

粮食产量预测理论、方法与应用

I. 科技进步增产理论、模型及其应用

侯彦林¹, 郑宏艳¹, 刘书田¹, 米长虹¹, 王 农¹, 蔡彦明¹, 黄治平¹, 夏 维¹,
王铎今², 任 军³, 王新民⁴, 侯显达⁵

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.北京农业信息技术研究中心, 北京 100089; 3.吉林省农业科学院, 吉林 长春 130033; 4.河南牧业经济学院, 河南 郑州 450011; 5.北京优雅施软件研发服务中心, 北京 100089)

摘 要:粮食增产趋势及增产原因是国家制定宏观农业政策和措施的依据。科技进步增产理论是指:气候是波动的,科技是持续进步的,它是粮食多年持续增产的主要驱动力;科技进步增产预测模型是多年平均单产移动的回归方程。全国和东北三省粮食增产潜力案例分析结果表明:科技进步单产加速时间最早的是辽宁省,最晚的是黑龙江省;与全国相比,吉林省和辽宁省科技进步贡献率高于全国平均水平,黑龙江省低于全国平均水平,吉林省最高。本文初步得出以下结论:科技进步增产理论科学、模型实用、预测结果准确。

关键词:粮食预测;科技进步;增产;理论;模型;应用

中图分类号:S11+4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)03-0205-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0058

The Theory, Method and Its Application of the Grain Yield Forecast

I. The Theory, Model and Its Application of Scientific and Technological Progress in Increasing Grain Yield

HOU Yan-lin¹, ZHENG Hong-yan¹, LIU Shu-tian¹, MI Chang-hong¹, WANG Nong¹, CAI Yan-ming¹, HUANG Zhi-ping¹, XIA Wei¹,
WANG Shuo-jin², REN Jun³, WANG Xin-min⁴, HOU Xian-da⁵

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2.Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China; 3.Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 4.Henan College of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450011, China; 5.Software Development and Service Center of Beijing Yours, Beijing 100089, China)

Abstract: The increasing trend and its causes of grain yield are the basis for a nation to formulate the macroscopic agriculture policies and measures. Increasing Production Theory of Scientific and Technological Progress (IPTSTP) is defined as follows: climate is undulating, while the technological progress is sustainable and it is the main driving force of sustainable increasing production for many years. Increasing Production Forecasting Model of Scientific and Technological Progress (IPFMSTP) is a regression equation for the moving average data of the per unit area yield. The IPTSTP and its methods were applied to analyze the grain yield potential in China and northeast China, respectively. The results showed that Liaoning Province was the earliest one which accelerated per unit area yield by scientific and technological progress, and the latest one was Heilongjiang Province. Compared with other provinces at present, the contribution rate of the scientific and technological progress in Heilongjiang province was lower than the average level in China, while the contribution rate in Liaoning Province and Jilin Province were higher than the national average level. The contribution rate of the scientific and technological progress in Jilin Province was the highest.

Keywords: grain forecasting; scientific and technological progress; increasing production; theory; model; application

粮食产量预测包括短、中、长期生产潜力预测和当年估产两部分,对于国家粮食安全政策制定、当年

贸易策略、粮食期货价格走势判断和国内调配方案实施都具有十分重要的战略意义和现实意义。本系列研究包括粮食生产潜力和估产的理论、方法、参数体系和软件等内容,可为国家、各级政府和商业机构提供适时的粮食预测信息支持和服务,包括6部分:(1)科技进步增产理论、模型及其应用;(2)粮食生产潜力短期预测理论、模型及其应用;(3)粮食生产潜力中、长

收稿日期:2014-03-20

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(2014-cxgc-hyl)

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林公主岭人,博士,研究员,博士生导师,中国科学院“百人计划人才”,中国农业科学院科技创新工程团队首席科学家,主要研究方向为农业资源环境数据挖掘与信息化。E-mail: bjyours@sina.com

期预测理论、模型及其应用;(4)粮食估产理论、模型及其应用;(5)粮食潜力实现率及其评价方法;(6)粮食产量预测软件。内容见图 1。

高产是多数农业生产追求的目标^[1-2],但最近的一些证据表明某些作物增产趋向缓慢甚至在某些环境下停止增产,比如小麦和水稻产量在一些国家就出现了滞增^[3-5]。由于耕地面积逐渐减少^[6]、水资源紧缺^[7]以及众多的耕地面积由食物生产转为燃料生产^[8]等原因,产量的持续增产愈发重要。Specht 等^[9]、Nafziger^[10]认为,产量的年际间波动主要是气候的直接作用或间接作用,在我国这种波动是县级尺度大于省级尺度,省级尺度大于国家级尺度;国内学者建立了基于统计模型的气象因子预测产量的方法^[11-14];多年连续提供全国粮食产量预报的方法^[15]认为社会经济因素决定产量的变化趋势,并认为是产量波动的重要原因之一,强调社会经济因素对产量的贡献。本系列研究认为粮食产量的增产趋势是科技进步驱动的,而年际间的波动主要是气候因素作用的结果^[16-17]。

