

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.029.

吕添贵, 付舒斐, 胡晗, 等. 农业绿色转型约束下耕地利用生态效率时空分异特征及空间效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 269-279.

Lyu Tianguai, Fu Shufei, Hu Han, et al. Spatiotemporal Differentiation Characteristics and Spatial Effects of Ecological Efficiency of Cultivated Land Use Based on the Constraints of Agricultural Green Transformation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 269-279.

农业绿色转型约束下耕地利用生态效率 时空分异特征及空间效应

吕添贵^{1,2}, 付舒斐², 胡晗³, 耿灿¹

(1.江西财经大学 财税与公共管理学院, 南昌 330013;

2.江西财经大学 应用经济学院(数字经济学院), 南昌 330013; 3.湖南大学 公共管理学院, 长沙 410082)

摘要:[目的]基于农业绿色转型约束探究粮食主产区耕地利用生态效率时空分异特征及空间效应,可为制定生态耕种政策提供理论支撑。[方法]运用SBM-Undesirable模型对长江中游粮食主产区2005—2019年耕地利用生态效率进行评价,结合Dagum基尼系数和地理时空加权回归模型分析其时空特征及影响因素。[结果](1)2005—2019年长江中游粮食主产区耕地利用生态效率总体由0.425上升至0.674,效率值空间差异较大但差异度有所下降;(2)耕地利用生态效率空间非均衡性显著且逐渐缩小,基尼系数由0.265降至0.185,地区空间非均衡程度表现为湖南地区>湖北地区>江西地区;(3)人均GDP、有效灌溉率和财政支农力度对研究区耕地利用生态效率呈正向影响,复种指数和城乡收入差距呈负向影响。[结论]长江中游粮食主产区耕地利用生态效率呈上升趋势,但空间非均衡性显著,受自然、经济社会、技术和政策多重因素影响。未来应激发农户耕地绿色生产积极性,降低污染排放量,以及推进耕地绿色利用技术均衡化,提高区域整体资源配置效率。

关键词:农业绿色转型; 耕地利用; 生态效率; 时空分异特征; 长江中游粮食主产区

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)01-0269-11

Spatiotemporal Differentiation Characteristics and Spatial Effects of Ecological Efficiency of Cultivated Land Use Based on the Constraints of Agricultural Green Transformation

Lyu Tianguai^{1,2}, Fu Shufei², Hu Han³, Geng Can¹

(1.School of Public Finance & Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 2.School of Applied Economics (School of Digital Economics), Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 3.School of Public Administration, Hunan University, Changsha, 410082, China)

Abstract:[Objective] The aim of this study is to explore the spatiotemporal differentiation and spatial effects of ecological efficiency in cultivated land use in major grain producing areas based on the constraints of agricultural green transformation can provide theoretical support for formulating ecological farming policies. [Methods] The SBM-Undesirable model was applied to evaluate the cultivated land use ecological efficiency in the middle reaches of Yangtze River from 2005 to 2019, and its spatiotemporal characteristics and influencing factors were analyzed by combining the Dagum Gini coefficient and geotemporal weighted regression model. [Results] (1) The overall ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing regions in the middle reaches of the Yangtze River increased from 0.425 to 0.674 from 2005 to 2019, with a large spatial difference in efficiency values but a decrease in the degree of difference. (2) The spatial non-equi-

收稿日期:2022-12-04

修回日期:2023-06-12

资助项目:国家自然科学基金项目(42261049);江西省自然科学基金项目(20232BAB203061)。

第一作者:吕添贵(1986—),男,福建龙岩人,博士,副教授,研究方向为城乡发展与土地利用。E-mail:lvtianguai@jxufe.edu.cn

通信作者:付舒斐(1997—),女,江西新余人,助理研究员,研究方向为耕地利用转型。E-mail:fshufei@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

librium of the ecological efficiency of cultivated land use was significant and gradually decreasing, with the Gini coefficient decreasing from 0.265 to 0.185 and the degree of regional spatial disequilibrium was shown as Hunan>Hubei>Jiangxi. (3) Per capita GDP, effective irrigation rate and financial support for agriculture had a positive impact on the ecological efficiency of cultivated land use in the study area, while the multiple cropping index and urban-rural income gap had a negative impact. [Conclusion] The ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River was on the rise, but the spatial imbalance was significant, and influenced by multiple factors such as nature, economy, society, technology, and policies. In the future, farmers should be motivated to produce green cultivated land and reduce pollution emissions, as well as to promote balanced green cultivated land use technologies to improve the overall resource allocation efficiency of the region.

Keywords: green transformation of agriculture; cultivated land use; ecological efficiency; spatiotemporal differentiation characteristics; main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River

粮食主产区耕地生态利用直接关系到保障国家粮食安全和实现农业绿色转型发展^[1],然而,在当前人口增长和城镇化双重驱动下,耕地非农化、面源污染和农业碳排放问题愈演愈烈^[2-3],严重威胁粮食主产区耕地生态状况。面对耕地地力退化的现实困境,耕地利用生态效率俨然成为当前土地领域研究焦点。为此,中央政府提出农业绿色转型发展方案,要求耕地利用过程中融合面源污染防治、低碳等绿色理念约束,以应对耕地绿色转型发展新挑战^[4]。在此背景下,如何界定农业绿色转型约束下粮食主产区耕地利用生态效率,评价其时空分异特征及空间效应,对促进粮食主产区耕地生态耕种具有重要现实意义。

国内外学者从不同方面对耕地利用生态效率进行诸多探讨,在概念界定方面,认为耕地利用生态效率是生产要素投入所实现的社会经济正外部性最高而环境污染负外部性最低的综合指数^[5-6];在效率测度方法方面,随着效率内涵由“资源—社会经济”二维系统发展为“资源—社会经济—环境”三维系统^[7-8],从主要运用 SFA 模型、传统 DEA 模型^[9]转变为 Malmquist 指数^[10]、DEA 混合模型及 SBM 模型等来测度^[11-12];在时空分析方面,普遍采用空间自相关^[13]、泰尔指数^[14]和核密度估计^[15]等方法,从区域整体与局部两个层面解析其时空分布及演化特征;在影响因素方面,多采用空间计量模型和地理加权回归模型对农户行为主体意识、耕地资源禀赋和农业社会化服务等方面因素展开分析^[16];在研究尺度上,侧重于省、市和县域等中宏观尺度^[17]。综上,已有研究成果对揭示农业绿色转型约束下耕地利用生态效率内涵具有现实指导意义。但由于耕地利用过程中农药化肥对土壤污染和农业活动对大气环境的综合影响,需规避传统上采取碳排放或面源污染单一维度的农

业绿色转型约束评价,应将两者统一纳入耕地生态利用过程。此外,学界对耕地利用生态效率的空间分异程度及其影响因素时间非平稳变化过程关注较少,忽略此可能导致区域政策制定的靶向性失误^[18]。长江中游粮食主产区作为农业绿色生产转型重点区域,过去粗放式耕地生产模式造成区域耕地生态问题日渐凸显,评价该区域耕地利用生态效率已成为实现农业绿色转型生产不可避免的现实要求,探讨其时空演化过程更具典型性。鉴于此,本研究以长江中游粮食主产区内 31 个地市为研究单元,基于农业绿色转型背景界定碳排放与面源污染约束的耕地利用生态效率内涵,运用 SBM-Undesirable 模型测度 2005—2019 年耕地利用生态效率演化规律,采用 Dagum 基尼系数分解其区域分异程度,并运用地理时空加权回归模型探究耕地利用生态效率影响因素的时间非平稳变化过程,以期为农业绿色转型约束下实现耕地生态利用提供理论支撑。

