

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.09

肯尼亚滑坡灾害分布特征及敏感性区划

杨先全¹, 周苏华², 邢静康², 朱生龙³

(1. 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 肯尼亚是我国“一带一路”战略在东非的重要支点, 由于全球气候变暖和其独特的气候地形条件, 使得肯尼亚地质灾害频发, 造成了大量的人员和财产损失, 因此对其地质灾害的时空分布特性及敏感性区划研究具有重要现实意义。本文首先以肯尼亚1999—2013年的地质灾害数据为基础, 分析得出了肯尼亚主要的地质灾害类型、时空分布特性; 然后选取地貌、高程、坡度、坡向、土层类型、年均降雨量、地表植被覆盖类型, 以及距离东非大裂谷的距离等滑坡影响因素, 采用层次分析法开展了肯尼亚全境的滑坡敏感性评价。结果表明: (1) 由于存在明显的雨季(每年3~5月, 10~12月), 肯尼亚地质灾害多与强降水有关, 洪水和降雨引起的滑坡、泥石流是主要的地质灾害类型; (2) 受地形及降雨的影响, 洪水、滑坡、泥石流多发生在肯尼亚西南部的裂谷及高原区域, 且多发生在每年的雨季期间; (3) 肯尼亚西南部高原与东非大裂谷过渡地带是滑坡的高危险区, 79.48%的历史滑坡均分布在敏感性分区的Ⅳ级(敏感)和Ⅴ级(非常敏感)区域。本文的研究结果最大限度地防范和抵御地质灾害对我国“一带一路”战略实施带来的不利影响, 并为肯尼亚的防灾减灾规划提供参考。

关键词: 肯尼亚; 地质灾害敏感性; 一带一路; 模糊层次分析法; 地理信息系统

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0065-10

Distribution patterns and susceptibility mapping of landslides in Kenya

YANG Xianquan¹, ZHOU Suhua², XING Jingkang², ZHU Shenglong³

(1. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510310, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 3. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Kenya plays an important role in China's "One Belt, One Road" strategy. As development expands under pressures of increasing populations, geohazards are becoming more frequent and losses from them are increasing in Kenya. The purpose of this study is to identify the distribution patterns of major geohazards and zonate landslide susceptibility of Kenya. Firstly, an inventory of historic geohazards in Kenya from 1999—2013 was created and analyzed. By spatial overlay the geohazard inventory with the terrain and mean annual precipitation (MAP) in Kenya, we explore the spatial-temporal distribution patterns of geohazards. 8 landslide contributing factors, including geomorphology, elevation, slope, slope aspect, soil type, MAP, land cover and distance to the great rift valley, were collected to generate the landslide susceptibility maps of Kenya using AHP (Analytical Hierarchy Process) method. The results showed that flood, extreme storm, rainfall-induced

收稿日期: 2018-12-18; 修订日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51708199); 中央高校基本科研业务费专项资金(531107050969); 北京市科技计划(Z181100003918005); 贵州省交通运输厅科技项目(2017-143-054); 国家重点基础研究发展规划项目(2011CB710601)

第一作者: 杨先全(1985-)男, 湖北十堰人, 本科, 土木工程专业, 工程师, 从事道路桥梁与隧道施工技术管理工作。E-mail: yxianquan@cccc4.com

通讯作者: 周苏华(1987-)男, 助理教授, 工学博士, 主要从事地质灾害方面研究。E-mail: zhousuhua@foxmail.com

landslides and debris were the most common geohazard type in Kenya. Most of the geohazards occurred during the rainy seasons (March to May and October to December) and concentrated on the southwestern part of Kenya. Validation of landslide susceptibility maps showed that 79.48% of historic landslides fell within the susceptible and very susceptible zones. The landslide susceptibility zonation map is useful for landslide hazard prevention, mitigation, and improvement to society, and proper planning for land use and construction in the future.

Keywords: Kenya; susceptibility of geohazard; One Belt, One Road; analytical hierarchy process; GIS

0 引言

肯尼亚地势复杂,东非大裂谷纵贯南北,国内地形大部分是高原,主要为热带草原气候和热带季风区,降水集中,干湿季节非常明显。受干湿交替气候和高原裂谷地形的双重影响,肯尼亚境内滑坡、泥石流等地质灾害频发。给当地的基础设施建设和安全运维带来了严重威胁。

肯尼亚是我国“一带一路”倡议沿线的重要国家。作为不发达国家,肯尼亚在灾害应对地质灾害的经验、研究和数据积累方面均存在严重的不足。因此,研究肯尼亚地质灾害分布特征并开展相关地质灾害的危险性区划,对于保护两国人民生命财产安全和我国“一带一路”倡议的顺利实施具有重要的现实意义。

滑坡敏感性是对在特定的地质环境下某个特定的边坡单元发生失稳破坏可能性的一个量化表达。随着高精度数字地形模型数据的日趋完善和遥感(RS: Remote Sensing)、地理信息技术(GIS: Geographic Information System)技术的迅速发展,国内外学者提出了大量的基于GIS的区域范围内的滑坡敏感性分区方法。鉴于肯尼亚历史滑坡数据较为缺乏,其他基础水文地质数据也不完整这一现实情况,本文采用层次分析法来开展肯尼亚全国范围的滑坡敏感性分区研究工作。层次分析法(AHP: Analytic Hierarchy Process)是一种半经验半定量的评价方法,既可以充分利用专家的经验,又可以有效避免专家在决策过程中的主观性。首先以肯尼亚1999—2013年的地质灾害数据为基础,分析得出了主要的地质灾害类型、时空分布特性及其发展趋势。其次以在建的内-马铁路穿越地区为研究区域,选择4类12个地质灾害孕灾因子,采用层次分析法构建地质灾害危险性评价结构模型、计算各因子综合权重和叠加制图等分析步骤,开展了研究区域地质灾害危险性评价,得出肯尼亚全国滑坡敏感性区划图。最后利用历史灾害点进行了精度验证。

