



基于 ARIMA 模型的世界大豆单产预测分析

蔡承智¹, 张建威¹, 梁 颖²

(1. 贵州财经大学 经济学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 公共管理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:大豆是世界上最重要的油料及经济作物之一,随着世界人口数量的不断增加及耕地面积的持续下降,提高大豆单产潜力越来越受到重视。所以,分析全球大豆未来单产对指导世界大豆生产具有重大意义。然而,迄今为止基于“时间序列”模型预测全球大豆单产潜力尚鲜见报道。因此,本文运用 ARIMA(自回归单整移动平均)模型预测分析了世界大豆单产潜力。结果表明:2017、2018、2019、2020 和 2021 年世界大豆平均单产将分别为 2 825、2 782、2 920、2 968 和 3 017 kg·hm⁻²,同期世界大豆最高单产将分别为 4 037、4 081、4 129、4 171 和 4 217 kg·hm⁻²;前者分别是后者的 69.98%、70.37%、70.72%、71.16% 和 71.54%。该结果意味着:就世界大豆生产而言,高产国家进一步提高单产变得越来越困难,未来总产的提高应主要依靠改良中、低产国家耕地;与世界大豆相比,未来提高我国大豆单产尚有较大空间,应保持高产耕地生产力与改良中低产田土并重。

关键词:ARIMA 模型;世界大豆;单产;产量潜力

Analysis of Potential Yield of Global Soybean Forecasted by ARIMA Model

CAI Cheng-zhi¹, ZHANG Jian-wei¹, LIANG Ying²

(1. Faculty of Economics, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China; 2. Public Administration School of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Soybean is one of the world's most important food oil and economic crops, with the continuous increase of the world's population and ever declining farmland, attention has increasingly focused on improving the potential yield of soybean. Therefore, analyzing the yield of global soybean in the future is of great significance to the production of soybean in the world. However up to now, there were few reports on forecasting potential yield of global soybean on the bases of 'time series' model. In this paper, potential yield of global soybean is forecasted on ARIMA (auto-regression integrated moving average) model basis. The results showed that, in 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021, average yields of global soybean would be 2 825, 2 782, 2 920, 2 968 and 3 017 kg·ha⁻¹ while top ones would reach 4 037, 4 081, 4 129, 4 171 and 4 217 kg·ha⁻¹, respectively, the former was 69.98%, 70.37%, 70.72%, 71.16% and 71.54% of the later, correspondingly. The results signify that, as for global soybean production in the future, higher improvement opportunities will increasingly come from raising the potential of middle & low yield countries rather than high ones. In comparison, there is still a considerable space for China to increase future yield of soybean, and the importance should be equally paid to both sustaining the productivity of high yield fields and ameliorating middle & low ones.

Keywords: ARIMA model; Global soybean; Yield; Yield potential

作为世界上重要的油料及经济作物之一,大豆单产(潜力)一直是农业生产实践及农学界关注的重点和热点之一。运用 AEZ(农业生态区划)模型计算的结果显示,我国大豆最高单产潜力主要分布在鲁西平原及鲁中丘陵、黄淮海平原及南阳盆地和汾渭谷地,为 3 200 ~ 3 400 kg·hm⁻²^[1]。不同历史时期我国大豆单产的最大年增幅为 1985 年前 10%、1988 年前 9%、1994 年前 8%、1999 年前 7%、2004 年前 6%^[2]。学界对大豆单产潜力影响因素方

面的研究主要体现在三方面:基因型、种植环境以及耕作方式。在“基因型”方面,如:不同基因型大豆的籽粒生长速率(ISGR)个体差异较大,而且受环境因素影响不大;不同基因型间籽粒有效充实期(EFP)存在差异,因生物与非生物胁迫而缩短;实现大豆单产潜力取决于提高生物量积累率(BAR)以及延长籽粒有效充实期(EFP),而且影响这些变化的一个关键因子就是确保作物免于养分(尤其是氮素)制约^[3]。又如:Bhatia 等^[4]于 2012–2014 年通

