

# 基于BP神经网络的粮食产量与化肥用量相关性研究

李 想 戴 维 高红菊 徐文平 魏小红

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对太湖流域化肥用量和粮食产量数据,利用BP神经网络算法,建立了粮食产量与化肥用量之间的关系模型,以指导化肥减施增效。共收集了1980—2014年共35 a太湖流域16个县市每个县市的单位面积化肥用量和单位面积粮食产量数据。通过自回归滑动平均模型(ARMA),对两类数据进行时间序列分析,对数据中存在的缺项进行了填补。实验表明,对于单位面积粮食产量数据,用ARMA(2,6)模型能够达到较佳的填补效果,均方误差小于0.2,  $R^2 > 0.85$ 。对于单位面积化肥用量数据,用ARMA(3,7)模型较优,均方误差小于0.02,  $R^2 > 0.80$ 。说明ARMA模型数据填补效果较好。将填补后的不同县的数据通过BP神经网络建立模型,描述了各县市单位面积化肥用量和粮食产量的关联关系。实验表明,该方法拟合的均方误差小于0.12,  $R^2 > 0.80$ ,说明BP神经网络是一种准确度较高的拟合方法。通过分析各县拟合结果,表明化肥用量有阈值,化肥用量低于该阈值,粮食产量将会较快速增长,高于该阈值,粮食产量将不再增长,过多的施用化肥并不能取得高产。

**关键词:** 粮食产量; 化肥用量; BP神经网络; 相关性

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0186-07

## Correlation between Grain Yield and Fertilizer Use Based on Back Propagation Neural Network

LI Xiang DAI Wei GAO Hongju XU Wenping WEI Xiaohong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A strong correlation exists between fertilizer application and grain yield. Due to many factors affecting grain yield, the existing fitting methods of correlation between the two variables lead to large errors. Aiming at the data of fertilizer application and grain yield in Taihu Lake Basin, the back propagation (BP) neural network was used in this paper to model the correlation between the two variables accurately, which could guide to reduce use of fertilizer. This paper collected average fertilizer use and grain yield data per acre in 35 years i. e. from 1980 to 2014, in 16 counties and cities in Taihu Lake Basin. Missing items were filled automatically through a time series analysis approach called autoregressive and moving average model (ARMA). For average grain yield data, ARMA(2, 6) model had higher accuracy with mean square error (MSE) less than 0.2 and  $R^2$  more than 0.85. For average fertilizer use, ARMA(3, 7) model had higher accuracy with MSE less than 0.02 and  $R^2$  more than 0.80. Then BP neural network with a single hidden layer (1-10-1) was established to fit correlation fertilizer use and grain yield data in each country. Goodness of the fit with BP neural network was better than other methods, with MSE less than 0.12 and  $R^2$  more than 0.80. Results indicate that there is a threshold for fertilizer use. When fertilizer is used less than the threshold, grain yield per acre is more, whereas when it is more than the threshold, grain yield per acre fluctuates and the average keeps invariant. The correlation implies excessive application of fertilizers can not achieve high yields.

**Key words:** grain yield; fertilizer use; back propagation neural network; correlation

收稿日期: 2017-06-14 修回日期: 2017-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61601471)、北京市自然科学基金项目(4164090)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017QC077)

**作者简介:** 李想(1983—),男,讲师,博士,主要从事农业大数据挖掘和实时复杂事件处理研究, E-mail: cqlixiang@cau.edu.cn

**通信作者:** 高红菊(1972—),女,副教授,博士,主要从事农业大数据挖掘算法研究, E-mail: hjgao@cau.edu.cn

## 引言

近年来,由于耕地面积的紧张,化肥的施用量呈增加趋势。一方面,化肥的施用对粮食增产增收起到了关键作用,另一方面,也成为环境污染、空气污染、土壤污染的重要来源之一。如何合理地施用化肥,使其最大程度地促进粮食增产,减少对周围环境的污染成为需要解决的重要问题。研究粮食产量与化肥施用量的关系,成为解决上述问题的前提。

