

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1865-06

基于最小二乘支持向量机的黄土湿陷性预测挖掘

井彦林¹, 仵彦卿², 林杜军³, 李晓光¹, 张志权¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 2. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240;
3. 中煤西安设计工程有限责任公司, 西安 710054)

摘 要: 运用数据挖掘技术进行了黄土湿陷性的预测挖掘, 挖掘模型采用最小二乘支持向量机。建模过程中用主成份分析法进行数据的预处理, 以剔除指标间的相关性, 消除多指标信息冗余对挖掘模型的影响, 并引入粒子群优化算法进行模型反演分析, 确定最优参数。针对实际工程数据进行的预测挖掘表明: 黄土的电阻率、剪切波速与土的结构特性、含水率、密度等指标密切相关, 可较为全面地反映影响黄土湿陷性的因素; 以电阻率、剪切波速及土层埋深作为模型的预测变量就可定量预测黄土的湿陷性; 用所建模型和预测变量来预测黄土的湿陷性是可行的。

关 键 词: 黄土; 湿陷性预测; 数据挖掘; 最小二乘支持向量机

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Prediction of loess collapsibility by using data mining based on least squares support vector machines

JING Yan-lin¹, WU Yan-qing², LIN Du-jun³, LI Xiao-guang¹, ZHANG Zhi-quan¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. China Coal Xi'an Design & Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The data mining techniques are used to predict loess collapsibility in geotechnical engineering; and the mining model is constructed by using the least squares support vector machines. Using principal component analysis method, data of model is preprocessed to remove the correlation among the indicators and to eliminate the impact of multi-index redundant information on the mining model, and the model inverse analysis is administered by introducing particle swarm optimization algorithm to determine the optimal parameters. The forecast mining for the actual project data shows that loess resistivity and shear wave velocity is closely related to the soil indicators such as the soil structural properties, water content, density etc, they can be more comprehensively reflect the factors of impact of loess collapsibility. Using loess resistivity, shear wave velocity and soil depth as predicting variables of the model can quantitative predict the loess collapsibility; the proposed model is effective.

Key words: loess; collapsibility prediction; data mining; least squares support vector machines

1 引 言

湿陷性是黄土的重要工程特性。用原位测试技术预测和评价黄土湿陷性的方法简捷而经济, 很多学者在此方面进行了积极探索, 并取得了一定成果。20 世纪 70 年代初前苏联就用静力触探及旁压试验研究黄土的湿陷性, 我国于 20 世纪 80 年代及 90 年代初也进行了此项研究。相比之下, 研究较多、较深入的是静力触探。研究结果表明, 用静力触探测定黄土的湿陷性应分土类和地区进行, 在较适宜

的条件下可测定黄土的湿陷性, 但这种评价是定性的、辅助性的, 即便是在同类场地对比试验基础上也应慎重采用。1995 年, 法国克莱蒙大学和中国科学院地质研究所第四纪研究室合作研究中国黄土的岩土特性及其环境意义。该研究运用一种轻便动力触探仪现场测试黄土的力学强度, 继而在分析所获触探曲线基础上研究黄土的湿陷性。研究结果显示, 探头阻力在自然与饱和条件下的比值同黄土的湿陷系数具有很好的相关性。据探头阻力, 可将黄土分为具湿陷性或不具湿陷性两类^[1]。从已发表的文献

收稿日期: 2008-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10572090); 中央高校基本科研业务费专项资金长安大学基础研究支持计划专项基金(No. CHD2009JC084)。
第一作者简介: 井彦林, 男, 1963 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事黄土力学与工程、环境岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: jingyanlin@sina.com

来看,在测试法研究黄土湿陷性方面已取得了很大进展,但主要是进行定性或半定量评价,因此,研究成果目前还未完全走向实际应用。

电阻率及波速能够很好地反映土的物理力学性质。近年来,电阻率及波速在岩土工程领域已得到广泛应用。为了从不同角度、用不同的测试方法研究黄土的湿陷性,本文采用数据挖掘技术、运用电阻率及剪切波速等指标进行黄土湿陷性的预测挖掘研究,以探索更为简便和经济的湿陷性评价方法。

