

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

刘蒙罢^{1,2}, 张安录^{1,2}, 文高辉³

(1. 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学生态与环境经济研究所, 武汉 430070; 3. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要: 基于耕地利用生态效率内涵构建其评价指标体系, 并运用SBM-Undesirable模型、核密度估计法及空间收敛模型, 对长江中下游粮食主产区71个市(州)耕地利用生态效率区域差异及收敛态势定量刻画。结果表明: (1) 2007—2018年长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率整体水平中等, 各粮食主产区效率差异明显, 效率损失主要源于投入冗余所带来的投入非效率, 其中劳动力投入冗余度最高; (2) 时间维度上看, 长江中下游粮食主产区整体耕地利用生态效率始终存在两级分化的现象, 整体内部差异呈扩大趋势, 但逐步趋于稳定, 各粮食主产区内部差异演变具有较大分异性; (3) 空间维度上看, 考虑空间溢出效应的情境下, 长江中下游粮食主产区整体存在显著的绝对 β 收敛, 且在科技水平、农户收入水平、灌溉水平及空间溢出效应等因素的共同影响下以1.01%的速度条件收敛, 但各粮食主产区收敛态势具有区域差异性。应建立粮食主产区协同机制, 因地制宜, 分区施策以提升长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率水平。

关键词: 耕地利用生态效率; 区域差异; 空间收敛; 粮食主产区; 长江中下游

2015年, 习近平总书记在全国耕地保护工作的会议中指出: “耕地是我国最为稀缺的生产资源, 要实行最严格的保护制度, 要像保护大熊猫一样保护耕地。”但受我国耕地数量、资源禀赋等条件限制, 耕地一直以来处于高强度的利用状态, 虽然也实现了粮食总产量及农业产值的重大增产增值(2018年我国年粮食产量达65789万t, 农业产值达61452亿元), 但其利用过程中也产生了大量CO₂, 一定程度上制约着区域生态系统的协调发展^[1]。据丁宝根等^[2]对中国2000—2015年耕地利用状况进行研究发现, 研究时限内中国耕地利用过程中所排放的碳量处于持续增长阶段, 年均增量达175.8 t, 年均增速达2.56%, 且耕地的持续高强度利用进一步破坏了土壤结构, 削弱了耕地固碳属性值。耕地利用过程中所产生的碳排放已成为全球温室气体重要排放来源^[3], 严重制约着耕地的生态文明建设。2020年中共中央国务院印发的《关于抓好“三农”领域重点工作确保如期实现全面小康的意见》中明确提出未来农业发展要以“提质增效”为核心, 积极探索农业可持续发展道路, 切实推进农业向“两型”农业发展。因此, 在当前生态文明建设的背景下, 如何有效地将生态内涵融入耕地利用效率评价中, 厘清耕地利用生态系统

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2021-01-25

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA054); 国家自然科学基金项目(41801190)

作者简介: 刘蒙罢(1994-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 研究方向为土地资源经济。

E-mail: liumengba940312@sina.com

通讯作者: 张安录(1964-), 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地资源经济。

E-mail: zhanglanlu@mail.hzau.edu.cn

的“资源—社会经济—环境”协同机制及其多要素时空格局变化及相互作用的基本规律,是当前我国实施耕地立体保护的关键问题。

生态效率自20世纪90年代被提出后,经过学者们一系列的丰富及深化,已运用至不同的研究领域,成为衡量某领域是否满足可持续发展的重要尺度。当前,国内外学者有关生态效率运用的研究主要集中在区域、城市及行业等^[4-8]方面,研究尺度逐渐细化,由国家、省域等^[9,10]中宏观层面逐步细化至市域或县域等^[11]微观尺度。在研究内容方面,学者们早期主要侧重于生态效率评价指标的构建、时空演变特征、影响因素^[12,13]等方面,当前则更加关注将空间因素纳入生态效率研究之中,侧重于对其空间格局、空间溢出效应及空间收敛性等方面的探究。如王兆峰等^[14]基于标准椭圆及重心模型等方法对长江经济带旅游生态效率的时空演变格局进行了探究;Yu等^[15]则基于空间杜宾模型对中国191个地级市生态效率的空间溢出效应及空间收敛性进行探究,发现中国区域生态效率存在显著空间溢出效应且存在 σ 和 γ 收敛的周期性规律。在研究方法上,对于生态效率的测度主要集中运用随机前沿分析法^[16]、生态足迹法^[17]、能值分析法^[18]以及数据包络分析法^[19]等,其中数据包络分析法因其无需事先设定模型的具体形式及估计参数而成为当前生态效率测度中最为常用的方法,如Qiao等^[20]基于DEA模型对中国30个地区2000—2015年间区域生态效率进行了测度,盖美等^[21]则基于三阶段DEA模型对中国环渤海地区17个城市的生态效率进行了测度,曾贤刚等^[22]则基于DEA-SBM模型对中国高质量发展下的长江经济带生态效率进行了测度;对生态效率影响因素探究早期常用的方法主要为多元回归分析法、Tobit回归模型^[23,24]等,当前则偏向运用地理加权回归模型、空间计量模型^[25,26]等方法。

纵观当前研究发现,生态效率已广泛运用至区域、城市及行业等不同领域,但细化至土地利用生态效率方面的研究则尚处于起步阶段,尤其是耕地利用生态效率研究,对耕地利用生态效率内涵系统界定相对不足;其次在研究内容上,缺乏对区域耕地利用生态效率内部差异及其未来演变趋势规律的探究。而准确把握我国粮食主产区耕地利用生态效率内部差异及其未来演变趋势规律,有助于实现生态效率增长与非期望产出的解耦发展。因此,本文试图将生态内涵融入耕地利用效率评价之中,界定耕地利用生态效率的内涵,构建耕地利用生态效率评价指标体系。以长江中下游粮食主产区2007—2018年71个市(州)为研究对象,采用SBM-Undesirable模型对其耕地利用生态效率测度分析,并在考虑空间自相关的前提下,运用核密度估计法及空间收敛性分析法识别各粮食主产区地区差异及空间敛散性特征,以期为促进长江中下游各粮食主产区之间的合作联动发展、提高耕地利用生态效率以及耕地利用生态文明建设相关政策的制定提供理论依据。

1 理论分析

1.1 耕地利用生态效率理论内涵

“生态效率”一词最早由Schaltegger等^[27]提出,并将其定义为经济的增长量与其所引致的环境负价值的比值;世界可持续发展工商理事会(WBSCD)则将生态效率定义为在资源消耗过程中除生产人类正常的商品与服务需求外,同时还须确保该过程中所带来的生态影响至少与地球的承载力基本保持一致^[28];欧洲环境署(EEA)则用生态效率指标衡量社会经济发展的可持续性,将其定义为单位自然资源消耗所获福利的最大化程度^[29]。由上述各定义可知,对生态效率的定义和解释所秉承的基本思想是一致的,即单位资源投

入最大化福利价值的同时, 最小化“非意欲”产出, 其之间差异主要是对福利价值的解释不同。生态效率协调的是“资源—社会经济—环境”复合系统的耦合发展, 追求的是提高人类福利的同时, 降低资源消耗与环境损耗。

耕地作为农业生产活动中最基本的投入要素之一, 对其利用则希望单位生产要素投入农户所获福利最大化的同时, 农业生产环境损耗最小化, 其核心是在耕地利用复合系统中追求社会经济发展与生态环境的协调统一。因此, 本文将耕地利用生态效率定义为: 耕地利用过程中一定资源要素的投入所能实现的社会经济产出最大化与环境污染最小化的程度。具体而言, 即耕地利用过程中单位生产要素投入, 农业产值与粮食总产量最大化及碳排放量最小化所能实现的程度。耕地利用生态效率需兼顾期望产出最大与非期望产出最小化两类目标, 实现“资源—社会经济—环境”复合系统的协调发展, 减少效率损失, 以达到效率有效状态。