1 材料与方法

从公开发表的数据中整理出全国和东北三省 1949—2010 年粮食单产数据以及 31 个省、区、直辖市 1979—2010 年粮食单产数据。使用本文提出的科技进步增产理论和模型进行分析。

2 结果与分析

2.1 科技进步增产理论和模型

2.1.1 科技进步增产现象的普遍性

通过观察人类文明社会迄今为止的粮食单产增

加的事实,可以总结出以下规律:粮食单产总是随时间递增而呈现波动式上升趋势,这是因为科技总是进步的,气候总是波动的,单产持续上升的驱动力只能是持续的科技进步。将中国 1949—2010 年的粮食单产数据画成趋势图(图 2),同时分析了全国 31 个省、区、直辖市以及典型县的数据,结果表明不同空间尺度下粮食单产几乎都呈现类似于图 2 的波动式上升趋势,这说明科技进步增产趋势具有普遍性。

2.1.2 “现状生产潜力”概念

为了与以往研究者使用的粮食或作物生产潜力概念相区别,现定义“现状生产潜力”的概念,即它是指在一定的空间单元上(Space),在特定的时间范围内(Time),种植某一作物的主导品种或主导品种组合,在当时经济技术水平、科技投入、政策保障条件下(Human),在土地条件相对稳定阶段(Land),特别是在多年平均气候条件下(Climate),所达到(指过去或现在)或能够达到(指未来)的产量,它是以上五大因素综

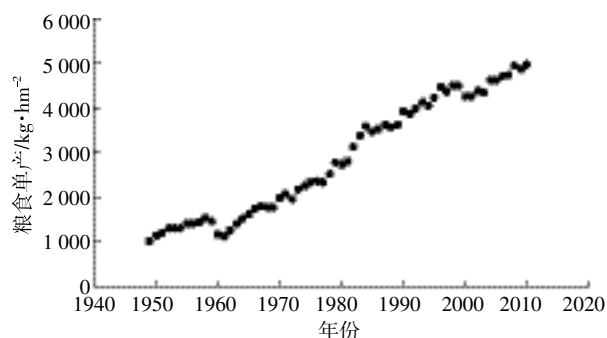


图 2 中国 1949—2010 年粮食单产趋势图

Figure 2 Trend of grain yield per unit for China from 1949 to 2010

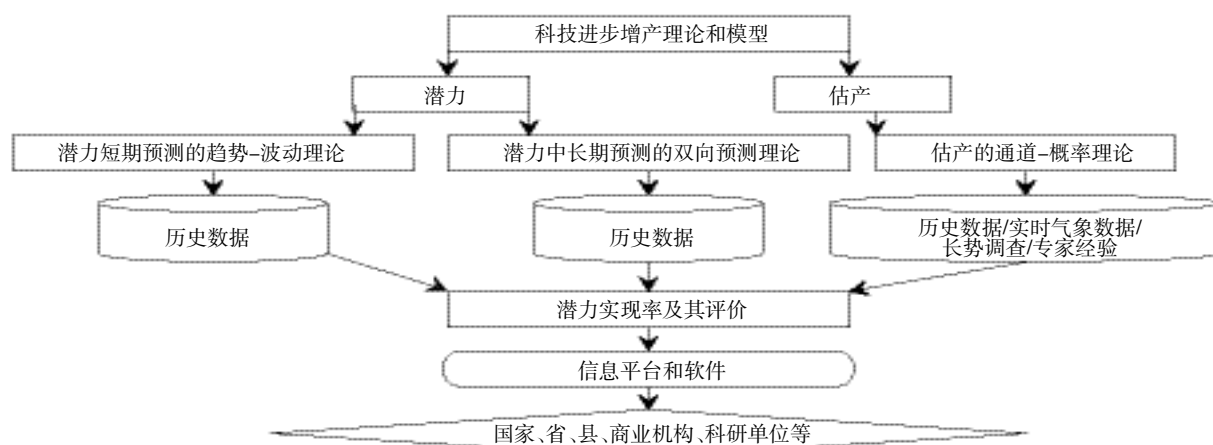


图 1 中国粮食产量预测框图

Figure 1 Grain production forecasting of China

合作用下的产量。就生产潜力预测而言,多指未来某一年的产量或某段时间内的平均产量。如吉林省公主岭市 2005 年玉米 209 品种在 2005 年土地状况下,在 2005 年生产技术、投入和多年平均气候条件下单产为 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,它即为该市当年玉米主导品种单产的生产潜力;如预测到 2015 年潜力为 $8\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,则是指 2015 年当时的以上要素组合在多年平均气候条件下的单产。

