

基于 BP 神经网络的土壤养分综合评价模型*

韩磊¹ 李锐^{1,2} 朱会利³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西理工学院经贸系, 汉中 723000)

【摘要】 以土壤养分指标体系作为神经网络的输入,以土壤养分等级评分作为输出,基于 BP 神经网络,建立了具有 5 个隐含层节点、3 层网络的土壤养分综合评价模型;以土壤养分指标的各级评价标准作为模型的训练样本和检验样本,利用 Matlab 软件对 BP 神经网络进行训练和检验,并对安塞县土壤养分进行综合评价。结果表明 BP 神经网络对检验样本的模拟输出和期望输出是一致的;对安塞县土壤养分综合评价结果与模糊模式识别、主成分分析结果也是完全一致的。

关键词: 土壤养分 BP 神经网络 综合评价
中图分类号: S126; S151.9⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0109-07

Comprehensive Evaluation Model of Soil Nutrient
Based on BP Neural Network

Han Lei¹ Li Rui^{1,2} Zhu Huili³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Economy & Trade Department, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract

A comprehensive evaluation model of soil nutrient based on BP neural network was set up, which contained 5 cryptic layer nodes and 3 layers. The rank classification criterion of soil nutrient's assessment indicator system was chosen as the training sample and the test sample of the model. The training and the test were made by using Matlab software. The comprehensive evaluation of farmland soil nutrients was conducted in Ansai County. The results showed that simulation result of BP neural network was consistent with the expected result; the simulation result of BP neural network, fuzzy pattern and principal component analysis were exactly the same.

Key words Soil nutrient, BP neural network, Comprehensive evaluation

引言

土壤养分是构成土壤肥力的物质基础,由于自然和人为因素的影响,不同的土壤类型所含的养分不同,养分含量常具有明显的时空分布特点,这种时空分布特征会影响区域植被分布、植物群落生物量的大小、物种的组成和多样性^[1~5]。因此,研究土壤养分的分布特征,对于土壤养分资源的科学管理和

合理利用,有针对性地采取合理施肥技术,提高肥料养分资源的利用率具有重要的理论和实践意义^[6~7]。传统的土壤评价方法主要包括标准综合级别法、指数和法、灰色关联分析法、主成分分析法、模糊综合评价法等^[8],但多数方法的实际操作性不强,多为人为地划分土壤肥力的等级指标和相对权重系数,评价标准不一,存在着一定的主观性,推广应用性较差。本文利用 Matlab 软件将人工神经网络

收稿日期: 2010-12-31 修回日期: 2011-02-23
* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB407203)
作者简介: 韩磊,博士生,主要从事土地管理与空间信息技术研究,E-mail: hanshuanglei@126.com
通讯作者: 李锐,研究员,博士生导师,主要从事水土保持、水土流失动态遥感监测研究,E-mail: lirui@ms.iswc.ac.cn

络方法引入土壤养分综合评价,采用 BP 算法建立土壤养分综合评价模型,并用于实际的土壤养分综合评价,旨在推进土壤养分综合评价方法的研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安塞县地处西北内陆黄土高原腹地,在经纬度 36°31′~37°19′、东经 108°51′~109°26′之间,属典型的大陆性半干旱季风气候,夏秋多雨,冬季严寒干燥。年日照时数 2 415.5 h,辐射总量 480.06 kJ/cm²,全年无霜期 160~180 d,平均气温 8.8℃,大于 10℃活动积温 3 177.4℃,年平均降水量 505.3 mm,年蒸发量 1 645.4 mm。本区地形地貌复杂多样,主要为梁峁状黄土丘陵。土壤以黄绵土为主,成土母质主要有黄土和洪积冲积物,黄土土层深厚,土质以粉粒为主,保水性差,疏松易碎,易受水蚀和风蚀。水土流失面积占总土地面积的 78.7%,是黄河中

游水土流失重点县之一,也是西北典型生态环境脆弱区。

1.2 土样采集

土壤采集于 2009 年春在安塞县 12 个乡镇展开,按照地区方位、面积,结合安塞县各乡镇的行政区划按“S”形选出有代表性并能充分反映土壤特性的农田进行采样,采样深度为 0~20 cm,共采集 4 231 个代表性的耕层土样。

