

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.012

# 田间持水率土壤传输函数研究\*

韩勇鸿<sup>1</sup> 樊贵盛<sup>1,2</sup> 孔令超<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 基于不同土壤质地、结构、有机质含量条件下的田间持水率测定, 分析了影响田间持水率的主导因素。利用多元线性、非线性模型和BP神经网络模型, 建立了田间持水率与常规土壤理化性能参数间的不同传输函数。结果表明: 土壤干容重、粉粒含量、黏粒含量以及土壤有机质含量等常规土壤理化性能参数对田间持水率都有较大影响; 通过这些传输函数预测田间持水率都是可行的, 具有较高的预测精度(相对误差小于10%), BP神经网络模型预测效果最好(相对误差3.24%)。

**关键词:** 田间持水率 土壤理化参数 土壤传输函数 线性回归模型

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)09-0062-06

## Soil Transfer Functions of Field Moisture Capacity

Han Yonghong<sup>1</sup> Fan Guisheng<sup>1,2</sup> Kong Lingchao<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Based on field capacity test with different soil structures, soil texture and organic matter content, the dominant factors impacting the soil field capacity were analyzed. With the multiple linear regression model, multiple non-linear regression model and BP model method, the different transfer functions between field capacity and soil physical and chemical properties were set. The result showed that these conventional physical and chemical performance parameters of soils, including dry density, silt content and clay content of soil structure, soil texture and soil organic matter content, all had significant impact on field-water capacity. It was feasible to forecast field specific retention by the different transfer functions, which had higher prediction accuracy (relative error less than 10%) and BP model was the best (relative error was 3.24%).

**Key words:** Field moisture capacity Soil physical and chemical parameters Soil transfer function  
Linear regression model

## 引言

土壤田间持水率是旱地土壤孔隙中悬着毛管水达到最大时的含水率, 它是指不受地下水影响时土壤孔隙中所能保持水分的最大数量。研究田间持水率的预测对于指导农田灌溉、改善农田生态环境具有重要意义。在农业灌溉实践中, 田间持水率作为作物生长有效水分的控制上限, 是确定灌水定额的

基础参数, 田间持水率在控制农田水分平衡和防旱保墒等方面也具有重要应用。土壤田间持水率一般通过试验或根据土壤类型查相关表格的方法获得, 采用田间试验获取的数据可靠, 但试验过程长、费时费力, 投入较大; 根据土壤类型查相关表格获得的数据, 取值上仅考虑土壤类型的差异, 没有考虑土壤结构、有机质含量、土壤盐分等参数对田间持水率的影响, 往往误差较大。目前, 国内外许多土壤学者利用

收稿日期: 2013-04-04 修回日期: 2013-04-21

\* 国家自然科学基金资助项目(40671081)和山西省科技攻关项目(20100311124)

作者简介: 韩勇鸿, 博士生, 主要从事水土环境控制理论与技术研究, E-mail: hyh-292@sina.com

通讯作者: 樊贵盛, 教授, 博士生导师, 主要从事节水理论与技术、水土环境控制理论与技术研究, E-mail: fanguis5507@263.net

多元土壤传输函数来获得相关领域的主要参数<sup>[1-5]</sup>。有的学者致力于利用多元土壤传输函数来预测土壤含水率、入渗率等参数的研究,有的学者对土壤传输函数使用方法进行了详细的阐述<sup>[6-8]</sup>。此外,神经网络应用于相关研究领域也是日渐受到关注的一种研究方法<sup>[9]</sup>。曹崇文利用线性、非线性与神经网络回归模型对入渗参数进行了预报,获得了比较满意的预报精度<sup>[10]</sup>。经过对参考资料的分析研究可以看出,对于与土壤入渗特性相关的参数预报研究较为普遍<sup>[11-12]</sup>,而对于大田土壤田间持水率的预测研究较少。本文基于不同土壤质地、不同土壤结构、不同有机质含量条件下的田间持水率测定试验,建立土壤田间持水率的数据样本,在分析田间持水率与主导影响因素关系的基础上,利用多元线性、非线性回归方法和BP神经网络技术,采用不同的变量组合,建立田间持水率与土壤常规理化性能参数间的线性传输函数,最后选择预报精度较高的传输函数作为田间持水率的线性传输函数模型,为土壤水资源管理和合理确定农田灌溉技术参数提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

