

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.052

基于改进多因素相互作用关系矩阵的场址评价 ——以 CSNS 工程选址为例

李 坤^{1,2}, 尚彦军¹, 蒋 毅¹, 何万通¹, 林达明³, 常金源⁴, 陈延伟⁵

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 2. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041; 3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 5. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘 要: 工程场址评价方法中传统的权重确定方法无法反映多元地学信息之间的复杂关系, 影响评价结果的客观公正。为更好地满足大型工程设施选址的需要, 将传统多因素相互作用关系矩阵法由常权改进为动态变权并引入工程场址评价, 提出工程场址适宜度 (ESSI) 评价方法和定量评价指标, 通过分析影响因素间作用关系及其在不同时空下对系统整体的影响, 确定其在系统整体评价中根据实际情况动态变化的变权, 根据权重计算工程场址适宜度。将该评价方法应用于中国散裂中子源工程选址工作, 使用 6 个影响因素在 5 个备选场址中的变权及常权分别评价工程场址适宜度并对比分析, 确定第 3 场址作为工程建设场址。实践证明基于多因素相互作用关系矩阵的 ESSI 评价方法与指标更具科学性、合理性和实用性, 以为类似工程选址提供参考。

关 键 词: 选址; 权重; 多因素相互作用关系矩阵; 变权; 工程场址适宜度 (ESSI)

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 1-0400-09

Site evaluation system based on modified multifactor interaction matrix ——A case study of CSNS project site

LI Kun^{1,2}, SHANG Yan-jun¹, JIANG Yi¹, HE Wan-tong¹, LIN Da-ming³,
CHANG Jin-yuan⁴, CHEN Yan-wei⁵

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China; 3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 4. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 5. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The determination of the weights of the influencing factors in evaluating the suitability of engineering sites varies greatly among the conventional methods which are generally found unreliable when applied to some engineering sites with complex geology for their failure to reveal the complex relationships between the geological factors. To satisfy the need of selecting proper sites for large-scale key projects, we improve the constant weight to variety weight and introduce the matrix of multifactor interactions into the suitability evaluation of engineering sites, and propose the concept of engineering site suitability index (ESSI), a comprehensive index which is capable of considering the correlations between the influencing factors and the variation of their impact under various temporospatial dimensions; and therefore put forward a multi-discipline system for evaluating the suitability of engineering sites. The system is used in the site selection for China Spallation Neutron Source (CSNS) Project, and found applicable and reliable by the follow-up engineering investigation. The ESSI system which is based on the matrix of multi-factor interactions is proved scientific, reasonable, and applicable by case studies; and it is expected to provide a reference for similar large-scale engineering

Keywords: site; weight; multi-factor interaction matrix; variety weight; engineering site suitability index (ESSI)

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41372324); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (No. 2014CB046901); 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开放研究基金 (No. NELXX201603)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372324), the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (2014CB046901) and the Opening Research Fund of National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention (NELXX201603).

第一作者简介: 李坤, 男, 1984 年生, 博士, 主要从事工程地质、煤田地质、水文地质方面的工作。E-mail: likun-2008@foxmail.com

1 引言

工程设施建设场址的优劣程度极大程度上会影响工程建设的成败和安全高效运行,我国地质条件多变,且较复杂,在目前土地资源紧张的形势下如何能为大型工程设施的建设选取一个相对适宜的场址无疑是一个亟待解决的难题。

从 1959 年刘国昌教授发表《中国工程地质分区原则》^[1]开始,我国工程选址才算正式进入科学研究阶段,张文佑先生倡导地质基础理论^[2-3],谷德振院士提出软弱结构面控制岩体稳定^[4],孙广忠教授^[5-6]系统地论述了岩体结构控制论,尚彦军^[7]在其基础上提出岩体结构动态控制观,胡海涛院士等^[8-10]提出并进一步发展的“安全岛理论”等在工程选址及场址评价中都得到广泛应用,但是“岩体结构控制论”以岩体结构单因素评价,“安全岛理论”是大尺度地壳稳定研究,不能适用于复杂地质条件下多层次、多类型因素一般选址研究。

