

罗海平, 潘柳欣, 宋 焱, 等. 基于生态系统服务价值的中国粮食主产区农业-生态协调性实证测算与预警[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 760-768.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.031

基于生态系统服务价值的中国粮食主产区农业-生态协调性实证测算与预警

罗海平¹, 潘柳欣¹, 宋 焱¹, 王新悦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. 四川农业大学管理学院, 四川 成都 611100)

摘要: 区域的粮食生产与生态价值存在相互促进和制约的特殊关系。本研究基于生态系统服务价值 ESV 范式构建了生态农业协调度 EAH 模型, 进而对中国粮食主产区(河北、内蒙古辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川)粮食生产与生态环境的协调性进行实证研究和预警预测。研究发现, 2017 年中国粮食主产区总体协调度为 1.27, 处于中度协调水平, 粮食主产区农业-生态协调性较差, 错位现象较为严重。从动态属性看, 研究期间农业-生态协调性形成了以 2013 年为拐点的倒 U 型趋势, 当前粮食生产与生态服务价值协调性逐年下降, 灰色系统 GM(1,1) 预测显示, 相比 2011–2017 年, 2019–2025 年农业-生态协调性呈逐渐弱化趋势。从空间属性看, 粮食生产与生态服务价值存在较为突出的地理空间分异和不协调现象。

关键词: 生态系统服务价值; 粮食安全; 协调度

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0760-09

Measurement and warning of agro-ecological coordination in China's major grain-producing areas based on ecosystem service value

LUO Hai-ping¹, PAN Liu-xin¹, SONG Yan¹, WANG Xin-yue²

(1. Research Center of Central China Economic and Social Development, Nanchang University, Nanchang 330027, China; 2. School of Management, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611100, China)

Abstract: There is a special relationship between regional food production and ecological value. Based on the paradigm of ecosystem service value (ESV), an ecological agriculture coordination degree model was constructed, and then the coordination between food production and ecological environment in major grain-producing areas (Hebei, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Heilongjiang, Jiangsu, Anhui, Jiangxi, Shandong, Henan, Hubei, Hunan, Sichuan) was studied and predicted. The results showed that the overall coordination degree of China's major grain-producing areas was 1.27 in 2017, which was at the level of moderate coordination. The agro-ecological coordination in major grain-producing areas was poor, and the dislocation was serious. From the perspective of dynamic attributes, the agro-ecological coordination during the study period formed an inverted U-shaped trend with 2013 as the inflection point. The coordination between current food production and ecological service value was declining year by year. The gray system GM(1,1) prediction results showed that the coordination in 2019–2025 was gradually weakening compared with that in 2011–2017. From the perspective of spatial attributes, the value of food production and ecological service was not coordinated in geographic space.

Key words: ecosystem service value; food security; coordination degree

收稿日期: 2019-11-03

基金项目: 国家社会科学基金项目 (17BJL066)

作者简介: 罗海平 (1979-), 男, 四川南充人, 博士, 副研究员, 主要研

究方向为粮食安全。(E-mail) lhp6322@126.com

通讯作者: 王新悦, (E-mail) 15387608939@qq.com

中国作为农业大国, 同时也是全球第一粮食消费大国, 2018 年中国的年粮食进口量为 1.08×10^8 t。党

的十九大报告提出:“要确保国家粮食安全,把中国人的饭碗牢牢端在自己手中。”但随着自然、人为等多种原因导致生态环境恶化,生态问题成为影响和制约粮食安全的重要因素。农业生态安全是粮食安全的基础和支撑。粮食安全与生态安全协调性的研究随着对二者内涵与关系认识的深入而逐步深入。

(1)概念内涵上粮食安全与生态安全的一致性研究。1983年联合国粮农组织通过了“让所有人在任何时候都能获得充足的粮食”的“粮食安全”定义。在强调“充足粮食”目标状态的同时明确了实现粮食安全的可持续性要求。长期以来,粮食安全研究中生态视角的研究一直是不可或缺的一环。Common等^[1]研究认为,农业未来必然转向生态农业。Brown^[2]同样认为,传统农业出路在于改进农田生态系统。富兰克林^[3]则提出粮食安全保障不能超出生态生产潜力,不能对整个生态系统构成威胁。而Daily等^[4]、Egoh等^[5]、Lautenbach等^[6]则提出并构建了生态系统服务价值(ESV)的概念和模型,提出粮食供给作为生态系统产品的直接价值,实现了粮食与生态研究的理论融合。

(2)价值范畴上的粮食安全与生态安全协调性研究。一是将生态安全视为粮食安全的重要组成。翟虎渠^[7]将粮食安全解构成“粮食的数量安全、粮食的质量安全和生态安全”,并将生态安全视为粮食安全可持续化的保障。王国敏等^[8]区分了广义和狭义的粮食安全,并将生态安全纳入广义粮食安全范畴。胡岳岷^[9]则置生态安全与粮食的数量安全、品质安全与健康安全于一体。黎东升等^[10]则将贸易安全纳入与生态安全、产品安全、资源安全的“四位一体”粮食安全体系;二是将生态安全作为研究粮食安全的视角和维度。邱建军等^[11]认为,生态安全是粮食安全的基础。倪国华等^[12]提出从生态安全与食品安全维度审视粮食安全;三是将生态作为影响粮食安全的重要因素,其中主要侧重生态中土地资源与气候变化对粮食安全的影响研究^[9,13-14]。

