



## 基于岩体质量等级评价的边坡稳定性分析 ——以辽宁宽甸地区下河口—拉古哨路段为例

颜翔锦, 黄 伟, 任传涛

中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157000

**摘 要:** 在对岩体质量定性分析及相关指标定量分析的基础上, 将岩体质量分为不同级别. 根据岩体的不同质量等级, 通过岩石力学性质分析了下河口—拉古哨路段边坡的稳定性. 结果表明: 侵入岩组(石英二长岩、石英正长岩)和变质岩组(混合岩)岩体节理对边坡失稳破坏的影响较小; 变质岩组(片麻岩)岩体的风化程度和完整程度降低了边坡的稳定程度. 风化程度、完整程度、结构特征、结构面产状及延伸性是影响边坡稳定性的主要原因, 边坡破坏方式和程度可能出现多种模式.

**关键词:** 岩体质量等级; 岩石力学; 边坡稳定性; 变质岩组; 辽宁省

## ANALYSIS OF SLOPE STABILITY BASED ON ROCK MASS QUALITY GRADE EVALUATION: A Case Study of Xiahekou-Lagushao Road Section in Kuandian Area of Liaoning Province

YAN Xiang-jin, HUANG Wei, REN Chuan-tao

Mudanjiang Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Mudanjiang 157000, Heilongjiang Province, China

**Abstract:** The rock mass quality is divided into different grades on the basis of qualitative analysis of rock mass quality and quantitative analysis of related indexes. According to the different quality grades, the slope stability along Xiahekou-Lagushao road section is analyzed by rock mechanical properties. The results show that the joints of intrusive rock group (quartz monzonite, quartz syenite) and metamorphic rock group (migmatite) have minor influence on the slope instability failure. The weathering and poor integrity of metamorphic rock mass (gneiss) reduce the slope stability. The weathering degree, integrity degree, structural characteristics, occurrence and extensibility of structural planes are the major factors affecting the slope stability, with multiple modes of slope failure and degree.

**Key words:** rock mass grade; rock mechanics; slope stability; metamorphic rock group; Liaoning Province

### 0 引言

不稳定的天然斜坡和设计坡角过大的人工边坡, 在岩体重力、土体重力、水体压力、振动力及其他外力

作用下, 常发生岩土崩塌或滑动破坏<sup>[1]</sup>. 岩体崩塌或者山体滑坡的发生会给人类的生产生活带来较重负面影响, 例如交通问题、居民建筑的坍塌, 还可能导

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-07-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“军民融合地质调查项目”(DD2016008107).

作者简介: 颜翔锦(1992—), 男, 从事应用地质调查工作, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//526503856@qq.com

通信作者: 任传涛(1986—), 男, 工程师, 主要从事固体矿产勘查及基础地质调查工作, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//153390803@qq.com

流方向的改变<sup>[2]</sup>. 因此对边坡稳定性的研究十分有必要, 既有利于地质灾害的防治, 又可以使人工边坡的设计达到安全、经济的目的<sup>[3-6]</sup>.

研究区已经完成了基础地质、矿产资源、水工环地质、重要目标体地质灾害评估等不同尺度和层面的地质调查工作, 积累了较为丰富的地质成果资料. 为了调查下河口—拉古哨路段当前边坡稳定情况, 利用实地调查对野外边坡做了大量分析和对比, 发现其中有73%的边坡稳定性不强, 其中一部分已经出现了坍塌情况, 另一部分出现坍塌的可能性较大. 对边坡稳定性的分析通常包括定性和定量两种方法, 其中定性分析的方法较多, 例如极限分析法、类比法等. 除此之外, 还有一些方法并不成熟, 仍处于测试阶段, 例如灰色理论分析法等<sup>[7]</sup>.

## 1 工程地质条件

### 1.1 自然地理

研究区位于辽宁省宽甸满族自治县的长甸镇, 地处辽东低山丘陵地貌景观区, 东部为鸭绿江中下游的

中朝边境地带, 同时位于长白山和千山两大山脉之间, 地势具有西北部较东南部高的特点. 通过资料收集调查发现, 西北部最高海拔达1 336.1 m, 东南部山地较多, 多为300~500 m, 平均海拔约400 m. 其中山地丘陵占地较多, 盆地及河流占地面积较少, 两者间的比例可达到2:1. 在气候方面, 宽甸县属于东亚季风区, 降水量较多, 有明显的四季对比, 特别是冬夏两季的季节气候较为明显, 并且不同海拔不同纬度地区的气候差别也较大<sup>[8]</sup>.

