文章编号:1000-7601(2016)02-0212-06

# 基于 GA – BP 网络的西藏高海拔地区 $ET_0$ 预报

汤鹏程<sup>1</sup>,徐 冰<sup>1</sup>,张伟明<sup>2</sup>,高晓瑜<sup>3</sup>,宋一凡<sup>1</sup>

2.河北省天和咨询有限公司,河北,石家庄 050021; 3.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要:选择那曲县(海拔4450 m)、改则县(海拔4700 m)作为西藏高原气候典型地区,通过遗传 - 神经(GA - BP)网络训练,应用1983—2012年30年的数据建立GA - BP 网络模型,采用前一年的气象资料预报当年的参考作物腾发量,当2010—2012年连续3年的预报值均满足设定的阈值下限时,输出预测结果,这样使得模型在保证了预报精确度的同时兼具预报稳定性。结果发现:经GA - BP 网络确定的2010—2012年3年模型预报值与真实值间的线性关系明显,决定系数 R<sup>2</sup>分别达到 0.8805、0.9363、0.9167,斜率接近于1;多年的模拟预报值与实际值之间的相对误差均处于 0.1 以下,小于设定的阈值下限。对于易获得气象资料的地区,研究成果可对高海拔地区未来月际间作物需水量的变化进行预判,进而为将来灌溉制度的制定提供依据;对于缺测气象资料的地区,通过本文建立的网络模型,结合气象条件类似的站点,可在大时间尺度下对该地区 ET<sub>0</sub>变化趋势进行模拟,同时对下年度灌溉制度的拟定提供指导。

关键词:参考作物蒸腾蒸发量(*ET*<sub>0</sub>); *ET*<sub>0</sub>预报;遗传神经网络模型;高海拔地区;西藏 中图分类号: S163 文献标志码: A

## $ET_0$ forecast on the basis of GA – BP network in high altitude areas of Tibet

TANG Peng-cheng<sup>1</sup>, XU Bing<sup>1</sup>, ZHANG Wei-ming<sup>2</sup>, GAO Xiao-yu<sup>3</sup>, SONG Yi-fan<sup>1</sup>

Institute of Water Resources for Pastoral Area of IWHR, Hohhot, Inner Mongolia, 010020, China;
 The Tianhe Consulting Limited Company of Hebei, Shijiangzhuang, Hebei 050021, China;

3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083, China)

Abstract: As the typical climate area of Tibet plateau, Nagqu County (4 450 m above sea level) and Gerze County (4 700 m above sea level) were chosen to build a Genetic Algorithm – Back Propagation (GA – BP) model through the GA – BP network training using data from 1983 to 2012. The  $ET_0$  was obtained by the monthly meteorological data from the previous year. When the forecast values for consecutive years between 2010 and 2012 met the threshold limit set, the forecast values would be exported, which could ensure accuracy and stability of the forecast. The results showed that the there was a great linear relationship between the predicted values by GA – BP model and the real values, reaching  $R^2$  values of 0.8805, 0.9363 and 0.9167, respectively. The relative error produced by predicted values and real values were all smaller than 0.1, which was less than the threshold. In conclusion, the model can be used to predict the  $ET_0$  of different months during crop growth period, and then the inter-monthly water demand of crops can be estimated in the future. It can further provide the basis for future irrigation schedule. For areas lacking meteorological data, based on the network model discussed in this article, the  $ET_0$  variation in these areas can be simulated within a big time frame by referring to other stations with similar meteorological conditions, which can provide guidance for the irrigation schedule of next year.

