

粮食产量预测理论、方法与应用

II. 粮食生产潜力短期预测理论、模型及其应用

郑宏艳¹, 刘书田¹, 王铄今², 侯彦林^{1*}, 米长虹¹, 王 农¹, 蔡彦明¹, 黄治平¹,
夏 维¹, 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: 粮食生产潜力短期预测结果可以检验粮食中长期生产潜力预测的准确性和为国家提供制定粮食生产战略的科学依据。粮食生产潜力短期预测理论即“趋势-波动理论”, 它建立在粮食或作物“现状生产潜力”概念和“天-人-地概念模型”基础上, 预测模型为最佳移动步长条件下的多年单产移动平均趋势模型, 实际预测时采用系统预测方法。11 个研究案例预测的平均误差为 0.77%, 最大误差为 2.99%, 预测精度高。本研究初步结论是: 粮食生产潜力短期预测理论和模型是科学和实用的。

关键词: 粮食生产潜力; 短期; 预测; 理论; 方法

中图分类号: S114

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2014)03-0212-08

doi: 10.13254/j.jare.2014.0068

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

II. The Theory, Method and Its Application of Short-Term Forecast of the Grain Yield Potential

ZHENG Hong-yan¹, LIU Shu-tian¹, WANG Shuo-jin², HOU Yan-lin^{1*}, MI Chang-hong¹, WANG Nong¹, CAI Yan-ming¹, HUANG Zhi-ping¹,
XIA Wei¹, 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 accuracy of the long-term forecast of grain production potential can be tested by the short-term forecast results of grain production potential, and the scientific basis for the national strategy of grain production also can be provided. The theory of short-term forecast of the grain production potential, namely, the theory of trend-volatility, is established on the basis of the concept of current production potential of grain or crop and the conceptual model of climate, human and land. Forecasting model is the moving average trend model of multi-year per unit area yield under the condition of the optimum moving step. The systematic forecast method was used to predict the short-term grain production potential. The above theory and methods were demonstrated by 11 cases in China and three provinces, respectively. The average error of 11 cases was 0.77%, the maximum error was 2.99%, and the accuracy of prediction was high. The results showed that the theory and model of short-term forecast of the grain production potential were scientific and practical.

Keywords: grain yield potential; short-term; forecasting; theory; method

粮食生产潜力的研究, 对于制定一个国家的作物生产规划、粮食储运、人口控制、合理开发利用农业自

然资源以及环境保护等一系列基本国策都具有重要的战略意义和现实意义。目前, 由于耕地面积逐渐减少^[1]、水资源紧缺^[2], 耕地由生产食物转化为生产燃料^[3], 以及像 2012 年美国玉米大面积干旱和俄罗斯作物大幅度减产等气象灾害的影响, 这些原因都影响全球粮食市场稳定, 因此, 粮食安全问题的研究将始终是国内外研究的重点。

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程(2014-cxgc-hyl)

作者简介: 郑宏艳(1986—), 女, 辽宁铁岭人, 硕士, 研究实习生, 主要从事粮食产量研究、数据挖掘和 GIS 应用研究。

E-mail: zhenghongyan5540@163.com

* 通信作者: 侯彦林 E-mail: bjyours@sina.com

传统的粮食生产潜力是指:影响作物产量的所有因子都达到最佳状态时作物所能达到的产量。有关粮食潜力的研究可以追溯到20世纪60年代,50多年来,随着研究的逐步深入,各种计算方法相继应用,大量的计算公式不断问世,有关计算参数逐步精确^[4-30],其中,“机制法”和“AEZ法”是应用最广泛的粮食生产潜力研究方法,这些研究工作对于我国的农业生产、农业规划和区划曾起到良好的指导作用。但是,这些基于光、热、水资源角度估算的粮食生产潜力往往高于农业的实际生产水平,且参数众多,难以确定主要限制因子的权重,故其预测结果指导实际生产的意义不大。

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。使用本文提出的粮食生产潜力短期预测理论即“趋势-波动理论”,它建立在粮食或作物“现状生产潜力”概念和“天-人-地概念模型”基础上,预测模型为最佳移动步长条件下的多年单产移动平均趋势模型,实际预测时采用系统预测方法。

2 结果与分析

2.1 粮食生产潜力短期预测的“趋势-波动理论和方法”

侯彦林等^[30]以粮食或作物“现状生产潜力”概念为内涵,提出了粮食产量“天-人-地概念模型”,并根据科技进步增产现象的普遍性,对粮食单产趋势确定出上升通道,提出科技进步增产理论和推导出科技进步增产预测模型,并可以计算科技进步累计增加量,用来估算过去或未来科技进步的贡献率^[30]。