收稿日期:2018-02-13

基金项目:贵州省科技计划(黔科合基础[2016]1527-1 号)。

第一作者简介:蔡承智(1966–),男,博士,研究员,主要从事农业生态经济研究。E-mail:caichengzhi@mail.gufe.edu.cn。

过盆栽试验研究了印度 16 个大豆基因型的抗寒能力,发现相互间单产差异显著,幅度从 $892\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 $2\,009\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;Kuswantoro 等^[5]对印度尼西亚 12 个大豆品系(种)的研究表明,单产降低主要源于瘠荚数增多。在“种植环境”方面,如:Soltani 等^[6]研究了 2007 – 2013 年间美国和加拿大部分省区(100%和 95%两种)杂草控制(处理)对大豆单产的影响,单产为 $2\,598\sim 2\,978\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,杂草导致减产最高可达 52%;由于杂草干扰及其控制成本导致的大豆生产损失(减产及品质下降),对生产者净收益有显著影响。又如:Muleta 等^[7]在埃塞俄比亚大豆主产区的 6 个试验点进行了 4 种根瘤菌的大豆接种试验,发现在低氮酸性土壤上,选择耐酸性根瘤菌接种能在一定程度上改善大豆性状;Zhang 等^[8]运用 APEX(农业政策环境组合)模型,研究 2002 – 2014 年美国 9 种土壤类型下大豆单产潜力差异,发现不存在水分胁迫时单产达 $4\,470\sim 6\,510\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,受生长期累计太阳辐射量(ASR)的显著影响($R^2=0.71$);Zanon 等^[9]基于 2011 – 2015 年巴西南部 Rio Grande do Sul 地区的试验站数据和农场物候学信息,研究了大豆对季节降水的需求,发现降水量 800 mm 左右对绝大多数品种为最佳,晚播降水量偏低则往往不能满足。在“耕作方式”方面,如:강위금等^[10]通过盆栽试验,研究了“水稻 – 水稻”、“水稻 – 大麦 – 水稻 – 大麦”、“水稻 – 大麦 – 水稻 – 小麦”和“大豆 – 大麦 – 大豆 – 大麦”等(2 年)轮作制对土壤性状和作物单产的影响,发现“水稻 – 水稻”后大豆的产量高于其它模式,但相互间差异未达显著水平,土壤孔隙度与大豆单产呈显著正相关。又如:Slattery 等^[11]研究表明,由耕作方式(如合理密植)导致的大豆叶片叶绿素含量降低并不直接影响生物量积累和产量,其负面影响主要源于其它因素的复合效应;叶绿素含量的适当减少,可改善光的渗透性及在群体冠层的分布,可提高光合有效辐射转化成生物量的效率,进而提高密植单作大豆产量。然而,针对大豆单产(潜力)预测方面的研究,仅散见文献报道。如:薛庆喜^[12]研究表明,随着年度阶段的递增,我国黑龙江的大豆种植面积、总产都在增加,特别是近 10 年比上个 10 年增加量达极显著。又如:张占国等^[13]采用基于大豆随机前沿生产函数模型和技术效率损失函数模型,计算出 1980 – 2010 年我国黑龙江省大豆生产的平均技术效率为 0.926,表明大豆产量还有一定的增长空间;Bishop 等^[14]运用模型方法,模拟空气中 CO_2 浓度升高对美国 18 个大豆基因型产量的影响,发现地上部生物

量平均提高 22%,而籽粒产量只提高 9%;Chung^[15]运用模型方法研究了 7 种遗传因素参数对韩国 2 个大豆品种单产预测精度的影响,发现贡献最大者对 2 个品种的决定系数(R^2)分别为 0.66 和 0.41。

综上所述,学界目前对大豆单产(潜力)研究主要基于自然科学(生物学、生理学、遗传学及栽培学等)层面,主要运用实验、试验手段开展微观领域的定性研究,较少从宏观(趋势)上进行定量研究,尤其在“时间序列”计量模型(如 ARIMA)运用方面鲜见报道。ARIMA(auto-regressive integrated moving average)即“自回归单整移动平均”模型是一种著名的时间序列预测方法。ARIMA 指的是以下单整自回归移动平均过程:如果一个随机过程含有一定个数的单位根,经过同样次数的差分后可以变换为一个平稳的自回归移动平均过程(即单整自回归移动平均过程),因而可以进行一定程度的趋势外推,预测未来走向及数值。本文拟进行这方面的尝试,运用计量经济学软件 Eviews 构建 ARIMA 模型、预测未来 5 年世界大豆单产,旨在为指导世界大豆生产以及帮助解决未来粮食安全问题提供决策参考信息。

