

# 江西省气候变化的特征 及其对水稻产量的贡献

——基于“气候-经济”模型

付莲莲 朱红根 周曙东

1. 江西农业大学理学院, 江西南昌 330045;
2. 江西农业大学经济管理学院, 江西南昌 330045;
3. 南京农业大学经济管理学院, 江苏南京 210095)

**摘要:** 采用气候倾向率和 M-K 突变检验, 分析 1951-2012 年江西省气候和温度的变化趋势和突变特征; 构建“气候-经济”新模型, 研究气候因子对水稻产量的影响, 最后借助 BP 神经网络模型预测未来 10a 气候因子对水稻产量的贡献。结果表明: 过去 60 多年来气温平均每 10a 升高 0.172℃, 而降水的线性倾向不显著; 气温突变开始的时间约为 1997 年, 降水的突变趋势不明显; 不同阶段气候因素的贡献率及作用方向存在差异, 1978-1997 年气候因子贡献率为 5.97%, 其中温度和降水贡献率分别为 1.51%、4.46%。1998-2013 年气候因子贡献率为 8.98%, 温度和降水贡献率分别为 4.63%、4.35%。物质要素在不同阶段的贡献率均为 70% 以上, 其中播种面积和化肥的影响程度较大; 未来 10a 气温对江西水稻产量的贡献为 1.48, 降水量对水稻产量的贡献为 2.22。

**关键词:** 气候变化; 水稻产量; M-K 突变检验; “气候-经济”模型; BP 神经网络模型

**中图分类号:** P461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2016)04-0590-09

**DOI:** 10.11870/cjlyzyyhj201604008

过去 100 多年来, 全球气候变化异常, 极端天气频发, 2013 年的 IPCC 第五次评估报告指出: 在过去的 132a(1880-2012 年)里, 全球平均气温上升了 0.85℃, 1951-2012 年气温上升的速率为 0.12℃/10a, 几乎是 1880 年以来的 2 倍。中国的气候变暖特征尤其显著, 100 年来平均气温升高了 0.5-0.8℃, 专家预测与 1961-1990 年相比, 2020 年我国平均气温可能上升 1.3-2.1℃。我国农业生产系统对气候变化的敏感性较强, 很容易受到气候变化的不利影响。频繁变化的极端气候带来的洪涝灾害使得国内粮食产量波动厉害, 从而引发了粮食价格“过山车”式的波动, 影响了农业经济的稳定和粮食安全。因此, 气候因子对粮食产量的影响已经成为农业经济领域和气候学关注的热点问题。

水稻是国内粮食作物中最重要的一类, 其产量接近粮食总产量的 1/2。江西省水稻产量占粮食产量的 80%左右, 2013 年水稻产量为 2004 万 t, 位居全国第三, 稻谷播种面积为 337.95x10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>, 位居全国第二。气候变化厉害, 使得水稻生长季内农业气象灾害频繁发生。据专家分析, 江西重度以上洪涝灾害发生的频率为 3a, 造成江西水稻欠收的概率达到 67%。极端天气频繁发生, 早涝、高温等事件出现的频率增大, 强度增强, 气候变化引起的自然灾害使得水稻生产成本增加, 严重影响水稻的生产。

不少学者从播种面积、化肥、农业机械、劳动力投入等方面研究了水稻产量波动的成因, 近几年来国外学者开始借助于李嘉图模型、相关分析、作物模型研究气候因素对粮食产量的影响。Zhang 等(41)研究中国 1981-2005 年县域气候因子和水稻产量的关系, 发现太阳辐射与水稻产量正相关, 是水稻产量的主要驱动因素。Kurukulasuriya & Mendelsohn 基于对非洲 11 个国家 9 000 多农户的调查数据, 利用李嘉图均衡模型研究气候因素对粮食产量的影响, 结果表明, 气温上升和降水增加有利于粮食生产。Tao 等在中国省级尺度上研究了气候和产量的关系, 发现水稻、小麦、玉米和大豆的产量和生长季气候显著相关, 一般来说, 生长期温度变暖有利于水稻产量的提高, 区域差异明显。Lobell 认为与最低气温的升高相比, 最高气温的升高对水稻产量影响更不利。Peng 等通过分析 1979-2003 年水稻产量和温度之间的关系, 发现年度最大和最小平均气温上升了 0.35℃和 1.13℃, 水稻产量与最低气温呈负相关, 当最低气温上升 1℃时, 水稻产量将减少 10%左右(181)。Liu 等基于县级横截面数据, 构建李嘉图模型分析经济因素和气候因素对中国农业的影响, 结果发现, 温度的升高和降水的增加对中国

