

吴博, 赵法锁, 吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 34-38. [WU Bo, ZHAO Fasuo and WU Shaoyan. Stability Evaluation of Loess Slope Based on Combined Weighting and Efficiency Coefficient Method [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 34-38. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.008.]

基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价^{*}

吴 博, 赵法锁, 吴韶艳

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 在综合考虑影响黄土边坡稳定性因素的基础上, 选取边坡高度、坡度、土体天然重度、内摩擦角、粘聚力、地震烈度和孔隙水压力为评价指标, 基于主成分分析法和熵权法分别计算各评价指标的主观权重和客观权重, 依据偏好系数法进行组合赋权, 采用功效系数法建立黄土边坡稳定性评价模型, 并以 16 个黄土边坡样本进行对比验证, 结果表明, 该模型作为一种快速、简便、有效的评价方法, 适用于黄土边坡稳定性评价。

关键词: 黄土边坡; 稳定性评价; 主成分分析法; 熵权法; 组合赋权; 功效系数法

中图分类号: TU444; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)02-0034-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.008

近些年由于工程建设的数量增多、规模增大, 开挖后黄土边坡高度高达上百米, 一旦发生失稳, 所引起的滑坡、崩塌等灾害对工程建设及安全运营造成极大的威胁, 对黄土边坡进行科学有效的评价, 具有重要的防灾减灾意义。目前, 传统的黄土边坡稳定性评价方法主要有工程地质类比法、极限平衡法、图解法、数值分析法等, 由于黄土边坡稳定性受多种因素影响, 各个因素又具有模糊性、不确定性和复杂性^[1], 故引入现代数学新的理论与方法, 衍生出不确定性评价的方法, 诸如模糊综合评判法^[2]、神经网络^[3-5]、属性识别模型^[6]、突变模型^[7]、可拓工程法评价模型^[8]等。

功效系数法通过建立指标评价标准和权重, 对评价对象进行定量评价, 被广泛应用于财务分析、金融预警、绩效评价^[9-11]中, 后来逐渐被引入到岩土行业中。陈顺满等采用改进功效系数法对岩体质量等级进行评价, 并应用到实际工程中^[12]; 孟凡奇建立了功效系数法对泥石流预警模型, 并以岫岩地区泥石流为例进行了检验^[13]; 魏新江在综合分析岩爆影响因素基础上, 建立了基于熵-功效系数的岩爆烈度预测模型^[14]; 谢全敏等考虑滑坡的自身条件、诱发因素以及受灾因子等, 基于功效系数法对滑坡的风险进行评估, 并与实际对比, 准确率达到 97%^[15]。徐佳等首次将功效系数法应用到岩体优势结构面中, 避免了传统方法只注重数量优势的缺点, 融入了质量优势的评价指标, 将岩体优势结构面的研究和评价定量化^[16]。秦胜伍等在模糊层次分析法的基础上, 引入功效

系数对岩质边坡稳定性进行了分级评价^[17]。

本文以功效系数法为评价方法, 考虑到主观赋权和客观赋权的优缺点, 采用组合赋权对评价指标进行权重计算, 建立组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价模型, 以期为黄土地区黄土边坡的稳定性评价方法提供思路, 为其防治提供依据。

1 功效系数法原理

功效系数法又称之为功效函数法, 是一种以多目标规划为理论基础的对研究对象进行综合评价的方法, 优点有二: ①通过对不同指标的评分, 可以对较为复杂的对象进行评价; ②对评价指标设置满意值和不允许值, 并根据其实际值所处位置进行评分, 可以避免单一评价标准而造成的误差。具体计算步骤如下。

(1) 建立评价指标体系。评价指标体系的选取应遵循以下原则: ①代表性, 指标应当具有代表评价目标的特性; ②全面性, 指标应尽可能的综合反映评价目标的特征; ③独立性, 各项指标既要相互补充, 又具有一定的独立性。

(2) 确定指标满意值和不允许值。指标满意值和不允许值的确定是根据选取指标与评价对象的关系, 通常情况下满意值是指各项指标在参与评价的单位中可能达到的最高水平; 不允许值是指在各项指标在参与评价的单位中不应出现的最低水平。

* 收稿日期: 2019-08-09 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877247)

第一作者简介: 吴博(1986-), 男, 陕西延安人, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定研究. E-mail: 41389839@qq.com