1.2 耕地利用生态效率收敛性理论假说

基于耕地利用生态效率内涵可知, 耕地利用生态效率是“资源—社会经济—环境”复合系统综合运行的结果, 是耕地利用过程中一定资源要素的投入所能实现的产出最大化与环境污染最小化的程度。基于计划行为理论可知, 农户作为耕地利用过程主体, 其自身行为态度会直接影响农户的生产投入行为^[30], 如其对化肥农药减量投入所持态度会直接影响其对化肥农药等资本要素的投入量; 其次政府层面的环境规制及财政激励等政策的实施, 对耕地利用过程中的非期望产出也具有一定的抑制效应; 再次社会经济发展水平所带来农业生产结构转变及技术溢出的效益影响对耕地利用过程中的期望产出具有一定的促进效应。由此可知, 农户微观层面、农业生产中观层面及政府行为宏观层面收敛机制均会使得耕地利用生态效率出现区域差异收敛。具体理论分析如下:

微观收敛机制主要体现为农户行为趋同。由规模报酬递减规律可知, 在技术水平保持稳定的条件下, 一定区域耕地面积内集聚过度的劳动力、资本等生产要素会致使投入冗余, 导致耕地利用生态效率下降, 从而驱动农户将部分生产要素向不充足地区发生转移, 减少耕地利用生态效率的区域差异性; 其次农户作为理性的经济人, 其会基于资源环境的稀缺度进行理性选择, 当农户收入水平提高至一定阶段时, 自然而然地会加强对绿色粮食及种植环境的关注度, 环保意识的增强会致使农户自觉减少化肥农药等化学品的投入, 转而利用农家肥等清洁肥料, 从而促进区域耕地利用生态效率的提升。农户行为的趋同最终引致资源投入子系统在区域上的趋同。

中观收敛机制主要体现为农业生产结构及模式趋同。一方面随着人民生活水平的提高, 需求层次的改变致使人们对绿色健康生活的向往, 以此驱动当前农业生产模式及农业生产结构的转变, “石油农业模式”必然会逐渐被“绿色农业模式”所取代, 农业种植结构也必然会逐渐倾向于低消耗—高价值的绿色食品种植; 另一方面经济的快速发展, 间接地带来了耕地利用技术效率的提升, 如测土配方施肥、水肥一体化等技术, 技术的提升一定程度上可抑制耕地利用的投入冗余及碳排放, 从而提升区域耕地利用生态效率。农业生产结构及模式的趋同最终引致社会经济产出子系统在区域上的趋同。

宏观收敛机制主要体现为政府行为趋同。一方面随着农业生产过程中“逆生态化”效应的堆积, 政府会逐步加强农业生产环境规制, 制定一系列低碳减排政策及技术扶持政策, 以提高生态效率滞后区域的可持续发展能力; 另一方面随着政府财政收入的增长, 政府将分配更多的财政用以农业环境污染治理, 通过农业科技投入及财政补贴等支农政策诱导农户低碳生产, 积极参与耕地面源污染治理, 以降低耕地利用过程中非期望

产出冗余,提升区域耕地利用生态效率水平。政府行为的趋同最终引致环境产出子系统在区域上的趋同。

综上所述,随着农户环保意识的逐渐增强、耕地利用先进生产技术的普及、农业生产结构及模式的转型以及政府低碳减排政策的实施,耕地利用综合系统逐步实现协调发展,耕地利用生态效率水平协同迈入高水平阶段,理论上存在空间收敛状态(图1)。

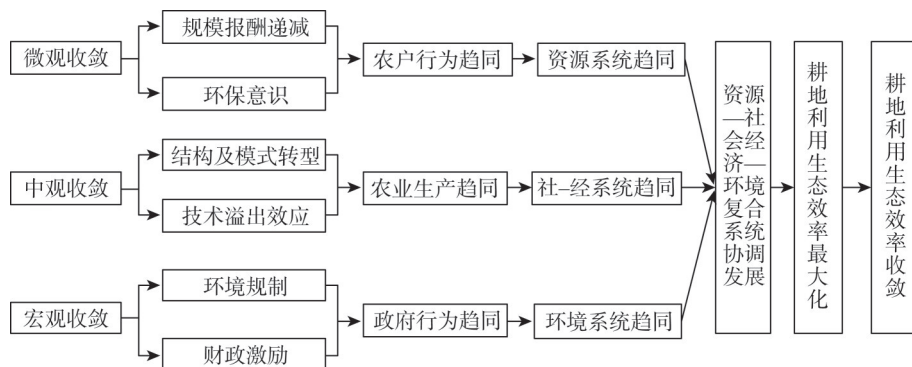


图1 耕地利用生态效率收敛机理

Fig. 1 Convergence mechanism of ecological efficiency of cultivated land use

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

长江中下游粮食主产区涵盖了江苏、安徽、湖北、湖南及江西五省区域,是我国重要的粮食生产基地,也是长江经济带生态文明建设和生态功能维护的核心区域。凭借其优良的耕地资源及水热条件,2018年长江中下游粮食主产区农作物播种面积约38109千 hm^2 ,粮食总产量达15720万 t ^①,约占全国陆地粮食总产量的23.9%,在保护国家粮食安全方面承担着重要作用。然而随着社会经济的快速发展,“石油农业模式”下的“逆生态化”效应的逐步堆积,农业生态环境破坏日趋严重,加之长江中下游粮食主产区农户在耕地利用过程中对耕地的重用轻养,导致区域资源环境污染问题不断突出。同时,各粮食主产区间耕地资源禀赋、政策制定等存在的区域差异,也为长江中下游粮食主产区的耕地利用生态效率的协调发展带来了重重阻碍。因此,本文以长江中下游粮食主产区内71个地级市(州)为单位进行分析探究,目的在于探究长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率内部的非平衡性特征,为实现耕地利用与生态环境的协调融合提供理论支撑。

2.2 研究方法

2.2.1 SBM-Undesirable模型

SBM-Undesirable模型不仅将投入或产出的松弛变量纳入函数模型中,同时也将非期望产出纳入模型的效率测度中,有效解决了存在松弛变量及非期望产出下的效率评价问题^[31]。由于在规模报酬不变(CRS)和规模报酬可变(VRS)的不同假设下所测度的效率值是不同的,依据Zheng等^[32]建议,当两种技术假设下出现结果差异时,应优先考虑运用VRS下得到的结果。因此,采用基于规模报酬可变的SBM-Undesirable模型测度,其基本原理如下:

① 数据来源于五省相关数据汇总而得。

假定在耕地利用过程中, 有 n 个决策单元, 均有 m 个投入指标 x_{i0} , a 个期望产出指标 y_{r0}^e 以及 b 个非期望产出指标 y_{h0}^n , 则可定义以下矩阵:

$$\begin{aligned} X &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^{m \times n} \\ Y^e &= (y_1^e, y_2^e, \dots, y_n^e) \in R^{a \times n} \\ Y^n &= (y_1^n, y_2^n, \dots, y_n^n) \in R^{b \times n} \end{aligned} \quad (1)$$