**Keywords**: reference crop evapotranspiration  $(ET_0)$ ; prediction of  $ET_0$ ; genetic algorithm-back propagation model; high altitude areas; tibet

西藏高海拔地区位于我国边疆,由于特殊的自

然地理环境,加之历史欠账较多,与内蒙古、新疆等

收稿日期:2015-05-30

<sup>(1.</sup>水利部牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020;

基金项目:国家自然科学基金项目"西藏高海拔地区 ET<sub>0</sub> 计算公式试验率定与作物系数推求"(51579158);中国水科院科研专项基金项目"西藏地区灌溉饲草料地节水丰产集成模式研究"(MK2014J01)

作者简介:汤鹏程(1988—),男,河北石家庄人,助理工程师,主要研究方向为节水灌溉技术。E-mail:tangpc1988@163.com。

其他民族地区相比,水利科研严重滞后于工程建设。 关于参考作物腾发量(*ET*<sub>0</sub>)的计算方面,主要表现 在气象站点有限,计算数据缺失。对于中长期参考 作物腾发量(*ET*<sub>0</sub>)的计算及其预报是自然与技术科 学领域内的一个难题,对其进行深入研究具有十分 重要的理论与实际意义<sup>[1]</sup>。造成中长期 *ET*<sub>0</sub> 预报 研究困难的主要原因是 *ET*<sub>0</sub>本身的计算具有复杂 性及其不确定性<sup>[2]</sup>。复杂性表现在正确计算 *ET*<sub>0</sub> 需要对多种气象数据进行观测,通过复杂的计算推 导得出理论值<sup>[3]</sup>;不确定性表现在对 *ET*<sub>0</sub>进行预报 的气象因子是不确定的、多变的,比如风速、降雨、日 照等<sup>[4]</sup>。不仅预报对象与预报因子间存在高度复杂 的非线性关系,预报因子与预报因子间也存在复杂 的非线性关系<sup>[3-5]</sup>。

在国内已有研究中对于 *ET*<sub>0</sub> 预报多局限于简 单的公式模拟,或是由气象因素估算 *ET*<sub>0</sub>,预报模型 通常基于 FAO 彭曼公式或类似公式的改良与拟 合<sup>[6-9]</sup>。同时基于气象因素的 *ET*<sub>0</sub> 预报模型以中 短期为主,本文针对参考作物腾发量的计算特点,基 于 GA – BP 网络,利用前一年固定月份的气象资料, 对当年同月份 *ET*<sub>0</sub> 进行中长期预报,预报效果较 好,结果可靠;对于易获得气象资料的高海拔地区, 本模型研究成果可对未来月际间作物需水量的变化 进行预判,进而为将来灌溉制度的制定提供依据;对 于不易获得气象资料的地区,通过本文建立的网络 模型,同时结合气象条件类似的站点,可在大时间尺 度下对该地区 *ET*<sub>0</sub> 变化趋势进行模拟,同时对下年 度灌溉制度的拟定提供指导。

1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区典型高原气候区 – 那曲 县(海拔 4 450 m)与改则县(海拔 4 700 m),分别地 处西藏地区中部与北部,地貌类型为高原山地,平均 海拔 4 450 m 以上,属高原亚寒带季风半湿润气候 区,高寒缺氧,气候干燥,年平均气温为 – 2.2℃,降 雨主要集中在 6—9 月份,多年平均降水量 410 mm, 多年平均日照时数为 2 886 h 以上。全年无绝对无 霜期,每年十月至次年五月为风雪期和土壤冻结期, 六月到八月为作物生长期。年日照百分率在 60% 以上,光照资源充足,热量不足。

#### 1.2 研究方法

1.2.1 GA-BP网络建模思路 事物间的联系是普

遍存在的,尽管很多关系是复杂的、多样且多变的<sup>[10]</sup>。单纯的线性关系很难准确地描述某两者之间的联系,在复杂多变的非线性关系中如何寻找更加准确的预报模型是当前预报研究的重点<sup>[11-15]</sup>。为了防止神经网络(BP 网络)容易陷入局部极小影响的缺陷发生,本文通过遗传算法对 BP 网络权阈值进行遗传优化(GA 优化),建立 GA – BP 网络模型<sup>[16-17]</sup>。