(3)测度与评价方法上的粮食安全与生态安全协调性研究。田克明等^[15]通过构建农用地生态安全评价方法研究土地生态安全对粮食安全和经济安全的影响机制。刘渝等^[16]则制定了水资源生态安全和粮食安全双重安全评价体系,通过指标间的关系分析水资源生态安全与粮食安全关系。何玲等^[17]利用生态系统服务价值和粮食安全标准进行

生态安全底线测算。杨建利等^[18]应用系统综合评价法构建粮食安全评价指标体系,并发现粮食生产活动对土地生态服务价值存在较强反作用。同样谢高地等^[19]发现耕地生态服务价值与生态效率在陆地生态系统中最低。宋利娜等^[20]则进一步实证了粮食作物种植和生长给耕地以及生态系统服务价值带来损失。

目前,国内外对粮食安全和生态安全协调性研究要么立足于单一某省或某县市,要么立足全国。而对于粮食产量长期保持在全国70%左右,历年粮食增产贡献率达95%,同时在全《全国主体功能区规划》中列入中国最重要生态屏障区的13个粮食主产区(河南、河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、山东、湖北、湖南、江西、安徽、四川)的粮食生产与生态协调性的研究则较少,从而导致研究要么缺乏代表性要么缺乏普遍性。为此,本研究基于国际上成熟的生态系统服务价值研究法测算并预警粮食主产区生态-农业的协调性,对确保中国生态农业的可持续性发展具有重要意义。

1 ESV范式下的农业生态价值协调度的EAH动态预测模型

1.1 生态系统服务价值ESV动态模型

为表征生态系统的服务价值,主要方法包括单位面积服务功能价格法和基于Costanza模型的单位面积当量因子法,由于Costanza模型标准统一,易于度量,本研究选用Costanza模型来计算生态系统服务价值(ESV),其核心是将单位面积农田生态系统粮食生产的价值记为当量“1”,通过谢高地等^[19]构建的生态系统服务价值当量因子表计算单位面积各生态系统的各类生态服务功能的服务价值 E_{ij} :

$$E_{ij} = e_{ij} E a_i = e_{ij} \cdot \frac{1}{7} \sum_{k=1}^3 \frac{m_k p_k q_k}{M} (i=1,2,\dots,9; j=1,2,\dots,6; k=1,2,3) \quad (1)$$

式中 e_{ij} 和 E_{ij} 分别表示单位面积不同生态系统的各类生态服务功能的当量因子和服务价值; i 表示生态系统服务功能,共9类,分别为食物生产、原材料供给、土壤形成与保护、气候调节、气体调节、废弃物处理、文化服务、水源涵养、生物多样性保护; j 表示陆地生态系统的类型,共6类,分别为园地、草地、林地、湿地、耕地和未利用地。 t 为评估年份; p_k 为 k 作物评估年份的全国平均价格(元,1t); q_k 为 k

种作物单产(t/hm^2); m_k 为 k 种作物的粮食播种面积(hm^2); M 为粮食作物播种总面积(hm^2)。

ESV 动态模型是在 Costanza 模型的基础上经过空间异质调整和社会发展调整而来的,使生态系统服务功能能够体现时空差异性和社会经济发展状况:

$$S_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\ln g}{\ln G} + \frac{\ln w}{\ln W} \right) \quad (2)$$

$$T_t = I_t / I, \text{ 其中 } I_t = I_0 h / \left[(1 + e^{-\frac{1}{E_n-3}}) H \right] \quad (3)$$

式中 S_t 表示研究区 T_t 时期空间异质系数; T_t 表示 t 时期研究区支付意愿系数; g 和 G 分别表示研究区与全国的单位面积粮食产量; w 和 W 分别表示研究区与全国的单位面积林分蓄积量; h 和 H 分别表示研究区与全国的城镇化水平, E_n 表示恩格尔系数。

在计算出单位面积不同生态系统各类生态服务功能价值基础上,经过时空异质系数和支付意愿系数的调整,便可求得研究区各省(区)的总体生态服务价值:

$$V_t = S_t T_t \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 A_{ji} E_{ijt} \quad (i=1,2,\dots,9; j=1,2,\dots,7) \quad (4)$$

表 1 农业-生态协调度(EAH)划分标准

Table 1 Division standard of ecological agriculture coordination degree (EAH)

