

罗海平, 邹楠, 潘柳欣, 等. 生态足迹视域下中国粮食主产区粮食生产安全态势的时空属性研究: 2007–2025[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1468–1475.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.028

生态足迹视域下中国粮食主产区粮食生产安全态势的时空属性研究: 2007–2025

罗海平^{1,2}, 邹楠², 潘柳欣², 朱勤勤²

(1. 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心, 江西 南昌 330027; 2. 南昌大学经济管理学院, 江西 南昌 330027)

摘要: 粮食主产区在肩负稳定国家粮食生产重要责任的同时, 也面临着日趋严重的农业生态问题。本试验基于生态足迹视域, 对中国粮食主产区2007–2016年粮食安全态势进行了时空维度的实证研究, 并利用GM(1, 1)模型对粮食主产区2017–2025年的粮食产能和生态足迹指数进行了预测。结果表明, 粮食主产区生态足迹和生态承载力省(区)间空间差异较大, 变化趋势不一致。生态赤字最为严重的地区主要集中在河南省、安徽省和江苏省, 辽宁省、吉林省、黑龙江省、湖北省和内蒙古自治区生态状况良好。GM(1, 1)模型预测2025年生态足迹指数为0.65%, 粮食安全的生态支撑形势严峻。

关键词: 粮食主产区; 生态足迹指数; 灰色系统

中图分类号: F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1468-08

Research on temporal and spatial attribute of food production security state in Chinese major grain regions under the horizon of ecological footprint: 2007–2025

LUO Hai-ping^{1,2}, ZOU Nan², PAN Liu-xin², ZHU Qin-qin²

(1. Research Center of Central China Economic and Social Development, Nanchang University, Nanchang 330027, China; 2. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330027, China)

Abstract: Chinese major grain regions shoulder the important responsibility of stabilizing national grain production, and face increasingly serious agricultural ecological problems. Under the horizon of ecological footprint, food security state in Chinese major grain regions from 2007 to 2016 was empirically researched by temporal and spatial dimensions, and the grain productivity and ecological footprint index of major grain regions from 2017 to 2025 were predicted by using GM(1, 1) model. The results showed that ecological footprint and ecological carrying capacity in each major grain province had significant spatial discrepancy, and the changing trends were different. The ecological deficit was most serious in Henan province, Anhui province and Jiangsu province, but the ecological condition was good in Liaoning province, Jilin province, Heilongjiang province, Hubei province and Inner Mongolia Autonomous Region. According to the prediction results of GM(1, 1) model, the ecological footprint index in 2025 was 0.65%, therefore the situation of ecological support for food security was grim.

Key words: main grain production regions; ecological footprint index; grey system

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 国家社会科学基金项目(17BJL066); 南昌大学研究生创新专项基金项目(CX2019042)

作者简介: 罗海平(1979-), 男, 四川南充人, 博士, 副研究员, 主要从事粮食安全研究。(E-mail) lhp6322@126.com

通讯作者: 朱勤勤, (E-mail) 1445914581@qq.com

“国以民为本, 民以食为天, 食以安为先”, 粮食安全是关系国家经济运行和人民生产生活的重大事件。从新形势下的粮食生产来看, 产量不足已经不是

农业的主要矛盾,日益突出的生态安全问题成为制约中国粮食安全可持续性的瓶颈。由于农业生产长期缺乏对生态环境的重视,中国农业生态安全受到威胁。化肥、农药、塑料农膜等农业生产投入,在一定程度上可以促进粮食单产水平的提高,但施用过量不仅会造成土壤板结、酸化、盐碱化、质量退化、地下水污染、富营养化等问题,还会导致农田生态系统生物多样性锐减,增加生态环境的压力。同时,粮食生产重心逐渐从资源禀赋优异的南方,向水资源严重匮乏的北方迁移,加大了自然灾害的风险。党的十八大以来,以习近平为核心的党中央牢固树立生态文明理念,着力补齐生态短板,高度重视农业生产和粮食安全问题,把粮食安全作为治国理政的首要之务。2017年一号文件提到,全面落实新的粮食安全战略离不开生态安全的支撑^[1]。十九大报告指出,粮食安全要靠自己,立足国内解决粮食供求问题,确保国家粮食安全,把中国人的饭碗牢牢端在自己手中^[2]。2018年一号文件指出,新时代要推进乡村绿色发展,打造人与自然和谐共生发展新格局,加强农村突出环境问题的综合治理^[3]。2019年一号文件再次强调,要夯实农业基础,保障重要农产品的有效供给^[4]。可见,生态安全是当前保障中国粮食安全的重要领域,也是保证粮食安全可持续性的关键所在。

