

# 基于支持向量机回归的黄土湿陷性预测研究

Research on Prediction of Loess Collapsibility Based on Support Vector Machine Regression

戴汀<sup>1,2</sup>, 李向国<sup>1,2</sup>, 王凯<sup>3</sup>

(1. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 中建三局一公司基础分公司, 武汉 430064)

**摘要:** 针对传统方法难以快速精准预测陇中地区黄土湿陷性的问题, 开展基于支持向量机回归的黄土湿陷性预测研究。研究依托陇中地区某铁路项目, 于人工探井中采集样土进行室内土工试验, 以获取土的相关物性指标数据。通过文献分析法和数理分析, 探究黄土湿陷系数与各物性指标的相关性。在此基础上, 基于支持向量机, 采用高斯核函数构建黄土湿陷性预测模型。以 45 组试验数据作为训练集, 9 组作为测试集进行误差分析。结果表明: 预测模型训练集平均绝对误差为 0.003、平均偏差误差为 0.001、均方根误差为 0.015 9; 测试集平均绝对误差为 0.013 2、平均偏差误差为 0.001 8、均方根误差为 0.015, 表明该模型预测精度良好, 可有效预测陇中地区黄土湿陷系数, 为实际工程中黄土湿陷性的预测提供了可靠的新方法。

**关键词:** 黄土湿陷性; 物性指标; 相关性; 支持向量机; 预测模型

**中图分类号:** TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0073-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.014

DAI Ting<sup>1,2</sup>, LI Xiangguo<sup>1,2</sup>, WANG Kai<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic

Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Basic Branch of China Construction Third Bureau One Company, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To address the challenges in rapid and accurate prediction of loess collapsibility in Central Gansu using conventional methods, a support vector machine regression-based predictive model was developed. Leveraging data from a railway project in this region, soil samples collected from manually excavated test pits underwent comprehensive laboratory geotechnical testing to obtain key physical property indices. Correlations between loess collapse coefficients and physical indices were systematically investigated through literature analysis and mathematical statistics. A Gaussian kernel function-based SVM prediction model was subsequently established. The model was trained with 45 experimental datasets, while 15 datasets were utilized for

基金项目: 国家自然科学基金 (52378453)。

作者简介: 戴汀 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 黄土湿陷性。

通信作者: 李向国 (1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 铁路线路结构设计、施工等方面。

收稿日期: 2025-01-18

## 岩土力学

validation and error analysis. Results demonstrate that the model achieves a mean absolute error (MAE) of 0.003, mean bias error (MBE) of 0.001, and root mean square error (RMSE) of 0.0159 on the training set. For the testing set, performance metrics indicate MAE = 0.0132, MBE = 0.0018, and RMSE = 0.015. These findings confirm the model's high predictive accuracy for estimating loess collapse coefficients in Central Gansu, providing a reliable novel methodology for practical engineering applications.

**Key words:** loess collapsibility; physical property index; correlation; support vector machine; prediction model

## 0 引言

湿陷性土壤在受到地下水或降雨作用后,会出现显著的变形,这对基础设施、房屋及其他工程建设构成潜在威胁<sup>[1]</sup>。随着城市化进程的加快和基础设施建设的不断扩展,黄土湿陷性带来的工程安全问题日益显现。因此,对黄土湿陷性的准确评判十分有必要。

关于黄土湿陷特性的研究,众多学者采用现场试验以及理论分析等多种方法对该问题进行了探讨。史向庆<sup>[2]</sup>、李同录等<sup>[3]</sup>指出了当前黄土湿陷系数计算方法及试验压力取值存在的部分缺陷,提出了黄土湿陷系数试验的压力取值的修正方案;付昱凯等<sup>[4]</sup>在不同含水率下开展了多组黄土高压固结试验,得到不同含水率及压力组合下的湿陷系数;唐辉等<sup>[5]</sup>对黄土湿陷性与多项物性指标之间的关系进行进一步研究;金鑫等<sup>[6]</sup>提出并验证了考虑卸荷作用的湿陷系数理论计算方法;张超哲等<sup>[7]</sup>对黄土含水率与电学特性关系展开研究,提出了一种基于电阻率的黄土湿陷系数评价方法。