随着计算机和模糊数学的广泛应用,工程场址评价方法也经历了从定性评价到定量评价、单因素评价到多因素评价的发展过程。基于层次分析法(AHP)^[11-12]、BP 神经网络^[13]、熵权^[14]、突变理论^[15]、模糊综合评判法^[16]、变权模型^[17]等基础上的评价方法,根据各场址特点确定评价场址的影响因素及其权重,多因素综合对场址进行评价。然而,上述几种评价方法仅是通过比较两两因素间相对重要性确定各因素权重来评价整个系统,虽然考虑了不同因素对系统整体的影响,但在不同程度上忽略了多元地质信息内部差异对系统整体的影响以及多因素之间相互作用对彼此及系统整体的影响,从而导致评价结果有失客观性和公正性,无法很好地解决工程地质问题复杂性、多样性和社会性等特点。

Hudson^[18-19]提出了岩石工程系统(rock engineering system, RES),认为所有岩石工程中的相关因素都不是固定搭配和孤立存在的,而是相互作用和影响的动态过程。尚彦军^[20-21]、丁继新等^[22]将这一理论引入到工程地质学中,并发展为多因素相互作用关系矩阵用于地质灾害评价,定量地研究和初步解决了多类型多层次的工程地质因素相互作用复杂问题,但由于其在评价过程中使用的权重是固定不变的,依然不同程度上忽略了在不同时空条件下影响因素内部差异对系统整体的影响,可能造成评价结果有失公正。

通过总结、借鉴前人研究经验,结合多项工程选址实践,笔者等对传统的多因素相互作用关系矩

阵法进行改进,提出了基于多因素相互作用关系矩阵因素变权的工程场址适宜度(ESSI)评价方法,以多学科交叉、定性与定量相结合的方式评价场址工程地质的适宜性。这种方法不仅弥补了依靠单一学科评价结果的局限性,而且较好地解决了由于影响因素较多而引起的评价不合理现象,其评价结果具有可量性、可比性、客观公平性,且具有时效性,更利于实际应用。本研究旨在从地质条件最优利用角度更好地解决大型工程选址问题,可望为大型工程选址提供参考和借鉴。

中国散裂中子源是我国最大的重大科技基础设施项目,规划在广东省东莞市建设,为保证其长期稳定运行,需为其选定合适的建设场址。针对此问题,应用工程场址适宜度(ESSI)评价方法评价 5 个比选场址适宜度,并与常规评价结果进行比较,确定了中国散裂中子源最终建设场址,证明了工程场址适宜度法的合理性。

2 多因素相互作用关系矩阵变权法

多因素相互作用关系矩阵组成的做法是将 n 个影响因素放置在该矩阵的主对角线上(前后位置可互换),矩阵主对角线以外的位置为影响因素相互作用或影响程度,因素两两相互作用的强弱采用 0~4 编码,分别表示无(0)、弱(1)、中(2)、强(3)和极强(4)的相互作用。每行的编码表示在该行主对角线上因素对其他因素的主动作用(cause, C),如 V_{ij} 表示因素 i 作用于因素 j 的程度,矩阵是非对称矩阵,每列的编码表示在该列主对角线上的因素受到其他因素的影响(effect, E),即被动作用,如 V_{ji} 表示因素 j 作用于因素 i 的程度,见表 1,表中,

$$\left. \begin{aligned} S_C(i) &= V_{i,1} + V_{i,2} + \cdots + V_{i,j} + \cdots + V_{i,n} \\ S_E(i) &= V_{1,i} + V_{2,i} + \cdots + V_{j,i} + \cdots + V_{n,i} \\ S(n) &= \sum_{i=1}^n S_{C(i)} = \sum_{i=1}^n S_{E(i)} \\ (i &= 1, 2, \cdots, n, \text{ 且 } i=j \text{ 时, } V_{i,i} \text{ 不存在}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: n 为影响工程选址稳定性的主要影响因素个数; $S_C(i)$ 、 $S_E(i)$ 为多因素相互作用关系矩阵中第 i 个影响因素主动作用程度和受影响程度; $S_C(i)$ 为主对角线上第 i 个因素作用于其他因素的程度,即主对角线上第 i 个因素所处行的数字之和; $S_E(i)$ 为主对角线上第 i 个因素受到其他因素的作用程度,即主对角线上第 i 个因素所处列的数字之和; $S(n)$ 为 n 个所有影响因素主动作用或被动影响的总和。

