during the period of 2010-2015 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 1-6.
- [19]熊倩莹. 基于 1:5 万地质灾害填图的区域地质灾害易发性及危险性的评价与区划——以茂汶羌族自治县幅为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Xiong Q Y. Based on 1:50 000 geological hazard mapping of regional geological hazards and risk assessment and regionalization: Shigeru to Brunei Qiang Autonomous County as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [20]杨乐, 彭海游, 周莫林, 等. 基于层次分析法的奉节县城地质环境承载力评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 95-99.
- Yang L, Peng H Y, Zhou M L, et al. Assessment of geological environment carrying capacity of Fengjie County based on AHP [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(2): 95-99.

(上接第 803 页/Continued from Page 803)

- [17]邱新分. 无人机技术在林业工作中的应用[J]. 吉林农业, 2019(12): 92-93.
- Qiu X F. Application of UAV technology in forestry [J]. Agriculture of Jilin, 2019(12): 92-93. (in Chinese)
- [18]要书其. 浅谈构建绿色矿山的环保设计技术[J]. 河北煤炭, 2012(2): 1-2.
- Yao S Q. Discussion on environmental protection design technology for building green mines [J]. Hebei Coal, 2012(2): 1-2. (in Chinese)
- [19]麻燕华. 可控源音频大地电磁法在查明煤矿富水性的应用[J]. 中国科技投资, 2017(1): 173-174.
- Ma Y H. Application of controllable source audio frequency magnetotelluric method in identifying water abundance of coal mines [J]. China Venture Capital, 2017(1): 173-174. (in Chinese)
- [20]郑伟清. 邢东煤矿采空区综合勘察技术研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zheng W Q. Study and application of comprehensive survey technology in goaf of Xingdong coal mine [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [21]吴霞. 遥感技术在山水林田湖草生态修复的应用[J]. 地矿测绘, 2020, 3(3): 53-54.
- Wu X. Application of remote sensing technology in ecological restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses [J]. Geological and Mineral Surveying and Mapping, 2020, 3(3): 53-54. (in Chinese)