EAH 范围	描述	层次
$EAH < -2$	ESV 显著降低,降低速度远高于粮食产能增长速度,粮食产能增长明显受限于生态环境	严重负相关,高度冲突
$-2 \leq EAH < -1$	ESV 降低,降低速度高于粮食产能增长速度,生态问题较为突出	负相关,中度冲突
$-1 \leq EAH < 0$	ESV 降低,降低速度低于粮食产能增长速度	负相关,低度冲突
$0 \leq EAH < 1$	ESV 增长,增长速度低于粮食产能增长速度,存在潜在危机	正相关,低度协调
$1 \leq EAH < 2$	ESV 增长,增长速度略高于粮食产能增长速度	正相关,中度协调
$EAH \geq 2$	ESV 显著增长,增长速度远高于粮食产能增长速度,生态-农业产出效率高	高度正相关,高度协调

1.3 灰色系统预测 GM(1,1) 模型

通过计算粮食总产量与生态服务价值的协调度 EAH,可以表征粮食生产活动是否为环境友好型,粮食生产与生态保护是否存在偏离。中国学者邓聚龙^[23]1982 年创立的灰色系统理论,充分利用已有的“最少信息”,为贫信息不对称的小样本预测提供研究思路,目前已广泛应用于经济、社会、农业等方面的预测研究。本研究运用灰色系统 GM(1,1) 模型来预测粮食主产区 2019–2025 年的粮食总产量和生态服务价值,进而判断农业-生态的长期协调性。灰色系统预测 GM(1,1) 模型的构建主要分为以下四步:

式中 V_t 表示研究区 t 时期生态服务价值; A_{ji} 表示研究区 t 时期 j 类生态系统类型的面积。

1.2 ESV 范式下的农业生态价值协调度的 EAH 模型

本研究以生态系统服务价值表征生态活动产出,以粮食总产量表征农业活动产出,参考经济学中“弹性”原理,用生态服务价值变化率/粮食总产量变化率表征生态产出对于粮食总产的敏感性,以期考察粮食生产与生态环境的协调性。在参考魏晓旭等^[21]、刘海龙等^[22]度量生态经济系统协调度指数(EEH)的基础上,本研究提出农业生态价值协调度(EAH)来评价粮食主产区生态服务价值和粮食总产量的协调水平(协调度的划分标准见表 1),计算公式如下:

$$EAH = V_r / Q_r \quad (5)$$

$$V_r = (V_j - V_i) / V_i \quad (6)$$

$$Q_r = (Q_j - Q_i) / Q_i \quad (7)$$

式中 EAH 表示农业-生态协调度; V_i 和 V_j 分别表示研究区研究时期的始、末年份的生态服务价值(元); Q_i 和 Q_j 分别表示研究区研究时期的始、末年份粮食总产量。

第一步:设 X_0 为非负序列, X_1 为 X_0 的一次累加序列, Z_1 为 X_1 的紧邻均值生成序列, GM(1,1) 模型

型 $x_0(k) + az_1(k) = b$ 的白化方程为 $\frac{dx_1}{dt} + ax_1 = b$

第二步:计算参数 a, b

$$\text{设 } B = \begin{bmatrix} - & z_1(2) & 1 \\ - & z_1(3) & 1 \\ & \vdots & \vdots \\ - & z_1(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x_0(2) \\ x_0(3) \\ \vdots \\ x_0(n) \end{bmatrix}$$

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

第三步:计算 GM(1,1) 模型的时间响应序列:

$$\hat{x}_1(k+1) = [x_0(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a}$$

第四步:计算预测值还原: $\hat{x}_0(k+1) = \hat{x}_1(k+1) - \hat{x}_1(k)$

为提高预测模型的可信度,在预测前对模型进行精度检验,灰色模型的精度检验方法主要有后验差检验、小误差频率检验、关联度检验等,本研究采用后验差检验,后验差检验精度划分等级为:当 $c < 0.35$ 时精度等级为好;当 $0.35 \leq c < 0.50$ 时精度等级为合格;当 $0.5 \leq c < 0.65$ 时精度等级为勉强合格;当 $c \geq 0.65$ 时精度等级为不合格。其检验步骤分为以下3步:

第一步:计算原始非负序列 X_0 的均方差 S_0 :

$$S_0 = \sqrt{\frac{S_0^2}{n-1}}, S_0^2 = \sum_{k=1}^n [x_0(k) - \bar{x}_0]^2, \bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_0(k)$$

第二步:计算残差数列 $\varepsilon_0(k) = x_0(k) - \hat{x}_0(k)$ 的均方差 S_1 :

$$S_1 = \sqrt{\frac{S_1^2}{n-1}}, S_1^2 = \sum_{k=1}^n [\varepsilon_0(k) - \bar{\varepsilon}_0]^2, \bar{\varepsilon}_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_0(k)$$

表2 粮食主产区农业-生态协调度(EAH)实证结果

Table 2 Empirical results of agro-ecological coordination degree in major grain-producing areas