因素 i 的权重值 W_i 则为其在系统整体中主动作

用与被动影响程度之和所占的比例,式(2)计算出的权重即为因素在系统评价中的固定权重。

$$W_i = \frac{S_C(i) + S_E(i)}{\sum_{j=1}^n [S_C(j) + S_E(j)]}, \quad (i=1, 2, \dots, n.) \quad (2)$$

表1 多因素相互作用关系矩阵
Table 1 Matrix of multifactor interactions

因素1	...	$V_{1,j}$	...	$V_{1,j}$	...	$V_{1,n}$	$S_C(1)$
...	因素*	...	...	...	...	...	$S_C(\dots)$
$V_{i,1}$	...	因素 <i>i</i>	...	$V_{i,j}$	...	$V_{i,n}$	$S_C(i)$
...	...	...	因素*	...	...	...	$S_C(\dots)$
$V_{j,1}$	...	$V_{j,i}$	...	因素 <i>j</i>	...	$V_{j,n}$	$S_C(j)$
...	...	...	...	...	因素*	...	$S_C(\dots)$
$V_{n,1}$	...	$V_{n,i}$	...	$V_{n,j}$	...	因素 <i>n</i>	$S_C(n)$
$S_E(1)$	$S_E(\dots)$	$S_E(i)$	$S_E(\dots)$	$S_E(j)$	$S_E(\dots)$	$S_E(n)$	$S(n)$

由于工程地质复杂性和多样性,同一因素在不同时空下活跃程度及对场址的影响程度不同,而因素常权则无法反映其动态变化对场址评价的影响程度,进行权重计算前有必要对主对角线上各因素在工程场址适宜度评价中的活跃程度 P_i 进行划分。这里用 0~2 赋值形式,分别表示各个因素实际上无作用(0)、中等作用(1)和强烈作用(2)。

确定了系统影响因素并组成相互作用关系矩阵后,可据式(3)计算出影响某个场地稳定性的第 i 个影响因素的权重 W_i ,此权重值则是随着因素的活跃程度 P_i 变化而动态变化的。

$$W_i = \frac{P_i[S_C(i) + S_E(i)]}{\sum_{j=1}^n \{P_j[S_C(j) + S_E(j)]\}}, \quad (i=1, 2, \dots, n.) \quad (3)$$

多因素相互作用关系矩阵变权法计算出的权重大小取决于因素之间相互作用关系及其本身的活跃程度,因素主动作用、被动影响程度之和越大、活跃程度越高,其在系统整体评价中所占权重值越大,反之则小。与传统常权和变权方法相比,多因素相互作用关系矩阵变权法不仅反映了不同因素及同一因素内部差异对系统整体的影响,而且反映了各影响因素之间相互作用对系统整体的影响,评价结果更为客观、公正且具有时效性,特别适合用于解决多种因素间具有相互作用和相互耦合等复杂关系的问题。

3 工程场址适宜度评价方法

工程场址适宜度 $ESSI$ 指几个不同场区或一个工程场区内不同亚区的工程场地条件适宜某项工程

设施建设和运行的程度,是一个考虑工程场地环境和地质条件、工程目标和要求的综合性指标,以统一标准定量值表示,值越大,说明工程地质适宜性越好,越适合选作工程建设场地。

3.1 评价步骤

工程场址适宜度评价方法是一种系统评价方法,在评价过程中应遵循一定的评价步骤:①明确评价问题及评价目的。②选取影响因素、确定评价函数、对影响因素进行权重划分。③将影响因素所占权重代入评价函数进行计算,得到各场区或亚区工程场址适宜度指数。④根据工程场址适宜度结果确定场址,并提出工程相关建设建议。

3.2 影响因素选取

在工程场址适宜度评价中影响工程场址适宜性的因素很多,影响因素的选取直接影响着评价结果的准确性和可信性,科学合理的选取评价工程场址适宜度的影响因素非常重要。笔者结合多个项目实际研究经验,认为选取评价工程场址适宜度影响因素时应遵循以下原则:(1)科学性原则:选取指标应有明确界定。(2)完备性原则:全面反映工程场地条件,兼顾经济合理、技术可行。(3)区域性原则:选取因素能显著代表该区域地质特征。(4)可量性原则:所选择指标应是可度量的,倘若不可直接度量,也应可制定分级划分标准。(5)规范性原则:须对各因素指标进行规范化处理。