关于化肥施用量和粮食产量的关系,一种方法是对宏观数据做分析,房丽萍等<sup>[1]</sup>采用主成分回归分析、陈建梅等<sup>[2-4]</sup>采用C-D生产函数分析,发现化肥施用量是影响粮食产量的重要因素。张利庠等<sup>[5]</sup>采用双对数模型对1952—2006年的化肥施用量和粮食产量的关联关系进行了分析。王祖力等<sup>[6]</sup>对1978—2006年化肥施用对粮食产量增长的作用进行了实证分析,发现化肥的施用是所有投入要素中贡献最大的一项。彭琳<sup>[7]</sup>发现化肥施用对粮食产量的贡献率平均为46.43%。郎贵飞等<sup>[8]</sup>进行分析,得到我国粮食产量和化肥施用量之间存在着长期的协整关系,化肥施用量的增加促进了我国粮食产量的提高。但上述研究均将重点放在证明化肥对粮食产量的重要性上,并未量化考察化肥用量和粮食产量间的相关性,难以指导科学施肥。另一种方法是采用小范围实验的方式确定两者关系,OLANIYI等<sup>[9]</sup>在拉科克科技大学教学与研究农场,设计几组对照实验,得到最大的苜蓿产量对应的化肥施用量。HOOPER等<sup>[10]</sup>在两个地区两个季节进行了针对特定生长阶段的氮肥施用和所有季节施用同一化肥的对照实验,发现在特定生长阶段的氮肥施用可以提高旱地小麦的粮食产量,谷粒蛋白质浓度和氮利用效率。陈金等<sup>[11]</sup>在2011—2012年和2012—2013年生长季节进行了田间试验,比较秸秆还田加氮肥和仅施用氮肥对小麦产量和氮肥利用效率的影响,发现秸秆还田处理的谷物产量很高。JIANG等<sup>[12]</sup>发现叶面喷施和土壤施用硒,可提高荞麦籽粒产量。EFRETUEI等<sup>[13]</sup>研究了施用氮肥的开始时间对冬小麦产量的氮肥使用效率的影响。周萍萍等<sup>[14]</sup>探讨了播种日期,播种率和化肥施用量对燕麦产量的影响。李敏等<sup>[15]</sup>通过开展夏玉米田间实验,研究了稳定氮肥施用量对夏玉米产量和氮积累,氮肥使用效率的影响。余庆福等<sup>[16]</sup>研究了小麦生长季氮肥施用量对后续直播稻的生长、籽粒产量和氮肥利用率的影响,并确定了推荐的氮

肥施用量。上述研究对单一肥种对单一农产品的影响研究较为深入,但受到实验地域范围较小的影响,不能很好地揭示肥用量与粮食产量的普遍联系。

本文基于太湖流域施肥量与粮食产量的宏观数据,运用ARMA模型填补缺失值,采用BP神经网络,探究施肥量和粮食产量的关系。旨在揭示普遍情况下施肥条件与作物产量的关系规律,指导科学用肥。

## 1 数据获取与处理

### 1.1 基础数据获取

太湖流域曾是我国重要的粮食产区,自1980年以来产量和化肥施用量数据变化较大,各层次数据齐全,挖掘两个量之间的相关性,具有典型意义,能够揭示化肥用量和粮食产量间的普遍关系。20世纪80年代以来,太湖流域经济飞速发展,农业在国民经济中的比重逐年下降。1985年以来,在城市化推进及阶段性粮食生产政策的影响下太湖流域粮食总产呈下降趋势,年产量由1083.4万t减少到2010年的698.2万t,减少了35.5%,占全国比重也由2.9%减少到1.3%<sup>[17]</sup>。随着经济发展,农业生产从精耕细作到简化作业,施肥从有机无机肥结合到仅施用化肥。太湖流域农户施肥量偏高,远超过国内施肥的平均水平,对太湖水污染影响深远<sup>[18]</sup>。

选取1980—2014年太湖流域江阴、宜兴、常州、溧阳、金坛、苏州、常熟、张家港、昆山、太仓、镇江、余杭、平湖、桐乡、德清、安吉等16个县市的共377条单位面积粮食产量数据和对应的358条单位面积施肥数据,数据来自《江苏统计年鉴》、《中国区域统计年鉴》,部分数据由江苏省农业厅提供。

### 1.2 基于ARMA模型的数据填补

#### 1.2.1 ARMA模型

获取的数据存在缺失值,单位面积粮食产量和单位面积施肥数据分别应有数据400项,分别缺失5.75%和10.50%,因此需要采用科学的方法对两类数据进行填补。自回归移动平均模型(Auto-regressive and moving average model, ARMA)是目前最为常用的研究时间序列模型,有较精确的谱估计及较优良的谱分辨率性能。因此,本文采用ARMA模型进行预测来填充缺失值。