1.3 测定项目及方法

测定前,土壤样品自然风干,按常规方法处理^[9]。有机质用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;碱解氮采用康惠皿法测定;速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾用醋酸铵浸提-原子吸收光谱法测定^[9~10],测定的结果如表 1 所示,并查阅已有资料^[11]获得了二次土壤普查安塞县农田土壤养分数据作为对比。

表 1 安塞县土壤养分含量
Tab.1 Farmland soil nutrient contents in Ansai County

乡镇名称	指标	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
镰刀湾乡	平均值	9.28	0.57	28.75	8.98	98.28
	标准差	1.87	0.07	5.67	1.41	14.64
	变异系数/%	20.11	13.18	19.72	15.68	14.89
化子坪镇	平均值	7.66	0.50	22.92	7.15	95.50
	标准差	1.30	0.08	4.31	1.21	13.71
	变异系数/%	16.99	14.94	18.82	16.87	14.35
王家湾乡	平均值	7.50	0.49	25.31	7.44	94.03
	标准差	1.28	0.07	4.14	1.35	10.72
	变异系数/%	17.08	15.20	16.37	18.17	11.40
楼坪乡	平均值	8.29	0.54	25.80	9.00	96.78
	标准差	0.94	0.05	3.28	0.81	7.48
	变异系数/%	11.08	8.91	12.83	9.49	8.34
建华镇	平均值	8.26	0.53	24.84	8.43	97.73
	标准差	0.95	0.05	3.68	1.12	9.04
	变异系数/%	11.55	9.51	14.81	13.30	9.25
真武洞镇	平均值	9.28	0.55	37.43	8.98	113.76
	标准差	0.98	0.08	7.37	1.27	18.01
	变异系数/%	10.61	14.27	19.69	14.17	15.83
王窑乡	平均值	8.92	0.54	37.00	9.26	96.07
	标准差	1.05	0.06	3.98	0.77	10.33
	变异系数/%	11.75	11.52	10.77	8.26	10.75
招安镇	平均值	9.25	0.54	36.58	9.60	112.59
	标准差	1.10	0.08	6.28	1.15	13.39
	变异系数/%	11.88	15.28	17.17	12.03	11.89

续表 1

乡镇名称	指标	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
沿河湾镇	平均值	8.96	0.53	36.35	9.08	99.74
	标准差	1.13	0.07	5.30	1.04	15.14
	变异系数/%	12.57	14.05	14.59	11.40	15.18
砖窑湾镇	平均值	8.99	0.53	30.24	9.14	98.43
	标准差	1.45	0.08	8.38	1.24	14.29
	变异系数/%	16.16	15.42	27.72	13.60	14.51
高桥乡	平均值	9.20	0.58	27.90	9.18	96.00
	标准差	0.93	0.07	6.22	1.26	10.78
	变异系数/%	10.08	11.83	22.30	13.69	11.23
坪桥镇	平均值	8.49	0.51	25.55	8.59	89.64
	标准差	1.03	0.05	3.34	0.61	5.59
	变异系数/%	12.14	9.26	13.08	7.11	6.24
全县	平均值	8.73	0.54	31.11	8.79	100.68
	标准差	1.28	0.07	7.86	1.32	14.81
	变异系数/%	14.71	13.84	25.26	15.02	14.71
二次土壤普查	平均值	4.12	0.35	17.83	6.56	73.06

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2003、Matlab 2010 等软件进行数据录入、统计和分析。

2 BP 神经网络模型

BP 神经网络模型是目前应用最为广泛的网络模型,属于多层状型的人工神经网络,由输入层、输出层和一个或若干个隐含层构成。传递函数通常是 Sigmoid 型函数,所以可以实现输入和输出间的任意非线性映射。采用 BP 人工神经网络技术构建的非线性评价模型,可以避免人为确定各指标的权重带来的主观性,使评价结果的准确性提高。

2.1 数据来源与处理

采用 BP 神经网络方法建模的首要条件是有足够的典型性好、精度高的样本。而且,为监控训练

(学习)过程使之不发生“过拟合”,以提高网络模型的性能和泛化能力,必须将收集到的数据随机分成训练样本、检验样本(10%以上)和测试样本3部分^[12~13]。此外,数据分组时还应尽可能考虑样本模式间的平衡。

