中国农村水利水电
China Rural Water and Hydropower
ISSN 1007-2284,CN 42-1419/TV

《中国农村水利水电》网络首发论文

题目：　基于 BP 神经网络方法的黄土水分特征曲线预测模型比选
作者：　李彬楠，樊贵盛，申丽霞
网络首发日期：　2022-06-14
引用格式：　李彬楠，樊贵盛，申丽霞．基于 BP 神经网络方法的黄土水分特征曲线预测模型比选[J/OL]．中国农村水利水电．
https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20220613.1844.006.html

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2022-06-14 11:41:06
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20220613.1844.006.html

基于 BP 神经网络方法的黄土水分特征曲线预测模型比选

李彬楠,樊贵盛*,申丽霞
（太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024）

摘要：黄土高原区水资源严重匮乏，研究土壤水分特征曲线对于提高水分利用率、节约水资源有着重要的现实意义，但直接试验测量土壤水分特征曲线面临操作技术难度大、耗时费力等诸多问题，因此对土壤水分特征曲线进行科学合理预测十分必要。为提高黄土高原区土壤水分特征曲线预测模型精度，以山西省五个县市的试验点黄土为研究对象进行模型比选。基于 BP 神经网络算法，以土壤基本指标粘粒含量、粉粒含量、干容重、有机质和全盐量共 5 个影响因素作为预测模型的输入变量，以经验模型的参数作为预测模型的输出变量，分别建立了 Gardner 经验模型参数和 Van Genuchten 经验模型参数的预测模型，并根据实测数据库的预测结果进行对比和分析。结果表明：建立的经验模型参数的 BP 神经网络预测模型，Gardner 经验模型建模和验证后的两个参数相对误差的平均值都小于 4%，Van Genuchten 经验模型建模和验证后的两个参数相对误差的平均值都小于 5%；不论是建模的训练数据库还是验证数据库，Gardner 经验模型参数的预测模型精度均高于 Van Genuchten 经验模型参数的预测模型精度。因此，建议针对黄土高原区的黄土水分特征曲线预测模型的建立，选用 Gardner 经验模型更加合适，且此经验模型的表达式简单易懂，更利于农田水利相关的基层工作人员的学习与利用。

关键词：黄土；土壤水分特征曲线；Gardner 经验模型；Van Genuchten 经验模型；BP 神经网络
中图分类号： TV93；S27　　**文献标识码：**A

Comparison of Loess Water Characteristic Curve Prediction Model Based on BP Neural Network Method

LI Bin-nan, FAN Gui-sheng, SHEN Li-xia
（Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China）

Abstract: The Loess Plateau region has a serious shortage of water resources, and the study of soil moisture characteristic curves has important practical significance for improving water efficiency and saving water resources, but the direct test of measuring soil moisture characteristic curves faces many problems such as difficult operation technology, time-consuming and laborious, so it is necessary to make scientific and reasonable predictions of soil moisture characteristic curves. In order to improve the accuracy of the prediction model of soil moisture characteristic curve in the Loess Plateau area, the loess of the test site in five counties and cities in Shanxi Province was compared for the model. Based on the BP neural network algorithm, the prediction models of Gardner empirical model parameters and Van Genuchten empirical model parameters were established respectively, and the prediction models of Gardner empirical model parameters and Van Genuchten empirical model parameters were compared and analyzed according to the prediction results of the measured database.The results show that the average value of the relative errors of the two parameters after modeling and verification of the Gardner empirical model is less than 4% in the BP neural network prediction model of the empirical model parameters established, and the average of the relative errors of the two parameters after the modeling and verification of the Van Genuchten empirical model is less than 5%. It can be seen that whether it is the modeling training database or the validation database, the prediction model accuracy of Gardner empirical model parameters is slightly higher than that of Van Genuchten empirical model parameters. At the same time, compared with the Van Genuchten experience model, the expression

