文章编号：1005-0906(2023)02-0166-08 DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20230222

我国玉米生态效率的时空差异与影响因素

胡言康,姜会明
(吉林农业大学经济管理学院,长春 130118)

摘 要：基于碳汇和产值双重视角,采用SBM-DEA模型测算我国玉米生态效率,通过核密度估计分析其时空特征,同时对其影响因素进行分析。结果表明,我国玉米生态效率总体水平不高且随时间大致呈“降—升—降”后趋于平缓的变化趋势,区域差异明显但差异程度逐年降低。政府政策、受教育水平和环境规制等影响因素有利于生态效率的提高,收入水平、农业生产性服务水平等对生态效率具有负向影响。各地区应基于自身资源禀赋结合影响因素采取差异化措施,同时强化区域间交流协作,进一步提升玉米生态效率以推进玉米低碳高产高效发展。

关键词：玉米;生态效率;时空差异;SBM-Tobit模型;影响因素
中图分类号：S513 **文献标识码**：A

Temporal and Spatial Differences and Influencing Factors of Maize Ecological Efficiency in China

HU Yan-kang, JIANG Hui-ming
(*School of Economics and Management, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118, China)

Abstract: Based on the dual perspective of carbon sink and output value, the SBM-DEA model was used to estimate the ecological efficiency of maize in China, and kernel density estimation was used to analyze its temporal and spatial characteristics. Meanwhile, the influencing factors were also analyzed. The results showed that the overall level of maize eco-efficiency in China was not high and showed a trend of "down-up-down" with time, and then tended to be gentle. The regional differences were obvious, but the difference degree was decreasing year by year. Government policy, education level and environmental regulation are conducive to the improvement of ecological efficiency, while income level and agricultural productive service level have a negative impact on ecological efficiency. Therefore, different regions should take differentiated measures based on their own resource endowment and influencing factors, and strengthen inter-regional communication and cooperation to further improve maize ecological efficiency to promote low carbon, high yield and high efficiency development of maize.

Key words: Maize; Ecological efficiency; Spatial and temporal difference; SBM-Tobit model; Influencing factor

近年来,应对气候变化问题成为全球的焦点,低碳生态化发展成为社会各生产部门的常态。玉米是我国第一大粮食作物,其发展方向与生产状况关乎我国粮食安全。虽然玉米生产基本实现连年增产,但在传统的粗放型生产模式下,石化生产要素的过量使用造成了大量碳排放、土壤水质污染等多种问题,生态环境受到了极大的破坏,环境承载力逼近极限,玉米生产的可持续发展面临着巨大压力。因此,探讨如何推进玉米产业低碳高产高效生态化发展是落实藏粮于地战略亟待解决的重要问题。

关于农业生态效率的研究已引起学界关注。依照生态效率的思想,农业生态效率是指综合考虑农业生产过程中投入、产出、生态影响三者关系的综合绩效[1]。不少学者对我国农业生态效率进行了测度[2,3],普遍认为东部省份农业生态效率相对较高,中西部省份农业生态效率相对较低,总体水平偏低且区域不平衡现象明显并呈扩大态势[4]。与此同时,鉴于农业具有净碳效应的特殊性[5],也有学者基于碳汇与经济的双重视角评价我国农业发展水平,

录用日期：2022-03-24
基金项目：吉林省科技厅科技战略与规划项目(20200101094FG)。
作者简介：胡言康(1994-),山东聊城人,硕士,研究方向为农业经济理论与政策。E-mail:359905071@qq.com
姜会明为本文通讯作者。

发现只有少数省份碳汇与经济二者的协调度良好[6]。此外,还有一些学者对农业生态效率的影响因素进行考察,发现农业技术水平、人力资本水平等有助于促进农业生态效率的提高[7,8],财政支农、化肥施用强度、机械使用密度等的增加会导致农业生态效率下降[9,10],不同影响因素对不同地区农业生态效率的影响存在异质性[11]。当前针对特定作物的研究偏少,仅见相关研究对水稻、小麦生态效率进行了探讨[12,13],尚缺针对我国第一大粮食作物玉米生态效率的研究。