土壤养分评价本质上是模式识别问题,即将土壤养分评价指标系统的实际监测结果与对应土壤养分评价标准值构成的数组进行比较,与监测值构成的数组最为接近的标准值数组所对应的土壤养分等级即为 BP 人工神经网络模型的识别结果,也就是对应区域的土壤养分评价结果。BP 人工神经网络模型采用全国第 2 次土壤普查土壤养分的分级标准为评价标准(表 2),以土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾为评价指标。

相关研究表明^[14~16],训练样本过少会造成网络模型的鲁棒性、适用性较差,因此不能对实测数据作

表 2 土壤养分含量分级标准

Tab.2 Standard of soil nutrient contents

级别	丰缺状况	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1	极高	>40	>2.0	>150	>40	>200
2	高	30~40	1.5~2.0	120~150	20~40	150~200
3	中等	20~30	1.0~1.5	90~120	10~20	100~150
4	低	10~20	0.7~1.0	60~90	5~10	50~100
5	较低	6~10	0.5~0.7	30~60	3~5	30~50
6	极低	<6	<0.5	<30	<3	<30

出准确的识别,从而对土壤养分状况进行明确判别。针对模型存在的这一问题,本研究尝试在上述等级划分的基础上,用 Matlab 软件 normrnd 函数在每级标准对应数组之间,根据数据呈正态分布的原则生成 600 个总样本(每等级 100 个),对样本集进行扩充,再从中随机抽取 180 个训练样本(每等级 30 个),30 个检验样本(每等级 5 个),从而提高 BP 人工神经网络模型的鲁棒性和适用性^[17]。

为了便于利用 Matlab 神经网络工具箱中的训练函数,应用最大最小函数 premnmx 对训练样本、检测样本进行预处理,将各参数量化到 $[-1,1]$ 内,然后再作为输入单元。

2.2 BP 神经网络层数

在 BP 神经网络拓扑结构中,隐含层层数是确定网络层数的关键所在,直接影响到网络性能。关于 BP 人工神经网络模型隐含层的层数,有研究证明,当各节点具有不同界限时,对于在闭区间内的一个连续函数可用一个隐含层的网络来逼近,一个 3 层的 BP 网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射^[18]。因此,本研究中土壤养分评价的 BP 人工神经网络模型层数取 3 层,即输入层、隐含层和输出层。

2.3 传递函数和训练参数

为保证 BP 神经网络模型的非线性,从输入层到隐含层采用非线性 S 型对数传递函数 logsig 函数;从隐含层到输出层采用线性函数 purlin 函数;网络采用的训练函数为 trainlm 函数。

2.4 BP 神经网络拓扑结构

输入层节点数是由模型需要解决的实际问题本身所决定的,由于本研究参评的土壤养分指标为 5 个,故本模型的输入层节点数为 5。与 BP 人工神经网络模型输入层节点数确定的出发点相同,输出层节点数的确定也是基于问题本身而决定的,土壤养分评价 BP 网络模型的目标输出为土壤养分等级,因此,本模型输出层节点数确定为 1。

在 BP 神经网络中,隐含层节点数的选择对 BP 神经网络预测精度有较大的影响:节点数太少,网络不能很好地学习,需要增加训练的次数,精度也受影响;节点数太多,训练时间增加,网络容易过拟合。最佳隐含层节点数选择参考公式为

$$L < \sqrt{(m+n)} + a$$

式中 L ——隐含层节点数
 m ——输出层节点数
 n ——输入层节点数
 a ——0~10 之间的常数

隐含层节点数的选择首先参考公式来确定节点

数的大概范围,然后再进行网络训练检验以确定最终隐含层节点数。

使用 nntool 工具箱的检验结果表明,当隐含层节点数为 5 时,本模型在速度和精度两方面都达到最优。据此,可确定土壤养分评价的 BP 人工神经网络模型 5-5-1 的拓扑结构。

2.5 BP 神经网络模型的训练和检验

依据上述神经网络结构、传输函数和参数设置,在 Matlab 软件中对土壤养分综合评价的 BP 人工神经网络模型进行训练和检验。此神经网络最大迭代次数为 3 000,误差性能目标为 0.000 1,最小训练速率为 0.1,动态参数为 0.3;以 $[P, \min P_n, \max P_n, T, \min T_n, \max T_n] = \text{premnmx}(P_n, T_n)$ 指令对数据进行归一化前处理, P_n 表示训练样本, T_n 表示预期输出;以 $\text{net} = \text{newff}(\text{minmax}(p), [5, 1], \{\text{'logsig'}, \text{'purelin'}\}, \text{'trainlm'})$ 指令创建一个新的前向神经网络;以 $[\text{net}, \text{tr}] = \text{train}(\text{net}, P, T)$ 指令实现网络训练;以 $\text{Ptest} = \text{trammx}(\text{Ptest1}, \min P_n, \max P_n)$ 指令对检验样本进行归一化处理, Ptest1 为检验样本;以 $y = \text{sim}(\text{net} \text{ Ptest})$ 指令完成网络仿真检验;结果用 postmnmx 函数进行反归一化处理。

