数量化理论Ⅲ在川东红层岩质滑坡研究中的应用

张世林[1,2], 孙金辉[1,2], 马 娇[3]

〔1. 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734; 3. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 湖北 武汉 430074〕

摘 要: [目的] 揭示川东红层岩质滑坡稳定性的影响因素,为该地区滑坡的防治提供理论依据。[方法] 基于对川东红层地区的滑坡综合调查,利用数量化理论Ⅲ对该地区滑坡的影响因素及其耦合作用进行分析。[结果] 川东地区滑坡的主要作用因素为岩层倾角、滑坡高度及临空面高度,次要作用因素为土地利用情况及岩层组合关系,而一般作用因素是外营力及人类工程活动和岩层时代;确定出年降雨量、侏罗纪时代岩层、小于 50 m 的滑坡高度、岩层倾角在 5°～15°之间、厚层砂岩或泥岩夹薄层泥岩或砂岩、临空面高度在 5～15 m 之间、土地旱地利用及河流冲刷及人类工程活动的主控影响因素。[结论] 在不同滑坡样品中,不同因素的耦合强度具有一定的差异。经对比分析结果与现场调查的可靠性验证,证明了该方法的有效性。

关键词: 滑坡; 川东红层; 数量化理论Ⅲ; 耦合作用

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2016)02-0140-06 **中图分类号**: P642.22

文献参数: 张世林, 孙金辉, 马娇. 数量化理论Ⅲ在川东红层岩质滑坡研究中的应用[J]. 水土保持通报, 2016,36(2):140-145. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.027

A Study of Rock Mass Landslide in Red Rock Area of East Sichuan Province Based on Third Theory of Quantification

ZHANG Shilin[1,2], SUN Jinhui[1,2], MA Jiao[3]

〔1. *Institute of Exploration Technology, Chengdu, Sichuan* 611734, *China*; 2. *Geological Disaster Prevention Technology Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan* 611734, *China*; 3. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei* 430074, *China*〕

Abstract: [Objective] The influencing factors of landslide were explored in red rock area of East Sichuan Province in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of landslide in this area. [Methods] A comprehensive survey related with landslide was carried out in red rock area of East Sichuan Province, influential factors of landslide and their coupling intensities were analyzed using the third theory of quantification. [Results] The first contributing factor of landslide in red rock area of East Sichuan Province are strata dip, landslide height and the free surface height. The second contributing factors are land use situation and rock composition relationships. The third factors are outside forces and human engineering activities and rock era. The main control factors include annual rainfall, Jurassic era rock, less than 50 m landslide height, rock inclination between 5°～15°, thick sandstone or mudstone with thin mudstone or sandstone, free surface height between 5～15 m, dryland land use and river erosion and human activity. [Conclusion] In different landslide samples, though the coupling strengths of different factors were different, they were verified in comparison with field investigations. Therefore, the validity of the method is proved.

Keywords: **landslide; red rock area of east Sichuan Province; third theory of quantification; coupling intensity**

红层在我国具有面积大、分布广、易滑等特点,易形成大量的滑坡灾害,且滑坡具有群发、隐蔽等特征,具有很强的潜在威胁。因此,对红层地区滑坡影响因素的分析具有重要的意义。在红层研究方面,已有一

收稿日期:2015-10-21 **修回日期**:2015-10-24

资助项目:中国地质调查局地调项目"西南红层地区缓倾顺层岩质滑坡调查与防治"(12120113011200)

第一作者:张世林(1981—),男(汉族),云南省威信县人,硕士,工程师,主要从事地质灾害防治技术及地质灾害治理工程勘查设计等方面的研究。E-mail:38183037@qq.com。