表 1 各评价指标及分级标准

指标	黄土边坡稳定性评价级别				说明
	稳定 I	基本稳定 II	不稳定 III	极不稳定 IV	
高度/m	<10	10~25	25~40	>40	递减型
坡度/(°)	<25	25~40	40~55	>55	递减型
天然重度/(kN/m ³)	>20	18~20	16~18	<16	递增型
内摩擦角/(°)	>32	24~32	16~24	<16	递增型
粘聚力/kPa	>75	50~75	25~50	<25	递增型
地震烈度	0	0~6	6~8	>8	递减型
孔隙水压力比	<0	0~0.25	0.25~0.5	>0.5	递减型

(3) 计算出各项指标的单项功效系数值。在功效系数法的评价理论体系中, 根据评价指标与单项功效系数之间的关系, 将指标类型共分为 4 类: ①极大型指标, 即指标数值越大, 单项功效系数值越高; ②极小型指标, 即指标数值越小, 单项功效系数值越高; ③稳定型指标, 即当指标数值在一数值时单项功效系数值最高; ④区间型指标, 即当指标数值位于某一区间内时, 单项功效系数值最高。各指标单项功效系数值计算公式分别如下:

$$\mu_1 = \begin{cases} \frac{x_i - x_{ni}}{x_{mi} - x_{ni}} \times 40 + 60, & x_i < x_{mi}; \\ 100, & x_i \geq x_{mi} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} \frac{x_i - x_{ni}}{x_{mi} - x_{ni}} \times 40 + 60, & x_i > x_{mi}; \\ 100, & x_i \leq x_{mi} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3 = \left(1 - \frac{|x_i - x_{mi}|}{|x_{ni} - x_{mi}|} \right) \times 40 + 60 \quad (3)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} \left(1 - \frac{x_{\min} - x_i}{x_{\min} - x_{\min}} \right) \times 40 + 60, & (x_i < x_{\min}); \\ 100, & (x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}); \\ \left(1 - \frac{x_i - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\max}} \right) \times 40 + 60, & (x_i > x_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ 为单项功效系数值; x_i 为第 i 个指标实际值; x_{mi} 为第 i 个指标满意值; x_{ni} 为第 i 个指标不允许值; x_{\min} 为第 i 个区间型指标最小值; x_{\max} 为第 i 个区间型指标最大值; x_{\min} 第 i 个区间型指标下限不允许值; x_{\max} 为第 i 个区间型指标上限不允许值。

(4) 计算评价对象总功效值。根据评价指标的单项功效系数, 再结合评级指标的权重系数, 用式(5)计算评价对象总功效系数值:

$$D = \sum_{i=1}^m (\mu_i \omega_i) \quad (5)$$

式中: D 为评价对象的总功效系数值; μ_i 为第 i 个评价指标的单项功效系数值, ω_i 为第 i 个评价指标的权重系数。

2 黄土边坡稳定性评价模型

2.1 构建黄土边坡稳定性评价指标体系

黄土边坡稳定性受多种因素的影响, 不但包括边坡的形态特征、地层岩性特征, 还有外动力作用。在综合分析其关键影响因素基础上, 综合前人研究成果, 本文选取影响黄土边坡稳定性主要因素为边坡高度、边坡平均坡度、土体重度、内摩擦角、粘聚力、地震烈度、孔隙水压力比。

黄土边坡稳定性与各评价指标的关系如表 1 所示。

2.2 确定评价指标满意值和不允许值

结合表 1, 分别取递减型指标的 IV 级和 I 级标准值作为指标的满意值和不允许值; 取递增型指标的 I 级和 IV 级标准值作为指标的满意值和不允许值(表 2)。

表 2 评价指标的满意值和不允许值

指标	特征值	
	满意值	不允许值
高度/m	40	10
坡度/(°)	55	25
天然重度/(kN/m ³)	16	20
内摩擦角/(°)	16	32
粘聚力/kPa	25	75
地震烈度	8	0
孔隙水压力比	0.5	0

2.3 计算评价指标的单项功效值

选取的 7 个指标中, 高度、坡度、地震烈度和孔隙水压力比为极大型变量, 其单项功效值采用式(1)计算; 天然重度、内摩擦角和粘聚力为极小型变量, 其单项功效值采用式(2)计算。