生态足迹又称生态占用,最早于1992年由加拿大生态经济学家^[5]提出,其通过核算某一国家或地区维持特定人口生存和废弃物消纳所需要的生态生产性土地面积来衡量人类的生态需求,并与该国家或地区所能提供的生态生产性面积,即生态供给相比较,评估地区可持续发展程度。生态足迹反映区域资源消耗强度,生态承载力代表区域资源供给能力,二者之间的差值(生态盈余或生态赤字)则准确揭示出人类持续生存的生态阈值。经过近30年的发展演变,生态足迹的应用范围已遍及全球不同区域和领域的可持续发展测度^[6-7]。Turner等^[8]将投入产出和生态足迹相结合的方法运用到国际贸易领域,研究国际贸易带来的资源利用和污染转移。Mancini等^[9]将生态足迹用于评价生态系统服务的作用,通过案例研究发现,国家生态承载力与森林服务的经济价值高度相关。付恭华等^[10]运用生态足迹指数法预测了中国2030年粮食生产的生态可持续水平。刘秀丽等^[11]基于生态足迹理论,测算出甘肃省在保持社会经济可持续发展前提下的最佳耕地资源容量,并按照社会经济

指标对耕地资源可持续发展容量进行情景预测。田玲玲等^[12]用生态足迹分析法,对湖北省的生态足迹和生物承载力进行时空动态研究,预测了湖北省可持续发展趋势。同时根据现实研究的需要,生态足迹模型的产量因子和均衡因子不断被调整,适用不同领域的模型理论基础不断优化,使得生态足迹值的准确性有所提高。Lenzen等^[13]运用投入产出模型对全球公顷不能准确反映区域实际的缺陷进行修正,重新计算了澳大利亚的生态足迹。刘某承等^[14-15]基于净初级生产力,计算出中国各种类型土地的产量因子和均衡因子,修正后的计算结果更能真实地反映区域消费的生态影响。Mancini等^[16]对生态足迹方法中碳足迹组成部分的一个关键参数——平均森林固碳量进行了更新计算。马楠等^[17]将能值理论与生态足迹模型相结合,以2016年统计数据为分析依据,对陕西省的生态安全进行评估。

综上,当前生态足迹法在国内外的学术研究中运用较为广泛,方法发展相对完整和成熟,研究结果具有较高的可信性和科学性。但引入生态足迹法分析中国保障粮食安全的生态成本,进而衡量粮食安全可持续性的研究较少,并且研究大多针对单一省、县进行或是直接以全国为研究对象,结果缺乏一定的代表性和针对性。因此,本研究拟基于生态足迹法对中国13个粮食主产省(区)2007-2016年的粮食生产生态安全进行实证评估,将粮食安全的生态足迹与生态承载力进行比较,判断主产区粮食生产的生态盈亏状况,并引入生态足迹指数作为衡量粮食安全可持续性的指标。在此基础上,构建灰色系统预测模型预测2017-2025年粮食产能和粮食安全的生态足迹指数,对粮食主产区粮食安全的可持续性进行分析,以期为粮食主产区实现粮食安全可持续性奠定基础,确保国家粮食安全,从而缓解全球粮食紧张态势。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

中国粮食主产区包括河南省、河北省、内蒙古自治区、辽宁省、吉林省、黑龙江省、江苏省、山东省、湖北省、湖南省、江西省、安徽省、四川省,共13个省(区)。按地理区域划分,中国粮食主产区主要分布在内蒙古高原、东北地区、黄淮海地区及长江中下游流域,以平原地形为主。根据国家统计局发布的公

告,2018 年中国粮食主产区播种面积达 $8.83 \times 10^{11} \text{ m}^2$,总产量 $5.18 \times 10^{11} \text{ kg}$,每平方米单位面积产量 0.59 kg ,在全国的占比分别为 75.46%、78.69%、105.36%。可见,粮食主产区耕地面积广、产量大、单产高,对中国粮食安全保障具有重要作用^[18]。但粮食主产区省际粮食产量差异较大,大致分为 3 个层级:河南省、黑龙江省和山东省为产量最大的第一层级;江苏省、安徽省、河北省、吉林省、四川省和内蒙古自治区为第二层级;江西省、湖北省、湖南省和辽宁省为产量最低的第三层级。近十年的数据分析结果表明,粮食主产区的农药和化肥施用均处于增长态势,单位面积上的施用量超过国家标准,对耕地质量和生态环境造成一定影响。同时,在极端气候频发、水土流失、工业“三废”污染、酸雨侵蚀等影响下,土壤中氮、磷、钾等营养元素含量缺失,肥力下降,作物生长环境恶化,使得目前粮食生产安全的可持续性受到威胁。