本文以我国第一大粮食作物玉米作为研究对象,考虑到玉米生产的盈利性和净碳效应两个方面,将碳汇和产值同时纳入到生态效率的测算中,以期更全面科学地测度玉米生态效率,进而探究我国玉米生态效率的时空差异与影响因素,为推进我国玉米低碳高产高效发展提供对策建议。

1　玉米生态效率的测度与分析

1.1　研究方法

1.1.1　非径向、非角度的SBM-DEA模型

关于生态效率的测算方法已经相当成熟,鉴于普通的DEA方法不能将投入冗余、非期望产出冗余等这些松弛因素考虑在内,往往造成估计结果偏高。因此,本研究借鉴葛鹏飞等[14]所采用的非径向、非角度的SBM-DEA模型进行测算。

1.1.2　核密度估计

本文采用的核密度估计分析方法是研究空间非均衡分布的重要工具,并选用已有研究中使用频率较高的高斯核函数[15],计算公式如下:

$$f(x)=\frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{N}K\left(\frac{X_i-\bar{x}}{h}\right) \tag{1}$$

$$K(x)=(1/\sqrt{2\pi})\exp(-x^2/2) \tag{2}$$

其中,$f(x)$表示密度估计值,$K(x)$为高斯核函数,X_i为独立同分布的观测值,$\bar{x}$为均值,N为观测值个数,h为带宽。

1.2　指标数据选取

我国主要有20多个玉米主产省份,依据地域性特征可划分为五大玉米生态类型区域,它们集中了全国玉米播种面积的90%和全国玉米产量的95%以上[16]。此外,鉴于我国于2004年使用新农产品调查指标体系进行核算,因此,本研究选取2004~2018年作为样本考察期,以20个玉米主产省份五大玉米生态类型区作为观测目标进行我国玉米生态效率的测度。

1.2.1　投入指标

本研究将玉米生产过程中所使用的劳动、机械、种子、化肥、农膜、农药及其他投入作为投入指标[17,18]。其中,劳动以每公顷人工投入表征,机械以每公顷租赁作业费用表征,种子、化肥、农膜、农药均以每公顷实际用量表征,其他投入为玉米生产过程中每公顷其他投入费用的总和。

1.2.2　期望产出指标

本研究玉米生产的期望产出有两个,一是碳汇,指玉米生产过程中的固碳效应(即碳吸收量),碳吸收量的测算方法借鉴学者们常采用的方法[19],即$C_{it}=C_f\times Y_{it}\times(1-w_f)/H_f$,$C_{it}$表示i省份第t年的每公顷玉米碳吸收总量,$C_f$为玉米生产过程合成有机物所需吸收的碳,即碳吸收率(0.471),Y_{it}为i省份第t年玉米的每公顷产量,w_f为玉米的含水量系数(0.13),H_f为玉米的经济系数(0.40)[20];二是产值,以玉米的每公顷产值表示。

1.2.3　非期望产出指标

本研究将玉米生产过程中产生的碳排放以及氮磷流失作为非期望产出指标。其中,碳排放主要考虑玉米生产过程中直接或间接产生,所涉及的碳源主要包括化肥、农膜、农药、柴油、翻耕、灌溉等,碳排放量用各类碳源的量乘以其碳排放系数再加总得到[21];氮磷流失借鉴展进涛等[22]的方法,根据《第一次全国污染普查公报》中种植业的氮磷流失量除以2007年种植业氮肥、磷肥使用量(包含复合肥中氮、磷肥的含量)得到氮流失率和磷流失率,再通过历年各省份玉米氮、磷肥用量得到其各自的氮、磷流失量。

本研究测算玉米生态效率所使用的劳动、机械、种子、化肥、农膜、其他投入等以及计算过程所用到的数据均来源于《全国农产品成本收益资料》和《中国农村统计年鉴》。农药、柴油用量借鉴陈中督等[23,24]的方法通过费用除以平均价格折算得到。样本数据描述性信息详见表1。