些学者在这方面进行了研究,如程强等[1]根据我国红层的分布特点,对中国红层进行了分区划分,并分析了不同地区滑坡的特点,对中国红层研究具有重要的意义;耿兴福等[2]分析了近水平状红层滑坡的形成机理,为红层滑坡的研究提供了理论基础;黄绍槟等[3]针对四川地区的红层进行了研究,分析了四川红层的基本特征及工程地质特征;李江等[4]进一步分析研究了川东红层的形成环境、规律及其影响因素,揭示了该地区滑坡的成因机理;张明等[5]分析了降雨对川东红层滑坡的影响机制,为川东地区理论的研究提供了理论支持;张世林等[6]研究了不同降雨类型对川东缓层滑坡的影响规律,取得了良好的效果。同时,数量化理论Ⅲ对研究多因素的影响规律具有较好的效果,许多学者已对该理论进行了应用,如赵黎明等[7]利用数量化Ⅲ理论对人力资源绩效进行了评价,经实例检验,具有较好的效果;石庆礼等[8]将数量化理论Ⅲ应用于煤矿瓦斯的危险性评估中,而吴财芳等[9]利用数量化理论Ⅲ分析了瓦斯突出的敏感性因素,两者均利用实例验证了该方法的有效;李军霞等[10]进一步将数量化理论Ⅲ应用到了滑坡主要影响因素的分析中,实例验证取得了良好的效果。但是,在上述研究中,对川东红层地区滑坡的研究相对较少,且没有对川东红层滑坡影响因素的综合性定量研究,同时,也还没有数量化理论Ⅲ在川东缓倾滑坡影响因素中的应用。因此,本研究基于对川东地区红层滑坡的现场调查,将数量化理论Ⅲ应用于该地区滑坡影响因素的筛选中,对该地区滑坡的主要因素及其耦合强度进行研究,并对比现场调查和理论分析的结果,研究该理论在川东红层滑坡中应用的有效性,以期为该地区滑坡的后期防治提供理论基础。

1　基本原理

数量化理论Ⅲ是一种可以实现对样品或定量有效分类的方法,其基本思想是构建反应矩阵,给各类目赋予一定的得分,进而分析各类目及样品之间的相互关系。在该理论中,其主要因素称为项目,而项目的次级因素称为类目,而变量包含了定性变量和定量变量。

在数量化理论Ⅲ的应用过程中,一个一维的特征向量常难以表示变量或样品的特征,可利用多个特征向量来表示,且特征值越大,其对应的特征得分向量具有更好的代表性。

2　川东红层滑坡发育影响因素分析

川东红层是中国具有代表性的红层之一,其主要分布于四川盆地及其边缘,面积约 1.65×10^5 km^2,由于其发育的岩性及地貌特征,使得在川东红层地区发育有大量的滑坡,结合对该地区滑坡的调查研究,将其滑坡发育的主要影响因素分析如下:(1) 川东地区滑坡所处的地层多为侏罗系和白垩系时代的地层,主要以砂岩、泥岩不等厚互层分布,岩层多为棕红色,且一般砂岩层较厚。由于砂岩泥岩互层分布,且泥岩风化能力较强,很大程度上为滑坡发生提供了软弱结构面,这说明地层时代及其分布的交互关系对滑坡发育具有重要的影响。(2) 川东红层地区的岩层倾角普遍较缓,通常在 0°～20°之间。由于地层坡度较缓,使得滑坡基岩上覆土体沿层面的分布较为隐蔽,易在小坡度条件下出现群发破坏的特点;同时,岩层倾角较小,易出现沿地层的基覆式滑坡的滑面倾角小于滑带土的内摩擦角,这使得传统滑坡稳定性分析方法具有一定的局限性,需要对川东地区滑坡稳定性的影响因素进行针对性的研究。(3) 川东红层地区的地貌主要为缓倾单面山地貌,受地质构造及地层岩性的影响,溪沟及河流等较发育,对斜坡前缘具有深切割的现象,这使得川东地区滑坡前缘均具有较为突出的临空面,这极大程度上为滑坡的滑动提供了滑动的空间条件,且减少了滑坡的抗滑作用,增加了滑坡前缘临空面坡肩的拉应力分布,易造成滑坡前缘向后的渐进性累计垮塌破坏。(4) 川东红层地区滑坡的高度均相对不高,该地区的滑坡的破坏类型主要有堆积层滑坡和顺层滑坡,由于雨量充沛,使得地表残积土难以堆积,且由于地层倾角相对较小,使得滑坡的坡度相对较小,进而造成滑坡的高度均相对不高。(5) 降雨是滑坡的主要诱发因素之一,对川东地区滑坡也是如此。在川东红层地区,砂岩泥岩互层明显,降雨易使软弱岩层出现“软化效应”,同时易在相对隔水层上部形成水体滞留的现象,进而改变滑坡的应力分布,促使滑坡的破坏。(6) 人类工程活动是川东地区滑坡滑动的主要的外因之一,由于居民耕种及房屋修建对原始坡面的影响,易于促使坡体临空面的出现,对滑坡的稳定性不利。