省份	2017		2009~2013		2014~2017		2009~2017	
	ESV ($\times 10^7$ 元)	TGO ($\times 10^4$ t)	EAH	层级	EAH	层级	EAH	层级
河北	35 590.10	3 829.25	2.96	高度协调	-0.24	低度冲突	1.31	中度协调
内蒙古	252 701.49	3 254.54	1.49	中度协调	-1.41	中度冲突	0.32	低度协调
辽宁	59 884.00	2 330.74	2.30	高度协调	-4.65	高度冲突	0.73	低度协调
吉林	75 573.84	4 154.00	1.14	中度协调	-1.37	中度冲突	0.23	低度协调
黑龙江	198 870.75	7 410.34	1.65	中度协调	-0.50	低度冲突	0.62	低度协调
江苏	69 190.47	3 610.8	18.41	高度协调	-0.74	低度冲突	8.60	高度协调
安徽	38 774.69	4 019.71	9.25	高度协调	0.22	低度协调	2.30	高度协调
江西	76 504.04	2 221.73	7.46	高度协调	0.74	低度协调	4.35	高度协调
山东	44 951.40	5 374.31	5.68	高度协调	-0.45	低度冲突	0.70	低度协调
河南	32 850.59	6 524.25	6.48	高度协调	-0.06	低度冲突	1.79	中度协调
湖北	72 643.44	2 846.13	9.64	高度协调	-0.27	低度冲突	3.17	高度协调
湖南	83 088.76	3 073.60	38.31	高度协调	1.40	中度协调	6.73	高度协调
四川	143 901.19	3 488.90	9.30	高度协调	0.39	低度协调	6.28	高度协调
主产区	1 184 524.76	52 138.30	3.81	高度协调	-0.83	低度冲突	1.27	中度协调

ESV:生态系统服务价值;TGO:粮食总产量。

2.1 粮食主产区的农业-生态地位

2017年粮食主产区的粮食总产量为 5.2138×10^8 t,生态系统服务价值为 $1.18452476 \times 10^{13}$ 元,与

第三步:计算方差比 $c = S_0/S_1$

2 粮食主产区农业生态协调度实证分析

根据 Costanza 动态模型求出13个粮食主产区2009-2017年各年份的不同土地利用类型生态服务价值以及各类生态服务功能的服务价值,在此基础上求出总的生态系统服务价值,以粮食总产量(TGO)作为农业产出指标,以总的生态系统服务价值(ESV)作为生态系统的产出价值指标,再根据EAH模型分别求出粮食主产区及13个省(区)在2009-2017年的农业-生态协调系数,将农业和生态2个系统的冲突性与协调性的关系分为“高度冲突”、“中度冲突”、“低度冲突”、“低度协调”、“中度协调”、“高度协调”6种类型,粮食主产区各省份的协调系数及协调水平如表2所示:

过去历年相比,粮食总产量显著上升,生态服务价值波动较为明显。由图1可知,各省份粮食总产量从高到低排序依次为黑龙江>河南>山东>吉林>安徽>

河北>江苏>四川>内蒙古>湖南>湖北>辽宁>江西, 各省份生态系统服务价值从高到低排序依次为内蒙古>黑龙江>四川>湖南>江西>吉林>湖北>江苏>辽宁>山东>安徽>河北>河南。其中河南、山东、河北、安徽四省粮食总产量很高,居各省前列,而生态服务价值远低于粮食主产区其他省份,相对于13个粮食主产区总体状况,四省粮食产量占总产量的37.88%,而生态服务价值仅占总生态服务价值的12.85%,表现为粮食生产用地占陆地生态系统比重高,农田生态系统没有作为其他生态服务价值更高的土地利用类型来使用,同时黄淮海地区作为中国重要的粮食生产基地,存在水资源严重短缺的问题,

不利于生态系统水源涵养、气候调节等生态系统服务功能的有效发挥,从而造成生态服务价值与粮食总产量严重错配的问题。位于华北地区的内蒙古和黑龙江两省(区)生态服务价值位居粮食主产省(区)前两位,生态产出效率高,占主产区总生态服务价值的38.12%,有利于生态系统服务功能的维持,但内蒙古地区受限于地理位置、水资源禀赋、气候调节等自然因素,农业产出动能不足,粮食总产量较低,该地区应合理规划农用地,因地制宜发展农业,提高农业产出效率。位于长江流域的四川、湖南、湖北、江西四省水资源充沛、气候适宜,农业-生态匹配性较好,粮食生产活动具有可靠的生态安全保障。

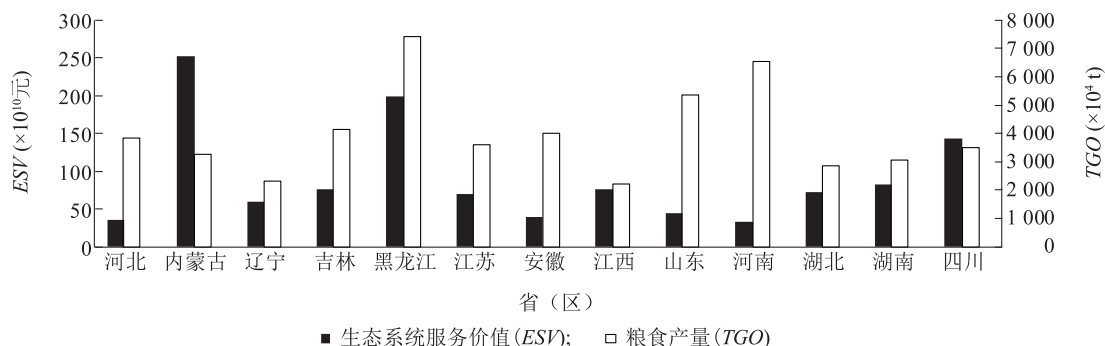


图1 粮食主产区2017年生态系统服务价值及粮食产量

Fig.1 Ecosystem service value and grain output in major grain-producing areas in 2017