多年单产移动平均模型:参照文献^[30],现有 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_j, \dots, y_m$ 共计连续 m 年的单产数据,分别计算 n 年单产平均,即 $(y_1+y_2+\dots+y_n)/n, (y_2+y_3+\dots+y_{n+1})/n, \dots, (y_{m-n+1}+y_{m-n+2}+\dots+y_m)/n$, 以 $n, n+1, \dots, m$ 为横坐标,以 $(m-n+1)$ 个的 n 年平均单产为纵坐标作散点图,并对散点图进行回归(多数情况下取线性回归),所获得的方程即为多年单产移动平均(Moving Average, MA)模型。

粮食生产潜力短期预测的“趋势-波动理论和方法”:如文献^[30]分析,气候具有周期性和波动性,相隔 n 年的2年(第 $n+j-1$ 和第 $j-1$)的气候差异对单产影响之差可正、可负、可零,而多年的连续2年气候之差影响的产量累计之和近似为零,它不会成为单产逐渐

上升的动力。因此,相隔 n 年的2个多年单产平均值之差近似等于这 n 年来科技进步对粮食生产潜力的贡献。至此,通过多年单产移动平均模型可以基本分离掉气候对产量的波动影响。所以,多年单产移动平均模型亦即粮食生产潜力($Y_{潜}$)预测模型。如果是直线方程,则每年科技进步对产量的贡献就是回归方程的斜率。

2.2 粮食生产潜力短期预测方法

为了验证以上理论和模型的正确性,现介绍系统预测方法的内容。所谓系统预测方法,就是按流程执行的所有方法的组合。

2.2.1 建模 n 值的确定方法

当取不同的 n 值时所获得的回归方程不同,其相关系数 r 也不同,以 $n(2 \leq n \leq m-1, m$ 为所有连续单产的年限)值为横坐标,以 r 为纵坐标画 $n-r$ 散点图(图1)。为确保回归模型的平均误差和最大误差最小以及用以建立回归模型的点数($m-n+1$)不会太少,确定 n 值遵循以下3条原则: r 达到极显著水平,剩下的年限($m-n+1$)不小于总样本年限的 $m/2$; 在样本较少的情况下剩下的年限至少要有10年以上;当剩下的年限少于 $m/2$ 时,可以降低 r 到显著水平,相应地 n 也减小了,以此增大 $m-n+1$ 年限。大量研究案例表明:目前仅用到线性回归和一元二次方程回归模型,并且前者居多。实际计算时软件可自动完成 n 值的优选并给出最优模型。

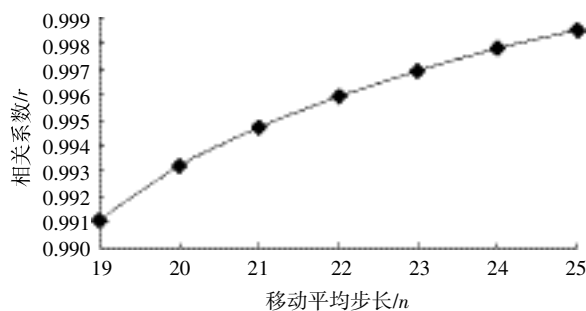


图1 辽宁省粮食单产 $n-r$ 图

Figure 1 The $n-r$ map of grain yield per unit for Liaoning Province

2.2.2 逐年预测时 n 值的确定方法

当一个模型建立后,使用它预测未知年生产潜力时,每年都将增加一年的产量数据用来预测下一年的产量,称之为逐步预测方法。众多研究案例表明:随着年限的增加,必须不断地筛选最佳 n 值才能获得最佳的预测结果,理论上每增加一年的单产数据需要重新优选一次 n 值,实际计算时软件可自动完成 n 值的

优选。

2.2.3 单产潜力通道发生变化时的预测方法

连续每年预测生产潜力时,当发现生产潜力趋势发生明显变化即出现拐点时,必须重新选择建模样本,即重新确立单产潜力通道和建模起、止年,实际计算时软件可自动完成优选。众多研究案例表明:以下 2 种方法可以解决拐点问题。(1)简单模型法:当使用原有模型预测的误差连续 3 年(次)超过 5% 以上时,就可以使用最近连续 3 年以上的数据进行简单的线性回归,并随时间增加不断增加建模年限。(2)分段模型法:当一个大趋势中包含若干个小趋势时,使用最近的小趋势预测最近的未来,前面的趋势只用作分析历史趋势之用。

2.2.4 小趋势修正方法

从众多研究案例中发现,预测误差分布具有很强的规律性,基本呈正弦曲线波动(见图 2)。误差有规律的分布必然包含了一段时间内社会因素如政策、经济因素如投入、自然因素如气候波动等的综合信息,即在一次性使用多年单产移动平均模型去除了气候的大部分影响之外,还存在一些难以确定的综合因素波动的影响,而我们可以利用误差的这种呈正弦曲线波动的特点来修正预测结果。为此,提出总体大趋势预测(多年单产移动平均模型)+局部小趋势修正的预测方法。大量研究结果表明,以下方法最佳:

$$\text{即: } Y_{\text{潜修}} = Y_{\text{潜}} \times (1 - \text{前一年预测误差}\%) \quad (1)$$