当前,探索在误差允许范围内对黄土湿陷性准确快捷的预测成为研究的热点和新方向。李国华等<sup>[8]</sup>基于山西转型综改示范区土工试验数据,对比分析随机森林模型和BP神经网络两种预测模型对湿陷性预测效果,为模型选择提供实践参考;陈佳玫等<sup>[9]</sup>将BP神经网络应用于黄土湿陷起始压力的预测中,利用多地数据证明了网络模型的通用性;陈砺锋等<sup>[10]</sup>采用多元线性回归和RBF神经网络对伊利河谷地区的黄土进行湿陷性预测,对比了传统线性方法与神经网络方法的差异;任文博等<sup>[11]</sup>提出离散型二项式系数组合模型用于黄土湿陷性预测;郭倩怡等<sup>[12]</sup>应用现有试验资料,构建了基于PLS方法及LogisticCum函数黄土湿陷性预测模型;徐东升等<sup>[13]</sup>

将模糊理论引入黄土湿陷性等级评判中,建立湿陷性预测模型;黄建军等<sup>[14]</sup>分别采用普通多元线性回归方法和偏最小二乘回归方法建立黄土湿陷系数的多因素回归模型,并对二者精度进行了对比验证;刘颖莹等<sup>[15]</sup>基于最小二乘法建立黄土湿陷性预测模型,通过数据对比证明以支持向量机所建立的模型来预测黄土湿陷性可用于实际工程中,肯定了支持向量机在黄土湿陷性预测中的实用性;温博等<sup>[16]</sup>建立了扰动状态理论(DSC)模型来预测不同初始含水率下原状黄土压缩行为,提出了湿陷性黄土湿陷系数及场地变形量的预测方法;杨国辉等<sup>[17]</sup>基于不同矿渣微粉掺量下黄土抗剪强度试验数据建立了黄土抗剪强度预测模型,并对模型预测值与实测值进行了对比验证,从抗剪强度方面为黄土湿陷性研究提供了参考。

由于不同地区的地质条件和黄土的物性指标存在较为显著的差异<sup>[18]</sup>,传统的统一预测方法难以精准适配各个地区的实际情况,在不同地域应用时往往会出现较大误差,无法满足工程建设对黄土湿陷性准确预测的需求。因此,基于陇中地区某铁路项目地勘报告资料,以试验数据为基础,分析其物性指标与湿陷系数的相关性并构建支持向量机预测模型,以在实际应用中提供一种快捷准确的预测方法。

## 1 黄土湿陷性土工试验概述

试验样品取自某地区高速铁路项目的两处人工探井。该段深路堑挖方范围内的地层岩性较为单一,主要由第四系上更新统的风积黄土构成。该黄土呈现浅黄色,土层质地变化较大。在对取样土壤进行观察和分析时,发现样品局部存在明显的孔隙结构,尤其是大孔隙较为突出,伴随着虫孔的痕迹以及植物根系的存在,土样感觉稍显湿润,被归类为II、III级普通土。

对样本采取室内试验的方式, 检测样土的物理性质, 如塑性指数及压缩性等。具体试验步骤参照 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》<sup>[19]</sup>。

## 2 湿陷性与物性指标相关性分析

由于土样的某些物理性质反映的土性特征相近, 只是采取了不同的测试方法和表达形式, 可采用主成分分析法对试验指标进行分析, 确定与黄土湿陷性相关显著的主要指标含水率、饱和度、孔隙比、塑性指数和压缩模量。选取室内试验的数据作为研究基础, 为研究单一指标对湿陷系数的相关影响, 忽略指标间的交互作用。各项指标与黄土湿陷性的影响如图 1 所示。

通过图 1 (a) 与图 1 (b) 可知, 天然含水率、饱和度与湿陷系数呈现负相关。由于黄土的结构与物质成分导致的“水敏性”, 在天然含水率较低时, 土颗粒紧密排列, 结构稳定性较好; 随着土中水分增加, 土颗粒间的浮力作用增大, 胶结力减弱, 从而导致结构稳定性降低。在含水率较高时, 即使水分发生波动, 湿陷性变化相对较小; 在饱和度较高时, 水分填充土壤中的孔隙, 土颗粒间的接触减弱, 土体的结构受到扰动, 导致黄土湿陷增加。

由图 1 (c) 可知, 孔隙比与湿陷系数呈现正相

关。当黄土处于高孔隙比时, 土壤的孔隙空间较大, 能够储存较多的水分。当水分渗入土壤后, 会减少土颗粒间的直接接触面积, 改变土壤应力状态, 减小颗粒间的内聚力, 容易破坏土壤结构, 使样土在受到外部荷载时更容易产生湿陷性。