GA – BP 网络模型采用三层神经网络,具有非 常强的非线性处理能力,理论上三层 BP 网络结构, 可以通过任意的计算精度逼近任意的输入与输出的 映射。将经过筛选用于计算的 *k* 个预报因子作为 神经网络预报模型中的自变量(*x*),因变量 *y* 作为 期望的网络输出预报项,首先为 GA – BP 网络确定 个体串长(*L*):

 $L = k \times g \pm g \pm g \times n \pm n$  (1) 式中,k为输入节点个数;g为隐层结点个数;n为输 出节点个数。

其次对 BP 神经网络的权阈值进行遗传编码, 同时我们将其作为遗传算法的父代,所以种群中的 每个单独个体均包含了一个 BP 网络所有的权阈 值,可以通过适应度函数对个体的优劣性进行评价。

然后,本文通过选择、交叉和变异操作寻找到最优的适应度值对应的个体,这个被寻找到的最优个体即为 GA – BP 网络最优权阈值。

最后利用优化后的 GA – BP 网络对预报因子进行训练,对预报对象进行预测。

1.2.2 GA - BP 网络建模流程示意图 GA - BP 网络算法流程如图 1 所示。

1.2.3 GA - BP 网络建模计算 GA - BP 网络建模 计算具体计算步骤如下<sup>[18-19]</sup>:

1) 编码。

GA - BP 网络算法采用实数编码,其中每个染 色体由隐含层阈值、输入层与隐含层连接权值、隐含 层与输出层连接权值和输出层阈值四部分组成。

2) 适应度函数。

本文把期望输出和预测输出之间的绝对误差值 作为个体适应度(ada.),其计算公式为:

$$ada. = m\left[\sum_{i=1}^{n} abs(y_i - o_i)\right]$$
(2)

式中,m 为系数,取0~1之间的值;n 为网络输出节 点的个数; $o_i$  为第i 个节点的预测输出; $y_i$  为神经网 络第i 个节点的期望输出。



图 1 算法流程图 Fig.1 Algorithm flow chart

3) 选择操作。

对于选择操作这一选项,本文采用轮盘赌法,对于每个个体 i的选择概率 $p_i$ 为:

$$f_i = \frac{1}{apa_i} \tag{3}$$

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \tag{4}$$

式中,  $apa_i$  为个体 i 的适应度; n 为种群个体数。

4) 交叉操作。

交叉操作采用两个体算术交叉,针对所选择的 两个染色体进行如下交叉:

$$\dot{c_1} = ac_1 + (1 - a)c_2$$
 (5)

$$c_{2}^{'} = ac_{2} + (1 - a)c_{1} \tag{6}$$

式中,随机数  $a \in (0,1)$ ;  $c_1 \ c_2$  为父代个体;  $c'_1 \ c'_2$  为 子代个体。

5) 变异操作。

选取第*i*个个体的第*j*个基因*a<sub>ij</sub>进行变*异,变异操作方法如下:

$$a_{ij} = a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max}) \times f(g) a_{ij} = a_{ij} + (a_{\min} - a_{ij}) \times f(g)$$
(7)

式中, $a_{\max}$ 为基因 $a_{ij}$ 的上界; $a_{\min}$ 为基因 $a_{ij}$ 的下界;  $f(g) = r_1(1 - \frac{g}{G_{\max}})^2; r_1$ 为一个随机数;g为当前迭 代次数; *G*<sub>max</sub> 为最大进化次数; *r* 为[0,1] 之间的随 机数。这样既保证了变异发生在基因变化范围(上、 下限), 又随着进化次数的增加保护了有效基因。