BP 神经网络训练的误差性能变化如图 1 所示,只经过了 35 次迭代,网络就达到了期望的误差水平,这说明模型的收敛速度是非常快的;数据回归情况如图 2 所示,期望响应与仿真输出回归效果非常好,相关系数达到了 0.999 9,说明模型的拟合程度非常高。训练好的 BP 神经网络模型的权值和阈值如表 3 所示。

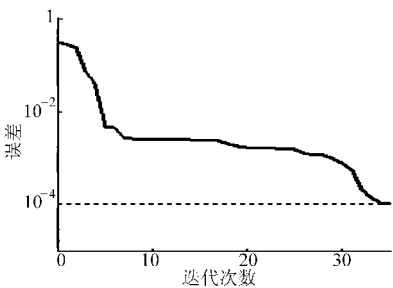


图 1 BP 神经网络误差性能变化曲线
Fig.1 Error of BP neural network

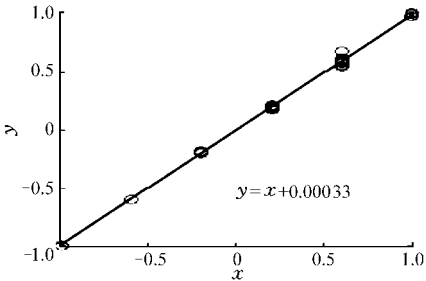


图 2 BP 神经网络数据回归
Fig.2 Regression of BP neural network

表 3 BP 神经网络的权值和阈值

Tab.3 Weight and threshold of BP neural network					
参数	数值				
权值	39. 58	16. 36	− 39. 18	− 53. 88	− 41. 32
	− 6. 50	− 80. 69	− 5. 35	− 42. 35	6. 45
	9. 09	15. 05	− 2. 30	− 4. 86	16. 58
	14. 82	15. 07	6. 63	− 2. 95	11. 76
	− 0. 69	2. 80	3. 31	16. 60	− 1. 10
阈值	− 64. 88	− 94. 60	15. 93	− 3. 24	4. 40

以训练好的 BP 神经网络模型对检验样本进行仿真,把模拟结果数值四舍五入取整后作为土壤养分综合评价的等级(表 4),和期望结果进行比较后可以看出,两者是完全一致的,说明此神经网络的仿真效果好,可以进行土壤养分的综合评价。