则包含非期望产出、规模报酬可变 (VRS) 的 SBM-Undesirable 模型表达式为^[31]:

$$\begin{aligned} \rho^* &= \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{D_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{a+b} \left(\sum_{r=1}^a \frac{D_r^e}{y_{r0}^e} + \sum_{h=1}^b \frac{D_h^n}{y_{h0}^n} \right)} \\ \text{s.t. } x_0 &= X\lambda + D^-, y_0^e = Y^e\lambda - D^e, y_0^n = Y^n\lambda + D^n \\ D^- &\geq 0, D^e \geq 0, D^n \geq 0, \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ^* 代表研究区域内各市的耕地利用生态效率值, ρ^* 介于 0~1 之间, $\rho^*=1$, 代表评价单元位于效率前沿面上, $\rho^*<1$, 表示评价单元存在效率损失, 有进一步优化调整投入产出的空间; m 、 a 、 b 分别代表投入、期望产出、非期望产出的个数 (个); D^- 、 D^e 、 D^n 分别代表投入、期望产出、非期望产出的松弛变量; x_{i0} 、 y_{r0}^e 、 y_{h0}^n 相对应地代表评价单元在某阶段的投入产出值; λ 表示权重向量。同时 SBM-Undesirable 模型可进一步分解出无效率项:

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{D_i^-}{x_{i0}} \\ \beta_r = \frac{1}{a} \sum_{r=1}^a \frac{D_r^e}{y_{r0}^e} \\ \beta_h = \frac{1}{b} \sum_{h=1}^b \frac{D_h^n}{y_{h0}^n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_i 、 β_r 、 β_h 分别表示投入冗余、期望产出不足、非期望产出冗余。

2.2.2 空间自相关模型

空间自相关是检验所评价单元的属性值与其邻近区域的同一属性值是否在地理空间上存在空间关联性。全局空间自相关用以检验研究区域整体的空间关联性, 采用全局莫兰指数进行反映, 其计算公式为^[33]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (4)$$

式中: x_i 、 x_j 为评价单元 i 、 j 的属性值 ($i \neq j$); \bar{x} 为评价单元属性值均值; n 研究区域内评价单元的总数目 (个); I 为全局莫兰指数, 若 I 显著为正, 即表明耕地利用生态效率存在正的空间自相关, 反之, 则表明存在负的空间自相关; w_{ij} 为空间权重矩阵, 其描述的是各评价单元在空间上的相互邻接关系, 本文基于长江中下游粮食主产区的面板数据进行分析, 考虑采用基于地理邻接构建空间权重矩阵, 即以 “1” 表示空间单元相邻, 以 “0” 表示空间单元不相邻; σ 为样本方差。

2.2.3 非参数核密度估计

核密度估计 (Kernel density estimation) 是一种非参数估计方法, 无需对数据分布附

加任何假定,直接基于样本数据本身,采用连续的密度曲线描述样本的分布形态,具有较好的统计特征,是当前分析地理事物特征差异变化较具代表性的统计方法,其估计函数表达式为^[34]:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 为耕地利用生态效率密度函数; x_i 为各粮食主产区耕地利用生态效率观测值; \bar{x} 则表示为该区耕地利用生态效率均值; N 为研究区域个数(个); h 为窗宽; $K(\cdot)$ 为核函数,本文采用当前运用最为广泛的高斯核密度函数对长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率进行核密度估计,估计过程基于 stata 15.0 软件。

2.2.4 空间收敛模型

收敛性分析可探究未来长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率的趋同与发散情况,若其耕地利用生态效率存在收敛性特征,则表明长江中下游各粮食主产区耕地利用生态效率差距将会在未来时间轴上逐步收敛,反之,则为发散。当前学术界进行空间收敛分析代表性方法主要为 β 收敛分析方法^[35]。

β 收敛意指耕地利用生态效率水平低的区域具有较高的增长率,其增长速度往往要高于耕地利用生态效率水平高的区域。 β 收敛可分为绝对 β 收敛与条件 β 收敛。绝对 β 收敛指各粮食主产区耕地利用生态效率水平收敛于相同的稳态水平,其隐含了一定的假设条件,即各评价单元的“资源—社会经济—环境”复合系统具有一致的生产环境,即各粮食主产区具有相似的经济水平、农业生产条件及政策机制等,基于一致的生产环境,不同粮食主产区的耕地利用生态效率最终会趋于相同的稳态水平;而条件 β 收敛则摆脱了绝对 β 收敛的假设条件,将各粮食主产区的经济发展水平、农业生产及支农政策等差异考虑在内,认为各粮食主产区的“资源—社会经济—环境”复合系统具有不同的增长路径,趋于各自的稳态水平。传统的计量经济学运用分析的前提假定条件之一是假定被考察样本的空间匀质性及独立同分布性,然而根据地理学第一定律可知,存在于地理空间的任何事物都是与其他事物相关的,越相近的事物,则关联越紧密。因此,本文将空间因素纳入耕地利用生态效率的收敛模型,建立生态效率 β 收敛的空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM),模型表达式分别为^[35]:

$$\ln \frac{CE_{i,t+T}}{CE_{i,t}} = \alpha + \beta \ln(CE_{i,t}) + \rho w_{ij} \ln \frac{CE_{i,t+T}}{CE_{i,t}} + \theta_k X_{i,t} + \varphi_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

$$\ln \frac{CE_{i,t+T}}{CE_{i,t}} = \alpha + \beta \ln(CE_{i,t}) + \lambda w_{ij} \varepsilon_{i,t} + \theta_k X_{i,t} + \varphi_i + v_t + \mu_{i,t} \quad (7)$$

式中: $\ln(CE_{i,t+T}/CE_{i,t})$ 为 t 至 $t+T$ 年间粮食主产区 i 的耕地利用生态效率增长速率的自然对数值; α 、 β 为待估参数, $\beta < 0$, 意味着收敛; $\alpha = -\ln(1+\beta)/T$, 表示收敛速度; ρ 、 λ 为空间相关系数,反映相邻区域对本地区属性值的影响; w_{ij} 为空间权重矩阵; φ_i 、 v_t 分别代表个体固定效应和时间固定效应; $\varepsilon_{i,t}$ 、 $\mu_{i,t}$ 均为随机误差项; $X_{i,t}$ 为各控制变量,结合本文前述的理论假设分析(图1)及相关影响因素的研究^[6,13],从经济发展水平、地区科技水平,政府支农力度、经营主体状况以及耕地利用生产条件五个方面,选取 AG (人均GDP)、 TE (地区科学技术支出额)、 GOV (财政支农支出额)、 FRE (农户人均纯收入)、 RCI (耕地复种指数)及 IRI (灌溉指数)作为控制变量; θ_k 为各控制变量 $X_{i,t}$ 的系数,据此判断绝对 β 收敛与条件 β 收敛,若 θ_k 为 0,则上述模型为绝对 β 收敛,若 θ_k 不为 0,则上述模型为条件 β 收敛。

2.3 指标体系构建与数据来源

基于耕地利用生态效率内涵，从耕地利用过程的投入、期望产出及非期望产出三个方面表征“资源—社会经济—环境”复合系统的要素流动。参考相关研究成果^[9,13]，结合柯布道格拉斯生产函数，考虑耕地利用生产实际特质，选取农业产值^②及粮食总产量表征复合系统中的经济社会维度，反映耕地利用过程中的期望产出；选取耕地、劳动力、农药化肥使用量、农业机械总动力表征复合系统中的资源维度，反映耕地利用过程中的土地、劳动力及资本投入；鉴于化肥农药流失系数具有区域特征性及难以测定性，选取碳排放量近似表征复合系统中的环境维度，反映耕地利用过程中的非期望产出，各类碳源碳排放系数参见 West 等^[36]、李波等^[37]研究成果。构建的耕地利用生态效率评价指标体系见表1。

表1 耕地利用生态效率评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of cultivated land use ecological efficiency

变量类型	变量	指标释义
投入指标	耕地投入	农作物播种面积/千 hm ²
	劳动力投入	第一产业从业人员×(农业产值/农林牧渔业总产值)进行换算/万人
	农药化肥投入	农药化肥施用折纯量/t
	农机投入	农业机械总动力/万 kW
期望产出指标	农业产值	农业产值/万元
	粮食产量	粮食总产量/t
非期望产出指标	碳排放	耕地利用碳排放总量/t