2.2 EAH的动态演变及趋势分析

协调度是2个变量相对变化趋势的一致性程度,相对于绝对量位次的一致性而言,协调度更能反映2个变量的协调性走势^[24]。为了更全面反映粮食主产区农业-生态产出协调性,本研究分别测算了粮食主产区各省(区)2009–2013年、2014–2017年以及2009–2017年3个区段协调度的EAH值(表2)。总体来看,粮食主产区粮食总产量与生态服务价值协调性存在向好趋势,2009–2013年主产区农业-生态协调度为3.81,处于高度协调水平;2014–2017年农业-生态协调度为-0.83,处于低度冲突水平,表现为在粮食总产量稳步上升的同时,生态服务价值呈先上升后下降的趋势,农业-生态发展存在潜在危机。综合2009–2017年主产区农业-生态协调度来看,总体协调度为1.27,属于中度协调水平,低于2009–2013年的生态-农业协调度,表明粮食主产区农业产出和生态产出的协调向好趋势有所减弱,存在逆转风险。

结合表2协调度测算结果,从动态趋势来看,2011–2017年粮食主产区生态-农业协调度形成了以2013年为拐点,呈倒U型变化特征,且可以分为2个阶段:

第一阶段是农业-生态高度协调阶段。2011–2013年农业-生态协调性趋势向好。除内蒙古、黑龙江、吉林三省(区)由于自然禀赋的限制农业-生态协调度较低外,其他各省(区)协调度均处于高度协调水平,其中位于长江流域的湖南、江苏、湖北、四川四省的农业-生态协调性水平居各省(区)前四位,在粮食总产量稳步提升的同时,表征为生态服务价值水平的不断提高且增速高于粮食总产量的提升速度。分别以2009年和2011年作为基准年份,逐项计算2011年和2013年粮食主产区的协调度分别为4.57和2.00。相比2011年,2013年吉林、安徽、江西、湖南、湖北、四川六省协调度有不同程度的降低,其中吉林省由中度协调水平转变为轻度冲突水平,作为中国水资源极度

短缺的省份之一,用水量的不足限制了吉林省生态产出效率的提升,2013年其余七省(区)的生态-农业协调度处于比较稳定的状态。

第二阶段是农业-生态协调分化阶段。2014–2017年粮食主产区整体处于低度冲突水平,各省(区)中有4个省(区)为协调状态,有9个省(区)为冲突状态,农业-生态发展的不协调性表现为粮食总产量表征的农业产出增长的同时,伴随着生态系统服务价值表征的生态产出的下降,在粮食生产过程中缺乏生态安全的保障。粮食主产区中辽宁省农业-生态为高度冲突水平,表现为生态服务价值下降且下降速度高于粮食总产量的增速,使粮食产量的增长受限于自然生态系统服务功能的发挥。分别以2013年和2015年作为基准年份,逐项计算2015年和2017年粮食主产区的协调度分别为-1.84和-0.55,由中度冲突水平转为低度冲突水平,生态-农业的协调程度有所提升,除河北、辽宁、江苏三省协调度有所下降外,其他各省(区)协调度均有所上升,其中安徽、湖南、四川三省由冲突水平转为协调水平。

农业-生态协调性的倒U型趋势的形成,原因在于研究年份中粮食主产区耕地面积基本维持不变,粮食作物播种面积以每年0.6%~2.0%的速度增加,农业生产技术不断提高,粮食作物品种和种植结构的不断优化,使得主产区粮食总产量逐年稳步增加。同时由于生态系统服务价值表现为2013年处于较高水平,总体呈现倒U型变化趋势,农业产出和生态价值存在偏离现象,不利于农业-生态的协调稳定发展。

2.3 EAH的空间分异分析

从粮食主产区农业-生态协调度的空间演变(图2)来看,以2009年为基准年份分别计算2011年和2017年的生态-农业协调度,粮食主产区总体协调度分别为3.81和1.27。与2011年相比,2017年各省(区)均处于协调水平,但协调程度均有所下降。

2011年粮食主产区各省(区)的生态-农业协调度从高到低依次为湖南>江苏>江西>四川>安徽>湖北>山东>河南>河北>内蒙古>辽宁>黑龙江>吉林,从区域层面来看,总体上长江流域各省份协调度最高,黄淮海地区各省份的协调度次之,华北和东北地区的协调度最低。位于长江流域的湖南、江苏、江西、四川、安徽、湖北六省当量单位面积生态服务价