1 肯尼亚气候与地质条件概况

肯尼亚地处东非赤道附近(图1),气候温和,终年气温在 $16 \sim 26^{\circ}\text{C}$,年均降雨量为 $1\,400 \sim 2\,200\text{ mm}$,但降雨在季节上十分集中,存在明显的“雨季”和“旱季”。气象资料显示,肯尼亚每年的3~5月为大雨季,10~12月为小雨季,其余月份则为旱季(图2)。统计数据表明,肯尼亚4月的平均降雨量可以达到 122.06 mm ,11月的平均降雨量则为 132.3 mm ,而8月份的平均降雨量为 16.6 mm 。

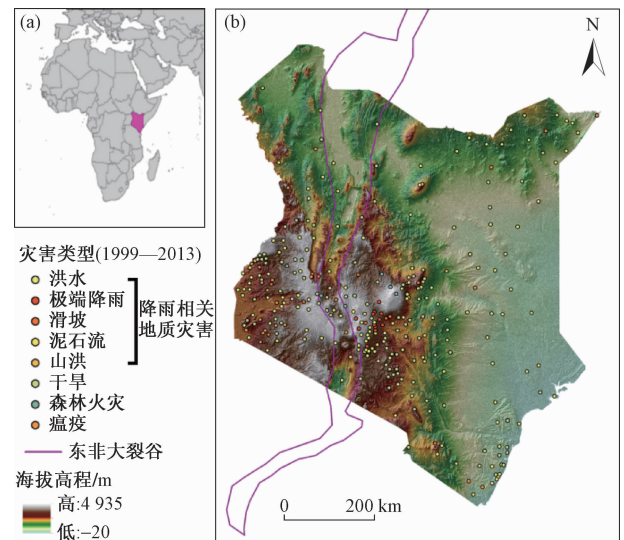


图1 肯尼亚地理位置(a)和自然灾害分布图(b)

Fig.1 Location and natural hazards in Kenya

肯尼亚全境以高原地貌为主,西部平均海拔在 $1\,600\text{ m}$,北部和东部沿海则以平原地形为主。著名的东非大裂谷的东支自南向北贯穿整个肯尼亚国土,并形成了独特的高原裂谷地形。裂谷带平均深度在 $500 \sim 1\,000\text{ m}$,平均宽度可达 $50 \sim 100\text{ km}$ (图3)。高原裂谷地带地表覆盖多为深厚火山灰土层,在地形和降雨的双重影响下,沟壑纵横,地表破碎,在雨季期间极易形成洪水、滑坡、泥石流和山洪等地质灾害。

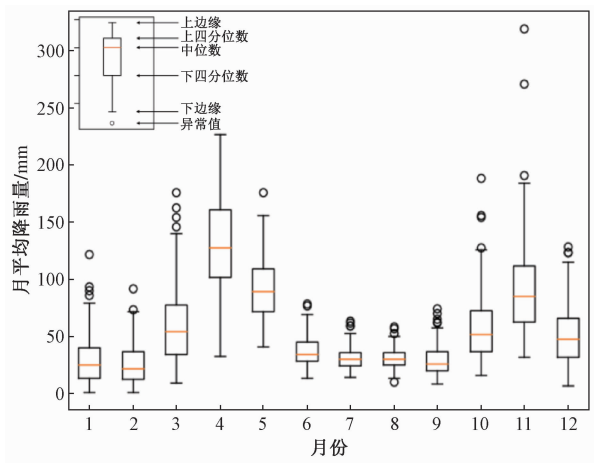


图 2 肯尼亚月平均降雨量统计图
Fig. 2 Statistics of mean monthly rainfall in Kenya (1901 ~ 2015)

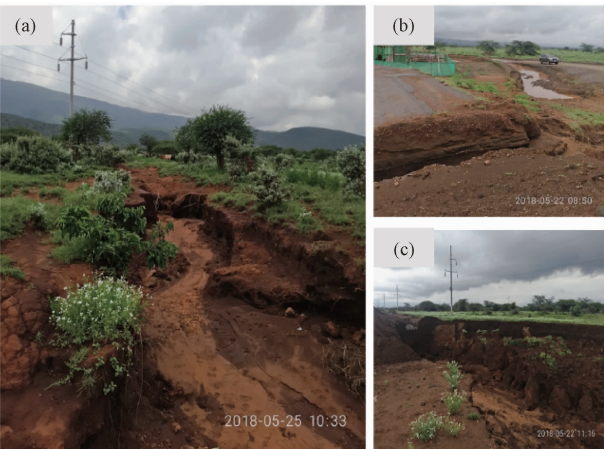


图 3 降雨期间肯尼亚的地表冲沟与滑坡
(课题组摄于 2018 年 5 月)
Fig. 3 Precipitation-induced ground incision in Kenya

2 肯尼亚自然灾害

2.1 数据来源

本文获取的 1999 ~ 2013 年肯尼亚的历史灾害数据集源于肯尼亚开放数据中心 (www. opendata. go. ke), 该数据集记录了 1999 ~ 2013 年期间肯尼亚发生的灾害类型、发生的具体日期、受灾人数和经济损失等。该数据集信息主要来自于联合国、肯尼亚政府和其他非政府组织、研究机构和媒体等。需要指出的是, 由于肯尼亚的发展现状所限, 该数据集记录的数据主要是造成了重大的伤亡或是财产损失的灾害事件, 而更多的影响较小的灾害事件则未在数据统计之内。

肯尼亚全境的数字高程模型数据来源于 ASTER-GDEM V2, 具有 30 m 的空间分辨率。地表径流等矢量

GIS 数据则来源于开放非洲数据库 (www. openafrica. org) 和世界资源研究所 (www. wri. org) 的共享数据。大量的研究已经表明, 地表植被覆盖对滑坡的敏感性具有重要的影响。肯尼亚的地表植被覆盖信息主要基于美国陆地卫星 Landsat-8 采用监督分类的方法获得。