1 材料与方法

1.1 材料

基于 1961 – 2016 年世界大豆平均单产和最高单产数据(来自联合国粮农组织)(表 1),分别预测分析 2021 年前世界大豆单产潜力。

1.2 方法

ARIMA 模型主要用于“时间序列”变量的宏观趋势预测分析。该方法的优点是不需要考虑变量的影响因素,而以“时间”作为“自变量”、预测指标作为“因变量”;该方法的缺点是预测时段不能太长,时间越短信度越高。对农业生产来说,运用 ARIMA 模型预测的时段一般为 5 年,因为大多数农作物是一年一季,连续丰产或歉收一般不会超过 3 年,故以 5 年为周期比较合理。本文运用计量经济学软件 Eviews 构建 ARIMA 模型、预测未来 5 年世界大豆单产,逻辑步骤如下:首先,检验 1961 – 2011 年单产统计数据的“时间序列”平稳性,直至建立“平稳序列”;然后,从 ARMA(1,2)模型、ARMA(1,1)模型、AR(1)模型、MA(2)模型和 MA(1)模型中,选择最佳者构建 ARIMA 模型拟合近 5 年单产,并将其与实际值(统计数据)比较;最后,运用 ARIMA 模型预测分析未来 5 年世界大豆单产。

表1 世界大豆1961–2016年平均单产和最高单产

Table 1 Average and top yields of global soybean from 1961 to 2016

(kg·hm⁻²)

年份 Year	平均 Average	最高 Top	国家 Country	年份 Year	平均 Average	最高 Top	国家 Country
1961	1129	2103	加拿大	1989	1829	5947	埃塞俄比亚
1962	1138	2076	墨西哥	1990	1896	3359	意大利
1963	1156	2051	墨西哥	1991	1873	3683	意大利
1964	1132	3056	巴拉圭	1992	2031	3132	意大利
1965	1228	2109	墨西哥	1993	1936	3155	意大利
1966	1372	2290	保加利亚	1994	2183	3350	意大利
1967	1349	2046	意大利	1995	2031	3753	意大利
1968	1435	3394	巴拉圭	1996	2132	3695	意大利
1969	1452	2797	巴拉圭	1997	2157	3802	意大利
1970	1480	2364	埃塞俄比亚	1998	2256	3504	意大利
1971	1519	2364	埃塞俄比亚	1999	2190	3533	意大利
1972	1490	2456	埃塞俄比亚	2000	2171	3939	瑞士
1973	1585	2855	意大利	2001	2306	3812	意大利
1974	1408	2669	意大利	2002	2293	3861	意大利
1975	1657	3000	新西兰	2003	2280	3459	埃及
1976	1544	3000	新西兰	2004	2243	3571	土耳其
1977	1756	3143	意大利	2005	2318	3630	意大利
1978	1626	3000	新西兰	2006	2324	3969	土耳其
1979	1749	3750	埃塞俄比亚	2007	2437	3535	土耳其
1980	1600	4456	埃塞俄比亚	2008	2398	3649	土耳其
1981	1754	2893	埃塞俄比亚	2009	2248	3657	土耳其
1982	1759	3136	埃塞俄比亚	2010	2578	3687	土耳其
1983	1620	4622	埃塞俄比亚	2011	2520	3870	土耳其
1984	1714	3040	意大利	2012	2289	3639	土耳其
1985	1906	3309	埃塞俄比亚	2013	2500	4161	土耳其
1986	1820	3469	意大利	2014	2604	4371	土耳其
1987	1905	4748	埃塞俄比亚	2015	2676	4400	土耳其
1988	1705	4030	埃塞俄比亚	2016	2756	4322	土耳其