本文以长江中下游粮食主产区的5个省份，71个地级市（州）2007—2018年的耕地利用数据作为研究样本，耕地利用的投入及产出基础数据来源于《中国统计年鉴2008—2019》《中国农村统计年鉴2008—2019》、各省、市统计年鉴及农村统计年鉴（2008—2019）以及历年国民经济与社会发展统计公报。空间收敛模型中的人均GDP、地区科学技术支出额、财政支农支出额来源于各省、市统计年鉴；农户人均纯收入、农作物总播种面积、耕地有效灌溉面积数据来源于《中国农村统计年鉴2008—2019》、各省农村统计年鉴及省、市统计年鉴。

3 结果分析

3.1 耕地利用生态效率测度及非效率来源分析

基于DEA-SOLVER PRO15a软件计算平台，设定期望产出与非期望产出权重比为1:1，测度长江中下游粮食主产区2007—2018年耕地利用生态效率值（图2）。总体看，2007—2018年间长江中下游粮食主产区年均耕地利用生态效率为0.698，并呈现小幅波动下降的趋势，表明长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率处于中等发展水平，耕地利用过程中非期望产出增加幅度相较于期望产出有所扩大的趋势，生态环境呈现下行态势，还存在较大的资源集约与环境保护的发展空间。对长江中下游各粮食主产区对比分析可知，各省耕地利用生态效率差异明显。12年来，江苏省耕地利用生态效率始终位于长江中下游流域前列，耕地利用生态效率均值为0.938，其次分别为江西、湖北、安徽及湖南。基于

② 本文所指农业为狭义层面上的农业，而非广义农业。

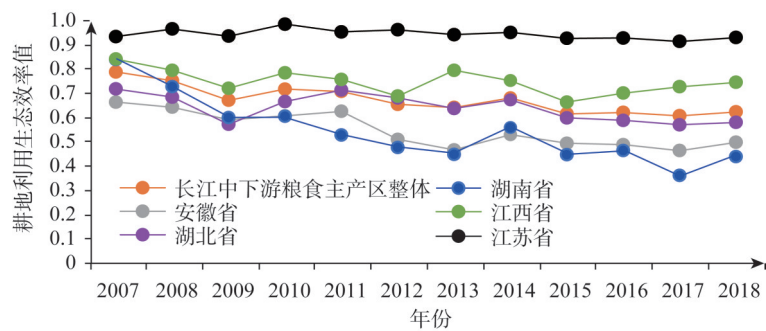


图2 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率值

Fig.2 Ecological efficiency value of cultivated land use in the main grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region

SBM-Undesirable模型的无效率分解式，进一步从投入与产出两方面测度耕地利用过程中的冗余度，探究长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率损失缘由，测度结果见表2。

总体来看，2007—2018年长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率损失源于投入冗余、非期望产出冗余及经济产出不足所带来的投入非效率、环境产出非效率及经济产出非效率，且投入冗余所导致的投入非效率远高于其他两者不足所带来的非效率，其中耕地利用过程中投入冗余度最高为劳动力投入，年均达31.86%，表明投入冗余对耕地利用生态效率负向影响最大，而劳动力冗余在其贡献最大，意味着长江中下游粮食主产区耕地经营方式及管理水平的低效，耕地及劳动资本整体投入规模不合理，耕地未能得到集约利用。分区域看，五个粮食主产区均存在一定程度的耕地利用生态效率损失，且损失来源具有地区差异性，江苏省耕地利用生态效率损失最低。土地投入冗余率最高的省份为湖南省，高达26.79%，其次为湖北省和安徽省；劳动力投入冗余率最高的省份为湖南省，高达56.08%，其次为安徽省和湖北省；资本（含农药化肥和机械投入）投入冗余率最高的省份为安徽省，高达58.52%，其次为湖南省和湖北省；非期望产出冗余率最高的省份为湖北省，高达28.72%，其次为安徽省和湖南省，表明这些区域耕地利用过程中过度依赖于以化肥、农药及柴油等为体系的“化学”农业模式，“逆生态化”现象较为显著；经济产出不足最高的省份为安徽省，不足率为31.51%，其次为江西省和湖南省，表明这些区域投入产出转化率相对较低，应注重关注该区域耕地利用经济效率的提升。

表2 2007—2018年长江中下游粮食主产区耕地利用年均投入产出冗余率

Table 2 Average annual input-output redundancy rate of cultivated land use in the major grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region from 2007 to 2018 (%)							
地区	耕地利用投入冗余率				耕地利用产出冗余率		
	土地投入 冗余率	劳动力投入 冗余率	农药化肥 投入冗余率	机械投入 冗余率	碳排放量 产出冗余率	粮食产量 冗余率	农业产值 冗余率
湖南省	-26.79	-56.08	-20.68	-36.83	-24.71	0	9.06
安徽省	-18.45	-43.59	-28.04	-30.48	-27.55	5.35	31.51
湖北省	-23.95	-27.03	-32.14	-15.89	-28.72	1.71	6.09
江西省	-12.84	-26.44	-9.75	-16.70	-12.32	0	17.24
江苏省	-1.23	-6.17	-4.45	-5.38	-4.95	0	0.60
整体	-16.65	-31.86	-19.01	-21.05	-19.65	1.41	12.90

3.2 耕地利用生态效率的时空差异

为进一步探究长江中下游各粮食主产区耕地利用生态效率的内部差异变化趋势,采用核密度估计法,对各粮食主产区2007年、2012年及2018年耕地利用生态效率进行核密度估计(图3)。整体上看,2007—2012年间长江中下游粮食主产区整体核密度曲线在横轴上表现左移的态势,2012—2018年其左移之势则相对不显著,意味着长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率整体水平在2007—2018年间呈降低的趋势,但该趋势逐步减弱;从形状上看,核密度曲线在2007—2018年间均为显著的“双峰”态势,但曲线主峰波峰高度在2007—2012年间出现下降的趋势,2012—2018年间基本保持稳定,表明粮食主产区耕地利用生态效率始终处于两级分化的格局,内部差距呈现扩大态势但逐步收敛于稳定。

分区域看,湖北省、湖南省、安徽省的核密度曲线图在横轴上不同程度均表现出左移的态势,而江西省、江苏省则基本保持不变,意味着除江西、江苏两省之外,其余三省耕地利用生态效率水平在2007—2018年间不同程度地均呈现下降的趋势。从形状上看,湖北省耕地利用生态效率核密度曲线始终维持“一主一小”的双峰格局,耕地利用生态效率呈现两级分散化的区域集聚特征,主峰波峰高度呈现“先变矮再变高”的特征,表明湖北省耕地利用生态效率差距经历了“先扩大后缩小”的演变历程;湖南省耕地利用生态效率核密度曲线在2007—2018年间由“单峰”演变为“双峰”,波峰宽度逐渐变窄,且主峰波峰高度逐渐变高,表明湖南省耕地利用生态效率极化现象逐步凸显,内部差距在逐渐缩小;安徽省核密度曲线在2007—2018年间由“双峰”演变为“单峰”且主峰波峰高度表现为持续变矮的态势,表明安徽省耕地利用生态效率极化现象有所减弱,内部差距在逐渐扩大;江西省耕地利用生态效率核密度曲线在2007—2018年间由“单峰”逐渐演变为“双峰”,但“双峰”分布特征逐渐不明显,主峰波峰高度出现“先变矮再变高”的特征,表明江西省耕地利用生态效率极化现象有所减弱,内部差距呈现先扩大后缩小的态势;江苏省耕地利用生态效率核密度曲线在2007—2018年间基本保持一致,始终维持“一主一小”的双峰格局,但主峰波峰高度在逐渐增高,表明江苏省耕地利用生态效率始终维持两级分化的态势,内部差距在逐渐减小。该现象背后的主要原因之一可能源于各地区区域内部经济发展的不平衡,区域内部经济发展的不平衡间接影响着农业生产投资力度的不均衡,从而导致各地区耕地利用生态效率内部差异较为显著。

