

陕西泾阳地区黄土固结湿陷试验及预测模型研究

刘颖莹¹, 谢婉丽^{1,2}, 朱桦², 於红¹, 葛瑞华¹

(1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:黄土湿陷问题的研究具有很大的工程意义及价值。野外取得陕西泾阳地区黄土原状样, 在天然含水率的基础上分别配置了含水率为12%、15%、18%与20%的5组原状黄土试样, 采用单线法对研究地区黄土进行了湿陷性试验, 获得了在不同法向应力下黄土的压缩特性及湿陷性系数, 研究了不同含水率以及不同压力对黄土湿陷性的影响。结果表明, 在较低含水率的情况下, 湿陷系数随着压力的增大而增大, 在较高含水率的情况下, 湿陷系数随着压力的增加先增大后减小。而湿陷系数与含水率的关系相对复杂, 在相同压力下, 湿陷系数均在某一含水率下达到峰值。根据湿陷系数与含水率及压力的曲线特征, 建立了不同压力下黄土湿陷系数与含水率的回归关系式。最后, 基于最小二乘支持向量机, 以黄土的密度、含水率、压力等指标作为预测变量, 建立了黄土湿陷性预测模型。结果表明, 采用支持向量机所建立的模型来预测黄土湿陷性是可以满足工程要求的。

关键词:黄土湿陷; 预测模型; 回归关系; 支持向量机

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)02-0227-07

Study on Loess Consolidation Collapse Test and Prediction Model in Jingyang District, Shaanxi Province

LIU Yingying¹, XIE Wanli^{1,2}, ZHU Hua², YU Hong¹, GE Ruihua¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazard in Loess Area, Ministry of Land and Resources, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The study of loess collapsibility problem has great engineering significance and value. Based on natural moisture content, the five sets of undisturbed loess samples with water content of 12%, 15%, 18% and 20% respectively have been collected from the Jingyang area of Shaanxi Province. The single-line method has been used to test the collapsibility of loess in this study area, the compressive properties and collapsibility coefficient of loess under different normal stresses have been obtained, the influence of different water content and different pressure on collapsibility of loess have been studied in this paper. The results show that the coefficient of collapsibility

收稿日期: 2017-10-12; **修回日期:** 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土高填方在高压、浸水和强夯作用下诱发地质灾害机理及其演化模式研究”(41772323); 国家重点研发计划项目“研发沟治造地工程地质与土壤湿陷稳定技术与标准; 陕西省国际科技合作与交流计划项目”“延安移山填沟工程中动静荷载引起的工程地质问题研究”(2017YFD0800501)(2016KW-030); 国土资源部黄土地质灾害重点实验室开放基金“大西安地区高压下黄土的湿陷特性研究”(KLGLAMLRL201502)

作者简介: 刘颖莹(1993-), 女(汉族), 山东省东营市人, 硕士研究生, 主要从事黄土湿陷性研究。E-mail: 18561220019@163.com

increases with the increase of pressure at lower moisture content. On the contrary, at higher moisture content, the coefficient of collapsibility first increases firstly, and then decreases with increasing pressure. But, the relationship between the coefficient of collapsibility and the moisture content is relatively complex. At the same pressure, the collapsibility coefficient peaks at a certain moisture content. According to the curve characteristics of collapsibility coefficient, moisture content and pressure, a regression equation has been established for collapsibility coefficient and moisture content of loess under different pressures. Finally, based on the least squares support vector machine, the loess density, moisture content and pressure have been used as predictors, thus, a collapsibility prediction model for loess has been established. The results show that this model established by the support vector machine can meet the engineering requirements for predicting the collapsibility of loess.