6) 预测。

经过以上步骤,可以找出适应度最大的个体,即 为最优权阈值,将其赋值给神经网络,并进行预测。

### 2 结果与分析

#### 2.1 GA - BP 网络实例计算

遗传神经网络中的部分输入数据来自那曲县、 改则县气象站和中国气象科学数据共享服务网。包 括 1983—2012 年 30 年间每日的日照时数( $J_H$ , h)、 平均气温( $T_{mean}$ ,  $\mathbb{C}$ )、最高气温( $T_{max}$ ,  $\mathbb{C}$ )、最低气温 ( $T_{min}$ ,  $\mathbb{C}$ )、平均相对湿度(HUM, %)、平均风速( $\mu$ , m·s<sup>-1</sup>)、降雨(P, mm)等。

用于校核模拟值的另一部分输入数据,通过 FA056 Penman – Monteith 公式(见公式 8)计算得 到<sup>[7]</sup>,对典型地区逐日参考作物腾发量进行计算,经 过日累积计算得到月参考作物腾发量的数据,因为 对于 *ET*<sub>0</sub>的预报值应用于作物需水量的预报研究, 所以本文将逐日 *ET*<sub>0</sub> 经过累积后可得到月资料,对 实际生产更有意义,具体计算结果见表 1。

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$
(8)

式中,  $ET_0$  为参考作物腾发量(mm·d<sup>-1</sup>);  $R_n$  为冠层

表面净辐射(MJ・m<sup>-2</sup>・d<sup>-1</sup>); *G* 为土壤热通量(MJ・m<sup>-2</sup>・d<sup>-1</sup>); *T* 为平均气温( $\mathfrak{C}$ );  $u_2$  为高度 2.0 m处风 速(m・s<sup>-1</sup>);  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽 压(kPa); Δ 为饱和水汽压温度曲线的斜率(kPa・ $\mathfrak{C}^{-1}$ ); γ 为湿度计常数(kPa・ $\mathfrak{C}^{-1}$ )。

#### 表 1 1983-2012 年作物生育期内月 ET<sub>0</sub>

Table 1	Monthly	$ET_0$	from	1983	to	2012	during	crop	growth	period	
---------	---------	--------	------	------	----	------	--------	------	--------	--------	--

年份		美	那曲 Naqu/mr	n		改则 Gerze/mm					
Year	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9	
1983	100.7	124.1	110.8	110.5	80.1	129.1	138.2	167.2	139.0	115.0	
1984	129.6	116.6	94.8	115.2	86.0	155.5	166.9	164.6	145.1	105.1	
1985	104.0	100.6	111.0	108.9	74.8	135.7	146.7	161.7	148.2	104.8	
1986	107.5	136.8	127.5	115.1	84.1	129.6	177.1	161.1	158.7	108.8	
1987	124.1	141.6	110.5	102.0	81.1	128.6	168.7	175.0	154.7	128.7	
1988	116.7	127.7	111.1	92.9	86.0	143.7	169.0	190.9	148.4	109.9	
1989	125.1	117.0	119.6	94.4	84.0	157.9	176.1	195.7	154.4	133.1	
1990	95.1	124.6	104.7	102.6	71.1	149.4	190.1	166.8	155.6	112.3	
1991	120.1	99.9	110.4	98.1	83.7	157.3	181.9	212.6	159.5	107.7	
1992	75.8	78.3	86.3	83.7	74.4	138.7	153.6	160.7	151.4	114.7	
1993	110.7	102.5	108.6	98.1	68.2	148.9	170.3	188.9	174.3	107.5	
1994	97.1	106.0	126.8	112.0	95.5	140.6	177.7	173.5	153.1	132.5	
1995	153.8	138.9	112.4	94.7	76.9	158.6	175.1	182.1	154.0	119.8	
1996	112.2	101.6	104.5	111.7	72.2	150.7	177.6	201.1	158.2	108.1	
1997	89.2	87.3	117.9	105.5	73.4	133.5	139.0	162.3	142.3	116.6	
1998	125.1	132.1	102.0	92.0	83.7	157.4	187.5	190.5	147.6	115.2	
1999	110.1	114.1	118.8	91.6	83.8	150.8	163.6	176.5	130.5	113.0	
2000	102.0	108.5	104.0	92.2	72.8	145.3	161.7	152.2	140.2	98.4	
2001	89.5	95.1	114.3	95.3	89.0	140.4	144.2	163.4	134.6	113.3	
2002	100.6	104.5	103.3	108.3	73.3	140.9	157.5	177.4	130.3	98.0	
2003	88.5	94.0	104.0	101.9	80.7	127.7	152.1	152.8	140.0	106.2	
2004	117.2	93.1	96.4	96.0	90.4	160.9	156.9	168.0	134.7	115.2	
2005	90.3	108.3	102.8	97.1	88.7	135.7	153.9	172.1	148.2	112.6	
2006	102.9	119.7	121.6	116.3	89.8	143.8	155.3	167.6	133.8	116.1	
2007	124.0	125.2	112.8	98.8	89.9	147.8	172.7	163.5	146.4	116.3	
2008	97.2	104.7	107.6	95.9	77.7	129.8	158.3	143.3	133.7	100.4	
2009	100.7	123.2	116.7	106.1	97.1	133.0	176.8	182.5	168.9	115.9	
2010	103.9	126.9	122.1	106.4	85.7	151.8	160.8	182.6	143.8	112.0	
2011	110.2	104.4	106.0	115.8	87.3	147.0	149.5	166.6	140.9	111.6	
2012	113.6	119.1	110.0	107.9	88.3	138.7	170.6	167.6	119.8	112.2	