2 数据的选取及预处理

研究中进行了黄土的湿陷性试验及电阻率、波速等测试。在试验数据分析的基础上进行预测挖掘。数据挖掘步骤见图 1。

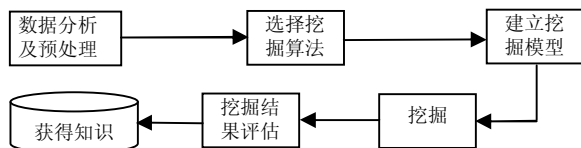


图 1 黄土湿陷性预测数据挖掘步骤

Fig.1 Flow sketch of loess collapsibility prediction by using data mining

试验场地位于陕西省彬县,地貌为黄土塬。试验中布置探井与钻孔对比勘探点 4 个,深度均为 15 m。剪切波速测试采用单孔法,在钻孔中进行;电阻率及黄土的密度、湿陷系数等指标采用室内试验方法。室内试验土样取自探井,考虑到野外测定电阻率较为困难,故本次研究采用了视电阻率,其测试方法见文献[2],测试与试验结果见表 1。图 2、3 分别为视电阻率、波速与湿陷系数的关系图。

视电阻率、剪切波速与土的工程性质关系较为密切,但图 2、3 显示,用视电阻率或剪切波速中的某一项指标还不能很好地进行黄土湿陷性的定量评价,所以本文采用多指标组合预测的方法。由于土的埋深反映土的应力状态及地质环境,所以在进行湿陷性预测时,将土的埋深也作为预测变量,即预测变量为视电阻率、剪切波速及土层埋深。多指标可较为全面地反映土的工程性质,但会带来信息冗余,为此本文采用数据压缩技术剔除指标间的相关性和冗余信息。压缩方法选用主成份分析法。

主成份分析 (principal component analysis, PCA) 是一种基于多元统计技术的数据压缩方法。它的作用一是降维,二是剔除相关性,将相关集转化为正交集,便于独立分析输入量和目标变量之间的关系。由于它剔掉了冗余信息,可简化模型,提

高精度。本文在此仅使用它消除指标间的相关性(其算法见文献[2]),采用预处理后的数据进行预测模型的建立。

表 1 黄土湿陷性试验参数表

Table 1 Test parameters table of loess collapsibility

序号	测点编号	土层埋深 /m	视电阻率 /($\Omega \cdot m$)	剪切波速 /(m/s)	湿陷系数 试验值
1	9-1	3	66.13	216	0.052
2	9-2	5	45.42	229	0.042
3	9-3	9	31.19	264	0.019
4	9-4	11	68.11	305	0.022
5	9-5	13	80.53	306	0.018
6	9-6	15	66.41	367	0.031
7	29-1	2	54.32	161	0.025
8	29-2	3	36.45	166	0.026
9	29-3	4	51.13	234	0.029
10	29-4	5	49.53	242	0.061
11	29-5	7	55.84	242	0.035
12	29-6	8	30.65	251	0.012
13	29-7	11	31.25	332	0.002
14	29-8	12	54.16	322	0.024
15	29-9	14	75.21	320	0.012
16	35-1	1	28.25	135	0.101
17	35-2	2	55.48	191	0.050
18	35-3	3	51.46	251	0.086
19	35-4	4	81.35	257	0.039
20	35-5	5	49.21	253	0.036
21	35-6	6	63.36	249	0.057
22	35-7	8	38.90	261	0.011
23	35-8	9	32.84	264	0.01
24	35-9	11	46.51	359	0.012
25	35-10	12	43.23	462	0.016
26	35-11	13	73.3	309	0.022
27	35-12	14	108.26	335	0.017
28	35-13	15	71.88	303	0.007
29	39-1	3	43.99	215	0.049
30	39-2	4	59.86	228	0.072
31	39-3	5	61.61	233	0.066
32	39-4	6	65.06	245	0.077
33	39-5	7	54.09	247	0.012
34	39-6	8	53.09	248	0.034
35	39-7	9	40.46	263	0.015
36	39-8	10	32.95	284	0.003
37	39-9	11	31.99	331	0.010
38	39-10	12	27.64	421	0.018
39	39-11	14	97.92	330	0.026
40	39-12	15	85.22	319	0.025