Keywords: loess collapsibility; prediction model; regression relationship; support vector machine (SVM)

区域性、大孔性、水敏性、结构性等是黄土所具有的特殊岩土工程性质,使其在各类工程建设中有着重要影响。黄土地基的湿陷特性,会给结构物带来不同程度的危害,使路基及结构物大幅度沉降、折裂、倾斜甚至严重影响其安全和使用。因此,对于不同地区黄土受不同压力及含水率的湿陷性的问题的研究具有很大的工程意义及价值(谢婉丽等,2015)。理论上以及技术上的突破,将促进中国黄土地区基础设施建设的进行。

李保雄等对兰州地区马兰黄土的工程地质性质进行了一系列的实验测试,系统研究了马兰黄土的物理力学特性,重点研究了兰州地区马兰黄土的抗剪强度受含水率的影响规律(李保雄等,2007);罗浩等对延安市赵家岸滑坡地区原状马兰黄土在不同初始含水率条件下,进行三轴压缩试验,分析了赵家岸滑坡地区原状马兰黄土抗剪强度参数随含水率降低的原因及对水的敏感性差异(罗浩等,2015);曾国红、裘以惠等通过室内试验,对湿陷性黄土进行增减湿压缩试验,并对湿陷起始压力与起始含水率进行了一系列试验,从而提出了变形分界压力和变形分界含水率的新概念(曾国红等,1996,1997)。对于压力与含水率对黄土湿陷性造成的影响程度及关系,李敏等进行了系统研究,提出了充分湿陷、不充分湿陷和剩余湿陷的新理论(李敏等,2005)。对于单线法和双线法的浸水湿陷试验的相对差异,张红萍等对黄土湿陷试验的 2 种方法的差异性进行了探讨(张洪萍等,2005)。

王家鼎教授采用新的优化处理方法,对于黄土

湿陷性提出了模糊信息处理方法(王家鼎,1999),并以试验区黄土含水率与湿陷系数的模糊关系为基础,给出了模糊信息近似推理方法与过程,成功在黄土的湿陷系数的预测处理过程中,将模糊数学方法引入。而后谢婉丽等(谢婉丽,2005)在黄土的湿陷系数的预测处理过程中将更多的湿陷性影响因素考虑进这一模糊信息优化处理方法中。李瑞娥等(李瑞娥,2009)、井彦林等(井彦林等,2006)、高凌霞等(高凌霞等,2006)、马闫等(马闫等,2016)将更加新颖的神经网络处理方法引入了对黄土湿陷系数预测之中。在建立预测模型时,各土性指标更加多样化的被研究人员所考虑进去,所选用的人工神经网络处理方法,也逐渐从基础的 BP 神经网络转变为更为复杂的 ANFIS 模糊神经网络,取得了一定的效果。井彦林等(井彦林等,2010)采用支持向量机方法进行了黄土湿陷性预测挖掘,证明了该方法在黄土湿陷性预测上的可行性。

Q₃黄土主要分布于中国西北地区,由于非饱和土的性质,其对水有较为敏感的性质,其持水能力有别于其他类土(不同地区的湿陷性不同)(张炜等,2010)。近年来随着经济发展速度的提高,泾阳南塬地区基础设施建设较为活跃,包括公路、铁路以及各种输油管线工程,这些设施多建在黄土地基之上,因此对陕西泾阳地区 Q₃黄土的湿陷模型的建立,对其地区的工程建设施工具有重要帮助。

笔者通过对泾阳南塬地区 Q₃原状黄土在不同载荷下进行天然含水率及 12%、15%、18%与 20%的含水率下的湿陷试验,并建立研究区黄土的湿陷

预测模型,分析了压力、孔隙比、含水率等因素对研究区黄土湿陷性的影响。

1 室内湿陷试验概述

采用挖掘方式在陕西泾阳地区一大型黄土滑坡后塬取得试验土样,塬边裂缝不同程度发育。该处地层出露较好,岩性界线分明。黄土埋深约为 5 m,对取得的土样密封以防止水分蒸发。试验要求土样的质量等级应为 I 级不扰动土样,因此在运输过程中需防止振动对土样的影响。采用 MS-2000 激光粒度仪进行测量,获得了该地区黄土土样的颗粒组成,并结合前人的试验资料,将所研究地区的黄土基本物理性质列于表 1。