1 研究区概况与理论框架

1.1 研究区概况

长江中游粮食主产区覆盖湖北、湖南和江西 3 省,耕地总面积约 11.3 万 km²,约占中国耕地总面积的 9.25%,具体包括武汉城市圈(包括武汉、黄石、宜昌、襄阳等 13 市)、长株潭城市群(包括长沙、株洲、湘潭、衡阳等 8 市)和环鄱阳湖城市群(包括南昌、景德镇、萍乡、九江等 10 市)。该区域既是全国现代农业生产基地,为保障国家粮食安全发挥着重要作用,也是重要的生态功能区,承担着重要的水土保持、气候调节和污染物降解等功能^[19]。然而,其农业生产长期依赖于过度地力开发与超量化肥农药使用,耕地非农化、面源污染和农业碳排放等状况逐渐加剧,导致

区域耕地生态环境约束趋紧。为应对耕地利用污染约束,国务院 2015 年批复《长江中游城市群发展规划》指出大力发展高产高效现代农业和生态农业^[20],在后续国家政策中提出农业全面绿色转型思考,并将碳排放与面源污染作为关键指标纳入绿色转型。因此科学评价粮食主产区耕地利用生态效率水平并促进耕地生态治理,是长江中游粮食主产区实现农业绿色转型的必然选择。

1.2 耕地利用生态效率理论框架

在耕地利用过程中加以“面源污染防治”“低碳产业链”和“固碳增汇”绿色理念约束^[4],是实现农业绿色转型进而影响耕地生态利用的逻辑起点,而耕地利用生态效率恰好蕴含着农业绿色转型的内在要素,其生态利用实现路径是耕地生产投入要素优化配置、负外部性持续减少以及正外部性不断增加的过程,其生态利用目标是实现资源消耗减少、社会经济期望产出最大化和生态污染非期望产出最小化,更是“资源—社会经济—生态”系统耦合协调的综合映射^[21]。

事实上,耕地作为复杂的生产系统,其生态利用过程还蕴含多重特性^[22]。一是资源节约特性。耕地生产通过推动生产方式向集约化和规模化转变,实现优化耕地、劳动和资本等多重要素配置,寻求减少资源的消耗以满足人类需求是社会经济持续发展的前提^[23];同时限制污染投入要素的使用是降低生产过程中负外部性重要手段;二是产出高效特性。耕地产出效益中粮食产量与农业产值的提升,能带来社会经济的发展,特别是现代化技术应用保障资源系统的持续投入与整合革新,并降低农业污染排放,协调环境系统;三是环境友好特性。反映耕地生态环境与社会经济是相辅相成的关系,强调耕地持续产出以降低碳排放和面源污染为底线,实现环境系统承载力与资源消耗程度均衡存在^[24]。综上,耕地利用生态效率以农业绿色转型理念为约束、投入要素优化配置为基础,最大化的社会、经济、生态效益期望产出和最小化的环境非期望产出为结果,依托“资源—社会经济—生态”耦合协调构建耕地利用生态效率理论分析框架(图 1)。

2 指标选取与研究方法

2.1 指标选取与数据来源

2.1.1 指标选取 本研究借鉴已有文献基础,采用地均投入和产出指标,包含资源、社会经济和环境等方面^[25-26],能准确反映单位面积耕地利用生态效率(表 1)。(1)投入指标将劳动力、资本和资源与耕地资源利用过程相结合,表征资源维度。劳动力投入选

取地均种植业从业人员;资本投入选取地均化肥、农药、农膜使用量和地均农业机械总动力来衡量;水资源投入选取农业地均用水量来衡量;(2)期望产出选取地均种植业产值和地均粮食产量,反映耕地生产经营所获成果,表征社会经济维度;(3)非期望产出选取面源污染排放和耕地碳排放,是对环境维度的表征。耕地面源污染由农药化学制品使用残留造成,因清单分析法具有较准确、方便等优点,被广泛运用于农业面源污染计算^[27]。为此,本研究采取此方法选取化肥氮磷流失量、农药流失量和农膜残留量对耕地面源污染量进行核算。而耕地碳排放直接源于化学制品和农机化石燃料的使用,间接源于农业翻耕引起的碳流失及灌溉过程中的电能利用,故本研究借鉴已有碳排放模型和相关碳源系数进行测算^[28]。

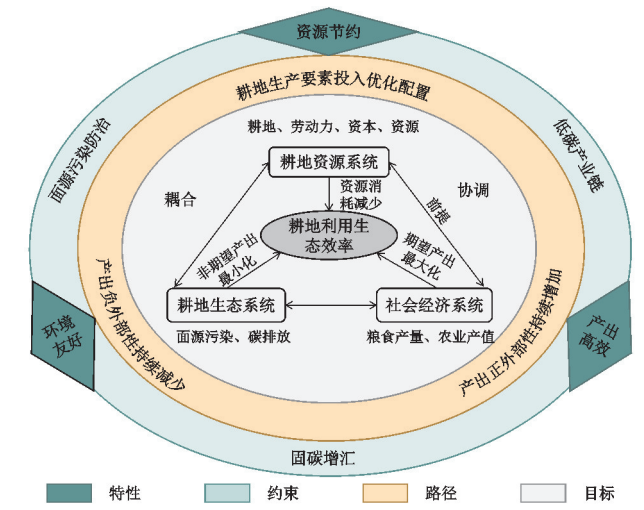


图 1 农业绿色转型约束下耕地利用生态效率内涵
Fig. 1 The connotation of ecological efficiency in cultivated land use under the constraints of agricultural green transformation

2.1.2 数据来源

(1) 各指标数据来源于 2006—2020 年的《中国农村统计年鉴》《江西统计年鉴》《湖南统计年鉴》《湖北统计年鉴》及各地级市统计年鉴和社会统计公报;(2) 面源污染相关系数参考《第一次全国污染普查:肥料流失、农药流失、地膜残留系数手册》^[29];(3) 少量数据缺失问题,进行内插法和外推法处理;(4) 行政区划及 DEM 数据来源于全国地理信息资源系统(www.webmap.cn)。

2.2 研究方法

2.2.1 SBM-Undesirable 模型 SBM-Undesirable 模型能有效解决忽略耕地生产中非期望产出而导致的效率结果偏差问题^[11]。假定耕地利用有 n 个决策单元,每个决策单元中 m 个投入 X_{i0} , S_1 个期望产出 Y_{r0}^g 和 S_2 个非期望产出 Y_{r0}^b ,则向量可表示为 $x \in R^m$, $y^g \in R^{S_1}$, $y^b \in R^{S_2}$ 。定义投入变量、期望产出和非期

望产出的矩阵分别为 $X=[x_1,\cdots,x_n]\in R^{m\times n},Y^g=[y_1^g,\cdots,y_n^g]\in R^{s1\times n},Y^b=[y_1^b,\cdots,y_n^b]\in R^{s2\times n}$,其中 X,Y^g,Y^b 均大于 0,生产可能性集定义 $p=\{(X,Y^g,Y^b)|x\geq X\lambda,Y^g\geq Y^g\lambda,Y^b\geq Y^b\lambda,\lambda\geq 0\}$,表达式为:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