2.1.3 粮食产量“天-人-地概念模型”

结合以往的研究结果^[18-21],将粮食产量构成概化为“天-人-地概念模型”,即:

$$Y(\text{产量})=f(\text{天,人,地})_{\text{空间,时间}}=f(C,H,L)_{S,T} \quad (1)$$

其中,“天”是以气候(Climat)为主的大环境要素的综合因素;“人”是以人(Human)为主的社会、经济综合影响因素;“地”是以土地(Land)为主的下垫面局部环境条件;产量同样也与耕地所处的空间位置(Space)和历史时间(Time)有关。这里,特定的“天”、“人”和“地”组合在一起也构成特定的“空间”。

求解上述概念模型需要参数,本文对参数做如下规范:模型所用数据是公开发表的或能够获得的数据,它是参数的基础;统计参数是按某种数学方法对原始数据进行统计而获得的指标,它是趋势研究不可缺少的统计指标;指标体系是指所有待用指标按某种结构组织在一起的全部指标,它构成模型的参数体系。为了进行系统、深入、定量地研究和快速提供研究结果,以上研究必须实现流程化、模型化和信息化。

2.1.4 单产通道划分方法

如图 3 所示,对一个趋势内的所有历史年的单产数据进行(线性)回归,它是平均气候条件下的产量趋

势模型,也为单产增加趋势通道中轨。以一个上升趋势内的所有散点图中的历史最好年和最差年的点位为基础,分别做平行于中轨的 2 条直线,其所夹的区域称为上升通道,其中通过历史最好年的直线为单产增加趋势通道上轨,通过历史最差年的直线为单产增加趋势通道下轨。再将近似平分中轨和上轨之间距离的直线作为平产年上限,将近似平分中轨和下轨之间距离的直线作为平产年下限,相应地可将整个通道划分为丰产年、平产年、欠产年 3 种气候年型,其中平产年的产量振幅为平产年上限和平产年下限之间的范围。

2.1.5 科技进步增产理论

把式(1)概念模型具体化,可以获得科技进步单产增产解析式,如下:

$$Y_{\text{实}}=Y_{\text{平}}+\Delta Y_{\text{科}}+\Delta Y_{\text{波}} \quad (2)$$

式(2)中: $Y_{\text{实}}$ 为当年“天”、“人”、“地”作用下的实际产量; $Y_{\text{平}}$ 为前一年或前第 n 年科技水平下的平均气候条件下的平均产量,即当时的“人”和“地”作用下的产量; $\Delta Y_{\text{科}}$ 为与前一年或与前第 n 年相比科技进步的增产量,即“人”或科技进步的增产量; $\Delta Y_{\text{波}}$ 为当年气候与多年平均气候相比的产量变化量,即“天”波动的产量。

将式(2)中的“ $Y_{\text{平}}+\Delta Y_{\text{科}}$ ”定义为“ $Y_{\text{潜}}$ ”,则式(2)变成:

$$Y_{\text{实}}=Y_{\text{潜}}+\Delta Y_{\text{波}} \quad (3)$$

而 $Y_{\text{潜}}$ 就是我们z需要建立模型预测的短、中、长期生产潜力,它是相对平均气候条件下的“现状(或未来)生产潜力”;我们的研究重点是如何从 $Y_{\text{实}}$ 中分离掉 $\Delta Y_{\text{波}}$,然后再研究 $Y_{\text{潜}}$ 的趋势。