2 结果与分析

2.1 世界大豆2021年前平均单产预测

2.1.1 世界大豆1961–2011年平均单产“时间序

表2 世界大豆平均单产的lnave的ADF单位根检验

Table 2 ADF unit root test of time series lnave of global soybean

序列 Series	<i>t</i> 统计 <i>t</i> -Statistic	检验临界值 Test critical values			平稳性 Stationarity	概率 Probability
		1%	5%	10%		
lnave	−5.361549	−4.152511	−3.502373	−3.180699	Stationary	0.0003

为此,基于lnave建立世界大豆平均单产的预测(至2021年)基础模型。

2.1.2 世界大豆平均单产预测模型的构建 为了选

列”平稳性检验 为了消除异方差,对世界大豆“平均单产”取对数(记为lnave)并进行“时间序列”平稳性检验。结果表明:世界大豆平均单产对数值“时间序列”平稳(表2)。

择最佳基础模型构建预测模型,初步建立了5种基础模型,其AIC(akaike info criterion 赤池信息准则)值如表3所示。

表 3 世界大豆平均单产预测基础模型的 AIC 值和概率(*F* 统计)值

Table 3 AIC and probability(<i>F</i> -statistic) values of basic models for forecasting average yield of global soybean		
模型 Model	赤池信息准则值 AIC	概率(<i>F</i> 统计) Probability(<i>F</i> -statistic)
ARMA (1,2)	-3.017236	0.000006
ARMA (1,1)	-3.041534	0.000002
AR (1)	-3.053333	0.000000
MA (2)	-3.040170	0.000002
MA (1)	-3.029227	0.000001

表 4 世界大豆平均单产 ARIMA 预测模型的回归结果

Table 4 The regression result of ARIMA model for forecasting average yields of global soybean

变量 Variable	系数 Coefficient	标准误 Std. Error	<i>t</i> 统计量 <i>t</i> -statistic	概率 Probability
C	0.016471	0.004462	3.691457	0.0006
AR(1)	-0.649874	0.111522	-5.827310	0.0000
<i>R</i> 平方 <i>R</i> -squared	0.419449	因变量均值 Mean dependent var		0.016224
调整的 <i>R</i> 平方 Adjusted <i>R</i> -squared	0.407097	因变量标准差 S. D. dependent var		0.066922
回归标准误 S. E. of regression	0.051530	赤池信息准则值 Akaike info criterion		-3.053333
残差平方和 Sum squared resid	0.124803	施瓦茨准则值 Schwarz criterion		-2.976115
对数似然值 Log likelihood	76.80665	H-Q 信息准则值 Hannan-Quinn criter.		-3.024036
<i>F</i> - 统计量 <i>F</i> -statistic	33.95754	D. W. 统计值 Durbin-Watson stat		2.129130
概率(<i>F</i> - 统计) Prob(<i>F</i> -statistic)	0.000000			
AR 根倒数 Inverted AR Roots	-0.65			

表 5 世界大豆平均单产 ARIMA 预测模型残差的 ADF 单位根检验

Table 5 ADF unit root test of ARIMA model's residual for average yields of global soybean

序列 Series	<i>t</i> 统计 <i>t</i> -Statistic	检验临界值 Test critical values			平稳性 Stationarity	概率 Probability
		1%	5%	10%		
e	-4.881212	-3.581152	-2.926622	-2.601424	Stationary	0.0000

2.1.3 世界大豆 2021 年前平均单产预测 运用 ARIMA 模型拟合的世界大豆 2012 - 2016 年平均单产如表 6 所示。2012 年世界大豆平均单产拟合值与实际值之差较大,为 13.65%,主要因为实际单产明显低于前后年份,而 2013 - 2016 年二者之差低于 5%,拟合效度较高。

表 6 世界大豆 2012 - 2016 年平均单产拟合值与实际值

Table 6 The fitted values and actual ones of average yields of global soybean in 2012 to 2016