2.2 主要地质灾害类型

通过对 1999—2013 年间肯尼亚主要 1 317 起自然灾害进行统计, 结果表明, 洪水、极端降雨、滑坡、泥石流是肯尼亚的主要自然灾害类型 (表 1), 肯尼亚在 1999—2013 年间共发生洪水 566 次, 年均 28 次, 均造成了大量的人员和财产损失。

表 1 肯尼亚自然灾害情况统计 (1999—2013)

Table 1 Statistics of historic natural hazards in Kenya (1999—2013)

灾害类型	发生频次/次	受灾人数/人	建筑受损/栋
洪水	566	710 760	20 959
极端降雨	40	622 487	539
滑坡、泥石流	39	1 896	104
合计	645	1 335 143	21 602

从时间分布来看, 首先以年为统计单位, 结果显示, 以 2007 年为界, 2007 年之前, 自然灾害发生的总频次均小于 50 次, 2007 年以后迅速增加, 2010 年到达峰值, 总计 203 次, 2010 年之后灾害总频次有明显下降, 但是平均水平仍高于 2007 年之前的平均水平, 总体上看 (图 4(a)), 肯尼亚的自然灾害发生频次呈现波动上升趋势。然后以月为统计单位 (图 4(b)), 再次对肯尼亚的自然灾害发生频次进行统计, 结果显示, 一年中肯尼亚自然灾害发生时间段主要集中于 3 ~ 5 月、10 ~ 12 月, 结合肯尼亚月平均降雨量图, 可以看出肯尼亚自然灾害的高发期与肯尼亚的雨季 (即 3 ~ 5 月、10 ~ 12 月) 大致吻合, 尤其是肯尼亚大雨季 (即 3 ~ 5 月) 期间, 自然灾害的发生频次远高于全年平均水平, 这是因为肯尼亚的气候干湿季明显, 降水集中的特点成为肯尼亚的自然灾害发生的重要诱因之一。

3 肯尼亚滑坡敏感性分区

3.1 层次分析法 (AHP)

层次分析法 (AHP) 是由美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的多准则目标决策方法, 是将定性和定量相结合、层次化、系统化的决策方法。层次分析法旨在将研究对象影响因素分层, 通过建立判断矩阵, 对比同层次影响因素之间对于研究对象的重要程度或者贡献程度, 得出该层准则下的权重, 由此计算各

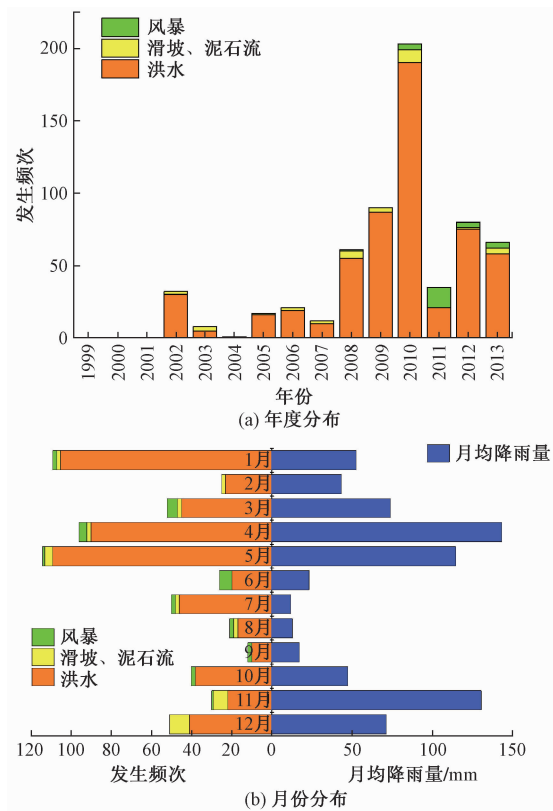


图4 肯尼亚主要自然灾害年度分布和月份分布

Fig.4 Annual and monthly distribution of major disasters in Kenya

目标因素对总体目标的组合权重。

其主要步骤是:

(1) 构建目标的评价指标体系;评估指标的选取应保证科学、系统、重点突出、综合考虑。指标体系的选取主要依据既有研究相关文献和研究区域的实际情况。

(2) 构建判断矩阵;依据 Saaty 提出的一致矩阵法,根据表 2 使用 1~9 个标度判断两元素之间所占的比重,构建判断矩阵。

表2 评价元素重要性标度表

Table 2 Ordinary scale represents of judgement (Satty 1977)

标度	含义
1	两因子相比,完全同等重要
3	两因子相比,一个比另一个稍微重要
5	两因子相比,一个比另一个明显重要
7	两因子相比,一个比另一个非常重要
9	两因子相比,一个比另一个极度重要
2,4,6,8	上述相邻判断的中值
倒数	上述比较结果的反面

(3) 计算最大特征值和特征向量;特征值及特征向量用于表征判断矩阵的一致性。

(4) 一致性检验;根据公式 1 和公式 2 检验判断矩阵的一致性。

$$CR = CI/RI \quad (1)$$

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (2)$$

式中 CR ——判断矩阵的随机一致性比率;

CI ——判断矩阵的一般一致性指标;

RI ——判断矩阵的平均随机一致性指标;

λ_{max} ——最大特征值;

n ——判断矩阵阶数。

1~10 阶判断矩阵的 RI 值参见表 3。 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵中的元素以使其具有满意的一致。

表3 平均随机一致性指标 RI 的值Table 3 Random consistency index (RI) (Satty, 1990)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3.2 肯尼亚滑坡敏感性评价指标体系