表 1 泾阳地区原状黄土的基本物理性质指标						
Tab.1 The basic physical properties of Jingyang area of Loess						
湿密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	含水率 (%)	干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	孔隙比	比重	液限 W_L (%)	塑限 W_p (%)
1.527	10.67	1.380	0.967	2.715	28.73	13.68
压缩 系数 a	压缩模量 E_s/MPa	>0.075 (mm) 砂粒	$0.075 \sim 0.005$ (mm) 粉粒	<0.005 (mm) 黏粒	<0.002 (mm) 胶粒	
0.12	17.2	3.1	53.88	43.99	27.06	

使用黄土滑坡后塬所取得原状黄土试样,在西北大学大陆学国家重点实验室内进行黄土湿陷性试验。在试验过程中,通过自然风干的方式以及蒸汽增湿法调节黄土的含水率。对于含水率高于试验要求的土样,采用自然风干方式;对于低于要求的土样,通过水蒸气增湿来提高其含水率。为保证增湿后土样含水率的均匀性,除采用间隔增湿的方式外,最后覆盖保鲜膜保存 3 天。设计 5 组不同含水率的黄土样品,分别为天然含水率(9%)、12% 含水率、15% 含水率、18% 含水率以及 20% 含水率。室内湿陷试验分为单线法压缩试验及双线法压缩试验。因本次取样数量充足,采用比较符合地基实际情况的单线法进行试验,分级加荷至试样的规定压力,下沉稳定后,试样浸水饱和,附加下沉稳定,试验终止。在 0~200 kPa 压力以内,每级增量宜为 50 kPa;大于 200 kPa 压力,每级增量宜为 100 kPa,最大压力

为 400 kPa。在本次试验中,采用南京土壤仪器公司制造的全自动气压固结仪 GZQ-1 型进行试验,该仪器与计算机相连,具有数据自动保存及实时图像处理功能。

2 试验结果分析

2.1 黄土湿陷特性及影响因素分析

将所配置的不同含水率的 Q_3 原状黄土进行湿陷试验,获得在不同含水率下黄土湿陷系数与压力关系曲线(图 1)。由图 1 可以看出,在天然含水率(9%左右)、较低含水率(12%和 15%)的情况下,湿陷系数随着压力的增大而增大,在较高含水率(18%和 20%)的情况下,湿陷系数随着压力的增加先增大后减小。同时,湿陷系数的增加并非线性,在压力较小时(<200 kPa),湿陷系数变化较为缓慢,当压力超过 200 kPa 时,湿陷系数增加较为剧烈。在压力达到 300 kPa 时,各土样湿陷系数已经大于 0.015。尤其是含水率为 12% 的土样,湿陷系数 $\delta_s > 0.03$;其他土样的湿陷系数为 0.015~0.026。

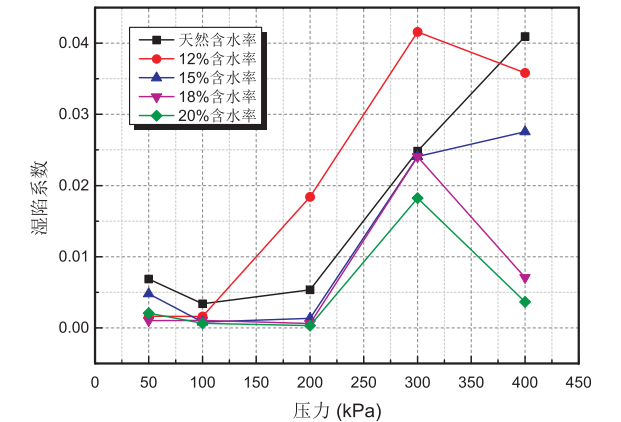


图 1 湿陷系数与压力的关系曲线图
Fig. 1 The relation curve of collapsibility coefficient and pressure

依据规范《湿陷性黄土地区建筑规范》中的计算公式确定黄土的湿陷系数 δ_s ,根据湿陷系数 δ_s 的大小,可对黄土的湿陷等级进行划分(表 2)。

图 2 给出了含水率与湿陷系数的散点图。在诸多影响黄土湿陷性的因素中,含水率的变化是导致黄土湿陷性的必要原因。从图 2 中可以看出,在含水率低于 10% 时,湿陷系数随着含水率的增加迅速

