碳效应研究

“双碳”目标下山东省耕地利用生态效率的时空演变及影响因素

郑东杰[1,2], 陈照亮[1,2], 程秋月[1], 管 辉[1,2]
〔1.青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266000;
2.青岛市智慧(绿色)岩土技术创新中心, 山东 青岛 266000〕

摘 要: [目的]针对山东省在农业绿色低碳转型过程中耕地利用生态效率测算不全面,时空分异规律不明确和驱动机制未厘清的问题,科学测度并系统评价其耕地利用生态效率及其影响因素,为区域耕地生态治理与农业绿色低碳转型提供精准科学依据。[方法]运用基于非期望产出的Super-SBM模型、Malmquist-Luenberger(ML)指数、趋势面分析及基准回归分析等方法,系统探讨了2010—2022年山东省耕地利用生态效率的时空演变及影响因素。[结果]①山东省耕地利用生态效率处于较高水平(0.857)。研究期内整体呈“W”型波动下降趋势。要素投入与非期望产出冗余是制约其达到效率最优的主要因素。在空间上呈现“西高东低,南北极化”的分异特征。②研究期内山东省耕地利用生态效率年均ML指数为0.995 2,效率值的下降是耕地利用经营管理水平和技术退步共同作用的结果,除济宁、威海、日照及聊城外,其余地市ML均小于1。③耕地利用生态效率变化受多因素协同驱动且存在显著区域异质性,其中,复种指数、城镇化水平及农业产业集聚因加剧资源环境压力而显著抑制效率提升,财政支农则通过改善耕地生产条件与推广绿色技术等显著促进效率。[结论]山东省耕地利用生态效率时空分异显著,其波动下降由“管理退化”与“技术停滞”复合驱动,且影响因素呈现显著的空间异质性。未来应实施差异化耕地生态治理,进一步推动农业绿色低碳转型。

关键词: “双碳”目标; 耕地利用生态效率; Super-SBM模型; 时空演变; 影响因素
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0245-12 **中图分类号:** F323.211, X322

文献参数: 郑东杰, 陈照亮, 程秋月, 等.“双碳”目标下山东省耕地利用生态效率的时空演变及影响因素[J].水土保持通报,2026,46(4):245-256. Zheng Dongjie, Chen Zhaoliang, Cheng Qiuyue, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecological efficiency of cultivated land use in Shandong Province under “dual carbon” goals [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):245-256.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.023 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.023**

Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecological efficiency of cultivated land use in Shandong Province under “dual carbon” goals

Zheng Dongjie[1,2], Chen Zhaoliang[1,2], Cheng Qiuyue[1], Guan Hui[1,2]
〔1.*Qingdao Surveying & Mapping Institute*, *Qingdao*, *Shandong* 266000, *China*;
2.*Qingdao Innovation Center of Smart (Green) Geotechnical Technology*, *Qingdao*, *Shandong* 266000, *China*〕

Abstract: [Objective] In Shandong Province, a major grain-producing region, issues such as incomplete measurement of the ecological efficiency of cultivated land use (EECLU), unclear spatiotemporal differentiation patterns, and insufficiently clarified driving mechanisms during the green and low-carbon agricultural transformation were identified. EECLU and its influencing factors were scientifically measured and systematically evaluated in order to provide precise and scientific evidence for regional cultivated land ecological governance and green and low-carbon agricultural transformation. [Methods] The Super-SBM model based on undesirable

收稿日期: 2025-10-29 **修回日期:** 2026-02-04 **采用日期:** 2026-02-05
资助项目: 青岛市科技惠民示范专项项目“高标准农田天空地一体化智慧监管技术与应用”(25-1-5-xdny-12-nsh)
第一作者: 郑东杰(1997—),男(汉族),安徽省阜阳市人,硕士,研究方向为土地经济与管理。Email:dongjiezheng@126.com。
通信作者: 陈照亮(1983—),男(汉族),山东省青岛市人,硕士,高级工程师,主要从事水工环地质与土地整治研究。Email:chenzhanshen@163.com。

outputs, Malmquist-Luenberger (ML) index, trend surface analysis, and benchmark regression analysis were employed to systematically examine the spatiotemporal evolution and influencing factors of EECLU in Shandong Province from 2010 to 2022. [Results] ① The EECLU in Shandong Province was at a relatively high level (0.857). During the study period, it exhibited an overall W-shaped fluctuating downward trend. Redundancy in factor inputs and undesirable outputs were the primary bottlenecks restricting the achievement of optimal efficiency. Spatially, it exhibited a pattern of "higher efficiency in the west and lower in the east, with polarization between the north and south." ② The annual average ML index of EECLU in Shandong Province during the study period was 0.995 2. The decline in efficiency values resulted from the combined effects of cultivated land use management degradation and technological regression. Except for Jining, Weihai, Rizhao, and Liaocheng, the ML indices of the remaining prefecture-level cities were all below 1. ③ Changes in EECLU were driven by the synergy of multiple factors and exhibited significant regional heterogeneity. Among these factors, the multiple cropping index, urbanization level, and agricultural industrial agglomeration significantly inhibited efficiency improvement by increasing resource and environmental pressure, while fiscal support for agriculture significantly promoted efficiency by improving cultivated land production conditions and promoting green technologies. [Conclusion] The spatiotemporal differentiation of EECLU in Shandong Province is significant. Its fluctuating decline is driven by the compound effects of "management degradation" and "technological stagnation", and the influencing factors exhibit significant spatial heterogeneity. In the future, differentiated ecological governance of cultivated land should be implemented to promote the green and low-carbon transformation of agriculture.