### 1.2 地质环境

宽甸地区大地构造处于华北板块边缘, 地质特征较为明显, 地层岩石主要包括古元古界辽河群高家峪组二段以及中生代早白垩世侵入岩(图1). 高家峪组二段以混合岩和片麻岩为主, 早白垩世侵入岩主要为石英正长岩和石英二长岩<sup>[8]</sup>. 本次研究的岩体主要分布在鸭绿江下河口—拉古哨路段沿线, 岩体在地质历史中曾遭受过多期构造作用, 受多条北东向断裂控制, 统称为鸭绿江断裂带. 鸭绿江深部断裂带及其次生断裂基本控制了本区构造格局, 具有复杂的结构特

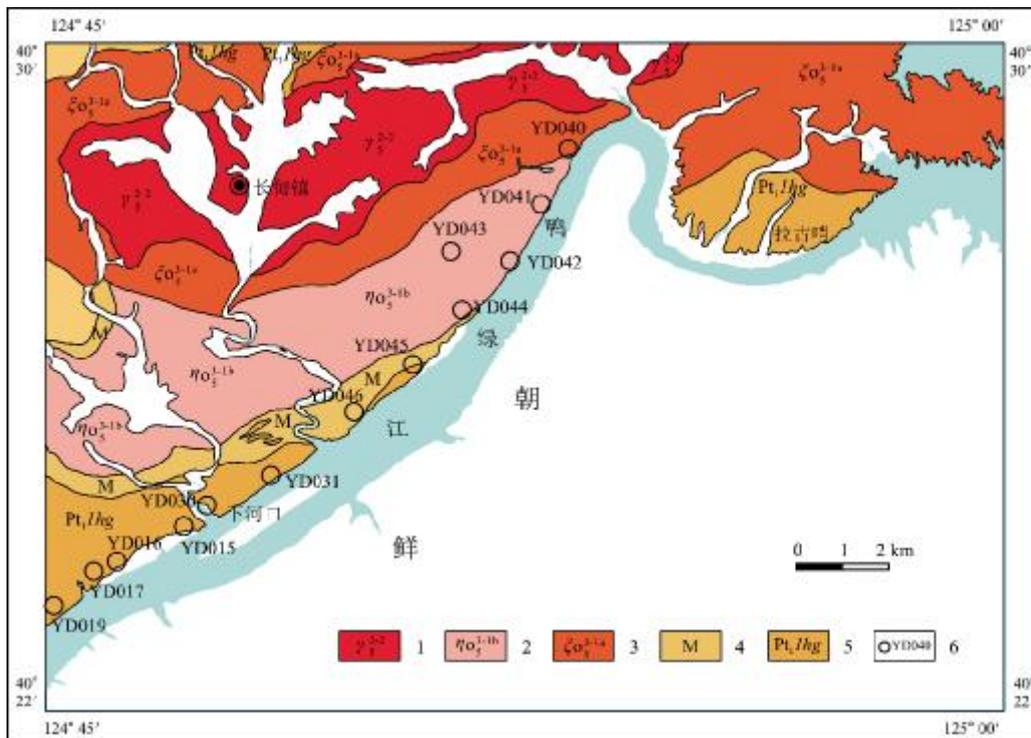


图1 研究区岩体分布图

Fig. 1 Distribution map of rock masses in the study area

1—中侏罗世花岗岩(Middle Jurassic granite); 2—中侏罗世石英二长岩(Middle Jurassic quartz monzonite); 3—中侏罗世石英正长岩(Middle Jurassic quartz syenite); 4—混合岩(migmatite); 5—高家峪组石墨黑云钾长片麻岩(graphite biotite K-feldspar gneiss of Gaojiayu fm.); 6—野外调查点(field survey spot)