为了使试验地点具有代表性,在山西省境内临汾盆地山地、丘陵、平原、河漫滩选择褚村、史店、林城等15个试验地点;在晋中盆地选择东于、东南坊、方山等14个试验地点,作为试验研究区进行土壤理化性能测定和田间持水率的测定。测坑深度3.0 m,试验土壤类型以褐土、草甸土为主,试验地点的土壤黏粒质量分数的变化范围在0.5%~25%之间,粉粒质量分数的变化范围在3.5%~92%之间,砂粒质量分数的变化范围在18%~91.5%之间;土壤干容重的变化范围在1.12~1.57 g/cm<sup>3</sup>之间;有机质质量分数的变化范围在0.094%~3.52%之间。

### 1.2 试验方案与方法

试验方案:采用野外原状土壤试验与扰动土试验相结合的方法进行。大田野外原状土田间持水参数测定是在晋中盆地和临汾盆地选择的29个试验地点进行。在每一个试验地点,分别取0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、...、150~200 cm等7~10层土壤为研究对象,每层土壤测定项目有土壤干容重、土壤质地、土壤有机质含量、田间持水量等,共进行266组试验。扰动土壤持水参数测定选择在太原理工大学校内农田水利学试验田进行,为了分析土壤结构对田间持水率的影响,用从东于、寅武、东南坊等9个试验地点取回来的土样,

在试验田块上构筑9个1.5 m×1.5 m地块,填充具有不同质地、结构的土壤,测定其相应的田间持水率,共计进行54组试验田试验。试验数据共计320组。

土壤干容重测定采用环刀法进行;土壤质地采用筛分与密度计结合法进行分析,得到土壤颗粒的组成及其土壤质地类型;土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法进行;田间持水率与土壤干容重的测定采用干燥法进行。

田间持水率在大田原状土壤上进行,根据土壤质地的不同计算计划灌水定额,并实施灌溉,使地表以下200 cm深度内土壤达到饱和含水率水平。灌溉完成48 h之后,在0~200 cm土壤深度,分层取土测定土壤干容重和田间持水率。

## 2 田间持水率的主要影响因素

### 2.1 土壤质地

土壤质地是指砂粒、粉粒和黏粒的相对比例,常用砂粒、粉粒和黏粒占土壤颗粒的质量分数来表示。为了分析土壤质地对田间持水率的影响,本文以黏粒质量分数来表示不同类型的土壤质地。根据土壤干容重和土壤有机质相近的5组土壤质地和田间持水率测定结果,绘制田间持水率随土壤黏粒质量分数的变化曲线,如图1所示。结果表明:随着土壤黏粒质量分数的增加,田间持水率增大。它们之间符合对数函数关系。说明黏粒质量分数对田间持水率影响较大。

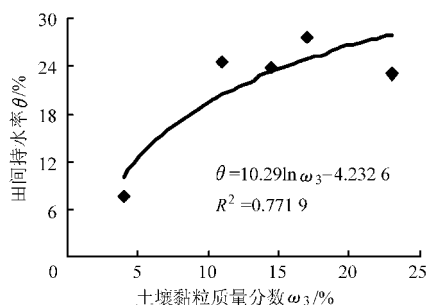


图1 田间持水率随土壤黏粒质量分数的变化曲线  
Fig. 1 Curve of field moisture capacity vs soil clay content

土壤黏粒具有极大的比表面积和表面电荷,具有极强的吸附水分子的能力,易形成比其粒径较厚的吸附水层或水膜,吸持水分较多。另一方面,质地越黏重,土壤的黏粒质量分数越大,土壤孔隙、孔径极细微,毛管吸持力较大,毛管持水能力就越强,所以,黏粒质量分数大的土壤田间持水率高。

### 2.2 土壤结构

土壤结构是反映土壤密实程度、孔隙状况和板结程度的指标,常以土壤的干容重来表示。为研究

土壤结构对田间持水率的影响,选取寅武试验地点扰动土6种不同土壤结构的田间持水率数据进行分析。田间持水率随土壤干容重的变化曲线如图2所示。结果表明:随着土壤干容重逐渐增大,田间持水率增大,但是当土壤干容重增大到一定值时,田间持水率呈逐渐减小的趋势,田间持水率与土壤干容重符合二次函数关系。