在实际使用统计数据时,式(2)可转化为以下通

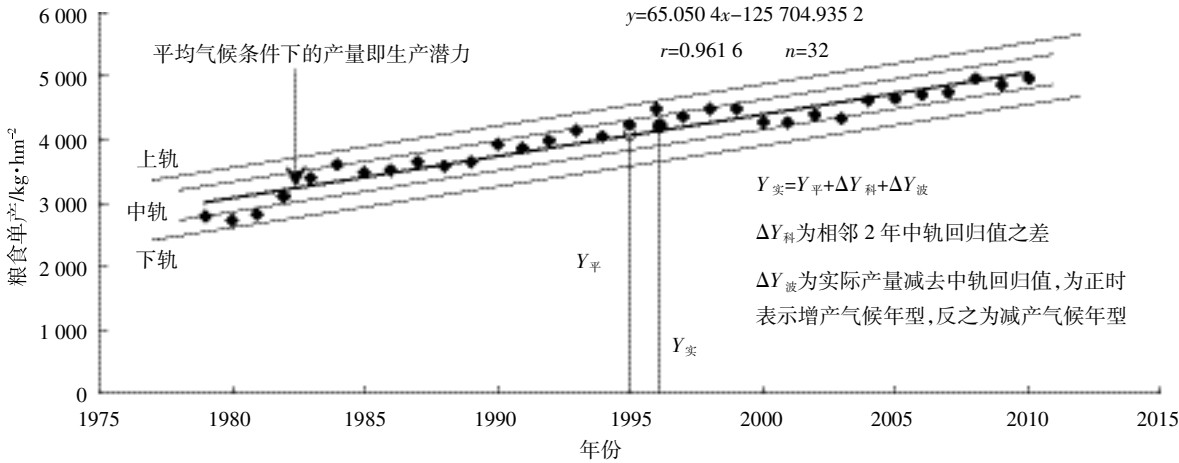


图 3 中国 1979—2010 年粮食单产趋势图

Figure 3 Trend of grain yield per unit for China from 1979 to 2010

式:

$$Y_{\text{实平}q} = Y_{\text{实平}p} + \Delta Y_{\text{科}(p-q)} + \Delta Y_{\text{波}(q-\text{多年平均气候等自然条件})} \quad (4)$$

式(4)中: $Y_{\text{实平}q}$ 为第 q 年(或季,下同)某区域某作物(或粮食作物,下同)实际平均单产(在每年播种面积变化不大情况下也可为总产); $Y_{\text{实平}p}$ 为某区域第 p 年某作物在平均生产技术、平均投入水平和多年平均气候等综合自然条件下的实际平均单产(也是与第 q 年比较的基准年的实际平均单产),这里 $q > p$, q 和 p 可以是相邻年也可以是相隔多年; $\Delta Y_{\text{科}(p-q)}$ 为从第 p 年到第 q 年科技进步的单产,也包含与第 p 年相比第 q 年科技进步与第 q 年平均生产技术、平均投入水平和多年平均气候等综合自然条件交互作用的产量; $\Delta Y_{\text{波}(q-\text{多年平均气候等自然条件})}$ 为第 q 年气候等自然条件偏离多年平均气候等自然条件而波动的单产。式(4)可解析为图 3 示意图,若以 1995 年为基准年,则 1996 年实际平均单产为式(4)。

2.1.6 科技进步增产的“多年平均产量移动模型”

根据式(4),可以写出如下一系列方程:

$$Y_{\text{实平}1} = Y_{\text{实平}0} + \Delta Y_{\text{科}(0-1)} + \Delta Y_{\text{波}(1-\text{多年平均气候等自然条件})} \quad (5)$$

$$Y_{\text{实平}2} = Y_{\text{实平}1} + \Delta Y_{\text{科}(1-2)} + \Delta Y_{\text{波}(2-\text{多年平均气候等自然条件})} \quad (6)$$

$$Y_{\text{实平}10} = Y_{\text{实平}9} + \Delta Y_{\text{科}(9-10)} + \Delta Y_{\text{波}(10-\text{多年平均气候等自然条件})} \quad (7)$$

$$Y_{\text{实平}11} = Y_{\text{实平}10} + \Delta Y_{\text{科}(10-11)} + \Delta Y_{\text{波}(11-\text{多年平均气候等自然条件})} \quad (8)$$

我们的研究表明:在我国,气候对粮食产量影响周期为 8~14 年,平均 10 年,这与太阳黑子活动周期 10 年左右相吻合;就全国平均而言,当取气候变化周期 10 年的平均单产时,剔除掉气候影响因素的效果最好。所以,现在假如取 10 年单产相加,即 $Y_{\text{实平}1} + \dots + Y_{\text{实平}10}$,得到:

$$\sum_{j=1}^{10} Y_{\text{实平}j} = \sum_{j=0}^9 Y_{\text{实平}j} + \sum_{j=0}^9 \Delta Y_{\text{科}(0+j-j+1)} + \sum_{j=1}^{10} \Delta Y_{\text{波}(j-\text{多年平均气候条件})} \quad (9)$$

从多年气候变化概率上分析, $\Delta Y_{\text{波}(j-\text{多年平均气候条件})}$ 出现的正负概率相近,当 n 大到一定数量时,

$\sum \Delta Y_{\text{波}(j-\text{多年平均气候条件})} \approx 0$ 。所以,

$$\sum_{j=1}^{10} Y_{\text{实平}j} \approx \sum_{j=0}^9 Y_{\text{实平}j} + \sum_{j=0}^9 \Delta Y_{\text{科}(0+j-j+1)} \quad (10)$$

如果式(10)除以 10,得,

$$Y'_{(\text{实平}10)-2} \approx Y'_{(\text{实平}10)-1} + \Delta Y'_{\text{科}(0 \rightarrow 10)} \quad (11)$$