表 1 岩体子类的基本质量等级特征一览表

Table 1 Basic quality grade characteristics of rock mass subclasses

岩体小类	岩体子类	点号	风化程度	岩体体积节理数 $J_v$ /(条/m <sup>2</sup> )	岩体完整性指数 $K_v$	完整情况	点荷载强度指数的平均值 $I_{s(50)}$	岩石单轴饱和抗压强度 $R_c$ /MPa	坚硬程度	岩体基本质量指标 BQ	质量等级
侵入岩组	石英正长岩	YD040	微风化	8	0.607	较完整	4.25	67.51	坚硬岩	454.27	II
		YD041	微风化	5	0.692	较完整	3.95	63.94	坚硬岩	464.82	II
	石英二长岩	YD042	微风化	7	0.635	较完整	4.86	74.68	坚硬岩	482.79	II
		YD043	中等风化	5	0.692	较完整	5.58	82.89	坚硬岩	521.66	II
		YD044	微风化	12	0.510	较破碎	4.64	72.20	坚硬岩	444.10	III
变质岩组	混合岩	YD045	中等风化	5	0.692	较完整	5.01	76.44	坚硬岩	502.32	II
		YD046	中等风化	14	0.470	较破碎	2.36	43.40	较硬岩	347.71	IV
	片麻岩	YD015	全风化			极破碎			极软岩		V
		YD016	全风化			破碎			软岩		V
		YD017	中等风化	4	0.721	较完整	4.12	66.04	坚硬岩	478.36	II
	YD019	微风化	4	0.721	较完整	5.04	76.75	坚硬岩	510.50	II	
	YD030	中等风化	14	0.470	较破碎	2.14	40.35	较硬岩	338.55	IV	
YD031	微风化	12	0.510	较破碎	1.97	37.93	较硬岩	331.30	IV		

征<sup>[8-9]</sup>.

### 1.3 岩体质量等级

根据工程地质岩组划分的原则,将下河口—拉古哨路段岩体划分为侵入岩组和变质岩组两个小类.侵入岩包括石英二长岩和石英正长岩两个子类,变质岩包括混合岩和片麻岩两个子类<sup>[10]</sup>.

通过野外实地调查及室内点荷载试验<sup>[11]</sup>,得出岩体工程地质数据(表 1).侵入岩组总体为微风化,少数为中等风化,总体为较完整,坚硬程度总体为坚硬;变质岩均有不同程度的风化,多为中等程度风化,并且岩体结构破坏程度较重,属于较硬岩—较软岩.通过分析可知石英正长岩、石英二长岩和混合岩岩体质量等级较好,片麻岩岩体质量等级较差<sup>[12]</sup>(表 2).

表 2 下河口—拉古哨路段边坡岩体质量分级

Table 2 Rock mass quality grading of the slope along Xiahekou-Lagushao road section

岩性	石英正长岩	石英二长岩	中等风化混合岩	中等风化片麻岩
BQ 值	>451	>440	>451	251-350
岩体质量等级	II	II—III	II	IV

### 1.4 岩体力学参数

在岩体质量等级分类上,常用的有 RMR 和 BQ 方法,RMR 岩体分级体系是 Bieniawski 于 1973 年建立的,其目的是对岩体的性质进行量化评价,并为岩体稳定性的评价提供依据<sup>[13]</sup>.而 BQ 分级法主要考虑的是岩块的强度以及岩体的完整性<sup>[14]</sup>.这两种方法的最大特点就是可以综合岩体中的影响因素,也正是因为分级方法较为相似,两种方法在运行过程中也有着一定相关性<sup>[15]</sup>,如以下公式,从式(1)中可利用 BQ 得到 RMR 的结果,而式(2)(3)则可计算岩体特性材料常数  $m, s$ <sup>[7]</sup>.

$$BQ=132.4+5.0183RMR \quad (1)$$

$$m=m_i \exp \frac{RMR-100}{14} \quad (2)$$

$$s=\exp \frac{RMR-100}{6} \quad (3)$$

$$\tau=(\cot \varphi_i-\cos \varphi_i) \frac{m \sigma_n}{8} \quad (4)$$

式(4)中  $\sigma_n$  代表岩体的法向应力, $\tau$  代表剪应力, $\varphi$  代表摩擦角.通过式中的计算情况可知法向应力会对剪应力造成影响,并可利用岩体的特性材料常数  $m$  对  $\sigma_n$

和  $\tau$  数据拟合得到相应的内聚力和内摩擦角<sup>[7]</sup>(表3)岩石的内聚力越低、内摩擦角越小,则岩石的强度就越低,岩体的稳定性就会变低,反之亦然<sup>[16]</sup>.

