

碳中和目标下中国农地利用效率的影响因素及时空异质性

刘雪琪¹, 李 波^{2*}

(1. 中南财经政法大学 工商管理学院, 湖北 武汉 430073;

2. 中南民族大学 经济学院/湖北全面小康建设研究院, 湖北 武汉 430074)



摘 要 从碳中和视角出发, 考虑农地利用所产生的二氧化碳“固”与“排”的平衡, 运用 Super-SBM 模型测算 2005—2019 年 31 个省(区、市)的农地利用效率, 并分析其时空特征及动态演进趋势, 利用时空地理加权回归模型(GTWR 模型)探讨各影响因素作用机理的时空异质性和演变规律。结果表明: (1) 中国农地利用效率上升至相对有效水平, 其中西南地区最高但呈逐年下降趋势, 华北地区和西北地区陷入“内卷化”陷阱, 各地区农地利用效率的差异呈“扩大-缩小-扩大”的变化趋势; (2) 相较 OLS 和 GWR 模型, GTWR 模型解释力和拟合效果更好, 种植结构对农地利用效率影响最大且为正向影响; (3) 各影响因素对农地利用效率的影响程度和方向呈时空异质性; (4) 各因素对农地利用效率的影响在东西方向的变化趋势大于南北方向, 城镇化的影响在东西方向上最敏感, 复种指数的影响在南北方向上最敏感。

关键词 土地利用; 农地利用效率; Super-SBM 模型; 时空异质性; GTWR 模型

中图分类号: F301.24 **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-3456(2023)01-0197-13

DOI 编码: 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2023.01.018

随着 CO₂ 排放的日益严重, 通过尽快实现碳中和应对全球气候变暖已经成为国际社会的共识, 截至 2021 年 5 月, 已有 131 个国家确立了碳中和目标。2020 年 9 月, 在第 75 届联合国大会一般性辩论上习近平总书记承诺, 中国力争在 2030 年前和 2060 年前分别实现碳达峰和碳中和的目标。2021 年 10 月, 中共中央、国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》, 针对陆地生态系统碳汇潜力, 提出了“提升生态农业碳汇”“强化国土空间规划和用途管控”等一系列碳中和措施。农地(即农用地)主要包括耕地、园地、林地和草地, 是最基本的农业生产投入要素, 也是陆地生态系统的重要组成部分, 对碳中和的实现发挥着重要的作用。如何在保障粮食安全的同时, 兼顾经济、社会和生态效益, 充分发挥农地碳中和贡献, 使农地利用效率达到最大化, 已成为重要的研究课题。

农地利用效率作为在一定社会、经济、生态产出和资源环境代价约束下, 衡量农地利用程度的综合性指标。现有对农地利用效率的研究聚焦于以下 3 个方面: (1) 测算方法。测算方法主要分为单要素生产率法和全要素生产率法, 单要素生产率法是总产出与某一种投入要素之比^[1]; 全要素生产率法是在多投入多产出情况下, 一定时期内某行业的产出与人力、资本、土地等投入要素成本的比值^[2]。通过对比两种方法发现, 全要素生产率法更能体现人力、资本等要素之间的替代性^[3]。虽然单要素生产率法和全要素生产率法在结果排序上具有较强一致性, 但是单要素生产率法更容易高估农地利用

收稿日期: 2022-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“巴黎协定下中国农业碳排放权省域分配及协同减排策略研究”(71903197); 教育部哲学社会科学
研究重大课题攻关项目“西部地区巩固拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴战略衔接机制研究”(21JZD028)。

*为通讯作者。

效率^[4]。因此越来越多学者运用全要素生产率法,其中两大衡量全要素生产率的方法:随机前沿分析(SFA)^[5]和数据包络分析(DEA)^[6]。相较于SFA,DEA可以避免人为主观性,不会出现函数设定问题而产生的误差,更能体现地区差异性,故逐渐成为主流研究方法^[7-8]。随着研究的推进,很多学者采用传统DEA改进后的模型,如Hybrid模型^[9]、三阶段DEA模型^[10]、SBM-Undesirable模型^[11]。(2)指标体系。现有研究基于不同研究范畴构建了不同的农地利用投入产出指标体系,大部分学者基于古典经济学,将土地、资本和劳动力视为最基本的投入要素,将粮食产量和农业产值视为期望产出要素^[12-13]。越来越多学者将碳排放纳入投入产出指标体系中,一部分学者从隐含投入要素的角度考虑,将碳排放视为同劳动、资本一样的有价格、可交换的商品,是生产过程中所“需要投入”的碳排放量^[14];另一部分学者从生产过程的环境损失角度考虑,认为在期望产出保持不变的情况下,现实生产过程中产生的污染物与其他投入要素无法实现同比例下降,故将碳排放作为非期望产出,更加真实反映现实农业生产情况^[15]。目前学界对于碳排放在全要素分析框架的定位尚未形成统一的界定,并且鲜有研究考虑到农地利用的碳汇效应和生态服务价值等生态效益,忽视了农地的碳中和贡献。(3)影响因素。现有研究从自然资源禀赋(受灾程度^[16]、地形^[17]),农村劳动力现状(非农就业^[4]、劳动力转移^[18]、劳动力年龄^[19]),农业生产条件(细碎化程度^[20]、经营规模^[21]、机械化水平^[22]),社会经济发展水平(农民收入水平^[11]、城镇化^[23]),心理学(农民土地价值观^[24]、种植偏好^[25])等方面出发,探讨了各因素对农地利用效率的影响。由于各地区资源禀赋和经济社会发展阶段不同,各地区农地利用效率的影响因素的作用程度也存在一定差异,现有研究未能对区域间各因素影响的时空异质性和非均衡性进行深入研究。

综上,本文基于2005—2019年31个省份(不包括港、澳、台地区^①)的面板数据,全面考察农地利用经济、社会、生态效益和生态负效应,纳入农地利用碳排放、农地利用碳汇和生态服务价值等综合反映农地碳中和贡献的指标,构建基于碳中和视角的农地利用效率指标体系;运用包含非期望产出的Super-SBM模型测算农地利用效率,并剖析其时空特征和动态演进趋势;采用GTWR模型从局部角度揭示各因素影响的时空异质性。