由图 1 (d) 可知, 样本土的塑性指数与湿陷性系数存在一定的负相关关系, 但无法呈现出稳定且显著的相关关系。由于黄土湿陷性受多种复杂因素交织影响, 多因素间存在相互作用, 塑性指数对湿陷性的影响力变得模糊难辨。因此在反映黄土湿陷性研究中, 塑性指数不能作为判断黄土湿陷性的唯一依据。

从图 1 (e) 中可知, 压缩模量与湿陷系数呈现负相关。压缩模量高的样土在受到外力作用时, 不容易发生塑性变形和体积变化, 表现出更好的稳定性, 不易发生湿陷; 低压缩模量的样土在受到水分的进入时容易出现塑性流动, 样土结构发生改变, 湿陷性相对更显著。

从图 1 (f) 中可得, 干密度与湿陷系数呈负相关。干密度可间接反映样土的孔隙含量。干密度高的样土中土颗粒间的接触更好, 颗粒间的孔隙较少, 湿陷性系数相对较低; 干密度较低的样土, 土颗粒间的孔隙较多, 受到水分的入侵时易发生变形, 导致湿陷性较高。

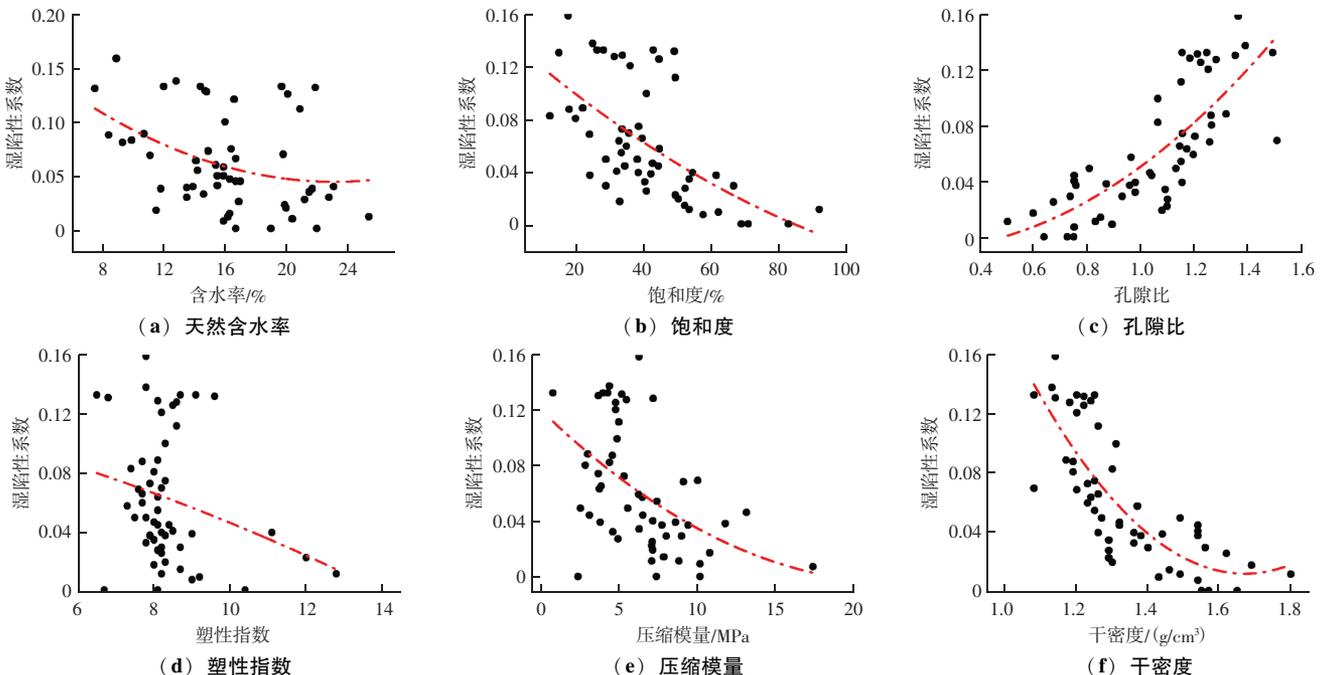


图 1 湿陷系数与各项指标相关性

Fig. 1 Correlation between collapsibility coefficient and various parameters

## 岩土力学

### 3 黄土湿陷性预测模型建立及验证

随机挑选室内试验数据中的 45 组作为训练集, 以构建黄土湿陷性预测模型, 剩余的 9 组数据作为测试集, 验证模板模型的预测效果。

基于 MATLAB 软件, 创建支持向量机预测模型, 采用高斯核函数, 选定 K-CV 方法作为评估分类能力的交叉验证方法, 引入惩罚参数  $C$  与核函数半径  $g$ 。通过试验, 最终确定模型的惩罚参数  $C$  为 0.5, 核函数半径  $g$  为 0.8。