式(11)中: $Y'_{(\text{实平}10)-2}$ 为第 2 个 10 年平均单产; $Y'_{(\text{实平}10)-1}$ 为包括参比年在内的第 1 个 10 年平均单产; $\Delta Y'_{\text{科}(0 \rightarrow 10)}$ 为与参比年相比 10 年平均科技进步增加的单产。

采用以上同样的方法可以获得第 3 个 10 年的 $Y'_{(\text{实平}10)-3}$,第 4 个 10 年的 $Y'_{(\text{实平}10)-4}$,……。在由以上这些 10 年平均单产散点组成的散点图上,气候等自然条件对产量的影响基本被消除(如果 n 取足够大数值后),因此,由这些散点组成的折线假如以基准年的 $Y_{\text{实平}0}$ 作为参比,即得到科技进步对单产增加的趋势线。如果对这些散点图进行回归即可得到科技进步增产的“多年平均产量移动模型”,并可对未来年进行预测。

综上所述,式(11)概化成通式为,

$$Y'_{(\text{实平}m)n+j} \approx Y'_{(\text{实平}m)n} + \Delta Y'_{\text{科}(0 \rightarrow m)} (j=1, 2, 3, \dots; m=10, 11, 12, \dots) \quad (12)$$

式(12)中物理量的含义是: $Y'_{(\text{实平}m)n+j}$ 为从 n 年到 $n+j$ 年连续 m 年的实际单产的平均值; $Y'_{(\text{实平}m)n}$ 为累计到包括 n 年在内的前连续 m 年实际单产的平均值; $\Delta Y'_{\text{科}(0 \rightarrow m)}$ 为从 n 年到 $n+j$ 年连续 m 年的科技进步增加的单产。

至此,根据每年实际单产数据和式(12)可以计算出按同一年限(m)计算的多年平均单产的多个数据,这些数据可以画成散点图。由于科技总是进步的,气候波动等因素的影响被多年平均单产趋势基本消除了,因此由这些散点组成的折线总是呈现上升趋势。然而,科技进步的推广也会受到社会、经济因素的影响以及自身的波动,加之以上分析的气候因素等不能完全被剔除掉,多多少少地也会对上升趋势产生一定程度的波动,但不会影响产量上升的总趋势。对于少数不符合上升趋势的案例,将采用其他方法建模,此处不在赘述。

2.1.7 科技进步累计增加量计算方法

用第 i 年的 m 年移动平均值与第 $i-1$ 年的 m 年移动平均值相减,得出的差值为科技进步对粮食单产贡献的产量增加量,将所有年份的增加量按年份依次累加,得到科技进步对产量贡献的累计增加量。通过对累计增加量变化趋势的分析可以得出科技进步对产量的贡献状况。

2.2 科技进步增产理论和模型的应用

2.2.1 全国科技进步增产速度趋势

分别以 m 为 2、5 年和 10 年为时间移动步长,计

算全国科技进步增产情况,并绘成图4。从图4中可以看出如下结论:我国科技进步增产效应呈现波浪式

分布趋势,目前正处在科技进步增速下滑阶段,面临着需要加大科技投入才能提高单产的难题。

2.2.2 全国和东北三省科技进步增产趋势

以东北三省和全国1949—2010年粮食单产统计数据为依据,实证以上理论。图5中显示了辽宁省不同年份单产散点图和 m 为5、10、20年的单产散点图。从图5中可以看出,随着 m 值的增大,曲线逐步稳定和平滑,但当 m 值太大时,反映最近产量变化趋势的信息减少,所以以下分析以10年为例。

图6是以10年为移动步长统计的全国和东北三省粮食单产的科技进步增量情况。1958—1970年,粮食单产累计增加量增长缓慢,表明科技进步对粮食增产作用较小。从1974年开始辽宁省累计增加量加速增长,吉林省和黑龙江省加速增长的年份分别出现在1978年和1987年;黑龙江省加速增长的年份晚于辽宁省13年,吉林省晚于辽宁省4年,但到1987年吉林省累计增加量开始超过辽宁省,且之后一直高于辽宁省。以上结果表明辽宁省科技进步对粮食增产作用发挥的最早,黑龙江省最晚,吉林省居中,但随着吉林省科技的持续应用,粮食产量不断增长,吉林省1987年科技进步对产量的增加量超过辽宁省;全国粮食单产累计增加量增长一直比较平稳。1973年开始辽宁省粮食单产累计增加量超过全国,吉林省于1984年开始超过全国,而黑龙江省一直处于全国平均水平之下。表明黑龙江省科技对粮食产量的贡献一直低于全国平均水平(这里也有大豆产量低的因素);2000年左右,全国和东北三省累计增加量均出现了不同程度的下降趋势,表明此时由于经济发展影响农民种田积极性以及政策等影响科技推广力度。

