

DOI: 10.11779/CJGE202010008

# 高铁地基低黏土矿物泥岩微膨胀性定量评定研究

薛彦瑾<sup>1, 2</sup>, 王起才<sup>\*1, 2</sup>, 马丽娜<sup>1, 2</sup>, 张戎令<sup>1, 2</sup>, 李盛<sup>1, 2</sup>, 张凯<sup>1, 2</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 微膨胀性地基红层泥岩遇水引起的高速铁路无砟轨道路基上拱, 已成为当前阻碍中国高速铁路发展又一关键因素, 合理评定低黏土矿物泥岩微膨胀性对高速铁路设计和施工具有重要意义。以兰新高速铁路为依托选取等效蒙脱石含量、阳离子交换量、自由膨胀率和液限为微膨胀性判别指标, 通过大量现场地基泥岩钻孔实测资料, 提出了地基泥岩微膨胀潜势分级标准, 采用改进层次分析法、基尼系数法和相对熵理论确定了判别指标组合权重, 基于线性综合评定法建立了泥岩微膨胀性定量评价模型。结果表明: 判别指标间有一定线性关系, 其作为泥岩判别与分级指标具有较好分类特性; 泥岩微膨胀潜势分级标准可实现94%样本的3项指标一致性; 线性综合评价法克服了同一试样不同指标属于不同等级判别缺陷, 可使泥岩微膨胀性进行量化, 并得出了泥岩微膨胀潜势定量分级标准; 通过室内膨胀力试验验证了泥岩微膨胀性定量评定及分级方法对兰新高铁适用性。研究成果对类似地质条件高速铁路路基长期持续上拱变形的工程控制措施提供理论依据。

**关键词:** 高速铁路; 上拱变形; 微膨胀性泥岩; 评价指标; 定量评定模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)10-1832-09

**作者简介:** 薛彦瑾(1991—), 男, 助教, 博士研究生, 主要从事高速铁路地基微膨胀泥岩及路基上拱等方面的研究工作。E-mail: yanjin@mail.lzjtu.cn。

## Quantitative evaluation of micro-swelling property for mudstone with low clay minerals in foundations of high-speed railways

XUE Yan-jin<sup>1, 2</sup>, WANG Qi-cai<sup>1, 2</sup>, MA Li-na<sup>1, 2</sup>, ZHANG Rong-ling<sup>1, 2</sup>, LI Sheng<sup>1, 2</sup>, Zhang-Kai<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National and Local Joint Engineering

Laboratory for Disaster Prevention and Control Technology of Road and Bridge Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou  
730070, China)

**Abstract:** The upheaval damage of subgrades of high-speed railways caused by muddy water on weakly expansive foundations has become another key factor hindering the development of China's high-speed railways. It is of great significance for the design and construction of high-speed railways to evaluate the swelling property of mudstone correctly. The equivalent montmorillonite content, cation exchange capacity, free expansion rate and liquid limit are selected as the indexes of swelling property of mudstone based on the Lanzhou-Urumqi High-Speed Railway. The grading standard for swelling expansion potential of mudstone is proposed based on a large number of field measured data of mudstone borehole. The combined weights of discriminant indexes are determined by the improved analytic hierarchy process, Gini coefficient method and relative entropy theory. A quantitative evaluation model for the swelling property of mudstone is established based on the linear comprehensive evaluation method. The results show that there is a certain linear relationship between the discriminative indexes, and it has good classification characteristics as a discriminant and classification index of mudstone. The classification standard for swelling potential of mudstone can realize the consistency of three indexes for samples of 94%. The linear comprehensive evaluation method overcomes the shortcomings of different indexes of the same sample belonging to different levels. It can quantify the swelling property of mudstone and obtains quantitative classification standard for swelling potential of mudstone. The applicability and accuracy of the quantitative evaluation and grading method for swelling property of mudstone of the Lanzhou-Urumqi High-Speed Rail way are verified by laboratory swelling force tests. The research results may provide a theoretical basis for engineering control measures of long-term continuous arch deformation in subgrades of high-speed railways with

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT\_15R29)

收稿日期: 2019-12-23

\*通信作者(E-mail: wangqc@mail.lzjtu.cn)

similar geological conditions.

**Key words:** high-speed railway; upheaval deformation; micro-swelling mudstone; evaluation index; quantitative evaluation model

## 0 引言

高速铁路无砟轨道建设标准高, 对路基上拱要求极为严格, 兰新高速铁路在建成运营过程中, 出现了多处路段路基严重上拱病害<sup>[1]</sup>, 且路基上拱量远远超过了规范要求限值<sup>[2-3]</sup>, 超限上拱变形的路基整治尚无长期有效措施和成熟技术, 已严重影响线路正常运行, 成为高速铁路建设的又一难题。针对兰新高铁路基上拱病害, 不少学者进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>, 普遍认为地基红层泥岩具有微膨胀性是导致路基上拱重要原因。红层泥岩是一种典型沉积岩, 含有蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物, 其物理力学性能差, 遇水软化, 失水崩解, 露天风化迅速, 具有一定膨胀性<sup>[7]</sup>。然采用现有规范和已有研究成果<sup>[8-17]</sup>, 对地基泥岩膨胀性判别时发现该种土体具有微膨胀性或不具有膨胀性, 这也是兰新高铁在设计之初没有考虑该种土体膨胀性而间接导致路基上拱发生的原因, 而中国红层泥岩分布总面积约 82 万 km<sup>2</sup>, 因此研究红层泥岩微膨胀性可为高速铁路无砟轨道的设计和施工提供技术参考。

