

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.15

# 泥岩地基中黏土矿物含量对高速铁路无砟轨道 膨胀潜力的影响

丁小刚<sup>1</sup>, 马丽娜<sup>1,2</sup>, 张戎令<sup>2,3</sup>, 李佳敏<sup>1</sup>, 张唐瑜<sup>1</sup>, 王斌文<sup>1</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; 3. 卡迪夫大学工程学院, 英国 CF24 3AA)

**摘要:**为研究低黏土矿物含量泥岩地基中不同黏土矿物含量对高速铁路无砟轨道路基膨胀潜势、膨胀上拱变形量的影响,对既有规范针对无砟轨道膨胀土判定分级方面进行补充和完善,选取 25 处典型路基上拱病害段泥岩样进行 X 射线衍射实验,优化级配的自由膨胀率实验及阳离子交换量实验,采用主成分分析法(PCA)提取累计方差解释量 90.098% 进行降维分析,并结合实际工程进行等级区间划分。结果表明:PCA 可排除各因子间的共线性对模型结果的影响,在统计意义的基础上采用三因子能够正确表征膨胀土膨胀潜势与微观因子间良好的线性关系;通过简化、优化物理指标得到的膨胀土膨胀特性判定指标  $F$ ,与实际轨道上拱量的 Person 相关性提高至 0.902;依据线路实际膨胀情况和  $F$  划分的膨胀等级区间较既有规范判定准确度明显提高。研究结果可为该高速铁路沿线膨胀土判别和灾害防治提供参考和理论支撑。

**关键词:**无砟轨道;黏土矿物;膨胀泥岩;主成分分析;等级判定

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)01-0108-09

## Expansive potential of ballastless track on high speed railway mudstone foundation with low clay mineral content

DING Xiaogang<sup>1</sup>, MA Lina<sup>1,2</sup>, ZHANG Rongling<sup>2,3</sup>, LI Jiamin<sup>1</sup>, ZHANG Tangyu<sup>1</sup>, WANG Binwen<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Cardiff University School of Engineering, UK, CF24 3AA)

**Abstract:** In order to study the influence of different clay mineral contents in low clay mineral content mudstone foundation on the swelling potential and swelling upper arch deformation of ballastless track subgrade of high-speed railway, supplement and improve the existing standards for the determination and classification of ballastless expansive soil. Mudstone samples were selected from 25 typical roadbed arch diseased sections to conduct X-ray diffraction experiments. The free expansion rate experiment and cation exchange capacity experiment were optimized. The principal component analysis (PCA) method was used to extract the cumulative variance interpretation amount of 90.098% for dimension reduction analysis. And combined with the actual project to classify the interval. The results show that: PCA can exclude the influence of co-linearity between factors on the model results. Based on statistical significance, three factors can be used to characterize the good linear relationship between the swelling potential of expansive soil and micro-factors; by simplifying and optimizing physical indicators, the obtained index  $F$  for expansive soil has a Person correlation with the amount of arch on the actual track increased to 0.902;

收稿日期: 2020-01-12; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 青年人才托举工程(2015QNRC001); 博士后面资助(2016M602892); 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT\_15R29); 兰州交通大学(201606)优秀平台资助

第一作者: 丁小刚(1999-), 男, 回族, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事膨胀性泥岩及隧道工程方面的研究。

E-mail: 2286515113@qq.com

通讯作者: 马丽娜(1985-), 女, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事膨胀性泥岩及隧道工程的教学与科研工作。

E-mail: malinalanzhou@163.com

according to the actual expansion conditions of the line and the expansion grade interval divided by  $F$ , the accuracy of the judgment of the existing standards is significantly improved. The research results can provide reference and theoretical support for the identification of the expansive soil and disaster prevention along the high-speed railway.

**Keywords:** ballastless track; clay mineral; expansive mudstone; principal component analysis; grade determination

## 0 前言

膨胀土是一种内部由蒙脱石、伊利石、高岭石等强亲水性黏土矿物成分组成的特殊高塑性黏性土<sup>[1]</sup>。具有遇水体积迅速膨胀、失水体积明显收缩干裂的特点,对工程的破坏具有反复性和潜伏性,给世界各国的经济带来了巨大损失<sup>[2]</sup>。

近年来,AL-HOMOUND A S等<sup>[3-6]</sup>针对膨胀土胀缩性的原因进行了相应的理论分析,陈善雄等<sup>[7]</sup>探讨了反映和表征膨胀土特性和胀缩机理的判别指标,并提出了膨胀土五指标判别分析法,王剑等<sup>[8]</sup>认为泥岩遇水膨胀是引起兰新高铁路基上拱变形的主要原因;马丽娜等<sup>[9-11]</sup>对哈密地区的泥岩进行了前期研究,认为高速铁路在该地区应重视泥岩的微弱膨胀性,王冲等<sup>[12-13]</sup>针对无砟轨道“无膨胀性”泥岩路基的上拱病害的研究发现,“无膨胀性”泥岩实际具有微弱的膨胀性,无砟轨道的高精度要求,加之地下水丰富共同造成了路基上拱病害的发生,崔晓宁等<sup>[14]</sup>对某地区高速铁路弱膨胀泥岩地基依据钢轨实际上拱量进行了相关分析和泥岩膨胀等级划分。这些研究大多采用较多的变量因子,分析样本容量较小,部分变量的实验获取易受操作环境、人员等因素影响。