结合目前国内外滑坡敏感性研究方法及成果来看^[1-10],对于影响滑坡要素的选取,分为环境本底要素和诱发要素两类。区域性滑坡和典型滑坡敏感性分析选取的环境本底要素大致相同,包括地貌、高程、坡度、坡向、岩性土性及植被等;但对于诱发要素,区域性滑坡敏感性分析主要以降雨为主导诱因,而典型滑坡除受降雨影响外,地震、冻融以及人类活动都有可能成为其诱因。本文研究区域肯尼亚,从收集到的资料来看,地震、冻融等灾害发生频次极少,降雨成为肯尼亚滑坡发生的主导诱因。综上所述,建立了如图 5 所示的肯尼亚滑坡危险性评价指标体系,其中一级指标还考虑到东非大裂谷南北纵穿肯尼亚,引入距裂谷距离这一特殊因素。最终对于肯尼亚的滑坡危险性评价分为 5 个敏感性等级。

不同二级指标分别表示为 u_1 地貌、 u_2 高程、 u_3 坡度、 u_4 坡向、 u_5 土层、 u_6 距裂谷距离、 u_7 降雨量、 u_8 植被覆盖度,依据一致矩阵法,得到如表 4 所示二级指标判断矩阵。利用 python 计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{max} = 8.6733$,对应的特征向量 $\omega = [0.3027 \ 0.1100 \ 0.6428 \ 0.2334 \ 0.3519 \ 0.0919 \ 0.5044 \ 0.2045]$,一致性检验结果 $CR = 0.03 < 0.1$,表明判断矩阵具有较好的一致性。

3.3 权重分配

依据特征向量按归一化公式分配二级指标各要素的权重,得到如表 5 所示的二级指标权重表。

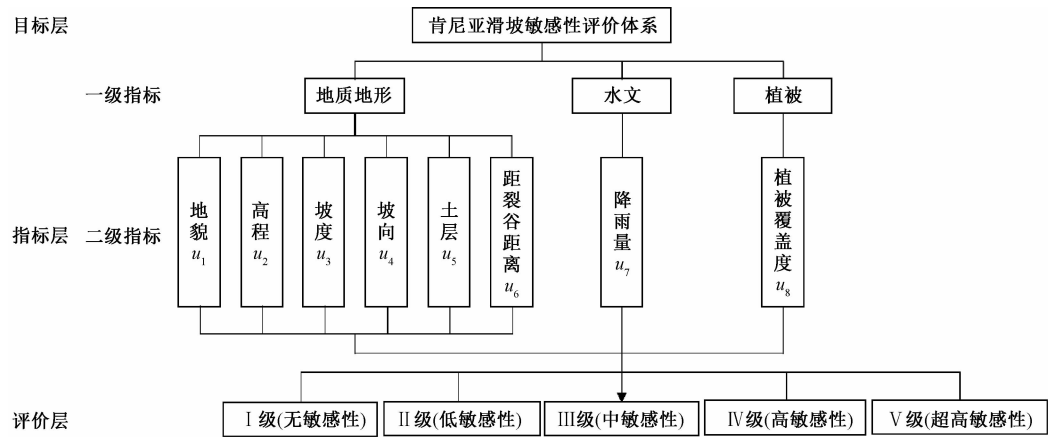


图 5 肯尼亚滑坡敏感性评价体系

Fig.5 Contribution factors of landslides used in AHP

表 4 滑坡敏感性评价判断矩阵

Table 4 Comparison matrix between landslide contributing factors

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
u_1	1	3	1/2	2	1/2	4	1/2	2
u_2	1/3	1	1/4	1/2	1/4	2	1/4	1/3
u_3	2	4	1	4	3	3	2	3
u_4	1/2	2	1/4	1	1/3	3	1/2	3
u_5	2	4	1/3	3	1	4	1/3	1
u_6	1/4	1/2	1/3	1/3	1/4	1	1/4	1/3
u_7	2	4	1/2	2	3	4	1	3
u_8	1/2	3	1/3	1/3	1	3	1/3	1

$$\omega = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \cdots \ a_i] (i = 1, 2, 3, \cdots n) \quad (3)$$

表 5 二级指标权重表

Table 5 Weights for landslide contributing factors

孕灾因子	权重 w_i
地貌	0.12
高程	0.5
坡度	0.26
坡向	0.10
土层	0.14
距裂谷距离	0.04
降雨量	0.21
植被覆盖度	0.08

地貌一定程度上反映出研究区域地形的相对高差,具体指潜在滑坡体本身的前后缘相对高,即一定的区域上斜坡体最高点与最低点的差值^[8],研究区域的地貌特征是判断潜在滑坡体的首要直观因素,理论上越陡峭的位置越易发展成滑坡体。本文通过现场采集及遥感技术等方法获得肯尼亚的地貌资料,依据陡峭程度,将地貌分为平地 u_{11} 、缓坡 u_{12} 、陡坡 u_{13} 、复合地貌 u_{14} (包含谷地、洼地等) 四种,单从地貌直观判断,越陡的地点越易发生滑坡,所以地貌分级的判断矩阵

及一致性检验如表 6 所示。

表 6 地貌分级判断矩阵及一致性检验表

Table 6 Comparison matrix and weights of geomorphology factor

	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}
u_{11}	1	1/3	1/5	1/2
u_{12}	3	1	1/3	2
u_{13}	5	3	1	4
u_{14}	2	2	1/4	1

$$\lambda_{\max} = 4.051 \ 1 \ \omega = [0.136 \ 2 \ 0.377 \ 7 \ 0.888 \ 1 \ 0.223 \ 9] \ CR = 0.02 < 0.1$$

高程并非直接影响滑坡的孕灾要素,但现有国内外滑坡敏感性评价研究成果表明^[2,5-8],区域尺度上的滑坡在不同高程的频率分布具有较明显的阶级性,内因在于不同高度的坡体上,岩土体的干湿循环程度受光照及土层含水量的双重影响具有明显的差异性,土质也因此存在差异,从而不同高度的坡体稳定性也不同。本文依据肯尼亚的数字高程模型,精度为 30 m × 30 m,综合考虑地貌特点,将肯尼亚的高程分为 u_{21} (< 1 000 m)、 u_{22} (1 000 ~ 1 500 m)、 u_{23} (1 500 ~ 2 000 m)、 u_{24} (> 2 000 m) 四级。高程分级的判断矩阵及一致性检验如表 7 所示。