一、碳中和目标下农地利用效率内涵和指标构建

1. 碳中和目标下农地利用效率的内涵

碳中和指在一段时间内释放出来的CO₂排放量,通过植树造林、退耕还林等一系列节能减排措施补偿和抵消CO₂排放量,使得净碳排放量降至为零。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)于2018年发布的《全球升温1.5℃特别报告》指出如果全球升温控制在1.5℃,可能在21世纪下半叶实现碳中和,其中农林业和其他土地利用(AFOLU)活动是导致气候变化的主要原因之一,也是重要的碳汇来源^[26]。农地利用碳效应分为碳排放效应和碳汇效应。一方面农地生产活动引发碳排放效应,在生产和施用如化肥、农药、农膜等农资的过程中会产生碳排放,农用机械使用和灌溉过程中消耗化石燃料会产生碳排放,同时翻耕也将改变土壤有机碳储量,释放出CO₂;另一方面,农地具有农林业生产、固碳释氧和提供生态服务等多功能性,植被覆盖类型是影响土壤有机碳储量的主要因素,其中园地、草地和林地具有巨大碳汇效应。2019年IPCC发布的《气候变化和土地特别报告》进一步指出AFOLU在2007—2016年间产生的碳汇量高于碳排放量,碳汇量可抵消总净人为碳排放的29%^[27]。由此可见,农地作为碳中和的重要载体,有效促进农地利用的碳排放效应最小化和碳汇效应最大化是实现碳中和目标的主要途径。

从投入角度来看,由于不同的农地利用方式和强度将导致碳排放效应和碳汇效应的差异化^[28-29],基于农业外部效应理论和可持续发展理论,过度使用化肥、农药等农资不仅释放出大量CO₂而且严重

① 由于港、澳、台地区数据严重缺失,故未列入样本考察对象。

破坏农地生态环境,进一步削弱农地生产效率,严重阻碍农业的绿色可持续发展;其次,单纯依靠生态用地数量增长难以实现碳中和目标^[30],而提高农地利用效率可减少土地转化需求,并释放出一部分土地,保障粮食安全的同时,有助于土地恢复和提升土壤固碳能力^[27];最后,由边际效益递减原理可知,农地利用过程中当资源要素投入达到最优状态后,再继续增加投入将会带来农地边际产出的减少,因此必须合理配置农地资源要素投入比例。从产出角度来看,碳中和是系统性经济社会变革,不仅涵盖环境目标而且还包含发展目标,基于协同发展理论,需综合考量粮食安全、社会稳定、生态服务和固碳释氧等目标,有效权衡协调农地利用的经济、社会和生态效益^[31];其次,在农地利用过程中不仅会产生期望产出,而且会带来一定的非期望产出即农地利用活动所带来的生态负效应,因此加入农地利用碳排放作为非期望产出,能更加真实反映现实农地利用情况。

综上所述,农地利用效率作为农地生产要素投入系统和产出系统的综合性指标,能有效反映资源要素投入和非期望产出最小化,期望产出最大化的实现程度。碳中和目标的确立对农地绿色低碳利用提出了新要求,因此本文将基于碳中和目标下的农地利用效率定义为在一定农业技术水平下实现经济社会效益和生态效益最大化,资源投入和生态负效应最小化,农地减排增汇效益最大化的农地绿色低碳利用程度(图1)。提高农地利用效率有助于降低单位产出农地利用碳排放强度,是基于陆地生态系统自身碳吸收能力实现碳中和最切实可行的途径。

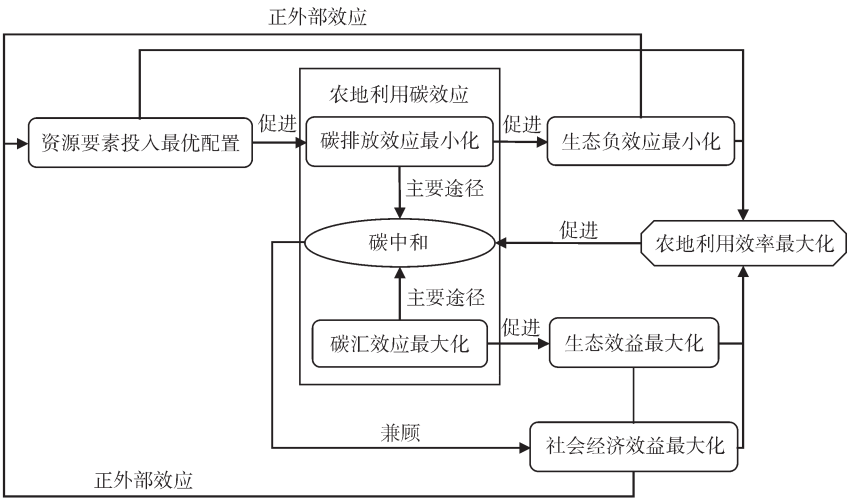


图1 碳中和目标下农地利用效率的内涵机制

2.碳中和目标下农地利用效率的指标构建

基于碳中和目标下农地利用效率的内涵,参考现有研究成果,综合考虑农地生产活动的实际情况,构建碳中和目标下农地利用效率的指标体系,见表1。

(1)投入方面,根据C—D生产函数和古典经济学理论,并基于农地利用的实际投入,从土地、人力、资本、机械动力和水资源投入5个角度分别选择农用地面积、第一产业从业人员、农业资本存量、农业机械总动力、农业用水总量作为投入变量。

(2)产出方面,从碳中和视角,基于农地利用碳排放和碳汇两大效应,将农地利用碳排放和碳汇分别作为非期望产出和期望产出,根据不同的植被覆盖类型对有机碳储量产生的不同影响,衡量农地利用活动产生CO₂的“固”与“排”的收支情况,体现农地的碳中和贡献;将农地生态系统服务价值(包括气体和气候调节、土壤保持等)作为科学评价农地利用效率的指标^[32],能一定程度反映各地区农地的碳中和贡献和生态效益;综合考虑农地利用活动所带来的经济社会效益,将农业总产值和粮食产量作为经济社会维度的期望产出。

表1 农地投入产出指标

指标	变量	单位	统计口径
投入	农用地面积	千公顷	按照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),主要包括耕地、园地、林地和草地。
	第一产业从业人员	万人	历年各省(区、市)第一产业从业人员。
	农业资本存量	亿元	参考吴方卫 ^[33] 和单豪杰 ^[34] ,利用永续盘存法计算得出,公式为 $K_t=K_{t-1}(1-\delta)+I_t$,其中 K_t 为 t 时期的农业资本存量,为 K_{t-1} 上一期农业资本存量, δ 为资本折旧率, I_t 为 t 期农业投资。
	农业机械总动力	万千瓦	历年各省(区、市)农业机械总动力。
	农业用水总量	亿立方米	历年各省(区、市)农业用水总量。
	农业(狭义)总产值	亿元	以2005年为基准年,地方农业(狭义)总产值(可比价)。
期望产出	粮食产量	万吨	历年各省(区、市)粮食总产量。
	生态系统服务价值	亿元	按谢高地等 ^[35] 改进方法,通过公式 $ESV=\sum A_k\times VC_k$,求耕地(水田和旱地)、林地(有林地和灌木林)、园地、草地的生态系统服务价值总和,其中 ESV 为农地生态系统服务价值总量, A_k 为各农地类型的面积, VC_k 为各农地类型的单位面积生态服务价值。
	农地利用碳汇	万吨	参考方精云等 ^[36] 碳汇系数,通过公式 $CS=\sum A_j\times\omega_j$,测算园地、草地和林地碳汇量总和,其中 CS 为农地利用碳汇总量, A_j 为各农地类型的面积, ω_j 为各农地类型碳汇系数。
非期望产出	农地利用碳排放	万吨	参考李波等 ^[37] 碳排放系数,通过公式 $E=\sum T_i\times\delta_i$,测算农药、化肥、农业机械、农膜、翻耕和灌溉产生的碳排放量总和,其中 E 为农地利用碳排放总量, T_i 为各类碳源的消耗量, δ_i 为各类碳源碳排放系数。