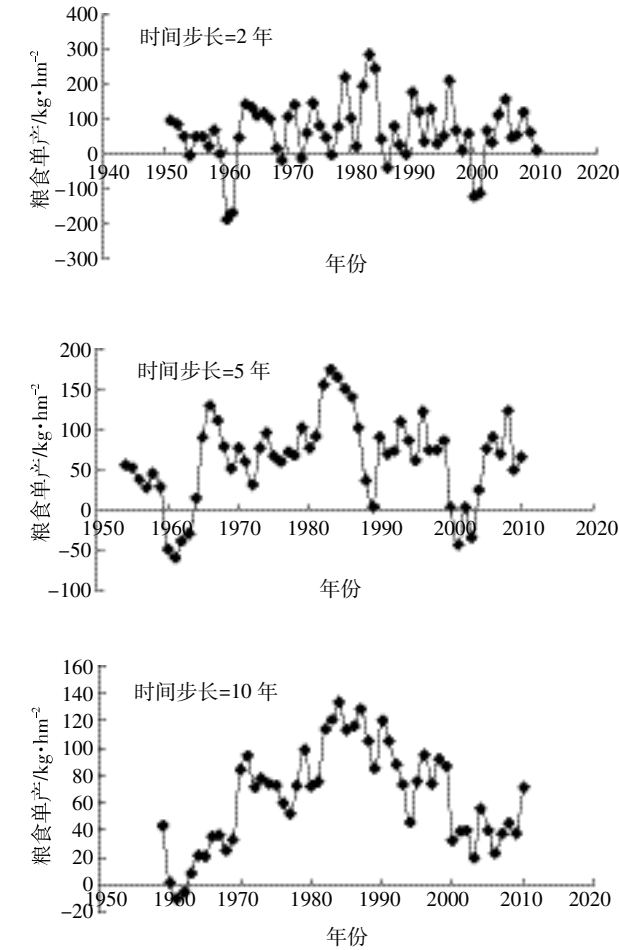


图4 时间步长为2年、5年、10年的全国科技进步增产趋势图
Figure 4 The national increasing trend of scientific and technological progress by step length of 2, 5, 10 years

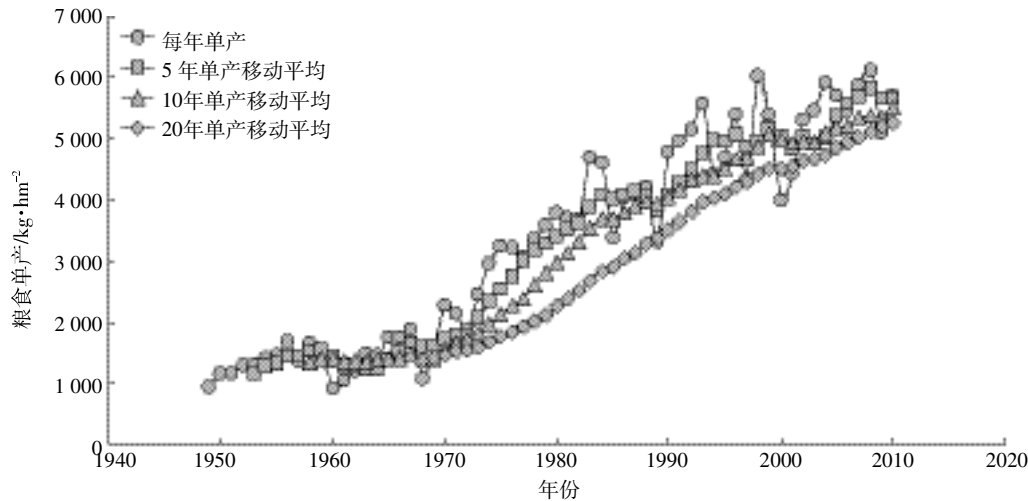


图5 辽宁省粮食单产和多年平均单产散点图
Figure 5 The splattering map of grain yield per unit and average multi-yield per unit for Liaoning Province