综合上述分析,川东地区滑坡的影响因素与其他地区滑坡具有一定的差异,因此本研究结合川东地区滑坡的特点,选取滑坡的岩层时代、滑坡高度、岩层倾角、岩层组合关系、前缘临空面高度、土地利用情况、外营力及人类工程活动、年降雨量为本文数量化理论分析的主要影响因素,各因素及其次级分类详见表 1。

3　滑坡主控因素及其耦合强度分析

基于数量化理论Ⅲ的基本原理,结合对川东地区

滑坡的现场地质调查，提取滑坡各影响因素的相关数据，旨在于利用数量化Ⅲ理论删选出川东地区滑坡的主控因素，并对各因素进行分析，为川东地区滑坡的稳定性评价提供一定的理论基础。

表1 滑坡主要影响因素

项 目	类 目	序号
岩层时代	侏罗纪	1
	白垩纪	2
滑坡高度/m	＜50	3
	50～100	4
	100～150	5
	＞150	6
岩层倾角/(°)	0～5	7
	5～10	8
	10～15	9
	15～20	10
	20～25	11
	25～30	12
前缘临空面高度/m	＜5	17
	5～10	18
	10～15	19
	15～20	20
	＞20	21
土地利用情况	水田	22
	旱地	23
	林地	24
外营力及人类工程活动	河流冲蚀	25
	人类工程活动	26
岩层组合关系	厚层砂岩下伏厚层泥岩	13
	厚层泥岩下伏厚层砂岩	14
	厚层砂岩夹薄层泥岩	15
	厚层泥岩夹薄层砂岩	16

3.1 数据来源

选取川东地区具有代表性的33个滑坡作为数据提取的来源，结合数量化理论Ⅲ对各定性类目的基本原理，对33个滑坡的数据进行整理和统计。同时，通过对滑坡的影响因素进行统计和分类，得出川东地区滑坡的影响因素(项目)主要有7个，其次级影响因素(类目)主要有27个。因此，结合数量化理论Ⅲ和现场调查数据，对川东红层岩质滑坡的数量化理论规律进行研究。

3.2 滑坡主控影响因素筛选

基于滑坡影响参数的统计，本文用于数量化Ⅲ理论的滑坡样本数据为33个，项目为7个，主要为岩层时代、滑坡高度、岩层倾角、岩层组合关系、前缘临空面高度、土地利用情况、外营力及人类工程活动和年降雨量，且其类目总数为27个。结合前文计算原理，得出计算结果的前3个最大的特征值为$\lambda_1=0.117\ 2$，$\lambda_2=0.086\ 4$，$\lambda_3=0.073\ 7$，且其对应的特征向量即为各类目对应的得分，且特征值越大，其可靠度越高，所以利用上述3个特征值及其特征向量对滑坡各影响因素及类目进行评价，其各类目得分详见表2。

3.2.1 *类目主导因素筛选* 由于上述3个特征向量均能代表各类目的得分，所以以上述3个特征向量对应三维坐标的因子轴，分析各类目在三维空间的得分；同时，以各类目空间点到原点的距离作为类目对坏影响程度的标准，并结合文献[10]，将各类目的影响程度划分为3类：A类为主要控制因素，B类为次要控制因素，C类一般控制因素。结果详见表3。