3 安塞县土壤养分的综合评价

用训练好的 BP 神经网络模型对安塞县土壤养分进行综合评价,结果如表 5 所示。2009 年安塞县

表 4 检验样本及 BP 神经网络模拟结果

Tab.4 Test samples and simulated results of BP neural network								
序号	有机质/ g·kg ^{−1}	全氮/ g·kg ^{−1}	碱解氮/ mg·kg ^{−1}	速效磷/ mg·kg ^{−1}	速效钾/ mg·kg ^{−1}	期望结果	BP 神经网络模拟结果	
							数值	级别
1	52. 18	2. 45	225. 41	66. 04	279. 08	1	1	1
2	53. 56	4. 93	151. 28	48. 67	299. 00	1	1	1
3	58. 30	2. 07	195. 80	60. 50	235. 52	1	1	1
4	62. 69	4. 80	157. 90	60. 82	223. 20	1	1	1
5	43. 15	3. 15	233. 03	43. 05	206. 57	1	1	1
6	30. 44	1. 79	136. 66	41. 05	179. 46	2	2	2
7	38. 77	1. 64	126. 49	54. 84	174. 45	2	2	2
8	30. 89	1. 92	130. 32	49. 44	196. 14	2	2	2
9	31. 73	1. 71	136. 90	41. 59	164. 66	2	2	2
10	31. 73	1. 57	140. 70	54. 62	152. 14	2	2	2
11	27. 63	1. 45	99. 12	14. 17	115. 39	3	3	3
12	26. 26	1. 20	109. 50	16. 60	143. 30	3	3	3
13	24. 08	1. 41	94. 89	10. 44	110. 56	3	3	3
14	24. 01	1. 21	97. 35	11. 55	123. 53	3	3	3
15	27. 64	1. 48	101. 19	13. 70	137. 88	3	3	3
16	14. 23	0. 97	78. 55	9. 01	66. 07	4	3. 98	4
17	12. 66	0. 88	70. 12	8. 55	77. 73	4	3. 99	4
18	19. 07	0. 88	81. 79	6. 02	99. 15	4	4. 27	4
19	13. 64	0. 77	75. 83	9. 74	77. 95	4	3. 96	4
20	18. 10	0. 87	71. 20	6. 22	60. 80	4	4. 05	4
21	9. 70	2. 62	30. 40	4. 64	47. 19	5	4. 92	5
22	9. 80	2. 57	38. 70	4. 24	37. 99	5	5. 01	5
23	8. 10	2. 15	33. 22	4. 20	38. 88	5	5. 19	5
24	8. 66	6. 35	44. 77	3. 75	31. 94	5	5. 33	5
25	6. 92	1. 01	56. 17	3. 21	31. 05	5	5. 26	5
26	5. 52	0. 23	22. 84	1. 97	21. 03	6	5. 95	6
27	4. 66	0. 27	26. 72	1. 17	29. 72	6	5. 95	6
28	5. 49	0. 15	14. 73	2. 60	22. 85	6	5. 94	6
29	1. 13	0. 23	21. 62	1. 14	23. 37	6	6. 05	6
30	3. 36	0. 36	17. 51	2. 86	24. 76	6	5. 92	6

各乡镇的土壤养分综合评价均为4级,属于低水平,各乡镇土壤养分状况较为接近,这可能和当地相对单一的土壤构成和种植方式有关^[11]。全县土壤养分综合评价为4级,比二次土壤普查时的土壤养分(5级)提高了一级,这说明安塞县自二次土壤普查以来,土壤养分的整体情况有所好转。对比不同评

价方法可以看出,BP神经网络综合评价结果和模糊模式识别结果是完全一致的;用神经网络模拟的数值对各乡镇土壤养分进行排序,其结果也是与主成分分析的排序结果完全一致,这说明BP神经网络不仅能进行土壤养分等级的评定,还可以进行土壤养分高低的综合比较。

表 5 安塞县农田土壤养分的综合评价
Tab.5 Comprehensive evaluation of soil nutrient in Ansai County

乡镇名称	BP神经网络模拟结果		模糊模式 识别结果	主成分 分析结果	乡镇名称	BP神经网络模拟结果		模糊模式 识别结果	主成分 分析结果
	数值	级别				数值	级别		
镰刀湾乡	4.04	4	4	6	招安镇	3.98	4	4	1
化子坪镇	4.22	4	4	12	沿河湾镇	4.01	4	4	3
王家湾乡	4.20	4	4	11	砖窑湾镇	4.04	4	4	5
楼坪乡	4.12	4	4	10	高桥乡	4.05	4	4	7
建华镇	4.10	4	4	9	坪桥镇	4.07	4	4	8
真武洞镇	3.99	4	4	2	全县	4.04	4	4	
王窑乡	4.02	4	4	4	二次土壤普查	4.77	5	5	

4 结束语

以各土壤养分的分级标准为基础生成学习样本和检验样本,借助于Matlab软件,建立了应用于土壤养分综合评价的BP神经网络模型,并利用训练好的模型对安塞县土壤养分进行模拟。实例表明,

该模型运算速度快、精度高,过程方便简捷,具有客观性、可比性、公正性和通用性。安塞县土壤养分综合评价为4级,属于低级水平,土壤养分整体情况比二次土壤普查时(5级)有所提高,表明安塞县近些年来土壤养分状况趋于好转。

参 考 文 献

1 Arnebrandt K, Bààth E, Sögderström B. Changes in micro-fungal community structure after fertilization of scots pine forest soil with ammonium nitrate or urea [J]. Soil Biology and Biochemistry,1990,22(3): 309~312.

2 Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass act as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. Natrure,1989,338:499~500.

3 马祥华,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):15~22.