表 1 耕地利用生态效率投入产出指标

Table 1 Input output indicators for ecological efficiency of cultivated land use

指标	变量	变量说明	指标内涵
投入	劳动力投入	地均种植业从业人员(人/hm ²)	表示单位面积耕地上种植业从业人口规模
		地均农药使用量(t/hm ²)	表示单位面积耕地上农药投入量
	资本投入	地均化肥使用量(折纯量)(t/hm ²)	表示单位面积耕地的化肥投入量
		地均农膜使用量(t/hm ²)	表示单位面积耕地的农膜投入量
		地均农业机械总动力(kW/hm ²)	表示单位面积耕地的技术投入量
期望产出	水资源投入	农业地均用水总量(m ³ /hm ²)	表示单位面积耕地的水资源投入量
	农业总产值	地均农业产值(万元/hm ²)	表示单位面积耕地的经济效益产出
	粮食总产量	地均粮食产量(t/hm ²)	表示单位面积耕地的社会效益产出
非期望产出	耕地碳排放	地均化肥、农药、农膜、农业机械、农业灌溉、农业播耕碳排放量(t/hm ²)	表示单位面积耕地对大气的污染
	耕地面源污染	地均化肥氮、磷流失量、农药无效利用量、农膜残留量(t/hm ²)	表示对单位面积耕地对土壤的污染

2.2.2 Dagum 基尼系数 Dagum 基尼系数按子群分解为区域内差异、区域间差异和超变密度,用以衡量各子群内单元间目标函数差距,目标函数均值高子群与均值低子群间差距,子群间离群值跨群交叉程度^[30]。该方法能较优考察耕地利用生态效率空间分异程度及其来源,定义式为:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^2 \bar{Y}} \tag{2}$$

式中: $y_{ji}(y_{hr})$ 为 $j(h)$ 子群内单元 $i(r)$ 的耕地利用生态效率; \bar{Y} 为所有单元效率均值; k 为子群个数; n 为单元总数。 G 越大,则效率空间差异度越大。子群 j 的基尼系数 G_{jj} ,子群 j 与子群 h 间基尼系数 G_{jh} 分别为:

$$G_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}|}{2n_j^2 \bar{Y}_j} \tag{3}$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h)} \tag{4}$$

$G=G_w+G_{nb}+G_t$,其中地区内差异 G_w 、地区间差异 G_{nb} 和超变密度 G_t 公式如下:

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} X_0 = X\lambda + S^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - S^g; y_0^b = y^b\lambda + S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中: S^-,S^g,S^b 分别是投入、期望产出和非期望产出的松弛变量;目标函数 $\rho^*(0\leq \rho^*\leq 1)$ 关于 S^-,S^g,S^b 严格递减。当 $S^-=S^g=S^b=0,\rho^*=1$ 时,决策单元有效;当 S^-,S^g,S^b 中有一个不等于零, $0\leq \rho^*<1$ 时,决策单元无效。

$$G_{nb} = \sum_{j=2h=1}^k \sum_{j=1}^{j-1} G_{jh} D_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) \tag{6}$$

$$G_t = \sum_{j=2h=1}^k \sum_{j=1}^{j-1} G_{jh} (1-D_{jh}) (P_j S_h + P_h S_j) \tag{7}$$

2.2.3 GTWR 模型 地理时空加权回归模型(GT-WR)将每个观测空间单元在不同时点进行局部回归,可以表征耕地利用生态效率变化影响因素的时空非平稳性,公式如下:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i) X_{it} + \sum_{k=1}^k \beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i) W X_{it} + \epsilon_i \tag{8}$$

式中: μ_i, ν_i, t_i 分别是第 i 个研究单元的经度、维度和观测时点; $\beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i)$ 为第 k 个变量的回归系数,表示第 k 个自变量 X_k 对因变量的影响; X_{it} 为外生解释变量的向量; W 为时空权重矩阵; ϵ_i 为残差。本研究引入 HUANG 等设计的 ArcGIS 插件 GTWR^[31] 进行测算,选择高斯距离函数,并采用赤池信息准则(AIC)确定带宽。

3 结果与分析

3.1 耕地利用生态效率时序演变特征分析

利用 DEA Solver Pro5 软件,计算 2005—2019 年不考虑非期望产出 DEA-CCR 模型和考虑非期望

产出的 SBM-Undesirable 模型效率值,结果均呈上升趋势。且考虑非期望产出效率值均低于不考虑非期望产出效率值,均值分别为 0.543,0.837,表明耕地利

用非期望产出要素制约了耕地利用效率提升。因此,考虑非期望产出的效率值更符合实际,本研究选取 SBM-Undesirable 模型测算结果进行分析(图 2)。

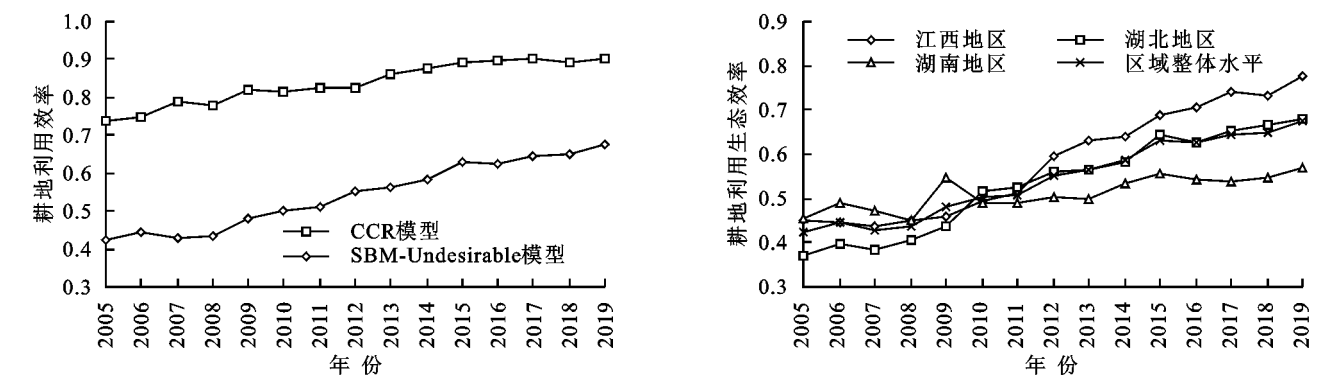


图 2 耕地利用效率变动趋势

Fig. 2 Trend of changes in cultivated land use efficiency

(1) 总体上看,耕地利用生态效率由 2005 年的 0.425 增加至 2019 年的 0.674,表明资源集约节约与耕地环境保护协同存在提升空间。分阶段看,2005—2010 年处于“波动”期,该阶段效率值增幅不明显,这与农村剩余劳动力加快转移导致耕地撂荒现象频发,多以资源环境来换取农业经济增长和耕地利用较粗放密切相关;2010—2019 年处于“稳增”期,究其原因,自 2010 年国务院将“长江中游地区”列为国家重点开发区,在共建共享的理念下制定生态文明考核办法,对耕地碳排放和面源污染以及粗放利用起到明显约束作用。

效率区为 6 个,分布于江西地区中部及湖北地区西部,低效率区有荆州、潜江和常德等 7 市,占比较大达到 23%,以单核形式集中于湖南与湖北地区交界处,可见此类地区亟待通过调整耕地生产投入配比,从而提升耕地利用生态效率;2010—2015 年,高效率区仅增一市,中效率区向南迁移,低效率区减少至 4 市;至 2019 年,高效率区分布范围扩大,增加至 9 市,占比提高到 30%,主要集中在湖北和江西地区,呈现双核连片分布特征,表明区域耕地生产投入资源配置趋向合理,中效率区及低效率区主要分布在湖南地区。整体上,研究区呈现高一低效率区“多核心”分布特征,反映在农业绿色转型约束下地区间耕地生态利用水平差异显著。