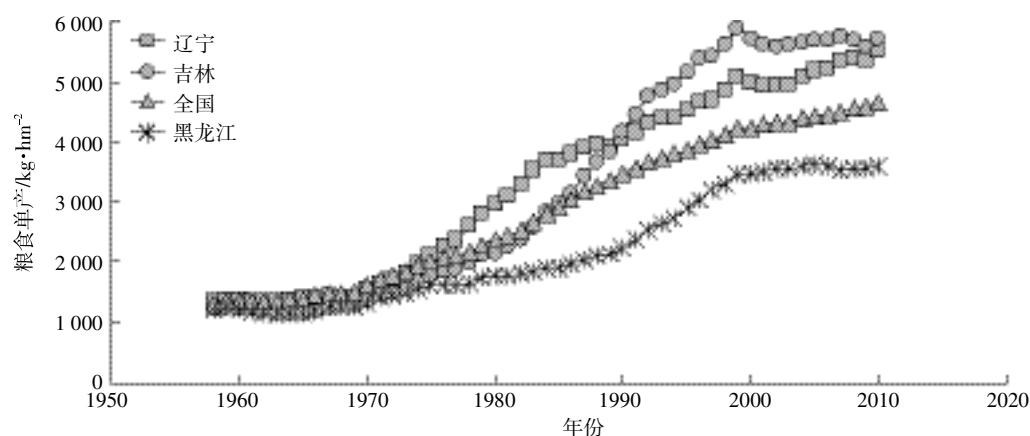


图 6 全国和东北三省粮食单产累计增加量

Figure 6 Cumulative increasing of grain yield per unit for the national and three northeast provinces

2.2.3 全国和东北三省单产翻番情况

东北三省和全国单产累计增长速度见图 7。以 10 年为多年平均单产,全国与 1958 年相比,到 2010 年科技贡献已经净增 2.53 倍,从 1958 年净增 1 倍花费 25 年(1983 年),从 1983 年再净增 1 倍花费 14 年(1997 年);从 1997 年再净增 0.5 倍花费 13 年。辽宁与 1958 年相比,到 2010 年科技贡献已经净增 3.11 倍,从 1958 年净增 1 倍花费 21 年(1979 年),从 1979 年再净增 1 倍花费 11 年(1990 年);从 1990 年净增 1 倍花费 17 年(2007 年)。吉林与 1958 年相比,到 2010 年科技贡献已经净增 3.71 倍,从 1958 年净增 1 倍花费 25 年(1983 年),从 1983 年再净增 1 倍花费 5 年(1988 年);从 1988 年再净增 1 倍花费 5 年(1993 年),之后一直徘徊。黑龙江与 1958 年相比,到 2010 年科技贡献已经净增 1.95 倍,从 1958 年净增 1 倍花费 34 年(1992 年),从 1992 年再净增近似 1 倍花费 10 年(2002 年),之后一直徘徊。可见科技对单产贡献的影响呈现“慢—

快—慢”的趋势,目前处于慢的阶段。以上分析不难得出结论:如果以 1958 年时的前 10 年的单产为基础,全国和东北三省单产增加的部分都是科技进步的贡献,全国和黑龙江、吉林、辽宁分别为 2.53、1.95、3.71 倍和 3.11 倍。

3 结论

(1)根据科技进步增产现象的普遍性提出“现状生产潜力”概念和粮食产量“天—人—地概念模型”,据此提出科技进步增产理论和建立预测模型,这些研究工作属于自成体系的原始创新,概念模型解析式中变量的物理学意义和生产意义明确;

(2)提出的多年单产移动平均趋势分析方法能有效地将气象因素和人为因素分离开,是计量科技进步对单产贡献的理论依据和方法基础;

(3)所建立的分析方法可以用于估算国家和省级粮食单产的科技贡献率;

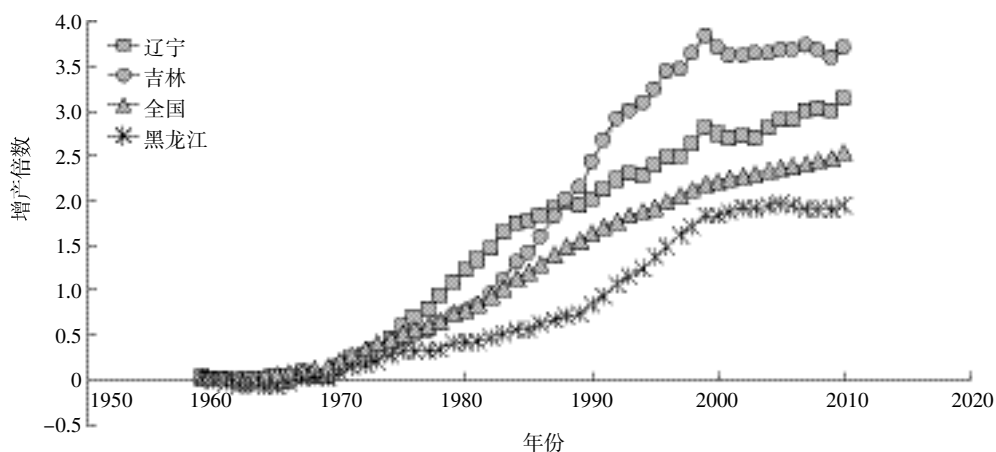


图 7 全国和东北三省单产累计增加倍数

Figure 7 Cumulative increasing ratio of total production for the national and three northeast provinces