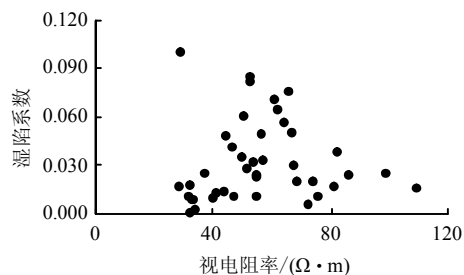


图 2 视电阻率-湿陷系数关系图

Fig.2 Relationship between apparent resistivity and loess collapsibility coefficient

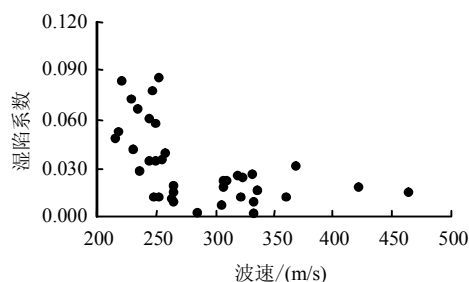


图3 波速-湿陷系数关系图
Fig.3 Relationship between shear wave velocity and loess collapsibility coefficient

3 黄土湿陷性的预测挖掘模型

3.1 最小二乘支持向量机

本文的试验数据量较小, 故选择适应于小样本的数据挖掘算法——最小二乘支持向量机 (LS-SVM)。支持向量机 (SVM) 是一种通用的机器学习方法, 在模式识别和非线性函数的估计应用方面取得了较好的效果。它的理论基础是 Vapnik 等提出的统计学习理论, 其核心思想是用结构风险最小化原则代替经验风险最小化原则。它是一种小样本学习理论, 主要研究在小样本情况下的统计学习问题。它运算简单, 收敛速度快, 精度高。LS-SVM 的主要算法如下 (详细的推导过程见文献[3])。

设有 n 个训练样本 $(X_1, y_1), (X_2, y_2), \dots, (X_n, y_n) \in R^{m-1}R$, X 是输入变量 (在本文中代表视电阻率、波速及土层埋深), y 是输出变量 (本文中为湿陷系数), 则有:

$$\hat{y}_i = f(X_j) = \sum_{i=1}^n a_i K(X_i, X_j) + b \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_i$ 为湿陷系数的预测值; $K(X_i, X_j)$ 为核函数。LS-SVM 的核函数有多项式函数、径向基函数、Sigmoid 函数、B 样条函数等。大量的研究成果表明, 径向基核函数的泛化能力较强, 因此, 本文采用径向基核函数, 其形式如下:

$$K(X_i, X_j) = \exp(-\|X_i - X_j\|^2 / 2\sigma^2) = \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=1}^m (x(i, l) - x(j, l))^2\right] \quad (2)$$

式 (1) 中参数 a 、 b 可通过下式用最小二乘法解出:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & K(X_1, X_1) + \frac{1}{\gamma} & K(X_1, X_2) & \dots & K(X_1, X_n) \\ & K(X_2, X_1) & K(X_2, X_2) + \frac{1}{\gamma} & \dots & K(X_2, X_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K(X_n, X_1) & K(X_n, X_2) & \dots & K(X_n, X_n) + \frac{1}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于 LS-SVM 算法, 式 (2)、(3) 中的参数 γ 及 σ 取值是一个非常关键的问题。 γ 控制对超出误差的样本的惩罚程度 ($\gamma > 0$), σ 为径向基函数的宽度。 γ 及 σ 对模型的推广预测能力有很大的影响, 若取值不当, 均会增大模型误差, 其取值通常是采用试算法或经验法。本文采用粒子群优化算法对 LS-SVM 的参数 γ 及 σ 进行优化。