则,修正之后的预测误差为:

$$e = (Y_{\text{潜修}} - Y_{\text{实}}) / Y_{\text{实}} \times 100\% \quad (2)$$

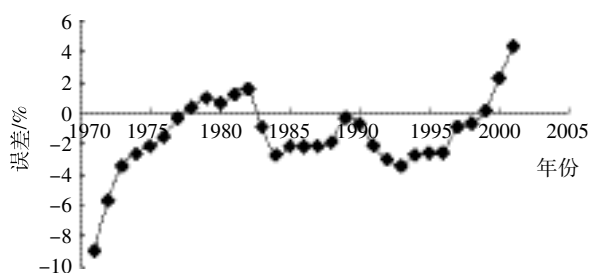


图 2 辽宁省单产潜力预测误差分布图

Figure 2 The distribution map of forecasting error of grain potential yield per unit for Liaoning Province

2.2.5 系统预测方法流程

(1)原始模型的建立:在原始数据中事先留出最近 3 年的数据不参与建模;确定最佳 n ;当回归方程自回归的最大误差连续 3 次以上出现大于 5% 时,将第 1 次出现误差 5% 前的年限划为历史前段数据,对

其后的数据重新选择最佳 n ,即使用分段预测法建模;建立直线回归方程模型;计算回归误差。

(2)倒数第 3 年的预测:利用以上所建立的模型预测倒数第 3 年的生产潜力;利用(1)中最后一年的回归误差来修正倒数第 3 年预测潜力;计算倒数第 3 年的预测误差。

(3)倒数第 2 年的预测:在(1)原来数据基础上增加倒数第 3 年的单产信息,重新确定最佳 n 值;建模;利用倒数第 3 年预测误差来修正倒数第 2 年预测潜力;计算倒数第 2 年的预测误差。

(4)倒数第 1 年的预测:同(3)。

(5)当年的预测:同(3);特别提示,当年预测误差要等当年实产数据公布后才能计算。

2.3 粮食生产潜力短期预测的系统预测方法的应用

2.3.1 一个案例的剖析

以辽宁省 1949—2005 年粮食单产统计数据为依据,通过以下 6 个步骤验证系统预测方法的科学性和实用性。第一步:利用 1949—2000 年 52 年单产数据建模,预测 2001 年单产潜力和预测误差。52 年单产数据的散点图见图 3, $n-r$ 图见图 1, 确定 $n=23$, 多年单产潜力趋势散点图和预测模型见图 4, 潜力预测误差分布见图 2。第二步:用上述模型预测 2001 年单产潜力,计算预测误差,并用 2000 年误差值对 2001 年的预测潜力值进行小趋势修正,计算出修正误差。结果见表 1。第三步:使用 1949—2001 年 53 年单产数据重复第一步的工作,确定 $n=24$ 。最终经过小趋势修正后,预测的 2002 年单产潜力结果见表 1。第四步:使用 1949—2002 年 54 年单产数据重复第一步的工作,确定 $n=25$ 。最终经过小趋势修正后,预测的 2003 年单产潜力结果见表 1。第五步:使用 1949—2003 年 55 年单产数据重复第一步的工作,确定 $n=25$ 。最终经过小趋势修正后,预测的 2004 年单产潜力结果见表 1。第六步:使用 1949—2004 年 56 年单产数据重复第一步的工作,确定 $n=27$ 。最终经过小趋势修正后,预测的 2005 年单产潜力结果见表 1。

2.3.2 系统预测方法的 11 个案例

采用与 2.3.1 同样的方法获得表 1 和表 2, 共计 11 个案例,平均误差为 0.77%,最大误差为 2.99%。研究表明:所建立的理论和方法同样适用于单产和总产预测。

2.3.3 生产潜力的实际意义分析

2.3.2 中的 11 个案例的共同特点是最大限度地剔除气候影响因素,而没有考虑随着 n 值的变化,所

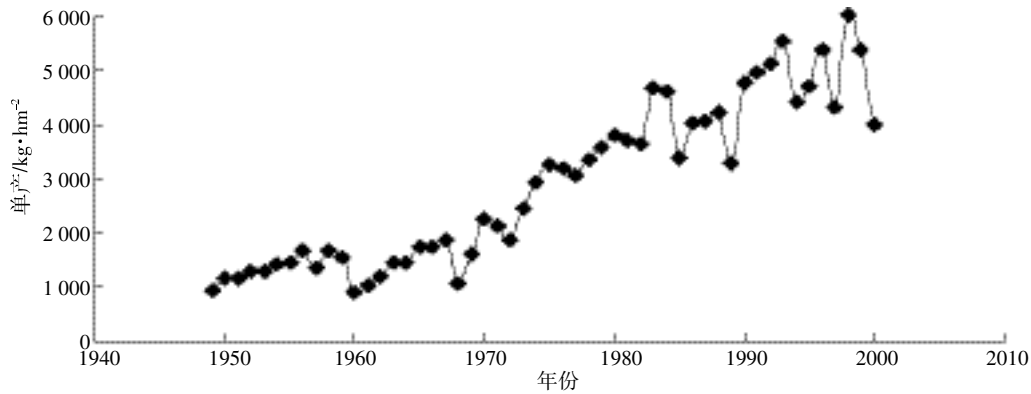


图 3 辽宁省粮食单产散点图(1949—2000 年)

