

# 浅地下水埋深条件下土壤水盐动态BP网络模型研究

乔冬梅, 史海滨, 霍再林

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 针对浅地下水埋深条件下作物生育期内根系层土壤水盐动态模拟中存在的问题, 将人工神经网络引入水盐动态的模拟和预报中, 建立了根系活动层0~60 cm和0~100 cm深度内土壤水盐动态的BP网络模型。结果表明, 以生育时段初平均土壤含水率、平均土壤盐分指标、地下水水位埋深、地下水盐分指标、时段内水面蒸发量、降雨量(包括灌水量)、生育期日序列7个因素为输入因子, 以生育时段末平均土壤水分、平均土壤盐分指标为输出因子的BP网络模型可有效表征土壤水盐动态及其影响因素之间的内在复杂关系, 并且有较高的精度。该研究为分析浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐动态规律的分析提供了一种有效可行的方法, 是对传统土壤水盐动态研究的补充。

**关键词:** 水盐动态; BP网络; 模型; 浅地下水埋深

**中图分类号:** S274.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)09-0042-05

乔冬梅, 史海滨, 霍再林 浅地下水埋深条件下土壤水盐动态BP网络模型研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 42-46

Qiao Dongmei, Shi Haibin, Huo Zailin. BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 42-46 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

在盐渍化地区, 土壤水盐状况是作物生长的主要影响因素, 土壤水盐动态的研究可为节水调盐的研究和实施提供理论依据。目前, 对土壤水盐动态研究主要有两种方法: 其一是以农田水盐平衡原理为基础的模拟模型; 其二是以土壤水分运动方程和溶质运移方程为基础的模拟模型。以水盐平衡原理为基础的分析方法对于地下水作用条件下土壤水盐动态模拟往往会遇到一定的困难, 而土壤水分运动方程及溶质运移方程的求解因计算参数多、分析方法复杂, 在田间土壤水盐动态预测中运用极不方便。针对解析法在水盐动态研究中可操作性差的弱点, 许多研究者将人工神经网络技术运用到了水盐动态预测研究中。尚松浩(2002)建立了冬小麦田间墒情预报的BP网络模型<sup>[1]</sup>, 得出BP网络可有效表征田间水分变化与其影响因素之间的关系, 但模型未涉及对盐分的预报, 而且研究中地下水没有参与建模。屈忠义(2002)利用人工神经网络技术建立了某一灌溉区域的土壤水盐动态模型<sup>[2]</sup>。该模型考虑了众多因素, 对区域水盐年际变化评估、调控有指导意义, 但模型是针对区域建立的, 而且预报时间段较长, 不合作物生长期间内农田土壤水盐动态分析。浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐变化受多种因素的影响, 而且土壤水分、盐分之间存在着复杂的耦合作用。本文针对浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐动态变化的复杂

性, 在上述研究的基础上, 充分利用人工神经网络对系统信息获取的自动化、知识表达方式的普适性及其非线性等特点, 建立了浅地下水埋深条件下作物生育期内0~60 cm和0~100 cm土层深度内土壤水盐动态变化的BP网络模型。

## 1 研究方法

### 1.1 试验条件及研究方法

本研究采用内蒙古河套灌区2003年节水灌溉试验资料, 试验田设在内蒙古河套灌区沙渠区试验站光荣二队试验地。该地区地下水埋深较浅, 各灌域多年地下水埋深5~11月平均1.46 m, 全年平均1.68 m。土壤存在不同程度的盐碱化, 地下水与土壤中的水分、盐分交换频繁。试种作物为新疆产康地115号油菜, 该作物具有耐盐耐旱的特性, 生育期110 d左右。由于当地地下水埋深较浅, 为了防止土壤水及地下水的相互影响, 在各小区之间的田埂处理设1 m深的塑料布。