因而,本文基于既有铁路膨胀土规范,针对高速铁路,以使实验简单易行、便于实际工程中判定为目标,以考虑物质组成和膨胀土与水相互作用所体现出的水理性质为前提,在确保判定结果准确、符合工程实际条件下,进行主成分分析法(PCA)形成针对高速铁路无砟轨道的膨胀土分级方法,探讨高速铁路膨胀土的膨胀性等级准确判定问题,也是对既有规范的补充和完善。

## 1 工程概况

某高速铁路联调联试前期,发现多区域轨顶高程高出设计值的异常情况(图1),根据查阅原地勘及设计资料和试验取样分析发现,地基中既不是冻胀,也没有引起“膨胀的岩层”,地层土体根据现有规范均被判定为“无”或“弱”膨胀性土体,然而实际测试得出,沿线上拱量最大处高达48 mm,已远远超出所使用的WJ-8B型扣件或同等性能弹性扣件的调节范围。而与其毗邻

的普通有砟铁路运营中,并未出现此类路基上拱问题,反思认为:既有规范对有砟铁路具有实用性,但对评判平顺性要求极高的高速铁路无砟轨道路基的膨胀等级有待于进一步探讨、研究。



图1 隆起病害(左)及膨胀泥岩图(右)

Fig. 1 Uplift(left) and expanded mudstone in the foundation (right)

鉴于该铁路沿线造成路基上拱的具体原因还尚不明确,且该路段的路基上拱量差异较大。因此,对上拱病害段路基现场实地踏勘与钻芯取样,并将土样进行分析测试,以期分析导致该高速铁路出现病害的真正成因。

依据规范<sup>[15]</sup>,对待测试的黏土矿物通过X射线衍射进行成分分析、黏土矿物含量、自由膨胀率及阳离子交换量等的实验和数据分析,并结合已有的高速铁路路基上拱资料和相关规范,综合考虑,以期对该路段路基上拱原因做出解释。

## 2 实验数据分析

X射线衍射分析是利用黏土矿物的X射线衍射图谱对黏土矿物进行鉴定的一种方法。当X射线射入黏土矿物的晶格当中会产生衍射。同时,由于不同的黏土矿物其晶格构造各异,会出现衍射图谱的不同。利用黏土矿物层状结构的特征和X射线衍射的规律和机理,可通过衍射峰值根据公式计算得到晶面间距,从而判断出矿物的种类,并定量的推断出黏土矿物的含量。

本次黏土矿物含量测试通过日本理学公司生产的D/Max-3B型X-射线衍射仪,测试条件为:Cu靶,步进连续扫描,扫描速率为4°/min,管电压为35 kV,电流25 mA。X射线衍射结果图谱如图2所示,列出25处泥岩矿物含量测试值如表1所示。