Keywords: "dual carbon" goals; ecological efficiency of cultivated land use; Super-SBM model; spatiotemporal evolution; influencing factors

中国自2020年提出"双碳"目标以来,耕地作为兼具粮食安全保障与碳源碳汇双重功能的核心资源,其绿色低碳利用已成为落实碳减排责任,推动农业绿色转型的关键抓手[1-4]。然而,近年来,高强度的耕地集约化利用方式在有效保障粮食供给的同时,也造成了农业面源污染、温室气体排放、生物多样性锐减等多重生态环境问题[5-6]。尤其是在碳排放方面,我国居于全球农业碳排放的首位,农作物种植活动产生的直接排放及由生产要素投入衍生的间接排放是其主要来源[7]。在此背景下,2024年农业农村部明确要求推动农业生产投入品减量增效,增强农田固碳能力,进一步凸显了推动耕地绿色低碳集约利用,对于衔接"双碳"目标与农业绿色低碳转型的必要性和紧迫性[8]。

耕地利用生态效率(EECLU)源于生态效率的拓展,强调耕地利用过程中资源要素投入-社会经济产出-生态环境保护的三重优化,是衡量农业绿色低碳转型、粮食安全与生态安全的关键指标[9-11]。目前,国内外学者围绕EECLU开展了多维度、多方法的相关研究。研究尺度涵盖全国[3,6]、流域城市群[9-10]、省级、[2,11]市县[3,10-13]等行政单元。研究维度上,主要从城镇化[13]、低碳约束[2-3,7]及"三安全"(边境-粮食-生态安全)等[14]视角对EECLU的时空演变特征进行分析,同时还探讨了农业新质生产力[15]、数字普惠金融[16]、耕地经营规模[17-19]、土地综合整治等[20]因素对其产生的影响;研究方法上,随机前沿分析法(SFA)和数据包络分析法(DEA)应用较为广泛,其中,以DEA为基础衍生出的超效率SBM模型,因能克服传统DEA模型无法同时考虑投入或产出松弛变量的缺陷,成为当前EECLU研究的主流模型[2,11-13]。但当前研究仍存在以下不足。首先,当前研究更多考虑耕地碳排放这一非期望产出,忽视了耕地的固碳能力,易导致效率被低估[4];其次,当前研究区域更多局限于长江经济带或黄河流域等区域[7,9-10,21-22],对于作为中国重要农业大省和粮食主产区的山东省,鲜有学者单独开展EECLU的系统性研究。

山东省在保障国家粮食安全和农产品供给中发挥着关键作用。在城乡转型发展背景下,山东省耕地利用方式发生显著变化,人地矛盾加剧,非粮化以及面源污染问题日益凸显[23]。科学识别耕地利用生态效率的时空格局与驱动机制,对保障区域粮食安全,促进耕地可持续利用具有重要的现实意义。基于此,本文以"双碳"视角为切入点,结合EECLU的内涵,构建了包含农业面源污染、碳排放和碳汇的评价指标体系,并运用超效率SBM模型、全局趋势分析、基础回归模型等方法,探究山东省EECLU的时空演变特征及影响因素,以期为山东省耕地资源可持续利用和农业绿色转型发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

山东省地处中国东部沿海、黄河下游,北接京津冀,南连长三角,总面积约 1.58×10^5 km^2。耕地资源禀赋优越,面积约占总面积的60%以上,是中国重要的农业大省和粮食生产基地。2023年该区农业总产值达 1.25×10^{12} 元,位居全国第一,粮食总产量达 5.54×10^7 t,约占全国粮食总产量的8.0%。但近年来存在耕地数量持续减少,土壤肥力下降,生态系统服务功能退化等数量、质量和生态问题,利用方式亟待向低碳集约化转型[23]。本文根据山东省自然地理格局将其划分4大区域:鲁东(青岛市、烟台市、威海市)、鲁中(济南市、淄博市、潍坊市、泰安市)、鲁西北(东营市、德州市、聊城市、滨州市)及鲁西南(枣庄市、济宁市、日照市、临沂市、菏泽市)(图1)。