上升,过了最大值后,随着含水率的下降,湿陷系数开始缓慢降低,黄土也中等湿陷性,降为轻微湿陷性或者非湿陷性。根据图 2 中散点分布以及表 2 中湿陷等级划分,当含水率高于 21% 时,黄土呈现非湿陷性,即其为湿陷终止含水率。而当含水率大于 18.8% 时,黄土不再发生中等强度湿陷。

表 2 黄土湿陷等级分类表

Tab. 2 Classification of loess collapsibility

湿陷系数	湿陷等级
$\delta s < 0.015$	非湿陷性
$0.015 < \delta s \leq 0.03$	轻微湿陷性
$0.03 < \delta s \leq 0.07$	中等湿陷性
$\delta s > 0.07$	强烈湿陷性

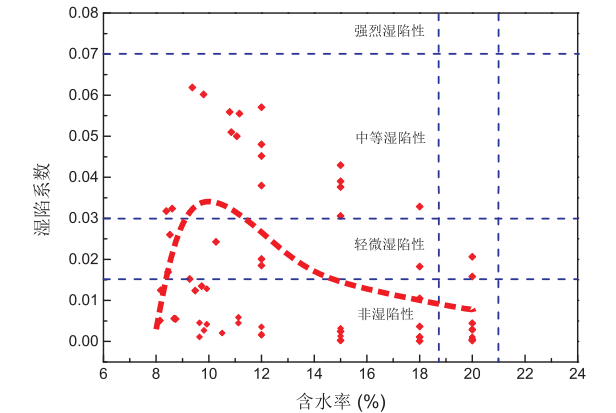


图 2 湿陷系数与含水率的关系曲线图

Fig. 2 The relation curve of wetting coefficient and water content

由孔隙比与含水率和压力的关系曲面可以看出,孔隙比最大的地方为压力为 10 kpa, 含水率 10% 处,孔隙比受压力与含水率 2 个因素的影响。随着压力的增大,孔隙比不断减小;随着含水率的增加,孔隙比也不断减小。但减小幅度不大,由此可以看出压力的大小对孔隙比的影响更明显。在相同含水率条件下,孔隙比随着压力的增大而减小;在含水率小于 10% 的条件下,孔隙比的下降速度随着含水率的增大而增大;而当含水率大于 10% 的时候,孔隙比的下降速度随着含水率的增大而减小。符合上图在含水率到一定范围内,湿陷系数的增长幅度逐渐降低的趋势(图 3)。

2.2 黄土湿陷性与压力及含水率关系建立

对于图 4 中湿陷系数随含水率的变化趋势,各

个压力下湿陷系数-含水率曲线均呈先较快增加然后逐渐衰减的趋势,对于这种变化趋势,可采用反双曲线函数、指数函数以及幂函数等来描述。经过多次尝试及拟合,发现采用公式 1 中所示的反双曲线函数及指数函数相结合的公式形式,拟合所得到的数据同试验数据的吻合程度最好,变化趋势也较为相似。