表3 各类岩体力学参数值表

Table 3 Mechanical parameters of rock masses

参数	石英正长岩	石英二长岩	中等风化混合岩	中等风化片麻岩
内聚力 $c/\text{MPa}$	0.702	0.693	0.712	0.413
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	42.1	37.8	39.5	32.4

## 2 边坡失稳模式分析

一般情况下,在判断岩体是否会发生滑动破坏现象时,会将岩体表面倾斜方向和坡向视为同向,当其倾角角度数处于岩体内摩擦角和坡角度数之间时,其发生滑动破坏的可能性较大<sup>[17]</sup>.下河口—拉古哨路段坡向总体为南东向,对边坡进行节理面倾向和构造结构面分析,其结果如图2、图3所示.玫瑰花图(图2)由31组岩体倾向数据制成,通过分析,测定的4组均值数据( $272^\circ \angle 42^\circ$ 、 $290^\circ \angle 46^\circ$ 、 $12^\circ \angle 39^\circ$ 、 $153^\circ \angle 52^\circ$ )中,只有第四组的节理倾向和坡面倾斜情况相近,其余3组的节理方向均与坡面方向相差较大<sup>[18]</sup>.通构造结构面分析(图3),其优势结构面的方向与坡面相反,根据此结果得出发生滑动破坏的可能性较小.同时对优势结构面和坡面的夹角进行测定,结果均不大于  $120^\circ$ ,以此判断出现山体倾倒的几率较小<sup>[19]</sup>.

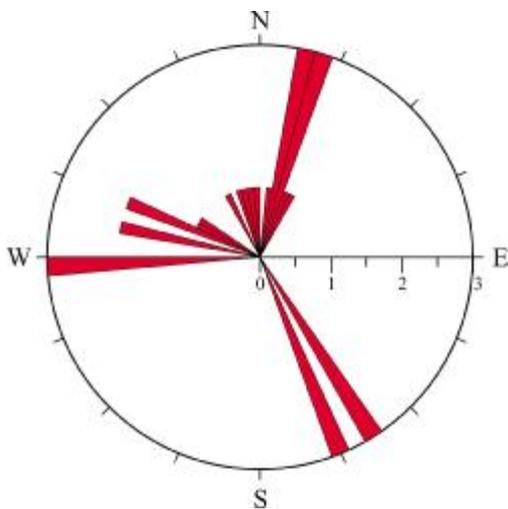


图2 下河口—拉古哨路段节理面倾向玫瑰花图  
Fig. 2 The rose diagram for joint plane dip directions of Xiahekou-Lagushao section

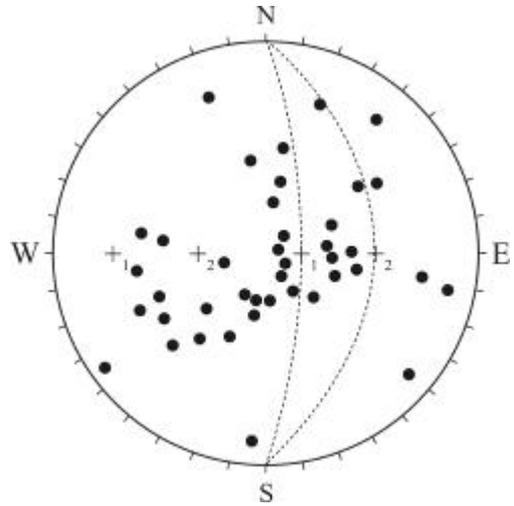


图3 下河口—拉古哨路段构造结构面极点统计图  
Fig. 3 Polar point statistical diagram for structural planes of Xiahekou-Lagushao section

片麻岩岩体完整性程度总体为较破碎,局部风化严重,对边坡的稳定性有显著影响,故对于片麻岩组成的边坡段,必须考虑风化程度、节理发育程度与坡面的空间组合关系.下河口—拉古哨路段全风化片麻岩边坡如遇强降雨等因素会发生滑动破坏.对该片麻岩岩体边坡的倾角、节理和坡面角度进行测定后,发现其倾角和坡面角度较大,同时节理密集,以此判断其可能出现的危险为崩塌<sup>[20]</sup>.

## 3 结论

1) 经岩体质量分级,有3种岩体的质量等级较高,其BQ值大于440小于550,分别为石英二长岩、石英正长岩及混合岩.

2) 石英二长岩、石英正长岩、混合岩和片麻岩岩体优势结构面与坡面的夹角均小于  $120^\circ$ ,出现岩体倾倒的几率较小.

3) 石英二长岩、石英正长岩和混合岩岩体节理对边坡失稳破坏的影响较小;片麻岩的岩体质量等级较低,其风化等级较高且节理发育较好,降低了边坡的稳定性,岩体有可能发生滑动破坏.