基金项目：国家自然科学基金资助项目（40671081）
作者介绍：李彬楠（1992-），女，博士研究生，主要从事节水灌溉理论与技术的研究。Email：867146468@qq.com
通讯作者：樊贵盛（1955-），男，教授，博士生导师，主要从事土壤物理、灌排理论与技术的研究。Email：fanguis5507@263.net

of the Gardner experience model is simpler, and the meaning of the parameters is easier to understand, which is also more conducive to the learning and application of grass-roots workers related to farmland water conservancy. Therefore, this paper proposes that for the establishment of the loess moisture characteristic curve prediction model in the Loess Plateau region, the Gardner empirical model is more appropriate, and the results of this paper can provide supplementary and practical proof for the theoretical study of the moisture characteristic curve in the Loess Plateau region.
Key words: loess; soil water characteristic curve; Gardner empirical model; Van Genuchten empirical model; BP neural network

引言

土壤水分特征曲线的横坐标是土壤含水率，纵坐标是土壤水吸力，可以由曲线上的拐点了解相应状态下的土壤水分情况，由此该曲线能够表征不同类型的土壤持水性和释水性。土壤水分特征曲线主要用于土壤水分运动的探究、土壤水分的调配和运用等方面，是农田水利最为重要和最为基础的工具[1]。根据土壤水分特征曲线的应用而创立了许多的经验模型及其预测模型，针对不同土壤类型建立预测模型的方法以及选取更加合适的经验模型。蒋名亮[2]等根据 Brooks Corey、Gardner 和 Van Genuchten 三种模型拟合了滨海盐渍土的土壤水分特征曲线模型，结果表明 Van Genuchten 模型拟合的精度最高；程冬兵等[3]利用实测数据对国内外常见的几种土壤水分特征曲线模型分别对三峡库区紫色土的水分特征曲线模型进行拟合，结果表明 Gardner 模型适合简单快捷的田间土壤水分管理，Van Genuchten 模型适合进一步土壤水力传导参数的推求应用。

BP 神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络，是应用最广泛的神经网络模型之一[4,5]。有关土壤水分特征曲线的预测人们也做了许多的研究，高如泰[6]等建立了基于 BP 神经网络的土壤转换函数模型，并与多元线性逐步回归方法进行比较，结果表明，BP 神经网络模型的预测效果总的来看要优于多元线性回归法；聂春燕[7]等考虑土壤质地不分类和分类 2 种情况,分别构建了基于支持向量回归机(SVR)的土壤传递函数模型,比较了在土壤质地不分类和分类情况下预测土壤水力学参数的效果,并与基于神经网络的 Rosetta 模型的预测效果进行了比较，结果表明无论土壤质地是否分类,样本和输入参数相同的条件下,基于 SVR 的模型预测的效果都优于 Rosetta 模型。

以山西省黄土高原区的五个县市试验点的土壤为研究对象，通过室外以及室内实验获取了 Gardner 经验模型参数和 Van Genuchten 经验模型参数的实际测量数据，以此建立了预测模型的数据库。由于 BP 神经网络具有比较强大的非线性映射能力、高度的自学习和自适应能力以及将学习所得的成果运用到新知识的能力等优点[8,9]，因此在众多的算法中选择使用 BP 神经网络方法，采用该方法对 Gardner 经验模型参数和 Van Genuchten 经验模型参数的预测模型进行对比，选取出最佳经验模型，研究结果为黄土水分特征曲线的理论知识提供补充和实践证明。

1 材料与方法

1.1 土壤状况

试验区土壤主要取自山西省黄土高原区五个地区试验点的耕作土壤。每一个试验点分别取用 0~20cm 的耕作层土壤与 20~40cm 的犁底层土壤。由于试验地点分布范围宽，土壤状况与土壤理化参数指标丰富，因此建模土壤样本具有较广的代表性。试验区土壤详情以及部分试验区土壤指标情况见下表 1 和表 2。