1.2 粮食安全可持续性评估模型

生态足迹是研究人类对资源利用程度的分析工具,它用生态生产性面积表达特定区域内资源和能源的消耗量,并与该地区实际提供的生态生产性面积相比较,定量判断一个地区生产消费活动的可持续发展程度。在生态足迹的计算中,各类资源和能源消耗项目被统一折算成耕地、草地、林地、水域、建筑用地、化石能源用地 6 类生态生产性土地面积,由于这 6 类土地类型的生态生产能力不尽相同,需要引入均衡因子和产量因子加以转化。人类经济活动所占用的土地面积即为生态足迹,区域实际提供给人类的生态生产性土地面积总和为生态承载力。若生态足迹大于生态承载力,出现生态赤字,说明这一区域人类占用的自然资源大于生态系统所能提供的资源;反之,出现生态盈余,表示这一区域的生产消费活动在生态承载力允许范围内,属于可持续发展。

1.2.1 生态足迹测算 粮食主产区粮食生产的生态足迹(EF)是指为保证满足社会生存发展所需要的粮食产量而对生态生产性土地面积产生的需求。本研究对粮食主产区粮食生产的生态足迹和生态承载力进行分析和计算,涉及到的粮食作物有:水稻、小麦、玉米、豆类、薯类和其他农作物等。生态足迹的计算公式如下:

$$EF = N \cdot \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot aa_j) = N \cdot \sum_{j=1}^6 [r_j \cdot \sum_{i=1}^n (a_i)] = N \cdot \sum_{j=1}^6 \left[r_j \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \right] \quad (1)$$

式中: EF 为粮食主产区粮食生产的生态足迹; N 为人口数; r_j 为均衡因子; aa_j 为各类生态生产性土地面积; $j=1,2,\dots,6$ 表示 6 类生态生产性土地类型; a_i 为人均第 i 种粮食作物生产折算的生态生产性面积; i 为种植的粮食作物类型; p_i 为第 i 种粮食作物的平均生产能力; c_i 为第 i 种粮食作物的人均年消费量; n 为粮食作物的数量。

1.2.2 生态承载力测算 生态承载力(EC)是指生态和环境的最大承受能力,反映了生态系统的协调性和持续性。粮食生产的生态承载力是指中国粮食主产区实际拥有的生态生产性土地面积总和,反映了生态系统对粮食产量安全的极限供给。生态承载力的计算公式如下:

$$EC = N \cdot ec = N \cdot \sum_{j=1}^6 (a_j \cdot r_j \cdot Y_j) = N \cdot \sum_{j=1}^6 (a_j \cdot r_j \cdot \frac{Y_{lj}}{Y_{nj}}) \cdot (1-12\%) \quad (2)$$

式中: EC 为粮食主产区粮食生产的生态承载力; N 为区域总人口; ec 为人均生态承载力; a_j 为实际人均占有的 j 类生态生产性土地面积; r_j 为均衡因子; Y_j 为产量因子; Y_{nj} 为 j 类土地的全国平均生产能力; Y_{lj} 为粮食主产区 j 类土地的平均生产能力。根据世界环境与发展委员会的报告《我们共同的未来》,本研究在生态供给中扣除 12% 作为生物多样性保护面积^[19]。

1.2.3 生态盈亏测算 生态盈亏包括生态盈余和生态赤字 2 种情况,用来表示区域的生态可持续状况。但生态盈亏是生态足迹和生态承载力的简单相减,并不能直观地表现一个地区粮食安全的可持续性状况。因此,本研究在对粮食主产区粮食生产生态供给和需求状况研究的基础上,引入生态足迹指数,对粮食主产区粮食安全的可持续性状况和等级进行度量。生态足迹指数(EFI)用百分比来表示一个地区的可持续性,可以认为是某地未来仍能持续保障粮食安全的能力^[20],计算公式如下:

$$EFI = (EC - EF) / EC \times 100\% \quad (3)$$

式中, EFI 表示生态足迹指数; EC 表示生态承载力; EF 表示生态足迹。

表 1 显示,当 $-100\% \leq EFI < 0$ 时,即生态足迹大于生态承载力,出现生态赤字,此时该地区处于粮食安全不可持续状态,当 $EFI < -100\%$ 时,可持续性等级为强不可持续。当 $EFI > 0$ 时,即生态承载力大于生态足迹,出