试验田附近设有观测井对地下水水位及水质进行观测, 并设有农田微气象站对各气象因子进行测定。土壤含水率和土壤盐分指标( $EC_g$ )分层测定, 每10 cm为1个层次, 每周测定1次, 测定深度都为1 m。土壤含水率采用烘干法测定, 土壤盐分( $EC_g$ )采用土水比为1:5的土壤溶液速测。

### 1.2 生育期内降雨及灌溉情况

内蒙古河套灌区降雨主要集中在7~8月份, 如图1a所示, 在作物生育期内降雨次数较多, 降雨累积量较大。灌水和降雨对土壤水盐的影响是一致的, 由于本年度降雨量较大, 试验研究中只灌一次水, 于8月4日进行灌溉, 各小区因处理不同, 灌水量也有所不同, 灌水量范围在512.7~763.95 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>之间, 而且灌溉水的矿化度较小, 为了便于分析将灌溉水量当做降雨量处理。灌溉水量用水表量测, 降雨资料来源于农田微气象站。

收稿日期: 2004-12-08 修订日期: 2005-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(50269002)

作者简介: 乔冬梅(1978-), 女, 内蒙古包头人, 主要从事节水灌溉新技术方向的研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018

通讯作者: 史海滨(1961-), 男, 山西太谷人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用方面研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018, Email: shi\_haibin@sohu.com

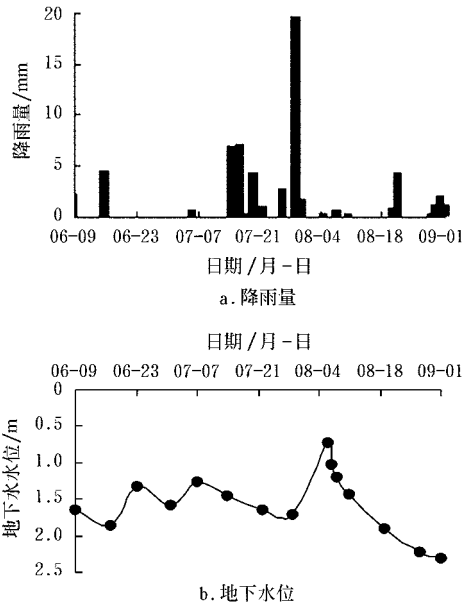


图1 生育期内降雨量和地下水变幅  
Fig 1 Groundwater table and distribution of rain in growing season

1.3 地下水水位埋深动态变化

试验区地下水埋深较小, 如图1b所示, 在作物整个生育期内地下水埋深保持在0.72 m到2.3 m之间, 对应当年的降雨资料可看出: 在油菜整个生育期内地下水水位埋深随降雨和灌溉(2003年8月4日)而变化, 总体上保持在较高水位, 这也是导致当地土壤盐渍化的主要原因。

1.4 生育期内土壤水盐变化范围

试验田1 m土层内的初始含盐( $EC_e$ )范围在0.26~0.34 m s/cm, 可代表河套灌区轻度含盐土壤, 土壤质地为砂壤土, 田间持水量为27.8% (占干土重)。生育期内土壤水分与盐分状况见表1。

表1 生育期内0~100 cm深度内土壤水盐动态变化

Table 1 Dynamic variation of soil water-salt in growing season at the depth from 0 to 100 cm

生育时段 /月-日	05-28~ 06-09	06-09~ 07-01	07-01~ 07-14	07-14~ 08-01	08-01~ 08-12	08-12~ 09-01
质量含水率 /%	24.13~ 27.48	22.72~ 26.79	21.76~ 24.97	20.20~ 23.26	18.99~ 23.91	18.41~ 23.98
EC /m s · cm <sup>-1</sup>	0.26~ 0.34	0.15~ 0.38	0.17~ 0.30	0.18~ 0.27	0.12~ 0.19	0.18~ 0.23