农业生产有积极作用。

国内关于气候因子对水稻等粮食作物影响的研究方法大致分为两大类。第一类是基于田间试验数据的作物机理模型,如: CERES-Maize/Rice/ Wheat1、 WOFOST 模型、 ORYZA2000 等,将未来气候变化设为不同情景,分析温度、降水等气候因子对产量的影响。第二类是统计方法,基于线性倾向率、相关分析、随机前沿生产函数等统计方法分析气候因子的变化特征和气候因子对粮食产量的影响。朱晓莉等采用随机前沿超越对数生产函数模型,在控制了劳动力、化肥施用量、播种面积等的基础上,研究了气候变化对江苏省水稻总产量影响。结果表明,不同生育期气候因子对水稻总产量的影响不同。朱珠等研究得出,江苏大部分地区,水稻产量与最高气温、平均气温及辐射的正相关性较显著,与最低气温的相关性并不明显,而与降水量则呈负相关。茹长宝等发现南京市近 60 年气温的线性倾向率为  $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,降水的线性倾向率为  $12.45\text{mm}/10\text{a}$ ,干燥度呈上升趋势,暖干化趋势明显,冬小麦产量与温度变化呈正相关,与降水、干燥度呈负相关。王秀芬等基于黑龙江省境内 30 个气象站点 1980-2009 年的玉米产量和相关的气候数据,测算出年降水量的线性倾向率为  $-27.6\text{mm}/10\text{a}$ ,平均气温的倾向率为  $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,最高温度的倾向率为  $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,最低温度的倾向率为  $0.48^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,穗期和花粒期的最低温度与玉米的气象产量呈正相关关系,花粒期的最高温度与玉米的气象产量呈负相关关系。周曙东和朱红根构建经济-气候新模型,分析了气候变化对南方水稻产量的影响大小及区域差异。结果表明,气候变化对南方地区水稻产量有负影响,水稻生长季节期间平均降水每增加  $10\text{mm}$  将会引起南方水稻产量减小  $0.4$  个百分点;平均温度上升  $1^{\circ}\text{C}$  将会导致南方水稻产量平均下降  $2.99$  个百分点。

水稻产量不仅受到自然因素的影响,还受到经济社会因素的影响。学者在用作物机理模型研究仅从自然因素方面研究气候变化对产量的影响,需要灌溉、密度、水分状态、土壤养分、病虫害等田间数据,并且假设农业技术进步、播种面积、农业机械总动力等经济变量不变,但随着社会经济环境的变化,这些因素不可能一成不变,分析气候变化对粮食生产的影响,不能仅考虑自然因素或经济因素,应结合两者来探讨。江西省地处南岭以北,长江以南,其气候变化与我国乃至全球有必然的联系,但也有其独特性。那么,江西省气候因子有着怎样的变化趋势?在整个样本期内是否存在结构突变?气候因素对江西水稻产量有着怎样的影响?未来 10a 气候因子对水稻产量的影响如何?这些问题现有文献较少涉及到,为此,本文首先借助线性倾向率和 Mann-Kendall 突变检验探讨 1951-2012 年江西气候因子变化特征和趋势,然后整合气候因素和社会经济因素,在生产函数的基础上引入气候因子,构建“气候-经济”模型,着重分析气候因素对江西省水稻总产量的影响,最后构建 BP 神经网络模型预测未来 10 年气候因子对水稻产量的贡献。旨在揭示江西省气候变化特征和趋势,评估气候因素对水稻产量的影响,为科学指导水稻生产,趋利避害,针对性地进行田间管理提供依据,相关研究对防御气象灾害对水稻生产的影响具有重要的现实意义。