1.3　测度结果分析

1.3.1　我国玉米生态效率的时空差异

从全国层面来看(图1),我国玉米生态效率总体水平不高,年平均值仅为0.799,距离玉米生产系统要素资源的最优配置还有一定的潜力,说明系统中存在着机械、化肥和农药等投入要素的冗余以及碳排放及氮流失等非期望产出的冗余。从演变过程看,我国玉米生态效率大致呈“降—升—降”最后趋于平稳的趋势,2004~2010年间呈波动下降趋势,

此阶段玉米生产方式较为粗放，对于生态保护的重视程度偏低，导致生态效率水平下降；2010～2014年间呈波动上升趋势，由于“十二五”时期倡导建设资源节约型、环境友好型社会，生态环境状况得到改善；2014～2018年先呈下降趋势后趋于平缓，由于长期处于“石化农业”的生产模式下，玉米生产与资源约束的矛盾日益尖锐，生态效率面临巨大的下行压力，生态治理步入攻坚时期。

表1 样本描述性统计信息

Table 1 Sample descriptive statistics

指 标 Indicators	变 量 Variable	均 值 Mean	标准误 S.E.	最小值 Min	最大值 Max	观测数 Obs
投入指标	劳动(日/hm²)	130.925	59.177	35.850	313.500	300
	机械(元/hm²)	1 323.112	762.232	115.800	3 405.000	300
	种子(kg/hm²)	35.015	8.548	17.850	69.000	300
	化肥(kg/hm²)	348.587	62.134	192.300	515.550	300
	农膜(kg/hm²)	6.683	13.581	0.000	77.100	300
	农药(kg/hm²)	2.681	1.091	0.417	5.940	300
	其他(元/hm²)	220.097	109.243	29.850	592.950	300
期望产出指标	碳汇(kg/hm²)	7 060.265	1 353.239	3 532.422	11 503.12	300
	产值(元/hm²)	12 484.300	3 663.507	5 118.600	23 283.600	300
非期望产出指标	碳排放(kg/hm²)	405.671	115.480	226.282	936.152	300
	氮流失(kg/hm²)	12.816	2.811	6.874	19.289	300
	磷流失(kg/hm²)	0.591	0.182	0.007	1.180	300

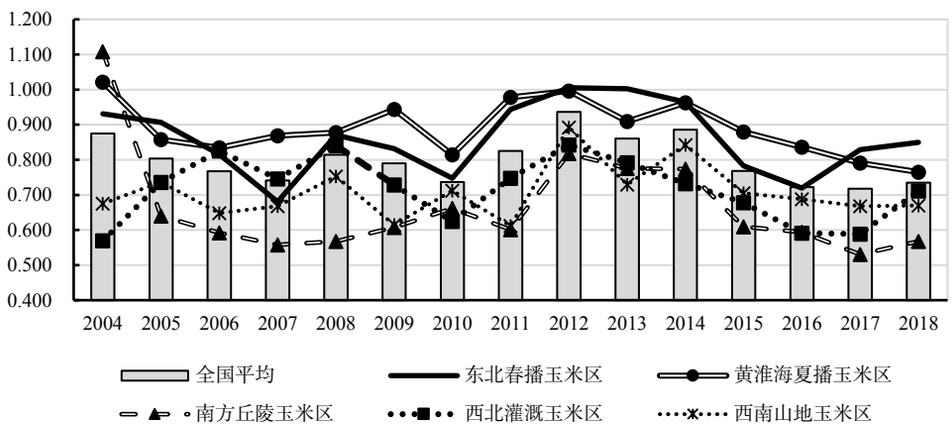

图1 全国及五大区域玉米生态效率

Fig.1 Maize eco-efficiency in China and five regions

分区域来看，玉米生态效率存在着明显的差异性，东北春播玉米区生态效率表现相对较好，效率值几乎均高于全国平均水平，变化趋势与全国趋势相近，呈现出“W”型特征，即生态效率历经“降—升—降”最终呈上升趋势；黄淮海夏播玉米区生态效率表现最优，效率值在整个样本期几乎均领先于其他区域，2004～2014年间生态效率介于0.8～1.0平稳波动，2014～2018年间略有下降；南方丘陵玉米区生态效率则表现相对较差，效率值在整个样本期几乎均低于其他区域，2005～2011年间一直处于较低水平，2011～2014年间有了一定提升，但之后又呈下降趋势，其玉米生态效率的提升空间较大，意味着其玉米生产系统中存在着大量投入冗余，并且污染排放冗余也相对较高，需格外重视减投减排降污增效；西北灌溉玉米区和西南山地玉米区生态效率变化趋势相近，整个样本期大致在0.6～0.8呈上下波动状态，平均生态效率值虽高于南方丘陵玉米区，但与东北春播玉米区和黄淮海夏播玉米区存在一定的差距，在其生态效率的提升方面同样有一定的潜力可挖，应注重玉米生产过程中减投减排降污以促进生态效率提高。