如果一个系统在时刻 $t$ 的响应 $X_t$ 不仅与它以前时刻 $t-1, t-2, \dots, t-p$ 的响应 $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$ 有直接关系,而且还与以前时刻 $t-1, t-2, \dots, t-q$ 进入系统的扰动 $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ 存在一定的相关关系,那么此类系统为ARMA模型,模型为

$$\begin{cases} X_t = \phi_0 + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \\ (\phi_p \neq 0, \theta_q \neq 0) \\ E(\varepsilon_t) = 0 \quad \text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2 \quad E(\varepsilon_t, \varepsilon_s) = 0 \quad (s \neq t) \\ E(\varepsilon_t, X_s) = 0 \quad (\forall s < t) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $X_t$ ——随机过程  $\varepsilon_t$ ——白噪声过程  
 特别地,当  $\phi_0 = 0$  时,称为中心化 ARMA( $p, q$ ) 模型,引进延迟算子  $b$ ,记为

$$\begin{cases} \varphi(b)X_t = \Theta(b)\varepsilon_t \\ \varphi(b) = 1 - \varphi_1 b - \varphi_2 b^2 - \dots - \varphi_p b^p \\ \Theta(b) = 1 - \theta_1 b - \theta_2 b^2 - \dots - \theta_q b^q \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\varphi(b)$ —— $p$  阶自回归系数多项式  
 $\Theta(b)$ —— $q$  阶滑动平均系数多项式

因此,在平稳时间序列建立模型时,可先拟合一个 ARMA( $p, q$ ) 模型,然后根据其参数值  $\varphi_1, \varphi_3, \dots, \varphi_p$  和  $\theta_1, \theta_3, \dots, \theta_q$  是否显著为 0 寻找较为合理的模型,再拟合相应模型检验其适应性<sup>[19]</sup>。

需要对模型定阶,即确定  $p, q$  的值。对于平稳

序列的自相关函数及偏自相关函数一般具有比较规范的统计特征。对于单纯的自回归 AR 模型和移动平均 MA 模型,可根据偏相关函数 PACF 和自相关函数 ACF 的截尾性来判定  $p$  和  $q$ 。而对于 ARMA 模型的 ACF 与 PACF 都具有拖尾性,所以通过 ACF 与 PACF 的统计特征并不能很好地给 ARMA 模型定阶。AKAIKE<sup>[20]</sup> 提出了 AIC 准则和 FPE 准则联合定阶。选取不同的  $p, q$  对时间序列进行拟合,计算相应 AIC 值、FPE 值,使其达到极小值的模型为最佳模型。选定最佳  $p, q$  后,计算模型残差,用来白噪声检验,以检验模型是否适合。

以下采用江阴市粮食产量数据及溧阳市化肥使用量对 ARMA 模型进行训练,这 2 个县的数据较为完整。图 1a、图 2a 反映了江阴市粮食产量时序变化、溧阳市化肥施用量时序变化。由于 ARMA 模型输入的数据必须满足平稳性,首先对其进行了平稳性检验;然后建立误差最小的 ARMA 模型;最后得到时序分析结果,并对其误差进行分析。