值较高,保持着与自然资源禀赋相匹配的生态系统服务价值,粮食总产量和生态服务价值分别占粮食主产区的39.42%和33.60%,处于比较协调的状态,粮食产出增长的同时具备良好的生态效益。位于黄淮海地区的山东、河南、河北三省各种土地利用类型中农用地所占比重也高,粮食产量高,占粮食主产区总产量的30.26%,但生态服务价值仅占主产区的8.80%,表现为单位面积生态系统服务价值和总生态服务价值严重偏低,农业产出和生态产出发展不均衡。位于华北和东北地区的内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁四省(区)生态服务价值较高,但粮食单产和粮食总产受自然因素限制处于较低水平,表现为农业-生态产出的严重失调。

实证显示,中国粮食主产省(区)生态-农业协调度空间分异显著。2017年粮食主产区各省(区)生态-农业协调度从高到低排序依次为江苏>湖南>四川>江西>湖北>安徽>河南>河北>辽宁>山东>黑龙江>内蒙古>吉林。2017年各省(区)协调水平对比2011年都有不同程度的降低。从各省(区)协调度位次来看,其他省(区)变动不明显,仅有山东省的主产省(区)协调度位次从2011年第七位变动到2017年第十位。山东省在粮食生产效率快速提升的同时,生态产出无显著增长且部分年份有所下降,从而造成生态-农业协调水平较低且相对其他省份下降幅度较大。

2.4 粮食主产区粮食总产量及生态服务价值动态预测

由灰色系统预测GM(1,1)模型,设粮食主产区粮食总产量或生态服务价值为原始非负序列 X_0 ,则 $x_0(k)$, ($k=1,2,\dots,5$)分别表示2009年、2011年、2013年、2015年、2017年的粮食总产量(TGO)或生态服务价值(ESV),可求得粮食总产量或生态服务价值的还原值,首先利用后验差检验对模型精度进行检验,结果见表3。

由表3可知,粮食总产量后验差检验 c 值为0.1501,远小于0.35,因此运用GM(1,1)模型来预测粮食总产量精度高;生态服务价值后验差检验 c 值为0.4082,介于0.35~0.50,因此运用GM(1,1)模型来预测生态服务价值精度较高,可以运用灰色系统预测GM(1,1)模型来预测粮食主产区2019–2025年的粮食总产量和生态服务价值,并计算2019–2025年生态-农业协调度(图3)。

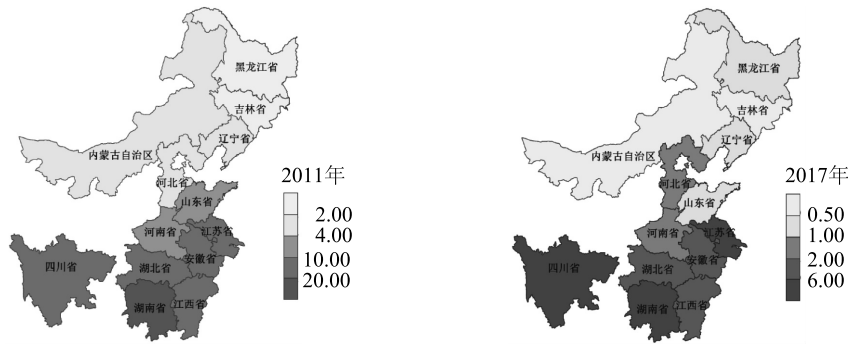


图 2 2011 年、2017 年协调度空间分异图
Fig.2 Spatial differentiation graph of coordination degree in 2011 and 2017

表 3 粮食主产区 2009–2017 年粮食总产量与生态服务价值还原值及精度检验

Table 3 Reduction value and accuracy test of total grain output and ecological service value in major grain-producing areas from 2009 to 2017

年份	粮食总产量 (TGO)				生态系统服务价值 (ESV)			
	实际值 ($\times 10^4$ t)	还原值 ($\times 10^4$ t)	残差 ($\times 10^4$ t)	相对误差	实际值 ($\times 10^7$ 元)	还原值 ($\times 10^7$ 元)	残差 ($\times 10^7$ 元)	相对误差
2009	39 710	39 710	0	0	847 149	847 149	0	0
2011	43 422	43 036	385.17	0.008 9	1 209 033	1 306 653	-97 620.33	0.080 7
2013	45 763	45 669	94.64	0.002 1	1 339 311	1 322 854	16 457.19	0.012 3
2015	47 341	48 462	-1 120.87	0.023 7	1 254 207	1 339 256	-85 049.50	0.067 8
2017	52 138	51 426	711.85	0.013 7	1 184 525	1 355 862	-171 336.77	0.144 6