3.3 工程场址适宜度评价函数

在工程项目选址实施基础上结合不同类型工程的选址特殊要求和选址区特点,对影响拟选场址工程场址适宜度的各个因素进行对比分析,确定各影响因素对工程场址适宜度的贡献,将每个影响因素对工程场址适宜度的贡献称为权重。权重值越大代表对工程场址适宜度影响的程度越大。不同因素归一化数据根据不同权重的叠加产生一个指数,一个能够指示工程地质适宜程度的综合指数,其评价函数的数学模型,公式为

$$ESSI = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x, y) \quad (4)$$

式中: $ESSI$ 为工程场址适宜度; w_i 为影响因素的权重; $f_i(x, y)$ 为每个单因素影响值函数; (x, y) 为各因素的地理坐标。

为消除不同影响因素因属性量纲的不统一而对评价结果带来的不均衡影响,使数据具有可比性,便于统计分析,需对影响因素进行统一量化。量化方法为:将有量纲的因素进行数据统计对比,并进行归一化;对无法用统一标准量纲量化的影响因素,

表 3 比选场址影响因素适宜度等级标准^[17, 25-29]

Table 3 Classification scheme for evaluating suitability of influencing factors^[17, 25-29]

适宜度分级 (分值)	岩性	构造	地形地貌	水文地质	岩石风化情况	土地利用及居民 活动情况
适宜 (10 分)	花岗岩石英岩为主	没有断层, 或距离断 层较远	地形平坦, 高差在 10 m 以下, 坡度小于 10°	水文地质条件简单, 主 要以地表水为主	岩石基本没有风化, 岩 体相对完整	土地利用率低, 少有 居民活动, 对居民生 活和环境影响小
较适宜 (8 分)	花岗岩变质岩为主	场址内存在 1~3 条断 层, 断距 3 m 以下, 且断裂带胶结较好	地形平缓, 个别区域 高差在 10~20 m, 坡 度在 15° 以下	水文地质条件比较简 单, 地表水为主, 有裂 隙水, 地表水和地下水 之间水力联系较弱	岩石风化程度较弱, 中 风化以下岩体完整, 风 化壳厚度在 3 m 以下	土地利用主要为植物 且以草被为主, 偶尔 居民活动
中等 (6 分)	变质岩为主	断距 5 m 以下断层 3~ 5 条, 断裂带胶结一般	高差在 100 m 一下, 坡度 30° 以下	水文地质条件中等, 地 表水为主, 地下水位较 深, 且水力联系不密切	风化壳厚 3~10 m, 全 风化层强风化 2 m 以 下	植被覆盖面积 60%以 上, 以普通树林为主, 季节性居民活动
较不适宜 (4 分)	地表主要为第四系 松散堆积体, 零星 可见变质岩	断距 5 m 以下断层 5 条以上, 断距 10 m 以 上断层 1~2 条	高差主要在 100~ 200 m, 地形坡度以 30° 以上	存在构造水和基岩裂隙 水, 水力联系以断层导 水为主	风化壳厚 10~20 m, 岩石比较破碎	生态树林为主, 植被 覆盖率 80%以上, 居 民季节性活动较多
不适宜 (2 分)	地表为第四系松散 堆积体, 且厚度在 20 m 以上	断距 10 m 以上的断层 3 条以上且横穿选区	高差在 200 m 以上, 地形较陡, 坡度 60° 以上占全区 50%以 上的面积	构造水、基岩裂隙水活 动为主, 断层导水性较 好, 地表水地下水之间 水力联系密切	全风化强风化厚度在 20 m 以上, 可见明 显有滑坡体	居民生活区, 人流量 较大

根据表 2、3, 对 5 个比选场址影响因素进行等级划分, 划分结果见表 4。

表 4 东莞 5 处 CSNS 比选场址影响因素适宜度等级

Table 4 Results of suitability classification for five potential sites of CSNS

场址	岩性	构造	地形地貌	水文地质	岩石风化	土地利用
第 1	6	6	8	6	6	6
第 2	6	4	4	6	6	8
第 3	8	6	6	8	6	8
第 4	6	6	6	8	6	6
第 5	8	6	6	6	6	6

4.3 比选场址影响因素权重确定

6 个影响因素之间存在相互作用的关系, 在不同程度上影响着 5 个比选场址的工程场址适宜度。使用传统方法计算的 6 个影响因素权重, 虽然在一定程度上能够反映出各因素在工程场址适宜度评价中的重要性, 但由于其不能反映出各因素间的相互影响作用和因素内部差异对评价场址工程场址适宜度的影响, 从而导致评价场址工程场址适宜度有失客观, 可能造成选址失败, 而多因素相互作用关系矩阵变权法, 恰恰可以很好地解决由于影响因素较多而引起的评价不合理现象, 其评价结果更为客观公正, 更利于实际应用。