1.3.2 我国玉米生态效率的动态演进

为进一步考察我国玉米生态效率的动态演进过程，采用核密度估计方法探究我国玉米生态效率的

分布位置、分布态势、分布延展性、极化趋势等,反映我国玉米生态效率的绝对差异程度。在不影响玉米生态效率的动态演进结果的前提下,选取考察期的2004年、2008年、2014年、2016年、2018年作为代表年份来展现我国玉米生态效率的分布动态变化。估计结果如图2所示。

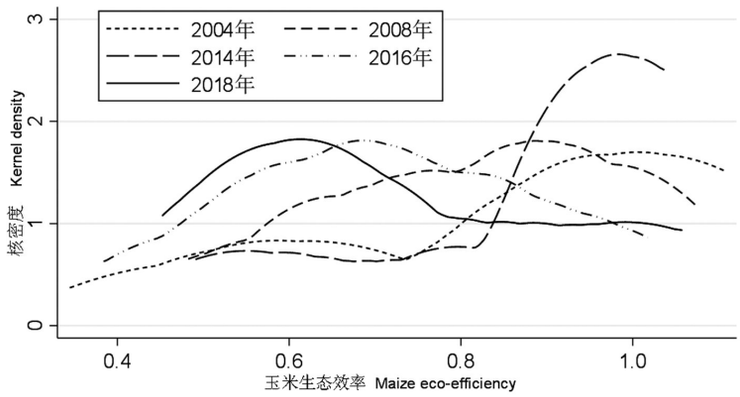

图2　玉米生态效率核密度估计结果

Fig.2　Kernel density estimation of maize eco-efficiency

从分布位置来看,核密度函数中心呈现"左—右—左"的移动态势,说明我国玉米生态效率整体上经历了"降—升—降"的演变趋势。2004~2008年间虽然基本实现了玉米产量的连年增产,但粗放型生产方式对生态环境造成破坏,导致生态效率呈下降趋势;2008~2014年间呈上升趋势,得益于"玉米临时收储政策"的实施,使得玉米经济收益明显提高,同时也印证了"十二五"时期强农惠农、推动绿色发展等方针政策的落实效果;2014~2016年间我国玉米生态效率大幅下降,长期处于"石化农业"的生产模式下,高投入高排放使得"逆生态化"效应的积累作用变得更强,生态效率下行压力增大;2016~2018年间玉米生态效率下降趋势得到缓解,说明"玉米价补分离政策"奏效、"十三五"时期积极应对气候变暖、倡导低碳绿色生产生活方式等措施取得成效。

从分布态势来看,我国玉米生态效率核密度曲线分布区间主要呈缩小趋势,主峰高度呈先上升后下降趋势,宽度则经历了由宽到窄的演变过程,说明我国各区域间玉米生态效率的绝对差异呈缩小趋势,生态效率较低区域与较高区域间的差距逐步缩小,各区域玉米生产的关注重心由经济收益向兼顾经济收益与生态效益转变,玉米生产正向着绿色生态化发展。

从分布延展性来看,核密度曲线的拖尾经历了"收缩—拓宽"的演变过程,主要表现为左拖尾逐渐缩短至消失而右拖尾逐渐出现并延长,说明我国玉米生态效率的空间差异总体上呈逐年减小趋势,生态效率较低区域在减投减排降污方面的工作逐渐取得成效,生态效率逐步上升,生态效率较高区域也得到了进一步的提升。