Figure 3 The splattering map of grain yield per unit for Liaoning Province from 1949 to 2000

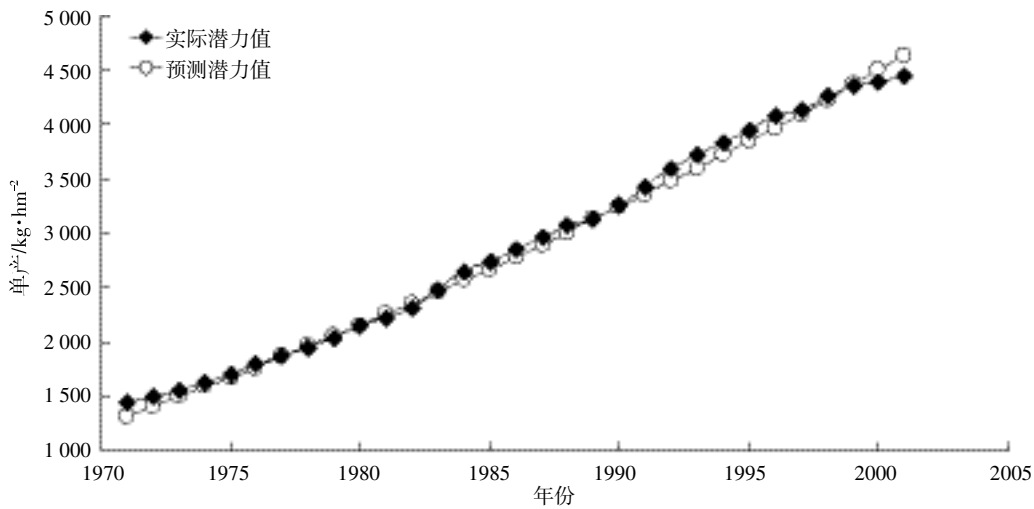


图 4 辽宁省粮食单产潜力预测模型及回归结果(1949—2000 年)

Figure 4 Forecasting model and results of grain potential yield per unit for Liaoning Province from 1949 to 2000

预测的生产潜力的值在减小。即时间步长短,生产潜力高,反映最近情况;时间步长长,生产潜力低,反映长时间情况。因此,研究者如果想剔除掉气候等影响因素,可以选择最佳 n 下的生产潜力。但如果为了预测最近的未来的实际生产潜力,则 n 应以 10 年左右为宜,既能反映生产实际,又能反映太阳黑子等活动造成的地球表面气候小周期的波动。

现以全国 1949—2010 年 62 年的单产数据为依据,分析对应不同时间步长下的生产潜力的实际意义。从全国尺度上看(图 5),5 年科技进步支撑线构成单产弱支撑线,10 年科技进步支撑线构成单产强支撑线,基本能够抵消掉自然灾害带来的单产减产幅度,即 10 年后的单产再减产也不至于低于 10 年前的平均产量,这就是科技进步对单产的贡献。以下以单产波动较大的吉林省为例进一步说明生产潜力的实际意义,见图 6。1996 年之后,吉林省粮食单产波动较大,5、10、20 年科技进步支撑线均被跌破,说明抗御

自然灾害的能力在减弱。

特别强调指出:当实际产量低于某一时间步长下的生产潜力趋势线时,如 10 年平均趋势线,表明减产较严重;如低于 20 年平均趋势线,表明减产严重。所以,生产潜力在某种意义上是科技水平和配套设施能支撑的产量,当然高产阶段产量的振幅比低产阶段要大,省级波动大于国家级波动,县级波动大于省级波动,这与气候是否具有相补性有关。

归纳以上研究结果:粮食生产潜力是一定时期科技进步对单产的支撑强度,用数字表示就是生产潜力;粮食生产潜力预测就是要预测这个支撑强度有多大。研究者可以选择不同时间步长研究生产潜力,不同步长代表的生产潜力的含义不同。作为国家来讲,要建立科技支撑种植业的保障体系,使一般自然灾害不低于 5 年平均产量支撑线,中等自然灾害不低于 10 年平均产量支撑线,连续几年大的自然灾害不低于 15~20 年平均产量支撑线,这才是中国粮食安全的