二、研究方法与数据来源

1. 非期望产出的 Super-SBM 模型

2003年,Tone创新提出基于松弛改进的非径向非角度SBM模型,并将非期望产出纳入其中。此模型考虑了松弛变量,并解决了径向和角度选择所带来的误差,克服了传统DEA模型缺陷^[38]。SBM模型可能会产生多个决策单元共同有效,有效决策单元的效率值无法进一步区分和排序。为解决SBM模型在此方面的缺陷,Tone进一步提出Super-SBM模型,此时效率值可以大于1,能对有效的决策单元进行区分^[39]。公式如下:

$$\rho^* = \text{Min} \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{\bar{y}_r^k}{y_{r0}^k} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \tag{1}$$
$$s.t. \ x_0 = X\theta + S^-, y_0^k = Y^k\theta - S^k, y_0^b = Y^b\theta + S^b$$
$$\bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \theta_j x_j, \bar{y}^k \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \theta_j y_j^k, \bar{y}^b \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \theta_j y_j^b$$
$$\bar{x} \geq x_0, \bar{y}^k \leq y_0^k, \bar{y}^b \geq y_0^b$$
$$\sum_{j=1, \neq 0}^n \theta_j = 1, \bar{y}^k \geq 0, \theta \geq 0, S^- \geq 0, S^k \geq 0, S^b \geq 0$$

ρ^* 为目标效率值且可大于1,当 $\rho^*\geq 1$ 时,被评价决策单元相对有效,当 $\rho^*<1$ 时,则相对无效。 x 代表投入,与 x 相对应的 m 表示投入指标数量。 y 代表产出, y^k 为期望产出, y^b 为非期望产出, s_1 和 s_2 分别表示期望和非期望产出的指标数量。 θ 为权重向量, S^- 为投入松弛量, S^k 和 S^b 分别表示期望产出和非期望产出的松弛量。

2. Kernel密度估计模型

此模型是一种非参数方法,用于估算概率密度函数。通过叠加 Kernel 密度函数的作用效果,利用平滑的峰值函数拟合观察样本,避免了由模型设定而造成的误差^[40],公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left[\frac{X_i - x}{h}\right] \quad (2)$$

$K[\cdot]$ 表示核函数, X_i 表示独立同分布观测值, N 表示观测对象的数量(即为31个省(区、市)), x 为均值; h 是带宽且选择满足公式(3),表示 Kernel 密度曲线的平滑度。 h 数值越小,Kernel 密度曲线的波峰越狭窄,反之则 Kernel 密度曲线的波峰越扁平。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} h(N) = 0; \lim_{N \rightarrow \infty} Nh(H) = N \rightarrow \infty \quad (3)$$

为更好地剖析中国农地利用效率的动态演变趋势,运用 Gaussian 核函数模型如下:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] \quad (4)$$

3. 时空地理加权回归模型(GTWR)

Huang 等将时间特性纳入传统地理加权回归模型(GWR)中,提出了 GTWR 模型,此模型有效解决时间和空间非平稳性问题,构建起三维时空坐标系^[41],公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{l=1}^k \beta_l(u_i, v_i, t_i) X_{il} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式(5)中, X_{il} 是解释变量, Y_i 是被解释变量, l 表示第 l 个解释变量, i 表示第 i 个样本省份, n 为省份总数, k 为解释变量个数; ε_i 为随机扰动项; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 是时空截距项,其中 u, v 为样本省份坐标, t 为时间, $\beta_l(u_i, v_i, t_i)$ 为在 i 省份 t 时间第 l 个解释变量的估计系数。

利用欧式距离和高斯核函数构建空间权重矩阵,并将时间间距距离因素纳入核函数中,构建时空权重矩阵,公式如下:

$$d_{ij}^{ST} = \sqrt{\gamma[(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2} \quad (6)$$

$$w_{ij}^{ST} = \exp\left\{-\left[\frac{\gamma[(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2}{b_{ST}^2}\right]\right\} \quad (7)$$

式(6)、(7)中, γ, μ 为比例因子,用来测量时间和空间距离不同影响, i, j 为不同样本省份, b_{ST} 为时空权重函数带宽。

4. 数据来源与指标描述性统计

(1)农地利用效率测算指标。农地数据均来自《中国国土资源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、第二次和第三次国土调查、各省统计年鉴;其余指标数据来源于《中国统计年鉴》《固定资产投资统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》。采用最优移动平均法对部分缺失数据进行补齐。

(2)农地利用效率影响因素指标。在遵循数据可获得性、科学性、可靠性的原则下,总结已有研究成果^[42-43],从农业经济发展水平、城镇化水平、农地利用程度、劳动力文化水平、农地利用情况、受灾程度、财政支农政策等方面探索各因素对农地利用效率影响的时空异质性。数据均出自《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》、各省统计年鉴和国家统计局。各指标说明与描述性统计分析见表2。

三、实证结果分析

1. 农地利用效率特征分析

基于规模报酬不变的假设,采用非径向非角度 Super-SBM 模型,测算 2005—2019 年 31 个省(区、

表 2 农地利用效率影响因素指标说明与描述性统计

影响因素	单位	指标说明	最小值	最大值	均值	标准差
农业经济发展水平(PGDP)	万元/人	农林牧渔业总产值与农村人口之比	0.210	4.388	1.337	0.756
城镇化(UR)	%	城镇人口与常住人口之比	0.207	0.896	0.527	0.146
复种指数(MCI)	%	农作物播种面积与耕地面积之比	0.531	2.291	1.267	0.389
农村受教育程度(EDU)	年	农村劳动力平均受教育年限	3.240	9.801	7.434	0.883
种植结构(PS)	%	粮食作物播种面积与农作物播种面积之比	0.328	0.971	0.653	0.127
农作物受灾程度(DL)	%	农作物受灾面积与农作物播种面积之比	0.000	0.936	0.212	0.151
财政支农水平(FSA)	%	财政支农支出与农林牧渔业总产值之比	0.019	2.091	0.212	0.279

