

# 基于特征选择的黄土湿陷性预测研究

井彦林<sup>1</sup>, 仵彦卿<sup>2</sup>, 林杜军<sup>3</sup>, 孟永会<sup>3</sup>

(1 长安大学 建筑工程学院, 陕西 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, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 【目的】探讨视电阻率、剪切波速、导热系数及比热容等指标与黄土湿陷性的关系, 从中选择可用于进行黄土湿陷性预测的指标, 以简化黄土湿陷性的评价方法。【方法】在湿陷性黄土场地采取试样进行视电阻率、导热系数及比热容等试验, 同时在相应取土层位进行野外剪切波速测试, 运用特征选择技术, 通过主成分分析、CART 决策树及粒子群优化等算法对测试与试验指标进行分析。【结果】视电阻率、剪切波速在众多的测试试验指标中信息量大、重要性强, 与土层埋深结合可作为黄土湿陷性的预测变量。实际工程湿陷量的预测结果表明, 预测值的相对误差为 -9.7%。【结论】采用视电阻率、剪切波速及土层埋深预测黄土湿陷性是可行的。

**[关键词]** 黄土湿陷性; 特征选择; 视电阻率; 剪切波速; 土层埋深

**[中图分类号]** TU444; TU470+.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2009)07-0223-06

## Study on the prediction of loess collapsibility based on feature selection

JING Yan-lin<sup>1</sup>, WU Yan-qing<sup>2</sup>, LIN Du-jun<sup>3</sup>, MENG Yong-hui<sup>3</sup>

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

**Abstract:** 【Objective】 For selecting the prediction variables of loess collapsibility from the apparent resistivity, shear wave velocity, coefficient of thermal conductivity, and specific heat capacity of loess, the relationship between loess collapsibility and the indices such as apparent resistivity, wave velocity, coefficient of thermal conductivity, heat capacity were discussed. 【Method】 The apparent resistivity, thermal conductivity, and heat capacity of loess samples from a collapsible site were performed. Shear wave velocity test was performed in-situ with the same depth of the loess samples. With feature selection technology, the feature (prediction variables of loess collapsibility) was selected by methods of principal component analysis, CART decision tree and so on. 【Result】 The results of feature selection indicated that apparent resistivity, shear wave velocity combined with buried depth could be used as prediction variables. Through prediction of loess collapsibility with prediction variables selected in practical engineering, the result showed relative error of loess collapse settlement was -9.7%. 【Conclusion】 The method of predicting loess collapsibility with apparent resistivity, shear wave velocity, and depth of collapsible soil layers is feasible.

**Key words:** loess collapsibility; character selection; apparent resistivity; shear wave velocity; depth of soil layers

自 20 世纪 70 年代起, 国内外在采用原位测试 技术评价黄土湿陷性方面进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>。关

\* [收稿日期] 2008-11-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10572090); 中煤能源集团公司重点科技项目(08-26)

[作者简介] 井彦林(1963—), 男, 陕西蒲城人, 教授级高工, 博士, 主要从事黄土力学与工程、环境岩土工程及岩土工程信息化研究。  
E-mail: jingyanlin@sina.com

文章<sup>[1]</sup>将静力触探用于黄土湿陷性预测,建立了湿陷系数与端阻力的回归模型;楚华栋<sup>[2]</sup>提出用旁压试验现场测定黄土湿陷性的方法,根据不同压力、天然状态及浸水状态下测管水位计算黄土的湿陷性;周树华等<sup>[3]</sup>运用轻便动力触探试验方法测定黄土的湿陷性,提出探头阻力在自然条件和饱和条件下的比值与黄土的湿陷系数具有很好的相关性,根据探头阻力可区分黄土是否具有湿陷性。这些成果虽未完全达到湿陷性评价的定量化并得到实际应用,但为黄土湿陷性的研究提出了新的方向<sup>[3]</sup>。