3.3 耕地利用生态效率空间收敛性分析

3.3.1 耕地利用生态效率空间自相关检验

为判断耕地利用生态效率的空间分布特征,本文基于GeoDa空间分析工具,构建基于地理邻接的空间权重矩阵对长江中下游粮食主产区2007—2018年耕地利用生态效率全局莫兰指数进行测算。由表3可知,长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率全局Moran's I 呈现波动上升的趋势,由2007年的0.194提高至2018年的0.301,且均通过了1%的显著性检验,表明长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率呈现显著的正向空间自相关性,且自相关性越来越强。根据计划行为理论可知,社会个体或团体所衍射出的行为不仅取决于其自身的行为态度,而且也取决于周边相邻群体以及政府机构等主观的行为规范影响^[30]。具体至农户的耕地利用行为,则表现为邻近区域农户生产投入行为、种植偏爱以及区域农业政策、农业技术对本区域农户生产投入及政策技术制定产生了影响,引导着本区域农户加以学习和模仿,以调整自己的耕地投入行为及种植结构,进而在地理空间上表现出空间自相关性,影响着区域耕地利用生态效率水平。

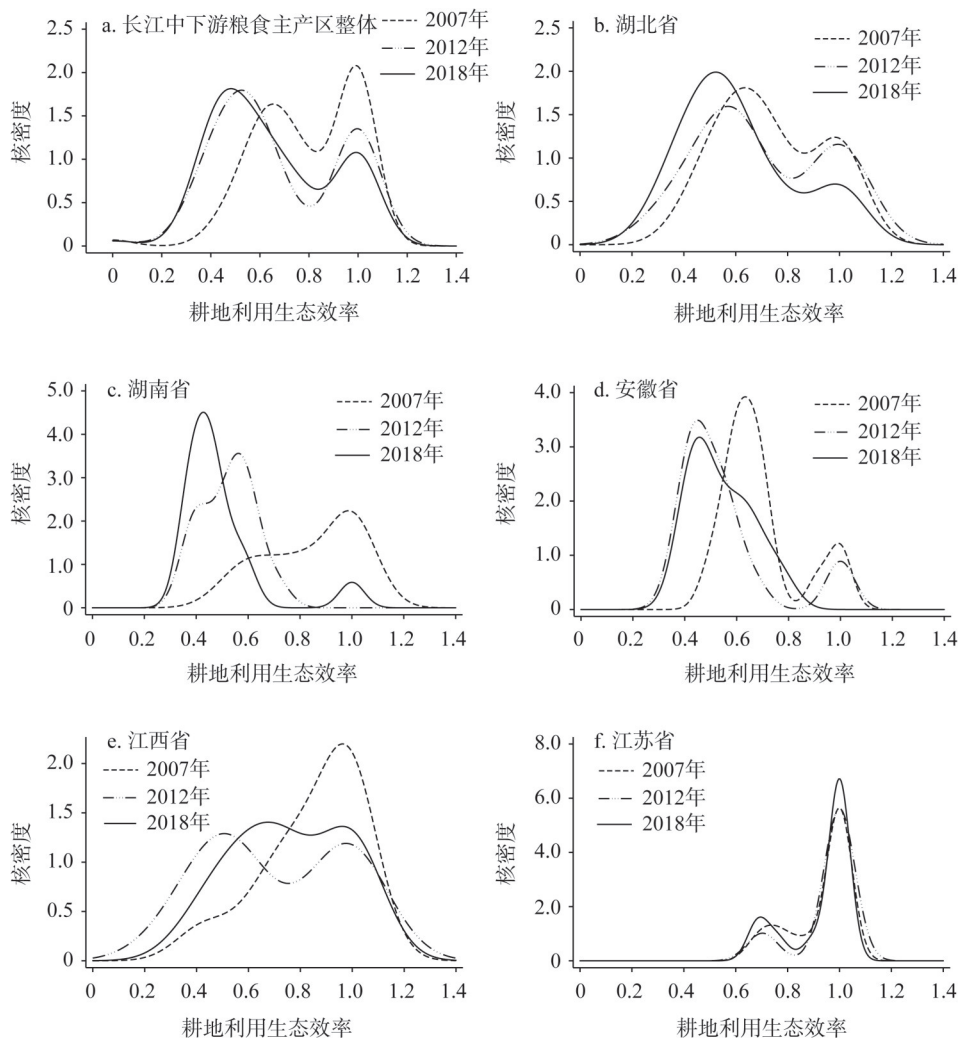


图3 2007—2018年长江中下游各粮食主产区耕地利用生态效率核密度估计

Fig. 3 Core density estimation of the ecological efficiency of cultivated land use in the major grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region from 2007 to 2018

3.3.2 β 收敛分析

基于全局自相关分析可知,长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率存在着显著的空间自相关性,因此需选择包含空间效应的空间计量模型进行收敛性分析。依据Anselin^[38]提出的判断规则,基于Lagrange乘数误差和滞后及其稳定性检验值对空间滞后与空间误差模型进行选择。从表4可知,在绝对收敛中,LM-lag和LM-error均通过了5%显著性水平的检验,且RLM-lag的统计量值大于RLM-error,因此采用空间滞后模型对耕地利用生态效率进行绝对 β 收敛分析;同理在条件 β 收敛分析中,应采用空间误差模型对耕地利用生态效率进行条件 β 收敛分析。同时,基于面板数据的Hausman检验值为21.280,显著性检验 P 值为0.0003,通过了1%显著性水平的检验,即表明应拒绝建立随机效应模型的原假设,选择固定效应模型进行回归分析,同时考虑到本文所研究数据类型为短平衡面板数据($n > T$,且每个时期,样本个体均保持不变),每个样本均存在自身的个体差异

表3 2007—2018年长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率全局 Moran's I

Table 3 Global Moran's I ecological efficiency of cultivated land use in the major grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region from 2007 to 2018

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Moran's I	0.194	0.187	0.210	0.228	0.199	0.296	0.371	0.285	0.244	0.236	0.339	0.301
Z值	2.743	2.653	3.019	3.343	2.899	4.236	5.389	4.020	3.533	3.445	4.893	4.340
P值	0.007	0.006	0.004	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

性及随时间而变的差异性，可能会存在不随时间而变但对个体而异以及不随个体而变但随时间而异的遗漏变量问题，因此，本文建立以时间个体双固定效应基础的空间误差和空间滞后模型进行生态效率的收敛性分析。

(1) 绝对β收敛分析

由表5可知，长江中下游粮食主产区整体耕地利用生态效率β系数显著为负，表明长江中下游粮食主产区整体存在绝对收敛，即各粮食主产区耕地利用生态效率水平最终将收敛于同一稳态水平，耕地利用生态效率较低的粮食主产区相对拥有更高的增长速度，各粮食主产区内部差距在未来时间轴上将逐步缩小。分区看得知，江苏省绝对收敛β系数绝对值最大，收敛速度最快，其次为湖南、湖北；而安徽省耕地利用生态效率β系数未能通过显著性检验，江西省耕地利用生态效率收敛β系数却显著为正，表明该粮食主产区域耕地利用生态效率不存在绝对收敛，可能是因为区域经济实力相对较弱，农业技术创新溢出效应相对不足，导致中心粮食主产区极化效应占据主导，使得邻域粮食主产区各项资源要素流向中心粮食主产区，使得初始耕地利用生态效率水平落后区域所具备的后发优势未能得到有效发挥。是否存在着发散趋势呢？需进一步加以探究。

(2) 条件β收敛分析

为进一步探究长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率的发展趋势，基于本文的理论假设及耕地利用生态效率相关的影响因素研究，选取了人均GDP、地区科学技术支出额、财政支农支出额等6个控制变量，以探究

