

黄土台缘滑坡滑距与滑体形态的关系分析

樊成意, 梁收运

(西部灾害与环境力学教育部重点实验室 兰州大学土木工程与力学学院地质工程系, 甘肃 兰州 730000)

摘要:在黄土台塬地区,由于过量引水灌溉导致塬边滑坡频繁发生。本文以24起甘肃黑方台滑坡及11起陕西泾阳南塬滑坡为研究对象,分析台缘地区滑坡滑动距离与滑体各参数之间的关系,结果显示滑距与滑体体积、宽度及厚度的关系较为明显,并以表征滑体形态的滑体长度、宽度及厚度作为计算滑距的指标,通过多元线性回归及模糊信息优化法量化滑体参数与滑距之间的关系,计算滑距,并对计算结果进行对比,结果表明其计算值与实际值吻合度都较高,可为滑距的计算及统计提供参考。

关键词:黄土台缘滑坡;滑体形态;多元线性回归;模糊信息优化;滑距

文章编号:1003-8035(2013)01-0018-07

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

0 引言

黄土台塬区因农业过量灌溉水的诱发作用而引起台(塬)边较为严重的滑坡灾害,其中以甘肃省永靖县黑方台及陕西泾阳南塬为代表。为了有效地减轻台(塬)缘黄土滑坡造成的灾害,对滑坡影响范围的分析显得尤为重要,然而由于滑坡运动机理的复杂性、诱发因素的不确定性和滑动轨迹的多变性,滑坡影响范围和强度的预测评价尚无明显进展^[1]。

滑坡危险范围的研究特别是滑距预测归结起来主要有经验统计^[2-7]与不同假设条件下的理论推导和模拟^[8-10]两种方式。现有的统计模型有舒德格尔公式、海姆公式、森胁·宽公式等^[2]。多元线性回归法因数据处理简便,客观反映了数据之间的相关性,其应用较广泛;模糊信息优化法融合了AHP法和二维正态信息扩散法,主客观相结合,并考虑了一些复杂因素,目前已用于滑坡危险性评价及滑距预测^[11-12]、滑坡滑动时间预报之中。张雨晴^[11]以10个滑坡数据为样本,利用单因素相关分析选择黄土厚度、斜坡坡度、滑体长度与滑体厚度四个指标,建立了黑方台塬边黄土滑坡滑距与影响因素之间的多元线性回归模型,但由于样本量较少,通过相关性大小选择影响因素时具有一定的局限性。基于此,本文根据已有的调查资料,以甘肃黑方台和陕西泾阳南塬台(塬)边的黄土滑坡(本文所说的黄土滑坡均指滑体为纯黄土的这一类滑坡)为研究对象,选择与滑距关系密切的滑坡体形态参数,通过多元线性回归及模糊信息优化法量化滑体参数与滑距之间的关系,计算滑动距离,为该类型滑坡灾害的预防提供借鉴。

1 参数选择

黑方台位于甘肃省永靖县境内,属于黄河四级阶地,是兰州附近黄河阶地中迄今保存面积最大,台地较完整的阶地之一。自1968年人工提取黄河水源进行大规模的农田灌溉以来,台缘滑坡频繁发生,新老滑坡相连,构成大型黄土台缘滑坡群。1968~1983年间发生15次滑坡,规模较小,滑距一般20~50 m;1984~1989年间发生9次,规模较大,滑距50~100 m;1990~1995年间发生22次,规模更大,滑距达250~400 m;1996年1~3月就发生了3次,1997~1998年发生了6次,滑距达300~400 m,很明显,随着灌溉水的下渗,地下水位的上升,滑坡灾害日益严重^[11]。泾阳南塬滑坡属于典型的黄土层内滑坡,据统计,该区共发生黄土滑坡27处,共50余起,塬边广阔的临空面和黄土特殊的岩土工程特性,加上人为活动的影响,滑坡灾害频频发生,但由于受测量条件的限制,对塬边黄土滑坡的发育特征缺少系统的测量、统计和分析,所以相关数据较为缺乏^[13-14]。