电阻率、剪切波速、导热系数及比热容与土的结构及物理力学特性有着密切的关系,与土的含水率、饱和度、密度、孔隙特征、孔隙中液体性质等有较显著的相关性<sup>[4-12]</sup>,电阻率还可用于描述土的结构性,有学者以此建立了土的电阻率模型<sup>[13-14]</sup>,而土的结构、含水率、密度、孔隙特征等是影响黄土湿陷性的重要因素。因此,可考虑采用电阻率、剪切波速、导热系数及比热容等预测黄土的湿陷性。

在以往的研究中,多采用一种测试方法预测黄土的湿陷性,但影响湿陷性的因素是多方面的,单项测试指标往往不能全面地反映黄土的湿陷特性,而预测时采用的测试指标过多则会增加测试成本,且使预测模型较为复杂。为此,本研究运用人工智能技术,从多项测试指标中选择尽量少、且能较为全面地反映黄土湿陷特性的指标进行湿陷性预测,以简化黄土湿陷性的评价方法、降低工程成本、提高工效。

## 1 数据采集

本研究首先进行数据采集,以取得相关测试数据。测试与试验工作在陕西彬县蒋家河煤矿工业场地进行。该场地为黄土塬地貌,地层为  $Q_3^{eol}$  黄土,具 II ~ III 级自重湿陷。测试与试验内容包括黄土固结试验、热力学试验及剪切波速测试等。剪切波速测试采用野外单孔法,视电阻率(考虑到目前野外测试直接取得真电阻率还有一定困难,试验中采用视电阻率)、导热系数及比热容测试采用室内试验,共取得测试指标 43 组。

## 2 特征选择

特征选择的任务是从  $N$  个特征中,按一定的标准选择出 1 组由  $m$  ( $m < N$ ) 个特征组成的特征子集,这个子集具有比特征全集更好,或与特征全集相同的分类或预测功能。特征选择方法有定性分析法

及智能算法。定性分析时人的主观影响较大,且容易漏掉重要因素;智能算法,如次优搜索顺序法、Tabu 搜索法及 CART 算法等,可实现定量分析,且更加科学化,但不同的算法可能会得出不同的结果。鉴于此,本文将采用智能计算与定性分析相结合的方法,从视电阻率、剪切波速、导热系数、比热容、含水率、密度和压缩性等指标中选择用于湿陷性预测的变量。

### 2.1 测试指标的主成分分析

含水率、密度和压缩性等是土的基本指标,为了定量评价视电阻率、剪切波速、导热系数和比热容相对于含水率、密度和压缩性等指标的信息量大小及重要性,对各测试指标进行主成分分析(PCA)。主成分分析可进行数据压缩、降维、剔除相关性等<sup>[15]</sup>。本文用 PCA 进行测试数据的重要性分析,重要性用各变量在数据总体中的信息量或称贡献率大小表示。

根据 PCA 的原理<sup>[15]</sup>,对测试指标中的视电阻率、剪切波速、导热系数、比热容以及含水率、密度、液限、压缩系数及湿陷系数等进行分析。分析计算中,首先计算测试指标相关系数矩阵的特征值及特征向量,然后计算各特征值在总特征值中所占百分比,即各主成分的贡献率,其分析结果分别列于表 1 和表 2。

表 1 各主成分贡献率计算结果

Table 1 Calculation results of contribution rate

主成分编号 Components' number	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Variance	累计贡献率/% Cumulative
1	2.677	29.75	29.75
2	2.028	22.53	52.28
3	1.297	14.41	66.69
4	0.856	9.51	76.20
5	0.754	8.38	84.58
6	0.590	6.56	91.14
7	0.365	4.06	95.20
8	0.222	2.46	97.67
9	0.210	2.33	100.00

由表 1 可以看出,由第 1 至第 9 主成分,各主成分所占信息量逐渐减小,前 4 个主成分的信息量即累计贡献率较大,达到了 76.20%,占总信息量的绝大部分,因此第 1~4 主成分可近似地代替原来的 9 个变量。根据 PCA 原理,特征向量绝对值越大,对应的变量在该主成分中所占信息量越大,即越重要,若同时出现 2 个或 2 个以上的值均较大且接近时,说明变量间具有相关性<sup>[15]</sup>。由表 2 可以看出,在第 1 主成分中,剪切波速、液限和湿陷系数 3 个变量对应的特征向量的绝对值较大,分别为 0.457, 0.436,