2.4 计算评价指标的权重值

为了避免主客观赋权法的缺陷, 扬长补短, 本文采用主成分分析法和熵权法的组合赋权, 根据偏好系数法确定两种权重的相对系数, 从而得出评价指标的权重。

(1) 基于主成分分析的指标权重计算。鉴于专家评分法的强主观性, 探究各位专家评分中的信息, 采用主成分分析法评分结果进行分析, 最大限度的降低专家评分法的主观性和随意性。计算步骤如下:

①确定选取 10 个专家对指标的重要度进行打分, 构建专家评分矩阵 Z (表 3);

②以原指标为样本、专家评分为指标进行主成分分析, 采用 SPSS 统计软件得到成分载荷矩阵 F 、主成分特征值(λ_i)以及方差贡献表, 按累计方差大于 85% 求得主成分数量 3 个(表 4)。

③计算决策矩阵系数 u_{ij} , 计算公式如下:

$$u_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}}, \quad (i=1, 2, \dots, 10; j=1, 2, 3) \quad (6)$$

④计算评价指标综合重要度系数 a_j :

$$a_j = \sum_{i=1}^{10} (\lambda_j / \sum_{j=1}^3 \lambda_j) \times u_{ij}, \quad (i=1, 2, \dots, 10; j=1, 2, 3) \quad (7)$$

表 3 指标评分矩阵

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10
坡高	4	3	3	4	3	3	4	3	4	3
坡角	3	4	2	3	3	3	4	3	3	3
天然重度	2	2	2	3	2	2	2	3	3	2
内摩擦角	4	5	4	4	5	4	5	4	4	4
粘聚力	4	4	5	4	4	5	4	5	5	4
地震烈度	2	3	2	3	4	3	3	4	2	3
孔隙水压比	4	2	3	4	3	3	2	4	3	3

注：5 为非常重要；4 为较重要；3 为一般重要；2 为较不重要；1 为不重要。

表 4 成分矩阵及方差解释表

成分	成分矩阵 F			方差解释		
	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	特征值 λ_i	方差%	累计值%
专家 1	0.779	-0.438	0.321	6.763	67.635	67.635
专家 2	0.752	0.603	0.218	1.564	15.639	83.273
专家 3	0.930	-0.289	-0.101	1.052	10.518	93.791
专家 4	0.758	-0.551	0.150	.475	4.755	98.546
专家 5	0.788	0.460	-0.239	.112	1.117	99.663
专家 6	0.950	0.030	-0.214	.034	0.337	100.000
专家 7	0.746	0.497	0.430	0	0	100.000
专家 8	0.702	-0.116	-0.699	0	0	100.000
专家 9	0.797	-0.344	0.286	0	0	100.000
专家 10	0.970	0.172	-0.103	0	0	100.000

⑤结合专家评分矩阵，可算出指标综合值：

$$V_i = \sum_{j=1}^7 a_{ij} p_{ij}, (i=1, 2, \dots, 7; j=1, 2, \dots, 10). \quad (8)$$

其中， p_{ij} 为专家对指标的重要度的打分。

⑥计算各评价指标权重：

$$\omega_i = V_i / \sum_{i=1}^7 V_i, i=1, 2, \dots, 7. \quad (9)$$

(2)熵权法。熵权法是一种客观赋权法，是通过计算实测数据中所包含的熵来反映指标的权重的大小，当信息熵值越大，其权重就越低，反之，权重越高。具体计算步骤如下：

①根据选取的 m 个评价指标属性，将评价指标分为递增型和递减型指标，采用公式(10)对 n 个样本数据进行归一化处理；

$$\begin{cases} x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \text{ 递增型指标;} \\ x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}, \text{ 递减型指标。} \end{cases} \quad (10)$$

②根据熵的概念，计算各评级指标的熵为：

$$H_j = -(\sum_{i=1}^m g_{ij} \ln g_{ij}) / \ln n, (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m). \quad (11)$$