表 1 试验区土壤详情

Tab.1 Soil details in the test area

试验地点	理化参数	参数范围	土壤类型
临县	干容重（$g\cdot cm^{-3}$）	1.10～1.70	粉砂质粘壤土
离石区	黏粒含量(%)	1.67～32.50	粉砂质壤土
交城县	粉粒含量(%)	30.20～66.20	壤土
介休市	无机盐含量（mg/kg）	690～3320	砂质壤土
榆社县	有机质含量(%)	0.18～2.73	砂质粘壤土

表 2 部分试验区土壤理化参数详情

Tab.2 Details of soil physical and chemical parameters in some test areas

取土地点	粒径质量分数/%			容重	有机质	无机盐
	<0.002mm	0.002～0.02mm	0.02～2mm	g/cm^3	g/kg	g/kg
云竹村	17.54	53.25	29.21	1.26	4.59	0.81
洪相村	10.32	55.03	34.65	1.21	19.74	1.27
成村	2.80	63.20	27.38	1.21	27.38	1.34
太平村	14.02	39.46	46.52	1.25	1.80	0.92
曜头村	2.40	62.24	35.36	1.28	4.85	0.93

1.2 试验器材及方法

建立的数据样本主要包含两部分试验，一是测定黄土水分特征曲线，二是测定土壤基本理化参数。

黄土水分特征曲线的测定试验：实验器材为压力膜仪。将过筛的风干土壤样品填装到环刀内并将其放置于压力膜仪中，加水使其吸水达到饱和状态。24h 后对土壤样品的饱和含水率进行测定，然后压力膜仪加压排水，间隔相同时间测土样重量，两次土样前后称重的值小于 0.005g 则可进行下一组压力值的测量。按照上述实验操作对土壤样品进行 0.3bar～15bar 压力值的测定，对每一个压力值下的土壤样品进行体积含水率的测定，最终根据测定的实验数据拟合得到模型参数。

土壤指标的测定试验：采用激光粒度分析仪测定试验区土壤的砂粒、粉粒以及粘粒含量；取自试验区的土壤样品为扰动土，因此人为配设了 $1.0g/cm^3$～$1.7g/cm^3$ 梯度的容重，大体包含了黄土的容重范围；土样有机质的测量使用重铬酸钾容量法；全盐量的测定采用化学法，其含量为八大离子之和，主要有 K^+、Cl^-、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO^{3-}。

1.3 土壤水分特征曲线经验模型与参数

针对山西省黄土高原区的土壤水分特征曲线 Gardner[10]经验模型和 Van Genuchten[11]经验模型参数进行预测，两种经验模型的模型结构及其参数如下表 3 所示：

表 3 土壤水分特征曲线经验模型表达式

Tab.3 Empirical model expression of soil moisture characteristic curve

模型名称	表达式	参数含义
Gardner 模型	$h = c\theta^{-d}$	h 代表的是土壤水吸力（cm）；θ 代表的是土壤体积含水率（%）；c、d 均为拟合参数，无单位量纲且均为正数。

Van Genuchten 模型	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^m}$	θ 是体积含水率（%），θ_s 为饱和含水率，θ_r 为残余含水率，单位（m^3/m^3）；h 为压力水头(m)；α 是与进气值有关的参数(m^{-1})，m、n 是曲线形状参数，无单位量纲，$m=1-1/n$。

由表可知，Gardner 模型和 Van Genuchten 模型均有两个参数。Gardner 模型中土壤水吸力可测得，因此参数为 c 和 d。Van Genuchten 模型中饱和含水率、残余含水率和压力水头均可测得，因此参数为 a 和 n。

1.4 预测模型的建立

土壤水分特征曲线主要受到如下几点因素的影响：（1）质地的影响。当土壤颗粒细而小时土壤中的中小孔隙数量多，土壤比表面积大则能吸附更多的水分。反之，土壤颗粒大时大孔隙的数量较多，土壤比表面积小则吸附的水分就较少。（2）容重的影响。土壤的密实程度可由容重的大小来判断，容重大则土壤密实表明土壤中的总孔隙度小，因此降低了土壤水力的传导度，在低吸力的情况下土壤持水能力就会变弱。（3）有机质的影响。有机质是土壤固相部分的重要组成成分，其胶结作用可以改变土壤孔隙的大小以及分布状况，因此有机质可以改变土壤板结以及土壤的密实程度，从而影响土壤的质地和结构。（4）全盐量的影响。土壤中的可溶性盐可以影响土壤的水吸力大小。当含盐量高时，土壤的毛管力变大而饱和含水率则变小，这就使得土壤的持水力变强，反之，当含盐量低时土壤的持水力就会变弱。