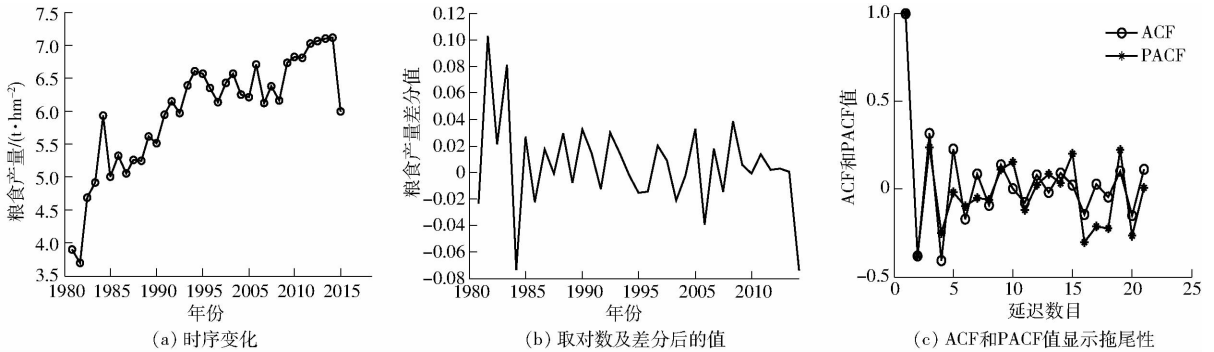


图 1 江阴市粮食产量时间序列及检验

Fig. 1 Time series and check of grain yields in Jiangyin City

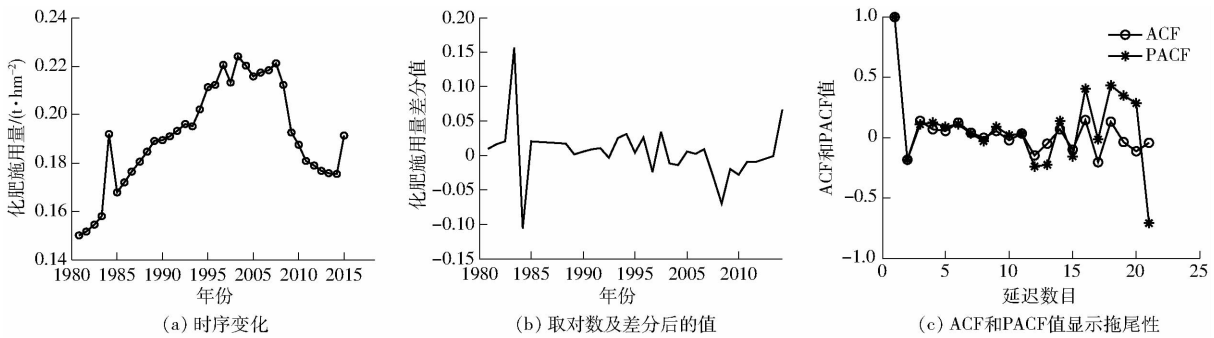


图 2 溧阳市化肥施用量时间序列及检验

Fig. 2 Time series and check of grain yields in Liyang City

1.2.2 数据的平稳性检验

如图 1b 所示,对江阴市粮食产量取对数并进行差分,进行平稳性检验。经过单位根(ADF)检验,该差分后的序列为白噪声序列,即平稳序列。如图 1c 所示,通过 20 阶运算自相关函数 ACF 和偏相关函数 PACF 值均没有明显的截尾性,即具有拖尾

性。故可以选用 ARMA 模型。

如图 2b 所示,对溧阳市化肥施用量取对数并进行差分处理,进行平稳性检验。经过 ADF 检验,该差分后的序列为白噪声序列,是平稳序列。如图 2c 所示,通过 20 阶运算自相关函数 ACF 和偏相关函数 PACF 值,均没有明显的截尾性,即具有拖尾性。

故可以选用 ARMA 模型。

### 1.2.3 ARMA 模型的建立和检验

对于江阴市,在选择粮食产量模型时,通过比较各个  $p, q$  参数下的 ARMA 模型,选择 AIC 和 FPE 最小的 ARMA(2,6) 模型

$$\varphi(b) = 1 - 0.1476b^{-1} - 0.8753b^{-2}$$

$$\Theta(b) = 1 + 0.7044b^{-1} - 0.2332b^{-2} - 0.1606b^{-3} - 0.192b^{-4} + 0.07979b^{-5} + 0.04868b^{-6} \quad (3)$$

通过对江阴市 1980—2009 年粮食产量进行建模拟合,并对 2010—2014 年的粮食产量进行预测,预测结果如图 3 所示。

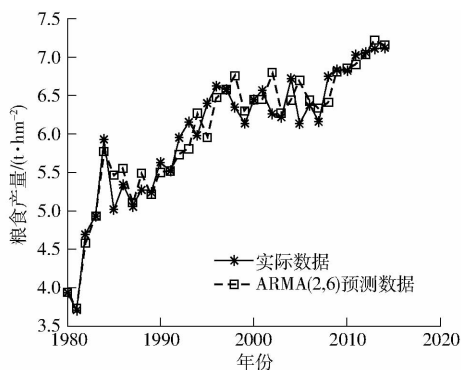


图3 江阴市粮食产量通过 ARMA(2,6)预测值

Fig.3 Prediction values of grain yields in Jiangyin City by ARMA(2,6)

对于溧阳市,在选择化肥施用量模型时,通过比较各个  $p, q$  参数下的 ARMA 模型,选择 AIC 和 FPE 最小的 ARMA(3,7) 模型

$$\varphi(b) = 1 - 1.723b^{-1} + 1.422b^{-2} - 0.3673b^{-3}$$

$$\Theta(b) = 1 - 1.689b^{-1} + 1.889b^{-2} - 1.359b^{-3} + 1.601b^{-4} - 0.7762b^{-5} - 0.01942b^{-6} + 0.4471b^{-7} \quad (4)$$

通过对溧阳市 1980—2009 年化肥施用量进行建模拟合,并对 2010—2014 年的化肥施用量进行预测,预测结果如图 4 所示。

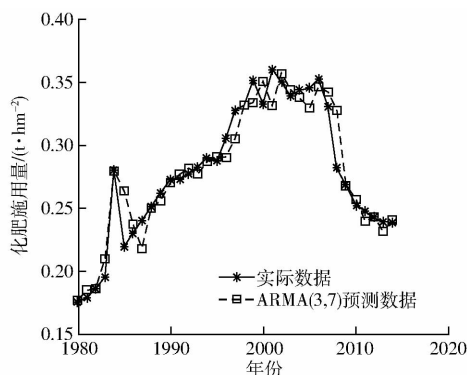


图4 溧阳市化肥施用量通过 ARMA(3,7)预测值

Fig.4 Prediction values of fertilizer use in Liyang City by ARMA(3,7)