黑方台与泾阳南塬都是以灌溉水诱发的黄土台缘滑坡的典型地区,具有一定的可比性,所以本文利用20世纪90年代的统计资料,采用11起泾阳南塬

收稿日期:2012-06-13;修订日期:2012-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072213)

作者简介:樊成意(1988—),女,硕士,主要从事环境地质与地质灾害研究。

E-mail:fanchy923@126.com

滑坡(来自文献[15])和 24 起黑方台滑坡(来自文献[2]和[11])作为基本资料,综合分析其滑动距离与有关滑体形态参数之间的关系。

国内外对于滑坡体积与最大水平滑距 $L_{\max}$ 的相关性研究较多,多数学者^[3-5,16-17]认为二者呈正相关关系,而等效摩擦系数($H_{\max}/L_{\max}$)与滑坡体积呈负相关关系。廖小平等^[8]研究认为滑体体积对滑速、滑程具有直接的作用和影响,但仅体现在相似的滑坡现象中。本文通过相关分析表明,黄土滑坡滑距 L 随滑体体积 V 的增加呈幂律增加,其幂指数为 0.539, R^2 为 0.793(图 1)。黑方台黄土滑坡滑体体积较小,多在 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下,而泾阳南塬区则相对分散。台缘区黄土滑坡无论体积大小,滑距一般在 500m 之内。滑距 L 随滑体长度 c 的增加亦呈幂律增加,同时呈现区域性集中。黑方台地区的滑坡滑体长度均小于 90m,泾阳南塬地区相对较大,在 70 ~ 140m(图 2)。