表 1 粮食单产潜力预测结果

Table 1 Forecasting result of grain yield potential per unit

预测年份	建模数据	n	当年单产/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	实际潜力/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	预测潜力/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	预测误差/%	修正潜力/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	修正后误差/%
辽宁省粮食单产案例(1949—2005):平均误差 0.72%,最大误差 1.17%。								
2001	1949—2000	23	5 056	4 468	4 672	4.57	4 520	1.17
2002	1949—2001	24	5 681	4 519	4 686	3.71	4 543	0.55
2003	1949—2002	25	5 845	4 572	4 710	3.02	4 592	0.44
2004	1949—2003	25	5 799	4 660	4 797	2.93	4 689	0.62
2005	1949—2004	27	5 490	4 651	4 775	2.67	4 690	0.84
吉林省粮食单产案例(1949—2005):平均误差 0.21%,最大误差 0.33%。								
2001	1949—2000	18	5 819	5 269	5 570	5.71	5 252	-0.33
2002	1949—2001	20	5 485	5 222	5 491	5.14	5 209	-0.26
2003	1949—2002	30	5 630	4 393	4 543	3.42	4 388	-0.12
2004	1949—2003	28	5 821	4 674	4 877	4.34	4 665	-0.19
2005	1949—2004	28	6 011	4 816	5 007	3.98	4 808	-0.16
黑龙江省粮食单产案例(1949—2005):平均误差 0.99%,最大误差 1.51%。								
2001	1949—2000	25	3 333	2 732	2 786	1.96	2 756	0.88
2002	1949—2001	23	3 755	2 887	2 941	1.88	2 905	0.64
2003	1949—2002	23	3 195	2 939	3 026	2.97	2 983	1.51
2004	1949—2003	21	3 816	3 140	3 199	1.88	3 160	0.65
2005	1949—2004	21	3 640	3 199	3 288	2.79	3 240	1.29
全国粮食单产案例(1979—2005):平均误差 0.83%,最大误差 1.28%。								
2003	1979—2002	10	4 333	4 329	4 464	3.12	4 380	1.17
2004	1979—2003	13	4 621	4 317	4 399	1.90	4 262	-1.28
2005	1979—2004	13	4 642	4 360	4 446	1.97	4 358	-0.04
辽宁省玉米单产案例(1980—2005):平均误差 0.74%,最大误差 1.02%。								
2003	1980—2002	10	6 645	5 666	5 755	1.59	5 707	0.73
2004	1980—2003	12	7 365	5 918	5 904	-0.22	5 890	-0.47
2005	1980—2004	14	6 450	5 979	6 064	1.43	6 039	1.02
吉林省玉米单产案例(1980—2005):平均误差 0.70%,最大误差 1.72%。								
2003	1980—2002	15	5 970	6 261	6 576	5.03	6 369	1.72
2004	1980—2003	15	6 148	6 261	6 572	4.97	6 246	-0.25
2005	1980—2004	15	6 238	6 338	6 573	3.71	6 329	-0.14
黑龙江省玉米单产案例(1980—2005):平均误差 1.23%,最大误差 1.34%。								
2003	1980—2002	13	4 083	4 786	4 782	-0.07	4 821	0.74
2004	1980—2003	13	4 902	4 815	4 749	-1.37	4 750	-1.34
2005	1980—2004	14	5 053	4 832	4 743	-1.85	4 769	-1.30

定量安全线。就各省而言,都要制定相应的农业保障措施和基本农田建设规划,才能保障国家的粮食安全。

3 结论

本研究围绕粮食生产潜力预测问题建立了新的理论和方法,并通过大量案例验证了其科学性、准确性和实用性。结合文献[30],得出以下初步研究结果。

在理论和方法方面:(1)提出了“现状生产潜力”等一系列新概念,所建立的理论和方法自成体系。(2)

概念模型解析式中的变量其物理学意义明确,模型属于平衡模型,但参数是通过统计方法获得的。(3)提出的多年单产移动平均趋势模型能巧妙而有效地将气象因素和人为因素分离开,是潜力预测的理论基石。(4)模型可以预测不同空间尺度下(县级预测案例另文讨论)、不同作物类型的单产和总产(面积波动大的情况下,建议使用单产 $\times$ 播种面积进行预测)。(5)预测参数都来自历史数据本身,充分挖掘了历史数据中所包含的综合性趋势信息,除了优化参数(优选 n 和小