4) 下河口—拉古哨路段岩体风化程度、完整性和岩体结构面的节理发育情况对边坡的稳定程度尤为重要.当某边坡稳定程度受到影响时,其影响因素存在较多情况,需进行实地勘测.

## 参考文献(References):

- [1]王存良. 陕西宝鸡地区黄土工程边坡分类及防治现状[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1111-1119.  
Wang C L. Classification of loess engineering slopes and present situation of prevention and control in Baoji area, Shaanxi[J]. Global Geology, 2019, 38(4): 1111-1119.
- [2]刘雨鑫, 冯玉华. 天峻县苏里乡一社不稳定斜坡危害与防治[J]. 青海国土经略, 2012, 21(3): 43-44.  
Liu Y X, Feng Y H. Damage and prevention of unstable slope in No. 1 Community of Suli Township, Tianjun County[J]. Management & Strategy of Qinghai, 2012, 21(3): 43-44. (in Chinese)
- [3]陈伟楠, 徐明. 沙湾县翠山公园不稳定斜坡地质灾害特征分析[J]. 地下水, 2019, 41(1): 135-138.  
Chen W N, Xu M. Analysis on geological hazard characteristics of unstable slope in Cuishan Park of Shawan County[J]. Ground Water, 2019, 41(1): 135-138. (in Chinese)
- [4]张玉, 杨志双, 张瑛, 等. 本溪南芬铁矿排土场滑坡稳定性研究[J]. 地质与资源, 2008, 17(1): 50-52, 60.  
Zhang Y, Yang Z S, Zhang Y, et al. Study on the stability and landslide control of the dumping ground in Nanfen Iron Mine, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2008, 17(1): 50-52, 60.
- [5]鲁宝锋. 图解法与极限平衡法在边坡稳定分析中的应用[J]. 绿色环保建材, 2017, 4(2): 225, 227.  
Lu B F. Application of graphic method and limit equilibrium method in slope stability analysis[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2017, 4(2): 225, 227. (in Chinese)
- [6]王艳龙, 杜立志, 何赛, 等. 逻辑回归模型在边坡稳定性分析中的应用[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 945-951.  
Wang Y L, Du L Z, He S, et al. Application of logistic regression model in slope stability analysis[J]. Global Geology, 2018, 37(3): 945-951.
- [7]曲文峰, 王德中, 张理, 等. 基于 RMR 岩体质量评价的某边坡稳定性分析[J]. 江西有色金属, 2010, 24(1): 7-9.  
Qu W F, Wang D Z, Zhang L, et al. Slope stability evaluation based on RMR rock mass quality classification method[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2010, 24(1): 7-9.
- [8]高博, 陈桂虎, 王刚, 等. 辽宁太平湾地区地质灾害特征及其对机动通行能力的影响[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1152-1165.  
Gao B, Chen G H, Wang G, et al. Characteristics of geological disasters in Taiping Bay district of Liaoning and their impact on motor traffic capacity[J]. Global Geology, 2019, 38(4): 1152-1165.
- [9]张国仁, 江淑娥, 韩晓平, 等. 鸭绿江断裂带的主要特征及其研究意义[J]. 地质与资源, 2006, 15(1): 11-19.  
Zhang G R, Jiang S E, Han X P, et al. The main characteristics of Yalujiang fault zone and its significance[J]. Geology and Resources, 2006, 15(1): 11-19.
- [10]龚放. 工程地质岩组与岩体质量分级在岩石工程中应用对比[J]. 江西建材, 2016, 36(23): 200-206.  
Gong F. Application comparison of engineering geological rock group and rock mass quality classification in rock engineering[J]. Jiangxi Building Materials, 2016, 36(23): 200-206. (in Chinese)
- [11]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 1-34.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013: 1-34.
- [12]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 1-20.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2015: 1-20.
- [13]安李良, 杨健. RMR 法在斯里兰卡 KMTC 隧洞工程中的应用[J]. 云南水力发电, 2020, 36(6): 25-28.  
An L L, Yang J. Application of RMR method in KMTC tunnel project in Sri Lanka[J]. Yunnan Water Power, 2020, 36(6): 25-28.
- [14]虞金林. BQ 分级法在边坡岩体基本质量分级中的应用分析[J]. 江苏建材, 2021, 41(2): 50-53.  
Yu J L. Application analysis for BQ classification method applied in basic quality classification of slope rock mass[J]. Jiangsu Building Materials, 2021, 41(2): 50-53.
- [15]姜平, 孟伟. 基于岩体质量分级的岩石力学参数研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004, 26(5): 424-427.  
Jiang P, Meng W. Research on rock mechanics parameters of rock quality grade-oriented[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2004, 26(5): 424-427.
- [16]刘德克, 李克钢. 内聚力和内摩擦角对岩样峰值强度影响规律探讨[J]. 矿产保护与利用, 2015, 35(3): 16-19.  
Liu D K, Li K G. The discussion on effect of cohesion and internal frictional angle on the peak strength of rock[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015, 35(3): 16-19.
- [17]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 2-83.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 2-83.