(2) 分区域看,江西、湖北和湖南地区耕地利用生态效率由 0.449,0.372,0.454 上升至 0.776,0.678,0.567,增幅分别达到 72.83%,82.26%和 24.89%,可见,江西和湖北地区耕地利用生态水平较明显改善,而湖南地区提升缓慢,究其缘由,随着近年来湖南地区乡镇工业迅猛发展,工业和生活污染排放进入农业环境,加之不合理的耕作施肥制度使耕地碳排放和面源污染加大,抑制了地区耕地生态水平。而效率均值呈现江西地区、湖北地区、湖南地区依次递减特征,分别为 0.584,0.534,0.507,且各区域之间差距逐渐增大,呈现明显空间非均衡性。

(2) 从变化趋势看,耕地利用生态效率(Z 轴)空间异质性特征显著,东西方向趋势线(X 轴)从较平滑到自西向东呈缓慢增长趋势,而南北方向趋势线(Y 轴)呈 U 型分布,并由南高北低到南北持平演化,且 U 型弯曲度减弱(图 4)。即研究区耕地利用生态效率高值区处于南北地区,低值区多处于中部地区,区域差异虽明显但差异度下降,其原因主要在于,一方面随着区域间经济发展水平差距缩小,耕地生产条件趋于收敛致使耕地生产投入行为差异性减弱;另一方面,在农业绿色转型生产导向下,耕地利用生态效率低值区会积极向高值区汲取相关政策及技术以优化耕地利用生态状况,进而导致耕地利用生态效率区域差异不断缩小。

3.2 耕地利用生态效率区域差异特征分析

3.3 耕地利用生态效率空间非均衡性特征分析

选取 2005 年、2010 年、2015 年、2019 年作为典型年份,结合农业绿色转型下耕地利用生态效率特征并参考效率分类相关研究^[6]。采取自然断点法将效率值划分为低、较低、中等、较高和高效率区 5 类,对其空间格局及发展趋势进行绘制分析(图 3)。

运用 Dagum 基尼系数及其分解方法得到 2005—2019 年长江中游粮食主产区及地区耕地利用生态效率基尼系数和分解值(表 2)。

(1) 在 2005 年,高效率区有鹰潭、娄底、湘潭和株洲 4 市,占比 13%,主要分布在湖南地区南部,中

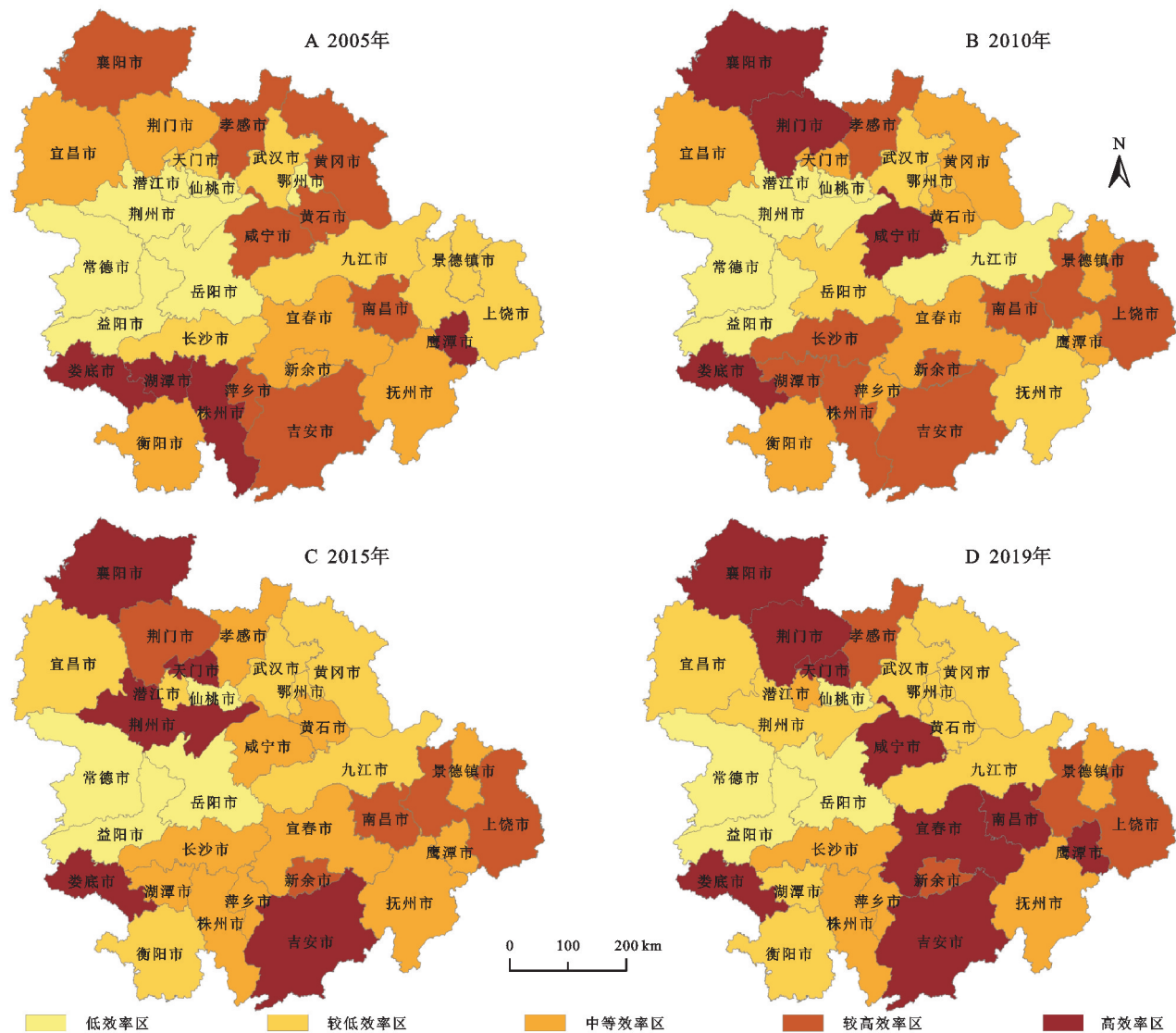


图 3 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率空间格局演变

Fig. 3 Evolution of the spatial pattern of ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River

从图 5 可知,研究区耕地利用生态效率基尼系数由 0.265 降至 0.185,表明空间非均衡特征明显,区域差距逐渐缩小。从区域内基尼系数看,湖北和湖南地区空间非均衡程度也呈现缩小趋势,基尼系数分别从 0.212,0.334 下降至 0.177,0.157,降幅分别为 16.51%和 53.0%。而江西地区基尼系数较稳定,主要在 0.10~0.15 间波动。其次,湖南地区空间非均衡程度最大,基尼系数均值为 0.224,究其原因,在湖南地区中衡阳、常德和益阳等城市发展以工业制造业为重点,对农业生态问题有所忽视,江西地区最小,基尼系数均值为 0.127,主要由于江西农业基础优良且产业门类齐全,因而耕地利用生态效率水平整体较为均衡。