3.2 基于 PSO 的 LS-SVM 模型参数优化

粒子群优化算法 (PSO) 是美国社会心理学家 James Kenned 和电气工程师 Russell Eberhart 在 1995 年的 IEEE 国际神经网络学术会议上提出的。PSO 源于对鸟类捕食行为的模拟。PSO 的早期研究者通过观察发现, 一群鸟在搜寻食物时, 如果某区域只有一块食物, 那么找到食物最简单而有效的方法就是搜索离食物最近的区域, PSO 就是通过这种启示而产生的。经改进的微粒群算法的进化方程为^[4]

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1r_1(P_i - X_i(t)) + c_2r_2(P_g - X_i(t)) \quad (4)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (5)$$

式中: $V_i(t+1)$ 、 $V_i(t)$ 分别为 $t+1$ 及 t 时刻第 i 个粒子的速度; w 为惯性权重; c_1 及 c_2 为两个常数; r_1 、 r_2 分别为 $[0, 1]$ 之间的随机数; P_i 及 P_g 为第 i 个粒子当前的最好位置及全部粒子当前的最好位置; $X_i(t+1)$ 及 $X_i(t)$ 分别为第 i 个粒子在 $t+1$ 及 t 时刻的位置。

运用 PSO 算法对式 (2)、(3) 中的参数 γ 及 σ 进行优化, 从而构成了粒子群优化最小二乘支持向量机算法, 即为本文所采用的预测挖掘算法。

运用 PSO 进行参数优化的计算步骤已有很多文献 (如文献[4]) 报道, 这里不再赘述。

4 预测结果及模型检验

本研究采集 40 组数据, 其中 34 组数据作为训练样本, 运用式 (1) ~ (5) 进行模型训练, 以建立粒子群优化最小二乘支持向量机预测挖掘模型, 其他 6 组 (表 1 中序号 1~6) 试验数据作为测试样本进行模型检验, 以对模型精度进行评价。检验结果见表 2。

表 2 湿陷系数的预测值与试验值对比结果

Table 2 Comparison of predicted and measured values of loess collapsibility coefficients

取土深度 /m	土性名称	湿陷系数 的试验值	湿陷系数 的预测值	绝对 误差	相对误差 /%
3	黄土	0.052	0.056	0.004	7.7
5	黄土	0.042	0.041	-0.001	-2.4
9	古土壤	0.019	0.015	-0.004	21.1
11	黄土	0.022	0.030	0.008	-36.4
13	黄土	0.018	0.023	0.005	27.8
15	黄土	0.031	0.026	-0.005	16.1

图 4 为湿陷系数试验值与预测值在深度方向上的变化规律。由图可见, 湿陷系数预测值与试验值在纵向上的变化规律一致, 即上部的黄土湿陷性最强, 下部 (老黄土) 的湿陷性较弱, 中部 (古土壤) 湿陷性弱或不具湿陷性。预测相对误差一般为 -2.4%~21.1%, 而个别值误差较大。11 m 处的试验值为 0.022, 而预测值为 0.030, 其相对误差为 -36.4%, 这样的预测误差在理论上是比较大的。造成这种个别值误差大的原因是多方面的。除了预测本身有误差外, 试验条件、土样的运输条件和试验过程等因素都会影响湿陷系数的准确性。又由于土体为非均质体, 且黄土体均匀性更差, 常含有钙核,

这些都会影响湿陷系数的可靠性, 相对于含水率等指标, 湿陷系数的稳定性较差, 因此, 过去称湿陷系数为相对湿陷系数。为了观察由于黄土不均匀性所造成湿陷系数的试验误差, 研究中进行了对比试验, 即从同一土样中采取两个环刀试样, 用相同的试验人员和相同的试验设备进行黄土固结试验、测定湿陷系数, 其结果列于表 3。由表可以看出, 两组土样的含水率、密度较为接近, 但湿陷系数的相对误差最大可达 -27.3% (范围值为 -27.3%~2.4%), 可见平行试验也存在大的误差。这一结果说明土的不均匀性对湿陷系数的影响极为明显。由于湿陷系数的湿定与视电阻率、剪切波速测试三者的空间位置非常接近, 但不会完全重合在一个几何点上, 总会存在一定间距, 所以个别试验点预测误差偏大不完全是预测模型造成的, 而与土的不均匀性有很大关系。