表4 耕地利用生态效率的空间相关性检验

Table 4 Spatial correlation test of ecological efficiency of cultivated land use

检验参数	绝对β收敛	条件β收敛
LM-lag	5.1924**	5.7675**
RLM-lag	30.2790***	3.8697**
LM-error	4.2157**	4.3796**
RLM-error	29.3022***	6.2765**

注：*、**、***分别表示在10%、5%、1%水平上通过显著检验，下同。

表5 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率的绝对β收敛结果

Table 5 Absolute β convergence results of cultivated land use ecological efficiency in the major grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region

回归系数	长江中下游粮食主产区整体	安徽省	湖北省	湖南省	江西省	江苏省
β	-0.3131***(-6.72)	-0.0637(-1.53)	-0.1536***(-2.60)	-0.1625*(-1.73)	0.1748*(2.06)	-0.3340***(-2.33)
ρ	0.1035***	-0.083*	-0.0941**	0.2338**	0.0953*	-0.2817**
R ²	0.3115	0.4050	0.2705	0.3084	0.4485	0.3960
收敛速度	0.0341	不收敛	0.0152	0.0161	不收敛	0.0370
样本数/个	71	16	17	14	11	13

注：括号内为基于市（州）为聚类变量的聚类稳健标准误下的Z值统计量，下同。

耕地利用生态效率的条件收敛趋势。

由表6可知,从整体上看,长江中下游粮食主产区整体耕地利用生态效率在科技水平、农户收入水平、灌溉水平以及空间溢出效应的共同影响下以1.01%的速度条件收敛,即随着地区科技水平、农户收入水平以及耕地生产条件的提高,耕地利用生态效率将会呈现逐年缩小的态势;分区域看,除江苏省存在假性条件收敛外,其余四大粮食主产区均存在条件 β 收敛,其中江西省地区的收敛趋势最为明显,其次为湖南、湖北、安徽。从各控制变量看,各因素对不同粮食主产区耕地利用生态效率的影响方向和程度并不一致,经济发展水平、技术投入、政府支农力度等影响着各粮食主产区各类生产要素的流动规模、交流频率等,从而导致耕地利用的地区差异性;农户收入水平则会影响农户的主观行为态度,从而影响其耕地投入行为;复种指数和灌溉指数作为耕地利用生产的基本条件,其影响着耕地产出效能。具体的计量分析结果如下:①人均GDP在粮食主产区整体、安徽、湖南的系数均为负的显著性相关,表明在2007—2018年地区经济发展水平的提高并未对耕地利用生态效率产生正向的促进作用,而是进一步地拉大了各粮食主产区耕地利用生态效率水平,主要的原因可能在于过去十几年经济发展水平的提高,其对农业的贡献主要在于促进机械化的发展,将农业发展模式由“有机农业”模式转变为“石油农业”模式,使得非期望产出急剧增加;②地区科技水平在各粮食主产区(除安徽省、湖南省)均通过了不同程度的正向显著性检验,表明科技投入在推动地区产业结构调整以及区域可持续发展的同时也对农业生产产生了溢出效应,一定程度上也促进了地区农业发展水平;③财政支农支出额在各粮食主产区对耕地利用生态效率的影响效应不一致,主要原因在于各粮食主产区支农政策的不同,支农财政补贴倾向于购置机械、化肥农药等补贴的区域,财政支农支出额对耕地利用生态效率存在负向影响效应,支农财政补贴倾向于兴修水利支出、生态种植补贴区域,则影响效应相反;④农户收入水平在各粮食主产区(除江西)均通过了正向显著性检验,表明农户自身资本的提高,对耕地利用生态效率具有正向促进效应,其本质原因在于农户收入水平的提高改变了农

表6 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率条件 β 收敛结果

Table 6 Conditional β convergence results of cultivated land use ecological efficiency in the major grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze Region

回归系数	长江中下游粮食 主产区整体	安徽省	湖北省	湖南省	江西省	江苏省
β	-0.1054*(-2.51)	-0.1416***(-2.76)	-0.0746*(-1.83)	-0.1909**(-2.01)	-0.4621**(-2.14)	-0.2173(-1.51)
$\ln AG$	-0.0866*(-1.75)	-0.0812**(-2.11)	-0.0144(-0.57)	-0.1819**(-1.99)	-0.0257(-0.92)	0.0381(0.28)
$\ln TE$	0.0891*(1.79)	0.0407(1.35)	0.0862*(2.03)	-0.0235(-0.59)	0.221*(1.84)	0.2558*(1.86)
$\ln GOV$	-0.0139(0.31)	-0.0969**(-2.32)	-0.1125**(-2.34)	0.0277(0.63)	-0.399**(-1.99)	0.2461*(1.75)
$\ln FRE$	0.201*** (3.38)	0.1687*** (2.89)	0.0643*(1.79)	0.2511** (2.53)	0.0313(0.90)	0.2228*(1.69)
$\ln RCI$	0.0032(0.05)	0.0381(1.16)	0.0314(1.48)	-0.1585*(-1.68)	-0.5205**(-2.36)	0.0549(0.83)
$\ln IRI$	0.0970*(1.88)	0.0083(0.06)	0.0423*(1.68)	0.0017(0.02)	0.1981*(1.75)	0.2764** (2.06)
λ	0.1113***	0.0986**	0.0824**	0.2011**	0.2316*	0.2682**
R^2	0.4089	0.5125	0.3304	0.4813	0.4712	0.3238
收敛速度	0.0101	0.0139	0.0144	0.0193	0.0564	0.0223
样本数/个	71	16	17	14	11	13

户对生活追求的偏好,从而影响了农户在耕地利用过程中的投入行为;⑤复种指数对各粮食主产区的影响效应不一致,且部分区域不显著,而灌溉指数则对各粮食主产区的影响效应一致,且对耕地利用生态效率水平的提高具有显著的促进效应。上述结果表明,长江中下游粮食主产区可通过加大科学技术投入、转变支农政策、改善耕地利用生产条件等政策措施促进耕地利用生态效率的协同提升。

4 结论与建议

4.1 结论

基于耕地利用生态效率内涵,本文从“资源—社会经济—环境”复合系统的投入、期望产出及非期望产出三个层面构建耕地利用生态效率评价指标体系,运用SBM-Undesirable模型测度2007—2018年长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率,并运用核密度估计、空间收敛分析模型对其时空演变特征和收敛性进行分析,得到如下结论:

(1) 2007—2018年间长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率整体处于0.7水平上下,并呈现小幅波动下降的趋势,各粮食主产区效率差异明显,效率损失主要源于投入冗余所带来的投入非效率。表明长江中下游粮食主产区在12年的农业现代化推进过程中,虽然在耕地利用过程中逐步实现了由机械化等物质生产要素对劳动力生产要素的替代的转化,带来了期望产出的增加,但也不可避免地产生了投入冗余及大量的碳排放,耕地未能得到最大化的可持续集约利用,还存在较大的资源集约与环境保护的发展空间。

(2) 长江中下游粮食主产区整体耕地利用生态效率始终处于两级分化的态势,整体内部差异逐渐扩大,但逐步趋于稳定,各粮食主产区内部差异演变具有较大分异性,其中湖北省、江西省耕地利用生态效率差距经历了“先扩大后缩小”的演变历程,安徽省耕地利用生态效率内部差距在逐步扩大,而湖南省、江苏省耕地利用生态效率内部差距在逐渐减小。表明2007—2018年间长江中下游粮食主产区耕地利用复合系耦合协调度并未得以改善,反而呈现下降趋势,各粮食主产区耕地利用复合系统在区域经济发展水平及资源禀赋的差异下呈现着不同的演变路径,经济发展水平及资源禀赋相对完善区域耕地利用复合系统协调性相对更优,反之则相对更劣,区域差异则相对越大。