目前对膨胀岩(土)分类分级评价方法主要有两种, 一种为单一指标法, 如谭罗荣等<sup>[18]</sup>提出了风干含水率判别法, 建立了一种新的膨胀土判别分级图; 查甫生等<sup>[19]</sup>提出了自有膨胀比判别指标, 并对改良膨胀土膨胀性进行了判定; 刘特洪<sup>[20]</sup>采用塑性图法对膨胀土进行判别与分级。另一种为多指标评价法, 如《铁路工程特殊岩土勘察规程 (TB10038—2012)》<sup>[8]</sup>采用自由膨胀率、蒙脱石含量、阳离子交换量 3 项指标进行判定; 《公路路基设计规范 (JTGD30—2015)》<sup>[10]</sup>采用自由膨胀率、标准吸湿含水率、塑性指数进行判定; 美国垦务局<sup>[21]</sup>采用胶粒含量、塑性指数、缩限、膨胀体变为指标进行判别分类; 陈善雄等<sup>[11]</sup>采用液限、塑性指数、自由膨胀率、小于 0.005 mm 颗粒含量、胀缩总率对膨胀土进行判别分类。由于膨胀岩(土)性质复杂, 影响其膨胀因素较多, 且各因素间也存在一定相关关系, 对此缺乏深入研究, 使膨胀岩(土)分类一直是研究难题, 单一指标法根据各个指标得出的评价结果互相矛盾, 有很大局限性和片面性, 多指标评价法往往易出现同一土样不同指标属于不同膨胀等级, 而难于归类问题, 给决策和设计应用带来很大困难。

本文依托兰新高速铁路对路基上拱地段进行钻芯取样, 采用改进层次分析法和基尼系数法确定了判别指标主、客观权重, 利用线性综合评价法建立了泥岩微膨胀性评价模型, 最后通过室内膨胀力试验验证了本文提出评价方法的准确性。

## 1 兰新高铁地基泥岩膨胀性判别试验

### 1.1 土样采集与试验方法

在兰新高铁(新疆段)沿线上拱地段不同里程钻芯取样, 取样深度为 0~20 m, 采集若干土样, 如图 1 所示, 限于篇幅本文仅列出 30 个。综合已有研究成果并结合现有铁路规范、建筑规范判别指标, 使用自有膨胀率、阳离子交换量和蒙脱石含量, 但存在部分土样蒙脱石为 0 情况, 故还考虑了伊利石和高岭石含量, 另一方面已有研究表明<sup>[11, 15, 17]</sup>液限对泥岩膨胀性判别敏感程度较高, 故分别开展黏土矿物含量试验、自由膨胀率试验、阳离子交换量试验和液限试验<sup>[22-24]</sup>, 试验结果如表 1 所示。



图 1 路基钻芯取样

Fig. 1 Core-drilling sampling of subgrade

### 1.2 泥岩膨胀性分类结果分析

依据表 2 对表 1 中土样膨胀性进行判别, 有 27 个土样的自由膨胀率、蒙脱石含量、液限判别结果达到一致为无膨胀性, 即该地基泥岩中约有 90% 左右土样为无膨胀性, 但兰新高速铁路在运营过程出现多处路段路基上拱变形, 最高点比设计高程高约 48 mm<sup>[1-2, 16]</sup>, 而微膨胀性泥岩是导致路基上拱变形重要原因<sup>[4-6]</sup>, 而现有膨胀岩(土)判定标准都将该种土判定为无或弱膨胀性, 因此现有判定标准对上拱变形要求为毫米级的高速铁路无砟轨道已不再适用, 故需重新对该种微膨胀性泥岩膨胀潜势进行评定。

表1 地基泥岩钻芯取样实测资料

Table 1 Core-drilling sampling data of foundation mudstone

土样 编号	蒙脱 石/%	伊利 石/%	高岭 石/%	自由膨 胀率/%	阳离子交换量 (mmol·kg <sup>-1</sup> )	液限 /%
1	1.6	2.3	5.4	29.9	159.6	25.6
2	2.8	5.6	3.4	39.8	226.6	36.5
3	2.7	6.2	7.2	36.9	306.7	38.5
4	1.2	8.4	5.8	19.6	156.2	23.2
5	0.8	4.9	4.3	25.8	146.9	25.9
6	2.2	3.2	2.3	28.7	209.2	26.4
7	2.9	3.2	0.0	37.5	226.9	38.9
8	0.8	2.1	8.6	23.4	162.3	22.8
9	0.9	6.6	7.8	28.6	147.6	25.6
10	1.9	0.8	0.6	37.9	186.5	38.6
11	3.9	3.3	5.6	25.5	165.6	27.9
12	4.2	8.2	5.1	43.6	255.6	36.8
13	2.4	5.9	6.6	22.7	309.6	29.6
14	1.9	7.8	6.1	43.9	326.8	49.1
15	0.8	5.6	0.0	29.6	158.6	21.6
16	1.5	3.1	2.8	22.1	153.1	23.9
17	2.8	8.5	4.6	32.9	155.6	36.0
18	0.6	5.6	0.0	16.5	138.6	19.0
19	2.6	3.4	2.3	32.8	219.6	34.3
20	4.3	0.8	0.0	37.6	226.8	39.4
21	3.5	2.9	6.8	38.5	213.5	31.6
22	0.0	3.9	4.2	13.2	98.5	21.8
23	2.2	3.6	0.0	29.3	215.4	27.9
24	3.7	0.8	1.2	38.8	198.4	35.9
25	1.8	0.6	1.2	35.4	185.7	34.1
26	0.0	2.5	3.8	20.9	158.4	18.5
27	3.8	4.9	8.5	38.7	235.4	37.6
28	5.4	3.9	4.7	45.4	289.4	42.5
29	3.7	0.5	4.2	39.8	232.6	32.5
30	2.1	1.2	8.5	32.6	308.9	34.6