表 2 粮食总产潜力预测结果
Table 2 Forecasting result of total grain potential

预测年份	建模数据	<i>n</i>	当年总产/10 ⁷ kg	实际潜力/10 ⁷ kg	预测潜力/10 ⁷ kg	预测误差/%	修正潜力/10 ⁷ kg	修正后误差/%
辽宁省粮食总产案例(1949—2005):平均误差 0.83%,最大误差 1.31%。								
2001	1949—2000	20	1 394	1 395	1 476	5.81	1 413	1.31
2002	1949—2001	21	1 510	1 400	1 476	5.38	1 412	0.81
2003	1949—2002	21	1 498	1 417	1 488	5.02	1 427	0.70
2004	1949—2003	21	1 720	1 428	1 499	5.02	1 442	0.97
2005	1949—2004	25	1 746	1 421	1 469	3.32	1 427	0.38
吉林省粮食总产案例(1949—2005):平均误差 1.72%,最大误差 2.99%。								
2001	1949—2000	18	1 953	1 819	1 874	3.02	1 866	2.62
2002	1949—2001	18	2 214	1 845	1 946	5.44	1 900	2.99
2003	1949—2002	18	2 259	1 877	2 008	6.94	1 923	2.42
2004	1949—2003	32	2 150	1 561	1 609	3.10	1 569	0.51
2005	1949—2004	32	2 581	1 617	1 652	2.20	1 618	0.07
黑龙江省粮食总产案例(1949—2005):平均误差 1.06%,最大误差 1.75%。								
2001	1949—2000	28	2 652	1 974	2 008	1.75	1 995	1.08
2002	1949—2001	28	2 941	2 032	2 077	2.17	2 051	0.91
2003	1949—2002	25	2 512	2 171	2 228	2.64	2 209	1.75
2004	1949—2003	25	3 135	2 238	2 294	2.52	2 249	0.50
2005	1949—2004	23	3 600	2 421	2 430	0.35	2 396	-1.05
全国粮食总产案例(1949—2005):平均误差 1.28%,最大误差 1.81%。								
2001	1949—2000	18	45 264	44 495	46 359	4.19	45 302	1.81
2002	1949—2001	20	45 706	44 267	45 998	3.91	44 873	1.37
2003	1949—2002	24	43 070	42 851	44 472	3.78	43 495	1.50
2004	1949—2003	25	46 947	43 015	44 589	3.66	43 466	1.05
2005	1949—2004	27	48 402	42 851	44 123	2.97	43 137	0.67

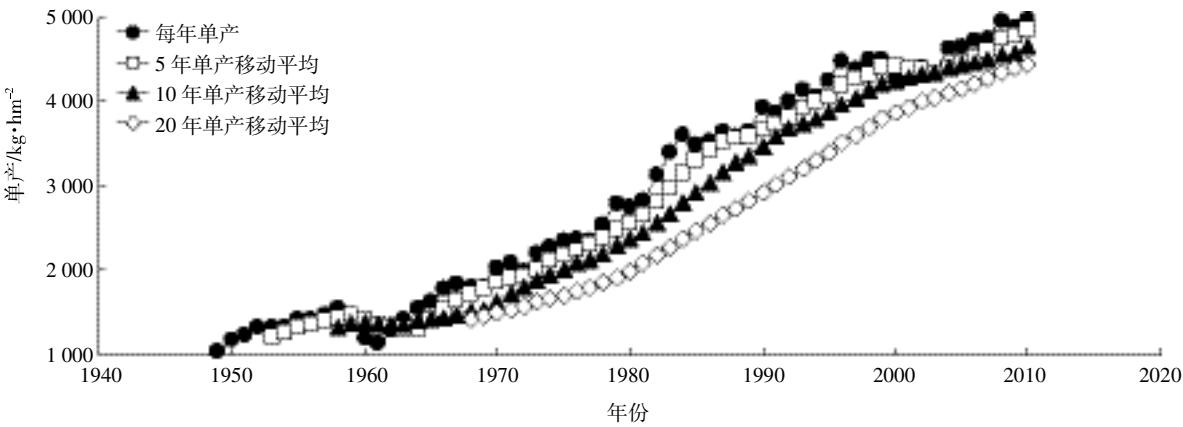


图 5 全国 1949—2010 年 62 年的单产和不同时间步长下的生产潜力散点图

Figure 5 The splattering map of grain yield per unit and production potential by different time step for China from 1949 to 2010

趋势修正)之外没有人为确定参数的干扰,便于研究结果推广应用,说明方法具有通用性。(6)建立了适合不同情况的预测方法,如建模 *n* 值的确定方法、逐年预测中动态 *n* 值的确定方法、产量趋势发生拐点时的预测方法(简单模型法和分段模型法,另文讨论)、小

趋势修正方法、综合的系统预测方法。
在应用方面:(1)应用系统预测方法的 11 个案例预测的平均误差为 0.77%,最大误差为 2.99%,预测精度高。所提出的理论和方法与传统的理论和方法没有直接可比性,但是预测结果的精确性说明了理论和