由图1和表3结合可知，在川东红层地区，滑坡的A类主控因素包含年降雨量、侏罗纪时代岩层、小于50 m的滑坡高度、岩层倾角5°～15°、厚层砂岩或泥岩夹薄层泥岩或砂岩、临空面高度5～15 m、土地旱地利用及河流冲刷及人类工程活动，而滑坡高度大于100 m、岩层倾角25°～30°、厚层泥岩下伏厚层砂岩、临空面高度大于20 m等因素为滑坡的C类影响因素，其余因素则是滑坡的次要控制因素。结合前文对川东地区滑坡的特点及现场的调查情况，川东地区滑坡的地层时代控制了地层的形成过程，造成砂泥岩互层，而当两岩层厚度不一致时，易造成土层应力分布的差异，进而出现破坏的软弱面，这与本文数量化理论分析的结果一致；同时，岩层倾角较缓及临空面的分布区间也与本文的分析结果一致，其影响规律已在前文进行叙述，而人类活动则是滑坡活动的外因，对滑坡稳定性的影响较大；另外，降雨对滑坡的影响更不容忽视，在川东红层地区，雨量充沛，溪沟发育，对滑坡的形成和诱发都起到了至关重要的作用。现场的实际调查结果与本文理论分析基本一致，说明本研究数量化理论Ⅲ的应用较为成功，各主控因素对滑坡的形成和发育起着重要的作用。

3.2.2 *项目影响因素筛选* 基于数量化理论Ⅲ的基本原理和各类目的得分向量，选取得分范围R和方差比η作为滑坡项目影响因素筛选的基本标准，同时，考虑前文3个得分向量的差异性，选取最大特征值对应的得分向量作为因素筛选的得分向量，结果详见表4。由表4可知，各影响因素的得分范围具有较强的区间性，得出川东地区滑坡的主要作用因素为岩层倾角、滑坡高度及临空面高度，次要作用因素为土

地利用情况及岩层组合关系,而起一般作用的因素是外营力及人类工程活动和岩层时代。综合上述对川东地区滑坡影响因素重要性的筛选,得出了主要作用因素、次要作用因素及一般作用因素,并与现场的调查情况基本相符,均得出了本研究数量化理论Ⅲ应用的有效性。

表 2　滑坡影响因素类目得分

影响因素		b_1(特征值为 0.117 2)	b_2(特征值为 0.086 4)	b_1(特征值为 0.073 7)
岩层时代	侏罗纪	0.032 0	−0.105 9	−0.061 2
	白垩纪	−0.038 5	0.127 1	0.073 4
滑坡高度	<50 m	−0.033 5	−0.083 9	−0.006 8
	50～100 m	−0.008 2	0.170 3	0.200 3
	100～150 m	−0.117 4	0.509 9	−0.297 3
	>150 m	0.540 5	0.070 9	−0.122 0
岩层倾角	0°～5°	−0.114 7	−0.126 7	0.038 9
	5°～10°	0.070 3	0.084 8	0.038 2
	10°～15°	−0.051 1	0.056 2	−0.064 8
	15°～20°	0.007 9	−0.081 3	0.127 6
	20°～25°	−0.088 7	−0.146 1	−0.097 7
	25°～30°	0.603 2	0.001 6	−0.539 9
岩层组合关系	厚层砂岩下伏厚层泥岩	−0.053 8	−0.129 0	0.028 3
	厚层泥岩下伏厚层砂岩	0.184 0	0.053 7	0.380 3
	厚层砂岩夹薄层泥岩	−0.017 9	0.055 5	−0.087 6
	厚层泥岩夹薄层砂岩	−0.009 1	−0.077 8	−0.035 6
前缘临空面高度	<5 m	−0.011 9	−0.165 6	−0.079 7
	5～10 m	−0.057 5	−0.004 3	0.079 2
	10～15 m	−0.029 9	0.059 4	−0.084 7
	15～20 m	0.430 3	0.054 7	0.077 5
	>20 m	−0.107 8	0.707 8	−0.432 7
土地利用情况	水 田	0.129 0	0.044 1	0.258 8
	旱 地	−0.065 0	0.020 8	−0.015 8
	林 地	0.180 0	−0.185 7	−0.297 1
外营力人类工程活动	河流冲蚀	0.069 2	0.112 6	−0.004 6
	人类工程活动	−0.039 6	−0.064 3	0.002 6
年降雨量	1 200～1 400 mm	0.000 1	0.000 1	0.000 1