表2 泥岩膨胀潜势分级标准

Table 2 Classification criteria for swelling potential of mudstone

分级指标	非膨 胀性	弱膨 胀性	中膨 胀性	强膨 胀性	出处
自由膨 胀 率/%	40<	40~60	60~90	≥90	铁规 <sup>[8]</sup>
	70<	70~90	90~100	≥100	孙小明 <sup>[9]</sup>
	40<	40~60	60~90	≥90	公规 <sup>[10]</sup>
	40<	40~65	65~90	≥90	陈善雄 <sup>[11]</sup>
	40<	40~65	65~90	≥90	建规 <sup>[12]</sup>
蒙脱石 含量/%	7<	7~17	17~27	≥27	铁规 <sup>[8]</sup>
	—	10<	10~30	≥30	何满潮 <sup>[13]</sup>
阳离子 交换量 /(mmol·kg <sup>-1</sup> )	10<	10~30	30~60	≥60	朱训国 <sup>[14]</sup>
	7<	7~15	15~25	≥25	巫茂寅 <sup>[15]</sup>
液限/%	170<	170~260	260~360	≥360	铁规 <sup>[8]</sup>
	120<	120~260	260~360	≥360	崔晓宁 <sup>[16]</sup>
	165<	165~255	255~355	≥355	巫茂寅 <sup>[15]</sup>
40<	40~50	50~70	≥70	陈善雄 <sup>[11]</sup>	
	40<	40~50	50~60	≥60	杨世基 <sup>[17]</sup>
40<	40~50	50~70	≥70	巫茂寅 <sup>[15]</sup>	

## 2 泥岩微膨胀性判别指标与膨胀潜势确定

### 2.1 泥岩微膨胀性判别指标选取及相关性分析

蒙脱石的存在是膨胀土膨胀关键,能较好反映膨胀土膨胀潜势高低,可作为地基泥岩判别和分级指标。但从表1可知,部分泥岩中蒙脱石含量为0,而经X射线衍射仪分析发现其中还含有部分伊利石和高岭石等黏土矿物,故应综合考虑三者在泥岩中含量,等效计算公式如下所示<sup>[2~16]</sup>:

$$M' = M + I/10 + K + 60 \quad (1)$$

式中  $M'$  为等效蒙脱石含量(%) ;  $M$  为蒙脱石含量(%) ;  $I$  为伊利石含量(%) ;  $K$  为高岭石含量(%)。

仅考虑等效蒙脱石含量不太全面,本文将等效蒙脱石含量、自由膨胀率、阳离子交换量和液限作为无砟轨道地基泥岩膨胀性判别指标。根据表1数据,绘制等效蒙脱石含量与自由膨胀率、阳离子交换量、液限的相关关系如图2~4所示。

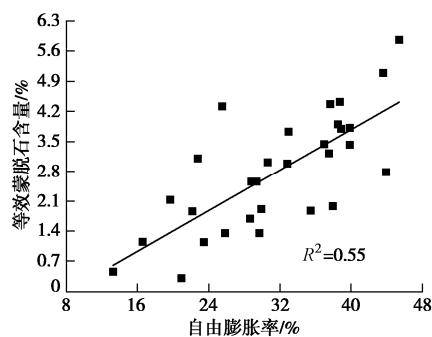


图2 等效蒙脱石与自由膨胀率的关系

Fig. 2 Relationship between equivalent montmorillonite and free expansion rate

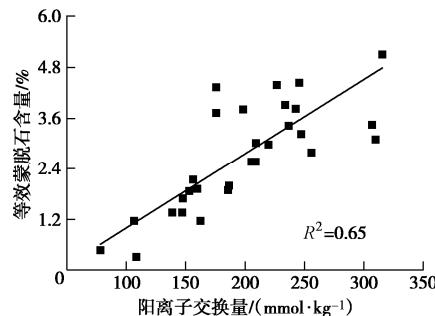


图3 等效蒙脱石与阳离子交换量的关系

Fig. 3 Relationship between equivalent montmorillonite and cation exchange capacity

由图2可知,  $R^2=0.55$ , 该系数偏低可能与自由膨胀率试验本身局限性有关。已有研究表明:自由膨胀率试验因操作过程中极易出现土碾碎程度不一致和不同试验人员采用同一标准量筒所量取土样密度存在

10%以上差值, 使试验结果存在不唯一性<sup>[11]</sup>。故该指标可靠性及能否反映土本质等一直存在争议。但自由膨胀率因试验方法简单易行, 所需设备少、试验周期短等特点, 尽管不宜作为土样判别单一指标, 但仍可作为一项辅助判别指标。

由图 3 可知,  $R^2=0.65$ , 稍高于自由膨胀率。阳离子交换量是黏土矿物具有一种重要物理化学性质。不同类型黏土矿物, 因为晶格边缘破键产生的电荷会吸附阳离子, 并达到平衡状态, 以及晶格同晶置换作用和裸露在羟基上氢的活性与数量不同, 导致不同黏土矿物阳离子交换性能上区别较大。因此, 阳离子交换量是一种反映膨胀土本质特征的指标。