从极化趋势来看,波峰经历了由双峰到微弱多峰最终变为单峰为主,说明我国玉米生态效率经历了由两极分化到多极化,最终极化现象趋弱的演变过程,区域间玉米生态效率分化程度逐渐降低并逐步向密度中心收敛,区域发展不协调状况得到改善。

2　玉米生态效率的影响因素分析

2.1　模型设定

SBM-Tobit两阶段模型是集效率测算与影响因素分析于一体的重要方法。本研究的被解释变量(玉米生态效率)介于0~2,显然具有双边断尾特征,对于这种受限被解释变量的回归,Tobit模型相较于OLS法具有明显优势。对于面板数据回归,要想得到一致、无偏的估计量,使用固定效应模型则难以实现[9]。基于此,本研究选用随机效应的面板Tobit模型进行玉米生态效率影响因素的回归分析。具体模型如下:

$$Y_{it}=\beta_0+\sum_{j}^{n}\beta_j X_{j,it}+\mu_i+\varepsilon_{it} \tag{3}$$

Y为玉米生态效率,X_j为玉米生态效率的影响因素,β_0为截距项,β_j为待估计系数,i和t分别表示省份和年份,μ_i为个体效应,ε_{it}为随机误差项。

2.2　变量选取

影响玉米生态效率的因素有很多,考虑到五大玉米生态类型区的地域性特征,并借鉴已有研究成果,选取政策因素、城镇化水平、人均收入水平、受教育水平、地方环境规制、农业生产性服务水平等因素作为影响玉米生态效率的解释变量。其中,政策因

素方面，本文借鉴蔡荣[25]的方法，在模型中引入虚拟变量，将2008～2015年东北三省一区的临时收储政策变量赋值为1，其他省份和年份赋值为0；将2016～2018年东北三省一区的价补分离政策变量赋值为1，其他省份和年份赋值为0。城镇化水平，用各省份城镇人口数占该省份总人数的比重表示，该指标体现了农业人口转向非农业人口的变化趋势；人均收入水平，以地区农村居民人均可支配收入表示；农业劳动力受教育水平，以地区农业劳动力平均受教育年限来衡量，即平均受教育年限=(地区农业劳动力小学文化程度数*6+初中*9+高中*12+大专及以上* 16)/地区农业劳动力总数[26]。地方环境规制，由于环境规制属于政策性变量难以衡量，借鉴张金鑫等[27]的方法以地区环境污染治理投资总额作为代理指标。农业生产性服务水平，借鉴高维龙等[28]的方法，以农业服务业总产值占农业总产值的比重表示。变量描述性统计和回归结果见表2。

表2 变量描述性统计与回归结果

Table 2 Descriptive statistics of variables and regression results

变 量 Variable	平均值 Mean	标准误 S.E.	最小值 Min	最大值 Max	回归结果 Regression
临时收储政策	0.107	0.309	0.000	1.000	0.075*** (0.041)
价补分离政策	0.040	0.196	0.000	1.000	0.061 (0.061)
城镇化水平(%)	48.077	9.628	26.230	69.610	−0.225 (0.365)
人均收入水平(万元)	0.706	0.385	0.172	2.085	−0.161** (0.069)
受教育水平(年)	7.531	0.593	5.840	8.988	0.081** (0.036)
地方环境规制(百亿元)	2.160	1.974	0.070	9.525	0.029*** (0.010)
农业生产性服务水平(%)	3.899	1.943	0.940	11.470	−1.565** (0.770)
常数项					0.397* (0.235)
个体效应标准差	0.133*** (0.024)	干扰项标准差	0.140*** (0.006)	对数似然值	138.329
LR检验	104.170***	Wald检验	24.300***		

注：回归结果中*、**、***分别代表在10%、5%、1%水平上显著，括号内为估计系数的标准误差。

Note: In the regression results, *, ** and *** represent significant at the level of 10%, 5% and 1% respectively, and the number in brackets is standard error of the estimated coefficient.