### 1.2.4 所有地区 ARMA 模型拟合准确度

分别使用各城市的单位面积粮食产量训练 ARMA(2,6)模型的误差如表 1 所示,使用单位面积化肥施用量训练 ARMA(3,7)模型如表 2 所示。表中 MSE、RMSE、 $R^2$  分别为均方误差、均方根误差及决定系数。

表1 各地区单位面积粮食产量 ARMA(2,6)模型预测误差

Tab.1 Errors of ARMA(2,6) for prediction of grain yields in 16 areas

| 地区  | MSE     | RMSE    | $R^2$   |
|-----|---------|---------|---------|
| 江阴  | 0.054 1 | 0.232 6 | 0.926 9 |
| 宜兴  | 0.082 1 | 0.286 5 | 0.880 7 |
| 常州  | 0.077 0 | 0.277 5 | 0.904 1 |
| 溧阳  | 0.110 6 | 0.332 6 | 0.931 0 |
| 金坛  | 0.120 2 | 0.346 7 | 0.911 9 |
| 苏州  | 0.041 9 | 0.204 7 | 0.953 4 |
| 常熟  | 0.077 9 | 0.279 1 | 0.911 3 |
| 张家港 | 0.064 5 | 0.254 0 | 0.862 5 |
| 昆山  | 0.046 4 | 0.215 4 | 0.943 5 |
| 太仓  | 0.097 2 | 0.311 8 | 0.859 1 |
| 镇江  | 0.060 2 | 0.245 4 | 0.886 1 |
| 余杭  | 0.058 3 | 0.241 5 | 0.923 2 |
| 平湖  | 0.070 5 | 0.265 5 | 0.919 2 |
| 桐乡  | 0.044 0 | 0.209 8 | 0.959 5 |
| 德清  | 0.084 3 | 0.290 3 | 0.897 4 |
| 安吉  | 0.059 2 | 0.243 3 | 0.938 3 |

表2 各地区单位面积化肥施用量 ARMA(3,7)模型预测误差

Tab.2 Errors of ARMA(3,7) for prediction of fertilizer use in 16 areas

| 地区  | MSE       | RMSE      | $R^2$   |
|-----|-----------|-----------|---------|
| 江阴  | 0.000 358 | 0.018 910 | 0.883 2 |
| 宜兴  | 0.001 400 | 0.037 417 | 0.907 0 |
| 常州  | 0.002 100 | 0.045 826 | 0.810 4 |
| 溧阳  | 0.000 229 | 0.015 129 | 0.917 8 |
| 金坛  | 0.000 342 | 0.018 498 | 0.975 8 |
| 苏州  | 0.000 557 | 0.023 606 | 0.950 5 |
| 常熟  | 0.000 217 | 0.014 716 | 0.968 3 |
| 张家港 | 0.000 417 | 0.020 420 | 0.906 7 |
| 昆山  | 0.002 000 | 0.044 721 | 0.873 6 |
| 太仓  | 0.000 921 | 0.030 342 | 0.925 3 |
| 镇江  | 0.000 648 | 0.025 447 | 0.932 8 |
| 余杭  | 0.000 641 | 0.025 328 | 0.838 4 |
| 平湖  | 0.001 200 | 0.034 641 | 0.880 9 |
| 桐乡  | 0.000 380 | 0.019 495 | 0.819 8 |
| 德清  | 0.001 400 | 0.037 417 | 0.657 7 |
| 安吉  | 0.018 200 | 0.134 907 | 0.688 3 |

对于单位面积粮食产量,ARMA(2,6)模型预测较为准确,均方误差 MSE 均在 0.2 以下,拟合优度决定系数  $R^2$  均在 0.85 以上。这说明 ARMA(2,6)模型对太湖流域地区单位面积粮食产量的预测较为

准确,能够用以填补缺失数据。

对于单位面积施肥量,ARMA(3,7)模型预测较为准确,误差MSE均在0.02以下,拟合优度决定系数 $R^2$ 大部分在0.80以上。这说明ARMA(3,7)模型对太湖流域单位面积施肥量的预测较为准确,能够用以填补缺失数据。

## 2 基于BP神经网络的粮食产量与化肥用量相关性分析

本文收集的化肥用量及粮食产量数据,每个县市有25个数据,不足以覆盖所有对应情况,为了更好地观察两者相关性规律,需要对两者关系进行拟合。

观察两者的关系,呈现非线性特征。尝试用6阶多项式、滑动平均等进行拟合方法,拟合效果均不理想。因此,采用BP神经网络对该套数据进行拟合。BP神经网络常被用于多输入多输出的数据挖掘场景。它也是一种很好的非线性函数关系拟合方法。