0.429,说明剪切波速与液限、湿陷系数在第 1 主成分中信息量大,为第 1 主成分的代表变量,且剪切波速与液限、湿陷系数具有相关性,由于这种相关性的存在,也可认为第 1 主成分所代表的变量为剪切波速;同理,第 2~4 主成分代表的变量分别为视电阻率、导热系数和比热容。可见剪切波速、视电阻率、导热系数、比热容分别是第 1~4 主成分的代表变

量,为前 4 个主成分的主要信息组成,而前 4 个主成分可近似地代替原变量。

PCA 分析结果表明,剪切波速、视电阻率、导热系数、比热容在所有被分析数据中为前 4 个主成分的代表变量,具有重要的地位,所占信息量大,可反映黄土的主要工程性质。

表 2 各测试指标的特征向量

Table 2 Elements of eigenvectors of testing indices

测试指标 Testing index	主成分 Component								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
含水率 Moisture content	0.358	0.378	0.224	-0.121	0.496	0.011	0.297	0.473	-0.325
密度 Density	-0.248	0.567	-0.101	-0.001	0.084	-0.143	-0.441	0.334	0.523
液限 Limit of liquidity	0.436	0.236	-0.340	0.152	0.305	0.210	0.231	-0.505	0.412
压缩系数 Compacting factor	0.320	-0.203	0.359	-0.602	0.113	-0.445	-0.175	-0.206	0.284
湿陷系数 Coefficient of collapsibility	0.429	-0.228	-0.301	0.114	-0.422	-0.244	0.272	0.510	0.297
视电阻率 Apparent resistivity	-0.057	-0.556	-0.055	-0.107	0.431	0.521	-0.173	0.325	0.284
剪切波速 Shear wave velocity	-0.457	-0.088	0.362	0.195	0.171	-0.211	0.622	-0.003	0.391
导热系数 Coefficient of thermal conductivity	0.207	0.202	0.590	-0.007	-0.460	0.554	0.014	0.014	0.222
比热容 Specific heat capacity	0.280	-0.173	0.350	0.733	0.190	-0.233	-0.376	-0.017	-0.011

2.2 基于 CART 算法的特征选择

2.2.1 CART 决策树根节点的生成 CART (Classification and Regression Trees) 决策树算法是一种非参数、非线性的预测与分类分析方法,其特点是在计算过程中使用二叉树结构<sup>[16]</sup>。CART 决策树生长过程中,首先计算基尼系数、选择最佳分割变量与最佳分割阈值,以确定根节点(最上一层节点);根节点确定后,将数据集分为两部分,即决策树的左、右两枝。现以其根节点的选择过程为例说明根节点分割阈值及分割变量的选择过程。

设数据集中有  $N$  类样本,其容量为  $n$ ,预测变量  $X$  取值为  $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nk}$ ,目标变量  $Y$  取值为  $y_1, y_2, \dots, y_n$ 。计算步骤如下:

- 1) 计算数据全集中的基尼系数  $G$ ;
- 2) 以变量  $X(1)$  的最小值为分割阈值(分割点),将数据分为 2 类,即决策树的左、右两枝,计算左、右分枝的基尼系数  $G_l, G_r$ ;
- 3) 计算  $G_l, G_r$  的加权平均值  $G_a$ ;
- 4) 计算基尼系数差值  $\Delta E, \Delta E = \max(G - G_a)$ ;
- 5) 对每个变量  $X(1), X(2), \dots, X(k)$  的每个取值重复步骤 2)~4);

6) 取基尼系数差值最大值  $\Delta_{\max}$  所对应的变量为最佳分割变量,取该变量所对应的阈值为最佳分割阈值,即生成根节点(同理可生成其他节点)。