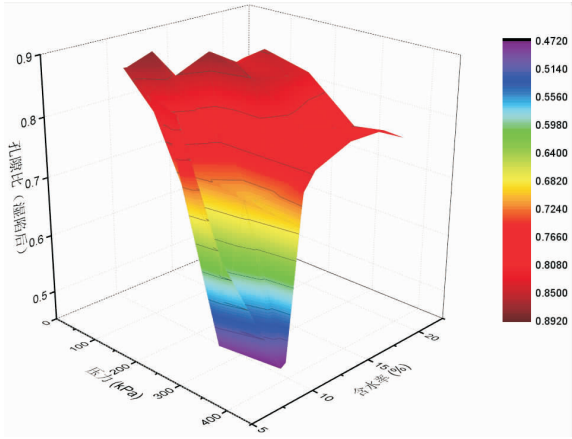


图 3 孔隙比与含水率和压力的关系曲面图

Fig. 3 The relationship between pore ratio and water content and pressure

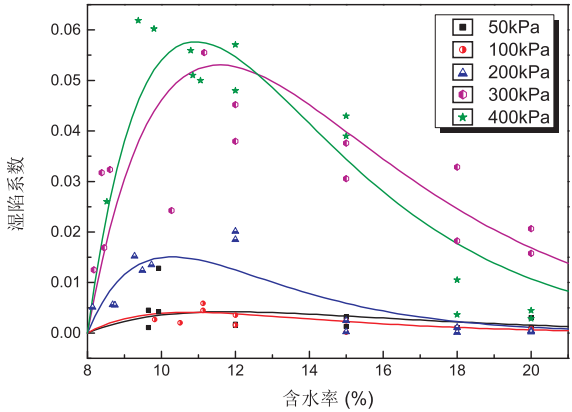


图 4 湿陷系数曲线拟合结果图

Fig. 4 Fitting result of collapsible coefficient curve

拟合得出泾阳地区黄土的湿陷系数-含水率经验关系如下。

$$\delta = ae^{-b(\omega-0.08)} \sinh c(\omega-0.08) \tag{1}$$

式中: ω —— 含水率; a, b, c —— 回归关系式系数; $\sinh$ —— 反双曲函数。

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \tag{2}$$

表 3 给出了不同压力下回归函数中系数 a 、 b 、 c 的拟合值。可见系数 a 与 c 随压力增大而增大,而系数 b 在压力小于 300 kPa 时,随压力逐步增大,但超过 300 kPa 后有所降低。

表 3 参数拟合结果表
Tab. 3 Parameter fitting result

施加压力(kPa)	系数 a	系数 b	系数 c
50	0.428	-26.170	0.700 4
100	0.544	-35.970	0.742 1
200	2.269	-43.650	0.787 9
300	4.120	-28.002	0.980 0
400	4.975	-34.101	1.074 0

图 4 给出了回归曲线拟合的结果。可见采用该回归函数形式的拟合结果是可以较好反映不同压力下的湿陷系数随含水率的变化。

2.3 最小二乘支持向量机预测模型

支持向量算法是在 20 世纪 60 年代开发的,基于由 VAPNIK 和 CHERONENKIS 开发的统计学习理论或 VC 理论。支持向量机被开发并应用于

对象识别任务,在回归和时间序列预测应用中也获得了出色的表现。与其他人工智能方法相比,支持向量回归在解决小样本和高维度问题方面具有许多独特优势。同时,其回归算法可以克服迭代过程中局部最小值、过拟合问题等缺陷。考虑到其在小样本学习中的优点,因此选择支持向量机方法来对本次的试验数据进行建模预测。假设训练样本为 (x_i, y_i) , x 为输入变量,则输出变量 y 可表示如下。

$$y_i = f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i^* - a_i)k(x, x_i) + b \quad (3)$$

式中: y_i ——变量预测值; $k(x, x_i)$ ——核函数,可以为多项式形式、双曲正切形式、径向基函数等; a_i^* , a_i ——拉格朗日乘子;各个系数可以通过最小二乘法得到。

在这项研究中,49 组数据被收集,采用其中 42 组数据为训练模型的样本(表 4)。采用支持向量机模型进行训练,得到粒子群优化最小二乘预测模型。之后采用试验中其他 7 组数据作为测试样本,对所获得模型进行检验,对其准确性进行评估。表 5 给出了测试的结果。