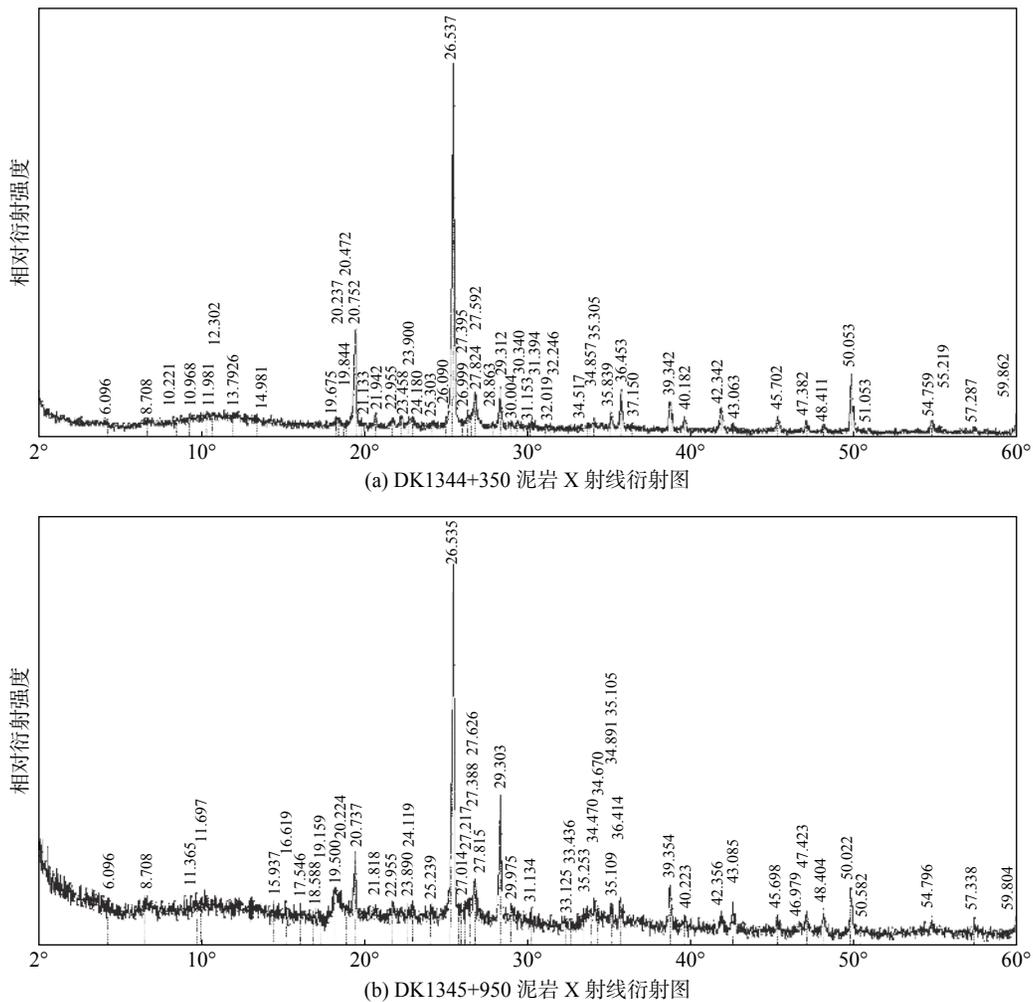


图 2 泥岩 X 射线衍射图  
 Fig. 2 X-ray diffraction pattern of mudstone

得到优化级配后的自由膨胀率实验如图 3(左)及阳离子交换量实验如图 3(右)。列出 25 处泥岩指标测试数据汇总图,并根据既有规范对其进行膨胀等级判别(图 4)。

以实测土样数据为基础,依据既有规范<sup>[6]</sup>的判定方法进行膨胀性判定,通过对比实际的工程情况,分析既有规范对高速铁路无砟轨道膨胀泥岩地基膨胀性判别的适用性。通过试验数据分析,对既有规范进行补充完善。最后,对完善后的新方法进行验证。

2.1 既有规范判定泥岩膨胀性等级

依据既有规范<sup>[6]</sup>的膨胀等级对 25 处泥岩样进行判定如图 5 所示,可知,该路段的 25 处土样中,共有 17 处泥岩被判定为“无膨胀性”,仅有 6 处被判定为“弱膨胀性”,2 处判定为“中膨胀性”,分别占总土样的 68%, 24% 和 8%,而其中需采取治理措施的有膨胀性泥岩占总土样的 32%。现场路基平顺性测试发现,25 处泥岩

取样处路基变形均超出了 WJ-8B 型扣件或同等性能弹性扣件上拱调节限值,其中最大上拱量高达 48 mm,有背线路高平顺性的要求,对线路的安全运营带来安全隐患。

综合以上分析,可知采用既有铁路规范难以满足评判对平顺性要求极高的高速铁路无砟轨道路基的膨胀等级。有必要尝试采用新的方法对高速铁路无砟轨道膨胀地基膨胀等级进行评判。

2.2 等级判定新方法

2.2.1 判定方法

主成分分析法是指将可能存在相关性的变量,转变成线性不相关变量,将获得的不相关变量称之为主成分,多个高维因素转变为低维综合指标,方便实际工程操作,便于工程中的膨胀土等级判定。

(1) 计算试验样本数据的协方差矩阵  $R$ :