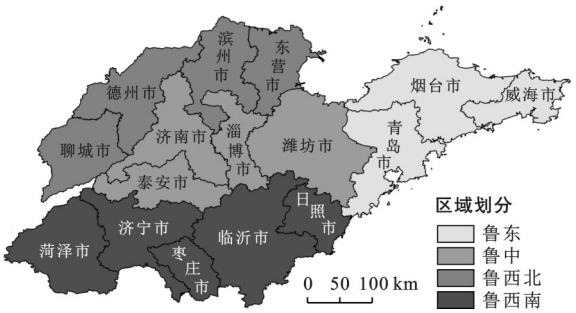


图1　山东省区域划分

Fig.1　Administrative divisions of Shandong Province

1.2　数据来源

1.2.1　数据来源与处理

本文基于数据的科学性、易获性和可操作性等原则,借鉴相关研究成果[6-7,9-10],以山东省16个地级市为研究对象。耕地数据来源于国土调查成果共享应用服务平台(https://gtdc.mnr.gov.cn/Share#/),其余指标数据均来源于2010—2022年《中国统计年鉴》《山东统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》等(详见表1—2)。经济数据统一以2010年为基期,折算成可比价,同时,采用线性插值法对个别城市个别年份相关缺失数据进行补充。基准回归模型所涉及的各变量,均采取对数化转换,以消除量纲差异,缓解异方差问题并降低多重共线性对结果的影响。

1.2.2　耕地利用生态效率的测度指标

本研究借鉴相关研究成果[24-25],以Cobb-Douglas生产函数为理论基础,遵循科学性、合理性和数据易获性等原则,并结合EECLU的概念内涵及耕地生产特性,构建EECLU评价指标体系(表1)。要素投入指标是生产中消耗的资源,主要从土地、劳动力和资本三方面选取7项要素投入指标。产出维度包含期望产出和非期望产出。期望产出兼顾耕地利用经济-社会-生态效益,其中,将耕地利用碳吸收作为期望产出纳入效率评价指标体系,以更全面地反映耕地利用的环境效应,提升评价结果的科学性和准确性。非期望产出选取面源污染和碳排放两项指标予以表征。

1.2.3　耕地利用生态效率的影响因素指标

影响耕地利用生态效率的因素包括被解释变量和解释变量(表2)。

(1)被解释变量。耕地利用生态效率(EECLU)。

(2)解释变量。以相关研究成果为参考[6,12,24],并结合山东省耕地利用实际和指标数据可获取性,从自然生态因素、农业生产条件、社会经济因素3个方面设定7个指标作为解释变量。

①自然生态因素方面,选取复种指数(MCI)予以表征。在自然维度上,优越的生态环境条件(如地势平坦、光热充足、水资源丰富等),通常有助于提升耕地集约利用水平与复种指数,进而通过影响作物产量对耕地利用生态效率产生重要作用。因此,在研究自然生态环境对耕地利用生态效率的影响机制时,常将复种指数作为自然生态因素的替代变量。复种指数(MCI)反映特定区域内耕地利用的集约化程度,通常以农作物播种面积占耕地面积的比重予以衡量。

②农业生产条件方面,选取劳均播种面积(LAS)、农业机械密度(AMD)和农业产业集聚(AIA)予以表征。劳均播种面积(LAS)通过农作物播种面积与农业从业人员数量的比值予以表征,不同的LAS意味着差异化的农业生产组织方式(如劳动密集型或土地规模化经营),这种差异将直接影响EECLU。农业机械密度(AMD)以农业机械总动力与农作物播种面积之比衡量。AMD提高虽可提升耕作效率,但其伴随的化石燃料消耗将增加耕地利用碳排放,制约EECLU改善。农业产业集聚(AIA)采用区位熵指数表征。AIA通过规模经济、知识溢出及累积效应等途径,对EECLU产生复杂影响。

③社会经济因素方面,选取城镇化水平(UR)、工业化水平(IND)和财政支农水平(FSA)予以表征。城镇化水平(UR)采用人口城镇化率衡量,UR的提升在刺激农产品需求并提供耕地利用所需人才、技术与资金支持的同时,也可能导致耕地非农化与非粮化,进而负向影响EECLU。工业化水平(IND)以第二产业增加值占地区GDP的比例表征。IND的发展一方面侵占优质耕地用于建设用地,另一方面促

使农业生产要素投入增加,导致耕地利用转向高投—高产—高消的“逆生态化”模式,两者共同损害EECLU。FSA以地方财政农林水事务支出占一般预算支出比重衡量。FSA旨在促进农业发展,但对农机、化肥、农药等要素的过量补贴将加剧耕地生态环境压力,抑制EECLU提升。

表1 耕地利用生态效率评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of ecological efficiency of cultivated land use (EECLU)