现生态盈余,此时该地区处于粮食安全可持续状态,当 $0 \leq EFI \leq 20\%$ 时,可持续性等级为弱可持续;当 $20\% < EFI \leq 100\%$ 时,可持续性等级为强可持续。

表1 粮食安全可持续性评价及等级划分

Table 1 Evaluation and gradation of food security sustainability

生态足迹指数 (EFI)	粮食安全 可持续性评价	粮食安全 可持续性等级
$20\% < EFI \leq 100\%$	粮食安全可持续	强可持续
$0 \leq EFI \leq 20\%$	粮食安全可持续	弱可持续
$-100\% \leq EFI < 0$	粮食安全不可持续	弱不可持续
$EFI < -100\%$	粮食安全不可持续	强不可持续

1.3 灰色系统预测模型

在社会活动、经济活动或者科学研究过程中,常将信息完全清楚的称为白色系统,信息完全不清楚的称为黑色系统,信息不完全清楚的则称为灰色系统。灰色系统理论由中国学者邓聚龙^[21]于1982年创立,以小样本、贫信息的不确定性系统为研究对象,主要通过对灰色系统进行白化、淡化、量化、模型化、最优化,提取有价值的信息,实现对系统发展演化规律的预测和控制。农业生产的影响因素非常多,而且很多方面都具有不确定性,使得农业系统成为典型的灰色系统。

灰色系统预测模型是对含有不完全信息的灰色系统进行预测而建立的,灰色系统预测模型是通过将离散随机数经过生成变为随机性被显著削弱而且比较有规律的生成数,建立起微分方程形式的模型。数列预测的单变量、一阶微分 GM(1,1) 模型是目前使用最广泛的灰色系统预测模型。GM(1,1) 模型以随机的原始时间序列为基础,按时间累加后形成新的数据序列,可用一阶线性微分方程的解对呈现出的规律进行逼近。

首先,在建立灰色系统预测模型之前需要对已知的原始数据进行检验处理,以保证建模方法的可行性。本研究采用级比检验方法对粮食安全的生态足迹与生态承载力、粮食产量、单产的原始数据进行级比判断,设粮食主产区粮食安全的生态足迹或生态承载力的原始时间序列为 $x^{(0)}$,经一次累加运算后生成一次累加序列 $x^{(1)}$,对 $x^{(1)}$ 建立白化形式的微分方程,即 GM(1,1) 模型,见公式(4)。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (4)$$

式中, $X^{(1)}$ 为一次累加序列 $x^{(1)}$ 按时间顺序组合的矩阵; t 为时间变量; a 、 b 为待定参数。

其次,利用一次累加序列构造数据阵 B ,原始时间序列构造数据列 Y ,计算出 a 和 b 的值,代入公式(4)可得到一次累加序列 $x^{(1)}$ 的预测值,见式(5),然后将一次累加序列的预测值还原成原始序列估计值,见公式(6)。

$$\hat{X}^{(1)}(k) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

$$\hat{u} = (\hat{a}, \hat{b})^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)$$

式中, k 为预测时间序列, $k \in \{n+1, n+2\}$; $\hat{X}^{(1)}(k)$ 为第 k 年累加预测数据矩阵; $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为还原的第 k 年预测数据序列; \hat{u} 为参数序列; a 、 b 为待定参数。

2 结果与分析

2.1 粮食主产区2007-2016年粮食安全可持续性时空分析

根据构建的粮食生产生态足迹模型,测算出粮食主产区2007-2016年粮食生产的生态足迹、生态承载力和生态盈亏变化(图1),尽管生态足迹和生态承载力都呈上升趋势,但中国粮食主产区整体处于生态赤字的状态,粮食安全的可持续性并不乐观。

2007年到2016年,中国粮食主产区生态足迹的变化经历了显著攀升、缓慢增长和略有下降3个阶段。2007-2010年粮食主产区生态足迹处于显著攀升状态,年均增长率为1.51%,其中2009年到2010年的增长最为突出,增长了1.96%。究其原因,可能是受到2008年刚刚结束的世界粮食危机的影响,中国于2009年强调粮食生产的耕地保障,开发了较多的

后备耕地资源,并且为了提高粮食单产加大了农药和化肥的施用量,从而导致较为严重的生态破坏,大幅提高了生态足迹。2010–2015年粮食主产区生态足迹处于缓慢增长状态,年均增长率为0.43%,同时粮食产量也在稳步上升,表明在这个阶段国家仍继续稳

抓粮食生产,愈发严重的生态破坏和耕地受损在一定程度上引起了中国对生态安全保障的重视,开始推出诸如化肥农药零增长、农业现代化等政策。基于政策效果,2015–2016年,粮食主产区生态足迹略有下降,下降了0.38%。