2 土壤水盐动态BP网络模型的建立及检验

2.1 输入、输出因子、训练样本的确定

为了模型的普遍应用, 本文分别建立了作物根系活动层0~60 cm、0~100 cm土层内的土壤水盐动态BP网络模型。对于本研究区域, 作物根系活动层内土壤水盐动态变化主要受生育时段初土壤水盐、地下水盐状况、生育时段内降雨量、灌水量、作物蒸发蒸腾量的影响, 而作物蒸发蒸腾量取决于气象因素、土壤水分及作

物生长情况, 为了便于模型的应用, 采用水面蒸发量表征气象因素, 生育期日序列表征作物生长情况。由于土壤水盐运移具有耦合作用, 所以本研究将同时考虑水分运动和盐分运移。0~60 cm土层内的模型输入因子确定为生育时段初60 cm深度内6层的平均土壤质量含水率 $\theta_{0.6初}$ 、60 cm深度内6层的平均土壤含盐指标 $EC_{s0.6初}$ 、地下水水位埋深、地下水含盐指标 $EC_s$ 、水面蒸发量 $E_0$ 、生育期日序列、时段内降水量(包括灌水量), 模型输出因子确定为生育时段末60 cm深度内6层的平均土壤质量含水率 $\theta_{0.6末}$ 、60 mm深度内6层的平均土壤含盐指标 $EC_{s0.6末}$ 。0~100 cm土层内模型的输入因子和输出因子与0~60 cm土层内模型的输入和输出因子大致相同, 所不同的是0~100 cm土层内模型的输入和输出的土壤因子采用的是100 cm深度内10层的平均值 $\theta_{0.1}$ 、 $EC_{s1.0}$ , 而不是60 cm深度内6层的平均值 $\theta_{0.6}$ 、 $EC_{s0.6}$ , 其它输入因子和输出因子与0~60 cm土层内的相同。

样本数据来源于节水灌溉试验田11个处理小区的试验资料, 试验中设计了3个缺水生育阶段(苗期、现蕾期、开花期), 3种水分胁迫处理(70% $\theta$ 、55% $\theta$ 、40% $\theta$ )和2个对照处理。将油菜生育期划分为6个时段(见表1)。共有66个样本参与网络的训练、检验, 其中48个为训练样本, 18个为检验样本。

2.2 网络训练及模型的建立

理论已经证明, 3层BP网络可以逼近任何有理函数, 而且被成功应用于多个领域的预报问题中。本研究中对3层BP网络进行训练, 传递函数选择目前常用的组合, 即隐含层采用双曲正切S型, 输出层采用线性传递函数。运用上述确定的训练样本采用快速BP算法(0~60 cm土层内模型的初始学习速率 $lr=0.05$ , 0~100 cm土层内模型的初始学习速率 $lr=0.1$ )对网络进行训练, 通过调整隐含层神经元个数来确定网络结构, 最终确定隐含层神经元个数为6时, 网络具有误差收敛速度快, 拟合误差小, 泛化能力强的优点。所以该水盐动态BP网络的拓扑结构为7-6-2。经网络训练所得权重、阈值列于表2、3。

经过网络训练0~60 cm土层内土壤水盐动态BP网络模型输入层确定为7个因子, 对上文所确定的0~60 cm土层内模型的输入因子隐含层节点数为6, 输出层确定为2个因子, 即上文中所确定的0~60 cm土层模型的输出因子。0~100 cm土层内土壤水盐动态BP网络模型结构和0~60 cm土层内的完全相同, 所不同的是0~100 cm土层内模型的输入和输出的土壤因子采用的是100 cm深度内10层的平均值 $\theta_{0.1}$ 、 $EC_{s1.0}$ , 而不是60 cm深度内6层的平均值 $\theta_{0.6}$ 、 $EC_{s0.6}$ , 其它输入因子和输出因子与0~60 cm土层内的相同。输入层、隐含层、输出层因子分别经权阈值及传递函数通过以下公式连接。

$$y_j = f_1 \left( \sum_{i=1}^7 w_{ij} x_i - b_j \right), \quad i = 1, \dots, 7, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