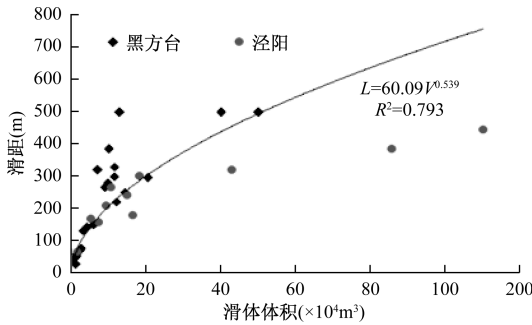


图 1 滑距与滑体体积的关系

Fig. 1 Relationship between sliding distance and landslide volume

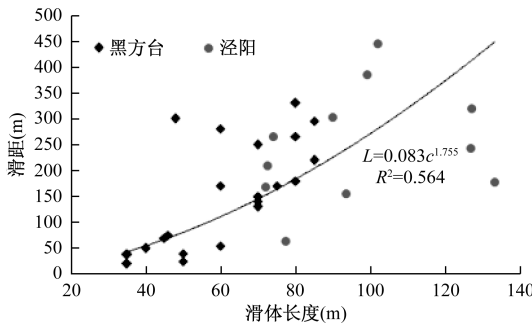


图 2 滑距与滑体长度的关系

Fig. 2 Relationship between sliding distance and landslide length

台缘地区黄土滑坡滑距 L 随滑体宽度 b 的增加呈对数增加,黑方台地区的滑体宽度范围较小,均在 200m 以下,而泾阳南塬的滑体宽度范围较大(图 3)。

滑体厚度与滑距的相关性较好(图 4),滑距 L 随滑体厚度 d 的增加呈幂律增加,幂指数为 1.228, R^2 为 0.855。

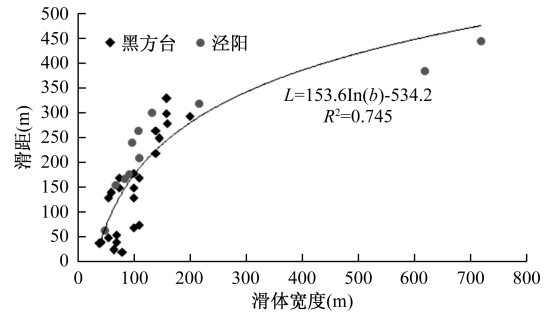


图 3 滑距与滑体宽度的关系

Fig. 3 Relationship between sliding distance and landslide width

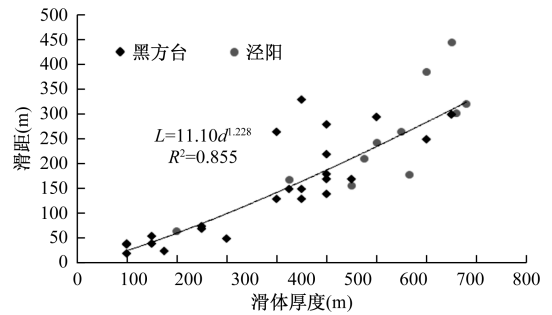


图 4 滑距与滑体厚度的关系

Fig. 4 Relationship between sliding distance and landslide thickness

以黑方台为例,黄土滑坡滑体体积与滑距的相关性较好,若加入黄土-基岩滑坡的数据进行统计分析后发现无相关性,所以对同类型滑坡研究滑距与滑体形态参数之间的关系才有意义。综合来看,滑体厚度与滑距的关系更为密切, R^2 为 0.855,而斜坡坡度与斜坡高度与滑距的相关性较差, R^2 值都低于 0.5(表 1)。

以滑体体积、滑体长度、滑体宽度、滑体厚度和滑体长宽比等为因素,分别对甘肃黑方台、陕西泾阳南塬和两者总体数据进行一元线性回归后得到有效的拟合方程(表 1)。

综合分析滑距与有关参数的相关性(表 1),确定 V 、 b 、 d 三个因素为与黄土滑坡滑距相关性较密切的因素,但由于 V 与 b 、 d 并不是非相关因素,所以在使用线性回归及模糊信息优化法等方法计算滑距时,选用 c 、 b 与 d 为表征滑体形态的非相关性因素。

表 1 黄土台缘滑坡滑距与滑体参数之间的拟合关系
Table 1 The fitting equation of sliding distance and each parameters of sliding-body form on the edge of loess platform

地区(样品数)	参数	最佳拟合方程	R ²
黑方台 (24)	L 与 V	$L = 52.707V^{0.6592}$	0.849
	L 与 c	$L = 0.01c^{2.287}$	0.622
	L 与 b	$L = 182.71\ln(b) - 676.5$	0.678
	L 与 d	$y = 11.19d^{1.222}$	0.829
泾阳南 塬(11)	L 与 V	$L = 75.968V^{0.3962}$	0.855
	L 与 b	$L = 120.61\ln(b) - 346.9$	0.887
	L 与 λ	$L = 82.02\lambda^2 - 336.4\lambda + 458.7$	0.802
	L 与 d	$L = 39.23e^{0.143d}$	0.838
黑方台与 泾阳(35)	L 与 V	$L = 60.098V^{0.5398}$	0.793
	L 与 c	$L = 0.083c^{1.755}$	0.564
	L 与 b	$L = 153.61\ln(b) - 534.2$	0.745
	L 与 d	$L = 11.10d^{1.228}$	0.855
	L 与 a	$L = 0.002a^{1.228}$	0.439
	L 与 H	-	-

注:表中 L—滑距(m);V—滑体体积(×10⁴ m³);λ—滑体长宽比;d—滑体厚度(m);c—滑体长度;b—滑体宽度;a—坡度;H—斜坡高度。

2 滑距预测

多元线性回归法是目前基于统计分析参数相关性的客观方法,模糊信息优化法具有主、客观相结合的特点。本文整合黑方台和泾阳南塬黄土滑坡的 35 组数据,其中 1~24 号为黑方台滑坡,25~35 号为陕西泾阳滑坡,用 33 组数据作为计算模拟样本,第 24 号与第 35 号作为模型检验样本,然后选择三个主要因素 c、b、d 为指标,通过这两种方法计算滑坡滑动距离,并对计算结果进行对比。