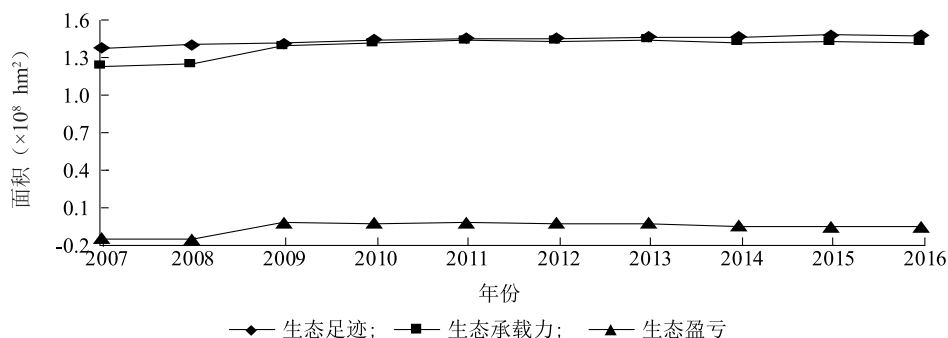


图1 粮食主产区粮食生产的2007–2016年生态盈亏变化

Fig.1 Ecological surplus and deficit change of food production in main grain production regions from 2007 to 2016

粮食主产区生态承载力在时间维度上的变化大致可分为2个阶段。2007–2011年为迅速增长阶段,年均增长率达到4.00%,其增长原因主要归结于粮食主产区耕地面积的扩大,2007年中国主产区耕地面积约为 $7.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$,2011年约为 $8.92 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。2011–2016年为波动下降阶段,表明粮食主产区的生态承载力并不稳定。

由于生态承载力的迅速增长,2007年到2011年,中国粮食主产区的生态赤字出现明显的好转,从 $-1.49 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 上升至 $-1.79 \times 10^6 \text{ hm}^2$,但增长原因主要是耕地面积的扩张,缺乏一定的持续和带动效应,因而随着生态环境破坏的加剧,自2012年开始,粮食主产区的生态赤字开始逐年加重,甚至出现向强不可持续状态转变的趋势。尽管在政策把控下,2016年生态足迹略有下降使得生态赤字稍有减少,但中国粮食安全仍明显表现为不可持续性。

对粮食主产区各省(区)2007年、2012年及2016年3个时间节点的生态足迹、生态承载力及生态足迹指数进行分析,中国粮食主产区在粮食安全可持续上的空间差异较大,且未显示出均衡发展的趋势。结果(图2)显示,13个粮食生产省(区)生态足迹的空间分布不均。其中黑龙江省、河南省、山东省三省的生态足迹较高,而且这三个省的粮食产量都相对较高,根据统计局发布的公告,2018年这三个省的粮食产量分别为 $7.507 \times 10^{10} \text{ kg}$ 、 $6.649 \times 10^{10} \text{ kg}$ 、 $5.320 \times 10^{10} \text{ kg}$,在粮食主产区总产量中分别占比

12.91%、11.43%和9.15%,表明产量贡献大的省在发展过程中生态做出了一定的牺牲。辽宁省、江西省、湖南省、湖北省的生态足迹较低,这四省的粮食产量在粮食主产区中均处于下游水平。在时间变化上,黑龙江省由于玉米作物生态足迹的快速增长及水稻生态足迹的波动增长,导致整体生态足迹的上升在粮食主产区中较为突出,其次吉林省、河北省及内蒙古自治区的生态足迹在3个时点也都表现为上升的趋势。河南省、江苏省和山东省三省则表现为轻微下降的趋势。

生态承载力的空间分布与生态足迹一致。时间变化上,黑龙江省生态承载力的上升幅度较大,从2007年到2016年的增长率达到87.0%,年均增长7.2%,远大于生态足迹的增长幅度。其次增长明显的为吉林省、辽宁省、四川省及内蒙古自治区,而江苏省、河南省和山东省三省有轻微下降。

表2显示,利用生态足迹指数的变化可直观看出粮食主产区各省(区)粮食安全可持续性的表现情况。由于生态承载力的大幅上升,黑龙江省是粮食主产区中唯一从生态赤字转变为生态盈余,从弱不可持续转变为弱可持续发展的省份。其次辽宁省、吉林省和内蒙古自治区也呈现向好变化,均从弱可持续向强可持续转变,粮食生产与生态保护的协调度有所提高,粮食安全的可持续性表现乐观。江苏省的生态足迹指数最低,且仍在降低,从2007年的-50%下降到2016年的-61%,粮食安全的可持续性表现较差,须引起足