BP 神经网络模型拓扑结构包含输入层、隐含层和输出层，隐含层可拓展为多层[12]。根据上述分析选取了质地（粘粒含量、粉粒含量）、干容重、有机质和全盐量共 5 个影响因素作为模型的输入因子，Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型的参数作为模型的输出因子，以此建立两种经验模型参数的预测模型。

本文中的 Gardner 经验模型参数和 Van Genuchten 经验模型参数的输入变量都是 5 个。BP 神经网络的神经元响应函数为 Sigmoid 阈值函数，模型的输入样本和输出样本使用 MATLAB 软件中的归一化函数（premnmx）和还原函数（postmam）进行归一化处理。设定 BP 神经网络中经验模型参数的训练精度为 0.0005，学习迭代次数最大为 1500 次，学习率为 0.01。建立模型所用的 BP 神经网络拓扑结构式，如下式所示，两种经验模型参数建模指标情况见下表 4：

$$net = newff(\min\max(trainput),[i,j],\{'tansig','purelin'\},'trainlm') \quad (1)$$

式中：net 为建立的 BP 神经网络；*newffw* 是前馈神经网络函数；*minmax(traininput)*是输入向量范围；*traininput* 是输入向量；[*i*,*j*]中 *i*、*j* 分别代表中间隐含层和输出层的神经元数量；*'tansig'*为隐含层激活函数，*'purelin'*输出层激活函数；*'trainlm'*为训练函数。

表 4 四个参数建模指标情况

Tab.4 Four parameters model the indicator situation

模型名称及参数	Gardner 模型		Van Genuchten 模型	
	参数 c	参数 d	参数 a(m^{-1})	参数 n
隐含层数	27	17	11	6
迭代次数	1410	1340	313	17
训练精度	0.000456	0.000453	0.000471	0.000479

2 结果与分析

2.1 Gardner 经验模型参数的预测

根据室外实验取得的试验区土壤所测定的黄土水分特征曲线以及土壤基本指标，建立了 68 个样品的数据库，其中随机选用 8 个样品为建模验证数据库，剩下的 60 个样品为建模数据库，然后利用 MATLAB 对 Gardner 经验模型两个参数进行模型的建立，预测模型的具体预测结果如下表 5 所示：

表 5 Gardner 模型建模样本误差分析

Tab.5 Gardner model modeling sample error analysis

样本	参数 *c*			参数 *d*		
	实测值	预测值	相对误差%	实测值	预测值	相对误差%
1	3.7086	3.5397	4.56	0.3905	0.4043	3.54
2	3.6246	3.6596	0.96	0.5595	0.6165	10.19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
58	6.2039	6.1876	0.26	1.6375	1.6390	0.09
59	6.2079	6.3087	1.62	1.5120	1.3772	8.92
60	4.5383	4.2374	6.63	1.0177	1.0213	0.36
最大值			16.74			13.41
最小值			0.12			0.05
平均值			4.86			1.96

从上表 5 中可知，在建立的 Gardner-BP 预测模型中，参数 *c* 的相对误差最大值为 16.74%，最小值为 0.12%，平均值为 4.86%，参数 *d* 的相对误差最大值为 13.41%，最小值为 0.05%，平均值为 1.96%。根据上述结果可知 Gardner 经验模型参数 *c* 和参数 *d* 的实测值预测效果良好。