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。BP网络在输入层与输出层之间有若干隐藏层神经元,其状态的改变,能影响输入与输出之间的关系。计算过程由正向计算过程和反向计算过程组成。正向传播过程,输入模式从输入层经隐单元层逐层处理,并转向输出层,每层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的连接通路返回,通过修改各神经元的权值,使得误差信号最小。

### 2.1 模型训练

经过模型优化,选择1-10-13层结构的BP神经网络模型。输入层节点个数为1,对应输入化肥用量;输出层节点个数为1,对应输出粮食产量;隐藏层神经元个数为10。隐藏层转移函数选择TANSIG正切型函数。输出层转移函数类型为PURELIN线性函数。

训练算法使用LM算法,适应性学习函数使用梯度下降反向传播学习规则(LEARNGD)。以金坛市的数据为例,BP神经网络的训练过程如图5所示。迭代次数Epoch为18次,泛化能力检查Validation Check为若连续6次训练误差不降反升,则强行结束训练。从图5可以看到,通过12次迭代,MSE仅为0.0475,说明训练的效果较好,之后6次迭代不降反升,故可认为此模型误差已达到最低。

训练后的模型的评估函数如图6所示,预测点和真实点均基本靠近1:1曲线, $R$ 达到0.9562,说明拟合较为准确。

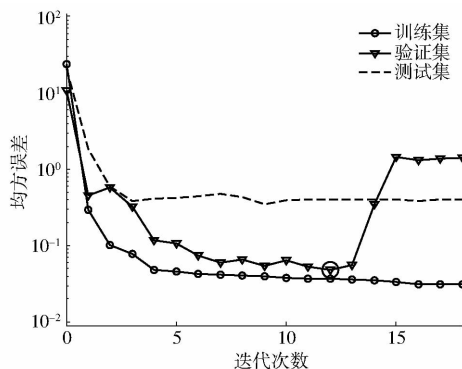


图5 BP神经网络训练过程

Fig.5 Training process of selected BP neural network model

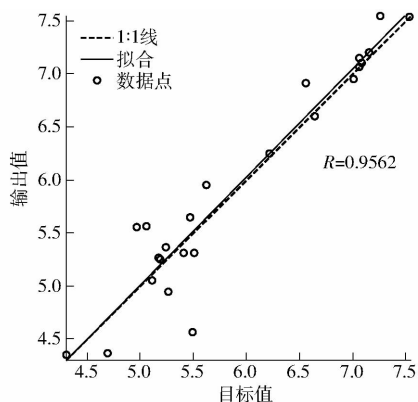


图6 BP神经网络模型训练结果

Fig.6 Results of trained BP neural network model

### 2.2 所有地区BP神经网络拟合准确度

利用16个县市的数据进行训练,误差如表3所示。除了少量城市误差较为明显外,其余多数城市化肥施用量和粮食产量的相关性均能由神经网络较

表3 基于BP神经网络模型对各地区粮食产量与施肥量关系拟合的误差

Tab.3 Errors of BP neural network for fitting correlation between grain yield and fertilizer use in every area

| 地区  | MSE         | RMSE        | $R^2$     |
|-----|-------------|-------------|-----------|
| 江阴  | 0.036 009 5 | 0.189 761 7 | 0.911 590 |
| 宜兴  | 0.029 008 4 | 0.170 318 5 | 0.911 179 |
| 常州  | 0.033 198 8 | 0.182 205 3 | 0.899 669 |
| 溧阳  | 0.084 562 1 | 0.291 893 8 | 0.912 952 |
| 金坛  | 0.047 531 2 | 0.062 947 3 | 0.914 318 |
| 苏州  | 0.010 513 6 | 0.102 535 8 | 0.985 583 |
| 常熟  | 0.038 412 5 | 0.195 991 0 | 0.927 655 |
| 张家港 | 0.035 346 0 | 0.188 005 3 | 0.948 130 |
| 昆山  | 0.007 25 40 | 0.085 202 0 | 0.967 774 |
| 太仓  | 0.018 558 3 | 0.075 036 9 | 0.986 783 |
| 镇江  | 0.011 352 5 | 0.106 548 1 | 0.872 323 |
| 余杭  | 0.027 153 8 | 0.164 784 1 | 0.906 773 |
| 平湖  | 0.008 384 6 | 0.091 567 6 | 0.988 009 |
| 桐乡  | 0.019 106 2 | 0.138 225 2 | 0.992 669 |
| 德清  | 0.115 732 2 | 0.340 194 1 | 0.892 988 |
| 安吉  | 0.093 106 2 | 0.305 133 1 | 0.818 583 |

好拟合。均方误差 MSE 均在 0.12 以下,拟合优度决定系数  $R^2$  均在 0.80 以上。说明 BP 神经网络对于这种非线性相关性拟合效果非常显著。