指标类别	准则层	指标层	指标单位	数据来源
要素投入	土地要素投入	农作物播种面积	10^3 hm^2	《山东统计年鉴》
	劳动力要素投入	农业从业人员	万人	《山东统计年鉴》
	资本要素投入	化肥施用折纯量	t	《山东统计年鉴》
		农药使用量	t	《山东统计年鉴》
		农膜使用量	t	《山东统计年鉴》
		有效灌溉面积	10^3 hm^2	《山东统计年鉴》
		农业机械总动力	10^4 kW	《山东统计年鉴》
期望产出	经济效益	农业总产值	万元	《山东统计年鉴》
	社会效益	粮食总产量	t	《山东统计年鉴》
	生态效益	耕地碳汇总量	t	国土调查成果共享应用服务平台
非期望产出	碳排放	耕地碳排放总量	t	《山东统计年鉴》
	面源污染	耕地面源污染排放量	t	《山东统计年鉴》

注:①耕地碳汇总量计算公式为$C_l=S_l\times\delta$。C_l,S_l分别为耕地碳汇总量和耕地面积,δ为耕地碳吸收系数0.007 (t/hm^2)[27]。②耕地碳排放量公式为$C_n=\sum_{i=1}^{n}C_i=\sum_{i=1}^{n}T_i\times\beta_i$。$C_n$为耕地碳排放总量,$C_i$,$T_i$,$\beta_i$分别表示各类碳源碳排放总量、施用量以及碳排放系数,具体系数参照相关研究[28-29]。③耕地面源污染排放量计算公式为$E_n=\sum_{i=1}^{n}M_i\times\xi_i$。$E_n$为耕地面源污染排放量;$M_i$和$\xi_i$分别表示化肥、农药、农膜施用量以及流失或残留系数;相关系数参照文献[26]。

表2 耕地利用生态效率的影响因子

Table 2 Influencing factors of ecological efficiency of cultivated land use (EECLU)

变量	变量类型	变量名称	变量说明	数据来源
被解释变量		耕地利用生态效率(EECLU)	基于非期望产出的超效率SBM模型测度	《山东统计年鉴》 国土调查成果 共享应用服务平台
解释变量	自然生态因素	复种指数(MCI)	农作物播种面积/耕地面积	《山东统计年鉴》 国土调查成果 共享应用服务平台
	农业生产条件	劳均播种面积(LAS)	农作物播种面积/农业从业人员	《山东统计年鉴》
		农业机械密度(AMD)	农业机械总动力/农作物播种面积	《山东统计年鉴》
		农业产业集聚(AIA)	农业产业集聚区位熵指数	《中国统计年鉴》 《山东统计年鉴》
	社会经济因素	城镇化水平(UR)	城镇常住人口/常住人口	《中国区域经济统计年鉴》
		工业化水平(IND)	第二产业增加值/GDP	《山东统计年鉴》
		财政支农水平(FSA)	地方财政农林水事务支出/地方财政一般预算支出	《中国城市统计年鉴》

1.3 研究方法

1.3.1 超效率SBM模型

EECLU是衡量耕地资源利用过程中实现“资源要素投入—社会经济产出—生态环境保护”协同发展的综合指标。相较于SFA模型,DEA模型更适用于多投入多产出的效率评估。但传统DEA模型存在忽略松弛变量,仅关注环境负面效应以及无法区分有效决策单元等局限。可能导致效率值系统性低估,难以真实反映区域耕地利用的实际水平。Kaoru Tone基于测算生态效率的SBM模型[30],发展衍生而

来的超效率SBM模型。该模型同时考虑了投入或产出的松弛变量,且能够对达到DEA有效的DMU进行比较、排序,较好地克服了传统DEA模型的缺陷。本文将耕地利用碳吸收作为期望产出纳入效率评价指标体系,以更全面地反映耕地利用的环境效应,提升评价结果的科学性和准确性。基于此,本文通过运用MATLAB R2021 b软件,从非径向和非角度对EECLU进行度量。计算公式如下:

$$\rho^{*}=\min\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^{-}}{x_{io}}}{1+\frac{1}{n_1+n_2}\left(\sum_{r=1}^{n_1}\frac{s_r^{g}}{y_{ro}^{g}}+\sum_{h=1}^{n_2}\frac{s_h^{b}}{y_{ho}^{b}}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}x_o=X\lambda+s^{-}\\ y_o^{g}=Y^{g}\lambda-s^{g}\\ y_o^{b}=Y^{b}\lambda+s^{b}\\ \lambda\geqslant 0,s^{-}\geqslant 0,s^{g}\geqslant 0,s^{b}\geqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

式中:ρ^{*}为被评价单元EECLU的观测值;λ表示权重矢量;(m,n_1,n_2),(X,Y^{g},Y^{b}),(s^{-},s^{g},s^{b})以及(x_o,y_o^{g},y_o^{b})分别表示要素投入、期望产出和非期望产出指标的数量、定义矩阵、松弛变量以及向量。