表 7 高程分级判断矩阵及一致性检验表

Table 7 Comparison matrix and weights of elevation factor

	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}
u_{21}	1	1/3	1/4	1/2
u_{22}	3	1	1/2	2
u_{23}	4	2	1	3
u_{24}	2	1/2	1/3	1

$$\lambda_{\max} = 4.045 \ 8 \ \omega = [0.159 \ 8 \ 0.458 \ 5 \ 0.838 \ 0 \ 0.249 \ 0] \ CR = 0.02 < 0.1$$

坡度对滑坡体的发展具有直接影响。滑坡的发育是坡体临空面逐步积累为有效临空面的结果,而临空

面能否发展成有效临空面与坡度直接相关。通常随着坡度的增加,包括重力在内的剪切力增大,滑坡发生概率也会增大^[11]。但也并不是坡度越大越有利于滑坡的发生,实际上滑坡的发生是在一定的坡度范围内的。坡度值较高的区域多为陡峭的坚硬岩石峭壁,只有在极端的地质条件下才会发生坍塌;已有研究成果表明,10°~20°的坡度区间是最容易发生滑坡的范围。本文依据肯尼亚的数字高程模型,借助 ArcGIS 空间分析和处理计算,生成肯尼亚坡度土层,并分为 u_{31} ($<10^\circ$)、 u_{32} ($10^\circ \sim 20^\circ$)、 u_{33} ($20^\circ \sim 30^\circ$)、 u_{34} ($30^\circ \sim 45^\circ$)、 u_{35} ($>45^\circ$)。坡度分级判断矩阵及一致性检验如表 8 所示。

表 8 坡度分级判断矩阵及一致性检验表

Table 8 Comparison matrix and weights of slope factor

	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}
u_{31}	1	1/5	1/3	1/2	1
u_{32}	5	1	3	4	5
u_{33}	3	1/3	1	3	4
u_{34}	2	1/4	1/3	1	2
u_{35}	1	1/5	1/4	1/2	1
$\lambda_{\max} =$ 5.119 4	$\omega = [0.134\ 1\ 0.849\ 4\ 0.445\ 6$ $0.214\ 3\ 0.126\ 8] CR = 0.03 < 0.1$				

坡向与坡形、降雨、风和日照相联系,一般山坡可分为阳坡和阴坡。阳坡得到更充足的光照,植被生长更加茂密,同时土壤发育更为充分,保水性较好,这些特性都有助于固土防滑的作用,而阴坡上的土壤缺乏有机质,结构松散,抗剪强度和抗风化能力较低,植被生长发育不如阳坡上的茂密,相对容易发生滑坡。同现有滑坡危险性评价方法一样,对于肯尼亚坡向图层,以北 u_{41} ($337.5^\circ \sim 22.5^\circ$)、北东 u_{42} ($22.5^\circ \sim 67.5^\circ$)、东 u_{43} ($67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)、东南 u_{44} ($112.5^\circ \sim 157.5^\circ$)、南 u_{45} ($157.5^\circ \sim 202.5^\circ$)、南西 u_{46} ($202.5^\circ \sim 247.5^\circ$)、西 u_{47} ($247.5^\circ \sim 292.5^\circ$)、西北 u_{48} ($292.5^\circ \sim 337.5^\circ$) 为划分等级,考虑到肯尼亚被赤道从中部穿过,且东临印度洋,全年光照均匀,但是受季风洋流的影响,北东、东和东南作为主要的迎风面,坡体的干湿循环相对更频繁,土体表层的内胶结质相对较少,强度较低,更易发生滑坡。坡向分级判断矩阵及一致性检验如表 9 所示。

地质资料显示,肯尼亚境内的坡体以土坡为主,土性成为滑坡变形失稳的决定因素,其一方面决定土坡的应力分布、变形破坏特征,同时又是滑坡发生、发展的物质基础^[11]。坡体土壤颗粒间孔隙越大,毛细管作用越弱、保水性越差、有机质含量越低,则更容易发生滑坡。依据土壤颗粒间孔隙、毛细管作用、保水性及有

机质含量等特征,将土层因子划分为砂土 u_{51} 、壤土 u_{52} 、黏土 u_{53} 。土层分级判断矩阵及一致性检验如表 10 所示。

表 9 坡向分级判断矩阵及一致性检验表

Table 9 Comparison matrix and weights of slope aspect factor

	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}	u_{45}	u_{46}	u_{47}	u_{48}
u_{41}	1	1/5	1/4	1/3	1/2	3	4	2
u_{42}	5	1	2	3	4	6	7	5
u_{43}	4	1/2	1	2	4	6	7	5
u_{44}	3	1/3	1/2	1	3	5	6	4
u_{45}	2	1/4	1/4	1/3	1	3	4	2
u_{46}	1/3	1/6	1/6	1/5	1/3	1	3	1/2
u_{47}	1/4	1/7	1/7	1/6	1/4	1/3	1	1/2
u_{48}	1/2	1/5	1/5	1/4	1/2	2	2	1
$\lambda_{\max} = 8.390\ 2$	$\omega = [0.160\ 0\ 0.701\ 8\ 0.533\ 1\ 0.371\ 5\ 0.194\ 8$ $0.083\ 6\ 0.053\ 3\ 0.107\ 6] CR = 0.04 < 0.1$							

表 10 土层分级判断矩阵及一致性检验表

Table 10 Comparison matrix and weights of soil type factor

	u_{51}	u_{52}	u_{53}
u_{51}	1	3	5
u_{52}	1/3	1	3
u_{53}	1/5	1/3	1
$\lambda_{\max} = 3.038\ 5$	$\omega = [0.916\ 1\ 0.371\ 5\ 0.150\ 6] CR = 0.03 < 0.1$		