- 响因素分析[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(8): 87-96.
- Wang X S, Teng D G, Xie W, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of landslide disasters in mountain cities[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(8): 87-96.
- [21]董丞妍, 罗明良, 张斌. 四川芦山余震序列空间格局分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 45-50.
- Dong C Y, Luo M L, Zhang B. Analysis of spatial pattern of Lushan aftershocks sequence[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 45-50.
- [22]Qiu H J, Cui Y F, Hu S, et al. Temporal and spatial distributions of landslides in the Qinba Mountains, Shaanxi Province, China [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 599-621.
- [23]张诗茹, 蒋建军, 缪亚敏, 等. 基于SBAS技术的岷江流域潜在滑坡识别[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 91-97.
- Zhang S R, Jiang J J, Miao Y M, et al. Application of the SBAS technique in potential landslide identification in the Minjiang watershed[J]. Mountain Research, 2018, 36(1): 91-97.
- [24]许领, 戴福初. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 28-32.
- Xu L, Dai F C. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 28-32.
- [25]桂蕾, 殷坤龙, 王佳佳. 基于聚类分析的滑坡灾害危险性区划研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 100-105.
- Gui L, Yin K L, Wang J J. Landslide hazard zonation based on cluster analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 100-105.
- [26]何玉花, 张东水, 李燕婷, 等. 基于聚类的黄河上游干流地区滑坡特征研究[J]. 地理空间信息, 2017, 15(11): 60-64.
- He Y H, Zhang D S, Li Y T, et al. Research on landslide characteristics in the main stream area of the Yellow River upper reaches based on clustering[J]. Geospatial Information, 2017, 15(11): 60-64.
- [27]Melchiorre C, Matteucci M, Azzoni A, et al. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation[J]. Geomorphology, 2008, 94(3/4): 379-400.
- [28]樊晓一, 胡晓波, 张睿骁, 等. 开阔型地形条件对滑坡运动距离的影响研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 188-196.
- Fan X Y, Hu X B, Zhang R X, et al. Study on the open topography influence on the moving distances of landslides[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 188-196.
- [29]王欢, 潘代洪, 靳艳彩. 重庆黔江区斜坡坡度对滑坡发育的贡献率[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(5): 81-84.
- Wang H, Pan D H, Jin Y C. Contributing rate of slope gradient to landslide growth in Qianjiang District of Chongqing [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(5): 81-84.
- [30]Wu C Y, Qiao J P, Wang M. Landslides and slope aspect in the three gorges reservoir area based on GIS and information value model [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 773-779.
- [31]Zeng R Q, Meng X M, Zhang F Y, et al. Characterizing hydrological processes on loess slopes using electrical resistivity tomography: A case study of the Heifangtai Terrace, Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 742-753.

(上接第 205 页/Continued from Page 205)

- [18]陈卫忠, 杨建平, 邹喜德, 等. 裂隙岩体宏观力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1569-1575.
- Chen W Z, Yang J P, Zou X D, et al. Research on macro mechanical parameters of fractured rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1569-1575.
- [19]刘飞, 秦胜伍, 乔双双, 等. 基于神经网络模型的斜坡地质灾害易发性评价: 以吉林永吉为例[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1166-1176.
- Liu F, Qin S W, Qiao S S, et al. Slope geological hazards susceptibility evaluation based on neural network model: A case study from Yongji County of Jilin Province [J]. Global Geology, 2019, 38(4): 1166-1176.
- [20]李庆海, 李飞, 蒋楚生. 巴中车站高边坡破坏机理分析及整治措施[J]. 路基工程, 2015, 33(1): 195-199.
- Li Q H, Li F, Jiang C S. Analysis on failure mechanism of high slope at Bazhong railway station and the countermeasures [J]. Subgrade Engineering, 2015, 33(1): 195-199.