表 3　滑坡类目影响因素空间距离

类目编号	空间距离	类别	类目编号	空间距离	类别
1	0.126 5	A	15	0.105 2	A
2	0.151 7	B	16	0.086 0	A
3	0.090 6	A	17	0.184 2	B
4	0.263 0	B	18	0.098 0	A
5	0.601 8	C	19	0.107 7	A
6	0.558 6	C	20	0.440 6	B
7	0.175 2	B	21	0.836 5	C
8	0.116 6	A	22	0.292 5	B
9	0.099 9	A	23	0.070 0	A
10	0.151 5	B	24	0.393 9	B
11	0.196 9	B	25	0.132 2	A
12	0.809 5	C	26	0.075 6	A
13	0.142 6	B	27	0.000 1	A
14	0.425 9	C			

注:将各类目的影响程度划分为 3 类,A 类为主要控制因素,B 类为次要控制因素,C 类为一般控制因素。

表 4　滑坡类目影响因素筛选表

影响因素	得分范围	方差比	排序
岩层时代	0.070 5	0.002 5	7
滑坡高度	0.657 9	0.072 4	2
岩层倾角	0.717 9	0.090 3	1
岩层组合关系	0.237 7	0.011 5	5
前缘临空面高度	0.538 2	0.047 8	3
土地利用情况	0.244 9	0.016 7	4
外营力及人类工程活动	0.108 8	0.005 9	6

3.3　滑坡影响因素之间的耦合作用分析

基于数量化理论Ⅲ对样品得分的评价,进一步对各滑坡样品的得分进行计算,以评价滑坡的发育程度;同时,考虑滑坡各影响因素之间可能存在的耦合作用,因此在剔除表 4 中的一般因素后,再对各滑坡样品的得分进行评价,对比剔除一般因素前后滑坡样品的得分,以评价滑坡各因素之间的耦合程度,相关计算结果如图 1 所示。由图 1 可知,不同滑坡样品的

得分具有一定的差异，说明滑坡的发育程度不同。同时，以样品得分±0.01为界，将滑坡的发育程度划分为强、中、弱3个等级，通过统计可知，滑坡13，14及19号的发育程度较强，说明其危险性较高，其中13号滑坡的危险程度最高，而滑坡1，8，12，15，21，22，23号的发育程度较弱，危险性较低，其余滑坡的发育程度中等，危险性间于上述两者之间，工程本文滑坡样本的69.7%，说明调查的川东地区滑坡的危险性绝大部分处于中等，危险性一般。另外，对比剔除一般影响因素前后的滑坡得分可知，两种情况下各滑坡的得分均具有较强的相似性，但也具有一定的差异，说明滑坡的一般影响因素对滑坡的影响较小，不过也存在一定的耦合作用，且不同滑坡耦合作用的程度具有一定的差异，为分析各滑坡耦合程度的大小，以样品得分差值的绝对值0.005为界，将滑坡影响因素的耦合程度划分为强和弱，经过对比剔除一般影响因素前后的滑坡得分得滑坡8，10，12，16，18，19，20，23，25，26，28，33号的耦合程度相对较强，其余滑坡的耦合程度相对较弱。