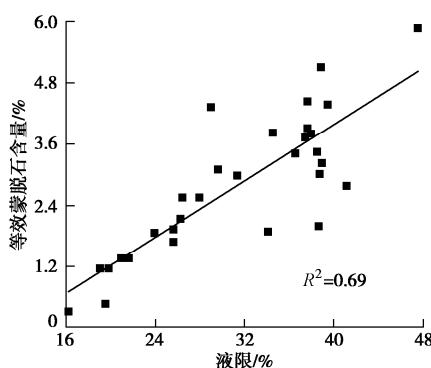


图 4 等效蒙脱石与液限的关系

Fig. 4 Relationship between equivalent montmorillonite and liquid limit

由图 4 可知,  $R^2=0.69$ , 稍高于阳离子交换量。土界限含水率是反映土粒与水相互作用灵敏指标之一, 在一定程度上反映了土亲水性能。它与土颗粒组成、黏土矿物成分、比表面积等有着十分密切关系, 一般膨胀土是具有高塑性黏土, 液限越高则土膨胀潜势越大。因此, 将液限作为泥岩判别指标是可行的。

## 2.2 泥岩微膨胀潜势分级标准

由现场钻芯取样试验结果可知, 等效蒙脱石含量变化区间为 0.08%~6.57%, 考虑到铁路规范和已有研究<sup>[8, 15]</sup>中将蒙脱石含量 7%作为膨胀土与非膨胀土界限值, 因此本文将等效蒙脱石含量 7%作为强膨胀性泥岩上限值, 在 0%~7%之间对其进行分级。已有研究中将自由膨胀率和液限膨胀性与非膨胀性分级界限值定为 40%<sup>[8-12, 15, 17]</sup>, 根据大量地基泥岩实测值中仅有小部分土样的自由膨胀率和液限大于 40%, 而没有超过 50%, 故本文中将强膨胀性泥岩自由膨胀率和液限上限定为 50%, 在 0%~50%之间对其进行分级。试验中出现阳离子交换量最大值为 316.8 mmol/kg, 故本文将强膨胀性泥岩阳离子交换量上限定为 320 mmol/kg, 在 0~320 mmol/kg 之间对其进行分级。将各个指标中泥岩膨胀性大于上限值的土样定为具有极

强膨胀性。

为进一步得出合理界限值, 首先对泥岩中等效蒙脱石含量进行单样本 K-S 检验<sup>[25]</sup>, 经检验发现等效蒙脱石含量服从正态分布。因等效蒙脱石含量总体符合正态分布, 故按照泥岩膨胀等级分级后也应符合正态分布, 经大量计算与统计分析最终得出等效蒙脱石含量膨胀潜势分级标准如表 3 所示。

等效蒙脱石含量能较好反映泥岩膨胀特性, 是表征泥岩膨胀本质特性参数, 且测试过程在 X 射线衍射仪上进行, 测试结果可信度较高, 作为泥岩判别分级指标稳定性较好。本文将等效蒙脱石含量作为地基泥岩判别与分级主要控制指标。从等效蒙脱石分级结果可知, 非膨胀性占 6.5%, 弱膨胀性占 47%, 中等膨胀性占 40%, 强膨胀性占 6.5%, 以此为标准得出自由膨胀率、阳离子交换量和液限膨胀潜势分级标准, 如表 3 所示。

表 3 建议的膨胀潜势分级表

Table 3 Recommended swelling potential scales

膨胀等级	等效蒙脱石/%	自由膨胀率/%	阳离子交换量 /(mmol·kg <sup>-1</sup> )	说明
极强	≥7	≥50	≥320	灾害风险极高
强	5~7	40~50	250~320	灾害风险高
中	3~5	30~40	180~250	灾害风险中等
弱	1~3	15~30	100~180	灾害风险低
无	0~1	0~15	0~100	灾害风险无

## 2.3 泥岩膨胀潜势分级结果分析

按表 3 对表 1 中泥岩重新分级, 结果如表 4 所示。

表 4 建议的泥岩判别分级结果的试样数量分布情况

Table 4 Distribution of sample quantity of recommended discrimination and classification results of mudstone

判别指标	非膨胀性	弱膨胀性	中膨胀性	强膨胀性
等效蒙脱石含量	2	15	11	2
自由膨胀率	1	13	14	2
阳离子交换量	1	13	13	5
液限	0	14	14	2

由表 4 可知, 按本文建议的地基泥岩分级标准, 有 17 个样本 4 项指标能达到较好一致性, 占样本总数的 57%, 有 11 个样本 3 项指标可达到较好一致性, 占样本总数的 37%, 有 2 个样本判定时无法统一, 占样本总数的 6%, 这是由于泥岩性质极其复杂, 在判定时出现了同一试样不同指标属于不同等级情况, 为了避免这种情况出现, 本文采用定量综合评定方法, 综合考虑评价指标主、客观权重, 建立了泥岩膨胀等级评定模型, 将泥岩膨胀性进行量化, 解决了同一试