根据 5 个比选场地的实际初勘结果和项目组专项评价建议, 参考前人研究中对各因素间相互作用程度的评判^[18-22], 对 6 个因素构建关系矩阵, 见表 5。

图 2 中, 地形地貌、岩性、构造 3 个因素落在主对角线的右下方, 表示此 3 个因素主动作用值大

于被动作用值, 对系统起主要影响作用。土地利用、岩石风化、水文地质被动作用值大于主动作用值, 显示它们在系统中受到影响, 起着被动作用。

表 5 CSNS 比选场址多因素相互作用关系矩阵

Table 5 Matrix of multifactor interactions of five candidate sites

岩性	2	3	3	4	3	15
2	构造	4	4	3	3	16
2	2	地形地貌	3	3	4	14
2	1	2	水文地质	3	3	11
2	0	2	2	岩石风化	3	9
1	0	1	2	1	土地利用	5
9	5	12	14	14	16	70

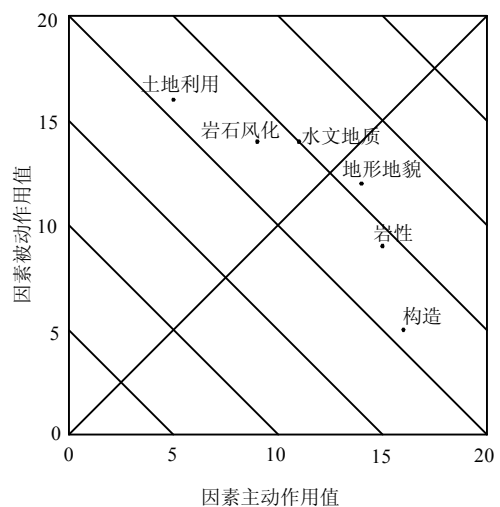


图 2 6 个影响因素的主动-被动关系

Fig.2 Relation of cause and effect of six factors

在实际情况中评价比选场址工程场址适宜度的 6 个影响因素活跃程度不同, 根据现场调查和工程项目组关于专项评价要求及建议, 制定 6 个主要因素在评价区域内活跃程度 P_i 等级标准, 见图 3。

分档	赋值	分档	赋值	分档	赋值	分档	赋值	分档	赋值	分档	赋值
强硬	0	简单	0	平缓	0	简单	0	弱	0	低	0
中等	1	中等	1	中等	1	中等	1	中	1	中	1
变质	2	复杂	2	陡峭	2	复杂	2	强	2	高	2

(a) 岩性(P_1) (b) 构造(P_2) (c) 地形地貌(P_3) (d) 水文地质(P_4) (e) 岩石风化(P_5) (f) 土地利用(P_6)

图 3 影响因素活跃程度等级标准
Fig.3 Classification scheme for degree of activity of different factors

通过对 5 个比选场址的资料收集和初勘实际情况, 依据图 3 赋值标准, 分别对各比选场址的 6 个主要影响因素进行活跃程度 P_i 赋值, 见表 6。

表 6 影响因素活跃程度
Table 6 Rating of six factors

场址	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
第 1	1	2	1	2	2	1
第 2	2	2	2	2	2	1
第 3	2	1	1	1	1	1
第 4	1	2	2	1	2	1
第 5	1	1	2	1	2	1

为方便对比, 分别计算不考虑影响因素活跃程度时的 5 个场址影响因素的固定权重(常权)和考虑因素活跃程度时的 5 个场址影响因素的动态权重(变权), 结果见表 7。

表 7 影响因素权重结果
Table 7 Weights of six factors

场址	岩性 W_1	构造 W_2	地形地貌 W_3	水文地质 W_4	岩石风化 W_5	土地利用 W_6
第 1	0.114 8	0.201 0	0.124 4	0.239 2	0.220 1	0.100 5
第 2	0.185 3	0.162 2	0.200 8	0.193 1	0.177 6	0.081 1
第 3	0.292 7	0.128 1	0.158 5	0.152 4	0.140 2	0.128 1
第 4	0.114 3	0.200 0	0.247 6	0.119 1	0.219 0	0.100 0
第 5	0.127 0	0.111 1	0.275 1	0.132 3	0.243 4	0.111 1
常权	0.171 4	0.150 0	0.185 7	0.178 6	0.164 3	0.150 0