够的重视。其余省(区),除湖北省一直表现为弱可持续外,都始终处于弱不可持续的状态,使得粮食主产区粮食安全可持续性的整体形势较为严峻。

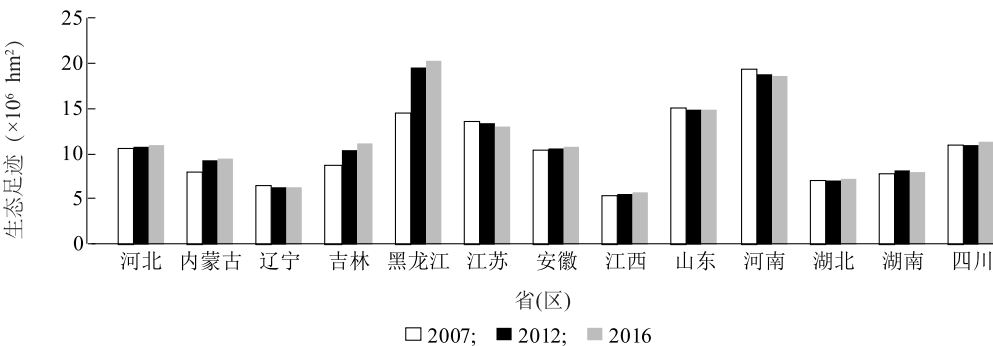


图2 粮食主产区各省(区)2007年、2012年及2016年生态足迹情况
Fig.2 Ecological footprint of each major grain province (district) in 2007, 2012 and 2016

表2 粮食主产区各省(区)生态足迹指数变化
Table 2 Change of ecological footprint index in each major grain province (district)

省(区)	生态足迹指数(%)		
	2007年	2012年	2016年
江苏省	-50	-63	-61
安徽省	-27	-28	-29
四川省	-24	-12	-13
河南省	-22	-26	-27
黑龙江省	-21	13	10
河北省	-14	-12	-12
江西省	-13	-13	-16
湖南省	-10	-14	-15
山东省	-6	-9	-13
内蒙古自治区	0	21	23
吉林省	12	28	21
湖北省	14	19	13
辽宁省	16	31	29

2.2 粮食主产区2017-2025年粮食安全可持续性预测分析

2.2.1 模型精度检验 利用GM(1,1)模型对粮食主产区2007-2016年粮食安全的生态足迹和生态承载力变化进行模拟,拟合结果(图3)显示,生态足迹和生态承载力表现出相同的趋势特征,即预测值从超过计算值到低于计算值再到超过计算值,始终围绕计算值上下浮动,预测结果较为可靠。

相对误差和级比偏差检验的模型精度结果(表

3)显示,粮食安全的生态足迹和生态承载力的级比偏差值均小于0.10,预测精度较高。经计算,生态足迹的平均相对误差为0.51%小于1.00%,精度等级为一级;生态承载力的平均相对误差为2.42%小于5.00%,精度等级为二级,所有级比都落入可容性覆盖区间内,检验合格。因此,模型达到了灰色系统理论预测等级的精度要求,可用于预测粮食主产区未来一定时期粮食安全的生态足迹和生态承载力。

2.2.2 粮食安全的可持续性预测 运用预测模型对粮食主产区2017-2025年粮食安全的生态足迹和生态承载力进行预测,以预测结果为基础,计算出粮食主产区粮食安全的生态足迹指数。同样运用上述方法,对粮食主产区粮食产量和单产进行灰色系统预测。粮食安全的可持续性预测结果(表4)显示,粮食主产区粮食安全的生态足迹和生态承载力均稳定增长。生态足迹从2017年的 $1.499\ 03\times 10^8\ \text{hm}^2$ 上升至2025年的 $1.577\ 87\times 10^8\ \text{hm}^2$,年均增长率为0.64%。生态承载力以0.95%的平均增长率从2017年的 $1.472\ 36\times 10^8\ \text{hm}^2$ 上升至2025年的 $1.588\ 14\times 10^8\ \text{hm}^2$ 。分阶段来看,2017-2022年,粮食主产区粮食安全的生态足迹始终大于生态承载力,表现为生态赤字,粮食安全处于弱不可持续状态。在粮食产量和粮食单产水平保持当前水平的情况下,2023-2025年,生态承载力超出生态足迹,表现为生态盈余,粮食安全逐渐从弱不可持续向弱可持续状态转变。在粮食生产的资源环境基础未遭到持续破坏的前提下,2017-2025年粮食主产区粮食产量和单产将保持逐年增长的态势。