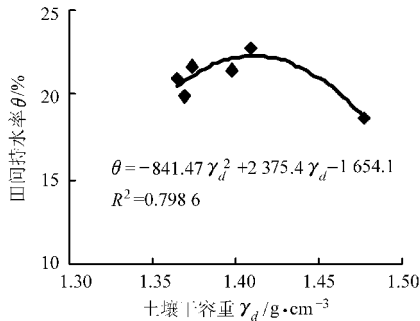


图2 田间持水率随土壤干容重的变化曲线

Fig. 2 Curve of field moisture capacity vs soil bulk density

从图2可看出,土壤干容重对田间持水率的影响可分为两个阶段,最高点对应的干容重为 $1.429 \text{ g/cm}^3$ ,田间持水率为 $22.9\%$ 。第一阶段,当土壤结构由疏松变得密实,田间持水率增加到最大田间持水率,土壤干容重与田间持水率呈正相关关系。土壤干容重增大,土壤中的细小孔隙会增多。土壤颗粒间的孔隙愈小,毛管力吸持力愈大,那么靠毛管力维系在土壤中保持和运动的水分量就愈大,田间持水率就愈高。

第二阶段,土壤干容重与田间持水率呈负相关关系,当土壤干容重增大,土壤结构就变得密实,即土壤颗粒间的孔隙过于细小,水分受到土粒吸附力的强烈影响,会阻碍水分在土壤孔隙间的运动,田间持水率不会再继续增大,反而随之减小。

### 2.3 土壤有机质

在土壤干容重基本相近的条件下,选择土壤质地为壤土的6组试验数据进行分析,田间持水率随土壤有机质质量分数的变化曲线如图3所示。结果表明,田间持水率随着土壤有机质质量分数的增加而增加,它们之间符合直线函数关系。说明土壤有机质对田间持水率有影响。

土壤有机质是土壤中的重要胶结物质,它不仅可以增加砂土的黏结性,而且会与矿物土粒形成有机矿物质复合体,在有机质参与下形成的土壤团粒,具有较强的力稳性和水稳性。有机质含量高的土壤团粒结构多且稳定性好,团粒表面吸水能力强,团粒内部又有大量的毛管孔隙,可以保存大量的水分,土壤的持水能力大。有机质质量分数低的土壤结构相对不好,或团粒结构稳定性差,遇到水作用后,表层

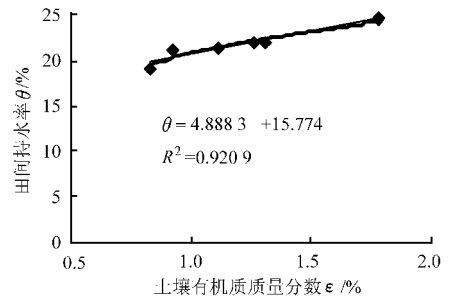


图3 田间持水率随土壤有机质质量分数的变化曲线

Fig. 3 Curve of field moisture capacity vs soil organic content

有些团粒容易溃散而变成较为均匀的小粒,沉积在一些大的孔隙中,导致土壤孔隙体积减小,土壤持水能力降低。

## 3 田间持水率的传输函数模型

### 3.1 传输函数模型结构

田间持水率受到众多因素影响,如上文分析的土壤质地、土壤干容重、土壤有机质等,这些因素的影响错综复杂,很难找到这些因素共同对田间持水率产生的影响。现根据大量试验数据,应用多元线性、非线性回归模型和BP神经网络模型,建立田间持水率与其影响因素之间的传输函数模型,最后选择预测精度高、应用方便的模型作为田间持水率的土壤传输函数模型。3种传输模型结构如下:

#### (1) 多元线性传输函数模型

$$\theta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_i X_i + \cdots + \beta_m X_m \quad (1)$$

式中  $\beta_i$ ——模型回归系数

$X_i$ ——第*i*个影响因素

$m$ ——变量个数  $\beta_0$ ——常数项

#### (2) 多元非线性传输函数模型

根据田间持水率与各影响因素的数量关系分析可知,它们之间符合二次函数关系、对数函数关系或直线函数关系等。在构造多元非线性预测模型结构时,首先考虑田间持水率与影响因素之间的关系,对所选自变量进行一些数学上的函数处理,然后再对处理后的数值进行预测。因此,构造模型

$$\theta = \beta_0 + \beta_1 \gamma_d + \beta_2 \gamma_d^2 + \beta_3 \ln \omega_1 + \beta_4 \ln \omega_2 + \beta_5 \ln \omega_3 + \beta_6 \exp \epsilon \quad (2)$$

式中  $\omega_1$ ——土壤砂粒质量分数, %

$\omega_2$ ——土壤粉粒质量分数, %

#### (3) BP神经网络传输模型结构

用BP神经网络预测田间持水率时采用单隐层神经网络结构,需要确定的参数有:网络层数、各层神经元个数、训练样本、传递函数、训练函数等。输入层神经元个数由田间持水率的影响因素确定,由上文分析可知,BP网络输入层取4或5个神经元。输出