$$O_l = f_2 \left[ \sum_{j=1}^6 w_{jl} y_j - b_l \right], l = 1, 2 \quad (2)$$

式中  $x_1 \sim x_7$ ——分别为输入因子: 生育时段初平均土壤质量含水率、地下水水位埋深, 阶段水面蒸发量、降雨量(包括灌水量), 生育期日序列, 阶段初平均土壤盐分指标( $EC_s$  值)、地下水盐分指标( $EC_g$  值);  $y_1 \sim y_6$ ——6个隐含结点;  $O_1, O_2$ ——输出因子: 生育时段末

平均土壤质量含水率、平均土壤含盐指标;  $w_{ij}$ ——连接输入层与隐含层的权值;  $b_j$ ——连接输入层与隐含层的阈值;  $w_{jl}$ ——连接隐含层与输出层的权值;  $b_l$ ——连接隐含层与输出层的阈值。

模型用于浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐动态预报时, 可通过相应的输入因子驱动模型, 得到时段末土壤水分、盐分指标值。

表2 浅地下水埋深条件下0~60 cm 深度内土壤水盐动态BP 网络模型权、阈值

Table 2 Threshold value and weight of BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table at the depth from 0 to 60 cm

隐含 结点	w 1							$b_1$	w 2		$b_2$
	土壤含水率	地下水水位	水面蒸发	降雨量	时间序列	土壤盐分	地下水盐分		土壤 EC	土壤含水率	
1	- 5.1222	2.4151	0.273	- 1.7988	0.5599	- 1.0237	1.217	3.4075	- 0.5668	1.3892	
2	1.8881	- 0.6449	- 2.2367	- 0.1028	- 0.4907	- 0.7021	- 1.0352	3.1473	1.5874	1.542	
3	0.5586	- 1.5684	- 0.9195	0.4189	- 0.0491	- 0.0769	0.1029	2.4795	- 5.7892	- 0.6395	3.7967
4	1.6608	- 1.0537	1.1466	- 0.7999	- 2.6744	1.0297	1.7305	- 4.0926	- 0.730	271	0.0297
5	- 0.3468	- 0.8657	2.1649	3.14	1.0546	- 4.2085	- 2.3502	0.2003	- 0.1258	0.4512	
6	- 1.0435	1.8823	- 1.0605	- 0.5113	1.1029	- 1.8537	0.2933	3.1331	- 0.4406	- 2.1525	

表3 浅地下水埋深条件下0~100 cm 深度内土壤水盐动态BP 网络模型权、阈值

Table 3 Threshold value and weight of BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table at the depth from 0 to 100 cm

隐含 结点	w 1							$b_1$	w 2		$b_2$
	土壤含水率	地下水水位	水面蒸发	降雨量	时间序列	土壤盐分	地下水盐分		土壤 EC	土壤含水率	
1	- 3.216	0.968	- 3.682	2.515	- 0.149	2.586	0.216	- 0.846	- 3.357	- 0.888	
2	- 4.142	- 0.932	0.682	- 0.228	- 1.494	- 0.275	1.053	- 3.846	3.859	- 1.077	
3	- 0.644	0.195	- 0.765	1.127	- 1.151	1.525	0.833	- 0.639	- 3.982	1.685	3.174
4	- 0.261	- 0.169	0.169	0.573	0.800	- 1.879	1.272	0.119	- 3.755	1.045	- 0.635
5	4.925	- 2.302	- 1.252	0.276	- 4.082	- 4.929	- 0.246	- 0.560	- 0.222	0.565	
6	3.581	0.685	2.054	- 0.328	- 1.088	- 2.612	0.765	0.329	- 3.068	- 0.804	

2.3 模型检验

将检验样本的输入因子代入所建立的土壤水盐动态BP 网络模型, 得到不同生育时段末0~60 cm 和0~100 cm 深度内土壤平均质量含水率  $\theta$  和平均盐分指标  $EC_s$