CART 算法所生成的决策树形式如图 1 所示(图 1 对应的数据集中样本共有 3 类)。该决策树的根节点最佳分割变量为  $X(3)$ 。

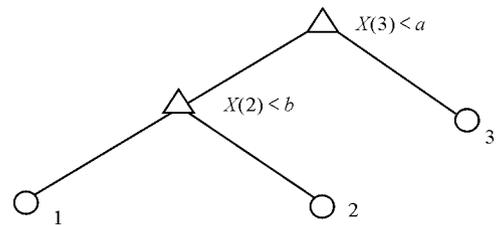


图 1 决策树示意图

Fig. 1 Sketch of decision trees

2.2.2 基于 CART 决策树的特征选择 由 CART 决策树根节点的生成过程可以看出,最佳分割变量及最佳分割阈值由基尼系数的差值确定。变量的基尼系数差值越大,则该预测变量作为分割变量的分类效果越好,即对目标变量影响越大;基尼系数差值最大,相应预测变量的分类效果最好,即最重要。如此通过计算基尼系数差值就可以对各变量的重要

性,即对目标变量的影响程度做出定量评价。然后选用预测算法(如支持向量机等)对不同的特征子集进行预测精度检验,选出满足精度要求的最小子集,即最优子集,即完成了特征选择。

2.2.3 特征选择计算 特征选择计算时首先对湿陷系数( $\delta$ )进行离散化,离散化过程中将湿陷性共分为 4 类<sup>[17]</sup>,代号分别为 1,2,3 和 4(见表 3)。

表 3 湿陷类别划分

Table 3 Classification of loess collapsibility

湿陷性 Collapsibility	湿陷系数 $\delta$ Coefficient of collapsibility	类别 Classification
非湿陷性 Noncollapsible	$\delta < 0.015$	1
弱湿陷性 Weak collapsibility	$0.015 \leq \delta < 0.030$	2
中等湿陷性 Middle collapsibility	$0.030 < \delta \leq 0.070$	3
强湿陷性 High collapsibility	$\delta > 0.070$	4

以湿陷系数为目标变量,以剪切波速、视电阻率、导热系数和比热容为预测变量,按前述步骤进行各预测变量的基尼系数差值计算,结果如表 4 所示。 $\Delta E$  越大,表明相应指标对湿陷性的影响越大,越重要。由表 4 可以看出,剪切波速的  $\Delta E$  最大,其次为视电阻率,再次为比热容,导热系数的  $\Delta E$  最小。这一结果说明,剪切波速和视电阻率对湿陷性的影响大于比热容和导热系数,即剪切波速和视电阻率对湿陷性的影响相对较大。

表 4 各预测变量的基尼系数差值  $\Delta E$

Table 4 Decrease of Gini indexes

变量 Index	$\Delta E$
剪切波速 Shear wave velocity	0.151 3
视电阻率 Apparent resistivity	0.056 9
比热容 Thermal conductivity	0.030 8
导热系数 Heat capacity	0.026 5

### 2.3 特征选择的定性分析

电阻率、剪切波速、导热系数及比热容与岩土的工程性质关系密切,电阻率可用于描述土的结构性。文献[14]在总结国内外相关研究成果的基础上,提出的电阻率结构模型为:

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

式中: $p$  为土的电导率, $n$  为孔隙率, $S_r$  为饱和度, $F'$  为土的导电结构系数, $\theta$ 、 $\theta'$  分别为土中土-水并、串联部分的水、土体积比, $BQ$  为土颗粒表面双电层的电导率, $p_w$  为孔隙水电阻率。

剪切波速与传播介质的密度等存在解析关系。根据物理学中的机械振动理论有:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

式中: $V_s$  为剪切波速, $G$  为介质的弹性模量, $\rho$  为介质密度。

对于多相土石介质,经证明有<sup>[18]</sup>:

$$V_s^6 = \left[ \frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \right]^3 \frac{3c^2(1-\varphi)^2 gG_s^2 / \rho_d^2}{2\pi^2(1-\nu)^2(1+w)^2} h \quad (3)$$

式中: $\nu$  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, $\varphi$  为孔隙度, $G_s$  为固体颗粒剪切模量, $\rho_d$  为干密度, $g$  为重力加速度, $w$  为含水率, $h$  为土层厚度。

式(2)为理论公式,式(1)、(3)为半理论公式。因此,相比较而言,在描述和反映土的工程性质方面,电阻率、剪切波速较导热系数、比热容更具理论基础,导热系数和比热容与土的工程性质指标仅是统计关系。本研究中虽采用的是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理基本相同(视电阻率与电阻率的影响因素及其区别见文献[19])。