市)和7大区域的农地利用效率值(表3)。将各省(区、市)农地利用效率分为相对无效水平(效率值<1)和相对有效水平(即高效率,效率值≥1)。

表 3 2005—2019 年 31 个省(区、市)农地利用效率

地区	2005	2010	2015	2019	均值	地区	2005	2010	2015	2019	均值
北京	1.100	1.090	1.110	1.075	1.097	海南	1.015	1.020	1.033	1.041	1.022
天津	0.514	1.011	1.025	1.073	0.834	重庆	1.159	1.222	1.142	1.096	1.165
河北	0.628	0.651	0.682	0.559	0.672	四川	1.076	1.059	1.057	1.037	1.062
山西	0.661	0.679	0.675	0.775	0.703	贵州	1.133	1.119	1.127	1.153	1.118
内蒙古	0.820	1.004	1.005	0.881	0.941	云南	1.072	1.064	1.067	1.082	1.068
辽宁	0.871	0.766	0.943	1.026	0.869	西藏	1.754	1.641	1.544	1.539	1.626
吉林	1.168	1.124	1.141	1.122	1.145	陕西	1.034	1.041	1.045	1.021	1.039
黑龙江	1.066	1.107	1.115	1.179	1.104	甘肃	0.621	0.632	0.652	0.716	0.650
上海	1.154	1.190	1.145	1.431	1.182	青海	0.590	0.605	0.622	0.624	0.616
江苏	1.180	1.185	1.204	1.188	1.189	宁夏	0.399	0.453	0.449	0.387	0.438
浙江	1.001	1.006	1.017	1.035	1.013	新疆	1.003	0.661	1.013	1.036	0.793
安徽	1.029	1.026	1.032	1.052	1.032	全国	0.970	0.978	0.996	1.003	0.980
福建	1.048	1.052	1.062	1.062	1.059	华北地区	0.744	0.887	0.899	0.873	0.849
江西	1.019	1.021	1.034	1.026	1.027	华东地区	1.083	1.086	1.086	1.149	1.090
山东	1.049	1.024	1.033	1.036	1.032	东北地区	1.035	0.999	1.066	1.109	1.039
河南	1.104	1.118	1.120	1.127	1.116	华中地区	1.007	0.996	1.006	0.997	1.006
湖北	0.875	0.815	0.850	0.827	0.856	华南地区	0.987	0.994	1.001	0.997	0.995
湖南	1.030	1.030	1.020	1.007	1.026	西南地区	1.239	1.221	1.187	1.181	1.208
广东	1.114	1.113	1.114	1.110	1.114	西北地区	0.729	0.678	0.756	0.757	0.707
广西	0.773	0.792	0.794	0.773	0.786	——	——	——	——	——	——

注:由于篇幅限制,仅列出4年数据。

(1)时空特征。如表3所示,在2005—2019年间,全国农地利用效率从0.970波动上升至1.003,达到相对有效水平,农地利用高效率省份数量从2005年的21个上升到2019年的23个。区域分布上,各地区的农地利用效率存在一定程度分异,7大区域^①农地利用效率均值排名:西南地区>华东地区>东北地区>华中地区>华南地区>华北地区>西北地区。西南地区农地利用效率最高但大致呈现下降态势,由此可以看出,西南地区林地、草地资源丰富,提高陆地生态系统碳储量的同时,为林

① 东北地区包括辽宁、吉林和黑龙江;华北地区包括北京、天津、河北、内蒙古和山西;西北地区包括陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆;华东地区包括上海、江苏、浙江、山东和安徽;华中地区包括河南、湖北、湖南和江西;华南地区包括广东、广西、海南和福建;西南地区包括重庆、四川、贵州、云南和西藏。

业和畜牧业发展提供基本生产资料,但对于林地和草地的利用方式还需进一步优化调整。华北地区和西北地区农地利用效率低于全国均值,虽有小幅波动,但始终无法突破农地利用效率“内卷化”陷阱^①,可能是因为华北地区和西北地区土壤盐渍化、荒漠化严重,导致土地碳储存和农业生产能力下降,加上粗放式的种植方式,进一步加剧土地退化风险,形成了恶性循环。

(2)动态演进特征。进一步运用 Kernel 密度估计模型,绘制 Kernel 密度估计分布图并分析农地利用效率动态演进趋势。由图 2 可知,曲线波峰从“一主一小”逐步变成“一主两小”,主峰位于效率值有效一侧,左侧小峰显著右移,右侧小峰逐渐凸显,说明在此期间中国农地利用效率逐步向三极化态势发展。分阶段来看,2005—2010 年,主峰值微弱下降,密度函数中心有向右移的趋势,左侧小峰抬升,表明在此期间各省(区、市)农地利用效率差距呈现微弱扩大;2010—2015 年,主峰由宽峰变为尖峰,两侧小峰变得陡峭,分布曲线右尾明显向左移动,变化区间进一步收缩,说明此期间各省(区、市)农地利用效率差距大幅缩小;2015—2019 年,主波峰显著下降,左侧小峰变得平坦,右侧小峰进一步抬升,表明此期间各省(区、市)农地利用效率差距有所扩大。总体来看,农地利用效率的地区差异呈现“扩大—缩小—扩大”的变化趋势。

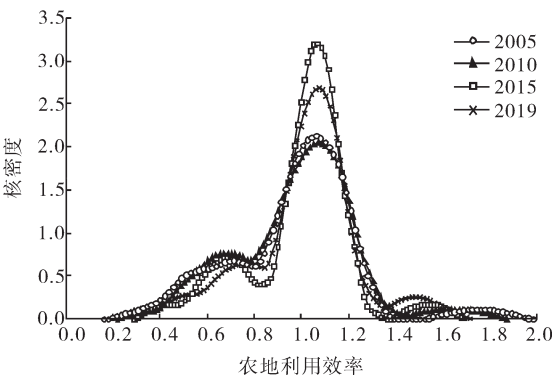


图 2 中国农地利用效率的动态演进

2. 农地利用效率影响因素时空异质性分析

(1)相关检验及模型选取。由于局部变量之间可能具有相关性或者不同局部点分析采用相同邻近点形成的变量之间具有相关性,导致构建 GTWR 模型时可能会出现多重共线性,因此采用方差膨胀因子(VIF)对影响因素指标进行检验。检验结果如表 4 所示,VIF 均小于 10,指标间不存在多重共线性,单个变量之间的贡献估计准确,可以构建 GTWR 模型。