2.1 多元线性回归

(1) 回归模型的建立

令 $y = L, x_1 = c, x_2 = b, x_3 = d$, 则回归模型为: $y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3$, 整合 33 组黄土滑坡数据, 进行回归分析后建立的滑距预测模型为:

$$L = -26.4 + 0.04c + 0.31b + 17.76d$$

(2) 回归模型的检验

对回归关系的显著性进行 F 检验, 设显著水平 $\alpha = 0.01$, 查 F 分布表得: $F_\alpha(3, 29) = 4.538$, $F = 61.11417$, 故 $F > F_\alpha$, 且 $R^2 = 0.863$, 说明该回归方程是有意义的。利用该模型外推计算出第 24、35 号滑坡的滑距与实际滑距的相对误差小于 10% (表 2)。采用多元线性回归模型预测的滑距值与实际滑距较为相近 (图 5)。

表 2 滑坡滑距计算值
Table 2 Calculated values of sliding distance by Multiple Linear Regression

滑坡编号	实际滑距	计算滑距	相对误差
24 (黑方台)	168	153.48	- 8.6%
35 (泾阳)	220	198	- 10%

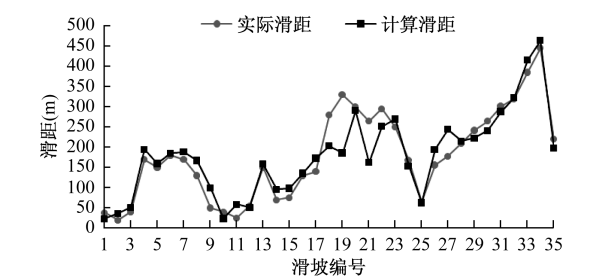


图 5 基于多元线性回归分析的滑距预测对比图
Fig. 5 Contrast of actual sliding distance and calculated values by Multiple Linear Regression

2.2 模糊信息优化法

(1) 权重的确定

采用层次分析法 (AHP) 确定 c、d 和 b 三个因子的权重, 通过两两比较, 对其赋值 (表 3)。

表 3 判断矩阵的构造
Table 3 Constitute of the judgment matrix

因素	滑体长度	滑体厚度	滑体宽度
滑体长度	1	1/3	1/2
滑体厚度	3	1	2
滑体宽度	2	1/2	1

得出判断矩阵如下:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

求解特征向量为:

$$W = [0.16 \quad 0.54 \quad 0.30 \quad 1^T];$$

经检验后随机一致性比率 $CR = 0.006 < 0.10$, 所以判断矩阵具有满意的一致性, 所获得的权值是合理的。故各因素的权值为: $\gamma_c = 0.16, \gamma_d = 0.54, \gamma_b = 0.3$ 。

(2) 建立模糊关系矩阵

参与模糊信息化处理的 33 组统计资料中, 滑距的变化范围为 20~445m, 滑体长度为 35~133.2m, 滑体厚度为 2~15.6m, 滑体宽度为 40~718m, 故按照模糊信息处理有关理论, 论域如下:

滑距论域 $\mu_L = (10, 40, 70, 100, 130, 160, 190, 220, 250, 280, 310, 340, 370, 400, 430, 460)$;

滑体长度论域 $\mu_c = (30, 50, 70, 90, 110, 130, 150)$

滑体厚度论域 $\mu_d = (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16)$

滑体宽度论域 $\mu_b = (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750)$

按照二维正态信息扩散公式建立模糊关系矩阵^[11,18]:

$$f_m(\mu, v) = \frac{1}{2\pi m h^2} \sum_{j=1}^m \exp \left[-\frac{(\mu' - \mu_i')^2 + (v' - v_i')^2}{2h^2} \right]$$

式中: $\mu' = (\mu - a_1)/(b_1 - a_1); v' = (v - a_2)/(b_2 - a_2);$
 $\mu_j' = (\mu_j - a_1)/(b_1 - a_1); v_j' = (v_j - a_2)/(b_2 - a_2);$
 $a_1 = \min_{1 \leq j \leq m} \{\mu_j\} \quad b_1 = \max_{1 \leq j \leq m} \{\mu_j\}$

$$a_2 = \min_{1 \leq j \leq m} \{v_j\} \quad b_2 = \max_{1 \leq j \leq m} \{v_j\}$$
$$h = 1.4208/(m - 1)$$