2.2 Van Genuchten 经验模型参数的预测

根据室外实验和室内实验建立了 68 个样品的数据库，其中随机选用 8 个样品为建模验证数据库，剩下的 60 个样品为建模数据库，然后利用 MATLAB 对 Van Genuchten 经验模型两个参数进行预测模型的建立，预测模型的具体预测结果如下表 6 所示：

表 6 Van Genuchten 模型建模样本误差分析

Tab.6 Van Genuchten model modeling sample error analysis

样本	参数 a(m^{-1})			参数 *n*		
	实测值	预测值	相对误差%	实测值	预测值	相对误差%
1	0.4831	0.4976	3.00	1.6352	1.6334	0.11
2	0.3821	0.3895	1.94	1.7661	1.7543	0.67
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
58	0.2377	0.2319	2.46	1.4554	1.4521	0.22
59	0.3790	0.3844	1.42	1.4127	1.4149	0.16
60	0.2556	0.2651	3.72	1.5715	1.5695	0.13
最大值			17.64			6.29
最小值			0.13			0.02
平均值			4.92			2.04

从表 6 中可知，在建立的 Van Genuchten-BP 预测模型中，参数 *a* 的相对误差最大值为 17.64%，最小值为 0.13%，平均值为 4.92%，参数 *b* 的相对误差最大值为 6.29%，最小值为 0.02%，平均值为 2.04%。根据上

述结果可知 Van Genuchten 经验模型参数 *a* 和参数 *b* 的实测值预测效果良好。

将表 5 和表 6 进行对比可得，Gardner 经验模型的参数 *d* 比参数 *c* 的训练精度高，Van Genuchten 经验模型参数 *b* 比参数 *a* 的训练精度高，且两种经验模型建模后参数的相对误差平均值都小于 5%。从表 5 和表 6 的结果来看，建立的 BP 神经网络预测模型对两种经验模型参数均完成了较好的预报，并且 Gardner 经验模型的参数 *d* 和 Van Genuchten 经验模型参数 *b* 的预测效果更佳。

2.3 预测模型参数的验证

建模验证数据库由随机选取的 8 组土壤样本组成，因此采用验证数据样本对 BP 神经网络预测模型的 Gardner 经验模型参数和 Van Genuchten 经验模型参数进行验证，由验证结果判断 BP 神经网络预测模型的精确度和效果。两种经验模型参数的预测模型验证样本的相对误差情况见下表 7 和表 8：

表 7 Gardner 模型参数验证样本误差分析

Tab.7 Gardner model parameters validate sample error analysis

验证样本	模型参数 *c*		相对误差%	模型参数 *d*		相对误差%
	实测值	预报值		实测值	预报值	
1	3.6563	3.9421	7.82	0.4603	0.4208	8.58
2	5.9331	5.9158	0.29	1.7736	1.7748	0.07
3	4.1120	4.2819	4.13	0.4714	0.4713	0.02
4	6.6273	6.5788	0.73	4.8636	4.9092	0.94
5	5.8408	5.7718	1.18	3.5410	3.5312	0.28
6	6.3524	6.4982	2.29	4.6317	4.6475	0.34
7	1.8232	1.8006	1.24	1.7664	1.7722	0.33
8	1.2492	1.2464	0.22	3.7394	3.7174	0.59
最大值			7.82			8.58
最小值			0.22			0.02
平均值			2.24			1.39

表 8 Van Genuchten 模型参数验证样本误差分析

Tab.8 Van Genuchten model parameters verify sample error analysis

验证样本	模型参数 $a(m^{-1})$		相对误差%	模型参数 *n*		相对误差%
	实测值	预报值		实测值	预报值	
1	0.4562	0.4554	0.17	1.6854	1.6722	0.78
2	0.3259	0.3102	4.83	1.4968	1.4931	0.25
3	0.5514	0.5518	0.08	1.3276	1.3103	1.30
4	0.2245	0.2234	0.48	1.6726	1.6823	0.58
5	0.9649	0.8854	8.24	1.2774	1.2973	1.56
6	0.0871	0.0784	9.97	1.3075	1.2851	1.71
7	0.1546	0.1579	2.10	1.3847	1.3132	5.16
8	0.0630	0.0651	3.38	1.2079	1.2066	0.11
最大值			9.97			5.16
最小值			0.08			0.11
平均值			3.66			1.43