(3) 长江中下游粮食主产区整体存在显著的空间收敛,各粮食主产区收敛态势具有差异性,其中江苏省绝对收敛系数及江西省的条件收敛系数绝对值最大,收敛趋势最为显著。表明耕地利用生态效率水平较低地区存在“后发赶超”的趋势,最终整个长江中下游地区将收敛于同一稳态水平,即耕地利用复合系统最终将在农户行为、农业生产结构及政府行为共同的趋同下趋于协调发展,逐步协同迈入耕地利用生态效率高水平阶段,耕地可持续集约化利用程度将大幅提高,各区域耕地利用生态文明建设亦将逐渐趋同。

4.2 建议

(1) 树立低碳农业发展意识,合理确定区域耕地利用各生产要素的投入水平。研究表明,长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率损失主要源于投入、非期望产出冗余及经济产出不足,尤其是劳动力的投入冗余,表明耕地利用过程中各投入要素的规模结构不合理。因此,在未来的耕地利用生产过程中,对于劳动力投入过度区域,应积极发展乡村二三产业,促进农业劳动力就地转移;对于土地投入过度区域,应合理规范土地流转规模,积极推进农业现代化,促进耕地的集约化利用;对资本投入及非期望产出过度区域,应培育农户低碳农业发展意识,改进农药化肥使用结构等措施以减少不合理的化

肥农药施用总量,着力转变以化肥、农药及柴油等为体系的“化学”农业模式。

(2) 建立高低粮食主产区协同机制,发挥先进带后进作用,缩小区域差异。研究表明长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率处于两极分化的态势,内部差距逐步扩大。因此区域内耕地利用生态效率较低的市(州)应积极创建与耕地利用生态效率较高市(州)的协同机制,优化耕地利用生产的空间联动环境,促进高低粮食主产区在农户种植行为、耕地生态利用技术及政府环境规制相关政策等方面互通有无,推动各粮食主产区耕地利用综合系统协同发展,缩小各区域效率差距。

(3) 因地制宜,分区施策,发挥各地资源禀赋优势推进耕地利用生态文明建设。研究表明长江中下游粮食主产区存在显著的 β 收敛,各粮食主产区收敛态势具有差异性。因此,各粮食主产区应从自身的生态特点出发,遵循“因地制宜、分区施策、协调发展”的原则,对于经济发达且耕地利用生态效率水平较高的粮食主产区,其拥有较高的农业生产技术及财政支持,重点应关注耕地利用复合系统的协调发展,发挥其在整个长江中下游粮食主产区的示范效应;对于欠发达地区,不应片面追求耕地利用复合系统的协调发展,而应着重优化耕地利用各生产要素的投入结构、推进农田高标准建设,促进耕地的集约规模化利用,同时积极探索低碳耕地利用技术,如循环农业与生物肥料等技术的研究,发展生态绿色、高效安全的现代农业技术,以高物质技术装备支撑农业生产,有效提高生态效率水平。

值得注意的是,有关耕地利用生态效率的探讨仍存在以下三点值得进一步讨论:(1) 本文所构建的耕地利用生态效率评价指标体系中非期望产出仅考虑了二氧化碳,由于相关理论与实证研究的缺乏,未能将耕地的面源污染纳入评价指标体系,因此进一步的研究可基于采土实验方法确定各粮食主产区自身耕地利用面源污染系数,从而精确量化耕地利用过程所带来的面源污染量;(2) 本文基于市域尺度,选取了长江中下游粮食主产区71个市(州)作为研究靶向,探究了其耕地利用生态效率的收敛性,未来可进一步基于更微观尺度(县域)或者从农户的视角构建耕地利用生态效率评价体系,或能更深刻地反映长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率差异及其收敛性;(3) 限于篇幅,本文未能进一步探讨长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率的时空格局及其演变的驱动机制,这类问题亦有待进一步研究探析。

参考文献(References):

- [1] GUO L P, ERDA L. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China. *Chemosphere-Global Change Science*, 2001, 3(4): 413-418.
- [2] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究. *中国土地科学*, 2019, 33(12): 45-54. [DING B G, YANG S W, ZHAO Y, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China. *China Land Science*, 2019, 33(12): 45-54.]
- [3] 游和远,吴次芳. 农地集约利用的碳排放效率分析与低碳优化. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 224-234. [YOU H Y, WU C F. Analysis of carbon emission efficiency and optimization of low carbon for agricultural land intensive use. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(2): 224-234.]
- [4] 沈伟腾,胡求光,李加林,等. 中国区域生态效率的时空演变及空间互动特征. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2149-2162. [SHEN W T, HU Q G, LI J L, et al. Spatio-temporal evolution and spatial interaction of regional ecological efficiency in China. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2149-2162.]
- [5] SEPPALA J, MELANEN M. How can the eco-efficiency of a region be measured and monitored?. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 117-130.
- [6] 常新锋,管鑫. 新型城镇化进程中长三角城市群生态效率的时空演变及影响因素. *经济地理*, 2020, 40(3): 185-195. [CHANG X F, GUAN X. Temporal and spatial evolution and influencing factors of ecological efficiency in Yangtze Riv-

- er Delta Urban Agglomeration in the process of new urbanization. *Economic Geography*, 2020, 40(3): 185-195.]
- [7] ZHANG J X, LIU Y M, CHANG Y, et al. Industrial eco-efficiency in China: A provincial quantification using three-stage data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 143(12): 238-249.
- [8] 杨琛. 中国工业生态效率时空差异及收敛性分析. 宏观经济研究, 2020, (7): 106-113, 137. [YANG C. An analysis on the spatio-temporal difference and convergence of China's industrial eco-efficiency. *Macroeconomics*, 2020, (7): 106-113, 137.]
- [9] 侯孟阳, 姚顺波. 空间视角下中国农业生态效率的收敛性与分异特征. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 116-126. [HOU M Y, YAO S B. Convergence and differentiation of agricultural ecological efficiency in China from a spatial perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 116-126.]
- [10] 张仁杰, 董会忠. 基于省级尺度的中国工业生态效率的时空演变及影响因素. 经济地理, 2020, 40(7): 124-132, 173. [ZHANG R J, DONG H Z. Spatio-temporal evolution and influencing factors of Industrial ecological efficiency in China based on provincial scale. *Economic Geography*, 2020, 40(7): 124-132, 173.]
- [11] 周俊俊, 樊新刚, 杨美玲, 等. 县域生态效率影响因素分析及趋势预测: 以宁南山区三县为例. 水土保持研究, 2020, 27(5): 318-325. [ZHOU J J, FAN X G, YANG M L, et al. Comparison on driving mechanism of county ecological efficiency: With three counties in the mountainous area of Southern Ningxia, China as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 27(5): 318-325.]
- [12] JOUNI K, THOMAS P S. Beyond eco-efficiency: A re-silience perspective business strategy and the environment. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 17(7): 411-419.
- [13] 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. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 412-423. [HUANG H P, WANG Z P. Spatial-temporal differences and influencing factors of agricultural land eco-efficiency in Jiangxi province: Based on the dual perspective of non-point source pollution and carbon emission. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2): 412-423.]
- [14] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1945-1961. [WANG Z F, LIU Q F. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yangtze River Economic Belt and its interactive response with tourism economy. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1945-1961.]
- [15] YU Y, HU H, ZHANG Y, et al. Metafrontier eco-efficiency and its convergence analysis for China: A multidimensional heterogeneity perspective. *Emerging Markets Finance and Trade*, 2019, 55(7): 1531-1549.
- [16] MUHAMMAD A, AMJATH-BABU T S, SREEJITH A, et al. Climatic variability and thermal stress in Pakistan's rice and wheat systems: A stochastic frontier and quantile regression analysis of economic efficiency. *Ecological Indicators*, 2018, 89(6): 496-506.
- [17] 李姣, 周翠烟, 张灿明, 等. 基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究. 经济地理, 2019, 39(2): 199-206. [LI J, ZHOU C Y, ZHANG C M, et al. Study on total factor ecological efficiency of Dongting Lake Ecological Economic Zone in Hunan province based on ecological Footprint. *Economic Geography*, 2019, 39(2): 199-206.]
- [18] 王一超, 赵桂慎, 彭澎, 等. 基于能值与生命周期评价耦合模型的农业系统生态效率评估: 以北京市郊区为例. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1311-1320. [WANG Y C, ZHAO G S, PENG P, et al. Evaluation of agro-system eco-efficiency using a coupling model of energy analysis and life cycle assessment: A case study in the suburbs of Beijing city, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1311-1320.]
- [19] RASHIDI K, SHABANI A, FARZIPOOR SAENR R. Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: A case study in the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) countries. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105(15): 241-252.
- [20] QIAO Z, CHEN H. Club convergence analysis of regional ecological efficiency in China. *Pacific Economic Review*, 2020, 25(3): 384-401.
- [21] 盖美, 聂晨. 环渤海地区生态效率评价及空间演化规律. 自然资源学报, 2019, 34(1): 104-115. [GAI M, NIE C. Ecological efficiency evaluation and spatial evolution in Bohai Rim Region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 104-115.]
- [22] 曾贤刚, 牛木川. 高质量发展下长江经济带生态效率及影响因素. 中国环境科学, 2020, 40(2): 906-918. [ZENG X G, NIU M C. Measurement and influence factors of ecological efficiency of the Yangtze River Economic Belt under high quality development conditions. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 906-918.]
- [23] 杨亦民, 王梓龙. 湖南工业生态效率评价及影响因素实证分析: 基于DEA方法. 经济地理, 2017, 37(10): 151-156, 196. [YANG Y M, WANG Z L. Evaluation of industrial ecological efficiency and empirical analysis of influencing factors in Hunan province: Based on DEA method. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 151-156, 196.]
- [24] 李根, 刘家国, 李天琦. 考虑非期望产出的制造业能源生态效率地区差异研究: 基于SBM和Tobit模型的两阶段分