1.3.2　Malmquist-Luenberger指数及分解

基于非期望产出的超效率SBM模型,仅能从静态角度对单一特定时间节点的EECLU进行测度,缺乏动态视角的时间序列分析。本研究引入ML(Malmquist-Luenberger)指数以弥补静态分析的不足。计算公式如下:

$$\text{ML}_t^{t+1}=\left[\frac{1+\vec{D}_0^{t}(x^{t},y^{t},b^{t};y^{t},-b^{t})}{1+\vec{D}_0^{t}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};y^{t+1},-b^{t+1})}\times\frac{1+\vec{D}_0^{t+1}(x^{t},y^{t},b^{t};y^{t},-b^{t})}{1+\vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};y^{t+1},-b^{t+1})}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

ML指数又可进一步分解为技术效率变化指数(EC)和技术进步指数(TC)。具体公式如下:

$$\text{ML}_t^{t+1}=\text{EC}_t^{t+1}\times\text{TC}_t^{t+1} \tag{4}$$

$$\text{EC}_t^{t+1}=\frac{1+\vec{D}_0^{t}(x^{t},y^{t},b^{t};y^{t},-b^{t})}{1+\vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};y^{t+1},-b^{t+1})} \tag{5}$$

$$\text{TC}_t^{t+1}=\left[\frac{1+\vec{D}_0^{t+1}(x^{t},y^{t},b^{t};y^{t},-b^{t})}{1+\vec{D}_0^{t}(x^{t},y^{t},b^{t};y^{t},-b^{t})}\times\frac{1+\vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};y^{t+1},-b^{t+1})}{1+\vec{D}_0^{t}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};y^{t+1},-b^{t+1})}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

式中:当ML指数、EC指数、TC指数大于1时,表示该评价单元在t期到$t+1$期,EECLU提高,效率改善,技术进步。反之,表示EECLU下降、效率恶化、技术停滞。

1.3.3　趋势面分析

趋势面分析能够将地理要素的空间分异规律进行可视化表现。因此,本文运用趋势面分析,进一步探究山东省EECLU的全局空间趋势特征。公式如下:

$$Z_i(x_i,y_i)=T_i(x_i,y_i)+\xi_i \tag{7}$$

式中:$Z_i(x_i,y_i)$表示各评价单元的EECLU;$T_i(x_i,y_i)$为趋势函数,代表各评价单元EECLU的变化趋势;(x_i,y_i)为空间平面坐标;ξ_i为随机误差。

1.3.4　基准回归模型

本研究综合前文理论分析与现有文献基础[15,21],构建以下回归模型,运用StataMP 17软件,对平衡面板数据进行基准回归分析,以探究山东省EECLU的影响效应。

$$\begin{aligned}\ln\text{ECLU}_{it}=&\alpha_0+\beta_1\ln\text{MCI}_{it}+\beta_2\ln\text{LAS}_{it}+\\&\beta_3\ln\text{UR}_{it}+\beta_4\ln\text{IND}_{it}+\\&\beta_5\ln\text{AMD}_{it}+\beta_6\ln\text{AIA}_{it}+\\&\beta_7\ln\text{FSA}_{it}+\mu_i\end{aligned} \tag{8}$$

式中:ECLU_{it}为被评价单元i第t年的耕地利用生态效率;解释变量MCI_{it},LAS_{it},UR_{it},IND_{it},AMD_{it},AIA_{it},FSA_{it}分别代表被评价单元i第t年的复种指数、劳均播种面积、城镇化水平、工业化水平、农业机械密度、农业产业集聚、财政支农水平;β_1,β_2,β_3,β_4,β_5,β_6,β_7为待估参数;α_0为常数项;μ_i表示随机扰动项。

2　结果与分析

2.1　耕地利用生态效率时序变化分析

2.1.1　耕地利用生态效率静态分析

基于考虑耕地利用碳吸收的超效率SBM模型,测算2010—2022年山东省、4大区域及16个地级市的EECLU。参考已有研究[10]结合山东省实际,将效率划分为4类:低效率水平(0,0.5]、中等效率水平(0.5,0.8]、较高效率水平(0.8,1.1]、高效率水平(1.1,2.0]。

由图2可知,山东省EECLU整体在0.729~1.037之间波动,呈“W”型波动下降的趋势。空间分布上,研究期内山东省EECLU呈现明显的区域异质性,EECLU均值呈现:鲁东(0.824)<鲁中(0.844)<鲁西北(0.868)<鲁西南(0.878)的特征。鲁西南地区EECLU除2010年外,其余年份均高于山东省整体效率水平,为效率值最高地区,可能得益于其较好的

耕地自然条件、较高的规模化经营程度、较低的工业干扰以及生态保护政策倾斜等。鲁东地区仅在2017年、2018年高于山东省整体效率水平，为效率最低的地区。鲁中和鲁西北地区EECLU水平与全省平均效率较为接近，仍未达到最有效生产前沿。