数据输入的时间段为 1983—2012 年内 5 月到 9 月份,即作物生育期时间段内 30 年的数据资料。模型中采用多年训练的模式,并采用前一年具体月份 的气象基础数据,预报当年对应月份的 *ET*<sub>0</sub>。

$$\Psi_{i+1,j} = f(J_{Hi,j}, T_{\max i,j}, T_{\min i,j}, HUN_{i,j}, v_{i,j}, P_{i,j})$$
(9)

式中: *i* 表示年份, 1983 ≤ *i* ≤ 2012; *j* 表示月份, 5 ≤

 $j \leq 9$ ;  $\Psi_{i+1,j}$  表示对i + 1年j月份的预报值;  $J_{Hi,j}$ 表示i年j月份的日平均日照时数(h);  $T_{\max i,j}$ 表示i年j月份的日平均最高温度(℃);  $T_{\min i,j}$ 表示i年j月份的日平均最低温度(℃);  $HUN_{i,j}$ 表示i年j月份的日平均大气相对湿度(%);  $v_{i,j}$ 表示i年j月份的2 m高度处的日平均风速(m·s<sup>-1</sup>);  $P_{i,j}$ 表示i年j月份的日平均降雨(mm)。

差;δ表示相对误差。

(10)

在 GA - BP 网络计算中,本文利用 1983—2009 年 27 年的输入数据进行网络的训练,确立模型,利 用 2010—2012 年连续三年的输入数据进行检验,当 连续三年的检验误差在规定的阈值范围内时,默认 训练建模成功。