在此以滑体厚度与滑距的关系式为例。据上式,用 33 组数据建立滑体厚度的模糊关系矩阵,此时 $m = 33$, 且 $a_1 = 2, b_1 = 15.6, a_2 = 25, b_2 = 445, \mu \underline{\Delta} \mu_d, v \underline{\Delta} \mu_L, \mu_j$ 和 v_j 分别对应 33 组数据中的滑体厚度和滑距,则得到原始信息分布矩阵(表 4)。

同理,得到原始信息分布矩阵 $Q_{cL}(7 \times 16)、Q_{bL}(15 \times 16)$,此略。按行对原始信息分布矩阵进行正规化处理(用该行最大值遍除该行各元素)后,即得各元素与滑距之间的模糊关系矩阵 $R_{dL}(8 \times 16)、R_{cL}(7 \times 16)、R_{bL}(15 \times 16), R_{dL}$ 见表 5:

表 4 原始信息分布矩阵 $Q_{dL}(8 \times 16)$

Table 4 The original information distribution matrix $Q_{dL}(8 \times 16)$

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16
d1	4.29	7.87	1.73	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d2	4.12	5.13	4.20	0.70	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d3	0.21	2.44	2.47	0.39	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d4	0.00	0.00	0.01	0.80	4.40	2.75	0.20	0.11	1.82	1.84	0.40	0.47	0.04	0.00	0.00	0.00
d5	0.00	0.00	0.00	0.36	3.61	6.67	4.13	0.35	0.64	2.62	0.92	0.48	0.04	0.00	0.00	0.00
d6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	1.17	1.51	2.77	2.99	2.48	1.85	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
d7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.73	0.98	0.72	3.01	1.44	0.80	0.20	1.82	1.85	0.49	0.39
d8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.90	3.08	1.22	0.04	0.03	0.39	0.39

表 5 模糊关系矩阵 $R_{dL}(8 \times 16)$

Table 5 The Fuzzy relation matrix $R_{dL}(8 \times 16)$

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16
d1	0.54	1.00	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d2	0.80	1.00	0.82	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d3	0.09	0.99	1.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d4	0.00	0.00	0.00	0.18	1.00	0.62	0.05	0.02	0.41	0.42	0.09	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00
d5	0.00	0.00	0.00	0.05	0.54	1.00	0.62	0.05	0.10	0.39	0.14	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00
d6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.39	0.51	0.92	1.00	0.83	0.62	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
d7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.24	0.33	0.24	1.00	0.48	0.27	0.07	0.61	0.61	0.16	0.13
d8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.29	1.00	0.40	0.01	0.01	0.13	0.13

(3)模糊近似推理

按模糊近似推理公式 $Y = X \times R$ 来预测滑坡滑距,此时的合成算法 * 选用普通乘运算,原因集 X 为需要计算的滑坡资料中按一维信息分配公式处理后的数据。其一维信息分配公式^[19]如下:

当 $w \geq w_{\max}, w_{\max} \in W$ 时, $W = [0, 0, \dots, 1]$

当 $w \leq w_{\min}, w_{\min} \in W$ 时, $W = [1, 0, \dots, 0]$

当 $w_{\min} < w < w_{\max}$ 时, $W = \max [0, 1 -$

$$\left| \frac{w - w_i}{w_{i+1} - w_i} \right|], \text{其中 } i = 1, 2, \dots, n$$

以黑方台第 24 号滑坡为例说明, $d = 10\text{m}, b =$

140m, $c = 85\text{m}$,按上式可得该滑坡的原因集 X 如下:

$$X_{id} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$X_{ib} = [0 \quad 0.2 \quad 0.8 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$X_{ic} = [0 \quad 0 \quad 0.25 \quad 0.75 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