从区域间基尼系数上看,耕地利用生态效率在江西—湖南地区和湖北—湖南地区的空间非均衡程度均有所缩小,分别从由 0.326,0.367 和下降至 0.244,

0.201,降幅分别为 25.15%和 45.23%,而江西—湖南地区间的空间非均衡程度较稳定,基尼系数基本在 0.15~0.20 波动。总体而言,区域间空间非均衡程度湖北—湖南地区、江西—湖南地区和江西—湖北地区基尼系数均值分别为 0.240, 0.225,0.185,数值整体较小,反映出各区域间由于地缘相近,农业绿色生产交流合作较便捷和频繁,促进了区域间耕地利用生态效率差异不断缩小。

从区域差距空间分异看,空间非均衡性由区域内差异、区域间差异和超变密度共同构成。其中,超变密度是区域差距最主要来源,对整体差距的平均贡献率达到 40.50%,反映三大地区耕地利用生态效率的区域间差距与区域内差距的交互作用对区域整体效率差距起主要影响,两者的平均贡献率分别为 31.42%和 28.08%。此外,从演变趋势看,区域内差异的贡献率较稳定,由

2005 年的 27.47%微升至 2019 年的 29.66%。区域间差距贡献率先减后增,总体由 38.28%增加至 46.28%。超变密度贡献率先增后减,总体由 34.25%下降至

24.06%。可见,区域间与区域内的交互影响有所减弱,而区域间差距有所增加,未来缩小区域间差距是改善耕地利用生态效率空间不均衡的重点。

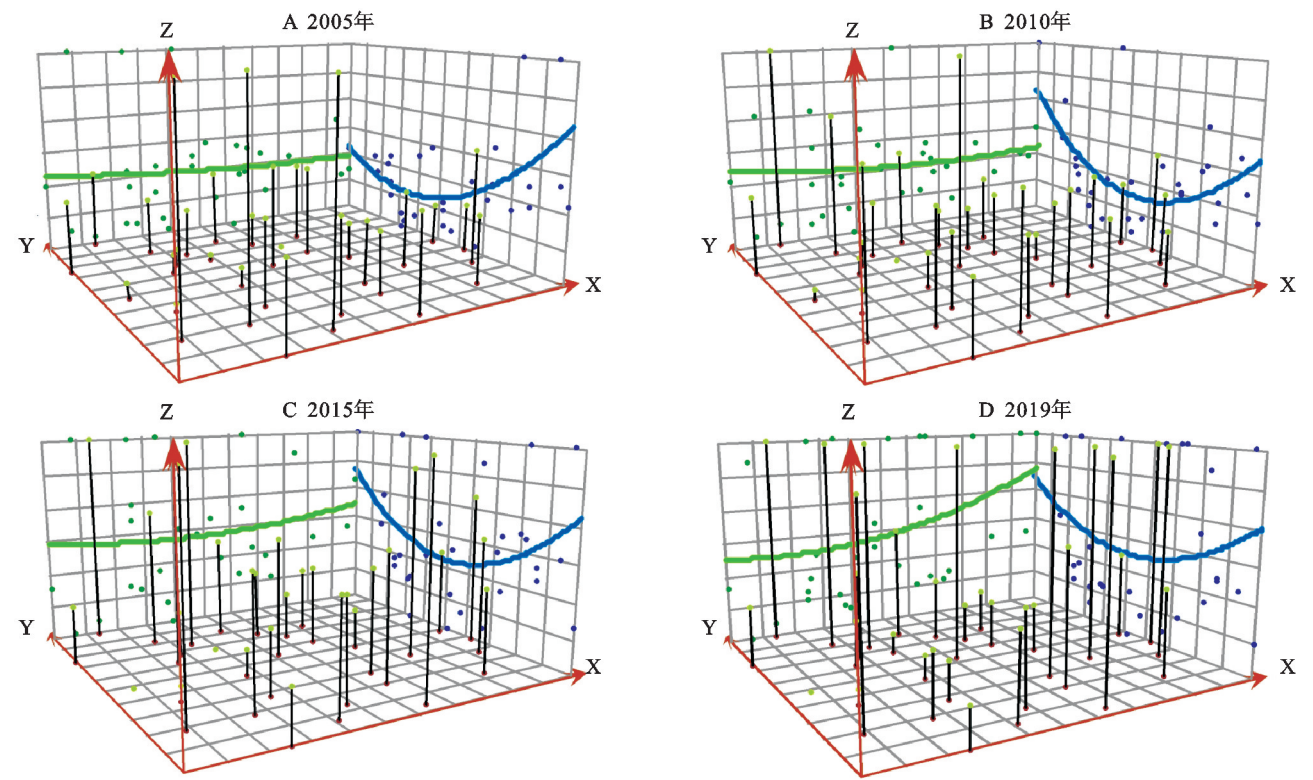


图 4 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率变化趋势

Fig. 4 Trends in ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River

表 2 耕地利用生态效率基尼系数及贡献率

Table 2 Gini coefficient and contribution rate of ecological efficiency of cultivated land use

年份	总体基尼系数	区域内基尼系数			区域间基尼系数			贡献率/%		
		江西地区	湖北地区	湖南地区	江西地区—湖北地区	江西地区—湖南地区	湖北地区—湖南地区	区域内	区域间	超变密度
2005	0.265	0.126	0.212	0.334	0.185	0.326	0.367	27.47	38.28	34.25
2006	0.218	0.108	0.191	0.301	0.165	0.256	0.289	29.65	28.81	41.53
2007	0.231	0.162	0.223	0.272	0.214	0.243	0.271	31.41	23.78	44.81
2008	0.177	0.115	0.177	0.219	0.162	0.185	0.210	31.95	22.34	45.71
2009	0.228	0.106	0.257	0.278	0.200	0.236	0.276	32.40	12.27	55.34
2010	0.200	0.112	0.252	0.198	0.200	0.163	0.236	34.02	8.88	57.10
2011	0.189	0.098	0.231	0.198	0.184	0.162	0.225	33.69	10.22	56.08
2012	0.190	0.148	0.204	0.186	0.186	0.192	0.207	33.52	22.97	43.51
2013	0.207	0.175	0.194	0.199	0.204	0.247	0.213	31.58	37.62	30.80
2014	0.198	0.141	0.193	0.232	0.184	0.225	0.222	32.01	27.35	40.63
2015	0.190	0.129	0.193	0.218	0.173	0.211	0.221	32.43	26.08	41.49
2016	0.191	0.116	0.201	0.207	0.194	0.210	0.207	30.94	33.10	35.96
2017	0.189	0.108	0.192	0.177	0.172	0.233	0.226	30.03	42.88	27.09
2018	0.191	0.136	0.183	0.177	0.175	0.238	0.223	30.56	40.27	29.17
2019	0.185	0.127	0.177	0.157	0.175	0.244	0.201	29.66	46.28	24.06
均值	0.203	0.127	0.205	0.224	0.185	0.225	0.240	31.42	28.08	40.50