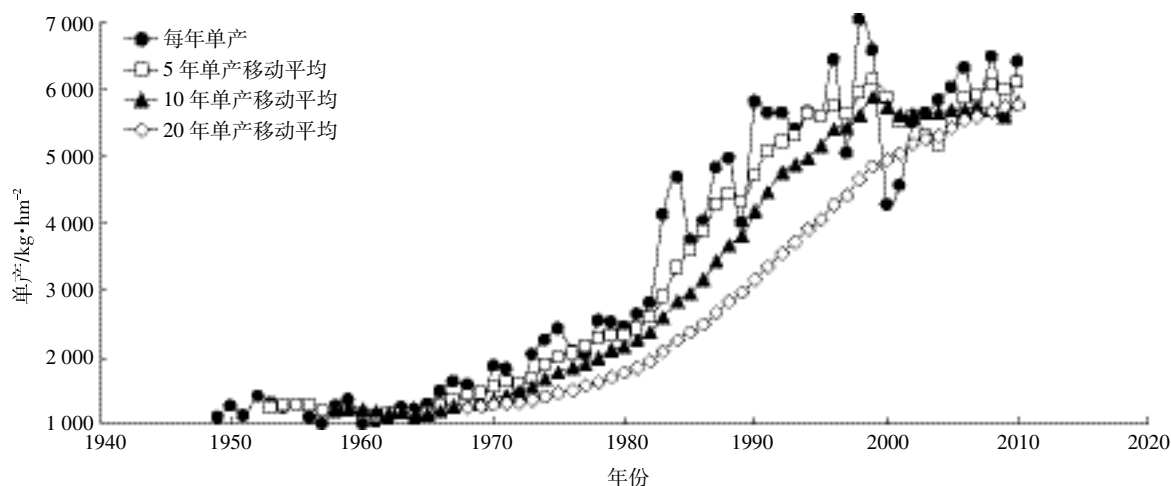


图 6 吉林省 1949—2010 年 62 年的单产和不同时间步长下的生产潜力散点图

Figure 6 The splattering map of grain yield per unit and production potential by different time step for Jilin Province from 1949 to 2010

方法的科学性和实用性。(2)所选择的 11 个案例是随机确定的,说明方法经得起检验。可以使用任何预测单元的历史数据进行验证,也可以进行预测。(3)所提出的预测理论和所建立的系统预测方法可以作为我国粮食生产潜力预测的理论和方法使用,并可应用到其他类似系统(具有趋势性变量和波动性变量的系统)的预测,其应用前景十分广泛。(4)生产潜力的实际意义:粮食生产潜力是一定时期科技进步对单产的支撑强度,用数字表示就是生产潜力。国家粮食安全就是要建立在安全的生产潜力基础上,既要长期逐步增产,又要保障灾害年的减产幅度不大。既有理论意义又有实践意义的步长是 10 年,它既反映气候小周期波动,又构成农业抗御自然灾害的风险线,当产量很容易低于 10 年平均单产线时,意味着粮食生产不安全,农业配套措施不到位。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Postel S. Pillar of sand: can the irrigation miracle last [M]. New York : w.w. Norton press, 1999.
- [3] Baker A, Zahniser S. Ethanol reshapes the corn market[J]. *Amber Waves*, 2006(4): 30–35.
- [4] Loomis R S, Williams W A. Maximum crop productivity: An estimate[J]. *Crop Sci*, 1963, 3(1):67–72.
- [5] Higgins G M. Regional assessment of land potential: A fallow up to the FAO[J]. *Nature and Resources*, 1981, 17(4):11–23.
- [6] 于沪宁. 光热资源和农作物的光热生产潜力[J]. *气象学报*, 1982, 40(3): 321–327.
- YU Hu-ning. On the light and thermal resources and the crop potential productivity[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1982, 40(3): 321–327. (in Chinese)
- [7] 黄秉维. 中国农业生产潜力—光合潜力[C]//地理集刊(17), 北京: 科学出版社, 1985: 15–22.
- HUANG Bing-wei. Chinese agricultural potential productivity—photosynthetic productivity [C]//Geography (17). Beijing : Science Press, 1985: 15–22. (in Chinese)
- [8] 孙惠南. 自然地理学中的农业生产潜力研究及我国生产潜力的分布特征[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- SUN Hui-nan. Agricultural potential productivity in physical geography and agricultural potential productivity and the distribution characteristics of potential productivity in China[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [9] 侯光良, 刘充芬. 我国气候生产潜力及其分区[J]. *自然资源*, 1985, 19(3): 52–59.
- HOU Guang-liang, LIU Chong-fen. Chinese agricultural climatic potential productivity and zoning[J]. *Journal of Natural Resources*, 1985, 19(3): 52–59. (in Chinese)
- [10] 高亮之. 苜蓿生产的农业气候计算机模拟模式—ALFAMOD[J]. *江苏农业学报*, 1985(2): 1–11.
- GAO Liang-zhi. ALFAMOD: An agroclimatological computer model of alfalfa production[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1985(2): 1–11. (in Chinese)
- [11] 李世奎. 中国农业气候资源和农业气候区划[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- LI Shi-kui. Climatologic resources and the agro-climatological zoning [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [12] 杨春虹. 农田小麦光合生产力模拟与分析[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- YANG Chun-hong. Modeling and analyzing urban photosynthetic productivity of wheat[M]. Beijing: Meteorology Press, 1990. (in Chinese)
- [13] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- GAO Liang-zhi, JIN Zhi-qing, HUANG Yao, et al. The rice cultivation—