$$\sum = (r_{ij}) p \times p \tag{1}$$

表 1 泥岩矿物成份表

Table 1 Mudstone mineral composition

样品编号	蒙脱石	伊利石	高岭石	石膏	绿泥石	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	赤铁矿	黄铁矿
NY1	2.0	3.1	0	0	0	34.1	10.2	21.2	28.1	0	0	0	1.3
NY2	1.5	3.3	0	0.3	0	56.6	6.2	12.6	19.5	0	0	0	0
NY3	0.6	1.4	0	0	0	26.4	7.5	7.8	55.7	0	0	0	0.6
NY4	1.2	2.5	2.5	0	0	46.6	15.8	17.1	14.3	0	0	0	0
NY5	2.8	3.7	2.3	0	0	36.7	12.0	18.0	23.5	0	0	0	1.0
NY6	0	4.8	0	0	0	48.3	12.7	28.7	5.5	0	0	0	0
NY7	0.5	2.5	0	0.3	0	35.9	10.2	16.9	33.7	0	0	0	0
NY8	0	3.0	2.6	0	0	32.4	26.7	13.4	21.9	0	0	0	0
NY9	2.1	3.6	2.8	0	0	34.3	9.4	22.5	24.3	1	0	0	0
NY10	1.7	2.5	0	0	3.7	28.4	13.1	25.8	24.8	0	0	0	0
NY11	1.5	3.7	0	0	0	27.6	18.4	24.7	21.8	0.6	0.7	0	1.0
NY12	1.2	2.4	0	0	0	61.2	12.3	11.9	11.0	0	0	0	0
NY13	1.9	3.0	0	0	0	47.3	0	9.0	38.1	0.7	0	0	0
NY14	0	2.8	0	0.3	0	53.2	14.2	14.7	14.8	0	0	0	0
NY15	0	5.3	0	0	0	55.3	22.3	0	17.1	0	0	0	0
NY16	1.6	3.3	2.2	0	0	42.9	15.5	23.6	9.1	0.9	0.9	0	0
NY17	1.5	3.9	0	0.4	4.2	47.3	10.2	15.5	14.9	0.6	0	1.5	0
NY18	1.6	3.7	3.5	0	2	30.8	14.7	34.1	8.8	0.3	0.5	0	0
NY19	0	4.5	1.4	0.3	0	50.0	24.0	11.2	8.1	0.5	0	0	0
NY20	2.0	3.6	0	0.3	0	50.5	7.4	20.6	14.2	0	0	0	1.4
NY21	1.4	7.6	0	0.5	0	55.8	10.4	14.0	9.0	0	0	0	1.3
NY22	1.6	3.6	2.4	0	0	54.4	7.1	18.2	12.2	0.5	0	0	0
NY23	3.7	6.5	0	0	0	50.1	13.3	24.4	2.0	0	0	0	0
NY24	1.1	3.3	0	0	0	41.4	20.7	17.7	15.8	0	0	0	0
NY25	0	8.2	0	0	2.7	49.5	7.9	16.2	14.2	0.6	0.7	0	0



图 3 自由膨胀率实验 (左) 及阳离子交换量实验图 (右)  
Fig. 3 Free expansion rate experiment (left) and cation exchange amount experiment (right)

其中,  $r_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, p)$  是原始变量  $x_i$  与  $x_j$  的相关系数,  $r_{ij} = r_{ji}$ , 其计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

(2) 计算特征向量  $\alpha$  和特征值  $\lambda$

求解特征方程  $|\lambda I - R| = 0$  得出特征值, 并按大小顺序对其排列  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 。分别求得与特征值  $\lambda_i$  相对应的特征向量  $e_i (i = 1, 2, \dots, p)$ , 并要求  $\|e_i\| = 1$ , 换

言之  $\sum_{j=1}^p e_{ij}^2 = 1$  中  $e_{ij}$  所表示向量  $e_i$  的第  $j$  个分量。

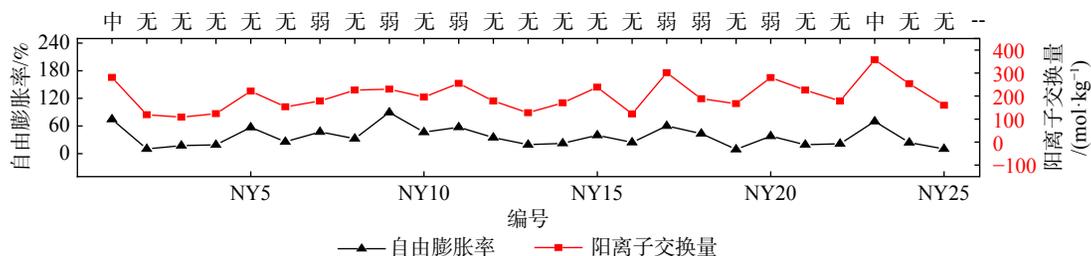


图 4 实验数据记录及规范<sup>[16]</sup>判定结果图

Fig. 4 Judgement result by experimental data record and specification<sup>[16]</sup>

注: 编号中“NY”表示“泥岩”, 下同; 图中“无”, “弱”, “中”, “强”分别表示泥岩膨胀性等级的“无膨胀性”, “弱膨胀性”, “中膨胀性”和“强膨胀性”, 下同。

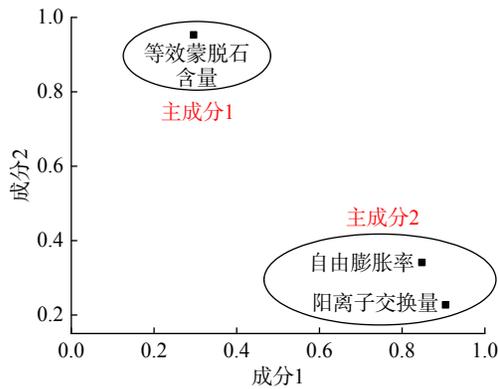


图 5 二维荷载图

Fig. 5 Two-dimensional load diagram

(3) 计算主成分贡献率及累计贡献率

主成分所包含的信息量通过方差贡献率来表示,  $\alpha_i$  为:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

累计贡献率  $G(m)$  表示的是前几个主成分包含全部指标所具有信息的百分率, 累计方差贡献量 > 85% 的前  $n$  个主成分即可解释整体。

$$G(m) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (4)$$

(4) 计算主成分得分

计算样本在  $m$  个主成份上的得分:

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{pi}X_p \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