层由预测目标个数确定,目标为田间持水率,故输出层取1个神经元,隐层神经元个数根据网络的收敛速度及稳定性等情况确定,隐含层传递函数为 Sigmoid 函数,输出层传递函数为 purelin 函数,训练函数为 Levenberg - Marquardt 算法的 trainlm。

### 3.2 传输函数模型建立

对于晋中盆地和临汾盆地的 320 组试验数据进行分析、整理,剔除一些不符合规律的数据,取 20 多组试验数据作为验证传输函数模型的精度,保留 290 组数据,利用上述 3 种传输模型对不同土壤条件下的田间持水率进行预测。在影响田间持水率的主导因素中,土壤质地可用砂粒质量分数、粉粒质量分数、黏粒质量分数 3 种形式表示,为了能反映多因素对其的综合影响,使预测结果更接近实测值,预测精度更高,在传输函数模型构建过程中采用不同的变量组合进行,变量组合方式见表 1。分析不同变量组合条件下的不同传输函数模型的预测结果,选择预测精度较高的模型作为田间持水率最终的传输

函数模型。

表 1 变量组合方式表

Tab. 1 Variable combinations

变量组合	土壤干容重	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	有机质含量
1	√	√			√
2	√		√		√
3	√			√	√
4	√	√	√		√
5	√		√	√	√
6	√	√		√	√

### 3.3 预测结果分析

#### 3.3.1 多元线性、非线性传输函数模型

根据试验观测值计算的不同变量组合条件下的  $F$  值和给定的显著水平对应的  $F_{\alpha}$  值、 $T$  值和给定显著水平的值  $T_{\alpha/2}$ 、预测相对误差和预测样本长度见表 2,表中  $T_1 \sim T_5$  表示各因素对田间持水率影响的显著性。

表 2 不同变量组合下田间持水率传输函数的参数估计及检验

Tab. 2 Estimation and validation parameters of field moisture capacity transfer function with different variable combinations

变量组合	$F$	$F_{0.05}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_{0.025}$	样本长度	相对误差/%	
1	线性	6.45	2.37	3.20	-8.67		5.05	1.96	285	9.77	
	非线性	5.27	2.37	0.77	-0.57	-9.13		2.08	1.96	285	9.60
2	线性	7.28	2.37	3.28		10.62		4.89	1.96	289	9.98
	非线性	4.78	2.37	1.64	-1.34	7.14		3.13	1.96	289	10.00
3	线性	3.81	2.37	4.23			-2.92	4.92	1.96	285	10.20
	非线性	4.02	2.37	0.36	-0.80		-5.49	3.66	1.96	285	9.90
4	线性	6.17	2.37	1.62	-2.67	1.14		4.63	1.96	284	10.30
	非线性	2.69	2.37	2.35	-2.19	-2.00	0.60	2.69	1.96	284	11.20
5	线性	5.21	2.37	3.31		7.19	-2.29	5.32	1.96	285	9.60
	非线性	3.48	2.37	2.88	-2.20	3.96	-5.15	3.54	1.96	285	10.70
6	线性	5.05	2.37	3.46	-7.15		-1.65	5.22	1.96	285	9.80
	非线性	4.53	2.37	2.41	-2.25	-7.33	-7.52	3.49	1.96	285	9.90

注:土壤干容重对其影响用二次函数表示,参数  $T_1$  有两个值。

由表 2 可以看出:

(1) 所有变量组合条件下的传输函数模型所计算的  $F$  值都大于相应的  $F_{0.05}$  值,说明这几种变量组合条件下田间持水率的传输函数都是显著的。预测样本长度都在 284 以上,说明数据样本具有一定的代表性,用线性、非线性传输函数模型预测田间持水率与实际情况比较接近,是一种可行的方法。

(2) 多元线性传输模型中,经过  $T$  检验法确定变量组合 4、6 部分变量影响不显著,与实际情况不符,因此说明这 2 种组合模型不合理;变量组合 1、2、3、5 下的多元非线性传输模型预测田间持水率是可行的。因为变量组合 5 的预测误差相对小一些,