样不同指标属于不同等级情况。

### 3 泥岩微膨胀性定量综合评定模型及分级评定研究

#### 3.1 定量综合评定模型

定量评定是指选定  $m$  项评价指标  $c_1, c_2, \dots, c_m$  时, 对  $n$  个被评价对象运行分类或排序问题, 通常采用如下线性综合评定模型<sup>[26]</sup>:

$$Z_i = \sum_{j=1}^m \gamma_j c_{ij} \quad , \quad (2)$$

式中,  $c_{ij}$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  项指标经无量纲化后的值,  $\gamma_j$  为评价指标权重系数 ( $\gamma_j \geq 0$ ,  $\sum \gamma_j = 1$ ),  $Z_i$  为第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 个被评价对象综合评定值。

#### 3.2 评价指标权重确定

改进层次分析法具有适用性强和实时性高等特点<sup>[27]</sup>, 基尼系数赋权法适用性强、保序性好<sup>[28]</sup>, 故本文主、客观权重分别采用改进层次分析法和基尼系数法。单独利用主观权重法或客观权重法确定权重是不合理的, 为确保泥岩膨胀性评价结果的准确性和合理性, 本文应用相对熵组合赋权法综合考虑了主观权重<sup>[29]</sup>。假设由改进层次分析法、基尼系数法求得权重向量分别为  $\alpha$ ,  $\beta$ , 它们权重分配系数为  $\theta$  和  $\varphi$ ,  $\gamma$  为组合权重向量, 根据相对熵思想建立求解组合权重数学模型:

$$\begin{cases} \min Q(\theta, \varphi) = \sum_{j=1}^m \gamma_j \ln(\gamma_j / \alpha_j) + \sum_{j=1}^m \gamma_j \ln(\gamma_j / \beta_j) , \\ \text{s.t.} \quad \theta + \varphi = 1, \quad \varepsilon_j = \theta \times \alpha_j + \varphi \times \beta_j \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $Q(\theta, \varphi)$  为相对熵, 此模型解即为主、客观权重的系数  $\theta$  和  $\varphi$ 。根据求得  $\theta$  和  $\varphi$  值结合权重向量  $\alpha$  和  $\beta$ , 可以得到被评价系统组合权重向量  $\gamma$ 。

#### 3.3 指标无量纲化方法选取

指标无量纲化方法包括线性无量纲化和非线性无量纲化, 因非线性函数种类繁多, 且非线性无量纲化方法极为复杂, 因此本文只讨论线性无量纲化方法: Z-Score 法、极差化法、极大化法、极小化法和均值化法, 通过构建兼容度来测度并选择最优无量纲化方法<sup>[30-31]</sup>。

#### 3.4 泥岩膨胀性定量评定过程

##### (1) 确定评价指标权重

$c_1$  为等效蒙脱石含量,  $c_2$  为自由膨胀率,  $c_3$  为阳离子交换量,  $c_4$  为液限, 建立比较矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} C & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & s \\ c_1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 7 \\ c_2 & 0 & 1 & 2 & 2 & 5 \\ c_3 & 0 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ c_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据文献[27]得到泥岩评价指标主观权重, 根据文献[28]得到泥岩评价指标客观权重。根据已知各个评价指标主观和客观权重, 使用相对熵计算公式(3), 借助 matlab 计算工具求解非线性规划最优解, 计算结果见图 5 所示。

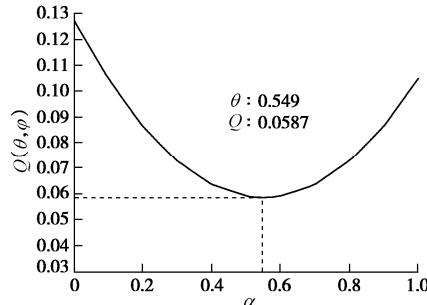


图 5 相对熵最优解图

Fig. 5 Optimal solution of relative entropy

通过求解非线性方程组(3)可以得到当  $\theta = 0.549$ ,  $\varphi = 0.451$  时组合权重与主观、客观权重相对熵最小, 因此, 组合权重可表示为:  $\gamma = 0.549 \theta + 0.451 \varphi$ 。评价指标权重计算结果见表 5 所示。

表 5 评价指标权重

Table 5 Weights of evaluation indexes

评价指标权重	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$\alpha_n$	0.559	0.261	0.125	0.055
$\beta_n$	0.382	0.240	0.219	0.159
$\gamma_n$	0.479	0.252	0.167	0.102

##### (2) 指标无量纲化方法确定

以 15 组泥岩样本为例, 进行无量纲化方法确定, 结果见表 6 所示。对 5 种无量纲化方法得出综合评价结果进行相关性分析和兼容度分析, 结果见表 7 所示。

从表 7 可知, Z-Score 法和极小化法相关系数最大  $r = 0.993$ 。从兼容度计算结果可知, 各种无量纲化方法相对有效性从高到低依次为: Z-Score 法、均值化、极小化法、极大化法、极差化法, 因此从相对有效性排序可知无量纲化方法应采用 Z-Score 法, 但据表 6 可知 Z-Score 法综合评定值出现了负值, 在进行泥岩膨胀性分级时采用负值不好理解, 且综合值之间离散型较小, 膨胀性不能很好区分; 均值化法得出综合值为正值, 但其离散型也较小, 膨胀性也不能很好区分; 极小化法综合值为正值, 且综合值之间离散程度较大, 可有效区分泥岩膨胀值, 同时极小化法与 Z-Score 法相关性最大 (Z-Score 法兼容度最高) 且极小化法兼容度较大, 因此无量纲化方法应采用极小化法。

##### (3) 泥岩膨胀潜势分级标准

根据表(3)、式(2)和各评价指标最小值得出泥岩膨胀潜势  $Z$  值分级标准, 如表 8 所示。

表 6 指标无量纲后综合评价结果及排序

Table 6 Comprehensive results and ranking of indexes after dimensionless evaluation