2.2.2 判定指标

(1) 等效蒙脱石含量

蒙脱石、伊利石、高岭石均为强亲水性黏土矿物, 现有规范采用的是蒙脱石含量作为判别指标, 研究<sup>[17-18]</sup>发现, 前者的亲水性分别为后者的 10 倍和 60 倍, 但通过对泥岩的试验发现, 该高速铁路地基中部分泥岩的黏土矿物中并没有规范判定所需的蒙脱石, 然而所有的泥岩均含有伊利石, 部分中含有少量膨胀性较弱的高岭石, 为定量分析与研究泥岩的膨胀本质, 故根据膨胀性的强弱将伊利石及高岭石折算为蒙脱石进行分析, 在课题组前期研究基础上引用等效蒙脱石含量<sup>[12]</sup>计算公式如下式所示:

$$M' = M + I/10 + K/60 \quad (6)$$

式中:  $M'$ ——等效蒙脱石含量/%;

$M$ ——蒙脱石含量/%;

$I$ ——伊利石含量/%;

$K$ ——高岭石含量/%。

(2) 自由膨胀率

自由膨胀率是反映土的膨胀特性最直接指标之一。课题组<sup>[13]</sup>研究发现, 其结果易受对土样粉碾程度不同的影响: 由于堆积密度不同, 10 mL 量土杯内土体的质量不同; 土颗粒自身的吸水膨胀能力随粒径大小变化, 颗粒越小, 膨胀能力越弱。故本文采用 0.5 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.1 mm、<0.1 mm 三种级配分别按 40 : 20 : 40 的比例进行自由膨胀率实验, 以提高自由膨胀率与各膨胀指标间的相关性和同步性。

(3) 阳离子交换量

阳离子交换量可定性判断出土体内黏土矿物含量的种类及数量, 可表征土体亲水性、塑性、强度和膨胀性等重要性质的综合指标。

2.2.3 主成分分析

在 SPSS 分析中, 需依式 2 对样本数据进行 Z-score 标准化消除量纲影响, 得到样本的均值和标准差计算表如表 2 所示。

$$z = \frac{(x - u)}{\sigma} \quad (7)$$

式中:  $z$ ——标准化后的变量值;

$x$ ——实际变量值;

$u$ ——平均数;

$\sigma$ ——标准差。

表 2 平均值和标准差计算表

Table 2 Average and standard deviation calculation table

	等效蒙脱石含量/%	自由膨胀率/%	阳离子交换量/(mol·kg <sup>-1</sup> )
平均值	1.66	36.54	201.69
标准差	0.95	21.29	62.45

计算 KMO 统计量检验和 Bartlett 球形检验两个参数来进一步确定主成分分析法是否适用膨胀土的判别, 以满足各变量之间的相关性和偏相关性要求, 由表 3 可知, Bartlett 检验显著度为 0.000 < 0.01, 满足要求; KMO 统计量为 0.684, 接近 0.7, 适用主成分分析。

表 3 KMO 和巴特利特检验

Table 3 KMO and Bartlett test

KMO 取样适切性量数		0.684
巴特利特球形度检验	近似卡方	23.869
	自由度	3
	显著性	0.000

当累计贡献率达到 85% 以上时, 通常认为其已经可以涵盖所有数据中的绝大部分信息。由表 4 可知, 前 2 个主成分的特征根的累计贡献率已经达到了

90.098%, 且其它成分特征值相对较小, 表明主成分分析法在该问题上的应用效果较好, 故本文选取前 2 个成分作为主成分进行综合评价。

表 4 解释的总方差

Table 4 The explained total variance

成份	初始特征值			旋转平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.176	72.529	72.529	1.626	54.197	54.197
2	0.527	17.569	90.098	1.077	35.901	90.098
3	0.297	9.902	100.000			

通过 SPSS 软件进行分析, 图 5 为提取的主成分二维荷载图, 其中主成分 1 等效蒙脱石含量系数远小于其他两个指标系数, 即主成分 1 可以更好的代表自由膨胀率和阳离子交换量两个指标; 主成分 2 中等效蒙脱石含量系数远高于其他两个指标系数, 故其可更好的代表等效蒙脱石含量。

运用回归方法得到两个主成分与原始变量指标间的成分得分系数矩阵如表 5 所示。

表 5 成分得分系数矩阵

Table 5 Component score coefficient matrix

指标	成份	
	1	2
等效蒙脱石 $M'$	-0.368	1.151
自由膨胀率 $F_s$	0.565	-0.091
阳离子交换量 $CEC$	0.696	-0.291

分别用  $\widetilde{M}$ 、 $\widetilde{F}_s$ 、 $CEC(\widetilde{NH}_4^+)$  表示原数据  $M'$ 、 $F_s$ 、 $CEC$  标准化后的 3 个变量, 将前 2 个特征根所对应的特征向量作为变量系数代入主成分表达式, 得到 2 个主成分分别为:

$$F_1 = -0.368\widetilde{M} + 0.565\widetilde{F}_s + 0.696CEC(\widetilde{NH}_4^+) \quad (8)$$

$$F_2 = 1.151\widetilde{M} - 0.091\widetilde{F}_s - 0.291CEC(\widetilde{NH}_4^+) \quad (9)$$