4.4 比选场址适宜度评价

分别将 6 个影响因素在 5 个不同场址中量化结果、活跃程度及其在系统评价中的动态变权值、固定常权值代入式(3), 计算 5 个比选场址的工程场址适宜度并排序, 结果见表 8。

从表 8 东莞市 5 处 CSNS 比选场址工程场址适

宜度计算结果可以看出, 使用变权值和常权值计算出 5 个比选场址的适宜度大小及排序有明显不同, 但两种方法结果中相同的是广东省东莞市水平村南(第 3 场址)工程场址适宜度最高, 是最适宜的 CSNS 建设场址, 而第 2 场址工程场址适宜度最低, 最不宜作为 CSNS 的建设场址。

表 8 东莞市 5 个 CSNS 比选场址工程场址适宜度
Table 8 ESSI of five CSNS candidate sites in Dongguan city

场址	变权适宜度	结果排名	常权适宜度	结果排名
第 1	6.248 8	3	6.371 4	2
第 2	5.436 3	5	5.628 6	5
第 3	7.146 3	1	7.000 0	1
第 4	6.238 1	4	6.357 1	3
第 5	6.254 0	2	6.342 9	4

4.5 评价结果

经过后期对场地的工程物探和工程钻探详细勘探, 验证了使用多因素相互作用关系矩阵变权法评价的结果更为切合实际, 评价结果也得到工程甲方认可, 水平村南第 3 场址被确认为 CSNS 建设场址, 并于 2011 年 10 月 20 日正式开工, 计划 2018 年建设完成。2015 年 5 月 5 日, 靶站氦容器完成安装, 是 CSNS 工程在设备安装阶段的里程碑(图 4)。截至投稿, CSNS 建设非常顺利, 证明了选址结果的正确性。



图 4 CSNS 施工现场^[30]
Fig.4 Construction site of CSNS^[30]

5 讨论

多因素相互作用关系矩阵变权法在岩石工程系统方法的基础上发展而来, 在对矩阵建立、编码及影响因素活跃程度确定的过程中, 应参考前期研究尽可能地减小了主观因素的影响。与 AHP 层次分析法矩阵不同的是多因素矩阵为非对称矩阵, 且矩阵主对角线两侧编码是互相影响关系, 而非倒数关系。与传统的变权确定方法相比, 在用于解决因

素之间具有相互作用和影响等复杂关系,尤其是因素活跃程度随时空动态变化的问题上,多因素相互作用关系矩阵的变权确定在系统评价中更为客观、准确、适用。

在本次工程实例应用中,虽然使用常权和变权确定的最终场址相同,但是应用多因素相互作用关系矩阵并考虑了因素活跃程度计算出的5个比选场址中6个影响因素权重各不相同(见表7),且5个比选场址工程场址适宜度的计算结果及排序和使用常权计算的结果及排序也不相同(见表8)。分析造成这一结果的原因是,第3场址条件明显比其他场址优越,所以两种权重评价结果第3场址都为最优。而假如排除第3场址以后,评价结果则不同,主要因为多因素相互作用关系矩阵不仅考虑了系统中每个影响因素对系统整体的影响,而且考虑了系统中各影响因素间的相互作用及同一因素在不同时空条件下的活跃程度,因此场址适宜度大小及排序有所不同。

使用变权得到的评价结果排名得到后期勘探单位的实际认可,使用变权评价结果和实际勘探结果相吻合,说明在此种类型的评价中,变权比常权更具有参考和指导价值。多因素相互作用关系矩阵,不仅仅可以用于工程选址评价,对于因素之间具有相互作用关系的其他类型评价中,也具有一定的适用性,或可在此基础上拓展其应用范围。

6 结 论

(1) 将多因素相互作用关系矩阵由因素常权改进为因素变权,应用到工程场址适宜度评价中,并提出基于多因素相互作用关系矩阵因素变权的“工程场址适宜度 ESSI”这一定性与定量相结合评价方法,建立了工程场址适宜度的数学计算模型。