### 2.4 土层埋深

湿陷系数是随压力变化的,不同的深度对压力的规定不同,如我国现行规范规定,测定湿陷系数的压力在基底 10 m 以内采用 200 kPa,10 m 以下采用饱和和自重压力,当饱和和自重压力大于 300 kPa 时则试验压力采用 300 kPa(荷载不大于 300 kPa)。因此,预测湿陷系数应考虑压力,而深度可反映应力状态,并在一定程度上反映土的地质环境,同时土层深度也是影响湿陷性的重要因素,故在进行黄土湿陷性预测模型建立时应将土层埋深作为重要影响因素之一。

### 2.5 预测变量的确定

以上分析表明,剪切波速、视电阻率、导热系数、比热容可反映黄土主要的工程性质,在剪切波速、视电阻率、导热系数、比热容这 4 项指标中,剪切波速与视电阻率的重要性高于导热系数和比热容,剪切波速、视电阻率与土的工程性质存在理论或半理论的关系,而导热系数和比热容与土的工程性质仅为统计关系;土层埋深可反映湿陷性的应力状态,因此黄土湿陷性的预测变量应选择视电阻率、剪切波速和土层埋深。

## 3 预测验证

采用粒子群优化最小二乘支持向量机预测方

法<sup>[15]</sup>,以视电阻率、剪切波速和土层埋深为预测变量,以本研究中所采集的试验数据为样本建立预测模型,并对湿陷系数进行预测,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,所得结果列于表5。由表5可以看出,预测值与试验值误差较小,预测精度较高,相对误差为-9.7%,预测的湿

陷等级与试验值的计算结果一致,均为Ⅱ级。因此,采用视电阻率、剪切波速及土层埋深作为预测变量进行湿陷系数的预测是适宜的,这种测定黄土湿陷性的方法是定量的、可行的。视电阻率和剪切波速在工程中应用比较普遍,且测试方便、成本低,故用其预测黄土的湿陷性可降低工程成本、提高经济效益。

表5 蒋家河煤矿主井绞车房黄土湿陷性预测值与试验值的比较

Table 5 Comparison of loess collapsibility between test and prediction in main shaft winder room site of Jiangjiahe coal mine

设计标高/m Design elevation	基础埋深/m Depth of foundation	湿陷土层起止深度/m Depth to collapsible loess	试验值		预测值		
			湿陷量/mm Collapse account	湿陷等级 Collapsibility grade	湿陷量/mm Collapse account	相对误差/% Relative errors	湿陷等级 Collapsibility grade
1 226.00	3.00	2.81~17.80	668	Ⅱ	603	-9.7	Ⅱ

## 4 结 论

1)运用主成分分析法对黄土的剪切波速、视电阻率、导热系数、比热容、含水率、密度、液限及压缩系数等指标进行了分析,结果表明,剪切波速、视电阻率、导热系数和比热容分别代表第1~4主成分,在数据中信息量大,占数据总信息量的绝大部分。

2)特征选择的定性分析及基于CART算法的特征选择定量分析结果表明,视电阻率、剪切波速的重要性较强,用于描述土的工程性质有一定的理论基础;土层埋深可反映湿陷性黄土的应力状态。因此,剪切波速、视电阻率结合土层埋深可作为预测变量进行黄土湿陷性的评价。经工程实例检验证明,这种评价黄土湿陷性的方法是可行的。

3)CART决策树的用途是分类与预测,本文对其应用范围进行了拓展,将其用于指标的重要性分析及特征变量(预测变量)的选择。实际应用效果说明,这种特征选择方法科学而有效。

## [参考文献]

[1] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.  
Guan W Z. Engineering performance of collapsible loess [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992. (in Chinese)

[2] 楚华栋. 旁压试验测定黄土湿陷性方法的探讨 [C]. 全国黄土学术会议论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2001:108-115.  
Chu H D. Study on loess collapsibility by pressuremeter test [C]. China Loess Learning Conference Discourse. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001:108-115. (in Chinese)

[3] 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 S H, Wei L Y, Wu F Q, 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. (in Chinese)

[4] 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.