表 4 预测模型中训练数据表
Tab. 4 Training data

序号	密度(g·cm ⁻³)	含水率(%)	压力(kPa)	湿陷系数	序号	密度(g·cm ⁻³)	含水率(%)	压力(kPa)	湿陷系数
1	1.563 3	9.92	50	0.000 9	22	1.632 4	15	300	0.030 6
2	1.550 8	9.92	50	0.012 9	23	1.598 6	15	300	0.017 6
3	1.568 4	11.12	100	0.005 9	24	1.659 6	15	400	0.012 2
4	1.555 1	8.68	200	0.005 6	25	1.722 2	18	50	0.001 0
5	1.573 4	8.14	200	0.005 1	26	1.715 1	18	50	0.001 1
6	1.630 4	8.17	300	0.032 8	27	1.705 0	18	100	0.001 0
7	1.643 6	8.45	300	0.016 9	28	1.703 7	18	100	0.001 1
8	1.610 3	10.79	400	0.055 9	29	1.675 0	18	200	0.000 1
9	1.621 9	8.52	400	0.026 0	30	1.635 8	18	300	0.015 3
10	1.586 8	12	50	0.001 5	31	1.668 6	18	300	0.032 9
11	1.593 2	12	100	0.001 6	32	1.776 7	18	400	0.010 5
12	1.587 3	12	200	0.022 9	33	1.741 2	18	400	0.003 7
13	1.616 1	12	200	0.014 0	34	1.742 4	20	50	0.003 1
14	1.579 3	12	300	0.045 2	35	1.731 5	20	50	0.001 1

续表 4

序号	密度(g·cm ⁻³)	含水率(%)	压力(kPa)	湿陷系数	序号	密度(g·cm ⁻³)	含水率(%)	压力(kPa)	湿陷系数
15	1.574 9	12	300	0.038 0	36	1.702 0	20	100	0.000 5
16	1.588 2	12	400	0.057 1	37	1.689 7	20	100	0.000 9
17	1.686 0	15	50	0.001 3	38	1.684 4	20	200	0.000 4
18	1.664 7	15	50	0.008 3	39	1.718 1	20	200	0.000 2
19	1.628 1	15	100	0.001 5	40	1.690 5	20	300	0.020 7
20	1.622 4	15	100	0.000 2	41	1.717 6	20	400	0.004 5
21	1.619 4	15	200	0.002 5	42	1.726 7	20	400	0.002 9

表 5 湿陷系数预测值与试验值对比表
Tab. 5 Comparison of prediction value of
collapsibility coefficient and test value

序号	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	测量湿陷系数	预测湿陷系数	相对误差(%)
1	1.593 3	11.12	0.007	0.007 9	13.53
2	1.582 3	12	0.001 75	0.001 8	4.42
3	1.586 8	12	0.054 6	0.057 1	4.63
4	1.641 8	15	0.002 5	0.002 7	9.23
5	1.656 1	15	0.042 95	0.041 8	-2.59
6	1.679 5	18	0.001 1	0.001 4	29.70
7	1.703 4	20	0.015 8	0.019 5	23.57

从表 5 不难看出,湿陷系数预测值与试验值吻合较好,误差值在接收范围之内,证明支持向量机模型在构建黄土湿陷性与含水率和压力的关系上是可靠的,具有较高的精度。

在黄土的湿陷性试验中,采用的土样数量较多,土壤的非均质性对试验结果的准确性有着较大的干扰,是试验中误差的来源之一。除此之外,在采样及试样的制备中,无法避免对与原状土样造成一些扰动,使得土样的应力历史不能很好的保存,对试验的精度造成影响。仪器的性能、操作技术等都会影响到试验的精度,造成数据的离散。

3 结论

笔者对湿陷性黄土变含水率情况下进行了法向受力情况下的的单线法浸水湿陷试验,综合试验曲线及模型的建立分析了湿陷性黄土的湿陷特征,总

结了黄土的湿陷变形随含水率以及压力的变化规律,并对试验数据进行了回归处理以及支持向量机预测,得出以下结论。

(1)在较低含水率的情况下,湿陷系数随着压力的增大而增大,在较高含水率的情况下,湿陷系数随着压力的增加先增大后减小。在相同压力下,湿陷系数均在某一含水率下达到峰值。

(2)笔者采用回归函数形式的拟合结果可以较好反映不同压力下的湿陷系数随含水率的变化关系。

(3)湿陷系数预测值与试验值吻合较好,误差值在接收范围之内,证明支持向量机模型在构建黄土湿陷性与含水率和压力的模型关系上是可靠的,具有较高的精度。

参考文献(References):

谢婉丽,王延寿,马中豪,等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. 现代地质,2015,02:397-407.
XIE Wanli, WANG Yanshou, MA Zhonghao, et al. Research Status and Prospect of Loess Collapsibility Mechanism [J]. Geoscience, 2015, 02: 397-407.
李保雄,牛永红,苗天德. 兰州马兰黄土的物理力学特性[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1077-1082.
LI Baoxiong, NIU Yonghong, MIAO Tiande. Physico-mechanical characteristics of Malan loess in Lanzhou region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1077-1082.
罗浩,伍法权,王定伟,等. 赵家岸滑坡地区马兰黄土物理力学特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 44-51.