表 4 多重共线性检验

	PGDP	UR	MCI	EDU	PS	DL	FSA	均值
VIF	1.53	2.41	1.72	2.46	1.27	1.36	1.52	1.75

最小二乘法(OLS)结果显示各回归系数均在 10% 的显著水平上显著且通过了 F 检验,模型解释力度达到 35.9%,有进一步提升空间。在此基础上,与纳入空间特性的 GWR 模型和纳入时空特性的 GTWR 模型估计结果进行对比。如表 5 和表 6 所示,AIC_c 值和残差平方和(RSS)从高到低排序均为 OLS>GWR>GTWR,拟合优度 R² 和调整后 R² 从小到大排序均为 OLS<GWR<GTWR。相较 OLS 和 GWR 模型,纳入时空特性的 GTWR 模型解释力度显著提升到 89.7%,并且 AIC_c 值和 RSS 最小,对观察数据拟合效果进一步优化。因此,选择综合考虑时间和空间非平稳性的 GTWR 模型进行时空异质性分析。

从平均影响程度^②来看,比较三种模型的回归结果,各影响因素的作用方向一致。其中种植结构对农地利用效率呈促进作用,且影响程度最大,这是因为相较于经济作物,粮食作物对农药、农膜等农资消耗较少^[44],更容易形成规模效应,并且在保障粮食安全的同时,有效缓解农地资源开发压力,降低农地碳排放强度。农业经济发展水平、城镇化、复种指数和财政支农水平对农地利用效率呈现弱正向影响,农村受教育程度和农作物受灾程度对农地利用效率呈现弱负向影响。

(2)各因素影响程度的时空分异。运用 ArcGIS 10.6.1 软件,得到 2005—2019 年 31 个省(区、市)各影响因素的回归系数。为分析各因素的影响程度及时空演变趋势,将各因素影响程度分成 6 类:较

① 农地利用效率发展到某一阶段停滞不前,始终处于相对无效状态,无法达到相对有效状态。
② 由于中位数结果不受数据极端值影响,通过分析比较中位数能更真实反映平均影响程度。

表 5 OLS 模型和 GWR 模型估计结果

变量	GWR						OLS
	最小值	上四分位数	中位数	下四分位数	最大值	标准差	
<i>PGDP</i>	-0.119	-0.009	0.024	0.084	0.494	0.123	0.057***
<i>UR</i>	-3.674	-0.203	0.380	0.562	1.186	1.317	0.176*
<i>MCI</i>	-0.118	0.120	0.212	0.337	0.558	0.157	0.258***
<i>EDU</i>	-0.242	-0.127	-0.080	-0.032	0.164	0.082	-0.128***
<i>PS</i>	-0.764	0.349	0.550	0.761	2.356	0.530	0.583***
<i>DL</i>	-0.684	-0.320	-0.074	0.017	0.175	0.225	-0.319***
<i>FSA</i>	-0.724	0.054	0.192	0.378	0.631	0.280	0.249***
常数项	-0.415	0.357	0.654	1.018	3.653	0.700	1.069***
<i>Bandwidth</i>			0.115				—
<i>AICc</i>			-798.803				-217.924
R^2			0.873				0.359
调整后 R^2			0.870				0.349
<i>RSS</i>			2.954				14.823

注:***和*分别表示在 1% 和 10% 显著水平上显著。

表 6 GTWR 模型估计结果

变量	GTWR					
	最小值	上四分位数	中位数	下四分位数	最大值	标准差
<i>PGDP</i>	-0.145	-0.011	0.029	0.085	0.635	0.126
<i>UR</i>	-6.008	-0.136	0.365	0.576	1.422	1.386
<i>MCI</i>	-0.135	0.119	0.217	0.354	0.857	0.185
<i>EDU</i>	-0.324	-0.120	-0.085	-0.030	0.180	0.088
<i>PS</i>	-1.051	0.307	0.557	0.948	2.388	0.530
<i>DL</i>	-0.751	-0.295	-0.091	0.013	0.310	0.230
<i>FSA</i>	-1.488	0.046	0.186	0.414	2.265	0.340
常数项	-0.935	0.392	0.704	0.985	3.660	0.721
<i>Bandwidth</i>			0.115			
<i>AICc</i>			-823.380			
R^2			0.897			
调整后 R^2			0.895			
<i>RSS</i>			2.389			

强正向影响(1, +∞)、中度正向影响(0.5, 1]、较弱正向影响(0, 0.5]、较弱负向影响[-0.5, 0)、中度负向影响[-1, -0.5)、较强负向影响(-∞, -1),并绘制图 3。

①农业经济发展水平。在研究期间,中度正向和较弱正向影响的省份数量逐步减少。空间格局上,农业经济发展水平的较弱负向影响主要位于中部地区和东北地区,西部地区农业经济发展水平的中度正向影响逐渐削弱。这可能是因为农业经济发展与碳排放之间呈现环境库兹涅倒“U”型曲线(EKC)关系,中部地区和东北地区位于EKC曲线拐点值右侧附近^[45],碳排放水平仍然处于较高水平,碳汇水平和生态服务功能也弱于西部地区,侧面反映出中部地区和东北地区农业经济发展正处于绿色低碳高质量发展的转型关键期。而西部地区位于EKC曲线的快速上升阶段^[45],碳排放尚未达到峰值,并且农业经济发展水平相对较低,自身碳汇资源丰富,仍存在一定排放空间,但西部地区农业经济发展水平对农地利用效率的正向影响已经进入“边际效益递减”阶段。

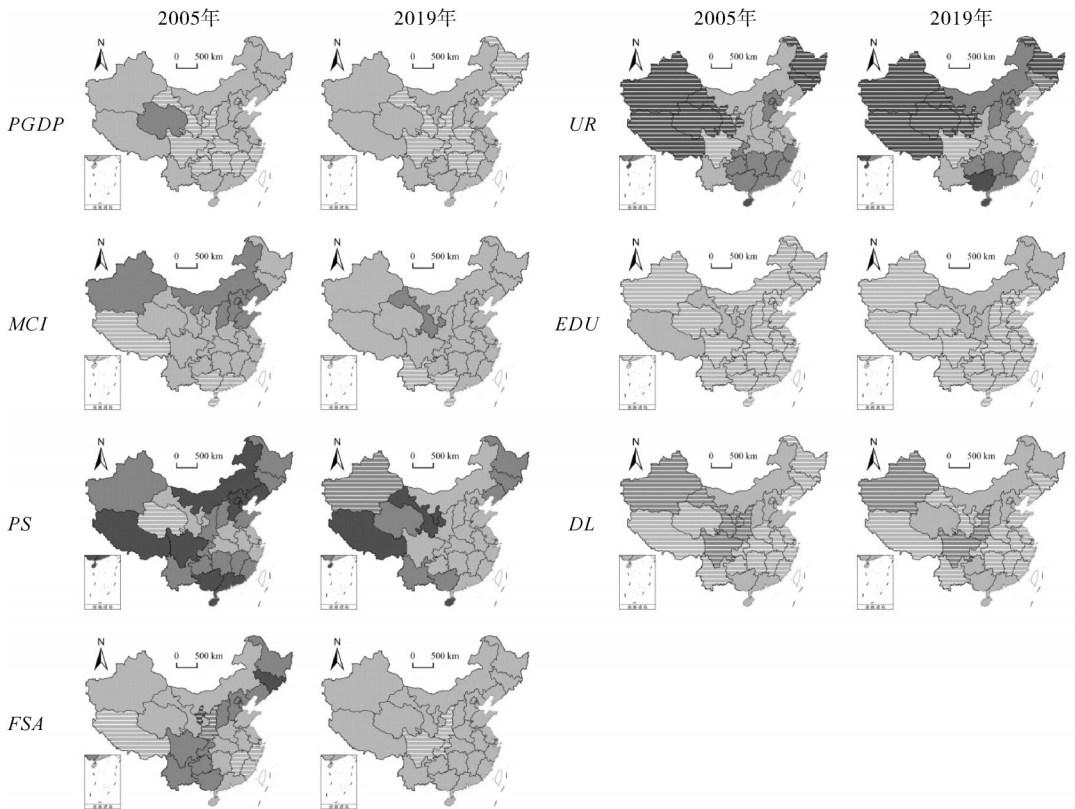
②城镇化。在研究期间,城镇化影响程度的标准差远大于其他因素,并且通过观察发现城镇化的正向影响逐步增强,负向影响呈溢出效应,这说明不同进度和阶段城镇化对农地利用效率的影响呈现差异化,且差异逐步扩大。空间格局上,城镇化对农地利用效率的负向影响主要位于西部地区和东北地区,正向影响主要位于东部地区 and 中部地区,京津冀地区的中度正向影响呈现外溢态势。