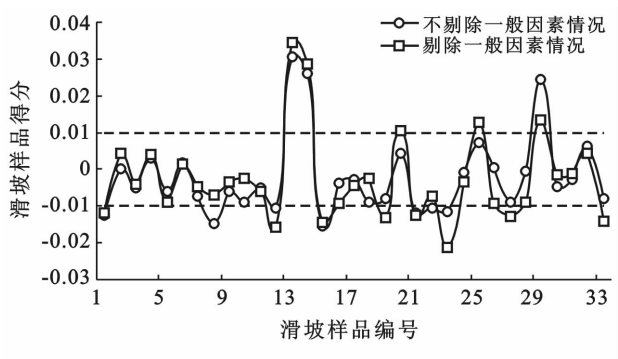


图1 滑坡样品得分分布状况

3.4 可靠性验证

为验证上述数量化理论Ⅲ对滑坡影响因素分析结果的有效性，以上述33个滑坡以外的杨家塝滑坡为例，对分析结果进行验证。杨家塝滑坡位于南江县沙河镇北东侧，其基岩为白垩系地层，岩层倾角在10°～20°之间，较为平缓，岩性为棕红色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及青灰色厚层—块状中细粒含钙质长石石英砂岩，呈不等厚互层，各岩层之间的厚度及性质具有较大的差异，其岩组具有半坚硬—软弱岩组的特征，地貌上亦表现为硬层互相迭置的现象。该滑坡地形为平缓斜坡，可分为两部分滑坡组成（H_1和H_2）。其中，H_1滑坡体长度约为270 m，前缘宽度约为70 m，后缘宽度约为180 m，厚度约为5～9 m，相对高差约为46～56 m；H_2滑坡体长度约为80 m，宽度约为68 m，厚度约为4～6 m，相对高差约为30 m。同时，滑坡基岩被切割，在滑坡前缘形成了陡坎，陡坎高度在5～15 m之间。滑坡体的主要成分是残坡积碎石土，夹有块石，其含量在10%～15%之间，且含有较多的粉质黏土，可塑性较强。另外，降雨对杨家塝滑坡的影响较大，是其主要的诱发因素，在2011年9月18日的暴雨中，H_1滑坡体前缘出现崩滑，崩滑范围的长度为50 m，宽度65 m，厚度2～6 m，体积约10 000 m^3。主要表现为前缘强风化基岩和覆盖层滑动，滑动基岩为粉砂质泥岩，滑动方向150°；同时，滑坡前缘未滑移部分变形也较为严重，主要表现为出现多级拉陷裂隙，土体下错，裂隙宽度5～30 cm，最大下错高度1 m，裂隙长度5～30 m。另外，滑坡前缘左侧基岩陡坎处可见剪切下错裂隙，基岩上可见清晰掉坎痕迹；滑坡前缘右侧基岩陡坎上约30 m范围内，可见明显基岩错动迹象，错动基岩厚度1～3 m，前后部厚，后部薄，呈台阶状，且造成形区内的村民房屋被严重损毁，无法居住。而在人类工程活动方面，滑坡地表被居民长期农耕改造，对滑坡的原始坡面具有一定的影响，且建筑物的修建对坡体局部进行开挖，也形成了一定的临空面，对滑坡的稳定性不利。目前，滑坡的稳定性较差，处于蠕滑变形阶段，威胁到51户210人的生命财产安全安全，以及碎石路面村道100 m、坡体水田13.33 hm^2和部分林地，潜在经济损失在1 200万元以上。

基于数量化理论Ⅲ分析，得出杨家塝滑坡的主要影响因素为岩层倾角、滑坡高度及临空面高度，次要影响因素为土地利用情况及岩层组合关系，而起一般作用的因素是外营力及人类工程活动和岩层时代，且滑坡的发育程度较高，影响因素之间的耦合作用相对较强，这与滑坡现场调查的情况基本一致，进一步说明了该理论在川东地区应用的有效性。

4 结 论

（1）基于数量化理论Ⅲ对川东地区滑坡项目主控因素的筛选，得出滑坡的A类主控因素包含年降雨量、侏罗纪时代岩层、小于50 m的滑坡高度、岩层倾角在5°～15°之间、厚层砂岩或泥岩夹薄层泥岩或砂岩、临空面高度在5～15 m之间、土地旱地利用及河流冲刷及人类工程活动。这为后期该地区滑坡的治理及研究提供了依据。

（2）基于数量化理论Ⅲ对川东地区滑坡类目主控因素的筛选，得出川东地区滑坡的主要作用因素为岩层倾角、滑坡高度及临空面高度，次要作用因素为土地利用情况及岩层组合关系，而起一般作用的因素是外营力及人类工程活动和岩层时代。