按模糊近似推理公式 $Y = X \times R$ 得到结论的可能性分布为:

$$Y_{id} = X_{id} \times R_{dL}$$
$$= [0 \quad 0 \quad 0.01 \quad 0.19 \quad 0.92 \quad 1 \quad 0.62 \quad 0.86$$
$$0.68 \quad 0.81 \quad 0.53 \quad 0.29 \quad 0.06 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$Y_{ib} = X_{ib} \times R_{bL}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.07 & 0.24 & 0.38 & 0.19 & 0.23 & 0.38 & 0.4 \\ 0.59 & 0.84 & 0.94 & 0.72 & 0.31 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$Y_{ic} = X_{ic} \times R_{cL}$$
$$= \begin{bmatrix} 0.01 & 0.05 & 0.08 & 0.1 & 0.44 & 0.63 & 0.39 \\ 0.45 & 0.45 & 0.74 & 0.78 & 0.27 & 0.12 & 0.1 \\ 0.05 & 0.03 \end{bmatrix}$$
(4)信息集中

根据信息集中公式 $\mu = \sum_{i=1}^n b_i \mu_i / \sum_{i=1}^n b_i$ 求取最终结果,其中 μ 为推论的最终结果, μ_i 为要推论的等级值, b_i 为模型近似推论结果元素的可能性分布值, k 为常数,根据实际情况选定,在这里把 k 取为2。
得到: $L_d = 173.866\text{m}$; $L_b = 249.795\text{m}$; $L_c = 242.724\text{m}$
加权平均求取最终预测滑距:

$$L_{\text{预}} = \frac{\gamma_d \times L_d + \gamma_b \times L_b + \gamma_c \times L_c}{\gamma_d + \gamma_b + \gamma_c} = 207.7(\text{m})$$

与实际滑距220m相差约12.3m。同理,第35号滑坡数据为: $d = 8.5\text{m}$, $b = 72\text{m}$, $c = 84\text{m}$, $L = 168\text{m}$, 计算滑距为149m。

用模糊信息优化法计算出台缘35个滑坡滑距的计算值与实际滑距大体吻合,仅个别值较大(图6)。目前由于对其论域的取值没有一个明确的参照标准,对于数值范围较大且局部集中的某个因子而言,其计算结果误差较大,所以导致最终计算结果出现一定的偏差。

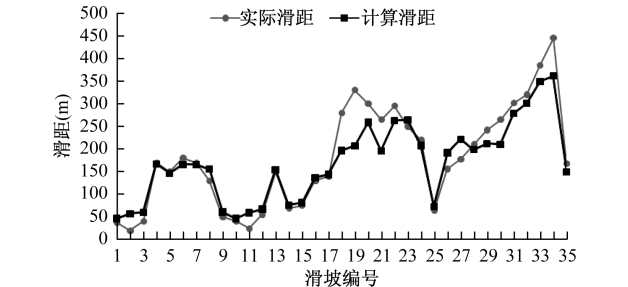


图6 基于模糊信息优化法的滑距预测对比图
Fig. 6 Contrast of actual sliding distance and calculated values by Fuzzy Information Optimization method

2.3 计算结果比较

多元线性回归法与模糊信息优化法都可对小样本数据进行预测,只是精度有所差别。通过线性拟合,比较两种方法计算的滑距与实际滑距吻合度,其相关系数 R^2 值分别为0.851、0.921。可见模糊信息优化法相对于线性回归吻合度较高(图7)。从理论上讲,斜率(k)越接近1,与Y轴截距(b)越小,则计算

值越接近于实测值,图7显示 $k_{\text{模糊}} < k_{\text{线性}} < 1$, $b_{\text{线性}} < b_{\text{模糊}}$,则线性回归相对于模糊信息优化法应该更合乎实际。线性回归较模糊信息优化法偏于保守,即线性回归相对于正误差个数多于负误差个数(图8,表6)。尽管模糊信息优化法正、负误差个数相近,但其负误差平均值较小,实际应用中亦可使用,总体上,两者总误差相近(表6)。利用多元线性回归方程推测滑距时完全从客观角度出发,由于影响因素之间相互作用的复杂性,太过机械化有时可能会得不到理想结果;模糊信息优化法具有主、客观相结合的特点,可靠性较高,但当样本量较小时,对模型拟合的判断较难得到令人满意的结果。综合而言,在计算滑距时,两种方法各有优缺点。