考虑变量多一些,取变量组合 5 作为田间持水率的多元线性传输函数,该模型各变量回归参数估计见表 3。

(3) 多元非线性传输模型中,经过  $T$  检验法确定变量组合 1、2、3、4 是不合理的,只有变量组合 5、6 组合下的预测模型是合理的,因为变量组合 6 的预测误差较小,因此取变量组合 6 下的预测模型作为田间持水率的多元非线性传输函数,该非线性传输函数模型各变量回归参数估计见表 3。

(4) 多元线性和多元非线性传输模型预测精度基本相近, $T$  检验值基本相同,只是模型参数不同,这是由于在非线性模型中,自变量先进行数学函数

表3 田间持水率多元线性与非线性传输函数的参数

Tab.3 Parameters of multiple linear and nonlinear transfer function model for field moisture capacity

	预测变量	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
线性	$\gamma_d, \omega_2, \omega_3, \varepsilon$	0.120 8	-0.041 3	0.091 4	-0.076	0.008 7	
非线性	$\gamma_d, \gamma_d^2, \omega_1, \omega_3, \varepsilon$	7.045	57.90	-18.71	-4.680	-2.184	0.110 6

处理,再进行预测,导致了模型参数不同,但实质是一样的。说明2种模型预测结果一样,线性传输模型更简单直观,建议用多元线性模型预测田间持水率。

### 3.3.2 BP神经网络传输模型

田间持水率的BP神经网络模型训练阶段是利用Matlab 7.2神经网络工具箱编写BP神经网络训练程序实现的,训练样本选用上述290组实测数据,采用随机赋予0~1的小数的常规方法对网络权值进行初始化,输入层神经元为4个,隐层神经元为15个。在实际调试过程中,调用不同的训练函数,调整BP网络模型的参数,根据对训练次数、模拟结

果等比较分析,最后确定的训练函数为Levenberg-Marquardt算法的trainlm。采用该训练函数,通过1960次训练学习,BP网络模型的训练均方误差下降到0.000 1以下,达到了预先设置的精度。经统计分析表明,预测土壤田间持水率的输出值和实测值的相关系数为0.916,训练效果较好,预测相对误差为3.24%。

### 3.4 土壤传输函数模型验证

从20组验证试验数据中取出4组试验数据,利用上述传输函数模型,预测这4组不同土壤条件下的田间持水率。4组数据的土壤条件、3种传输函数预测值、实测值及相对误差见表4。

表4 不同土壤条件下的田间持水率传输函数的预测值与实测值

Tab.4 Predicted value and measured value of field moisture capacity under different soil conditions

土壤干容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粉粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	有机质 质量分数/%	实测 值/%	预测值/%			相对误差/%		
					线性	非线性	BP	线性	非线性	BP
1.547	41.00	13.00	1.51	23.00	22.55	21.85	23.17	1.96	5.0	0.74
1.299	56.45	14.02	0.37	21.48	21.86	22.29	21.55	1.77	3.77	0.32
1.471	43.39	9.47	0.94	21.15	22.97	22.09	22.19	8.60	4.44	4.90
1.376	50.22	8.73	0.67	20.65	22.28	22.42	20.98	7.89	8.57	1.59

从表4中可以看出:

(1) 利用不同的土壤传输函数预测田间持水率,结果表明预测值与实测值相差不大,且预测误差都小于10%。说明3种传输函数模型都是可行的。

(2) 多元线性和多元非线性模型的预测误差比较接近,只是回归预报模型的系数不同,这是由于多元非线性模型对预测变量进行数学函数处理而导致的,其他自变量组合条件下的预测误差也说明这一点,说明这2种方法预测精度结果一致,用多元线性传输模型更简单一些。

(3) BP神经网络传输模型预测误差远小于多元线性和非线性传输模型,说明用BP神经网络传输模型预测田间持水率是一种比较好的方法。

## 4 结论

(1) 影响土壤田间持水率的主要因素有土壤质

地、土壤结构、土壤有机质含量等。田间持水率随着土壤黏粒含量的增加而增加,它们之间符合对数函数关系;田间持水率随着土壤有机质含量的增加而增大,它们之间符合直线函数关系。田间持水率随着土壤干容重的变化而有不同的变化,存在一个最大田间持水率,它们之间符合开口向下的二次曲线函数关系。

(2) 基于290组试验数据,引入土壤干容重、土壤砂粒、粉粒含量、黏粒含量和土壤有机质含量等变量,经过多种变量组合形式,采用3种传输函数模型,对土壤田间持水率进行预测。最后经模型验证,选用土壤干容重、土壤粉粒含量、黏粒含量和有机质含量4个变量,多元线性与非线性传输函数模型预测结果一样,BP神经网络传输函数预测田间持水率效果最好。