检验结果(图2、3)表明, 本研究建立的BP 网络模型用于预报浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐动态有较高的精度。除个别点外, 总体上模型预报值与实测值接近, 0~60 cm 深度内土壤含水率的平均检验误差为 7.1%, 而土壤盐分指标  $EC_s$  的平均检验误差

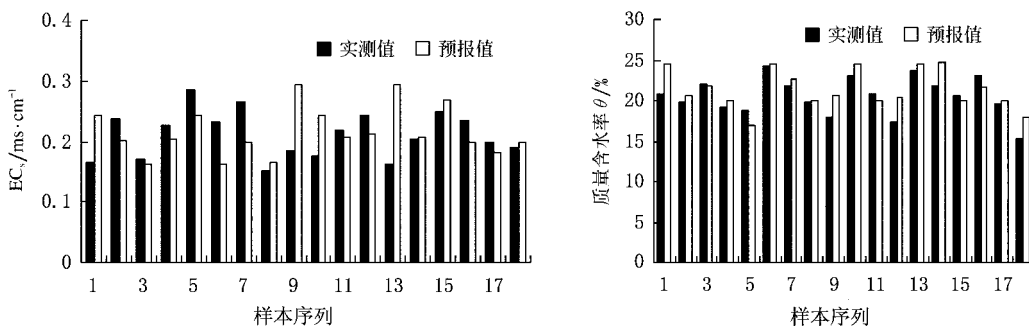


图2 0~60 cm 深度内土壤水盐动态BP 网络模型检验图

Fig 2 Test of BP network model for soil water-salt movement at the depth from 0 to 60 cm

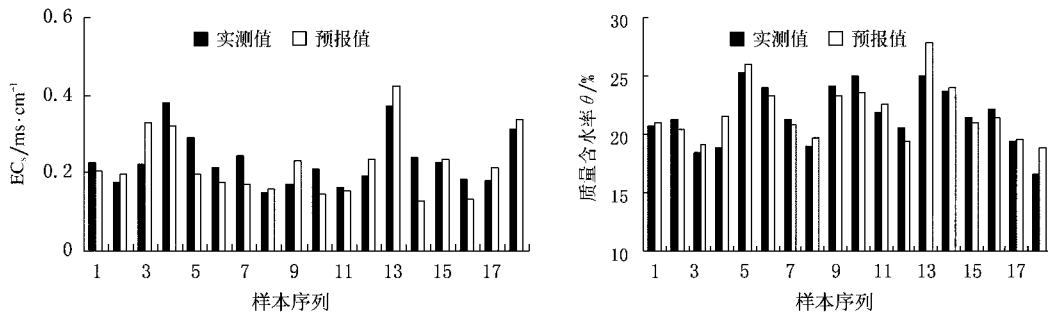


图3 0~100 cm 深度内土壤水盐动态BP网络模型检验图

Fig 3 Test of BP network model for soil water-salt movement at the depth from 0 to 100 cm

比含水率的大, 达到21.6%。0~100 cm 深度内土壤含水率的平均检验误差为4.7%, 土壤盐分指标 $EC_e$ 的平均检验误差达到21.4%。盐分的平均检验误差较水分的大, 这是由于土壤盐分运移机理远比水分运动机理复杂而引起的。0~60 cm 深度内模型的检验误差较0~100 cm 深度内的大, 这主要是由于0~60 cm 土层内的土壤水盐垂向运移较活跃, 空间变异性也较大, 因而导致了这个层次内检验误差的增大。由于本研究中建立的土壤水盐动态模型输入因子包含了影响水盐运动的主要因素, 而且模型可以同时输出土壤水分和土壤盐分指标, 基于所研究内容属于大田试验资料, 以上所得精度可满足浅地下水埋深条件下作物生育期内土壤水盐动态预报的要求, 因此所建模型合理。