(3) 基于数量化理论Ⅲ对各样品滑坡的得分计算,得出滑坡 13,14 及 19 号的发育程度较强,说明其危险性较高,而滑坡 1,8,12,15,21,22,23 号的发育程度较弱,危险性较低,其余滑坡的发育程度中等,各滑坡影响因素之间的耦合程度也具有一定差异性,其中滑坡 8,10,12,16,18,19,20,23,25,26,28,33 号的耦合程度相对较强,其余滑坡的耦合程度相对较弱。

(4) 对比数量化理论Ⅲ及杨家塝滑坡的现场调查,得出两者的分析结果相符,验证了数量化理论Ⅲ在川东红层滑坡中应用的有效性,为川东地区多因素分析滑坡提供了新的思路。

[参 考 文 献]

[1] 程强,寇小兵,黄绍槟,等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报,2004,12(1):34-40.

[2] 耿兴福,苗天德. 近水平层状红层软岩滑坡成因机制研究[J]. 地质灾害与环境保护,2014,25(1):9-12.

[3] 黄绍槟,程强,胡厚田. 四川红层分布及工程环境特征研究[J]. 公路,2005(5):81-85.

[4] 李江,许强,胡泽铭,等. 红层缓倾角土质滑坡发育环境、分布规律及影响因素研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(12):88-93.

[5] 张明,胡瑞林,殷跃平,等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3783-3790.

[6] 张世林,石胜伟,王军朝,等. 杨家塝缓倾岩质滑坡破坏机理及稳定性评价[J]. 水电能源科学,2015(2):38.

[7] 赵黎明,全怀周. 模糊数量化理论Ⅲ在人力资源绩效评估中的应用[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2004(1):76-78.

[8] 石庆礼,杨胜强. 数量化理论Ⅲ及其在煤与瓦斯突出危险性评估中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2013(6):69-74.

[9] 吴财芳,秦勇,张许良. 数量化理论Ⅲ在瓦斯突出预测敏感地质指标筛选中的应用[J]. 工程地质学报,2005,13(2):263-268.

[10] 李军霞,王常明,王钢城,等. 基于数量化理论Ⅲ的滑坡发育影响因素及耦合作用强度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(6):1206-1213.

(上接第 139 页)

[4] 曹兴松,刘世雄,章梦涛,等. 纤维丝加筋补强植生土强度参数的试验研究[J]. 公路交通科技:道路科学版,2013(8):46-50.

[5] 李广信,陈轮,郑继勤,等. 纤维加筋黏性土的试验研究[J]. 水利学报,1995(6):31-36.

[6] 刘世雄,曹兴松,程睿,等. 纤维丝固土护坡植生法在边坡防护中的水土保持效应[J]. 山地学报,2013,31(6):701-709.

[7] 刘光锐,龚明子,刘君秀,等. 椰纤维植被混凝土性能研究[J]. 商品混凝土,2013(11):30-32.

[8] 住房和城乡建设部. GB/T50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:光明日报出版社,2010.

[9] 齐吉琳,马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2082-2086.

[10] 吴志琴. 冻融循环作用对粉质黏土抗剪强度指标影响的研究[D]. 黑龙江 哈尔滨:黑龙江大学,2012.

[11] 周明涛. 植被混凝土冻融效应试验研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2010.

[12] 扈萍. 高速公路边坡植被护坡的力学分析[D]. 山东 济南:山东大学,2005.

[13] 王德银,唐朝生,李建,等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报,2013,10(35):1933-1940.

[14] 张锋,凌贤长,吴李泉,等. 植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(Z2):3979-3985.

[15] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等. 多花木蓝根—土复合体抗剪强度试验研究[J]. 长江科学院院报,2013,31(2):55-60.

[16] Yang Yunhua, Cheng Shengguo, Gu Jianyun, et al. Triaxial tests research on strength properties of the polypropylene fiber reinforced soil[C]// Multimedia Technology(ICMT), 2011 International Conference on IEEE. 2011.