东非大裂谷南北纵穿肯尼亚国境,裂谷作为地球板块运动的产物,其存在一定程度上能反映地质活动的活跃程度,滑坡作为地表灾害同样会受地质活动的影响,地质活动越活跃越易发生滑坡。所以本文的研究中,将距裂谷的距离作为滑坡的影响因子之一,其分级为 u_{61} ($0 \sim 5\text{ km}$)、 u_{62} ($5 \sim 10\text{ km}$)、 u_{63} ($>10\text{ km}$)。距裂谷距离判断矩阵及一致性检验如表 11 所示。

表 11 距裂谷距离分级判断矩阵及一致性检验表

Table 11 Comparison matrix and weights of distance to the great valley factor

	u_{61}	u_{62}	u_{63}
u_{61}	1	3	4
u_{62}	1/3	1	2
u_{63}	1/4	1/2	1
$\lambda_{\max} = 3.018\ 3$	$\omega = [0.915\ 4\ 0.349\ 3\ 0.199\ 9] CR = 0.03 < 0.1$		

降雨是诱发滑坡发生和发展最重要的影响因素之一^[11-12],降雨增加斜坡体的含水量,使得土体基质吸力大幅度降低,土体的抗剪强度减小^[13];降雨历时、降雨量、降雨强度及降雨形式等因素都对滑坡的发生具有重要影响,在自然营力作用方面,降雨尤其是暴雨是滑坡活动最重要的诱发因素。据文献统计降雨型滑坡约占滑坡总数的 70%^[14],受降雨数据完整程度的限制,本文仅选取年平均降雨量作为降雨影响滑坡的

评价标准,将降雨量分为 u_{71} ($< 800 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$)、 u_{72} ($800 \sim 1\,200 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$)、 u_{73} ($1\,200 \sim 1\,600 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$)、 u_{74} ($> 1\,600 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$) 四级(图 6),降雨量判断矩阵及一致性检验如表 12 所示。

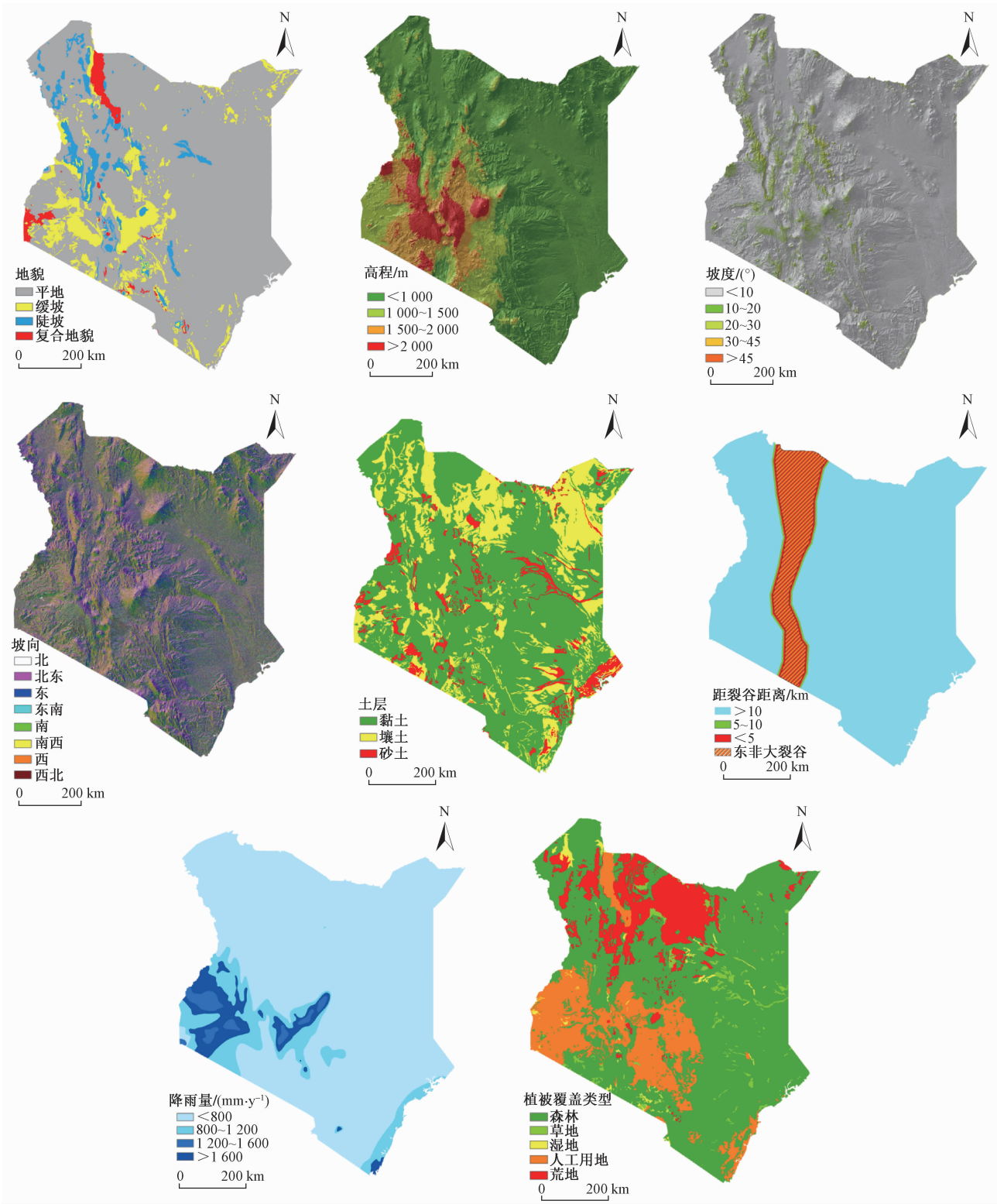


图 6 肯尼亚滑坡指标分层图
Fig. 6 Classification of landslide contributing factors

表 12 降雨量分级判断矩阵及一致性检验表

Table 12 Comparison matrix and weights of distance to the rainfall factor

	u_{71}	u_{72}	u_{73}	u_{74}
u_{71}	1	1/2	1/3	1/2
u_{72}	2	1	1/3	1/2
u_{73}	3	3	1	2
u_{74}	2	2	1/2	1
$\lambda_{\max} = 4.0710$ $\omega = [0.2122 \quad 0.3013 \quad 0.8047 \quad 0.4654]$				
$CR = 0.03 < 0.1$				