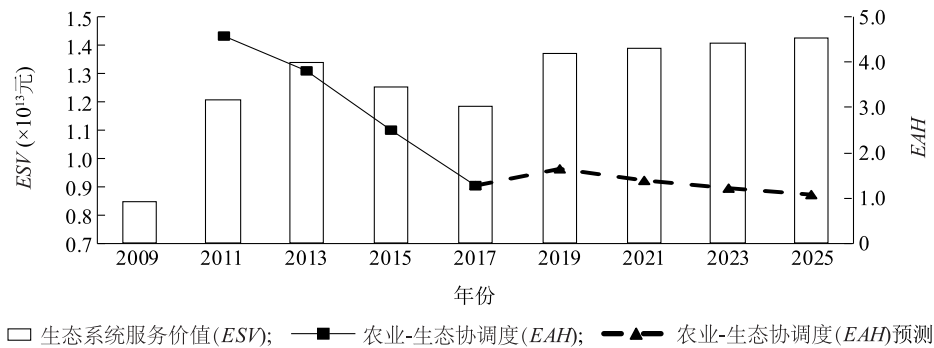


图 3 粮食主产区 2019–2025 年生态服务价值及农业-生态协调度预测
Fig.3 Prediction of ecological service value and ecological agriculture coordination degree in major grain-producing areas from 2019 to 2025

在保证气候、土壤等自然环境保持相对稳定的状态下,由于人口的不断增长、对粮食的需求增加,我们有理由相信2019–2025 年无论是基于自然因素、技术水平还是人为意愿,粮食主产区粮食总产量将与灰色系统预测 GM(1,1)模型的预测结果一致,呈增长趋势。同时,随着人类对气候条件、水土保持等认知的加强,以及对环境污染、气候变暖、物种锐减等问题的重视,政府采取环境治理、退耕还林等政策,公众对环境物品的支付意愿加强,使得粮食主产

区生态系统服务价值在2019–2025 年也呈现递增的趋势。根据灰色系统预测 GM(1,1)模型的预测结果,2021 年、2023 年、2025 年粮食主产区生态服务价值分别为 1.39×10^{13} 元、 1.41×10^{13} 元、 1.42×10^{13} 元,以 2009 年作为基准年份,2021 年、2023 年、2025 年粮食主产区生态-农业协调度分别为 1.397、1.207、1.061,处于中度协调水平,与2011–2017 年趋势一致,均呈递减变化。
根据 GM(1,1)模型的预测结果,随着生态服务

价值和粮食总产量的同向增长,生态-农业将处于协调状态,粮食生产具有较好的生态安全保障。但向好趋势在逐渐减弱,相比2011–2017年,协调度变化幅度相对减弱,表明在经历粮食大幅增产、社会环境支付意愿显著提升后,粮食产量和生态服务价值的增长速度趋于稳定,农业-生态保持在中度协调状态。

3 结论与启示

3.1 实证结论

第一,从静态总量位次匹配性看,粮食主产区农业-生态存在较为严重的错位现象。2017年除黑龙江、江苏外,其他省(区)的粮食和生态的产出指标值均存在较大程度的错位,农业-生态的匹配性较差。粮食产量位次显著高于生态服务价值位次的省份有河南、山东、吉林、安徽、河北五省,表现为粮食总产量居各省(区)前列,耕地资源利用程度高,但存在环境安全危机;生态服务价值位次显著高于粮食产量位次的省(区)有四川、内蒙古、湖南、湖北、辽宁、江西六省(区),表现为生态环境良好,除内蒙古外其他五省自然资源丰富,在生态安全保障的同时存在粮食增产的潜力。

第二,从动态相对协调度看,研究期内粮食主产区粮食产量与生态产出协调性呈倒U趋势。2011–2017年粮食主产区农业-生态协调度以2013年为拐点,呈现2011–2013高度协调和2014–2017年协调性减弱2个显著的阶段特征。各省(区)中农业-生态协调性下降趋势较为明显的省(区)有内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东五省,由高度协调水平转为低度协调水平,河南、河北两省由高度协调水平转为中度协调水平。

第三,从农业-生态协调的空间属性来看,粮食主产区粮食生产与生态服务价值存在地理空间不协调现象。生态服务价值与粮食产量空间分异显著。农业产出高的省(区)集中在黄淮海地区,生态产出高的省(区)集中在长江流域地区,生态-农业协调度的区域分布特点为长江流域地区协调度最高,黄淮海地区协调度较高,华北和东北地区协调度最低。

第四,从预测结果来看,粮食主产区生态服务价值呈逐年上升的趋势,同时,在保障自然条件相对稳定的同时,无论基于人为意愿还是技术条件粮食产量也呈现逐年递增的趋势。随着粮食增产效率减

弱,生态系统使用和修复趋于稳定,农业-生态产出协调度下降幅度逐年缩小,农业-生态协调度也维持在较稳定的状态,基本处于中度协调的水平。以2009年为基准年份,2025年生态-农业协调度将处于1.061的水平,即农业产出和生态产出增长速率将趋于一致,能较好实现农业与生态发展相匹配。

3.2 政策启示

一是强化粮食安全保障的生态支撑。研究结果显示农业-生态的不协调性主要根源于粮食生产和生态承载力的偏离。为此,在强调粮食产量和增量安全的同时应高度关注粮食主产区的生态安全问题。应加强生态资源保护和修复,通过科技进步推动提高耕地产粮效率,大力发展绿色农业,走农业生产活动与生态服务功能协调发展的路子。应合理规划土地生态资源,确立“粮食安全”与“生态安全”双重考核机制。建立粮食主产区生态补偿机制,生态资源丰富地区应适当多承担粮食安全主体功能责任。