(2) 基于多因素相互作用关系矩阵的工程场址适宜度评价方法应用在 CSNS 重大工程选址中,分别评价5个比选场址适宜度,最终确定第3场址为工程建设场址。通过对 CSNC 详勘和后期建设验证了应用此法评价结果的正确性。

(3) 基于多因素相互作用关系矩阵的工程场址适宜度评价方法及指标应用在 CSNS 工程选址中的成功应用,说明了应用此评价方法来解决工程地质多种因素间具有相互作用和相互耦合等复杂关系的问题,更为客观、公平和公正,且具有时效性,可望在今后为类似大型工程选址或因素之间具有相互作用关系的其他类型工程评价提供参考借鉴。

致谢: 本文得到了中国科学院高能物理研究所在项目研究中给予的支持。衷心感谢刘传正教授、丁恩保研究员和李

晓研究员在本文写作中提供的建议和帮助。

参 考 文 献

- [1] 刘国昌. 中国工程地质分区原则[J]. 水文地质工程地质, 1959, 3(7): 22—24.
LIU Guo-chang. The principles of engineering geology division of China[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1959, 3(7): 22—24.
- [2] 张文佑, 钟嘉猷. 中国断裂构造体系的发展[J]. 地质科学, 1977, 12(3): 197—209.
ZHANG Wen-you, ZHONG Jia-you. Development of system faults in China[J]. **Chinese Journal of Geology**, 1977, 12(3): 197—209.
- [3] 张文佑, 边千韬. 地质构造控矿的地球化学机制(摘要)[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1984, 3(1): 9—10.
ZHANG Wen-you, BIAN Qian-tao. Tectonic geochemical ore control mechanism(abstract)[J]. **Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry**, 1984, 3(1): 9—10.
- [4] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
GU De-zhen. Basement of engineering geomechanics of rockmass[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
SUN Guang-zhong. Rock mass structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [6] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14—18.
SUN Guang-zhong. On the theory of structure-controlled rockmass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1993, 1(1): 14—18.
- [7] 尚彦军, 李坤, 王开洋. 从施工地质灾害看岩体结构动态控制作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1129—1136.
SHANG Yan-jun, LI Kun, WANG Kai-yang. Insights of innovation and development of rock mass structure dynamic controlling froconstructiontriggered geohazard[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(6): 1129—1136.
- [8] 胡海涛. “安全岛”——相对稳定地(岩)块在广东核电站选址中的初步应用[J]. 工程勘察, 1983, 11(4): 25—29.
HU Hai-tao. “Safety Island”—Preliminary application relatively stable (rock) block siting of nuclear power plants in Guangdong[J]. **Geotechnical Investigation &**