#### 2.2 GA - BP 网络预报与误差检测

在 GA - BP 网络计算中,必须当连续 3 年的计

表 2	GA – BP	网络模拟结果
-----	---------	--------

Table 2 Simulation results by the GA - BP network

地区 Area	月份	真实值 True value			模拟值 Simulation value			Δ			δ		
	Month	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
那曲地区 Naqu	5	103.8	110.2	113.6	106.8	109.9	115.8	2.9	-0.4	2.2	0.028	0.003	0.019
	6	126.9	104.4	119.1	125.2	101.0	109.0	-1.7	-3.5	- 10.1	0.014	0.033	0.085
	7	122.1	106.0	110.0	112.4	110.9	99.5	-9.7	4.9	- 10.5	0.079	0.046	0.096
	8	106.3	115.7	107.9	109.6	108.6	113.9	3.3	-7.1	6.0	0.030	0.060	0.056
	9	85.7	87.33	88.3	78.2	93.6	94.1	-7.5	6.3	5.8	0.088	0.070	0.066
改则地区 Gerze	5	151.8	147.0	138.7	141.7	133.2	138.9	- 10.2	- 13.8	0.2	0.067	0.094	0.002
	6	160.8	149.5	170.6	175.7	150.9	171.1	14.9	1.4	0.5	0.093	0.009	0.003
	7	182.6	166.6	167.6	163.3	171.3	179.8	- 19.3	4.7	12.2	0.100	0.028	0.073
	8	143.7	141.0	119.9	156.6	146.4	133.5	12.9	5.4	13.6	0.089	0.039	0.100
	9	112.0	111.6	112.2	106.3	113.1	102.9	-5.7	1.5	-9.3	0.050	0.014	0.083

在图 2 中可看到那曲地区与改则地区 5—9 月份的 ET<sub>0</sub> 真实值与预报值所做的散点图,数据间线

性关系显著,2010—2012 年决定系数 R<sup>2</sup> 分别达到 0.8801、0.9363、0.9169,斜率接近于 1。

算数据均在规定阈值的范围内时(≤0.1),才可输出

模拟结果。表 2 中 Simulation value 表示 GA – BP 网 络预报值; True – value 表示真实值; $\Delta$  表示绝对误

绝对误差( $\Delta$ ) = 预报值 – 真实值

相对误差( $\delta$ ) = (预报值 – 真实值)/真实值(11)







## 3 结论与讨论

本文选择那曲县(海拔 4 450 m)、改则县(海拔 4 700 m)作为西藏高原气候典型地区,通过遗传 – 神经(GA – BP)网络训练,应用 1983—2012 年 30 年的数据建立 GA – BP 网络模型,对西藏高原气候区主要牧草作物生育期内 5—9 月份的参考作物腾发量进行预报研究。通过 GA – BP 网络训练, *ET*<sub>0</sub> 预报值与真实值间的线性关系明显,决定系数 *R*<sup>2</sup>分别达到 0.8805、0.9363、0.9167,斜率接近于 1;多年的模拟预报值与实际值之间的相对误差均处于 0.1 以下。在模型建立过程中,当连续 3 年预报值均满足

要求时输出的结果本模型才予以采用,这样在保证 了 GA – BP 网络预报精确度的同时使其兼具稳定 性。

对于易获得气象资料的地区,本研究成果结合 该地区对应作物的作物系数,可进一步对高海拔地 区未来月际间作物需水量的变化进行预判,进而为 将来灌溉制度的制定提供依据;对于缺测气象资料 的地区,通过本文建立的网络模型,结合与该地区气 象条件类似的气象数据,可在大时间尺度下对气象 资料缺测地区 *ET*<sub>0</sub> 变化趋势进行模拟。本研究成 果可对下年度灌溉制度的拟定提供指导,可以提高 劳动效率,有效地缓解当地劳动力紧张的局面。 本研究中所述模型在得到区域气象信息后可以 应用于大面积参考作物腾发量的预报,但对于缺少 气象资料的地区预报过程中需要考虑空间变异性, 如何对高海拔地区参考作物腾发量实时预报并进行 合理性和有效性检验,以及如何用于不同地区和不 同作物将需进一步的深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Lu, Liang Chuan, Wei Renjuan, et al. Temporal and spatial variations of  $ET_0$  and sensitivity coefficients in spring-summer in eastern agricultural areas of Qinghai, China[J]. Journal of Mountain Science, 2012, (6):817-826.
- [2] 霍再林.基于人工智能的参考作物腾发量与作物水盐响应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2004:71.
- [3] 冯克鹏,田军仓.宁夏参考作物腾发量的时空特征分析[J].灌溉排水学报,2013,(5):26-29.
- [4] 张火青,雒文生.预报因子及预报方程的优化探讨[J].人民珠 江,2000,(2):13-15.
- [5] 史 峰, 王小川, 郁 磊. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2010;183-187.
- [6] 王志强,朝伦巴根,柴建华.用多变量灰色预测模型模拟预测参 考作物蒸散量的研究[J].中国沙漠,2007,(4):584-587.
- [7] Allen R G. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drain paper 56[Z]. University of Michigan: Fao and Agriculture Organization of the United Nations, 1998:56-57.
- [8] 蒋任飞,阮本清,韩宇平,等.基于 BP 神经网络的参照腾发量 预测模型[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(4):308-311.
- [9] 夏克文,李昌彪,沈钧毅.前向神经网络隐含层节点数的一种优