样本	Z-Score 法		极差化法		极大化法		极小化法		均值化法	
	综合值	排序	综合值	排序	综合值	排序	综合值	排序	综合值	排序
1	-0.304	11	0.368	10	0.418	10	13.375	11	0.811	10
2	0.364	4	0.614	3	0.628	3	23.043	4	1.255	3
3	0.367	3	0.657	2	0.661	2	23.503	3	1.309	2
4	-0.282	10	0.310	13	0.374	12	14.318	9	0.755	11
5	-0.545	14	0.298	14	0.353	14	9.841	14	0.667	14
6	-0.057	8	0.439	9	0.483	9	17.412	8	0.961	8
7	0.281	5	0.597	4	0.608	4	21.808	5	1.209	5
8	-0.646	15	0.267	15	0.329	15	8.579	15	0.612	15
9	-0.402	12	0.337	11	0.390	11	11.897	12	0.749	12
10	-0.200	9	0.488	8	0.504	8	14.252	10	0.955	9
11	0.615	2	0.520	6	0.568	5	27.669	2	1.222	4
12	1.046	1	0.773	1	0.778	1	33.418	1	1.616	1
13	0.135	7	0.517	7	0.549	6	20.986	6	1.103	6
14	0.160	6	0.529	5	0.548	7	20.252	7	1.099	7
15	-0.543	13	0.311	12	0.370	13	9.986	13	0.693	13

注: 等效蒙脱石含量、自由膨胀率、阳离子交换量、液限的最小值分别为 0.08, 8.0, 33.6, 18.7。

表 7 各种无量纲化方法评价结果相关系数

Table 7 Correlation coefficients of dimensionless evaluation results

方法名称	Z-Score 法	极差化法	极大化法	极小化法	均值化法
Z-Score 法	1	0.939	0.961	0.993	0.971
极差化法	0.939	1	0.985	0.914	0.967
极大化法	0.961	0.985	1	0.950	0.932
极小化法	0.993	0.914	0.950	1	0.979
均值化法	0.971	0.967	0.932	0.979	1
兼容度	0.966	0.951	0.957	0.959	0.962

表 8 泥岩膨胀潜势 Z 值分级标准

Table 8 Classification criteria for values of Z swelling potential of mudstone

膨胀等级	Z
极强	$Z \geq 45$
强	$33 \leq Z < 45$
中	$19 \leq Z < 33$
弱	$7 \leq Z < 19$
无	$0 < Z < 7$

由得出的评价指标权重和采用的极小化无量纲方法, 根据式(2)计算出泥岩膨胀性定量综合值, 如表 9 所示。从表 9 可知采用线性定量综合评定方法得出的膨胀性为单一数值, 对泥岩膨胀性进行了量化, 克服了采用多指标判定时同一试样不同指标属于不同等级情况。

表 9 泥岩膨胀性 Z 值

Table 9 Swelling property and values of Z of mudstone

样本编号	Z	膨胀性	样本编号	Z	膨胀性	样本编号	Z	膨胀性
1	13.4	弱	11	27.7	中	21	25.8	中
2	23.0	中	12	33.4	强	22	3.8	无
3	23.5	中	13	20.9	中	23	17.5	弱
4	14.3	弱	14	19.9	中	24	25.1	中
5	9.8	弱	15	10.0	弱	25	13.5	弱
6	17.4	弱	16	12.7	弱	26	3.4	无
7	21.8	中	17	24.3	中	27	29.1	中
8	8.6	弱	18	8.3	弱	28	38.2	强
9	11.9	弱	19	20.1	中	29	25.5	中
10	14.3	弱	20	28.8	中	30	16.9	弱

## 4 地基泥岩判别与分级标准验证

本文采用直接指标法膨胀力进行验证。选取兰新高铁不同里程土样, 将其放入 105℃烘箱烘干 8 h 以上, 击碎过 2 mm 筛, 测试土样蒙脱石、伊利石、高岭石含量, 自由膨胀率, 阳离子交换量和液限, 配置土样初始含水率为 15%, 按照 90% 压实度压制成相同干密度试样, 在杠杆式双联固结仪中进行膨胀力试验, 试验结果如表 10 所示。

表 10 试验结果

Table 10 Test results

土样 编号	等效蒙脱 石/%	自由 膨胀 率/%	阳离子 交换量 ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	液限 /%	Z	评价 结果	膨胀 力 /kPa
31	0.54	13.6	78.3	19.6	4.2	无	0.00
32	0.86	14.3	89.6	21.4	6.2	无	0.00
33	1.25	23.8	139.7	31.6	9.1	弱	0.69
34	2.17	32.6	195.7	26.4	15.1	弱	1.89
35	2.78	24.6	179.5	32.4	18.5	弱	2.45
36	3.12	34.8	199.7	35.1	21.0	中	3.58
37	4.52	36.9	242.1	41.3	29.7	中	4.69
38	4.25	39.4	246.7	35.8	28.1	中	4.31
39	5.21	43.6	289.6	43.7	34.2	强	5.68
40	6.49	48.4	309.6	47.8	42.2	强	6.79

根据表 10 数据, 绘制 Z 值与膨胀力相关关系见图 6 所示。从图 6 可知,  $R^2=0.96$ , 表明 Z 值与膨胀力之间有较好相关性, 表明本文得出的地基泥岩微膨胀性分级结果可有效区分泥岩膨胀等级, 证明本文提出的泥岩分级标准和采用的线性定量综合评定方法对兰新高铁地基泥岩微膨胀性判定具有一定适用性。