### 2.3 相关性分析结果讨论

图 7 为通过 25 a 点数据的训练和拟合, BP 神经网络模型所预测的单位面积化肥用量和粮食产量的相关性曲线。对于金坛市,化肥用量从 0.15 t 增至 0.40 t(最大监测值为 0.54 t),粮食产量提高 66%。但受到土地等因素的制约,化肥用量超过 0.40 t 后,粮食产量不再显著提高。对于桐乡市,化肥用量从

0.15 t 增至 0.22 t(最大监测值为 0.39 t),粮食产量提高近 100%。但化肥用量超过 0.22 t 后,粮食产量反倒有明显的下降。

分析其他县市相关性曲线,均呈现上述规律。随着化肥用量的增大,开始阶段,粮食产量呈上升趋势,增产效果明显;达到一定阈值后,产量将趋于平稳,甚至出现减产。

### 3 结论

(1) 选取了 1980—2014 年太湖流域 16 个县市共 377 条单位面积粮食产量数据和对应的 358 条单位面积施肥数据。经过检验,数据的 ACF 与 PACF 都具有拖尾性,故采用 ARMA 模型对缺失数据进行了较准确的填补。对于单位面积粮食产量,选取 ARMA(2,6) 模型填补较为准确,均方误差 MSE 均在 0.2 以下,拟合优度决定系数  $R^2$  均在 0.85 以上。对于单位面积施肥量,ARMA(3,7) 模型填补较为准确,误差 MSE 均在 0.02 以下,拟合优度决定系数  $R^2$  均在 0.80 以上。说明 ARMA 模型可以较好地对粮食产量和化肥用量数据进行填补。

(2) 探寻了单位面积粮食产量和施肥数量的关联关系。由于数据波动性较大,因此采用 BP 神经网络进行拟合。经过模型优化,选择 1-10-13 层结构的 BP 神经网络模型。经过训练,均方误差 MSE 均在 0.12 以下,拟合优度决定系数  $R^2$  均在 0.80 以上。说明神经网络能够较准确地表示两者的关联关系。

(3) 通过数据拟合可以发现化肥施用量与粮食产量关联关系存在较为普遍的规律。化肥的施用量并非越多越好,化肥在一定范围内施用,能够明显地提高产量,与产量呈现强正相关关系。但超过一定阈值后,不但不能帮助增产,而且有可能会造成减产,因此,不宜施用过多的化肥。

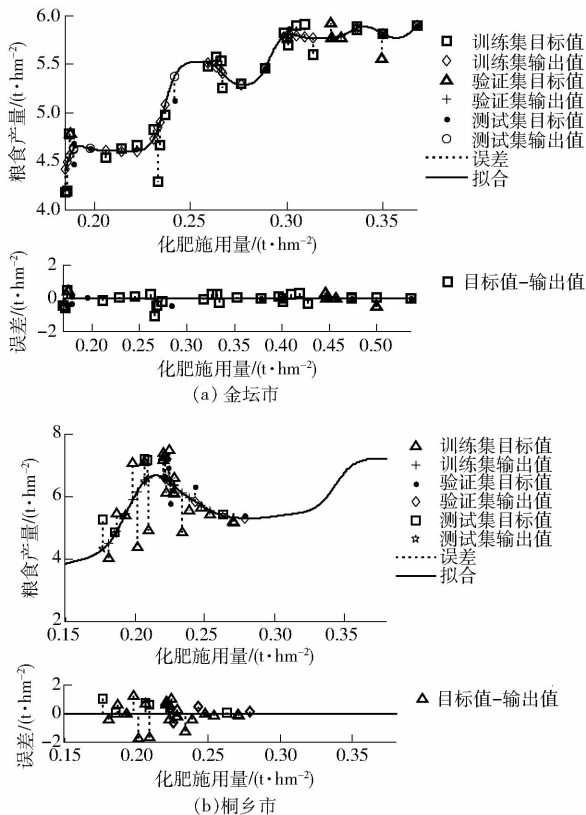


图 7 基于 BP 神经网络拟合的粮食产量与化肥用量相关性

Fig. 7 Correlation between grain yield and fertilizer use based on BP neural network in Jintan City and Tongxiang City

### 参 考 文 献

- 房丽萍, 孟军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析——基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17):156-160.  
FANG Liping, MENG Jun. Application of chemical fertilizer on grain yield in China analysis of contribution rate: based on principal component regression C-D production function model and its empirical study[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(17):156-160. (in Chinese)
- 陈建梅. 农业生产资料投入对粮食作物产出影响因素的相关验证分析[J]. 经济研究导刊, 2009(23):32-34.  
CHEN Jianmei. Verification analysis on the impact factors of agricultural means of production to the grain crops output[J]. Economic Research Guide, 2009(23):32-34. (in Chinese)
- 李静, 李晶瑜. 中国粮食生产的化肥利用效率及决定因素研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(5):565-568.  
LI Jing, LI Jingyu. Fertilizer using efficiency of China's grain production and its determining factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(5):565-568. (in Chinese)
- 刘德伟, 李强, 宋孝航. 中国粮食生产化肥施用效率分析——基于随机前沿生产函数[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(4):401-407.