2.3 回归结果分析

运用SBM-Tobit两阶段模型对其影响因素进行回归分析，从回归结果(表2)可以看出，政策因素中临时收储政策虚拟变量的估计系数显著为正，说明玉米临时收储政策对玉米生态效率有显著促进作用，玉米临时收储政策的实施对农户种植玉米的积极性起到极大的促进作用，使其经济收益得到明显改善，从而促进了玉米生态效率的提升。价补分离政策虚拟变量的估计系数虽然为正但并不显著，可能由于政策的实施具有滞后性，农户对其敏感度较弱，政策效果显现较慢。此外，人均收入水平对玉米生态效率产生负向影响，说明农户为了增加收入可能采取高投入高产出高污染的生产方式，获得经济收益的同时对生态环境也造成了相当严重的污染。地方环境规制对玉米生态效率呈正向影响，说明环境规制能够有效规范农户的生产行为，有利于生态保护，从而促进生态效率的提高。农业生产性服务对玉米生态效率产生抑制作用，虽然农业生产性服务为农户提供了生产的便利，但当前的农业服务组织多以营利性为目的，较注重玉米生产的技术效率

而忽视了生态效率,为了实现增产以致机械、农药、化肥等的过度使用,对生态环境造成了极大的破坏,反而抑制了生态效率的提高。城镇化水平对生态效率的影响不显著。

3　研究结论与启示

3.1　研究结论

本研究基于碳汇和产值双重视角,运用非角度、非径向的SBM-DEA模型测算了我国玉米生态效率并分析了其时空特征,同时对其影响因素进行分析,结果表明,我国玉米生态效率总体上呈"降—升—降"最后趋于平缓的演变趋势,总体水平不高且区域差异明显。黄淮海夏播玉米区表现最优,东北春播玉米区生态效率表现相对较好,西北灌溉玉米区、西南山地玉米区和南方丘陵玉米区三大区域表现相对较差。玉米生态效率的空间差异总体上呈缩小趋势,且分化程度逐渐降低并逐步向密度中心收敛,区域发展不协调状况得到改善。政策因素、受教育水平和地方环境规制对玉米生态效率具有正向影响,而人均收入水平、农业生产性服务水平具有负向影响。

3.2　启　示

总体上我国玉米生态效率正逐步改善,区域差异逐渐缩小,但距离玉米生产系统要素资源的最优配置还有一定的潜力,系统中存在投入和非期望产出的冗余。为此,进一步提高我国玉米生态效率提出如下建议。

完善政策强化引导,补齐短板长足发展。进一步完善玉米相关政策的科学性与合理性,政策重心向生态化发展倾斜,促进优势产区玉米生产低碳高效发展;此外,农户收入增长所附带的负面效应不可小觑,应加快推进新型绿色玉米生产技术的研发与应用,充分利用农户收入水平提高的优势,鼓励引导农户采纳绿色环保型玉米生产技术;同时,强化生态补偿政策与环保宣传教育,提高农业生产性服务人员及农户的生态保护意识,对其进行积极引导并施以适当的监管和约束,使其切实参与到生态保护中。

注重减投减排增效,生态生产协调发展。提高玉米生态效率的关键在于平衡投入、期望产出与非期望产出三者的关系,断不可一味地追求经济收益而盲目加大投入,亦不可片面地保护生态环境而阻碍经济发展。各地区应基于自身发展条件和资源禀赋,结合影响因素有针对性地制定符合自身发展的规划政策,保障经济收益的同时在机械、化肥、农药等投入方面减量施用,注重提高生产要素的使用效率,从而降低污染排放。

加强区域协作交流,合作共赢均衡发展。当前我国玉米生态发展存在区域失衡,应加强区域玉米生产技术联系,形成玉米生态效率较高地区与较低地区的良性互动,高效率区域应在优化自身资源配置的同时发挥示范效应,为低效率区域提供便利的学习渠道,低效率区域应密切关注高效率区域的相关政策、措施及技术并学以致用,从而促进玉米产业生态化区域共同发展。

参考文献:

[1] 王宝义,张卫国 . 中国农业生态效率测度及时空差异研究[J] . 中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19 .
Wang B Y, Zhang W G. A research of agricultural eco-efficiency measure in China and space-time differences[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6): 11-19. (in Chinese)

[2] 田　伟,杨璐嘉,姜　静 . 低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的SBM模型[J] . 中国农村观察,2014(5):59-71,95 .
Tian W, Yang L J, Jiang J. Agricultural eco-efficiency evaluation of low-carbon based on SBM model of undesired outputs[J]. China Rural Survey, 2014(5): 59-71, 95. (in Chinese)