- al simulation-optimization-decision making system[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1992.(in Chinese)
- [14] 陈 阜. 武川旱农区农田水分生产潜力研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(4): 14-18.
- CHEN Fu. Research of soil water productive potential in rain farmland in Wuchuan rainfed agricultural experiment area[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 1995, 13(4): 14-18.(in Chinese)
- [15] 冷石林. 开发北方旱农地区自然降水生产潜力的主要限制因素及途径[J]. 中国农业气象, 1997, 18(1): 13-17.
- LENG Shi-lin. The main limiting factor and approach of potential precipitation productivity and its appropriate exploitation measures in dry-land farming areas of Northern China[J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 1997, 18(1): 13-17.(in Chinese)
- [16] 尚新明. 定西地区气候资源生产潜力及土地人口承载力分析评价[J]. 农业系统科学与综合研究, 1997, 13(4): 293-294.
- SHANG Xin-ming. Climatic resources potential productivity and its population capacity evaluation in Dingxi[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 1997, 13(4): 293-294.(in Chinese)
- [17] 刘建栋, 傅抱璞, 卢其尧, 等. 冬小麦光合生产潜力数值模拟[J]. 地理研究, 1998, 17(1): 56-65.
- LIU Jian-dong, FU Bao-pu, LU Qi-yao, et al. The numerical simulation of the winter wheat photosynthetic potential in the Huanghuaihai area[J]. *Geographical Research*, 1998, 17(1): 56-65.(in Chinese)
- [18] 刘建栋, 于 强, 傅抱璞. 黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 169-174.
- LIU Jian-dong, YU Qiang, FU Bao-pu. The numerical simulation of winter wheat photo-temperature productivity in Huang-Huai-Hai Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(2): 169-174.(in Chinese)
- [19] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WC-SODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 169(2): 65-72.
- GAO Liang-zhi, JIN Zhi-qing, ZHENG Guo-qing, et al. Wheat cultivation simulation-optimization-decision making system (WC-SODS) [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 169(2): 65-72.(in Chinese)
- [20] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J]. 自然资源学报, 2000, 17(4): 481-487.
- WANG Zong-ming, LIANG Yin-li. The application of EPIC model to calculate crop productive potentialities in loessic yuan region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, 17(4): 481-487.(in Chinese)
- [21] 张 宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 264-270.
- ZHANG Yu, WANG Shi-li, WANG Fu-tang. Research on the possible effects of climate change on growth and yield of wheat in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11 (3): 264-270.(in Chinese)
- [22] 党安荣, 阎守邕, 吴宏歧, 等. 基于 GIS 的中国土地生产潜力研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 910-915.
- DANG An-rong, YAN Shou-yong, WU Hong-qi. A GIS based study on the potential land productivity of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 910-915.(in Chinese)
- [23] Alves H M R, Nortcliff S. Assessing potential production of maize using simulation models for land evaluation in Brazil[J]. *Soil Use M*, 2000(16): 49-55.
- [24] Schulze R. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological response[J]. *Agro Eco Env*, 2000, 82: 185-212.
- [25] 刘建栋, 周秀骥, 于 强. FAO 生产潜力模型中基本参数的修正[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 240-247.
- LIU Jian-dong, ZHOU Xiu-ji, YU Qiang. Modification of the basic parameters in FAO productivity model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(3): 240-247.(in Chinese)
- [26] 李 军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001(2): 161-165.
- LI Jun, WANG Li-xiang, SHAO Ming-an, et al. Simulation of wheat potential productivity on Loess Plateau region of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001(2): 161-165.(in Chinese)
- [27] 李 军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 555-560.
- LI Jun, WANG Li-xiang, SHAO Ming-an, et al. Simulation of maize potential productivity in the loess plateau region of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(4): 555-560.(in Chinese)
- [28] 李忠武, 蔡强国, Scott Mitchell, 等. 基于 GIS 的黄土丘陵沟壑区作物生产潜力模拟研究[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 311-317.
- LI Zhong-wu, CAI Qiang-guo, Scott Mitchell, et al. A GIS-based simulation of crop potential productivity in hilly loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 311-317.(in Chinese)
- [29] Deng X Z, Huang J K, Scott R. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China[J]. *Land Use Policy*, 2006, 23, 372-384.
- [30] 侯彦林, 郑宏艳, 刘书田, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(3): 205-211.
- HOU Yan-lin, ZHENG Hong-yan, LIU Shu-tian, et al. 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[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3): 205-211.(in Chinese)