Ma X H, Jiao J Y. Characteristics of vegetation with natural restoration in removal lands in loess hilly-gully region and the relationship between the characteristics and soil environment [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 15~22. (in Chinese)

4 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等. 沙棘-侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(5): 1~6.

Ye C W, Zhai Q R, Guo Z J, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity of hippophae rhamnoides and platycladus orientalis mixed forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5):1~6. (in Chinese)

5 侯琳,雷瑞德,王得祥. 黄龙山林区封育油松林土壤养分研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2): 63~68.

Hou L, Lei R D, Wang D X. Study on soil nutrient and enzyme in hill closed and afforested natural secondary *Pinus tabulaeformis* forest land in Huanglong Mountain [J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2007, 35(2): 63~68. (in Chinese)

6 钟国辉,田发益,旺姆,等. 西藏主要农区农田土壤肥力研究[J]. 土壤学报,2005,42(6):1 030~1 034.

Zhong Guohui, Tian Fayi, Wang Mu, et al. Soil fertility of croplands in major agricultural areas in Tibet [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 1 030~1 034. (in Chinese)

7 战秀梅,韩晓日,杨劲峰,等. 沈阳市玉米主产区土壤有机质和有效磷含量及其与玉米产量水平之间的关系[J]. 中国

土壤与肥料,2007(3):29~31.

Zhan Xiumei, Han Xiaori, Yang Jinfeng, et al. Status of soil organic matter and available phosphorus of maize cropping land and the relationship between the two nutrients and yield levels of maize in Shenyang City [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007(3):29~31. (in Chinese)

- 8 赵青,王子龙,姜秋香. 属性识别理论模型在土壤肥力综合评价中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究,2007, 23(3):265~267.

Zhao Qing, Wang Zilong, Jiang Qiuxiang. Applying attribute recognition theoretical model to evaluate soil fertility [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(3):265~267. (in Chinese)

- 9 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.

- 10 北京农业大学. 农业化学[M]. 北京:农业出版社,1979.

- 11 陕西省农业勘察设计院. 陕西农业土壤[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1982.

- 12 李丽,张海涛. 基于BP人工神经网络的小城镇生态环境质量评价模型[J]. 应用生态学报,2008,19(12):2693~2698.

Li Li, Zhang Haitao. Assessment model of townlet eco-environmental quality based on BP-artificial neural network [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12):2693~2698. (in Chinese)

- 13 楼文高,王延政. 农业机械化发展水平的人工神经网络评价模型[J]. 农业机械学报,2003,34(3):58~61.

Lou W G, Wang Y Z. Comprehensive assessment model for agricultural mechanization development level by artificial neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3):58~61. (in Chinese)

- 14 赵玉杰,师荣光,高怀友,等. 基于MATLAB6.x的BP人工神经网络的土壤环境质量评价方法研究[J]. 农业环境科学,2006,25(1):186~189.

Zhao Yujie, Shi Rongguang, Gao Huaiyou, et al. Assessment method for soil environmental quality based on BP neural network [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1):186~189. (in Chinese)

- 15 谭庆美,吴金克,赵黎明. 基于BP神经网络的中小企业信用评价研[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2009, 9(5):57~62.

Tan Qingmei, Wu Jinke, Zhao Liming. Credit evaluation on SMEs based on BP neural network [J]. Journal of Northwest A & F University: Social Science Edition, 2009, 9(5):57~62. (in Chinese)

- 16 楼文高. 基于人工神经网络的三江平原土壤质量综合评价与预测模型[J]. 中国管理科学,2002,10(1):79~83.

Lou Wengao. Evaluation and prediction of soil quality based on artificial neural network in the Sanjiang Plain [J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(1):79~83. (in Chinese)

- 17 甘信华,石勇,林保国. 基于MATLAB的BP神经网络在大气环境质量评价中的应用[J]. 安徽化工,2008,34(5):59~61.

Gan Xinhua, Shi Yong, Lin Baoguo. Application of BP neural network based on MATLAB toolbox to the evaluation of atmosphere environmental quality [J]. Anhui Chemical Industry, 2008, 34(5):59~61. (in Chinese)

- 18 张蓬涛,周雁,刘晓庄,等. 人工神经网络在农业自然资源研究中的应用[J]. 安徽农业科学,2007,35(27):8711~8713.

Zhang P T, Zhou Y, Liu X Z, et al. Application of the artificial neural network in the study on agro-natural resource [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2007, 35(27):8711~8713. (in Chinese)