## 1 资料来源和研究方法

### 1.1 数据来源

#### (1) 气候指标

一些学者采用的是作物生长期内的气候数据,但是 1982-2005 年卫星和气候资料反映并非只有生长期内气候数据与作物产量相关,许多植物更需要经过一个严寒的冬天才能度过早春季节。为此,气候指标选用的不仅仅是作物生长期内的数据,而是全年的平均气温和降水量。笔者选取了年平均气温和降水量 2 个气候指标,资料来自国家气候中心。根据数据可得性原则,样本期设定为 1951-2012 年。

#### (2) 社会经济指标

播种面积、农业机械、化肥施用量和水稻劳动力投入 4 个指标的数据来自历年的《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《江西省统计年鉴》。将农业机械、化肥施用量乘以水稻播种面积占总播种面积的比例得到水稻农业机械投入、水稻化肥投入。水稻劳动力投入 (labor) = 农林牧副渔从业人员数  $\times$  农业总产值 / 农林牧副渔总产值  $\times$  水稻播种面积 / 农作物播种面积。样本期设为 1978-2013 年,各变量的描述性统计见表 1。

表 1 变量的描述性统计

Tab.1 Descriptive Statistics of Variables

变量	含义(单位)		均值	标准差	最大值	最小值
Y	水稻产量(万吨)	社会经济指标	1 551.38	227.01	2 004	1 079.5
AEAR	水稻播种面积( $\times 10^4 \text{hm}^2$ )		3 157.07	199.45	3 386.8	2 685.27
POWER	水稻农业机械总动力(万千瓦)		735.76	722.44	2 770.9	155.19
FERTI	水稻化肥施用量(万吨)		53.95	21.25	85.12	13.6
LABOR	水稻农业劳动力(万人)	气候指标	306.76	70.04	438.94	207.33
TEMPER	年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )		18.51	0.518	19.62	17.4
RAINFALL	年降水量(mm)		1 598.47	267.45	2 138	1 166

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 气候变化对水稻产量影响的计量经济模型

将气候因素作为外生变量，构建生产函数模型：

$$Y = \alpha_0 K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} C^{\gamma} \mu \quad (1)$$

其对数函数形式为：

$$\ln Y = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K + \alpha_2 \ln L + \gamma \ln C + \mu \quad (2)$$

式中： $Y$ 表示产出； $K$ 表示资本，这里用指标农业机械总动力 $power$ 代替； $L$ 表示劳动投入，用指标劳动力投入 $labor$ 代替； $C$ 表示气候因素，影响水稻生长最为显著的是气温和降水量，为此，选取年平均气温 $temper$ 和降水量 $rainfall$ 作为气候因子。最后模型为：

$$\begin{aligned} \ln y = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln area + \alpha_2 \ln power + \alpha_3 \ln ferti \\ & + \alpha_4 \ln labor + \gamma_1 \ln temper + \gamma_2 \ln rainfall \\ & + \beta_1 t + \mu \end{aligned} \quad (3)$$

$y$ 为水稻产量， $area$ 、 $power$ 、 $ferti$ 、 $labor$ 、 $temper$ 、 $rainfall$ 分别表示水稻播种面积、水稻农业机械总动力、水稻化肥施用量、水稻劳动力投入、平均气温和降水量，时间趋势项 $t$ 表示技术进步。

### 1.2.2 BP 神经网络模型

建立 BP 神经网络模型预测未来 10a 气候因子对水稻产量的贡献度。BP (Back Propagation) 神经网络是一种基于误差的逆向传播算法训练的多层前馈网络，可以在没有事先设计任何数学模型的情况下，通过神经元之间的相互作用来完成整个网络的信息处理，从而取得满意的预测结果。被广泛应用于一些复杂非线性问题包括水位、太阳辐射等问题的预测和评价。它主要分为两个步骤：一是对网络进行训练，即网络的学习过程；二是对网络进行检验，利用训练好的网络对实际问题进行求解。典型的 BP 网络包括输入层、中间隐含层和输出层（如图 1），其数学原理如下：

该神经元单元由多个输入 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 和一个输出 $y_j$ 组成。中间状态由输入信号和权值运算的和表示，而输出 $y_j$ 可以用数学表达式表示为：