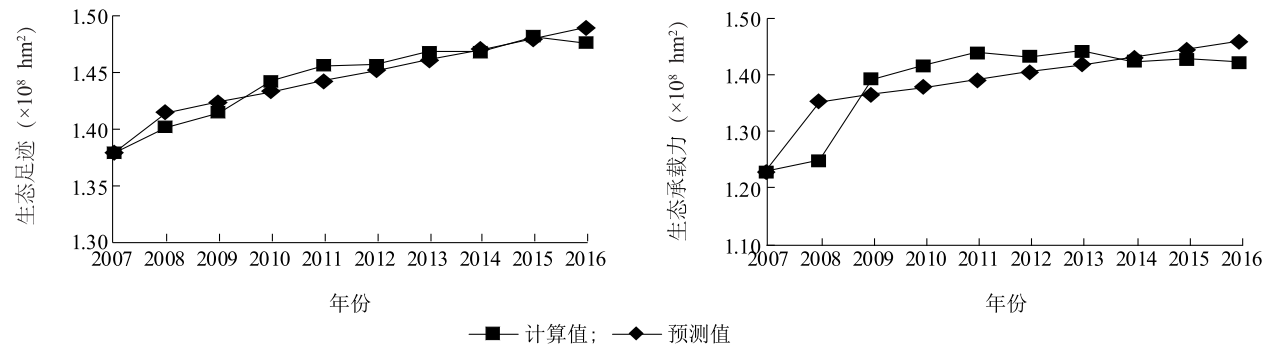


图 3 粮食主产区粮食安全的生态足迹与生态承载力模拟结果
Fig.3 Simulation results of ecological footprint and ecological carrying capacity in main grain production regions

表 3 粮食主产区粮食安全的生态足迹与生态承载力预测及误差检验
Table 3 Prediction and error test of ecological footprint and ecological carrying capacity of food security in main grain production regions

年份	生态足迹				生态承载力			
	计算值 ($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	预测值 ($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	相对误差	级比偏差	计算值 ($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	预测值 ($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	相对误差	级比偏差
2007	1.378 88	1.378 88	0		1.229 62	1.229 62	0	
2008	1.402 32	1.415 04	0.009 1	0.010 4	1.248 87	1.352 14	0.082 7	0.006 0
2009	1.414 69	1.424 14	0.006 7	0.002 4	1.391 88	1.364 99	0.019 3	0.094 2
2010	1.442 42	1.433 29	0.006 3	0.012 9	1.416 88	1.377 97	0.027 5	0.008 3
2011	1.456 48	1.442 50	0.009 6	0.003 3	1.438 54	1.391 07	0.033 0	0.005 7
2012	1.456 95	1.451 77	0.003 6	0.006 1	1.431 28	1.404 30	0.018 9	0.014 7
2013	1.468 17	1.461 11	0.004 8	0.001 3	1.442 35	1.417 65	0.017 1	0.001 8
2014	1.468 74	1.470 50	0.001 2	0.006 0	1.422 69	1.431 13	0.005 9	0.023 5
2015	1.481 77	1.479 95	0.001 2	0.002 4	1.427 50	1.444 74	0.012 1	0.006 1
2016	1.476 15	1.489 46	0.009 0	0.010 3	1.422 30	1.458 48	0.025 4	0.013 2

表 4 2017–2025 年粮食安全可持续性预测结果
Table 4 Prediction results of food security sustainability from 2017 to 2025

指标	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
生态足迹($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	1.499 03	1.508 67	1.518 37	1.528 12	1.537 95	1.547 83	1.557 78	1.567 79	1.577 87
生态承载力($\times 10^8 \text{ hm}^2$)	1.472 36	1.486 35	1.500 48	1.514 75	1.529 15	1.543 69	1.558 37	1.573 18	1.588 14
生态足迹指数 (%)	-1.81	-1.50	-1.19	-0.88	-0.58	-0.27	0.04	0.34	0.65
粮食产量($\times 10^{11} \text{ kg}$)	4.922 9	5.039 8	5.159 5	5.282 0	5.407 4	5.535 7	5.667 2	5.801 7	5.939 4
粮食单产(kg/hm^2)	5 960	6 060	6 150	6 250	6 360	6 460	6 560	6 670	6 780

基于预测结果,在现有农业生产投入、资源环境状况以及粮食种植结构和粮食产能等不发生较大变动的前提下,主产区粮食安全生态承载力的增长速度要高于生态足迹的增长速度,其生态赤字状况有得到改善的迹象。然而,随着城市化、工业化的快速推进以及膳食结构的改变,粮食需求刚性增长,主产区面临资源环境的约束和持续增产的压力以及调整