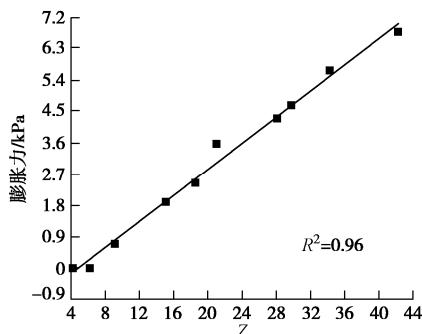


图 6 Z 值与膨胀力的关系

Fig. 6 Relationship between Z and swelling force

## 5 结 论

本文依托兰新高速铁路无砟轨道新疆段, 采集大量地基泥岩开展该判别与分级方法试验研究, 得出如下结论:

(1) 等效蒙脱石含量与自由膨胀率、阳离子交换量、液限有一定线性关系, 其作为地基泥岩判别与分级指标具有很好分类特性, 可作为兰新高铁新疆段地基泥岩判别与分级指标。

(2) 采用改进层次分析法和基尼系数法确定了泥岩判别指标主、客观权重, 基于相对熵思想综合考虑主、客观权重影响得出了判别指标组合权重, 利用线性综合评定法建立了泥岩微膨胀性评定模型, 将泥岩微膨胀性进行了量化, 克服了同一试样不同指标属于不同等级判别缺陷。

(3) 通过引入直接指标法膨胀力, 验证了本文提出的泥岩分级标准和采用线性定量综合评定法对兰新高铁地基泥岩微膨胀性判定具有一定适用性。

(4) 本文提出的高速铁路无砟轨道地基泥岩判别与分级标准仅在兰新高速铁路新疆段中进行了验证, 其普遍适用性有待进一步验证。

## 参 考 文 献:

- [1] 沈萌. 兰新客专新疆段泥岩路堑膨胀变形特征及控制措施研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016. (SHEN Meng. Study on Mudstone Cutting Deforming Properties and Controlling Measures of Lanxin High Speed Railway, Xinjiang Section[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [2] 王冲, 王起才, 张戎令, 等. 基于主成份分析法的高速铁路膨胀土判别研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1571 - 1578. (WANG Chong, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Discriminant analysis of high speed railway expansive soil based on principal component analysis[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(8): 1571 - 1578. (in Chinese))
- [3] 高速铁路设计规范: TB10621—2014[S]. 2014. (Code for Design of High Speed Railway: TB10621—2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [4] 马丽娜, 严松宏, 王起才, 等. 客运专线无砟轨道泥岩地基原位浸水膨胀变形试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1684 - 1691. (MA Li-na, YAN Song-hong, WANG Qi-cai, et al. In-situ tests on swelling deformation of mudstone foundation upon soaking under ballastless track of passenger railway line[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1684 - 1691. (in Chinese))
- [5] 薛彦瑾, 王起才, 张戎令, 等. 高速铁路无砟轨道膨胀土地基膨胀量计算模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1347 - 1353. (XUE Yan-jin, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Calculation model of swelling deformation of mudstone foundation upon soaking under ballastless track of high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1347 - 1353. (in Chinese))

- Rong-ling, et al. Calculation model of expansive soil foundation for ballastless track of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(7): 1347 - 1353. (in Chinese))
- [6] 王炳忠, 王起才, 张戎令, 等. 无砟轨道地基泥岩膨胀变形及水分迁移速率衰减规律[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 41 - 47. (WANG Bing-zhong, WANG Qi-cai1, ZHANG Rong-ling, et al. Attenuation law of expansion deformation rate and water migration rate on mudstone of ballastless track foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2): 41 - 47. (in Chinese))
- [7] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(2): 327 - 340. (ZHONG Zhi-bin, LI An-hong, DENG Rong-gui, et al. Study on the mechanism of time-dependent upheaval deformation for high-speed railway subgrade in red-bed soft rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(2): 327 - 340. (in Chinese))
- [8] 铁路工程特殊岩土勘察规程: TB10038—2012[S]. 2012. (Code for Special Soil and Rock Investigation of Railway Engineering: TB10038—2012[S]. 2012. (in Chinese))
- [9] 孙小明, 武 雄, 何满潮, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 128 - 132. (SUN Xiao-ming, WU Xiong, HE Man-chao, et al. Differentiation and grade criterion of strong swelling soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 128 - 132. (in Chinese))
- [10] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [11] 陈善雄, 余 颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, **37**(12): 1895 - 1900. (CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Discussion on the methods of the identification and classification of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **37**(12): 1895 - 1900. (in Chinese))
- [12] 膨胀土地区建筑技术规范: GDB3050112—2013[S]. 2013. (Technical Code for Buildings in Expansive Soil Regions: GDB3050112—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [13] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Engineering Mechanics of Soft Rock[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [14] 朱训国, 杨 庆. 膨胀岩的判别与分类标准[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 174 - 177. (ZHU Xun-guo, YANG Qing. Identification and classification of swelling rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 174 - 177. (in Chinese))
- [15] 巫茂寅, 王起才, 张戎令, 等. 无砟轨道路基膨胀土分类分级方法试验研究[J]. 公路, 2016, **61**(5): 38 - 41. (WU Mao-yin, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Ballastless track based expansive soil classification test[J]. Highway, 2016, **61**(5): 38 - 41. (in Chinese))
- [16] 崔晓宁, 王起才, 张戎令, 等. 基于无砟轨道膨胀路基的膨胀土分类分级试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(12): 248 - 251. (CUI Xiao-ning, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Experimental study of the identification and classification of ballastless track subgrade expansive soil[J]. Science Technology and Engineering, 2017, **17**(12): 248 - 251. (in Chinese))
- [17] 杨世基. 公路路基膨胀土的分类指标[J]. 公路工程地质, 1997, **1**(1): 1 - 6. (YANG Shi-ji. Classification index of expansive soil in highway subgrade[J]. Highway Engineering Geology, 1997, **1**(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [18] 谭罗荣, 张梅英, 邵梧敏, 等. 风干含水量 W65 用作膨胀土判别分类指标的可行性研究[J]. 工程地质学报, 1994, **2**(1): 15 - 26. (TAN Luo-rong, ZHENG Mei-ying, SHAO Wu-min, et al. The practicability research on use of air-dry moisture content W65 as identification index of the swelling soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, **2**(1): 15 - 26. (in Chinese))
- [19] 查甫生, 杜延军, 刘松玉, 等. 自由膨胀比指标评价改良膨胀土的膨胀性[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1502 - 1509. (ZHA Fu-sheng, DU Yan-jun, LIU Song-yu, et al. Evaluation of swelling capacity of stabilized expansive soils using free swell ratio method[J]. Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1502 - 1509. (in Chinese))
- [20] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Expansive Soil Problems in Engineering Construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [21] HOLTZ W G, GIBBS H J. Engineering properties of expansive clays[J]. Transact, ASCE, 1956, **121**(1): 641 - 677.
- [22] 沉积岩黏土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法: SY/T 5163—1995[S]. 1995. (Code for Relative Content of Sedimentary Rock Clay Minerals X-ray Diffraction