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ji}x_i + \theta_j\right) \quad (4)$$

式中： $\theta_j$ 为神经元单元的偏置值(阈值)； $w_{ji}$ 为连接权系数； $y_j$ 为神经元输出； $t$ 为时间； $f$ 为输出变换函数。

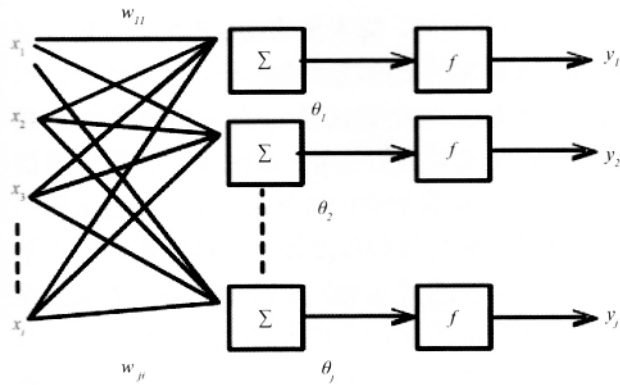


图 1 BP神经网络结构图

Fig.1 Structure of BP Neural Network

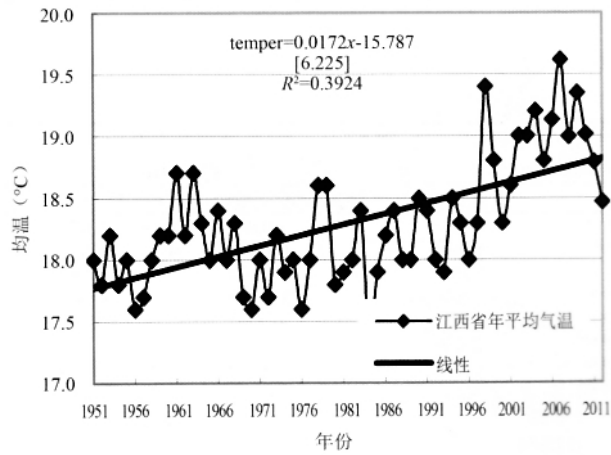


图 2 江西省平均气温的变化趋势

Fig.2 Trend of Average Temperature in Jiangxi

## 2 江西省气候变化的特征分析

### 2.1 气温变化特征

气温的线性拟合方程为：

$$temper = 0.0172x - 15.787 \quad R^2 = 0.3924 \quad (5)$$

线性拟合倾向率为 $0.172^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，江西省年平均气温每10a升高 $0.172^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 降水变化特征

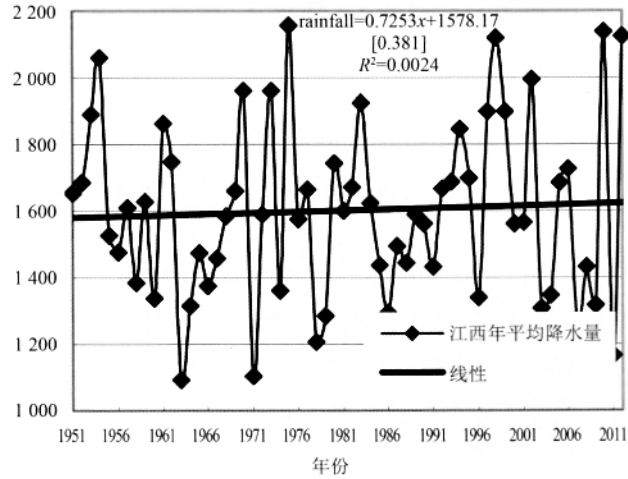


图3 江西省平均降水量的变化趋势

Fig.3 Trend of Average Precipitation in Jiangxi

由图3可看出，1951年-2012年江西省平均降水量相对气温来说波动更大，呈现稍有上升的趋势，但趋势不是很显著，其线性拟合方程为：

$$rainfall = 0.7253x + 1578.17 \quad R^2 = 0.0024 \quad (6)$$

T检验统计量为0.381，没有通过显著性检验，说明降水不存在明显的线性倾向变化。

## 2.3 气温的 M-K 突变检验

Mann-Kendall 是一种非参数检验方法，广泛地被应用在气候数据的趋势分析和突变分析中。对江西省 1951-2012 年平均气温进行 Mann-kendall 突变性检验，利用 Matlab 软件编程求出  $UB_k$  和  $UF_k$ ，并且绘图（图4）。