二是优化粮食和生态安全主体功能区空间格局。根据实证发现的问题,黄淮海粮食主产区应以绿色农业为导向,提升粮食生产效率,严守“生态红线”与“耕地红线”,逐步实现绿色农业现代化。东北粮食主产区中黑龙江应注重提升粮食生产效率,走农业可持续发展道路。辽宁、吉林应继续保护好土地资源,维护生态平衡,注意开展综合治理,使农业生产与生态环境协调发展。长江流域应承担更多的粮食安全责任,在保障流域生态安全的同时积极打造“国家高产农田示范区”,释放“中部粮仓”产粮潜能。北方内蒙古则应把“生态扶贫”与“经济扶贫”放到同等重要的位置,维持生态环境良性循环。

3.3 研究不足与讨论

农业-生态协调度水平由农业产出和生态产出所决定,其中农业产出由粮食总产量表征,生态产出由生态系统服务价值表征,由于粮食总产量度量方法统一且易于度量,对于粮食总产量的研究争议很少。而影响生态系统服务价值的因素众多,在基于ESV动态模型度量当量单位面积生态服务价值时粮食价格起着至关重要的作用,从《全国农产品成本收益资料汇编》中3种主要粮食作物的价格走势来看,2009年价格总体处于较低水平,2009–2017年水稻和小麦价格有略微变动,而2011年、2013年、2015年、2017年每50 kg玉米平均价格分别为

82.01元、108.81元、94.23元、82.16元,呈现倒U型变化。相比其他年份,2013年粮食价格水平较高且以2013年为拐点大致呈倒U型变化,与生态服务价值和当量单位面积服务价值变动趋势相一致。粮食价格由市场供需所决定,而生态产出的价值并不能由价格所决定,因此ESV模型存在夸大了粮食价格对生态系统服务价值影响程度的问题。

参考文献:

- [1] COMMON M, PERRINGS C. Towards an ecological economics of sustainability[J]. *Ecological Economics*, 1992, 6(1): 7-34.
- [2] BROWN L R. Who will feed china? [M]. New York: WWNortn & Company, 1995.
- [3] 富兰克林·H·金.《四千年农夫》[M]. 程存旺,石 嫣,译. 北京: 东方出版社, 2011: 80-114.
- [4] DAILY G C, SODERQVIST T, ANIYAR S, et al. The value of nature and the nature of value[J]. *Science*, 2000, 289(5478): 395-396.
- [5] EGOH B, ROUGET M, REYERS B, et al. Integrating ecosystem services into conservation assessment: a review[J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(4): 714-721.
- [6] LAUTENBACH S, KUGEL C, LAUSCH A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 676-687.
- [7] 翟虎渠. 粮食安全的三层内涵[J]. *瞭望新闻周刊*, 2004(13): 60.
- [8] 王国敏,张 宁. 中国粮食安全三层次的逻辑递进研究[J]. *农村经济*, 2015(4): 3-8.
- [9] 胡岳岷. 初论农村新型合作经济组织——关于长春市的个案调查与研究[J]. *当代经济研究*, 2006, 134(10): 57-60.
- [10] 黎东升,曾 靖. 经济新常态下我国粮食安全面临的挑战[J]. *农业经济问题*, 2015, 36(5): 42-47, 110.
- [11] 邱建军,张士功,李哲敏,等. 农业生态环境安全与生态农业发展[J]. *中国农业资源与区划*, 2005, 26(6): 42-46.
- [12] 倪国华,郑风田. 粮食安全背景下的生态安全与食品安全[J]. *中国农村观察*, 2012(4): 52-58, 94.
- [13] 孔祥斌,张凤荣. 中国农户土地利用阶段差异及其对粮食生产和生态的影响[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 112-120.
- [14] 聂 英. 中国粮食安全的耕地贡献分析[J]. *经济学家*, 2015(1): 83-93.
- [15] 田克明,王国强. 我国农用地生态安全评价及其方法探讨[J]. *地域研究与开发*, 2005, 24(4): 79-82.
- [16] 刘 渝,张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. *资源科学*, 2010, 32(12): 2292-2297.
- [17] 何 玲,贾启建,李 超,等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 215-224.
- [18] 杨建利,雷永阔. 我国粮食安全评价指标体系的建构、测度及政策建议[J]. *农村经济*, 2014(5): 23-27.
- [19] 谢高地,甄 霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [20] 宋利娜,张玉铭,胡春胜,等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 297-307.
- [21] 魏晓旭,赵 军,魏 伟,等. 基于县域单元的中国生态经济系统协调度及空间演化[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1535-1545.
- [22] 刘海龙,石培基,李生梅,等. 河西走廊生态经济系统协调度评价及其空间演化[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3645-3654.
- [23] 邓聚龙. 灰色系统与农业[J]. *山西农业科学*, 1985(6): 29-33.
- [24] 宋 焱. 我国粮食主产区粮食生产与生态环境的协调性研究——基于生态系统服务价值视角[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.

(责任编辑:陈海霞)