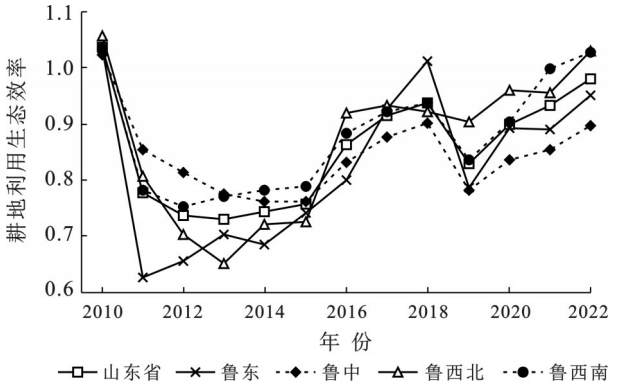


图2 2010—2022年山东省及鲁东、鲁中、鲁西北、鲁西南耕地利用生态效率趋势

Fig.2 Trends of EECLU in Shandong Province and its eastern, central, northwestern, and southwestern regions (2010—2022)

由表3可知，整体上研究期内全省效率处于较高水平(0.857)，但仍未达到效率最优，表明山东省耕地利用“资源要素投入-社会经济产出-生态环境保护”尚未达到充分均衡的协调发展阶段。具体而言，2010年，除潍坊市外，其余各市效率值均高于1，达到了最有效的生产前沿，属于EECLU有效地区。2014年仅日照市属于EECLU有效地区，2018—2022年EECLU有效地区明显增多。多数地市EECLU呈先降后升的波动下降趋势，其中泰安、青岛、济南波动最为显著，降幅分别为21.23%，19.12%与12.36%。

为进一步分析山东省各地区EECLU损失的原因，本文参考相关研究[2]，对2010—2022年研究区未达到DEA有效的16个地市进行投入与非期望产出的冗余分析(表4)。在要素投入方面，未达到效率最优地级市的土地、劳动力、化肥、农药、农膜、灌溉、农机要素投入冗余率均值分别为3.28%，11.79%，16.90%，11.64%，15.50%，0.72%和7.38%。从非期望产出角度来看，耕地利用碳排放和面源污染非期望产出冗余率均值分别为15.86%和15.07%。结果表明，这些地区在耕地利用过程中，化肥、农膜、劳动力、农药要素投入冗余与碳排放、面源污染等非期望产出冗余较为突出，是导致效率损失的主要因素。这在一定程度上反映在耕地资源约束与农业机械化水平不高的背景下，部分地区为追求短期粮食增产，可能过度依赖化肥、农药等化学品投入与劳动密集型经营，导致碳排放与面源污染加剧，生态环境压力增大，进而制约EECLU提升。此外，其余要素投入亦存在不同程度的冗余，说明相关地区在耕地经营模式与管理水平上仍较为粗放，资源利用效率不高，制约了其集约化与生态化水平。

表3 山东省耕地利用生态效率(EECLU)

Table 3 EECLU in Shandong Province

城市	EECLU				
	2010年	2014年	2018年	2022年	研究时段均值
济南市	1.173	0.859	1.028	1.028	0.957
青岛市	1.020	0.783	1.002	0.825	0.829
淄博市	1.098	0.781	1.020	1.020	0.921
枣庄市	1.028	0.620	0.760	1.022	0.787
东营市	1.026	0.590	1.002	1.020	0.848
烟台市	1.081	0.659	1.022	1.013	0.829
潍坊市	0.759	0.592	0.701	0.707	0.643
济宁市	1.030	0.662	0.849	1.032	0.787
泰安市	1.060	0.811	0.856	0.835	0.853
威海市	1.001	0.614	1.017	1.015	0.813
日照市	1.024	1.008	1.015	1.038	0.957
临沂市	1.053	0.932	1.036	1.009	0.960
德州市	1.086	0.897	0.929	1.040	0.952
聊城市	1.001	0.585	0.718	1.016	0.718
滨州市	1.113	0.807	1.036	1.038	0.953
菏泽市	1.040	0.693	1.026	1.033	0.901
山东省	1.037	0.743	0.938	0.981	0.857

2.1.2 耕地利用生态效率(EECLU)动态演变特征

2010—2022年山东省EECLU年均ML指数为0.995 2，整体呈现年均0.48%的微弱下降趋势(表5)。分解指标结果显示，年均技术效率变化指数(EC)和技术进步指数(TC)分别为0.997 3和0.997 9，对应年均降幅为0.27%和0.21%，表明山东省耕地利用经营管理水平与技术进步水平共同抑制了EECLU提升。时序上，ML指数及其分解项波动显著。其中，2010—2011年ML指数达到最低(0.731 3)，主要源于技术进步迟滞(TC=0.759 9)与技术效率下降(EC=0.962 3)的双重约束，且前者为主导因素。2015—2016年ML指数达峰值(1.138 0)。该阶段效率提升主要得益于技术进步水平的显著提高(TC=1.137 5)。