由 SPSS 计算出两个主成分的得分为  $F_1$ 、 $F_2$ , 从不同方面反映了各膨胀性指标对膨胀潜能影响的总体水平, 但单一的使用某一主成分并不能对膨胀潜能作出综合评价, 因此需要按主成分对应的旋转后的方差贡献率为权重计算, 具体值如表 6 所示。

表 6 主成分权重表

Table 6 Weight of the principal component

主成份	$F_1$	$F_2$
权重	0.541 97	0.359 01

对选取的两个主成分权重进行归一化处理, 使其权

重综合为 1, 计算权重, 得到表达式:

$$\begin{aligned} F &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} F_2 \\ &= 0.601 5 F_1 + 0.398 5 F_2 \\ &= 0.237 3 \widetilde{M} + 0.303 6 \widetilde{F}_s + 0.302 7 CEC(\widetilde{NH}_4^+) \quad (10) \end{aligned}$$

式中:  $F$ ——膨胀土膨胀特性判定指标。

式 10 中, 因变量  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F$  及变量  $\widetilde{M}$ 、 $\widetilde{F}_s$ 、 $CEC(\widetilde{NH}_4^+)$  不再是原始变量, 而是标准化之后的变量, 故在利用式 10 进行膨胀量化计算时, 需先对  $M'$ 、 $F_s$ 、 $CEC(NH_4^+)$  三组数据依式 2 进行 Z-score 标准化, 其中样本平均值和标准差见表 2, 再代入表达式 10 进行计算。

### 2.2.4 划分标准确定

根据已有的专家研究成果可知, 膨胀土的黏土矿物含量, 自由膨胀率和阳离子交换量的指标越大, 则土样的膨胀性也就越强。并考虑到膨胀率与膨胀力是反映膨胀土自身膨胀能力和膨胀潜力的两个重要指标<sup>[12]</sup>, 由文献<sup>[14]</sup>可知, 膨胀土测试得到的综合指标与膨胀力、无荷膨胀率两者均成线性关系, 进而证明了本文中得到的公式的合理性, 也为式 10 划分标准提供了理论依据。

通过将实际工程中的 60 组对高速无砟铁路具有不同影响程度土样的实验分析, 测得其黏土矿物含量, 自由膨胀率以及阳离子交换量, 将数据带入式 10 中, 得到膨胀性最弱的土的  $F \geq -1.0$ , 即当  $F < -1.0$  时, 土样不具有膨胀性(包括两类土: 一为该土样本本身不含有黏土矿物, 不具有膨胀性; 二为该土样含有少量的黏土矿物, 但土样充分膨胀后对高速无砟铁路不会产生影响或影响很小可以忽略)。

本文膨胀土分类分级的目的是在已经判别为膨胀土的基础之上, 对高速铁路无砟轨道有影响的膨胀土进一步进行判别, 将其影响程度和工程性质相差不多的膨

胀土划分为同一级别,将工程性质相差较大的划分成不同的类别,通过对该高速铁路的上拱病害程度进行分类,根据轨道上拱的严重程度把膨胀土的膨胀等级划分为强、中、弱、无四类。

当  $F \geq -1.0$  时,即土体具有膨胀性(此处的膨胀性指会对高速铁路无砟轨道具有危害作用),对比按照泥岩等效蒙脱石含量、阳离子交换量、自由膨胀率三指标的综合体现,区分膨胀泥岩的膨胀性强弱;并重点结合现场已有的上拱病害,根据威胁与影响该高速铁路安全运营的程度,使用综合指标  $F$  值对影响高速铁路无砟轨道地基膨胀土分为与之对应的强、中、弱、无四个等级(表 7)。

**表 7 膨胀等级汇总表**  
**Table 7 Summary of expansion levels**

级别	F 值范围
无膨胀	$F < -1.0$
弱膨胀	$-1.0 \leq F < 0.0$
中膨胀	$0.0 \leq F < 1.1$
强膨胀	$1.1 \leq F$

**2.2.5 新方法判定分级**

(1)综上所述,可得到新标准的判定分级标准,对图 1 中的土样进行判定分级,如图 6 所示,对比图 1 中各指标的走势,验证了本文中基于主成分分析法得到的综合指标与各指标间的相关关系,体现出使用主成分分析法的合理性。