[3] 郑　云,黄　杰 . 中国农业生态效率空间关联网络特征及其驱动因素研究[J] . 经济经纬,2021,38(6):32-41 .
Zheng Y, Huang J. A study on the characteristics and driving factors of spatial correlation network of agricultural ecological efficiency in China[J]. Economic Survey, 2021, 38(6): 32-41. (in Chinese)

[4] 李　波,王春妤,张俊飚 . 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J] . 中国人口·资源与环境,2019,29(12):68-76 .
Li B, Wang C S, Zhang J B. Dynamic evolution and spatial spillover of China's agricultural net carbon sink[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 68-76. (in Chinese)

[5] 田　云,尹忞昊 . 产业集聚对中国农业净碳效应的影响研究[J] . 华中农业大学学报(社会科学版),2021(3):107-117,188 .
Tian Y, Yin W H. Research on the impact of industrial agglomeration on China´s agricultural net carbon effect[J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition), 2021(3): 107-117, 188. (in Chinese)

[6] 田　云,张俊飚,罗小锋 . 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究[J] . 经济地理,2014,34(3):142-148 .
Tian Y, Zhang J B, Luo X F. Regional comparative analysis on the coordination degree between net carbon benefit and economic benefit of plant industry in China[J]. Economic Geography, 2014, 34(3): 142-148. (in Chinese)

[7] 徐维祥,郑金辉,李　露,等 . 中国农业生态效率的空间关联及其影响因素分解[J] . 统计与决策,2021,37(15):62-65 .
Xu W X, Zheng J H, Li L, et al. Spatial correlation and decomposition of influencing factors of agricultural eco-efficiency in China[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(15): 62-65. (in Chinese)

[8] 鲁庆尧,张旭青,孟祥海 . 我国粮食种植生态效率的空间相关性及影响因素研究[J] . 经济问题,2021(8):82-88,94 .
Lu Q Y, Zhang X Q, Meng X H. Empirical analysis of the influence

spatial correlation and influencing factors of ecological efficiency of grain planting in China[J]. On Economic Problems, 2021(8): 82-88, 94. (in Chinese)

[9] 王宝义,张卫国 . 中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于1996~2015年31个省份的面板数据分析[J] . 中国农村经济,2018(1):46-62 .
Wang B Y, Zhang W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996-2015[J]. Chinese Rural Economy, 2018(1): 46-62. (in Chinese)

[10] 侯孟阳,邓元杰,姚顺波 . 农村劳动力转移、化肥施用强度与农业生态效率:交互影响与空间溢出[J] . 农业技术经济,2021(10):79-94 .
Hou M Y, Deng Y J, Yao S B. Rural labor transfer, fertilizer use intensity and agro-ecological efficiency: interaction effects and spatial spillover[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(10): 79-94. (in Chinese)

[11] 王圣云,林玉娟 . 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素——水足迹与灰水足迹视角[J] . 地理科学,2021,41(2):290-301 .
Wang S Y, Lin Y J. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(2): 290-301. (in Chinese)

[12] 陈中督,徐春春,纪 龙,等 . 2004—2014年南方稻区双季稻生产碳足迹动态及其构成[J] . 应用生态学报,2018,29(11):3669-3676 .
Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Dynamic of carbon footprint and its composition for double rice production in Southern China during 2004-2014[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3669-3676. (in Chinese)

[13] 宋海风,刘应宗 . 粮食主产区小麦生态效率及降污潜力研究——基于藏粮于田的视角[J] . 干旱区资源与环境,2017,31(7):97-101 .
Song H F, Liu Y Z. Wheat ecological efficiency and pollution reducing potential of major grain production areas[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(7): 97-101. (in Chinese)

[14] 葛鹏飞,王颂吉,黄秀路 . 中国农业绿色全要素生产率测算[J] . 中国人口·资源与环境,2018,28(5):66-74 .
Ge P F, Wang S J, Huang X L. Measurement for China's agricultural green TFP[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(5): 66-74. (in Chinese)