在研究期间,西部地区和东北地区的城镇化发展的质量和效益相较于其他地区略低,仍处于起步或加速阶段。城镇化与碳排放呈倒“U”型关系^[46],西部地区 and 东北地区低水平的城镇化将导致碳排放增加,同时低水平的城镇化也会对农地和粮食生产产生“挤出效应”,进而降低净碳汇和生产效率。

③复种指数。在研究期间,复种指数中度正向影响有所减弱,地区间影响的差异逐步缩小,说明随着种植技术的成熟和水利设施的完善,各地区对农地资源的开发利用程度趋于饱和,其影响在逐步削弱。空间格局上,负向影响主要位于西南和华南边疆地区,侧面反映出这些地区农地资源持续高强度利用,加剧了水土流失、荒漠化,进而改变植被覆盖和地表折射率,削弱了农地碳汇和生产功能。

④农村受教育程度。在研究期间,较弱正向影响有向东北溢出趋势,但对大部分地区农地利用效率依旧呈现负向影响,一定程度上反映出在非农部门“虹吸效应”驱动下,受教育程度较高的农村劳动力逐步向非农部门转移进一步加剧了农地非农化和弃耕的现象,另一方面机械和化学品投入对劳动力的替代作用将间接导致农地利用碳排放增加。空间格局上,总体大致呈现“北正—南负”分布,说明对于北方地区来说,提升农户受教育水平,有助于增强农户绿色低碳环保意识,对低碳集约化生产方式接受度更高;而对于经济相对发达的南方地区,受教育程度提高可能会减少农户对农业的依赖,加剧农业和农村人才流失。因此,如何培养三农人才并留住人才成为亟待解决的问题。

⑤种植结构。在研究期间,正向影响由三核聚集转向双核聚集,大部分省(区、市)的正向影响逐步削弱。空间格局上,正向影响程度由西向东呈现“高一低一中”的分布态势,西南地区、华南地区和华北地区的正向影响显著减弱,表明这些地区种植结构对种植面积的减省效应减弱,不利于土壤碳库和肥力恢复。



图例 较强负向影响 中度负向影响 较弱负向影响 较弱正向影响 中度正向影响 较强正向影响
注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改。

图3 各因素影响程度的时空分异

⑥农作物受灾程度。在研究期间,中度、较弱负向影响的省份数量有所减少,较弱正向影响的省份数量增加。空间格局上,较弱正向影响集中于华北地区和华南地区,侧面反映出华北地区和华南

地区长期采用过度依赖资源投入、高强度、高排放的粗放型农地利用方式,导致地力严重透支,进而使得自然灾害对高碳生产行为具有显著的抑制作用^[47]。

⑦财政支农水平。在研究期间,较强和中度正向影响的省份数量均减少,表明财政支农政策的激励效应逐渐减弱。空间格局上,四川、重庆和陕西的财政支农水平对农地利用效率呈现弱负向影响,侧面反映出这些地区亟需优化调整财政支农政策。

综上可知,各因素对农地利用效率的影响强度和作用方向呈现显著时空异质性。

(3)各因素影响程度的趋势分析。通过 ArcGIS 10.6.1 软件的“趋势分析”工具,绘制三维透视图(图4),进一步探索各影响因素的空间演变规律。位于以正东为方向的X轴曲线表示经度趋势,位于以正北为方向的Y轴曲线表示纬度趋势,进而得到农地利用效率的各影响因素全局趋势。

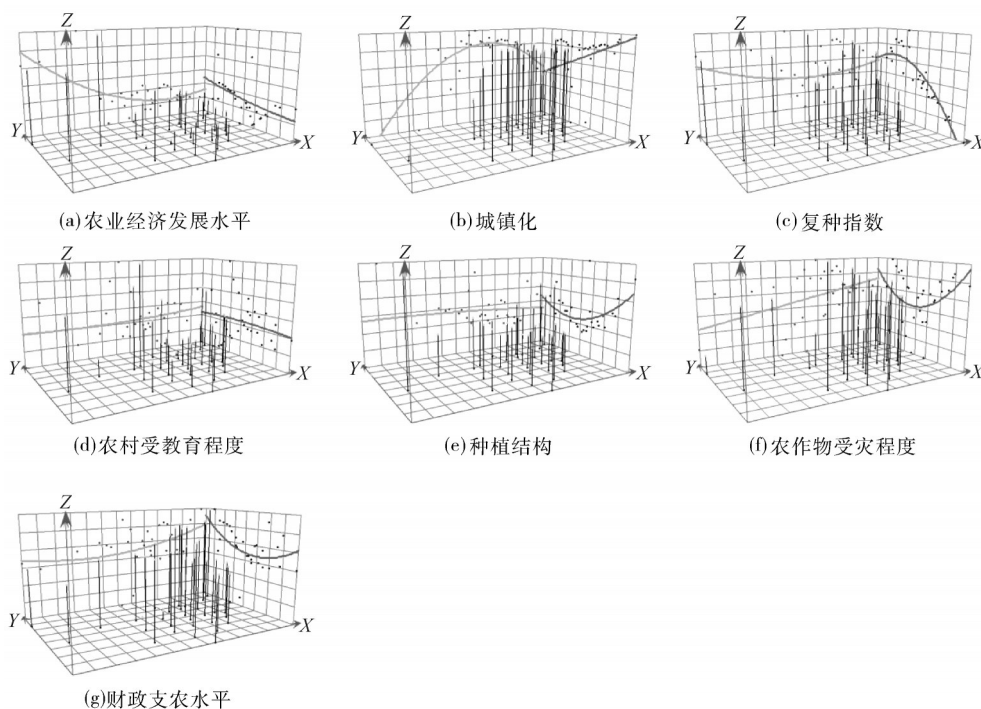


图4 各因素影响程度的趋势分析

在X方向(经向)上,城镇化对农地利用效率的影响程度呈倒“U”型并且对偏东地区影响较大;农业经济发展水平、复种指数和财政支农水平对农地利用效率的影响程度呈“U”型,其中农业经济发展水平的影响程度存在显著空间分异;农村受教育程度和农作物受灾程度对农地利用效率的影响程度自西向东递增,但相比之下农村受教育程度敏感度最低;种植结构对农地利用效率的影响程度自西向东递减。