在区域水平上，研究期内仅济宁、威海、日照、聊城4市的ML指数大于1，其余城市均小于1(表6)。根据效率分解指标将其划分为4类：①聊城EC与TC均大于1，其效率提升由管理水平提高与技术进步共

同驱动。②青岛、枣庄、潍坊、泰安、菏泽等市ML指数小于1,其效率提升应着重依靠改善经营管理水平;③滨州、德州、临沂、烟台、东营、淄博、济南等地ML指数小于1,且各时期EC普遍高于TC。这说明技术相对落后是制约其效率提升的关键,加大技术创新与推广力度是其主要改进方向;④威海和日照的效率提升主要依赖于管理水平贡献,而济宁则更多得益于技术进步。

表4　山东省各地区耕地利用年均冗余率

Table 4　Average annual redundancy rates of cultivated land use in different regions of Shandong Province

地区	投入冗余率/%							非期望产出冗余率/%	
	土地	劳动力	化肥	农药	农膜	灌溉	农机	碳排放	面源污染
济南市	1.50	6.16	13.36	0.00	6.41	0.18	3.19	5.21	5.34
青岛市	2.87	11.79	17.79	0.00	20.67	0.00	4.12	16.79	17.54
淄博市	0.10	12.31	7.10	13.33	11.97	0.00	5.06	7.39	4.08
枣庄市	10.75	16.48	34.60	8.05	18.85	0.00	2.08	29.17	34.08
东营市	0.00	7.46	8.07	18.03	21.60	4.61	0.00	12.61	8.58
烟台市	0.32	19.71	21.94	29.57	0.68	0.60	12.70	19.94	21.55
潍坊市	4.46	22.07	32.69	19.21	72.46	4.42	5.14	49.58	35.34
济宁市	6.56	24.80	26.15	24.52	5.15	0.13	15.67	22.61	26.02
泰安市	8.49	16.26	22.40	7.40	10.64	0.53	6.92	14.23	16.60
威海市	0.91	9.58	25.21	30.03	4.40	0.33	26.15	14.64	11.92
日照市	0.00	2.66	3.77	8.63	2.22	0.29	2.44	4.03	3.95
临沂市	2.08	2.67	4.07	1.94	7.00	0.00	5.10	4.81	3.80
德州市	0.14	0.25	6.17	2.28	6.21	0.06	6.80	5.60	6.04
聊城市	6.56	27.28	30.49	12.31	48.76	0.10	14.07	32.56	30.36
滨州市	0.23	7.68	5.03	7.57	1.62	0.34	4.07	4.36	4.55
菏泽市	7.51	1.51	11.56	3.38	9.30	0.00	4.59	10.15	11.40
均值	3.28	11.79	16.90	11.64	15.50	0.72	7.38	15.86	15.07

表5　2010—2022年山东省耕地利用生态效率ML指数及其分解

Table 5　ML index and its decomposition of EECLU in Shandong Province (2010—2022)

年份	全要素生产率变化指数(ML)	技术效率变化指数(EC)	技术进步指数(TC)
2010—2011	0.731 3	0.962 3	0.759 9
2011—2012	0.957 0	1.024 7	0.933 9
2012—2013	0.989 7	1.001 6	0.988 1
2013—2014	1.023 2	1.003 9	1.019 2
2014—2015	1.021 9	1.000 0	1.021 9
2015—2016	1.138 0	1.000 4	1.137 5
2016—2017	1.063 2	1.011 8	1.050 8
2017—2018	1.027 8	0.995 5	1.032 4
2018—2019	0.884 8	0.989 1	0.894 6
2019—2020	1.081 8	0.995 0	1.087 2
2020—2021	1.039 8	0.989 5	1.050 8
2021—2022	1.053 1	0.994 9	1.058 5
山东省	0.995 2	0.997 3	0.997 9

表6　山东省各地区耕地利用生态效率ML指数及其分解

Table 6　ML index and its EECLU decomposition of different regions of Shandong Province

城市	ML	EC	TC
济南市	0.989 1	0.997 2	0.991 9
青岛市	0.982 4	0.982 4	1.000 0
淄博市	0.993 9	1.000 0	0.993 8
枣庄市	0.999 5	0.999 5	1.000 0
东营市	0.999 5	1.002 0	0.997 5
烟台市	0.994 6	0.999 4	0.995 2
潍坊市	0.994 0	0.993 1	1.000 9
济宁市	1.000 2	0.999 7	1.000 5
泰安市	0.980 3	0.980 3	1.000 0
威海市	1.001 1	1.002 4	0.998 7
日照市	1.001 1	1.004 7	0.996 3
临沂市	0.996 5	0.999 2	0.997 3
德州市	0.996 4	0.999 5	0.997 0
聊城市	1.001 2	1.000 6	1.000 6
滨州市	0.994 2	0.997 7	0.996 5
菏泽市	0.999 5	0.999 3	1.000 1