- LIU Dewei, LI Qiang, SONG Xiaohang. Analysis on fertilizer application efficiency of grain production in China—based on stochastic frontier function[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(4):401–407. (in Chinese)
- 5 张利庠, 彭辉, 靳兴初. 不同阶段化肥施用量对我国粮食产量的影响分析——基于1952—2006年30个省份的面板数据[J]. 农业技术经济, 2008(4):85–94.
- ZHANG Lixiang, PENG Hui, JIN Xingchu. Analysis on the impact of agricultural fertilizer application on China's grain output at different stages—based on panel data for 30 provinces in 1952—2006[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2008(4):85–94. (in Chinese)
- 6 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008(8):65–68.
- WANG Zuli, XIAO Haifeng. Analysis on the role of fertilization on grain yield growth[J]. Issues in Agricultural Economy, 2008(8):65–68. (in Chinese)
- 7 彭琳. 中国化肥施用与粮食生产的进程、前景与布局[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(1):14–18.
- PENG LIN. Progressive process, prospects and distribution of fertilizer use and grain production in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2000, 21(1):14–18. (in Chinese)
- 8 郎贵飞, 周奎. 我国粮食产量和化肥施用量实证分析——基于VAR模型[J]. 现代商贸工业, 2016, 37(12):16–17.
- LANG Guifei, ZHOU Kui. The empirical analysis of grain yield and fertilizer application in China based on VAR model[J]. Modern Business Trade Industry, 2016, 37(12):16–17. (in Chinese)
- 9 OLANIYI J O, ADELASOYE K A, JEGEDE C O. Influence of nitrogen fertilizer on the growth, yield and quality of grain amaranth varieties[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4(4):506–513.
- 10 HOOPER P, ZHOU Y, COVENTRY D R, et al. Use of nitrogen fertilizer in a targeted way to improve grain yield, quality, and nitrogen use efficiency[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(3):903–915.
- 11 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1):160–167.
- CHEN Jin, TANG Yuhai, YIN Yanping, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1):160–167. (in Chinese)
- 12 JIANG Y, ZENG Z H, BU Y, et al. Effects of selenium fertilizer on grain yield, se uptake and distribution in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum Moench*) [J]. Plant Soil & Environment, 2015, 61(8):371–377.
- 13 EFRETUEI A, GOODING M, WHITE E, et al. Effect of nitrogen fertilizer application timing on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat in Ireland[J]. Irish Journal of Agricultural & Food Research, 2016, 55(1):63–73.
- 14 周萍萍, 赵军, 颜红海, 等. 播期、播种量与施肥量对裸燕麦籽粒产量及农艺性状的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(3):433–441.
- ZHOU Pingping, ZHAO Jun, YAN Honghai, et al. Effects of sowing date, sowing rate and fertilizer rate on grain yield and agronomic characteristics of *Avena sativa* [J]. Prataculturalence, 2015, 32(3):433–441. (in Chinese)
- 15 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 稳定氮肥用量对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 38(4):323–327.
- LI Min, YE Shuya, LIU Feng, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2014, 38(4):323–327. (in Chinese)
- 16 余庆福, 聂立孝. 麦-稻轮作系统中小麦施氮水平对后季直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9):1488–1494.
- YU Qingfu, NIE Lixiao. Effects of N application rates on grain yield and N-fertilizer utilization efficiency of succeeding direct-seeded rice in wheat-rice rotation system[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(9):1488–1494. (in Chinese)
- 17 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 太湖流域粮食生产格局变化及影响机制研究[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(3):64–69.
- PAN Peipei, YANG Guishan, SU Weizhong, et al. Study on the temporal-spatial structure and influence mechanism of grain production in Taihu Lake Basin[J]. Geography and Geo-information Science, 2013, 29(3):64–69. (in Chinese)
- 18 杨慧. 影响太湖流域农户化肥投入的因素分析[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- YANG Hui. The effect of farmers fertilization factors in the Taihu Lake Basin[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 19 BRUCE L B, RICHARD T O C. Forecasting and time series: an applied approach [M]. 3rd. ed. Belmont CA: Duxbury Press, 1993.
- 20 AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6):716–723.