对 Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型的参数 *c*、*d*、*α*、*n* 进行检验，由表 7 和表 8 的结果可知，

参数 c 相对误差的平均值为 2.24%，参数 d 相对误差的平均值为 1.39%，参数 α 相对误差的平均值为 3.66%，参数 n 相对误差的平均值为 1.43%。从验证样本的结果来看，Gardner 经验模型检验后的两个参数相对误差的平均值小于 3%，Van Genuchten 经验模型检验后的两个参数相对误差的平均值小于 4%，两种经验模型的验证样本训练精确度均高于建模样本的训练精确度。因此，对 Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型的参数所建立的 BP 神经网络预测模型获得了较高的精确度，其预测模型具有较高的可信度。

3 结论

（1）以土壤结构、质地、有机质和无机盐含量作为输入变量，以 Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型的参数作为输出变量，对黄土水分特征曲线 Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型参数进行预测是可行的，且建立的 BP 神经网络预测模型取得了良好的效果。

（2）通过 60 组的建模数据库，对 Gardner 经验模型和 Van Genuchten 经验模型的参数建立了 BP 神经网络预测模型，并用 8 组的验证数据库对两种经验模型参数所建立的预测模型进行了验证，Gardner 经验模型建模后的两个参数相对误差的平均值小于 4%，检验后的两个参数相对误差的平均值小于 3%，VanGenuchten 经验模型建模后的两个参数相对误差平均值小于 5%，检验后的两个参数相对误差的平均值小于 4%。由此可知，基于 BP 神经网络方法所建立的 Gardner 经验模型参数的预测模型精度比 Van Genuchten 经验模型参数的预测模型精度略高一些。因此，建议针对黄土高原区的土壤水分特征曲线的模型建立，可选用 Gardner 经验模型，且此经验模型的表达式简单易懂，更利于农田水利相关的基层工作人员的学习与利用。

参考文献

[1] 杜泽文. 土壤水分特征曲线的推求方法[D].西安: 长安大学, 2016.

[2] 蒋名亮, 李菲, 陈小兵, 等. 滨海盐渍土土壤水分特征曲线测定及拟合模型的比较[J].中国农村水利水电, 2016, (7):38-42.

[3] 程冬兵, 张平仓, 赵健, 等. 三峡库区不同水保措施下紫色土水分特征曲线特征及模型拟合[J].长江流域资源与环境, 2009, 18(11):1045-1049.

[4] 刘猛. 云计算平台下神经网络方法研究[D].成都: 电子科技大学.

[5] 王万祯, 王超, 孙嘉辉, 等. BP 神经网络与 NAM 模型在西营流域的比较研究[J].甘肃水利水电技术, 2019, 55(1):1-4, +8.

[6] 高如泰, 陈焕伟, 李保国, 等. 基于 BP 神经网络的土壤水力学参数预测[J].土壤通报，2005, 36(5):3-8.

[7] 聂春燕, 胡克林, 邵元海, 等. 基于支持向量机和神经网络的土壤水力学参数预测效果比较[J].中国农业大学学报，2010, 15(6):102-107.

[8] 李友坤. BP 神经网络的研究分析及改进应用[D].安徽淮南: 安徽理工大学, 2012.

[9] 程玥. BP 神经网络的算法改进与应用研究[D].重庆: 重庆大学, 2011.

[10] GARDER W R; HILLEL D; BENYAMINI Y. Post irrigation movement of soil water:1. Redistribution [J]. Water Resocurce Research, 1970, 6(3):851-861.

[11] VAN GENUCHTEN R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci. Soc. Am.J., 1980,44: 892-898.

[12] 万亿泰. BP 人工智能神经网络拓扑结构及算法[J]. 黑龙江科技信息，2009, (28):84-85.