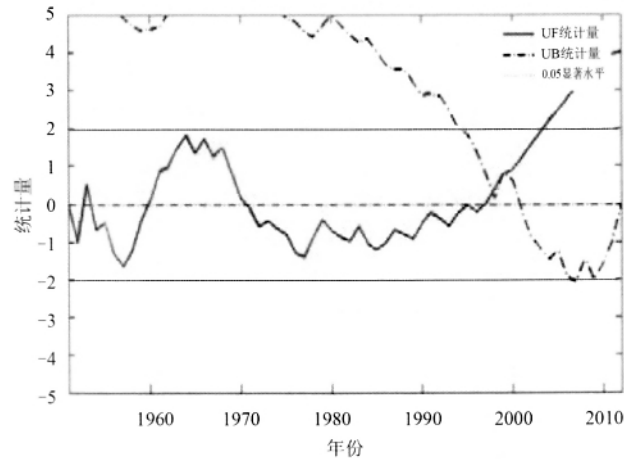


图4 江西省平均气温的Mann-kendall突变检验

Fig.4 Mann-Kendall Mutation Test of Average Temperature in Jiangxi

从图中可以看出，1997年之后UFk曲线值大于0，故1997年之后江西平均气温呈上升趋势。尤其在2004年左右以后，“凡统计量超过了0.05显著性水平的临界值（上限为1.96），上升趋势更加显著。1997年以前的变化趋势未超过0.05显著性水平的临界值，在1997年左右UFk和UBk两条曲线相交，并且交点位于临界值之间，所以可以判断突变的时间大致在1997年左右。

#### 2.4 降水的M-K突变检验

图5可见，UF, ,曲线值以负值为主，主要集中在1956年至1996年左右，表明这40年江西降水量呈减少趋势。1997年至今，除个别年份为负，UFk曲线值取正值。过去60余年来，除个别年份外UFk曲线值没有超出临界值，所以过去60余年江西省的降水量变化趋势并不是很明显，而且UF, ,和UBk在临界线之间的交点不止一个，表明降水量的波动较大。

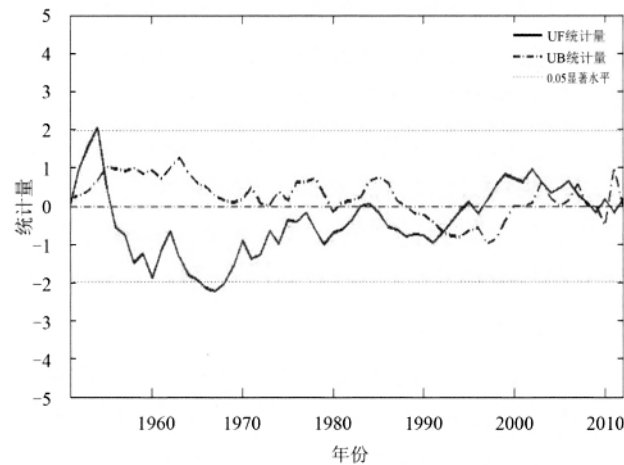


图5 江西省降水量的Mann—kendall突变检验图

Fig.5 Mann-Kendall Mutation Test of Precipitation in Jiangxi

### 3 气候变化对水稻产量影响的计量经济模型分析

#### 3.1 基于气候—经济模型的气象因子对水稻产 I 的影响

鉴于 1997 年气候因子发生了显著变化, 故以 1997 年为临界点, 分别对 1978-1997 年和 1998-2013 年建立模型. 考虑到对时间序列数据建模时, 可能会存在自相关性和异方差性, 本文使用 Newey-West 协方差矩阵对参数修正 (NWOLS), 得到最终的模型估计结果, 如表 2.