[15] 陈明华,岳海珺,郝云飞,等 . 黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J] . 数量经济技术经济研究,2021,38(9):25-44 .
Chen M H, Yue H J, Hao Y F, et al. The spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(9): 25-44. (in Chinese)

[16] 旷爱萍,胡 超,韩丹丹 . 碳排放约束下中国玉米全要素生产率测度及其时空分异——基于全国20个玉米主产区的实证[J] . 地域研究与开发,2021,40(3):115-120 .
Kuang A P, Hu C, Han D D. China's corn total factor productivity measurement and its temporal and spatial differentiation under carbon emission constraints: based on the empirical evidence of the China's 20 main producing areas[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(3): 115-120. (in Chinese)

[17] 吴 园,李 波,郝艳睿 . 基于随机前沿模型的中国玉米种植业技术效率实证研究[J] . 玉米科学,2019,27(4):181-188 .
Wu Y, Li B, Hao Y R. Study on technical efficiency of corn planting industry in China based on stochastic frontier model[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(4): 181-188. (in Chinese)

[18] 周书灵,张英彦 . 玉米生产效率的微观测度及对比分析——基于玉米主产区868个地块的调研[J] . 玉米科学,2018,26(6):165-169 .
Zhou S L, Zhang Y Y. Micro measurement and comparative analysis of maize production efficiency——Based on the investigation of 868 plots in the main maize producing areas[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(6): 165-169. (in Chinese)

[19] 吴昊玥,何 宇,黄瀚蛟,等 . 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J] . 中国人口·资源与环境,2021,31(6):113-123 .
Wu H Y, He Y, Huang H J, et al. Estimation and spatial convergence of carbon compensating rate of planting industry in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(6): 113-123. (in Chinese)

[20] 杨 果,陈 瑶 . 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J] . 中国人口·资源与环境,2016,26(12):171-176 .
Yang G, Chen Y. China's agriculture carbon sink estimation and its coupling analysis with agricultural economy development[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 171-176. (in Chinese)

[21] 李 波,张俊飚,李海鹏 . 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J] . 中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86 .
Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86. (in Chinese)

[22] 展进涛,徐钰娇,葛继红 . 考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化[J] . 资源科学,2019,41(5):884-896 .
Zhan J T, Xu Y J, Ge J H. Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 884-896. (in Chinese)

[23] 陈中督,徐春春,纪 龙,等 . 2004—2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J] . 中国生态农业学报),2019,27(7):1105-1114 .
Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004-2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1105-1114. (in Chinese)

[24] Xue J F, Pu C, Liu S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China[J]. Ecological Indicators, 2016, 64.

[25] 蔡 荣,汪紫钰 . 中国玉米生产的环境效率及其时空分异——兼论玉米临时收储政策的环境影响[J] . 农林经济管理学报,2019,18(5):569-578 .

Cai R, Wang Z Y. Environmental efficiency and its spatiotemporal differentiation on China's corn production: environment impact of temporary storage system of the corn[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2019, 18(5): 569-578. (in Chinese)

[26] 张清学,李佳辰,周慧秋.农户玉米生产技术效率及影响因素研究——基于黑龙江省农村固定观察点数据[J].玉米科学,2021,29(5):178-183,190.

Zhang Q X, Li J C, Zhou H Q. Research on technical efficiency and influencing factors of farmers' corn production——Based on data from fixed observation points in rural areas of Heilongjiang province [J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 178-183, 190. (in Chinese)

[27] 张金鑫,王红玲.境规制、农业技术创新与农业碳排放[J].湖北大学学报(哲学社会科学版),2020,47(4):147-156.

Zhang J X, Wang H L. Environmental regulation, agricultural technological innovation and agricultural carbon emission[J]. Journal of Hubei University(Philosophy and Social Science), 2020, 47(4): 147-156. (in Chinese)

[28] 高维龙.农业服务化对粮食产业高质量发展的影响效应及作用机制[J].广东财经大学学报,2021,36(3):61-76.

Gao W L. The effect and its mechanism of agricultural sericitization on high-quality development of grain industry[J]. Journal of Guangdong University of Finance & Economics, 2021, 36(3): 61-76. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)