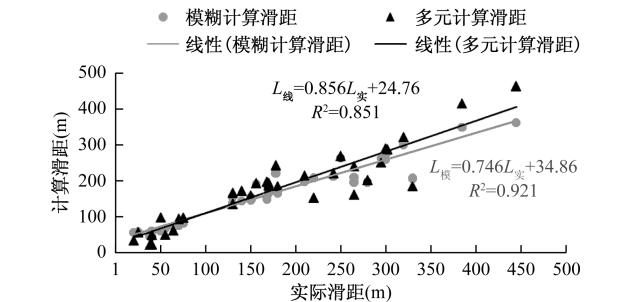


图7 不同方法预测滑距与实际滑距吻合度对比图
Fig. 7 Contrast the coincide degrees of actual sliding distance and calculated values by different methods

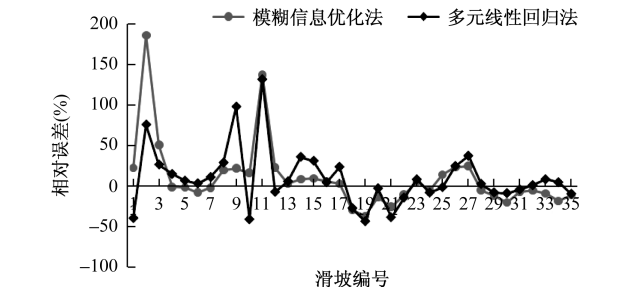


图8 两种方法计算滑距的误差对比图
Fig. 8 Contrast the deviation of the calculation by different methods

表6 两种方法计算滑距的误差对比表

Table 6 Statistics the deviation of the calculation by different methods

方法	计算值>实测值		计算值<实测值		总平均误差(%)
	个数	平均值(%)	个数	平均值(%)	
线性回归法	21	27.4	14	-18.5	23.0
模糊信息优化法	17	33.4	18	-12.8	23.1

3 结论与讨论

采用已有调查资料,以黑方台和泾阳南塬引水灌溉诱发的黄土滑坡为研究对象,通过单因素与滑距的线性回归,得出滑体厚度、滑体体积和滑体宽度与台缘黄土滑坡滑距相关性密切的因素。以滑体厚度、滑体长度和滑体宽度三个非相关性因子,分别用多元线性回归法和模糊信息优化法计算滑距值,计算值与实际值的吻合度都较好,对比两种方法的计算结果,从线性回归的斜率、截距及总误差来看,线性回归法优于模糊信息优化法,但从表征相关性的 R^2 值比较,后者又优于前者,且具有主、客观相结合的优点。