年份 Year	实际值 Actual /(kg·hm ⁻²)	拟合值 Fitted /(kg·hm ⁻²)	差值 Difference /%
2012	2289	2602	13.65
2013	2500	2645	5.80
2014	2604	2689	3.25
2015	2676	2734	2.18
2016	2756	2779	0.85

如表 3 所示,5 种基础模型中,AR (1) 模型的 AIC 值最低。为此,基于 AR (1) 模型构建 ARIMA 预测模型(表 4)。

世界大豆平均单产 ARIMA 预测模型残差的 ADF 单位根检验结果如表 5 所示。世界大豆平均单产 ARIMA 预测模型残差的 *t* 统计量低于所有水平临界值,表明模型的残差序列平稳。为此,ARIMA 模型可用于拟合 2012 - 2016 年、预测 2021 年前世界大豆平均单产。

运用 ARIMA 模型预测的世界大豆 2017 - 2021 年平均单产如表 7 所示。基于 2012 - 2016 年拟合效度,2017 - 2021 年预测值具有相应信度。

表 7 基于 ARIMA 模型的 2017 - 2021 年世界大豆平均单产预测值

Table 7 Average yields of global soybean in 2017 to 2021 forecasted by ARIMA model (kg·hm ⁻²)					
年份 Year	2017	2018	2019	2020	2021
单产 Yield	2825	2872	2920	2968	3017

2.2 世界大豆 2021 年前最高单产预测 同理,运用 ARIMA 模型预测 2021 年前世界大豆最高单产(过程略),结果为:1961 - 2011 年世界大豆最高单产对数值“时间序列”平稳(*t* 统计量为 -5.202 766、1% 水平临界值为 -4.152 511),基于此建立 5 种基础模型,根据 AIC 准则选择 MA (1) 模型构建 ARIMA 预测模型(模型的残差序列平稳);

拟合得到 2012–2016 年世界大豆最高单产拟合值与实际值之差为 5.02%~–10.64%，拟合效果不及平均单产，主要因为最高单产的历史数据波动更大；最后，预测得到 2017、2018、2019、2020 和 2021 年世界大豆最高单产分别为 4 037、4 081、4 129、4 171 和 4 217 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.3 世界大豆“平均单产”与“最高单产”比率的变化趋势

以上预测结果，2017、2018、2019、2020 和 2021

年世界大豆平均单产将分别为 2 825、2 782、2 920、2 968 和 3 017 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，同期世界大豆最高单产将分别为 4 037、4 081、4 129、4 171 和 4 217 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；前者分别是后者的 69.98%、70.37%、70.72%、71.16% 和 71.54%。

如图 1 所示，世界大豆 1961–2021 年平均单产与最高单产的比率在波动中上升，目前已达 70% 左右，意味着未来平均单产将越来越接近最高单产，最高单产提高越来越困难。

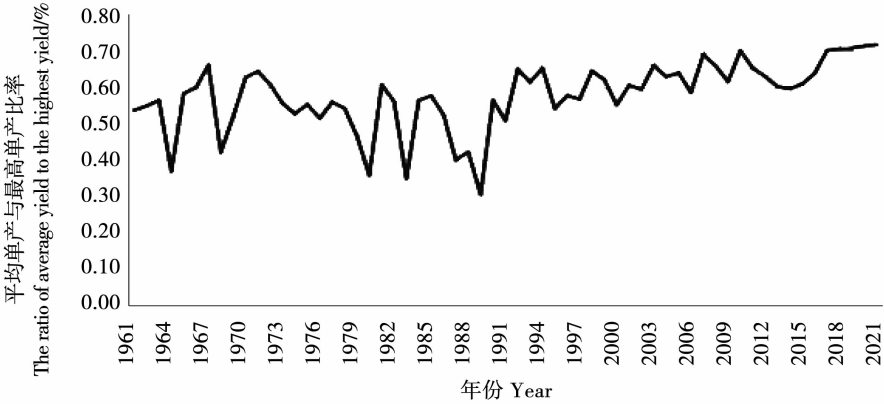


图 1 世界大豆 1961–2021 年平均单产与最高单产的比率
Fig 1 The ratio between average yields and top ones of global soybean in 1961 to 2021