式中：由于当 $g_{ij} = 0$ 时， $\ln g_{ij}$ 无意义，因此将其修正为：

$$g_{ij} = (1 + x'_{ij}) / \sum_{i=1}^n (1 + x'_{ij}). \quad (12)$$

③计算各指标权重 ω_j ：

$$\omega_j = (1 - H_j) / (m - \sum_{j=1}^m H_j). \quad (13)$$

当且仅当 $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ 。

(3)组合赋权法。组合赋权法得到的权重实际上是主观判断和客观信息的综合反映，通常采用线性加权组合确定：

$$\omega_j = \rho \alpha_j + (1 - \rho) \beta_j. \quad (14)$$

式中： α_j 、 β_j 分别为第 j 项评价指标的主观权重和客观权重， $\rho (0 < \rho < 1)$ 为偏好系数，本文取 0.5。

2.5 计算总功效系数

根据式(5)计算各样本的总功效系数，并将其作为黄土边坡稳定性的综合评价，其值越大，表示边坡越不稳定，具体分级如表 5 所示。

表 5 黄土边坡稳定性分级表

等级	功效系数值	说明
I	< 60	稳定且安全
II	60 ~ 75	基本稳定，但不安全
III	75 ~ 85	欠稳定 ~ 不稳定，处于临界状态
IV	> 85	极不稳定

2.6 模型验证

为了验证该评价模型的准确度和合理性，本文评价样本选取文献^[18-19]中 16 个黄土边坡进行评价，并与原文献的评价结果进行对比，实例数据、指标权重及评价结果见表 6。从表 6 中可以看出，基于组合赋权-功效系数法评价结果与属性识别评级模型、图解法的评价结果基本一致，说明该模型可以作为一种快速、简便、有效的评价方法，用于黄土边坡稳定性评价。

表6 黄土边坡样本数据、权重及评价结果

序号	指标实际值							总功效系数值	评价结果	属性识别模型	图解法
	高度/m	坡度/(°)	天然重度/(kN/m ³)	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	地震烈度	孔隙水压力比				
1	54	38.2	18.6	22	42.6	8	0	76.1194	Ⅲ(不稳定)	不稳定	0.99
2	63	19.5	18.3	26	70.3	0	0.25	56.4957	I(稳定)	一般稳定	1.59
3	34	38.2	18.5	27	51	0	0	57.9257	I(稳定)	较稳定	1.73
4	77	27	17.7	25	81.7	7	0.25	65.3088	Ⅱ(基本稳定)	一般稳定	1.36
5	50	23.4	18.2	23	59.5	8	0.5	75.8431	Ⅲ(不稳定)	不稳定	0.99
6	30.5	29.1	19.6	20	47.9	0	0	57.5838	I(稳定)	一般稳定	1.512
7	60	30.5	17.5	25	60	9	0.25	82.7007	Ⅲ(不稳定)	一般稳定	0.985
8	50	30.5	18	29	90	7	0.5	66.5294	Ⅱ(基本稳定)	一般稳定	1.211
9	50	51.3	18	29	90	9	0.5	75.0621	Ⅲ(不稳定)	极不稳定	0.955
10	42	51.3	19	20	100	0	0	50.7852	I(稳定)	极不稳定	1.292
11	45	51.3	18.3	27	75	0	0	58.9920	I(稳定)	一般稳定	1.423
12	45	51.3	18.3	27	75	8	0	62.6762	Ⅱ(基本稳定)	一般稳定	1.243
13	50	55	18.7	26	93	0	0	49.3382	I(稳定)	一般稳定	1.358
14	50	55	18.7	26	93	8	0	63.3225	Ⅱ(基本稳定)	一般稳定	1.19
15	73	32	18.3	25	55	8	0.25	75.7810	Ⅲ(不稳定)	不稳定	0.77
16	77	55	19.6	29	100	9	0.5	75.8939	Ⅲ(不稳定)	极不稳定	0.842
主观权重	0.1452	0.1367	0.0945	0.1883	0.1860	0.1240	0.1252				
客观权重	0.1395	0.1458	0.1386	0.1441	0.1441	0.1557	0.1321				
综合权重	0.1423	0.1413	0.1166	0.1662	0.1651	0.1398	0.1287				

3 结论

(1)本文在综合前人研究成果和分析黄土边坡稳定性影响因素的基础上,选取了高度、坡度、土体重度等7项主要因素,建立了组合赋权-功效系数法评价模型,对16个黄土边坡进行验证,并与其他评价方法进行对比,结果基本一致,评价方法合理有效。