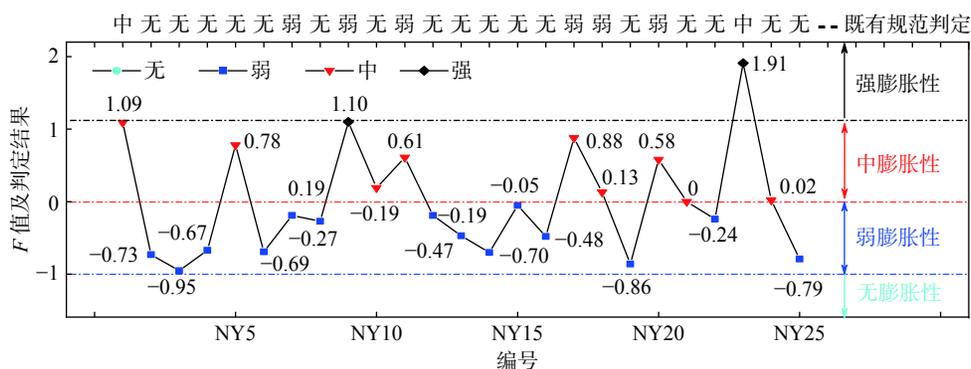


图 6 F 值计算汇总图

Fig. 6 Summary of calculated F values

(2)为明晰判定及对比结果,绘制膨胀等级对比图 7,经计算可得规范<sup>[16]</sup>判定中膨胀土占比为 32%,公式 10 判定中膨胀土占比为 100%,膨胀等级判定准确率明显提高了,符合实际。反思认为:由于工程背景的不同,既有规范对无砟轨道中低黏土含量的泥岩敏感度低,使得部分在工程实际中显现出“有膨胀性”的泥岩被误判为“无膨胀性”,相应的,部分膨胀性泥岩土样被误判定其他等级的膨胀性,导致线路路基发生不同程度的上拱病害,对铁路的安全运营带来安全隐患。

**2.2.6 公式验证**

(1)公式 10 的模型充分考虑各因子间的共线性和相关性对模型及分析结果的影响,通过降维的思想提取解释方差 >85% 的主成分代表整体,扩充了样本容量;为说明本文的必要性,选用文献<sup>[14]</sup>实验所得数据,以实际轨道上拱量为参考如图 8,分析可得,相比文献<sup>[12]</sup>,模型计算于实际轨道上拱量的相关性达到 0.902,提高了 0.074;选用三因子进行分析,简化了实验操作,更便于工程操作,也证明了分析的必要性。

(2)为确保公式 10 对公式铁路无砟轨道膨胀性判定的准确性,避免对无膨胀性土体进行误判,选取该高速无砟铁路沿线中未发生路基上拱变形病害段的 10 处土样进行检验(表 8)。

由表 8 可知,对于实际工程中未显现出膨胀性的土样,新方法的判定结果为无膨胀性,即该土样不具有膨胀性或其充分膨胀后对高速无砟铁路不会产生影响或影响很小可以忽略,符合工程实际情况。

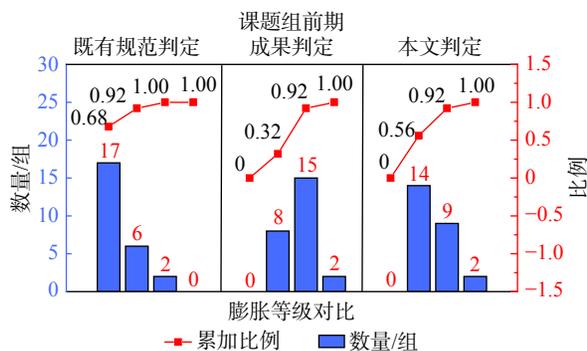


图 7 膨胀等级对比图

Fig. 7 Comparison of expansion levels

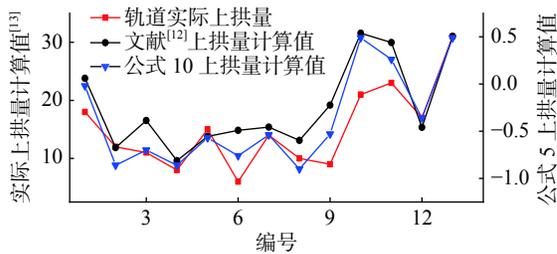


图8 路基上拱量对比图

Fig. 8 Comparison of arch amount on roadbed

表8 无膨胀性泥岩试验结果

Table 8 Test results of Non-expansive mudstone

编号	$M'(\%)$	$F_S(\%)$	$CEC(NH_4^+)$ (mol-L)	$F$	本文膨胀 潜力判定	实际 膨胀性
1	0.05	7.5	33.60	-1.63	无	无
2	0.19	11.5	40.49	-1.50	无	无
3	0.16	12.5	42.34	-1.49	无	无
4	0.34	14.0	49.06	-1.39	无	无
5	0.29	13.2	46.70	-1.43	无	无
6	0.30	14.5	49.73	-1.39	无	无
7	0.30	10.0	84.70	-1.28	无	无
8	0.29	21.0	84.71	-1.13	无	无
9	0.44	18.0	83.62	-1.14	无	无
10	0.37	12.5	98.83	-1.16	无	无

通过以上实验及数据分析,可得本文提出的新方法将既有规范中的无膨胀性土体重新判定为弱、中膨胀性;将既有规范中的弱膨胀性土体重新判定为中、强膨胀性;将既有规范中的中、强膨胀性土体重新判定为中或强膨胀性;并且,对于实际工程中未显现出膨胀性的土体,均判定为无膨胀性。判定分级结果与实际相符,体现出该方法的准确性和适用性。