(4)东北三省对比研究表明,科技进步推广深受地域社会、经济和科技发展水平影响。

参考文献:

- [1] Evans L. Adapting and improving crops: the endless task[C]//Greenland D, Gregory P, Nye P, et al. Land resources: On the edge of the Malthusian precipice. Wallingford: CAB International Publisher, 1998: 41–46.
- [2] Cassman K. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 5952–5959.
- [3] Pingali P, Hossain M, Gerpacio R. Asian rice bowls: The returning crisis [C]. Wallingford: CAB International Publisher, 1997.
- [4] Calderini D, Slafer G. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century[J]. *Field Crops Res*, 1998, 57: 335–347.
- [5] Cassman K, Dobermann A, Walters D, et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality [J]. *Ann Rev Environ Res*, 2003, 28: 15–58.
- [6] Lal R. Soil degradation and global food security: a soil science perspective[C]// Wiebe K, Land quality: Agricultural productivity and food security. Cheltenham: Edward Elgar Publisher, 2003: 16–35.
- [7] Postel S. Pillar of sand: Can the irrigation miracle last[M]. New York: w.w. Norton Press, 1999.
- [8] Baker A, Zahner S. Ethanol reshapes the corn market[J]. *Amber Waves*, 2006(4): 30–35.
- [9] Specht J, Hume D, Kumudini S. Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective[J]. *Crop Sci*, 1999, 39: 1560–1570.
- [10] Nafziger E. Soybean production in the midwestern USA: technologies for sustainable and stable yields[C]// Moscardi F, et al. Proceedings of world soybean research conf: VIII. Embrapa Soybean. Brazil: Londrina publisher, 2004: 523–530.
- [11] 王馥棠. 我国粮食产量气象预测预报研究[M]. 北京: 气象出版社: 1989.
- WANG Fu-tang. The Meteorological monthly forecasting for grain yield in China[M]. Beijing: Meteorological Monthly Press, 1989. (in Chinese)
- [12] 王馥棠. 我国小麦产量农业气象预测模式的初步研究[J]. 科学通报, 1983, 28(9): 546–567.
- WANG Fu-tang. A preliminary study on forecasting model for agricultural meteorological monthly wheat in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(9): 546–567. (in Chinese)
- [13] 赵四强. 应用海温预报粮食产量的初步探讨[J]. 科学通报, 1982, 27(20): 1269–1272.
- ZHAO Si-qiang. A preliminary study on application sea temperature on grain yield in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1982, 27(20): 1269–1272. (in Chinese)
- [14] 赵四强. 国家级农业气象产量预报业务系统及其服务效益[J]. 气象, 1991, 17(8): 50–52.
- ZHAO Si-qiang. A forecasting system for national agricultural meteorological monthly yield and its service benefit[J]. *Meteorological Monthly*, 1991, 17(8): 50–52. (in Chinese)
- [15] Chen X K, Pan X M, Yang C H. On the study of China's grain prediction[J]. *Int Trans Oper Res*, 2001, 4(8): 429–437.
- [16] 李红英, 侯彦林, 周永娟, 等. 辽宁省粮食单产通道模式及施肥结构变化分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4): 408–410.
- LI Hong-ying, HOU Yan-lin, ZHOU Yong-juan, et al. Variations trend of grain yield per unit area and fertilizer application systems in Liaoning province[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(4): 408–410. (in Chinese)
- [17] Zhou Yong-juan, Hou Yan-lin, Li Hong-ying. Statistical model for maize yield forecasting for Jilin province, China[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2009, 16(3): 232–234, 239.
- [18] 侯彦林. 生态平衡施肥: II. 施肥参数指标体系[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(3): 65–67.
- HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: II. Fertilization parametric norm system[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008, 23(3): 65–67. (in Chinese)
- [19] 侯彦林. 生态平衡施肥: III. 施肥专家系统软件[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(4): 62–64.
- HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: III. Specialist system software for fertilization[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008, 23(4): 62–64. (in Chinese)
- [20] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 等. 中国农田氮面源污染研究: II. 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1277–1282.
- HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHOU Yong-juan, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: II. Establishment of index system for evaluation of pollution degree[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1277–1282. (in Chinese)
- [21] 侯彦林, 赵慧明, 李红英. 中国农田氮肥面源污染研究: III. 估算模型的实证[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1337–1340.
- HOU Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying. Estimation and demonstration of nitrogen non-point pollution in China: III. Demonstration of the model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1337–1340. (in Chinese)