### 3 结论

针对浅地下水埋深条件下作物生育期内农田土壤水盐动态变化复杂的特点和解析法在水盐动态研究中可操作性差的弱点, 将BP网络引入浅地下水埋深条件下作物生育期内水盐的动态模拟及预报中。为了使模型得到普遍的应用, 分别建立了0~60 cm 和0~100 cm 深度内土壤水盐动态的BP网络模型。通过网络训练, 0~60 cm 和0~100 cm 深度内土壤水盐动态的BP网络模型的拓扑结构确定为7-6-2; 经检验0~60 cm 和0~100 cm 深度内土壤含水率的平均检验误差较土壤盐分的平均检验误差小, 这是由于土壤盐分运移机理远比水分运动机理复杂而引起的。而且0~60 cm 深度内的检验误差较0~100 cm 深度内的大, 这主要是由于0~60 cm 土层内的土壤水盐垂向运移较活跃, 空间变异性也较大; 0~60 cm 和0~100 cm 深度内土壤水盐动态模型输入因子包含了影响水盐运动的主要因素, 而且模型可以同时输出土壤水分和土壤盐分指标, 因此模型可有效

表征浅地下水埋深条件下作物生育期内农田土壤水盐动态变化与其影响因子之间的内在关系; 该模型将土壤水盐动态作为一个整体, 充分考虑了水盐耦合效应, 实现了土壤水盐动态预报的统一, 是传统水盐预报的补充, 为浅地下水埋深条件下土壤水盐动态预报和灌区灌溉管理开辟了新路。

### [参 考 文 献]

- [1] 尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋. 冬小麦田间墒情预报的BP神经网络模型[J]. 水利学报, 2002, (4): 60-63
- [2] 屈忠义, 陈亚新, 史海滨. 区域土壤水盐动态的人工神经网络预测研究[J]. 灌溉排水, 2002, (4): 40-44
- [3] 胡安焱, 高瑾, 贺屹. 干旱内陆灌区土壤水盐模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 726-729
- [4] 张展羽, 赖明华, 朱成立. 非充分灌溉农田土壤水分动态模拟模型[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 21-25
- [5] 徐力刚, 杨劲松, 张妙仙. 作物种植条件下的土壤水盐动态变化研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 170-174
- [6] 李新, 李国振. 塔里木河上游地区土壤水盐变化与作物的关系[J]. 干旱区地理, 1997, 20(4): 11-16
- [7] 张志鹏, 曹庆波. 应用人工神经网络方法评定作物生产系统中指标的权重[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(1): 1-4
- [8] 郭新宇, 张志鹏. BP神经网络在作物生育动态模拟中的应用[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 124-130
- [9] Brusseau M L, Rao P S C. Modeling solute transport in structured soil[J]. A Review, 1990, 46: 169-192
- [10] Chopart J L, Vauclin M. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 1377-1384
- [11] Behmans C, Wesseling J G, Feddes R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil[J]. SWA-TRE J Hydro1(Amsterdam), 1983, 63: 271-286

## BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table

Qiao Dongmei, Shi Haibin, Huo Zailin

*(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)*

**Abstract** Aiming at some problems of modeling soil water-salt movement with a shallow groundwater table, a BP network model was introduced for modeling and forecasting field soil water-salt in the crop root region at the depth from 0 to 60 cm and from 0 to 100 cm. The BP network input factors are the mean values of soil water content and salinity in preliminary period, groundwater level and salinity, evaporation of water surface, rainfall (including the amount of irrigation) during the period, and the day series of crop growth duration, the output factors are the mean values of soil water content and salinity. The results show that BP network model may deal with the complex relation well between soil water-salt movement and its influencing factors. The model may forecast field soil water-salt movement accurately. This study offers an effective and feasible method for analyzing soil water-salt movement and is a supplement for the traditional dynamic study of soil water-salt movement.

**Key words:** water-salt movement; BP network; model; shallow groundwater table