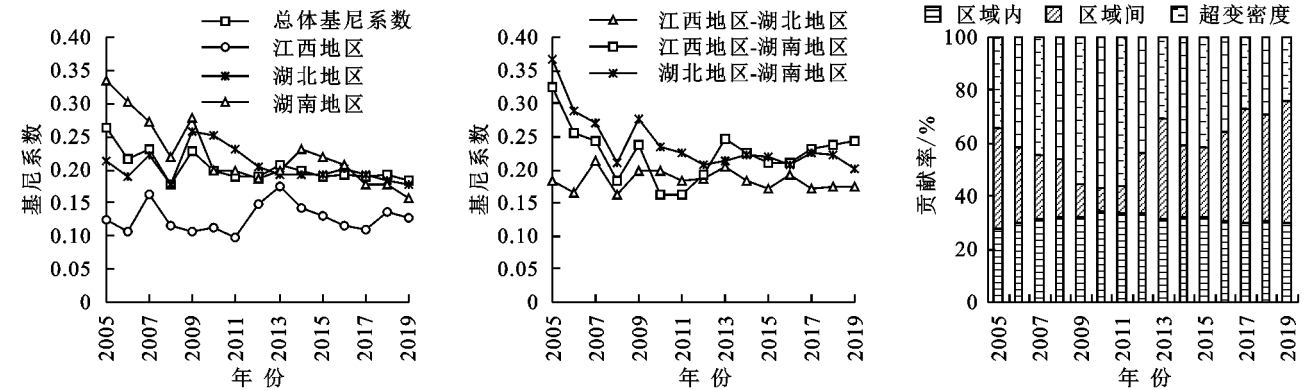


图 5 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率基尼系数变动及贡献率

Fig. 5 Gini coefficient variation and contribution rate of ecological efficiency of cultivated land use

in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River

3.4 耕地利用生态效率变化影响因素与提升路径

3.4.1 耕地利用生态效率影响分析过程 结合农业绿色转型过程中,耕地利用生产特征及其影响因素研究^[10,16-19],采用 GTWR 模型,选取耕地利用生态效率为因变量,从自然、经济社会、技术和政策 4 个维度选取人均耕地面积、复种指数、人均 GDP、城乡收入差距、种植结构、有效灌溉率、农业技术人员和财政支农力度作为解释变量(表 3)。计算可得耕地利用生态效率全局莫兰指数,得到 I 值为 0.199, *p* 值为 0.026,

表示耕地利用生态效率在 95% 的置信度下呈正集聚特征,因此保证了采用 GTWR 模型合理性。为避免出现伪回归现象,将标准化后的变量进行多重共线性检验,将方差膨胀因子(VIF)大于 10 的变量剔除,最终确定复种指数、人均 GDP、城乡收入差距、有效灌溉率和财政支农力度 5 个指标作为 GTWR 模型的解释变量。GTWR 回归结果的拟合系数 *R*² 和调整后的拟合系数 *R*² 分别为 0.767, 0.762, 模型拟合优度较高,可解释耕地利用效率总变异过程。

表 3 耕地利用生态效率影响因素指标选取

Table 3 Selection of factors influencing ecological efficiency of cultivated land use

维度	解释变量	影响因素计算说明	VIF
自然	人均耕地面积	种植业人口/耕地面积(hm ² /人)	10.233
	复种指数	农作物播种面积/耕地面积(hm ² /hm ²)	3.591
社会经济	人均 GDP	人均 GDP(元)	2.366
	城乡收入差距	城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入(元/元)	1.503
	种植结构	经济作物播种面积/粮食作物播种面积(hm ² /hm ²)	10.037
技术	有效灌溉率	有效灌溉面积/耕地面积(hm ² /hm ²)	6.326
	农业技术人员	农业技术人员数量(个)	12.290
政策	财政支农力度	政府财政支农支出/财政总支出(万元/万元)	1.311

3.4.2 耕地利用生态效率的影响因素分析

识别区域耕地利用生态效率主导影响因素是实现耕地差异化管理基础。根据回归系数绝对值大小来确定影响因素作用强度,具体如下:

(1)耕地利用生态效率影响因素的整体分析。由图 6 可知,研究区域的整体影响因子作用大小依次为:财政支农力度(1.251)>人均 GDP(0.810)>复种指数(−0.622)>有效灌溉率(0.598)>城乡收入差距(−0.398)。其中,财政支农力度、人均 GDP 及有效灌溉率对耕地利用生态效率呈正向影响,财政支农力度和有效灌溉率影响力加强,回归系数分别由 1.116、0.551 升至 1.300、0.618。人均 GDP 影响力有所减弱,回归系数由 0.957 降至 0.526。人均 GDP 表明地区经济发展状

况,财政支农力度反映政府对农业重视程度,有效灌溉率反映农业技术水平。一方面,经济发展可带来农业科技进步及要素投入加大,从而促进农业现代化步伐,推动耕地的集约化、规模化生产。另一方面,增加农业财政补贴能鼓励生产并改善农业生产条件,当前农业补贴多倾向于节水灌溉、生态农产品、内涵式农业等方面,使耕地生态效率得以改善。而复种指数回归系数由 −0.568 降至 −0.578,呈负向影响,影响力有所加强,表明该地区复种指数越高,农药化肥及其机械投入产生的污染排放相应增加。此外,城乡收入差距回归系数 −0.229 降至 −0.431,呈负向影响,影响力有所加强,表明该地区城乡居民收入差距过大导致农村青壮年劳动力流失,而农业社会化服务缺失难

以维系耕地生态利用稳定性与持续性。

(2)耕地利用生态效率影响因素的区域分析。事实上,各影响因素对三大区域耕地利用生态效率空间分异格局作用力存在显著差异。(1)江西地区起主导作用的是有效灌溉率和财政支农力度,回归系数均值分别为 1.204,1.240。此外,人均 GDP 和城乡收入差距的影响也较强,回归系数均值分别为 0.896 和 -0.921;(2)湖南地区 2005—2008 年主导影响因子

为复种指数(-1.034)和人均 GDP(0.805),2009 年后财政支农力度代替人均 GDP 成为主导因素之一,回归系数为 1.091。此外,有效灌溉率的影响也较大,回归系数均值达到 0.311;(3)湖北地区 2005—2015 年主导影响因素是财政支农力度和人均 DGP,回归系数均值分别为 1.422,0.735,到 2016 年主导影响因素人均 GDP 替换为复种指数(-0.670)。各区域影响因素 GTWR 结果方向与整体一致性,分析同样适用。