## 参 考 文 献

- 李小刚. 甘肃景电灌区盐化土壤的吸湿系数与凋萎湿度及其预报模型[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 498~504.  
Li Xiaogang. Hygroscopic coefficient and wilting point of salt-affected soils in Jingdian irrigation zone, GanSu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 498~504. (in Chinese)

- 2 Cornelis W M, Ronsyn J, Meirvenne M. Evaluation of pedo-transfer functions for predicting the soil moisture retention curve [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 638 ~ 648.
- 3 Wosten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J. Pedo-transfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3~4): 123 ~ 150.
- 4 缴锡云, 王文焰, 雷志栋, 等. 估算土壤入渗参数的改进 Maheshwari 法 [J]. 水利学报, 2001, 32(1): 62 ~ 66.  
Jiao Xiyun, Wang Wenyan, Lei Zhidong, et al. Improved Maheshwari method for estimating infiltration parameters of soil [J]. Hydraulic Engineering, 2001, 32(1): 62 ~ 66. (in Chinese)
- 5 李雪转, 樊贵盛. 土壤入渗积水时间预测模型研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 269 ~ 274.  
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Models of forecasting infiltration-waterlogging time in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 269 ~ 274. (in Chinese)
- 6 王改改, 张玉龙. 土壤传递函数模型的研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 99 ~ 101.  
Wang Gangan, Zhang Yulong. Advances in model of soil pedo-transfer functions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 99 ~ 101. (in Chinese)
- 7 王黎军, 丁小刚. 土壤含水率的预测模型 [J]. 中国农村水利水电, 2010(4): 79 ~ 80.  
Wang Lijun, Ding Xiaogang. Predictive model of soil moisture [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(4): 79 ~ 80. (in Chinese)
- 8 王维汉, 缴锡云. 畦灌土壤入渗参数估算的线性回归法 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 468 ~ 471.  
Wang Weihai, Jiao Xiyun. Linear regression approach for estimating soil infiltration parameters of border irrigation [J]. Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 468 ~ 471. (in Chinese)
- 9 张晓文, 杨煜普, 许晓鸣. 神经网络传输函数的功能分析与仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(10): 176 ~ 178.  
Zhang Xiaowen, Yang Yupu, Xu Xiaoming. Genetic optimization for neural network evolving with function based coding [J]. Computer Simulation, 2005, 22(10): 176 ~ 178. (in Chinese)
- 10 曹崇文. 利用土壤传输函数确定入渗参数的方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.  
Cao Congwen. Method study on determining soil infiltration parameters with pedo-transfer functions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 11 李雪转, 樊贵盛. 非充分供水与充分供水入渗模型参数间关系试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 44 ~ 49.  
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Experiment on relations of infiltration model parameter in non-sufficient and sufficient water supplies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 44 ~ 49. (in Chinese)
- 12 王改改, 张玉龙, 虞娜. 多数据源土壤传递函数模型在水分模拟中的不确定性 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 45 ~ 50.  
Wang Gaigai, Zhang Yulong, Yu Na. Soil pedotransfer function of multiple data source and its uncertainty in water simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 45 ~ 50. (in Chinese)
- 13 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 51 ~ 56.  
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua, et al. Pedotransfer functions of soil water retention curve based on joint multifractal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 51 ~ 56. (in Chinese)

(上接第 90 页)

- 15 李怀恩, 同新奇, 张康, 等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 69 ~ 73.  
Li Huaien, Tong Xinqi, Zhang Kang, et al. Experimental research on the soil moisture regulation of seabuckthorn plant flexible dams [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 69 ~ 73. (in Chinese)
- 16 胡建忠, 杜文嫣, 殷丽强, 等. 砒砂岩区沙棘人工林的萌蘖能力 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 26 ~ 30.  
Hu Jianzhong, Du Wenyan, Yin Liqiang, et al. Sprouting capacity of artificial hippophae rhamnoides forest in soft sandstone areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 17 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 含沙量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2 968 ~ 2 973.  
Tang Chaosheng, Shi Bin, Gao Wei, et al. Study on effects of sand content on strength of polypropylene fiber reinforced clay soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 26(Supp. 1): 2 968 ~ 2 973. (in Chinese)
- 18 刘月梅, 张兴昌. EN-1 对黄土性固化土水分垂直入渗特征的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 65 ~ 73.  
Liu Yuemei, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on water vertical infiltration characteristics for loess stabilized soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 65 ~ 73. (in Chinese)