前文提到,黑方台灌区从20世纪70~90年代,台(塬)缘滑坡年平均滑动次数及滑距越来越大,这一现象在本文的研究中未予考虑,但分析其原因在很大程度上受斜坡形态的影响。提水灌溉前的台缘斜坡处于陡峭的基本稳定的平衡状态,随着灌溉水下渗,地下水位上升导致斜坡失稳破坏,由于台缘区最为发育的黄土滑坡的剪出口均在斜坡中部黄土与红层基岩的分界面附近,初期的斜坡破坏形式自然以小规模的崩滑和垂直下落为主,水平位移较小;随着滑坡后缘逐渐向台地内扩展,斜坡的形态发生着明显的变化,坡度逐渐降低、坡长逐渐增大,而黄土滑坡的剪出口始终大体保持在同一高度,所以至20世纪90年代,新生滑坡形成后将会沿着比以前更缓的斜坡向下滑动,滑坡的水平位移明显增大,即滑距越来越大。当然,滑距不可能随着斜坡的变缓无限制地增大,这一问题尚需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王运兴,梁收运. 突发性地质灾害研究现状[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(1): 84-88.
WANG Yunxing, LIANG Shouyun. Review of abrupt geological disasters[J]. World Sci-Tech R & D, 2012, 34(1): 84-88.
- [2] 王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社, 2005.
WANG Nianqin, ZHANG Zhuoyuan. Study on loess landslide disaster [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005.
- [3] A E Scheidegger. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973(5): 231-236.
- [4] T R H Davies. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization [J]. Rock Mechanics, 1982 (15): 9-24.
- [5] F Legros. The mobility of long-runout landslides [J]. Engineering Geology, 2002, 63: 301-331.
- [6] 李秀珍,孔纪名. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 243-249.
LI Xiuzhen, KONG Jiming. Runout distance estimation of landslides triggered by “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 243-249.
- [7] 董书宁,李保雄. 黄土滑坡的空间预报[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 46-47.
DONG Shuning, LI Baoxiong. The space predicting of loess landslip [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(6): 46-47.
- [8] 廖小平,金波. 高速滑坡滑体体积与滑速滑程的相关研究[J]. 路基工程, 1994(6): 9-12.
LIAO Xiaoping, JIN Bo. Related research of landslide volume and sliding distance of high-speed landslide [J]. Subgrade Engineering, 1994(6): 9-12.
- [9] 王家鼎,张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.
WANG Jiading, ZHANG Zhuoyuan. A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 670-674.
- [10] 王家鼎,惠泱河. 黄土地区灌溉水诱发滑坡群的研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 305-310.
WANG Jiading, HUI Yanghe. Landslides in crows induced by irrigated water in loess area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 305-310.
- [11] 张雨晴. 甘肃黑方台黄土滑坡系统分析[D]. 西安: 西北大学, 2007.
ZHANG Yuqing. Systematic analysis on loess landslides in Hei Fangtai, Gansu province, China [D]. Xi'an: Northwestern University, 2007.
- [12] 霍张丽,梁收运. 模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 35-39.
HUO Zhangli, LIANG Shouyun. Application of Fuzzy mathematics method on landslide stability assessment [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 35-39.
- [13] 黄玉华,雷祥义. 模糊信息优化处理方法在陕西泾阳南塬塬边斜坡稳定性区划中的应用[J]. 灾害学,

- 2005, 20(4): 47–56.
- HUANG Yuhua, LEI Xiangyi. Applications of the method of Fuzzy information optimization processing in estimation of slope stability of the south Jingyang plateau [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4): 47–56.
- [14] 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(5): 28–32.
- XU Ling, DAI Fuchu. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(5): 28–32.
- [15] 龙建辉. 高速远程黄土滑坡预测预报方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- LONG Jianhui. Research on forecasting methods of the loess landslide with high speed and long-run distance[J]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [16] Y Okura, H Kitahara, T Sammori, et al. The effects of rockfall volume on runout distance [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 109–124.
- [17] ZHANG Dexuan, WANG Gonghui. Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China) [J]. Engineering Geology, 2007, 94: 76–88.
- [18] 刘悦, 王家鼎. 黄土湿陷性评价中的模糊信息优化处理方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, 30(1): 78–82.
- LIU Yue, WANG Jiading. The method of Fuzzy information processing of optimization in the evaluation of loess collapsibility [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2000, 30(1): 78–82.
- [19] 王家鼎. 地理学研究中的模糊信息优化处理方法[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 75–80.
- WANG Jiading. The method of Fuzzy information processing in research of geography [J]. Geography and Territorial Research, 1999, 15(1): 75–80.

Relationship between sliding distance and sliding-body form of loess landslides on platform

FAN Cheng-yi, LIANG Shou-yun

(Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education of China, Department of Geological Engineering, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Loess landslides developed frequently on the edges of loess platform because of overirrigation. With 24 landslides at Hei Fangtai in Gansu province and 11 landslides at South Jingyang Plateau in Shaanxi province as the research objects, analyzed the relationship between sliding distance and parameters of sliding-body on the area of edges of loess platform, the results showed that the relationships between sliding distance and landslide volume, width, thickness are obvious, and the parameters of landslide length, width and thickness which have no correlation each other can represent the sliding-body form as factors, calculated the sliding distance by the Multiple Linear Regression and Fuzzy Information Optimization method, then compared the calculation results and the actual sliding distance, the results displayed that both calculated values had a good coincide degrees with actual value, so they can provide the references for the calculation and the statistics of sliding distance.

Key words: loess landslides on platform; sliding-body form; Multiple Linear Regression; Fuzzy Information Optimization; sliding distance