训练集和测试集误差如图 2~3 所示。均方根误差能够很好地反映出测量精密度, 当其值越接近于 0, 说明模型的预测效果越准确; 平均绝对误差数值越小, 模型精度越高; 平均偏差误差的大小反应了模型的预测能力, 误差绝对值越小越趋近于 0, 说明模型的预测能力越好。

训练集的平均绝对误差 0.003; 平均偏差误差 0.001, 均方根误差 0.015 9; 测试集的平均绝对误差 0.013 2, 平均偏差误差 0.001 8, 均方根误差 0.015, 说明训练集和测试集与构建的模型误差小, 精度较

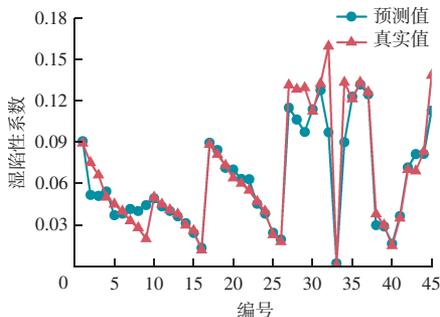


图 2 训练集的真实值和预测值对比

Fig. 2 The comparison between the real value and the predicted value of the training set

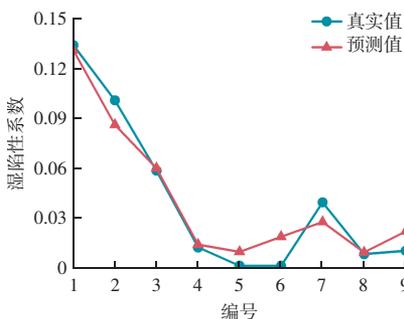


图 3 测试集的真实值和预测值对比

Fig. 3 The comparison between the true value and the predicted value of the test set

高; 由图 3 可知, 大多测试样本的真实值和预测值之间存在较小的误差, 说明模型的训练和预测效果具有较高的精度, 进一步说明可用于某高速公路项目边坡黄土湿陷性系数的预测。

### 4 结论

根据某高速铁路边坡黄土湿陷性问题, 通过对样土试验数据进行分析, 确定各物性指标与湿陷系数的相关性影响; 基于支持向量机, 提出了黄土湿陷系数预测模型并进行效果验证。主要结论如下:

(1) 黄土湿陷性与多指标之间存在较为显著的相关性。与天然含水率、饱和度、塑性指数、压缩模量以及干密度呈现负相关; 与孔隙率呈现正相关。其中压缩模量, 干密度, 孔隙率和饱和度与湿陷性系数具有强相关性。

(2) 基于室内试验数据, 搭建支持向量机预测模型, 采用其中 45 组数据为训练集, 9 组数据为测试集, 结果显示训练集和测试集模型的均方根误差、平均绝对误差和平均偏差误差均较小, 说明模型的训练和预测效果较好, 精度较高, 进一步说明可对陇中地区黄土湿陷性的评估预测提供一定的借鉴。

### 参考文献

- [1] 康佐, 亢佳伟, 邓国华, 等. 西安市区黄土湿陷特性研究 [J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20241012.1805.002.html>.
- [2] 史向庆. 湿陷性黄土湿陷系数测定方法探讨 [J]. 土工基础, 2018, 32 (3): 355-356, 364.
- [3] 李同录, 冯文清, 刘志伟, 等. Q2 黄土湿陷系数试验压力取值的讨论 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50 (6): 59-68.
- [4] 付昱凯, 李广林, 李同录, 等. 中更新世黄土的湿陷特性及其湿陷预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52 (1): 159-166.
- [5] 唐辉, 张瑞松, 高建中. 延安新区黄土湿陷性与其物性指标的相关性分析 [J]. 地基处理, 2023, 5 (1): 19-24.
- [6] 金鑫, 王铁行, 赵再昆, 等. 卸荷条件下黄土湿陷系数的计算方法及验证 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (10): 1959-1966.
- [7] 张超哲, 刘松玉, 王厚宇, 等. 基于电阻率的黄土湿陷性评价试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2025, 55 (1): 222-229.
- [8] 李国华, 周爱红, 袁颖. 山西转型综改示范区黄土湿陷性指标分析及其预测模型研究 [J]. 地质与勘探, 2024, 60 (6):