植被覆盖度同时受自然环境和人类活动的影响,与土地利用类型存在着密切关系。其影响滑坡的机理在于,植被覆盖度越高,坡体土壤的保水性越好,土颗粒之间的黏着力越强,土壤的抗剪强度越大,坡体稳定性越好。本文的研究对于植被覆盖度采用定性分析代替定量分析,将肯尼亚植被覆盖度划分为森林 u_{81} 、草地 u_{82} 、湿地 u_{83} 、人工用地 u_{84} 、荒地 u_{85} 五类,其判断矩阵及一致性检验如表 13 所示。

表 13 植被覆盖分级判断矩阵及一致性检验表

Table 13 Comparison matrix and weights of distance to the landcover factor

	u_{81}	u_{82}	u_{83}	u_{84}	u_{85}
u_{81}	1	1/3	1/3	1/4	1/5
u_{82}	3	1	1/2	1/3	1/5
u_{83}	3	2	1	1/3	1/5
u_{84}	4	3	3	1	1/3
u_{85}	5	5	5	3	1
$\lambda_{\max} = 5.2710$ $\omega = [0.0949 \quad 0.1655 \quad 0.2175 \quad 0.4248 \quad 0.8578]$					
$CR = 0.06 < 0.1$					

4 滑坡敏感性评估结果

依据二级指标各要素的分级特征向量,采用归一化公式计算各要素分级的加权权重,最后得到各级要素分级权重见表 14。

在 ArcGIS 中将各个要素原始栅格图层重新按表 14 定义分级并赋值,精度均为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ (图 6),利用栅格计算器进行各分级图层叠加,利用 ArcGIS 空间分析中的栅格重分类工具按能保持类别一致性的自然间断点分级法将危险权重划分区间得到五个滑坡敏感性等级,“自然间断点”法通过控制组间与组内的数据方差来控制各个类别的差异,原理是使数据组间的方差最大,组内的方差最小,这样使各个类之间的差异最大化,在数据值的差异相对较大的位置处设置其边界。最后将敏感性评价归一化,则得到肯尼亚全国 1 km 网格精度的滑坡(泥石流)灾害敏感性等级图见图 7,

分级见表 15。

表 14 分级判断矩阵及一致性检验表

Table 14 Weight of factors and their subclasses

二级因子权重 w_i	加权权重 w_j	分级权重 ($w_i \times w_j$)
地貌 (0.12)	平地 (0.08)	0.0096
	缓坡 (0.23)	0.0276
	陡坡 (0.55)	0.0660
	复合地貌 (0.14)	0.0168
高程 (0.05)	< 1 000 m (0.09)	0.0045
	1 000 ~ 1 500 m (0.27)	0.0135
	1 500 ~ 2 000 m (0.49)	0.0245
	> 2 000 m (0.15)	0.0075
坡度 (0.26)	< 10° (0.08)	0.0208
	10° ~ 20° (0.48)	0.1248
	20° ~ 30° (0.25)	0.0650
	30° ~ 45° (0.12)	0.0312
	> 45° (0.07)	0.0182
	北 (0.07)	0.0070
	北东 (0.32)	0.0320
	东 (0.24)	0.0240
坡向 (0.10)	东南 (0.17)	0.0170
	南 (0.09)	0.0090
	南西 (0.04)	0.0040
	西 (0.02)	0.0020
	西北 (0.05)	0.0050
	砂土 (0.64)	0.0896
土层 (0.14)	壤土 (0.26)	0.0364
	黏土 (0.10)	0.0140
	0 ~ 5 km (0.63)	0.0252
距裂谷距离 (0.04)	5 ~ 10 km (0.24)	0.0096
	> 10 km (0.13)	0.0052
	< 800 mm·yr ⁻¹ (0.12)	0.0252
降雨量 (0.21)	800 ~ 1 200 mm·yr ⁻¹ (0.17)	0.0357
	1 200 ~ 1 600 mm·yr ⁻¹ (0.45)	0.0945
	> 1 600 mm·yr ⁻¹ (0.26)	0.0546
	森林 (0.05)	0.0040
植被覆盖度 (0.08)	草地 (0.09)	0.0072
	湿地 (0.12)	0.0096
	人工用地 (0.24)	0.0192
	荒地 (0.50)	0.0400

表 15 滑坡敏感性等级划分表

Table 15 Reclassification of landslide risk map

敏感性等级	I	II	III	IV	V
敏感性评价	0 ~ 0.09	0.09 ~ 0.19	0.19 ~ 0.30	0.30 ~ 0.47	0.47 ~ 1

根据图 7 可以看出,IV 级以上的滑坡敏感性区主要集中在西南部的裂谷两侧高原地带,而隆戈诺特火山区,是滑坡 IV 及 V 级敏感性区的集中地带,而东部、南部以及北部地区主要敏感性等级都集中在 I 和 II 级区。将肯尼亚滑坡、泥石流历史灾害点与敏感性等级图叠加对比(图 8),结果显示分别有 3、26、5 个灾害点位于中、高和极高敏感性区,其余 5 个灾害点则分布在