在Y方向(纬向)上,复种指数对农地利用效率的影响程度呈倒“U”型并且对偏北地区的影响较大;种植结构、农作物受灾程度和财政支农水平对农地利用效率的影响程度呈“U”型,其中农作物受灾程度对地区差异敏感度较高;城镇化对农地利用效率的影响程度呈自北向南递增;农业经济发展水平和农村受教育程度对农地利用效率的影响程度呈现自北向南递减,其中农村受教育程度对南北方地区差异敏感度最低。

总体来看,各影响因素对农地利用效率的影响程度在东西方向(X方向)的变化趋势相较于南北方向(Y方向)更明显。城镇化对农地利用效率的影响在东西方向上最敏感,复种指数对农地利用效率的影响在南北方向最敏感。

四、结论与启示

通过对2005—2019年31个省(区、市)的农地利用效率时空演进特征分析,进一步考察各影响因

素对农地利用效率影响的时空异质性,结论如下:

(1)中国农地利用效率在研究期间波动上升至相对有效水平,各地区间农地利用效率仍存在一定程度差异。西南地区农地利用效率最高但呈下降趋势,华北地区和西北地区农地利用效率远低于全国平均水平,且尚未突破“内卷化”陷阱;在研究期间中国农地利用效率逐步向三极化态势发展,各地区农地利用效率的差异呈现“扩大—缩小—扩大”的变化趋势。

(2)种植结构是影响农地利用效率的主导因素,优化调整种植结构有助于农地利用效率提升。农业经济发展水平、城镇化、复种指数和财政支农水平对农地利用效率呈现弱正向影响,农村受教育程度和农作物受灾程度对农地利用效率呈现弱负向影响。

(3)各影响因素对农地利用效率的影响强度呈现明显的时序演变。不同阶段的城镇化对农地利用效率影响呈现差异化,农业经济发展水平、复种指数、种植结构和财政支农水平的正向影响逐步削弱,农村受教育程度和农作物受灾程度的负向影响逐渐收缩。

(4)各影响因素对农地利用效率的影响程度存在显著的空间分异。西部地区农业经济发展水平的正向影响进入“边际效益递减”阶段,中部地区和东北地区农业经济发展水平处于转型关键期,其影响为负值;西部地区和东北地区低水平的城镇化对农地利用效率存在显著抑制作用;复种指数、种植结构和财政支农水平对于绝大部分省(区、市)农地利用效率具有积极作用;农村受教育程度的影响呈现“北正—南负”态势;农作物受灾程度的较弱正向影响主要位于华北地区和华南地区。

(5)各影响因素对农地利用效率的影响程度在东西方向的变化趋势大于南北方向。城镇化的影响在东西方向上最敏感,复种指数的影响在南北方向上最敏感。

基于以上研究结论,得出以下政策启示:第一,强化农地用途管制,建立以“减碳排、增碳汇”为导向的农地保护管理机制。严守耕地生态红线,严格控制建设占用,遏制农地“非农化”和撂荒现象;在确保粮食安全的前提下,提升林地、草地、园地碳汇能力,加快推进农地碳库建设,建立完善碳汇市场化交易机制;相比其他地区,华北地区和西北地区农地利用效率陷入“内卷化”陷阱,应予以重点关注和扶持。第二,坚持因地制宜的种植原则,不断优化调整种植结构。一方面,基于各省(区、市)资源禀赋特征划定粮食保供区和特色农作物优势区,大力推广低碳高效种植模式,鼓励引导种植低耗水、低污染、低排放、高效率的农作物;另一方面,充分发挥改进种植结构对种植面积的减省效应,构建多元化、多层次农业生产性服务组织,进一步推动农地规模化经营,有效降低单位面积农地利用碳排放。第三,推动新型城镇化高质量发展,提高农地资源要素配置效率。避免盲目追求城镇化速率和规模而引发的“挤出效应”,重点提升西部地区和东北地区新型城镇化发展水平,推进技术、人才、资金等要素在城乡间合理自由流动,进一步完善农地流转市场建设,优化农地投入要素配置,促进农地利用方式由过度依赖资源投入、高强度、高排放的粗放型向精准投入、高效率、低排放的集约型转变。第四,实施差异化的农地利用效率提升政策,加大财政支农力度。由于各省(区、市)资源禀赋和农地利用现状存在差异,应避免“一刀切”政策,因地制宜、循序渐进制定提升农地低碳利用效率的政策,并通过提高财政支农水平,改善农业基础设施,积极推广应用减碳增汇型农业技术,建立以绿色低碳为导向的农地补偿机制,有效引导农民绿色低碳科学利用农地。

参 考 文 献

- [1] KAYA Y, YOKOBORI K. Environment, energy, and economy: strategies for sustainability[M]. Tokyo: United Nations University Press, 1997.
- [2] 周晓林, 吴次芳, 刘婷婷. 基于DEA的区域农地生产效率差异研究[J]. 中国土地科学, 2009, 23(3): 60-65.
- [3] 张丽峰. 基于DEA模型的全要素碳生产率与影响因素研究[J]. 工业技术经济, 2013, 32(3): 142-149.
- [4] 孙学涛. 促进还是抑制?——非农就业对农地效率的影响研究[J]. 经济与管理研究, 2021, 42(1): 133-144.
- [5] 王良健, 李辉. 中国耕地利用效率及其影响因素的区域差异——基于281个市的面板数据与随机前沿生产函数方法[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 1995-2004.
- [6] 刘新平, 孟梅, 罗桥顺. 基于数据包络分析的新疆农用地利用效益评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 40-43.