3 讨论

1961–2016 年世界大豆平均单产比最高单产上升更快、更平稳。“最高单产”可视为“平均单产”的潜力极限。运用 ARIMA 模型，对我国大豆单产预测得出，2016、2017、2018、2019 和 2020 年将分别为 1 872、1 899、1 926、1 954 和 1 982 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，分别占我国大豆单产 AEZ(农业生态区划)模型潜力的 55.07%、55.86%、56.66%、57.48% 和 58.31%^[16]。也就是说，与世界大豆相比，我国大豆单产潜力的提升空间更大，主要因为我国目前单产尚低于全球平均水平。提高我国大豆单产，应保持高产耕地生产力与改良中低产田土并重。

追求高产是人类农业生产永恒的目标。然而，由于照射到单位面积上的太阳辐射是有限的，任何作物的单产潜力总是有极限的。由于作物吸收、转化太阳能的总量是有限的，“高产”和“优质”均需要较多的能量来形成。因此，收获物中以高燃烧热物质为主要成分的作物往往比以低燃烧热物质为主要成分的作物单产要低。例如，以蛋白质和脂类为果实(或籽粒)主要成分的作物(如大豆和油菜)，其单产水平一般比以淀粉为主要成分的作物(如谷物、薯类)低，果实中水分含量比较高的作物(如蔬菜、水果)一般单产比较高。故，作物的低产与优质常常是“捆绑销售”的。

本研究以世界大豆的平均单产为核心，分析演变规律、预测未来趋势。以国家为单位，研究最高单产变化趋势。将“最高单产”视为“平均单产”的潜力极限，因为无论科技如何进步、管理水平如何提高，“平均单产”都不可能达到“最高单产”。因此，如果一个国家的大豆单产低于世界平均单产，理论上这个国家的单产潜力提升空间更大，反之更小。

4 结论

任何作物，由于生态环境中存在胁迫，因此单产的长期演变表现为逻辑斯蒂曲线(S 曲线)趋势，即：由慢到快，越过拐点后由快到慢，增长越来越困难。本研究创造性地提出“最高单产”可视为“平均单产”的潜力极限，并通过运用 ARIMA“时间序列”模型进行预测分析，认识目前世界大豆“平均单产”在长期 S 曲线中所处的区间，从而判断未来增长空间。研究结果表明：就世界大豆生产而言，高产国家进一步提高单产变得越来越困难，未来总产的提高应主要依靠改良中、低产国家耕地，并努力培育高产品种、改善种植(的光、温、水)环境及改进耕作方式。

参考文献

[1] 蔡承智, Harrij van V, Guenther F. 基于 AEZ 模型的我国大豆

产量潜力的农作制区划分析[J]. 河南农业科学, 2006, 32 (5): 27-31. (Cai C Z, Harrij van V, Guenther F. Analysis of soybean yield potential of Chinese farming system zoning based on AEZ model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2006, 32(5): 27-31.)

[2] Cai C Z, Shao J B, Liang Y. Analyses on soybean yield in China based on the prediction of yield potential [J]. Crop Research, 2012, 43(3): 47-51.

[3] Roekel van R J, Purcell L C, Salmeron M. Physiological and management factors contributing to soybean potential yield [J]. Field Crops Research, 2015, 182(S1): 86-97.

[4] Bhatia V S, Jumrani K. A maximin-minimax approach for classifying soybean genotypes for drought tolerance based on yield potential and loss[J]. Plant Breeding, 2016, 135(6): 691-700.

[5] Kuswanto H, Hapsari R T, Sulisty A, et al. Potential yield of tidal swamp-adaptive soybean promising lines [J]. Legume Research, 2017, 40(3): 514-519.

[6] Soltani N, Dille J A, Burke I C, et al. Perspectives on potential soybean yield losses from weeds in North America [J]. Weed Technology, 2017, 31(1): 148-154.

[7] Muleta D, Ryder M H, Denton M D. The potential for rhizobial inoculation to increase soybean grain yields on acid soils in Ethiopia [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 63 (5): 441-451.

[8] Zhang B B, Feng G, Kong X B, et al. Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 440-453.