表 2 气候因子对水稻产量的影响  
Tab.2 Influence of Climatic Factors on Rice Yield

因变量	水稻产量(lnY) (1978-1997年)		水稻产量(lnY) (1998-2013年)		水稻产量(lnY) (1978-2013年)	
	系数	T统计量	系数	T统计量	系数	T统计量
自变量						
常数	0.918	0.232	-7.588***	-3.3	-0.092	-0.057
lnAREA	0.458**	2.4799	1.91***	8.83	0.94***	5.83
lnPOWER	-0.035	-0.266	0.03	1.288	-0.036	-1.152
lnFERTI	0.142	1.195	-0.198**	2.83	0.216***	4.082
lnLABOR	0.45**	2.303	0.344*	1.837	0.222*	1.812
lnTEMPER	-0.188	-0.292	-0.854**	-2.428	-0.724**	-2.365
lnRAINFALL	0.058	0.164	-0.087**	-2.572	-0.021	-0.563
T	0.019***	3.728	0.0219**	3.23	0.013**	2.563
调整的R <sup>2</sup>	0.87		0.98		0.94	
F统计量	19.126		116.44		83.385***	
D.W	1.836		1.912		1.78	
残差的ADF统计量	-3.894***		-3.167***		-5.397***	

注: \*\*\*, \*\*, \*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著.

总体来看, 在 5% 的显著水平下, 温度对水稻产量有显著的负影响, 在其他因素不变时, 气温每升高 1%, 将导致水稻产量降低 0.724 个百分点; 降水量对水稻产量的影响则不显著, 可能是由于 1978-2013 年期间, 降水量的波动较大, 这也是前]面的降水量对产量的线性趋势不显著的原因. 水稻播种面积、化肥施用量、农业机械总动力在 10% 显著性水平上都显著, 水稻播种面积每增加 1%, 水稻产量将增加 0.94 个百分点, 江西水稻产量对播种面积的依赖程度较高. 化肥施用量每增加 1%, 水稻产量将增加 0.216 个百分点; 农业劳动力每增加 1%, 水稻产量将增加 0.222 个百分点. 技术进步在 1% 的水平上通过了显著性检验, 对水稻产量呈正影响.

分阶段来看, 影响水稻产量的因素发生了显著的突变性, 1997 年以前温度、降水、农业机械总动力和化肥对水稻产量的影响不显著, 之后温度对水稻产量有显著负影响, 温度每升高 1%, 水稻产量减少 0.854 个百分点, 降水对水稻产量也起显著负影响, 降水每增加 1%, 使得水稻产量减少 0.087 个百分点. 播种面积在 3 个模型中都显著, 表明播种面积是水稻产量重要的影响因素.

为了更清楚地认识气候变化对水稻产量的影响, 以上述计量模型为基础, 测算出水稻增产中气候因素的贡献, 将水稻产量减去非气候因素带来的水稻产量, 即可得到气候因素对产量的贡献率, 计算公式如下:

$$\ln y^{climate} = \ln y - \alpha_0 - \alpha_1 \ln area - \alpha_2 \ln power - \alpha_3 \ln ferti - \alpha_4 \ln labor - \beta_1 t - \mu \quad (7)$$

实际操作中, 可以将各变量年均增长率与回归系数相乘, 即可得到各个变量对水稻总产量的贡献率. 为避免突发事件和异常数据的影响, 变量变化率取后 3a 年平均值相对开始 3a 平均值的变化率. 最后计算结果如表 3.