- [7] 赵晨,王远,谷学明,等.基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J].生态学报,2013,33(5):1636-1644.
- [8] 魏北海,余玲铮.中国全要素生产率变动的再测算与适用性研究——基于数据包络分析与随机前沿分析方法的比较[J].华中农业大学学报(社会科学版),2011(3):76-83.
- [9] 赵茜宇,张占录.中国县级农地利用效率的变化特征及原因解析[J].中国人口·资源与环境,2019,29(4):77-86.
- [10] 周倩,乔观民,梅思雨,等.浙江省农业用地效率及其空间自相关研究——基于三阶段DEA模型[J].资源开发与市场,2020,36(12):1313-1319.
- [11] 刘蒙罢,张安录,文高辉.长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率区域差异与空间收敛[J].自然资源学报,2022,37(2):477-493.
- [12] 张荣天.长江三角洲农用地效率评价及类型分区[J].农业现代化研究,2014,35(6):769-774.
- [13] 黄和平,王智鹏.农业土地资源利用效率评价及改善路径研究——以江西省11个设区市为例[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(5):803-814.
- [14] 刘传江,赵晓梦.长江经济带全要素碳生产率的时空演化及提升潜力[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1635-1644.
- [15] 张红梅,宋戈.黑龙江垦区耕地利用生态效率及其内部协调性[J].华中农业大学学报(社会科学版),2019(4):160-168,178.
- [16] 黄和平,王智鹏.江西省农用地生态效率时空差异及影响因素分析——基于面源污染、碳排放双重视角[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):412-423.
- [17] 廖柳文,高晓路,龙花楼,等.基于农户利用效率的平原和山区耕地利用形态比较[J].地理学报,2021,76(2):471-486.
- [18] 李明艳.劳动力转移对区域农地利用效率的影响——基于省级面板数据的计量分析[J].中国土地科学,2011,25(1):62-69.
- [19] 杨俊,杨钢桥,胡贤辉.农业劳动力年龄对农户耕地利用效率的影响——来自不同经济发展水平地区的实证[J].资源科学,2011,33(9):1691-1698.
- [20] 白志远,陈英,谢保鹏,等.ARCGIS支持下的景观细碎化与耕地利用效率关系研究——以甘肃省康乐县为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):42-47.
- [21] 王丽英,雷鹏程,刘晏彤.要素投入、经营规模对农地利用效率的影响——基于四川省418户农户调查数据[J].农村经济,2017(7):39-44.
- [22] 王检萍,余敦,孙聪康,等.乡村振兴背景下农地利用效率[J].水土保持研究,2021,28(1):337-344.
- [23] 杨州,陈万旭,朱丽君.河南省城镇化对耕地利用效率影响的空间计量分析[J].水土保持研究,2018,25(2):274-280,287.
- [24] 张玉娇,陈英,刘洋,等.农民土地价值观对耕地利用效率的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(10):19-25.
- [25] 朱明月,王钊,李海央.土地经营权流转、农户种植偏好与农业经济效益——基于8省779户农户微观调研数据的实证[J].农村经济,2018(9):28-35.
- [26] IPCC.Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R/OL].(2018-10-08) [2022-02-21].<https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [27] IPCC.Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[R/OL].(2019-08-08) [2022-2-21].<https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- [28] 赵云,乔岳,张立伟.海洋碳汇发展机制与交易模式探索[J].中国科学院院刊,2021,36(3):288-295.
- [29] 单玉红,王琳娜,刘梦娇.社会化小农趋势下农户低碳经营的路径分析——以湖北省为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(11):2479-2487.
- [30] 潘家华,廖茂林,陈素梅.碳中和:中国能走多快?[J].改革,2021(7):1-13.
- [31] 熊健,卢柯,姜紫莹,等.“碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J].城市规划学刊,2021(4):74-80.
- [32] 王云,周忠学.多功能性的都市农业用地效率评价——以西安市为例[J].经济地理,2014,34(7):129-134.
- [33] 吴方卫.我国农业资本存量的估计[J].农业技术经济,1999(6):34-38.
- [34] 单豪杰.中国资本存量K的再估算:1952—2006年[J].数量经济技术经济研究,2008,25(10):17-31.
- [35] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [36] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [37] 李波,刘雪琪,王昆.中国农地利用结构变化的碳效应及时空演进趋势研究[J].中国土地科学,2018,32(3):43-51.
- [38] TONE K.A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J].European journal of operational research,2001,130(3):498-509.
- [39] TONE K.A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J].European journal of operational research,2002,143(1):32-41.
- [40] 田云,张俊飏,尹朝静,等.中国农业碳排放分布动态与趋势演进——基于31个省(市、区)2002—2011年的面板数据分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(7):91-98.

- [41] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. *International journal of geographical information science*, 2010, 24(3): 383-401.
- [42] 刘琼, 肖海峰. 农地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(6): 1063-1073.
- [43] 朱承亮, 师萍, 岳宏志, 等. 人力资本、人力资本结构与区域经济增长效率[J]. *中国软科学*, 2011(2): 110-119.
- [44] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 14-25.
- [45] 陈炜, 殷田园, 李红兵. 1997—2015年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(2): 37-44.
- [46] 李飞越. 老龄化、城镇化与碳排放——基于1995—2012年中国省级动态面板的研究[J]. *人口与经济*, 2015(4): 9-18.
- [47] 程琳琳, 张俊飏, 何可. 农业产业集聚对碳效率的影响研究: 机理、空间效应与分群差异[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(9): 218-230.

Spatio-Temporal Heterogeneity and Influencing Factors of Agricultural Land Use Efficiency in China from the Goal of Carbon Neutrality

LIU Xueqi, LI Bo

Abstract From the perspective of carbon neutrality and the balance between carbon fixation and carbon emissions from agricultural land use, this paper uses Super-SBM model to calculate the agricultural land use efficiency of 31 provinces from 2005 to 2019, and analyzes the spatio-temporal characteristics and dynamic evolution trend of agricultural land use efficiency. The geographically and temporally weighted regression (GTWR) is used to investigate the spatio-temporal heterogeneity and evolution of influencing factors. The results show that: 1) The overall level of agricultural land use efficiency in China had risen to a high efficiency level with Southwest China being the highest, but showing a downward trend with time and North China and Northwest China stuck in “involution”. The regional gap of agricultural land use efficiency in China showed a trend of “expanding-shrinking-expanding”; 2) GTWR model was better than OLS model and GWR model with planting structure having the greatest positive impact on agricultural land use efficiency; 3) The intensity and direction of influencing factors of agricultural land use efficiency showed spatio-temporal heterogeneity; 4) The changing trends of influencing factors of agricultural land use efficiency from the east to the west was greater than that from the south to the north. The urbanization rate had the most sensitive influence on the agricultural land use efficiency from the east to the west. The multiple cropping index had the most sensitive influence on agricultural land use efficiency from the south to the north. Finally, It provides inspiration for making policies of low carbon and efficient utilization of agricultural land according to local conditions.

Key words land use; agricultural land use efficiency; Super-SBM model; spatio-temporal heterogeneity; GTWR model

(责任编辑:金会平)