粮食生产结构的迫切要求,其粮食安全前景不容乐观。

3 讨论

粮食生产安全是粮食安全保障中的重要一环,本文从生态足迹视角,对中国粮食主产区粮食生产安全态势的时空属性进行了研究。但受限于县域数据获

取的难度,以及生态足迹模型在计算精度上的局限性,对主产区内生态生产性土地本身的动态变化及其与粮食生产之间关系的研究尚不深入,有待进一步利用土地遥感数据,结合地理学方法进行完善。

粮食主产区持续的粮食增产在保障国家粮食安全的同时加剧了资源的消耗和生态环境的恶化。13个粮食主产区的生态足迹和生态承载力差异明显,空间分布不均衡,生态赤字最为严重的地区主要集中在河南省、安徽省和江苏省,辽宁省、吉林省、黑龙江省、湖北省和内蒙古自治区生态状况良好。粮食主产区在2017-2025年将逐步实现从不可持续的生态赤字向可持续生态盈余过渡,但仅仅是从弱不可持续向弱可持续状态转变,2025年 EFI 仅为0.65%,远未达到强可持续水平。

综上所述,对中国粮食安全保障具有以下启示:首先,要加快推进农业生产方式从以生态牺牲为代价的粗放型向生态安全可持续型转变,加大对粮食主产区生态环境的补偿力度。其次,各粮食主产省(区)的生态保护要因地制宜,对粮食安全的可持续性进行统筹协调,基于中国主体功能区的规划,合理划定粮食作物生产保护区。最后,“藏粮于地,藏粮于技”战略是改变中国严重生态赤字现状的重要途径,需要科学调整农业产业结构,通过轮作休耕恢复已过度消耗的耕地质量,减少生态破坏,防治土壤污染,提升耕地质量。同时加快农业科学技术的研发和推广,农业生产技术的应用不仅可以有效降低粮食生产成本,提高粮食综合生产能力,提高农民收入和生产积极性,还可以改善农业生态环境,实现粮食安全强可持续的目的。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 中共中央、国务院关于深入推进农业供给侧结构性改革加快培育农业农村发展新动能的若干意见[R]. 北京:人民出版社,2017.
- [2] 习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[R]. 北京:人民出版社,2017.
- [3] 中共中央,国务院. 中共中央、国务院关于实施乡村振兴战略的意见[R]. 北京:人民出版社,2018.
- [4] 中共中央,国务院. 中共中央、国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见[R]. 北京:人民出版社,2019.
- [5] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [6] 谢新源,陈 悠,李振山. 国内外生态足迹研究进展[J]. *四川环境*, 2008, 27(1): 66-72.
- [7] 吴隆杰,杨 林,苏 昕,等. 近年来生态足迹研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2006, 11(3): 1-8.
- [8] TURNER K, LENZEN M, WIEDMANN T, et al. Examining the global environmental impact of regional consumption activities-Part 1: A technical note on combining input-output and ecological footprint analysis[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(1): 37-44.
- [9] MANCINI M S, GALLI A, COSCIEME L, et al. Exploring ecosystem services assessment through ecological footprint accounting[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 228-235.
- [10] 付恭华,鄢帮有. 中国未来的粮食安全与生态可持续性问题研究——基于粮食生产过程生态足迹的实证分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12): 1550-1556.
- [11] 刘秀丽,张 勃,胥国江,等. 基于生态足迹的甘肃省耕地资源可持续利用与情景预测[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 84-91.
- [12] 田玲玲,罗 静,董 莹,等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 316-325.
- [13] LENZEN M, MURRAY S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia[J]. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 229-255.
- [14] 刘某承,李文华,谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. *生态杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [15] 刘某承,李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 401-406.
- [16] MANCINI M S, GALLI A, NICCOLUCCI V, et al. Ecological footprint: refining the carbon footprint calculation[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 390-403.
- [17] 马 楠,徐玉霞,许小明,等. 基于能值生态足迹模型的陕西省生态安全评价[J]. *河南科学*, 2018, 36(12): 1994-1999.
- [18] 王一杰,邸 菲,辛 岭. 我国粮食主产区粮食生产现状、存在问题及政策建议[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(1): 37-47.
- [19] WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Our common future [R]. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [20] 吴隆杰. 基于生态足迹指数的中国可持续发展动态评估[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(6): 94-99.
- [21] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. *世界科学*, 1983(7): 1-5.

(责任编辑:王 妮)