- 1246-1256.
- [9] 陈佳政, 张爱军, 邢义川, 等. 基于 BP 神经网络的黄土湿陷起始压力的预测 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14 (4): 254-259.
- [10] 陈砺锋, 陈凯, 贺根义. 伊利河谷地区巩留县黄土湿陷性预测模型研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (4): 1282-1292.
- [11] 任文博, 刘云龙, 李佳佳. 基于离散型二项式系数组合模型的黄土湿陷性评估 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (12): 4945-4953.
- [12] 郭倩怡, 王友林, 谢婉丽. 黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究 [J]. 西北地质, 2021, 54 (1): 212-221.
- [13] 徐东升, 汪稔. 模糊测度在黄土湿陷性评判中的应用 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (增刊1): 217-219, 224.
- [14] 黄建军, 李雪梅, 滕宏泉. 基于偏最小二乘法的黄土湿陷性评价模型 [J]. 灾害学, 2021, 36 (2): 60-64.
- [15] 刘颖莹, 谢婉丽, 朱桦, 等. 陕西泾阳地区黄土固结湿陷试验及预测模型研究 [J]. 西北地质, 2018, 51 (2): 227-233.
- [16] 温博, 翁效林, 侯乐乐, 等. 湿陷性黄土的一维压缩模型及其应用 [J/OL]. 建筑科学与工程学报, 1-10 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.TU.20241202.0936.002.html>.
- [17] 杨国辉, 李驰, 商艳, 等. 矿渣微粉改良黄土力学性能及抗剪强度预测模型 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (3): 1185-1191.
- [18] 许力, 樊杰, 朱凯. 府谷地区黄土湿陷性与土体物性参数关系及其神经网络预测模型 [J/OL]. 太原理工大学学报, 1-10 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20241115.1656.006.html>.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. JTG3430—2020 公路土工试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

(上接第 62 页)

- [4] 陈辉, 陈芳芳. 石墨烯增韧粉煤灰混凝土的制备及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (5): 5198-5203.
- [5] 莫黎, 魏留明, 周强, 等. 不同养护制度下粉煤灰混凝土压缩冻融损伤演化 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (7): 101-104.
- [6] 和文超, 薛静, 王伟. 含粉煤灰微珠混凝土的强度和徐变特性研究 [J]. 无机盐工业, 2023, 55 (1): 124-128, 158.
- [7] 郑晓芳, 李霖霖, 齐恩磊, 等. 轻质粉煤灰泡沫混凝土的制备及性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (2): 107-111.
- [8] 周欣竹, 郑宇红, 张宇翔, 等. 粉煤灰和矿渣水泥浆氯离子扩散的试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51 (2): 127-130, 138.
- [9] WAGH C D, GANDHI I S R, NETI K V. Impact of addition of fly ash (as sand replacement) and polypropylene fibers on shrinkage and thermal characteristics of foam concrete [J]. The Indian Concrete Journal, 2023, 97 (9): 26-35.
- [10] 蒋建华, 卢宸宸, 师效哲, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (3): 10-17.
- [11] 张继超, 王仁义. 湿度对建筑混凝土材料耐久性影响仿真分析 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (10): 336-340.
- [12] LASHARI A R, KUMAR A, KUMAR R, et al. Combined effect of silica fume and fly ash as cementitious material on strength characteristics, embodied carbon, and cost of autoclave aerated concrete [J]. Environmental Science And Pollution Research International, 2023, 30 (10): 27875-27883.
- [13] 邵善庆, 龚爱民, 王福来, 等. 盐侵冻融作用下非饱和掺碱粉煤灰混凝土损伤研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (2): 222-230.
- [14] 陈晋华. 基于改进遗传算法的公路沥青混凝土路面黏弹性损伤演化模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 126-131.
- [15] 刘伟琪, 陈波, 陈家林. 基于声发射的蒸养混凝土受压损伤特性试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (1): 50-55, 62.