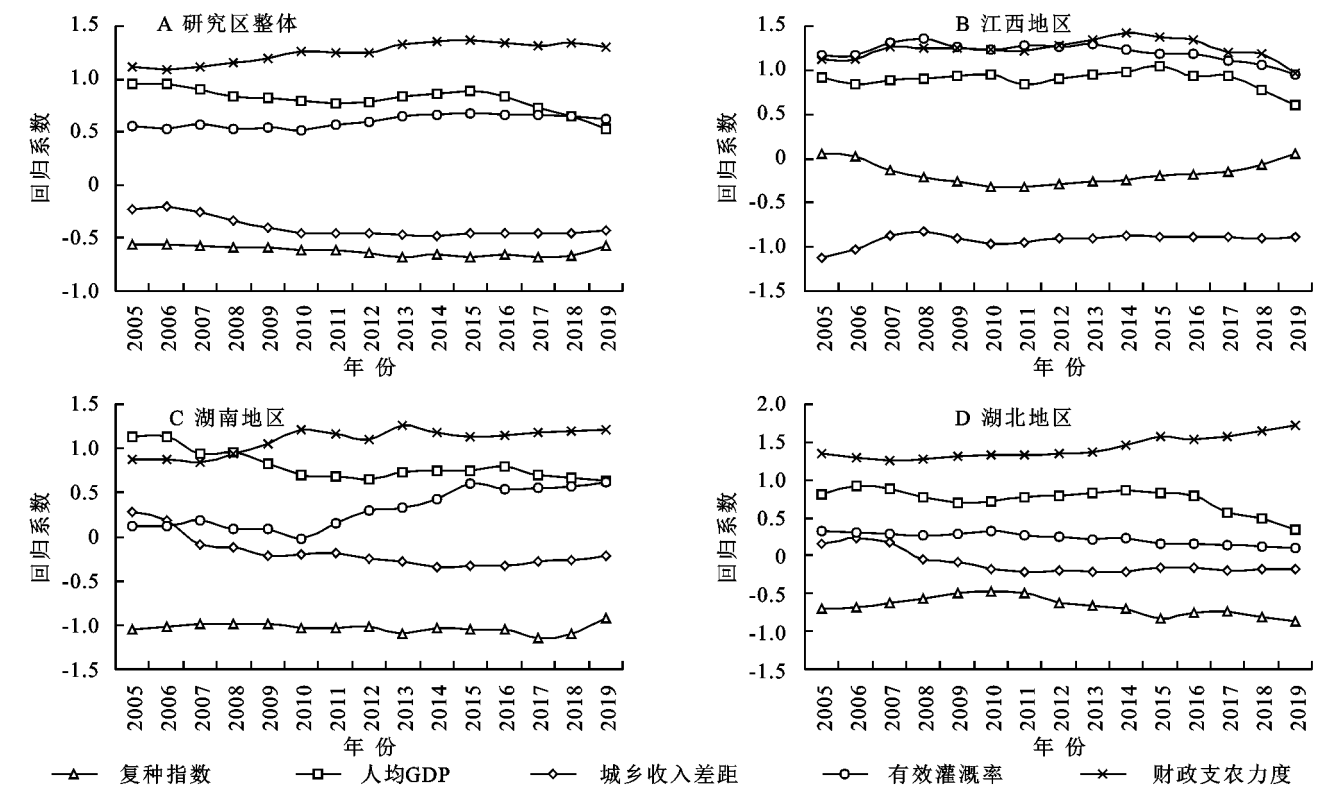


图 6 耕地利用生态效率的影响因素回归系数变化趋势

Fig. 6 Trends in regression coefficients of influencing factors on ecological efficiency of cultivated land use

3.4.3 提升耕地利用生态效率的优化路径 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率均值达到 0.837,基尼系数均值为 0.203,区域之间差距显著,面临着碳排放量和面源污染双重农业绿色转型约束,仍然存在提升空间。

推广,着重改良生物化肥,提高耕地单位面积绿色产出,加快耕地由粗放型经营向集约化经营转变,提升农户绿色生产收入水平;二是建立农业生态数据共享平台,衔接区域间耕地绿色利用社会化服务,提高有效灌溉水平;三是优化城乡土地、资本和人力资源等绿色要素配置,因地制宜推广高效优质多抗新品种,加强农业技术人员交流,制定差异化战略并加强区域合作,缩小城乡耕地绿色生产技术差距。

(1) 激发农户耕地绿色生产积极性,降低污染排放量。首先,农户作为耕地直接生产者,要加大生态耕地宣传力度,提高农户生态化种植意识。通过财政支农力度提高耕地生态保护补贴,鼓励农民减少农药化肥用量,多施用有机肥、绿肥,创新农业生态补偿机制,制定实物或经济奖励措施,提高农户耕地保护积极性^[32]。其次,长江中游地区各级政府应加强耕地轮作休养,避免耕地地力透支,顺应土壤生态修复规律,促进农户生态耕种良性循环。

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率由 2005 年的 0.425 上升至 2019 年的 0.674,均值为 0.543,年均增加 0.017,总体呈现波动上升趋势。区域呈江西地区>湖北地区>湖南地区且“多核心”分布特征。

(2) 推进耕地绿色利用技术均衡化,提高区域整体资源配置效率。一是加强区域测土配方施肥技术

(2) 长江中游粮食主产区耕地利用生态效率存在明显空间非均衡性,但空间非均衡性逐渐缩小。湖北和湖南地区区域内空间非均衡程度均有所缓解,江西地区无明显变化;江西—湖南地区和湖北—湖南地区区域间空间非均衡程度均有所缩小,而江西—湖南地区区间较稳定;空间分异主要受到超变密度影响,区域内差异和区域间差异的贡献率较低。

(3) 人均 GDP、有效灌溉率和财政支农力度对耕地利用生态效率起正向作用,复种指数和城乡收入差距起负向作用。江西地区主导影响因素为有效灌溉率和财政支农力度,湖南地区由复种指数和人均 GDP 转为复种指数和财政支农力度,湖北地区由人均 GDP 和财政支农力度转为复种指数和财政支农力度;未来应激发农户耕地绿色生产积极性,降低污染排放量,以及推进耕地绿色利用技术均衡化,提高区域整体资源配置效率。

4.2 讨论

值得注意的是,提升耕地利用生态效率是一项复杂的系统工程,全面把握农业绿色转型发展契机,是实现耕地生态利用的关键。囿于数据可获性,本研究仅考虑自然、社会经济、技术和政策等客观影响因素,未拓展农户技术采纳度和生态耕种理念等主观因素。此外,选取碳排放和面源污染作为农业绿色转型的核心要素以反映出耕地绿色利用水平,未考虑耕地利用碳吸收过程及畜禽粪便、农田固废处理不当等对耕地生态环境的影响,探讨多重要素叠加作用,是未来构建耕地生态利用转型政策支撑体系研究方向之一。

参考文献:

- [1] 张立新,朱道林,谢保鹏,等.中国粮食主产区耕地利用效率时空格局演变及影响因素:基于 180 个地级市的实证研究[J].资源科学,2017,39(4):608-619.
Zhang L X, Zhu D L, Xie B P, et al. Spatiotemporal pattern evolvement and driving factors of cultivated land utilization efficiency of the major grain producing area in China[J]. Resources Science, 2017,39(4):608-619.
- [2] Liu Y S, Zou L L, Wang Y S. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China in recent 40 years[J]. Land Use Policy, 2020,97(1):104794.
- [3] 孔祥斌.中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J].中国土地科学,2020,34(12):1-10.
Kong X B. The Connotation and realization path of ecological governance of cultivated land protection in China [J]. China Land Science, 2020,34(12):1-10.
- [4] 中华人民共和国农业农村部.建设国家农业绿色发展先行区促进农业现代化示范区全面绿色转型实施方案 [R].北京:中华人民共和国农业农村部,2022.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular on printing and distributing the Implementation Plan to Establish National Pioneering Zones of Green Agriculture and Accelerate Green Transformation of Modern Agriculture Demonstration Zones [R]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2022.
- [5] 黄海潮,雷鸣,孔祥斌,等.中国耕地空间格局变化及其生态系统服务价值响应[J].水土保持研究,2022,29(1):339-348.
Huang H C, Lei M, Kong X B, et al. Spatial pattern change of cultivated land and response of ecosystem service value in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):339-348.
- [6] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis-framework based on resource efficiency[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):534-546.
- [7] 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.
Zhang H M, Song G. Eco-efficiency of cultivated land use and the internal coordination in Heilongjiang Reclamation Area[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2019(4):160-168,178.
- [8] 李博,张文忠,余建辉.碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素[J].经济地理,2016,36(9):150-157.
Li B, Zhang W Z, Yu J H. Decomposition and influence factors of district difference of China agricultural production efficiency under the constraint of carbon emission[J]. Economic Geography, 2016,36(9):150-157.
- [9] 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.
Wang L J, Li H. Cultivated land use efficiency and the regional characteristics of its influencing factors in China: By using a panel data of 281 prefectural cities and the stochastic frontier production function[J]. Geographical Research, 2014,33(11):1995-2004.
- [10] 盖兆雪,孙萍,张景奇.环境约束下的粮食主产区耕地利用效率时空演变特征[J].经济地理,2017,37(12):163-171.
Gai Z X, Sun P, Zhang J Q. Cultivated land utilization efficiency and its difference with consideration of environmental constraints in Major Grain Producing Area