- Analysis Method: SY/T 5163 — 1995[S]. 1995. (in Chinese))
- [23] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010[S]. 2010. (Code for Special Soil Test of Railway Engineering: TB10102—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [24] 铁路工程岩土化学分析规: TB10103—2008[S]. 2008. (Code for Rock and Soil Chemical Analysis of Railway Engineering: TB10103—2008[S]. 2008. (in Chinese))
- [25] 韩建光. 企业财务困境预测动态建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. (HAN Jian-guang. Research on the Dynamic Modeling of Business Financial Distress Prediction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese))
- [26] 郭亚军. 综合评价结果的敏感性问题及其实证分析[J]. 管理科学学报, 1998, 1(3): 28 - 35. (GUO Ya-jun. Sensibility and practice analysis of comprehensive evaluation result[J]. Journal of management sciences in china, 1998, 1(3): 28 - 35. (in Chinese))
- [27] 丁 明, 过 翊, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214 - 223. (DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jing-jing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J].)
- Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214 - 223. (in Chinese))
- [28] 李 刚, 程砚秋, 董霖哲, 等. 基尼系数客观赋权方法研究[J]. 管理评论, 2014, 26(1): 12 - 22. (LI Gang, CHENG Yan-qiu, DONG Lin-zhe, et al. Study of the Gini coefficient objective weights[J]. Management Review, 2014, 26(1): 12 - 22. (in Chinese))
- [29] 卢 纯, 周开涛. 基于相对熵组合赋权法的电网经济性评估[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(11): 18 - 23. (LU Chun, ZHOU Kai-tao. Economic evaluation of power grid based on relative entropy combined weighting method[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(11): 18 - 23. (in Chinese))
- [30] 李玲玉, 郭亚军, 易平涛. 无量纲化方法的选取原则[J]. 系统管理学报, 2016, 25(6): 1040 - 1045. (LI Ling-yu, GUO Ya-jun, YI Ping-tao. Analyzing the principles for choosing dimensionless methods[J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(6): 1040 - 1045. (in Chinese))
- [31] 何艳频, 孙爱峰. Spearman 等级相关系数计算公式及其相互关系的探讨[J]. 中国现代药物应用, 2007, 1(7): 72 - 74. (HE Yan-feng, SUN Ai-feng. Discussion on the calculation formula of spearman rank correlation coefficient and their relationship[J]. Modern Medicine Application in China, 2007, 1(7): 72 - 74. (in Chinese))

### 第三届全国交通岩土工程学术会议一号通知

#### 一、会议时间与地点

拟定会议时间2020年11月初, 地点: 南京

#### 二、主办单位

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会  
交通岩土工程专业委员会

#### 三、承办单位

东南大学  
江苏省岩土力学与工程学会

#### 四、会议专题

征文内容涵盖交通岩土工程的研究领域, 主要包括:

- (1) 交通基础设施地基基础的勘察、设计、施工、检测和加固
- (2) 交通隧道和地下工程的设计、施工和运

#### 营

- (3) 交通基础设施地基处理
- (4) 边坡与支挡结构
- (5) 交通岩土工程抗震
- (6) 车-路-地基共同作用
- (7) 特殊土地区的交通岩土工程
- (8) 交通基础工程环境保护与修复
- (9) 轨道交通岩土及地下水问题
- (10) 岩土工程智能化技术

#### 五、会议秘书处及联系方式

秘书长: 章定文 13813065390

秘书处: 丁建文, 邓永锋, 蔡国军, 李宏025-83795086

联系地址: 南京市江宁区东南大学路2号东南大学交通学院岩土工程研究所 邮编: 211189。

(摘自《地基处理》)