(2)黄土边坡稳定性受到不仅仅是本文选取的这7个主要影响因素,还包括坡面形态、人类工程活动等其他因素,评价指标的选取及权重计算,对评价结果有着关键作用,因此,为更准确的评价稳定性,仍需要在指标选取及其权重上做进一步的研究。

(3)根据本次研究的结果发现,评价指标的分级对评价结果有着显著的影响,如坡高大于满意值,其余指标较为接近时,其总功效值差异较小,而实际中并非如此,故评价指标的分级标准仍需要大量的边坡实例进行验证,以达到广泛应用的目的。

参考文献:

- [1] 黄玮,梁永辉.可变模糊识别模型在黄土高边坡稳定性评价中的应用[J].土木工程学报,2015,48(S2):246-251.
- [2] 王秀丽,王艳红.黄土边坡稳定性的多级模糊模式识别分析[J].甘肃工业大学学报,2001(3):85-88.
- [3] 何书,王家鼎,王欢,等.基于信息扩散和BP网络的黄土边坡稳定性分析[J].西北大学学报(自然科学版),2008,38(6):983-988.
- [4] 李喜安,彭建兵.用改进后的BP神经网络评价黄土质边坡稳定性[J].地质灾害与环境保护,2002(4):56-59.
- [5] 孙祥,杨子荣,朴春德.黄土边坡稳定性分析的神经网络方法[J].辽宁工程技术大学学报,2003(S1):117-118.
- [6] 文畅平.黄土边坡稳定性的属性识别模型[J].水利水运工程学报,2007(2):10-16.
- [7] 胡晋川.基于突变理论的黄土边坡稳定性分析方法研究[D].西安:长安大学,2012.
- [8] 王东耀,折学森,叶万军.基于可拓工程法的黄土路堑边坡稳定性评价方法[J].地球科学与环境学报,2006(3):57-60.
- [9] 牛广君.基于功效系数法的企业财务预警研究[J].国际商务财会,2012(1):32-33.
- [10] 吴义虎.房地产金融风险预警研究—基于海南的实证分析[J].海南金融,2017(11):63-69.
- [11] 周莉,黄河清,蒲勇健.基于功效系数法的经营者相对业绩评价研究[J].软科学,2006(1):40-44.
- [12] 陈顺满,吴爱祥,王贻明,等.基于粗糙集和改进功效系数法的岩体质量评价[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(7):36-41.
- [13] 孟凡奇,李广杰,王庆兵,等.基于功效系数法的泥石流灾害预警研究[J].岩土力学,2012,33(3):835-840.
- [14] 魏新江,陈涛涛,王霄,等.基于熵权-功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J].低温建筑技术,2019,41(3):114-117,125.
- [15] 谢全敏,宋啸,杨文东.基于功效系数法的滑坡灾害风险评估研究[J].水利水电技术,2017,48(6):120-123.
- [16] 徐佳,张勤,吴继敏.功效系数法在确定岩体优势结构面中的应用[J].岩土工程学报,2008(4):617-620.
- [17] 秦胜伍,曹荣国,李广杰,等.基于FAHP的功效系数法的岩质边坡稳定性分级[J].灾害学,2016,31(4):27-32.
- [18] 高建勇,邢义川,陈艳霞.黄土高边坡稳定性预测模型研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):170-176.
- [19] 李靖,周欣华,党进谦.黄土边坡稳定性图解法[J].岩土工程学报,1998(4):43-46.

Stability Evaluation of Loess Slope Based on Combined Weighting and Efficiency Coefficient Method

WU Bo, ZHAO Fasuo and WU Shaoyan

(*College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

Abstract: On the basis of consideration of influence factors of loess slope stability, slope height, slope angle, natural weight, internal friction angle, cohesion, seismic intensity and pore water pressure are selected as evaluation indexes. The subjective weight and objective weight of evaluation index are calculated based on the principal component analysis and entropy weight method respectively. According to the method of preference coefficient, combinatory weighting is given. The model of stability evaluation of loess slope is established by the effectiveness coefficient method, and 16 loess slope samples are compared and verified. The results show that the model is a rapid, simple and effective evaluation method, which is suitable for the stability evaluation of loess slope.

Key words: loess slope; stability evaluation; principal component analysis; entropy method; combinatory weighting; efficiency coefficient method