[9] Zanon A J, Streck N A, Grassini P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1447-1454.

[10] 강위금, 최종서, 김정주, 조주식. Yield potentials of rice and soybean as affected by cropping systems in mid-mountainous paddy soils of Korea[J]. Korean Journal of Soil Science & Fertilizer, 2017, 50(4): 259-274.

[11] Slattery R A, VanLoocke A, Bernacchi C J, et al. Photosynthesis, light use efficiency, and yield of reduced-chlorophyll soybean mutants in field conditions[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(18):549.

[12] 薛庆喜. 中国及东北三省 30 年大豆种植面积、总产、单产变化分析[J]. 中国农学通报, 2013, 28(35): 102-106. (Xue Q X. Analysis on the change of 30 year's soybean areas, production and yield in China and northeast China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 28(35): 102-106.)

[13] 张战国, 杨振华, 左鹏, 等. 黑龙江省大豆单产影响因素和技术效率分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 59(13): 3191-3196. (Zhang Z G, Yang Z H, Zuo P, et al. Influencing factors and technical efficiency of soybean single yield in Heilongjiang province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 59 (13): 3191-3196.)

[14] Bishop K A, Betzelberger A M, Long S P, et al. Is there potential to adapt soybean (*Glycine max* Merr.) to future [CO₂]? An analysis of the yield response of 18 genotypes in free-air CO₂ enrichment [J]. Plant Cell And Environment, 2015, 38 (9): 1765-1774.

[15] Chung U. Exploring ways to improve the predictability of flowering time and potential yield of soybean in the crop model simulation [J]. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 19(4): 203-214.

[16] 蔡承智, 莫洪兰, 梁颖. 基于 ARIMA 模型的我国大豆单产预测分析[J]. 大豆科学, 2017, 36(5): 789-796. (Cai C Z, Mo H L, Liang Y. Chinese soybean yield projected on ARIMA model [J]. Soybean Science, 2017, 36(5): 789-796.)

(上接第 451 页)

[25] 李树岩,余卫东. 基于气候适宜度的河南省夏玉米产量预报研究[J]. 河南农业大学学报,2015,49(1):27-34. (Li S Y, Yu W D. Research of summer maize yield forecasting based on climate suitability in Henan[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2015,49(1):27-34.)

[26] 魏瑞江,宋迎波,王鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J]. 应用气象学报,2009,20(5):622- 627. (Wei R J, Song Y B, Wang X. Method for dynamic forecast of corn yield based on climatic suitability[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2009, 20(5): 622- 627.)

[27] 李曼华,薛小萍,李鸿怡. 基于气候适宜度指数的山东省冬小麦产量动态预报[J]. 中国农学通报,2012,28(12): 291- 295. (Li M H,Xue X P,Li H Y. Dynamic prediction method of wheat yield based on climatic suitability index in Shandong province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28 (12): 291-295.)

[28] 帅细强. 基于气候适宜度指数的湖南早稻产量动态预报[J]. 中国农学通报, 2014,30(33):56-59. (Shuai X Q. Dynamic forecasting for early rice yield based on climatic suitability index in Hunan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014,30(33): 56-59.)

[29] 张继权,梁警丹,周道玮. 基于 GIS 技术的吉林省生态灾害风险评估[J].应用生态学报,2007,18(8):1765-1770. (Zhang J Q, Liang J D, Zhou D W. Risk assessment of ecological disasters in Jilin province based on GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(8):1765-1770.)

[30] 王军,王洪雨,张雪清. 吉林省玉米生产自然灾害风险评估与气象灾害产量的影响因素研究[J]. 玉米科学,2011,19(5): 143-147. (Wang J, Wang H L, Zhang X Q. Disaster risk assessment of maize production and influencing factor analysis on the damage yields[J]. Journal of Maize Science, 2011,19(5):143-147.)

[31] 宋迎波,王建林,杨霏云,等. 粮食安全气象服务[M]. 北京: 气象出版社,2006:32-39. (Song Y B, Wang J L, Yang F Y, et al. Meteorological service for food security[M]. Beijing: China Meteorological Press,2006:32-39.)