- LUO Hao, WU Faquan, WANG Dingwei, et al. Physical and Mechanical Properties of Malan Loess in Zhaojia'an Landslide Area[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 44-51.
- 曾国红, 裴以惠. 含水量增加时湿陷性黄土变形特性研究[J]. 西部探矿工程, 1996, 8: 4-5.
- 曾国红, 孟宪寝, 裴以惠. 关于黄土湿陷起始压力、湿陷起始含水量的探讨[J]. 太原工业大学学报, 1997, 28(4): 17-20.
- ZENG Guohong, MENG Xianqin, QIU Yihui. The Inquiry into the Initial Pressure[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1997, 28(4): 17-20.
- 李敏, 马登科. 黄土湿陷性的影响因素及其综合分析[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2005, 17(2): 14-17.
- LI Min, MA Dengke. Comprehensive Analysis of collapsibility of Loess and its Influence Factors[J]. J. Zhejiang Water Conserv. & Hydr. College, 2005, 17(2): 14-17.
- 张洪萍, 包卫星. 增减湿黄土压缩与湿陷变形特性的探讨[J]. 山西建筑, 2005, 31(5): 50-51.
- ZHANG Hongping, BAO Weixing. On compression and collapse deformation behaviors of collapsible loess[J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(5): 50-51.
- 王家鼎. 地理学研究中的模糊信息优化处理方法[J]. 地理与地理信息科学, 1999, 15(1): 75-80.
- 刘悦, 王家鼎. 黄土湿陷性评价中的模糊信息优化处理方法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(1): 78-82.
- LIU Yue, WANG Jiading. The method of fuzzy information processing of optimization in the evaluation of loess collapsibility[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2000, 30(1): 78-82.
- 谢婉丽, 王家鼎, 张新军, 等. 模糊信息优化方法在黄土湿陷性评价中的应用[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 95-99.
- XIE Wanli, WANG Jiading, ZHANG Xinjun, et al. Application in evaluation of loess collapsibility with the method of fuzzy information optimization processing [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(1): 95-99.
- 李瑞娥, 谷天峰, 王娟娟, 等. 基于模糊信息优化技术的黄土湿陷性评价[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 213-218.
- LI Ruie, GU Tianfeng, WANG Juanjuan, et al. Evaluation of loess collapsibility based on the application of fuzzy information optimization technique[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(2): 213-218.
- 井彦林, 仵彦卿, 杨丽娜, 等. 基于数据挖掘技术的黄土湿陷性评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 130-134.
- JING Yanlin, WU Yanqing, YANG Lina, et al. Assessment of loess collapsibility based on data mining[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(4): 130-134.
- 高凌霄, 罗跃纲, 杨向军. 基于 BP 人工神经网络的非饱和黄土湿陷系数计算方法[J]. 大连民族学院学报, 2006, 34(5): 24-26.
- GAO Lingxia, LUO Yuegang, YANG Xiangjun. Study on Artificial Neural Network Method for Calculation the Coefficient of Loess Collapsibility[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2006, 34(5): 24-26.
- 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 120-128.
- MAYan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Relationships Between Physical-mechanical Parameters and Collapsibility of Loess Soil and Its Prediction Model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 120-128.
- 井彦林, 仵彦卿, 林杜军, 等. 基于最小二乘支持向量机的黄土湿陷性预测挖掘[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1865-1870.
- JING Yanlin, WU Yanqing, LIN Dujun, et al. Prediction of loess collapsibility by using data mining based on least squares support vector machines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 36(1): 120-128.
- 张炜, 张苏民. 非饱和黄土室内力学性质试验研究[J]. 工程勘察, 1991, (3): 6-10.