- Surveying**, 1983, 11(4): 25—29.
- [9] 胡海涛, 殷跃平. 区域地壳稳定性评价“安全岛”理论及方法[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 57—68.
HU Hai-tao, YIN Yue-ping. Theory and evaluation methods of regional crust stability “Safety Island”[J]. **Earth Science Frontiers**, 1996, 3(1): 57—68.
- [10] 刘传正, 胡海涛. 工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4(1): 30—39, 64.
LIU Chuan-zheng, HU Hai-tao. The “Safety Island” theory by multi-scale approaching and optimum seeking in engineering site selection[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1993, 4(1): 30—39, 64.
- [11] 井文君, 杨春和, 李银平, 等. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2683—2690.
JING Wen-jun, YANG Chun-he, LI Yin-ping et al. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2683—2690.
- [12] 王成. 基于 GIS 和 AHP 法的乡村避暑地选址研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
WANG Cheng. A research on the siting of rural summer resort based on GIS and AHP[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [13] 郑龙生, 杨晓霞. 基于 BP 神经网络模型的商务型饭店微观选址研究——以重庆市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 162—165.
ZHENG Long-sheng, YANG Xiao-xia. A microcosmic study of business hotels location selection based on BP neural network model——Taking chongqing as an example[J]. **Journal of Southwest University(Natural Science Edition)**, 2011, 33(4): 162—165.
- [14] 张国方, 包凡彪. 熵权值模糊综合评判法在物流选址中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7): 91—93.
ZHANG Guo-fang, BAO Fan-biao. Research on logistics centre with fuzzy synthesis evaluation of entropy weights model[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2005, 27(7): 91—93.
- [15] 李明捷, 石荣. 基于突变理论的机场选址评价研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6): 35—37, 54.
LI Ming-jie, SHI Rong. Site selection assessment model for civil aerodrome based on catastrophe assessment method[J]. **Journal of Civil Aviation University of China**, 2011, 29(6): 35—37, 54.
- [16] 王壹, 杨伟峰, 张旭光, 等. 深部非采煤层 CO₂ 封存稳定性模糊综合评判[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2932—2939.
WANG Yi, YANG Wei-feng, ZHANG Xu-guang, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on stability of CO₂ storage in deep non-mining coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 2932—2939.
- [17] 张英平. 变权模型在城市工程地质环境质量评价中的应用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
ZHANG Ying-ping. Application of variable weight model for quality evaluation of urban engineering geological environment: a case study of Zhengzhou city[Ph. D. Thesis D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- [18] HUDSON J A. Rock mechanics principle in engineering practice[M]. London: [s.n.], 1989.
- [19] HUDSON J A. Rock engineering systems: Theory & practice[M]. [S.l.]: Ellis Horwood, 1992.
- [20] SHANG Yan-jun, PARK H-D, YUAN Guang-xiang, et al. From in situ stress and discontinuities to the strength of granites: comparison and case study[J]. **Geosciences Journal**, 2008, 12(4): 361—372.
- [21] SHANG Yan-jun, PARK H-D, SHI Yong-yue, et al. Some large values of in-situ stress and related engineering geological problems in China[J]. **Geosciences Journal**, 2010, 14(2): 135—153.
- [22] 丁继新, 周圣华, 陈梦熊, 等. 基于多因素相互作用关系矩阵的边坡稳定性定量评价[J]. 工程勘察, 2006, 34(7): 5—8.
DING Ji-xin, ZHOU Sheng-hua, CHEN Meng-xiong, et al. Slope stability based on multi-factor interaction related matrix[J]. **Journal of Geotechnical Investigation & Surveying**, 2006, 34(7): 5—8.
- [23] 张杰. 中国散裂中子源(CSNS)——多学科应用的大科学平台[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(5): 415—417.
ZHANG Jie. China spallation neutron source——Large multi-disciplinary scientific platform applications[J]. **Bulletin of Chinese Academy of Sciences**, 2006, 21(5): 415—417.

- [24] 韦杰. 中国散裂中子源简介[J]. 现代物理知识, 2007, 19(6): 22—29.
WEI Jie. China spallation neutron source profile[J]. **Modern Physics**, 2007, 19(6): 22—29.
- [25] 廖建三, 彭卫平, 林本海. 影响广州市浅层地下空间开发利用的地质因素分析及分区评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3357—3362.
LIAO Jian-san, PENG Wei-ping, LIN Ben-hai. Analysis and partition evaluation of geological factions affecting space development and utilization of shallow underground in Guangzhou city[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3357—3362.
- [26] 陆显超, 卿展晖, 范拓. 广东省地质灾害预测分区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3405—3411.
LU Xian-chao, QING Zhan-hui, FAN Tuo. Study on prediction of geological disaster distribution in Guangdong province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3405—3411.
- [27] 祁生文, 刘春玲, 常中华, 等. 玉树 Ms7.1 地震灾区灾后重建工程地质与水文地质条件分区评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 224—228, 241.
QI Sheng-wen, LIU Chun-ling, CHANG Zhong-hua, et al. Engineering geology and hydrogeology mapping zonation for post-earthquake rebuilding planning of Yushu Ms7.1 earthquake damaged zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 224—228, 241.
- [28] 宋盛渊, 王清, 潘玉珍, 等. 基于突变理论的滑坡危险性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 422—428.
SONG Sheng-yuan, WANG Qing, PAN Yu-zhen, et al. Evaluation of landslide susceptibility degree based on catastrophe theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 422—428.
- [29] 贾善坡, 金凤鸣, 郑得文, 等. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 12—12.
JIA Shan-po, JIN Feng-ming, ZHENG De-wen, et al. Research on evaluation indexes and classification criterion of site selection technology for aquifer gas storage with the extension judgement method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 12—12.
- [30] 中国科学院高能物理研究所. 中国散裂中子源靶站氦容器投入安装 (150505)[EB/OL]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2015/201505/t20150507_4351213.html, 2015-05-07.
The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences. The helium vessel in China spallation neutron source target station has been successfully installed (150505)[EB/OL]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2015/201505/t20150507_4351213.html, 2015-05-07.