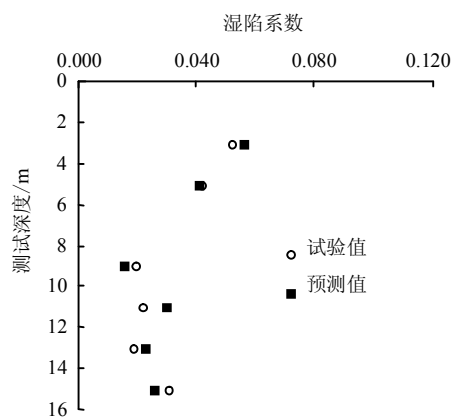


图 4 湿陷系数与深度关系图

Fig.4 Relationship between loess collapsibility coefficient and depth

表 3 湿陷系数对比试验结果

Table 3 Comparison of testing results for loess collapsibility coefficient

土样 序号	含水率/%		密度/(g/cm ³)		湿陷系数试验值		湿陷系 数误差	湿陷系数相对误差 /%
	环刀 1	环刀 2	环刀 1	环刀 2	环刀 1	环刀 2		
1	16.5	16.8	1.73	1.70	0.041	0.042	0.001	2.4
2	24.3	24.5	1.70	1.72	0.026	0.023	-0.003	-11.5
3	23.0	22.7	1.73	1.75	0.049	0.042	-0.007	-14.3
4	22.5	22.7	1.63	1.66	0.066	0.048	-0.018	-27.3

用湿陷系数的预测值及试验值对陕西彬县蒋家河煤矿主井绞车房进行湿陷性评价, 计算其湿陷量并评价湿陷等级, 结果列于表 4。由表可以看出, 预测精度较高, 相对误差为 0.35%, 预测的湿陷等级与试验值的计算结果一致, 均为 II 级。这一结果说明, 虽然对湿陷系数的预测存在 -27.3%~2.4% 的相对误差, 而由湿陷系数的预测值与试验值计算所算得的湿陷量误差很小, 达到了理想的精度, 但预

测误差毕竟存在, 所以进行剪切波速与视电阻率测试的位置应尽量接近, 以减少由于土的不均匀性带来的预测误差。

以上分析表明, 本文所建立的粒子群优化最小二乘支持向量机挖掘模型对湿陷系数的预测精度较高, 湿陷系数的预测值与试验值所得总湿陷量的误差较小, 因此, 采用视电阻率、波速及土层埋深作为预测变量进行湿陷系数的预测是合适的, 所建模

型用于预测黄土的湿陷性是定量的、可行的。

表4 预测值与试验值结果比较
Table 4 Comparison of measured and predicted values of loess collapsible volume

设计	基础	湿陷土层	试验值		预测值		
标高	埋深	起止深度	湿陷量	湿陷等级	湿陷量	相对误差	湿陷等级
/m	/m	/m	/mm		/mm	/%	
1 226.00	3.00	2.81~16.50	565	II	567	0.35	II

5 结果分析与讨论

预测分析结果表明, 可采用视电阻率、波速及土层埋深对湿陷性进行定量预测, 下面对湿陷性可预测的原因进行讨论。

关于电阻率及波速在土力学应用方面的文献较多, 其成果主要表现为两方面: 一是用电阻率描述土的结构性^[5-8], 二是电阻率及波速与土性指标的关系研究。研究成果表明, 电阻率与土的含水率、液限、饱和度、孔隙比、压缩系数等具有显著的相关性^[9-12], 剪切波速与密度、饱和自重压力、强度等具显著的相关性^[10, 13-15]。文献[6]认为, 对于非饱和土含水率是电阻率的主要影响因素, 可用电阻率描述土的结构性, 同时建立了非饱和土的电阻率结构模型, 即

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\text{sat}}} = \frac{1 - F_{\text{sat}}}{1 - F} \frac{n/100}{(w/100)G_s(1 - n/100)} \quad (6)$$