表 3 因素对水稻产量的贡献率

Tab.3 Contribution of Factors to Rice Yield

解释变量	1978-1997年			1998-2013年			1978-2013年		
	系数	变量变化率	贡献率(%)	系数	变量变化率	贡献率(%)	系数	变量变化率	贡献率(%)
物质要素			16.044(74.4)			21.16(71.39)			22.93(83.72)
lnAREA	0.458	-1.303	-0.597(-2.77)	1.91	13.68	26.13(88.14)	0.94	-1.64	-1.54(-5.63)
lnPOWER	-0.035	98.58	-3.45(-16)	0.03	404.69	12.14(40.95)	-0.036	1113.4	-40.08(-146.3)
lnFERTI	0.142	219.16	31.12(144.34)	-0.198	49.57	-9.81(-33.1)	0.216	345.33	74.59(272.3)
lnLABOR	0.45	-24.51	-11.03(-51.15)	0.344	-21.2	-7.29(-24.6)	0.222	-45.2	-10.03(-36.63)
气候要素			1.285(5.97)			2.663(8.98)			-1.78(-6.5)
lnTEMPER	-0.188	-1.73	0.325(1.51)	-0.854	-1.608	1.373(4.63)	-0.724	2.103	-1.523(-5.56)
lnRAINFALL	0.058	16.58	0.96(4.46)	-0.087	-14.82	1.29(4.35)	-0.021	12.255	-0.257(-0.94)
残值(剩余因素)			4.23(19.63)			5.82(19.63)			6.24(22.78)
总增长			21.56(100)			29.64(100)			27.39(100)

注：括号内数字表示各因素的贡献率占总贡献率(100%)的百分比。

从表 3 可知，水稻产量增长来源于 3 个部分：物质要素的变化、气候因素的变化和其他因素的变化。不同阶段这 3 部分的贡献度不一样，但物质因素均超过 70%，与 You 等 [22] 的研究结果接近，其中，化肥的贡献率均较高，表明提高土壤肥力有利于水稻产量的增加。相对于 1978-1997 年，1998-2013 年播种面积和农业机械总动力的贡献率上升，分别达到 88.14%、40.95%，而化肥和农业劳动力投入的贡献率下降。

3 种不同的阶段，气候要素的贡献率远小于物质要素。1978-2013 年气候因子的贡献率为 -6.5%，1998-2013 年相对于 1978-1997 年气候因子的贡献率更高，从 5.97% 增加到 8.98%，同时温度的贡献率从 1.51% 增加到 4.63%，降水的贡献率稍有下降，从 4.46% 降到 4.35%。1978-1997 年温度和降水对水稻产量的作用方向不一致，表明它们之间可能存在一定的交互效应，说明气候变化有较强的复杂性。

### 3.2 未来 10a 气象因子对水稻产 I 的情景模拟

建立 BP 神经网络模型预测 2014-2023 年的江西平均气温和降水量，根据预测值计算出变化率再乘以模型测算出来的 1998-2013 年温度和降水的弹性，即可算出未来 10a 气候因子对水稻产量的贡献度。

BP 神经网络模型中最大训练步长选择 5000，目标误差选择 0.01，其他参数采用缺省值。选用比较常用的方法 AIC 准则，得到气候因子序列最佳滞后期为 5，因此取输入数据的维数为 5，可以表示为一个 5 维的向量，可确定输入层节点为 5。输出层的节点数可以根据实际要求选取，在本研究中输出层节点选取为 1。依据 1978-2005 年的数据作为理想输入，2006-2013 年的预测误差数据作为理想输出，建立一个有 5 个输入层 1 个输出层的三层网络。

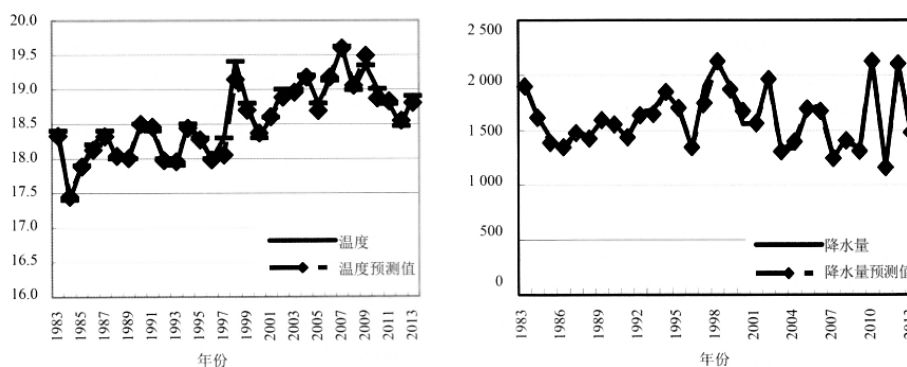


图 6 BP神经网络模型的预测值与真实值

Fig.6 Predicted Values From BP Neural Network and Real Values

图 6 表明预测值与实际值之间的差距不大，相对误差很小，故可以用 BP 神经网络模型对 2014-2023 年江西平均气温和降水量进行预测（表 4），根据预测结果计算出变化率，再乘以表 2 中相应的弹性系数，得到未来 10a 平均对水稻产量的贡献（表 5）。