- [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12):163-171.
- [11] 王建鹏,尹士,马立军,等.基于非期望产出的河北省耕地生态效率时空演变及收敛性分析[J].*水土保持研究*, 2022, 29(6):81-89.
- Wang J P, Yin S, Ma L J, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of cultivated land ecological efficiency in Hebei province based on SBM model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6):81-89.
- [12] 吕添贵,吴次芳,王利平.欠发达地区城市土地利用效率测度及其优化路径研究:以江西省为例[J].*生产力研究*, 2013(9):73-75, 96.
- Lv T G, Wu C F, Wang L P. Research on the measurement and optimization path of urban land use efficiency in under developed regions: A case study of Jiangxi province [J]. *Productivity Research*, 2013(9):73-75, 96.
- [13] 吴郁玲,张佩,李佳.长江经济带耕地利用效率时空演变特征及提升路径研究[J].*农业现代化研究*, 2021, 42(4):579-588.
- Wu Y L, Zhang P, Li J. The spatio-temporal evolution characteristics and improvement paths of farmland utilization efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(4):579-588.
- [14] 匡兵,卢新海,韩璟,等.考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化[J].*农业工程学报*, 2018, 34(11):1-8.
- Kuang B, Lu X H, Han, et al. Regional differences and dynamic evolution of cultivated land use efficiency in major grain producing areas in low carbon perspective[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(11):1-8.
- [15] Cao W, Zhou W, Wu T, et al. Spatial-temporal characteristics of cultivated land use eco-efficiency under carbon constraints and its relationship with landscape pattern dynamics[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141:109140.
- [16] 谢花林,张道贝,王伟,等.鄱阳湖生态经济区耕地利用效率时空差异及其影响因素分析[J].*水土保持研究*, 2016, 23(5):214-221.
- Xie H L, Zhang D B, Wang W, et al. Analysis of cultivated land use efficiency and its influencing factors for Poyang Lake Ecological Economic Zone[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):214-221.
- [17] 吕添贵,孔安妮,汪立.基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断[J].*水土保持研究*, 2021, 28(2):343-350.
- Lv T G, Kong A N, Wang L. Evaluation of regional ecological security and obstacle diagnosis of Ecological Civilization Demonstration Area Based on PSR model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2):343-350.
- [18] 王海力,韩光中,谢贤健.基于 DEA 模型的西南地区耕地利用效率时空格局演变及影响因素分析[J].*长江流域资源与环境*, 2018, 27(12):2784-2795.
- Wang H L, Han G Z, Xie X J. Spatiotemporal pattern evolution based on the DEA model and its driving factors of arable land utilization efficiency of the southwest region in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12):2784-2795.
- [19] 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时空格局与演变趋势[J].*中国土地科学*, 2021, 35(2):50-60.
- Liu M B, Zhang A L, Wen G H. Temporal and spatial pattern and evolution trend of cultivated land use ecological efficiency in the main grain producing areas in the lower Yangtze Region [J]. *China Land Science*, 2021, 35(2):50-60.
- [20] 王佳宁,罗重谱.新时代中国区域协调发展战略论纲[J].*改革*, 2017(12):52-67.
- Wang J N, Luo C P. The outline of China's regional coordinated development strategy in new era [J]. *Reform*, 2017(12):52-67.
- [21] 吕添贵,谢花林,李洪义,等.休耕政策实施的偏离风险、形成路径与防范体系研究[J].*中国土地科学*, 2019, 33(4):51-58.
- Lv T G, Xie H L, Li H Y, et al. Deviation risk of policy implementation of cultivated land fallow and its prevention system [J]. *China Land Science*, 2019, 33(4):51-58.
- [22] 张凤荣.厘清耕地生态保护的内涵[J].*青海国土经略*, 2021(5):37-39.
- Zhang F R. Clarify the connotation of ecological protection of cultivated land [J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, 2021(5):37-39.
- [23] 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.
- 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 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2):412-423.
- [24] Bin Y, Zhang Q W, Lei Z, et al. Exploring the eco-efficiency of cultivated land utilization and its influencing factors in China's Yangtze River Economic Belt, 2001—2018 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294:112939.

Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3):793-810.

[21] Fu J, Zhang Q, Wang P, et al. Spatio-temporal changes in ecosystem service value and its coordinated development with economy: A case study in Hainan Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4):970.

[22] 孙久文,崔雅琪,张皓.黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J].*自然资源学报*,2022,37(7):1673-1690.

Sun J W, Cui Y Q, Zhang H. Spatio-temporal pattern and mechanism analysis of coupling between ecological protection and economic development of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7):1673-1690.

[23] 李辉,周启刚,李斌,等.近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(3):654-666.

Li H, Zhou Q G, Li B, et al. Spatiotemporal change and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Three Gorges Reservoir Area in the past 30 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(3):654-666.

[24] 国洪磊,周启刚.三峡库区蓄水前后土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].*水土保持研究*,2016,23(5):222-228.

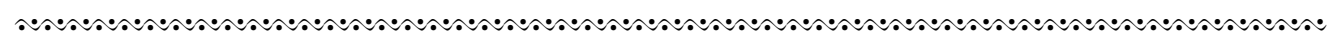
Guo H L, Zhou Q G. Effect of land use change on ecosystem service value pre and post the water storage in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):222-228.

[25] 张中浩,聂甜甜,高阳,等.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J].*长江流域资源与环境*,2022,31(5):1086-1100.

Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. Study on temporal and spatial characteristics of coupling coordination correlation between ecosystem services and economic-social development in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(5):1086-1100.

[26] Li T N, Li D Z, Liang D L, et al. Coupling coordination degree of ecological-economic and its influencing factors in the counties of Yangtze River economic belt [J]. *Sustainability*, 2022, 14(22):15467.

[27] Fan Q D, Yang X Y, Li H. Research on the change of ecosystem services and their trade-off in urbanization area [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022, 20(4):3299-3310.



(上接第 279 页)

[25] 文高辉,刘蒙罢,胡贤辉,等.洞庭湖平原耕地利用生态效率空间相关性与空间效应[J].*地理科学*,2022,42(6):1102-1112.

Wen G H, Liu M B, Hu X H, et al. Spatial correlation and spatial effect of cultivated land use ecological efficiency in the Dongting Lake Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022,42(6):1102-1112.

[26] 匡远配,张容.农地流转对粮食生产生态效率的影响[J].*中国人口·资源与环境*,2021,31(4):172-180.

Kuang Y P, Zhang R. Effect of farmland transfer on the ecological efficiency of food production[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021,31(4):172-180.

[27] 潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的 SBM 模型分析[J].*生态学报*,2013,33(12):3837-3845.

Pan D, Ying R Y. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(12):3837-3845.

[28] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].*水土保持学报*,2011,25(5):203-208.

Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,25(5):203-208.

[29] 中华人民共和国生态环境部.第二次全国污染源普查公报[J].*环境保护*,2020,48(18):8-10.

Ministry of Ecology and Environment the People's Republic of China. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020,48(18):8-10.

[30] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997,22(4):515-531.

[31] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatial-temporal variation in house prices[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(3):383-401.

[32] 陈美球.构建耕地共同保护机制:理论基础、制约因素与实现路径[J].*农业经济与管理*,2022(3):13-19.

Chen M Q. Construction of common protection mechanism of cultivated land: theoretical basis, restrictive factors and realization path[J]. *Agricultural Economics and Management*, 2022(3):13-19.