式中: σ 为电阻率; σ_{sat} 为饱和状态下的电阻率; F 为结构因子; F_{sat} 为饱和状态下的结构因子; w 为含水率; G_s 为土体相对密度; n 为孔隙率。

文献[7]在总结国内外相关研究成果的基础上, 提出以下电阻率结构模型:

$$p = \left[\frac{nS_r - F' \left(\frac{\theta'}{1 + \theta'} \right)}{\theta} BQ + \frac{nS_r - F' \left(\frac{\theta'}{1 + \theta'} \right)}{p_w} + \frac{F'(1 + \theta') BQ}{1 + BQp_w \theta'} \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: p 为土的电导率; S_r 为饱和度; F' 为土的导电结构系数; θ 、 θ' 分别为土中土-水并、串联部分的水、土体积比; B 为双电层中与土颗粒表面电性相反电荷的电导率; Q 为单位土体孔隙中阳离子交换容量; BQ 为土颗粒表面双电层的电导率; p_w 为孔隙水电阻率。

式(6)、(7)表明, 电阻率与土的结构、孔隙率、饱和度、土颗粒组成、孔隙水电阻率及土颗粒

自身的导电性等因素密切相关。

波速也可较好地反映土的密度等性质, 根据物理学中机械振动理论, 有:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

式中: V_s 为横波波速; G 为介质弹性模量; ρ 为介质密度。

对于多相土石介质, 赵明阶^[13]经证明提出:

$$G = \frac{5 - 4\nu}{5(2 - \nu)} \sqrt[3]{\frac{3c^2(1 - \phi)^2 E_s^2}{2\pi^2(1 - \nu)^2} \rho gh} \quad (9)$$

则有:

$$V_s^6 = \left[\frac{5 - 4\nu}{5(2 - \nu)} \right]^3 \frac{3c^2(1 - \phi)^2 g}{2\pi^2(1 - \nu)^2} \frac{G_s^2 / \rho_d^2}{(1 + \omega)^2} h \quad (10)$$

式中: ν 为土石多相复合介质泊松比; c 为土石多相复合介质颗粒平均接触点数; ϕ 为孔隙度; E_s 为固体颗粒剪切模量; ρ_d 为干密度; g 为重力加速度; h 为土层厚度。

显然, 波速在介质中的传播特性受干密度、孔隙度、饱和度、颗粒性质、土层厚度等影响较大, 泊松比等对之也有影响。式(10)是针对土石介质提出的, 而湿陷性黄土非土石介质, 但可将湿陷性黄土视为土石介质的一个特例, 即不含粗颗粒(石)的土石介质。

土层埋深也是本文采用的预测变量。湿陷系数是随压力变化的, 而测定湿陷系数的压力是随深度变化。按我国现行规范^[16]规定, 测定湿陷系数的压力在基底 10 m 以内采用 200 kPa, 10 m 以下至非湿陷性土层顶面采用饱和自重压力(当饱和自重压力大于 300 kPa 采用 300 kPa), 基底压力大于 300 kPa 时采用实际压力。因此, 土层埋深反映了应力状态。

综上所述, 电阻率可描述土的结构性, 电阻率及波速与土的颗粒性质(定向性、胶结状态等)、孔隙形状、孔隙结构、孔隙液特性以及含水率、孔隙率、饱和度、饱和自重压力等密切相关, 而结构性、含水率及密度等均是影响湿陷性的重要因素, 土层埋深反映了其应力状态及地质环境。黄土湿陷机制的研究表明, 导致影响黄土湿陷的主要因素可归纳为内因和外因两个方面: 黄土特殊的微结构形态是湿陷产生的内因, 水和力的作用(包括自重和外荷载)是湿陷产生的外因。显然, 电阻率、波速与土层埋深可反映湿陷产生的内因及外因。本研究中虽采用视电阻率而非电阻率, 但土的含水率、密度及微结构等对视电阻率与电阻率的影响机制基本相同(视电阻率与电阻率的区别见其他相关文献)。因