### 3 结论

(1)本文在综合考虑膨胀土物质组成和与水相关作用所体现出的水理性质为前提,使用等效蒙脱石含量,优化级配的自由膨胀率,阳离子交换量作为膨胀土判定的基本指标,运用统计学中的主成分分析法(PCA)建立模型,得到膨胀土膨胀特性判定指标  $F$ 。

(2)根据实际工程中泥岩的膨胀上拱量,结合本文膨胀土自身膨胀特性判定指标  $F$ ,建立膨胀性等级划分方法,从而得到适用于高速铁路无砟轨道地基膨胀土的综合判定公式,对比既有规范,判定准确率提高了92%。

(3)本文提出的膨胀土膨胀等级判定及分级方法,补充了既有规范,简化了已有的分级判定方法,并结合

实际工况对弱、中膨胀性比例进行适当的调整优化,使判定分级结果更符合工程实际,也是对既有规范的补充和拓展。

### 参考文献 (References) :

- [1] 董文萍. 基于黏粒含量变化的膨胀土抗剪强度及其掺灰改良研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2015. [DONG Wenping. Study on shear strength of expansive soil based on variation of clay content and improvement of ash addition[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2015. (in Chinese)]
- [2] 孙海宁. 荆门膨胀土结构特征及承载性能研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011. [SUN Haining. Study on structural characteristics and bearing capacity of Jingmen expansive soil[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese)]
- [3] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, HUSEIN MALKAWI A I, et al. Cyclic swelling behavior of clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(7): 562-565.
- [4] DIF A, BLUEMEL W F. Expansive soils under cyclic drying and wetting [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1991, 14(1): 96-102.
- [5] DAY R W. Swell-shrink behavior of compacted clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(3): 618-623.
- [6] ALLAM M M, SRIDHARAN S. Effect of wetting and drying on shear strength [J]. *Geotechnical Engineering, ASCE*, 1981, 107(4): 421-438.
- [7] 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, 26(12): 1895-1900. [CHEN Shanxiong, YU Song, KONG Lingwei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1895-1900. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王剑. 兰新高高速铁路路基上拱原因分析及整治措施 [J]. *路基工程*, 2015(1): 205-209. [WANG Jian. Cause analysis on subgrade arching of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway and the control measures [J]. *Subgrade Engineering*, 2015(1): 205-209. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 马丽娜, 严松宏, 张戎令, 等. 低黏土矿物含量泥岩浸水膨胀变形的试验研究 [J]. *工业建筑*, 2015, 45(11): 111-115. [MA Lina, YAN Songhong, ZHANG Rongling, et al. Experimental research on soaking swelling deformation of mudstone with low content of clay minerals [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(11): 111-115. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 马丽娜, 严松宏, 王起才, 等. 哈密地区膨胀性泥岩膨胀特性研究 [J]. *兰州交通大学学报*, 2015, 34(1): 17-22. [MA Lina, YAN Songhong, WANG Qicai, et al. Research

- on the characteristics of expansive mudstone in kumul prefecture [ J ] . *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, 34(1): 17 - 22. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 11 ] 薛彦瑾,王起才,张戎令,等.高速铁路地基膨胀土膨胀变形试验研究 [ J ] . *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(4): 690 - 696. [ XUE Yanjin, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental study on expansive deformation of expansive soil in high speed railway [ J ] . *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(4): 690 - 696. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 12 ] 王冲.高速铁路无砟轨道地基膨胀土判别与分级研究[D].兰州:兰州交通大学,2018. [ WANG Chong. Study on discriminant and classification of expansive soil in ballastless track of high-speed railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018. ( in Chinese ) ]
- [ 13 ] 王冲,王起才,张戎令,等.低黏土矿物含量泥岩的自由膨胀率试验研究 [ J ] . *水利水电技术*, 2018, 49(5): 123 - 128. [ WANG Chong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental study on free expansion rate of mudstone with low clay mineral content [ J ] . *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(5): 123 - 128. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 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 Xiaoning, WANG Qicai, ZHANG Rongling, 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 with English abstract ) ]
- [ 15 ] 铁路工程岩土化学分析规程: TB 10103—2008[S].北京:中国铁道出版社,2009. [ Regulations for rock and soil chemical analysis of railway engineering: TB 10103—2008[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009. ( in Chinese ) ]
- [ 16 ] 铁路工程岩土分类标: TB10077—2001[S].北京:中国铁道出版社,2001. [ Code for rock and soil classification: TB10077—2001[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. ( in Chinese ) ]
- [ 17 ] 袁琳.蒙脱石的胀缩机理及改性技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2007. [ YUAN Lin. The swelling and shrinking mechanism and modification of montmorillonite[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007. ( in Chinese ) ]
- [ 18 ] 王林洲.公路工程中膨胀土判别试验研究[D].济南:山东大学,2007. [ WANG Linzhou. Swollens Sentenved research in the highway engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2007. ( in Chinese ) ]