表 4 未来10a气候因子的变化趋势

Tab.4 Trend of Climatic Factors in the Next 10 Years

年份	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
平均气温预测值(°C)	19.31	19.28	19.45	18.93	18.7	18.92	19.3	18.66	19.27	19.11
降水预测值(mm)	2 275.4	1 381.5	2 158.3	1 440.4	1 906	1 371.2	2 159.6	1 300.4	1 833.6	1 197.3

表 5 未来10a气候因子对江西水稻的贡献

Tab.5 Contribution of Climatic Factors to Rice Yield in Jiangxi in the Next 10 Years

气候因子的贡献	系数(1)	变化率(2)	贡献(3)=(1)*(2)
平均气温的贡献	-0.854	-1.733	1.48
降水的贡献	-0.087	-25.518	2.22

未来 10a 平均气温对江西水稻产量的贡献为 1.48, 比 1978-1997 年气温的贡献 (0.325) 高出很多, 比 1998-2013 年气温的贡献 (1.373) 也略高; 未来 10a 降水量对水稻产量的贡献为 2.22, 比 1978-1997 年降水量的贡献 (0.96)、1998-2013 年降水量的贡献 (1.29) 都高出较多。因此, 未来政府、农业生产等相关部门要加强对洪涝灾害等的预测, 做好应对气候变化的适应性策略。

#### 4 主要结论和政策启示

本文首先利用线性倾向率和 Mann-Kendall 突变检验统计方法, 分析了江西省气候因子的变化趋势和突变性, 发现 1997 年气候因子发生了突变。然后通过构建“气候-经济”新模型, 实证分析了 1978 年以来各阶段气候变化对江西水稻产量的影响及其贡献率, 最后构建 BP 神经网络模型对 2014-2023 年江西气温和降水量进行预测, 利用预测值模拟未来 10a 气候因子对江西水稻产量的贡献, 主要研究结论如下:

(1) 过去 60 余年来江西省气温线性升高趋势明显, 平均每 10a 升高 0.172°C, 而降水的线性倾向不显著; 气温突变开始的时间约为 1997 年, 而降水的突变趋势不明显。

(2) 气候变化对江西省水稻产量有显著影响, 但不同阶段气候因素的贡献率及作用方向存在差异。1978-1997 年气候因子贡献率为 5.97%, 其中温度和降水贡献率分别为 1.51%、4.46%; 1998-2013 年气候因子贡献率较前一阶段有所提高, 为 8.98%, 温度和降水贡献率分别为 4.63%、4.35%; 1978-2013 年气候因子的贡献率为 -6.5%, 温度和降水贡献率分别为 -5.56%、-0.94%。

(3) 物质要素是水稻产量主要的影响因素, 3 个阶段贡献率高达 70% 以上, 其中播种面积和化肥的影响程度较高; 另外, 科技进步在 3 个模型中均显著, 科技进步对水稻产量增加有重要的促进作用; 未来 10a 平均气温对江西水稻产量的贡献为 1.48, 降水量对水稻产量的贡献为 2.22。

水稻产量与气候因子密切相关, 温度和降水等气候因子对水稻产量既有有利的一面, 也有有害的一面。在不同时期气候因子对水稻产量的影响程度存在差异, 1997 年之后气候因素的贡献率增大, 因此, 政府、气象等相关部门应加强气象信息传输, 为粮农合理安排水稻生产, 面对气候变化的不利影响采取相应措施提供理论和技术指导。其次, 播种面积、化肥和技术进步等对水稻产量的贡献率高达 70%, 说明江西省水稻产量的提高仍然依靠物质要素的投入, 因此, 政府部门要保障水稻播种面积, 提高土壤肥力, 加强水稻生产新技术的开发、优良品种的推广、抛秧等栽培技术的应用。