此,视电阻率、波速及土层埋深可较为准确地进行黄土湿陷性的定量预测。

6 结 论

(1) 采用粒子群优化最小二乘支持向量机方法进行了黄土湿陷性的预测挖掘,结果显示,用视电阻率、波速及土层埋深预测黄土湿陷性的方法可行。

(2) 视电阻率、波速、土层埋深与土的结构特性、含水率、密度、孔隙水特征、矿物成份、应力状态等密切相关,可较为全面地反映影响黄土湿陷性的因素,因而可作为预测变量定量预测黄土的湿陷系数。

(3) 多指标能较为全面地反映土的工程性质,但多指标会产生信息冗余。本文采用了主成份分析法进行数据预处理,剔除了指标间的相关性,消除了信息冗余对挖掘模型的影响。

(4) 视电阻率的室内试验与野外原位测试结果有一定的差异。本文的视电阻率采用室内试验数据,下一步应对视电阻率进行原位测试,以比较预测效果。

本文所采用的数据来自陕西关中盆地,下一步有必要增加样本数量,并针对不同的地区及地貌单元进行此项研究。

参 考 文 献

- [1] 周树华, 魏兰英, 伍法权, 等. 运用轻便动力触探仪研究黄土的岩土工程特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 719—722.
ZHOU Shu-hua, WEI Lan-ying, WU Fa-quan, et al. Study on geotechnical properties of loess with the help of a portable dynamic penetrometer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 719—722.
- [2] 井彦林, 仵彦卿, 孟永会, 等. 黄土的视电阻率与工程性质关系研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 98—101.
JING Yan-lin, WU Yan-qing, MENG Yong-hui, et al. The study on the relation between the apparent resistivity and engineering properties of loess[J]. **Bulletin of Soil and Water Conservation**, 2008, 28(6): 98—101.
- [3] 朱家元, 杨云, 张恒喜, 等. 基于优化最小二乘支持向量机的小样本预测研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6): 565—568.
ZHU Jia-yuan, YANG Yun, ZHANG Heng-xi, et al. Data prediction with few observations based on optimized least squares support vector machines[J]. **Acta Aeronautica et Astronautica Sinica**, 2004, 25(6): 565—568.
- [4] 柯晶, 钱积新. 应用粒子群优化的非线性系统辨识[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(4): 12—15.
KE Jing, QIAN Ji-xin. Nonlinear system identification using particle swarm optimization[J]. **Journal of Circuits and Systems**, 2003, 8(4): 12—15.
- [5] MITCHELL J K, ARULANANDAN K. Electrical dispersion in relation to soil structure[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1968, 94(2): 447—471.
- [6] FUKUE M, MINATO T. The micro-structures of clay given by resistivity measurements[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54: 43—53.
- [7] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1671—1676.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1671—1676.
- [8] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 393—396.
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 393—396.
- [9] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. **Engineering Geology**, 2001, 60: 361—369.
- [10] ZOURMPAKIS A, BOARDMAN D I, ROGERS C D F. Case study of a loess collapse field trial in Kent[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2006, 39(2): 131—150.
- [11] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83—87.
LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 83—87.
- [12] 蒋建平, 阎长虹, 徐鸣洁, 等. 苏通大桥地基中深厚软土电阻率试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2077—2082.
JIANG Jian-ping, YAN Chang-hong, XU Ming-jie, et al. Experimental study on electrical resistivity of thick soft soil in foundation of Su-Tong Yangtze River Bridge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2077—2082.
- [13] 赵明阶. 根据波速计算多相土土地基压实度的理论模型[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 618—623.
ZHAO Ming-jie. Theoretical model for calculating compactness of soil-stone mixture foundation according to wave propagation velocity[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(5): 618—623.
- [14] GUNN D A, NELDER L M, JACKSON P D, et al. Shear wave velocity monitoring of collapsible loessic brickearth soil[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2006, 39(2): 173—188.
- [15] 王建华, 程国勇. 饱和砂土的剪切波速与抗液化强度相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 369—373.
WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong. Study of correlation between the shear wave velocity and the liquefaction resistance of saturated sands[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(4): 369—373.
- [16] 陕西省计划委员会. GB50025—2004 陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.