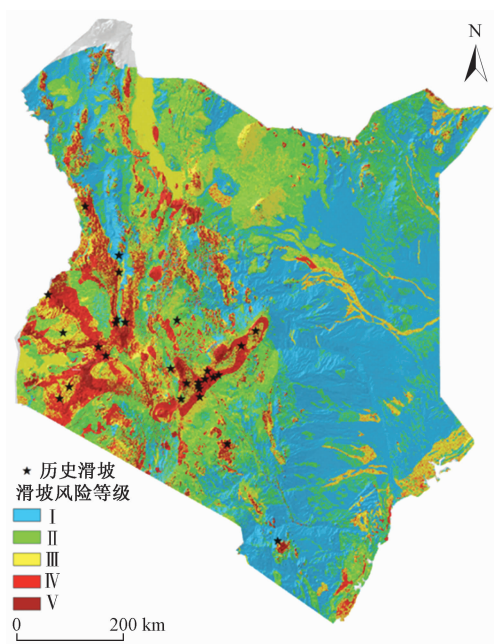


图7 肯尼亚滑坡敏感性等级图

Fig.7 Landslide risk map of Kenya

低或无敏感性区。

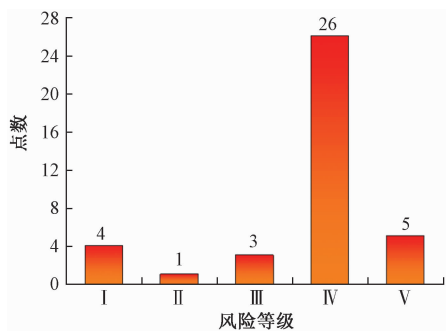


图8 肯尼亚历史滑坡灾害点叠加对比

Fig.8 Validation result of landslide occurrence and risk map

5 结论

“一带一路”战略沿线,以肯尼亚为代表的一批国家,由于数据缺乏和社会经济落后,对于滑坡等地质灾害的认识以及敏感性评估工作仍然处于初级阶段^[15-16],本文以肯尼亚为研究区域,采用层次分析法,提取8个滑坡评价要素,在数据有限的情况下,利用定性分析和定量计算相结合,对研究区域的滑坡敏感性进行了评估,主要结论如下:

(1)肯尼亚的地质灾害主要为极端降雨、洪水以及滑坡与泥石流。从空间分布上看,上述灾害主要集中在肯尼亚西南高原地区,尤其是与东非大裂谷过渡地带。从灾害发生的时间上看,肯尼亚地质灾害数量

总体呈现上升的趋势,且主要集中在每年的3~5月、10~12月期间,与肯尼亚的年均降雨分布高度相关。

(2)由于肯尼亚的相关水文地质和历史滑坡数据比较少,应用层次分析法开展肯尼亚全境的滑坡敏感性评价较为合适。

(3)本文基于人为主观判断经验建立的层次分析模型评价效果与已有的肯尼亚历史滑坡数据验证效果良好。

(4)肯尼亚滑坡敏感性较高的地区主要位于其西南部,尤其是高原裂谷过度地带。

本文的研究结果可为我国一带一路倡议在肯尼亚的大型基建投资提供参考。本文的基础数据资料也可服务于该地区其他相关的地质与勘查研究工作。

参考文献:

- [1] 樊晓一,乔建平,陈永波.层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J].自然灾害学报,2004(1):72-76.
FAN Xiaoyi, QIAO Jianping, CHEN Yongbo. Application of analytic hierarchy process in assessment of typical landslide danger degree [J]. Journal of Natural Disasters, 2004(1):72-76.
- [2] IONUT CRISTI NICU, ANDREI ASANDULESEI. GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluiet River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). Are Neolithic sites in danger? [J]. Geomorphology, 2018;314.
- [3] 乔建平,王萌,吴彩燕.汶川地震灾区滑坡风险区划研究[J].工程地质学报,2015,23(2):187-193.
QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan. Study on Wenchuan earthquake induced landslide risk zonation [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2):187-193.
- [4] MARKO KOMAC. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia [J]. Geomorphology, 2005, 74(1):17-28.
- [5] POURGHASEMI H R, PRADHAN B. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran[J]. Natural Hazards, 2012, 63(2):965-996.
- [6] 兰恒星,伍法权,周成虎.基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
LAN Hengxing, WU Faquan, ZHOU Chenghu. Analysis on susceptibility of GIS based landslidetriggering

- FACTORS IN YunNan XiaoJiang watershed [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1500 – 1506.
- [7] 常顺利, 张钟月, 孙志群, 等. 基于 GIS 的新源县滑坡灾害分析与区划[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 16 – 22.
- CHANG Shunli, ZHANG Zhongyue, SUN Zhiqun, et al. GIS-based analysis and zoning of landslide hazard in KUNES County [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 16 – 22.
- [8] 陈明, 王运生, 梁瑞锋, 等. 白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 325 – 333.
- CHEN Ming, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng, et al. Research on development and distribution rules of large scale landslides in Bailongjiang river basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 325 – 333.
- [9] MONDAL S. Landslide susceptibility analysis of Shiv-Khola watershed, Darjiling: a remote sensing & GIS based Analytical Hierarchy Process (AHP) [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012, 40(3): 483 – 496.
- [10] MALLICK J, SINGH R K, ALAWADH M A, et al. GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(7): 276.
- [11] 丁明涛, 田述军. 滑坡泥石流风险评价及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 40 – 68.
- DING Mingtao, TIAN Shujun. Risk assessment and application of landslide and mudslide [M]. Beijing: Academic Press, 2013: 40 – 68.
- [12] 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(3): 433 – 454.
- HUANG Runqiu. Large scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(3): 433 – 454.
- [13] 刘磊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 降雨影响下的区域滑坡危险性动态评价研究——以三峡库区万州主城区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 558 – 569.
- LIU Lei, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Dynamic evaluation of regional landslide hazard due to rainfall: a case study in Wanzhou central district, Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 558 – 569.
- [14] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008(4): 1061 – 1066.
- LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4): 1061 – 1066.
- [15] 王刚, 孙萍, 吴礼舟, 等. 降雨诱发浅层黄土滑坡机理实验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1252 – 1263.
- WANG Gang, SUN Ping, WU Lizhou, et al. Experimental study on mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1252 – 1263.
- [16] 胡瑞林, 范林峰, 王珊珊, 等. 滑坡风险评价的理论与方法研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 76 – 84.
- HU Ruilin, FAN Linfeng, WANG Shanshan, et al. Theory and method for landslide risk assessment: current status and future development [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 76 – 84.