- 析. 中国管理科学, 2019, 27(11): 76-87. [LI G, LIU J G, LI T Q. Study on regional differences in energy ecological efficiency of Manufacturing industry considering undesired output: A two-stage analysis based on SBM and Tobit models. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 76-87.]
- [25] 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. 水土保持研究, 2018, 25(2): 274-280, 287. [YANG Z, CHEN W X, ZHU L J. Spatial econometric analysis of the influence of urbanization on the utilization efficiency of cultivated land in Henan province. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 274-280, 287.]
- [26] 罗能生, 田梦迪, 杨钧, 等. 高铁网络对城市生态效率的影响: 基于中国277个地级市的空间计量研究. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 1-10. [LUO N S, TIAN M D, YANG J, et al. The Impact of high-speed rail network on urban ecological efficiency: A Spatial measurement study based on 277 prefecture-level cities in China. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(11): 1-10.]
- [27] SCHALTEGGER S, STURM A. Okologische rationalitat. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.
- [28] WBCSD. Eco-efficiency: Leadership for Improved Economic and Environmental Performance. Geneva: WBCSD, 1996.
- [29] EUROPEAN E A. Making sustainability accountable: Eco-efficiency, resource productivity and innovation. Environmental Science Press, 2009, 68(1): 52-59.
- [30] AJZEN I. The theory of planned behavior. Organizational behavior and Human Decision Processes, 1991, 50(2): 179-211.
- [31] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [32] ZHENG J, LIU X, BIGSTEN A. Ownership structure and determinants of technical efficiency: An application of data envelopment analysis to Chinese Enterprises (1986-1990). Journal of Comparative Economics, 1998, 26(3): 465-484.
- [33] 王周伟, 崔百胜, 张元庆. 空间计量经济学现代模型与方法. 北京: 北京大学出版社, 2017. [WANG Z W, CUI B S, ZHANG Y Q. Modern Models and Methods of Spatial Econometrics. Beijing: Peking University Press, 2017.]
- [34] 叶阿忠. 非参数计量经济学. 天津: 南开大学出版社, 2005. [YE A Z. Nonparametric Econometrics. Tianjin: Nankai University Press, 2005.]
- [35] 林光平, 龙志和, 吴梅. 我国地区经济收敛的空间计量实证分析: 1978—2002年. 经济学(季刊), 2005, (s1): 67-82. [LIN G P, LONG Z H, WU M. An Empirical analysis of the spatial econometrics of regional economic convergence in China: 1978-2002. China Economic Quarterly, 2005, (s1): 67-82.]
- [36] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1): 217-232.
- [37] 李波, 张俊飏. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究. 经济地理, 2012, 32(7): 135-140. [LI B, ZHANG J B. Study on carbon effects and spatial differences based on changes in China's agricultural land use. Economic Geography, 2012, 32(7): 135-140.]
- [38] ANSELIN L. Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

Regional differences and spatial convergence in the ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the Yangtze Region

LIU Meng-ba^{1,2}, ZHANG An-lu^{1,2}, WEN Gao-hui³

(1. School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Ecology and Environmental Economics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. School of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The basic premise of realizing the "trinity" protection of cultivated land in China is to explore the cooperative mechanism of "resource, social economy and environment" and its evolution of cultivated land use ecosystem. Based on the connotation of cultivated land use ecological efficiency, we, from the perspective of the "socioeconomy-resources-environment"

composite system, build a cultivated land use evaluation index system of ecological efficiency, and use the SBM - Undesirable model, kernel density estimation and spatial convergence model to quantitatively depict the dynamic evolution of the cultivated land use ecological efficiency of the 71 cities (prefectures) in the Middle and Lower Yangtze Region. The results showed that: (1) From 2007 to 2018, the overall ecological efficiency of cultivated land utilization in the study area was at medium level, with obvious differences among the main grain producing areas. The efficiency loss was mainly caused by input non-efficiency induced by input redundancy, among which labor input redundancy was the highest. (2) From the perspective of time dimension, the overall ecological efficiency of cultivated land use in the main grain-producing areas in the Yangtze Region can be divided into two levels, the overall internal differences have been expanding, but gradually tend to be stable. The evolution of the internal differences among the main grain-producing areas is highly differentiated. Among them, the gap in the ecological efficiency of cultivated land use in the major grain producing areas in Hubei and Jiangxi experienced a process of "expanding first and then narrowing". The internal gap in the ecological efficiency of cultivated land use in the major grain producing areas in Anhui province was gradually widening, while that in Hunan and Jiangsu provinces was gradually narrowing. (3) From the perspective of space dimension, considering the spatial spillover effect, the main grain producing areas in the Yangtze Region as a whole show significant absolute β convergence, and the condition convergence rate is 1.01% under the joint influence of science and technology level, farmers' income level and irrigation water equality. However, the convergence trend of major grain-producing areas varies in different regions. Jiangsu has the highest absolute value of absolute β convergence coefficient, followed by Hunan province and Hubei, while Anhui and Jiangxi have no absolute β convergence, but Jiangxi has the most obvious β convergence trend, while Jiangsu has the pseudo convergence. Therefore, in order to improve the ecological efficiency of cultivated land in the main grain producing areas in the Middle and Lower Yangtze River, it is necessary to raise the awareness of low-carbon agricultural development and a coordination mechanism of the main grain producing areas, adjust measures to local conditions and implement policies in different regions.

Keywords: cultivated land use, ecological efficiency; regional differences; spatial convergence; major grain-producing areas; Middle and Lower Yangtze Region