[5] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structures of clay given by resistivity measurements [J]. Engineering Geology, 1999, 54: 43-53.

[6] 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 X J, Liu S Y. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 393-396. (in Chinese)

[7] Gunn D A, Nelder L M, Jackson R 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.

[8] 高印立. 剪切波速与土性指标间的统计关系 [J]. 建筑科学, 1998, 14(5): 20-22.  
Gao Y L. The statistical relation of shear velocity with soil properties [J]. Building Science, 1998, 14(5): 20-22. (in Chinese)

[9] Abu-Hamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285-1290.

[10] Lehmann P, Stahli M, Papritz A, et al. A fractal approach to model soil structure and to calculate thermal conductivity of soils [J]. Transport in Porous Media, 2003, 52: 313-332.

[11] Nusier O K, Abu-Hamdeh N H. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils [J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39: 119-123.

[12] Heilman J L, Moore D G. Evaluation near-surface soil moisture using heat capacity mapping mission data [J]. Remote Sensing of Environment, 1982, 12(2): 117-121.

[13] Fukue M, Minato T, Matsumoto M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. Engineering

- Geology, 2001, 60: 361-369.
- [14] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 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 F S, Liu S Y, Du Y J, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1671-1676. (in Chinese)
- [15] 何晓群. 现代统计分析方法 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998: 281-314.  
He X Q. Method of modern statistical analysis [M]. Beijing: Renmin University of China Press, 1998: 281-314. (in Chinese)
- [16] Breiman L, Friedman J, Olshen R, et al. Classification and regression trees [M]. California: Wadsworth International Group, 1984.
- [17] GB 50025—2004 陷性黄土地区建筑规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004. (in Chinese)
- [18] 赵明阶. 根据波速计算多相土石地基压实度的理论模型 [J]. 水利学报, 2007, 38(5): 618-623.  
Zhao M J. 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. (in Chinese)
- [19] 井彦林, 仵彦卿, 杨丽娜, 等. 组合最小二乘支持向量机与粒子群优化算法研究黄土湿陷性 [J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1): 15-19.  
Jing Y L, Wu Y Q, Yang L N, et al. Study on loess collapsibility by combining least squares support vector machines and particle swarm optimization [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1): 15-19. (in Chinese)

(上接第 222 页)

- [9] 韩鲁佳, 刘向阳, 阎巧娟, 等. 我国秸秆饲料资源开发利用的研究 [J]. 农业工程学报, 1997, 13(增刊): 120-124.  
Han L J, Liu X Y, Yan Q J, et al. Research of development of straw feed resource [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 1997, 13 (Sup.): 120-124. (in Chinese)
- [10] 王德福. 粗纤维饲料粒度评价装置的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 128-131.  
Wang D F. Experimental study of particle-evaluation equipment for roughage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 128-131. (in Chinese)
- [11] Lammers B, Heinrichs J, Buckmaster D. Method helps in determination of forage, TMR particle size requirements for cattle [J]. Feedstuffs, 1996, 68(41): 14-20.
- [12] Beauchemin K A, Farr B I, Rode L M. Effects of alfalfa silage chop length and supplementary long hay on chewing and milk production of dairy cows [J]. J Dairy Sci, 1994, 77: 1326-1339.
- [13] Grant R J, Colenbrander, Mertens D R. Milk fat depression in dairy cows: Role of particle size of alfalfa hay [J]. J Dairy Sci, 1990, 73: 1823-1833.
- [14] 丁志欣, 裴新民, 吴新声. 全混合日粮饲料搅拌机饲料混合均匀度检测方法研究 [J]. 新疆农机化, 2005(1): 50-51.  
Ding Z X, Pei X M, Wu X S. Research of checking method of mixing evenness for TMR feed wagon [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2005(1): 50-51. (in Chinese)
- [15] 袁洪令. 饲料混合均匀度的应用 [J]. 粮食与饲料工业, 1997(4): 27-28.  
Yuan H L. Utilization of feed mixing evenness [J]. Grain and Feed Industry, 1997(4): 27-28. (in Chinese)