(上接第140页)

- [17] 刘 芬,同延安,王小英,等.陕西关中灌区冬小麦施肥指标研究[J].土壤学报,2013,50(3):126-133.
- [18] Cui Z L, Chen X P, Li J L, et al. Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses[J]. Pedosphere, 2006, 16(6):806-812. doi:10.1016/S1002-0160(06)60117-3.
- [19] 刘 忠,李保国,傅 靖.基于 DSS 的 1978-2005 年中国区域 农田生态系统氮平衡[J].农业工程学报,2009,25(4):168-175.
- [20] Wu L Q, Ma W Q, Zhang C C, et al. Current potassium management status and grain-yield response of Chinese maize to potassium application[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176:441-449. doi: 10.1002/jpln.201200314.
- [21] Fan T, Stewart B A, Wang Y, et al. Long-term fertilization effects on grain yield, water use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environ-

#### 化算法[J].计算机科学,2005,32(10):143-145.

- [10] Yan Dan, Zhang Jilong, Wang Zhibin, et al. Prediction model of gas volume fraction based on golden section and BP network[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, (1):4-6.
- Xie Wujie, Wang Ying, Sgen Maoxing, et al. The modeling and application of surface-to-air missile survivability prediction model[J].
   Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, (1): 2775-2781.
- [12] Yan Xiaoming, Zheng zhi. Research on gradient functions of BP artificial neural networks[J]. Journal of Fujian Institute of Education, 2011, (1):120-123.
- [13] XIE Yuangui, et al. Study on prediction for grain yield based on REMCC – BPNN[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, (6):2775-2778.
- [14] Lei Yu, Li Xiaoan. Study on GA BP based neural network inference mechanism[J]. Electronic Design Engineering, 2013, (2): 34-37.
- [15] Yan Zheping, Li Zi, Chen Tao, et al. Heading fault tolerant control for UUV based on GA – BP neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, (9):1237-1242.
- [16] Wang Bo, Hu Shuhui, Cao Zhijian. Application of GA BP neural network on radar target tracking[J]. Fire Control Radar Technology, 2010, (3):18-22.
- [17] Sun Bin, Jiang Nengfei. Application of thermal comfort index based on artificial neural network[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, (S1):66-69.
- [18] Chen Jielai, Sun Junlan. Prediction model of surface roughness in ultra – precision turning processing based on GA neural network[J]. Manufacturing Automation, 2011, (24):10-12.
- [19] Wang Linlin, LI Yijie, Wang Kegang. Improved BP algorithm in reinforced concrete beam deflection forecast[J]. Computer Measurement & Control, 2012, (1):50-58.

ment, 2005, 106: 313-329. doi: 10.1016/j.agee.2004.09.003.

- [22] Römheld V(德文), Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects[J]. Plant and Soil, 2010, 335:155-180. doi:10.1007/s11104-010-0520-1.
- [23] Zhang F, Niu J, Zhang W, et al. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply[J]. Plant and Soil, 2010,335:21-34. doi:10.1007/s11104-010-0323-4.
- [24] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110 (21): 8375-8380. doi: 10. 1073/pnas. 1210447110.
- [25] 林 葆,李家康.我国化肥的肥效及其提高的途径一全国化肥 试验网的主要结果[J].土壤学报,1989,26(3):273-279.