2.2 耕地利用生态效率空间格局演变规律

2.2.1 耕地利用生态效率全局趋势特征

运用ArcGIS 10.8趋势分析工具生成三维全局趋势图(图3),图3中Z轴代表效率值,X轴代表研究区域从西到东的地理位置,Y轴代表从南到北的地理位置;X-Z,Y-Z平面的趋势线,表示效率在空间上不同方向的投影拟合线。结果显示,山东省EECLU存在显著的空间分异特征,且在不同方向上呈现差异化的演变趋势。在东西方向上,效率分布态势随时间发生转变:2010年趋势线自西向东下降,呈现“西高东低”格局;2014年转为东西略低,中部略高的倒“U”型;2018—2022年再次呈现“西高东低”空间分布格局。在南北方向上,趋势线始终呈现明显的“U”型,即南北高,中部低的分布格局。这一结果揭示,山东省EECLU的空间非均衡性呈现“西高东低,南北极化”的分异特征。因此,推动耕地利用向“资源要素投入—社会经济产出—生态环境保护”更加均衡的方向演进,缩小南北效率差异,是提升全省EECLU的关键。

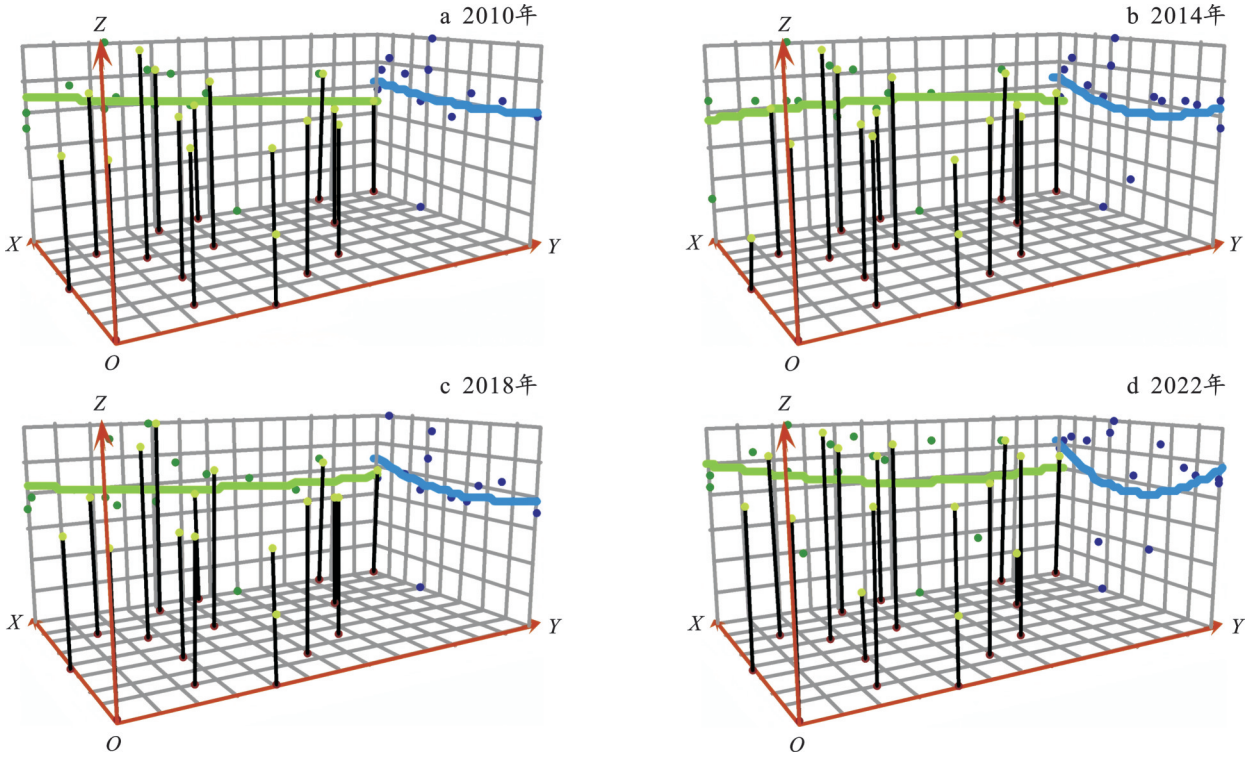


图3 山东省耕地利用生态效率三维全局趋势图

Fig.3 Three-dimensional global trends of EECLU in Shandong Province

2.2.2 耕地利用生态效率空间分布特征

为进一步探讨山东省各地区EECLU的空间分布差异,本文运用自然断点法,可视化呈现2010年、2014年、2018年和2022年山东省各地区EECLU的空间分布特征(图4)。整体上,研究时段内全省效率总体呈下降趋势,高效率等级的城市数量总体减少,较高效率等级的城市数量相应增加,低效率等级城市数量保持稳定。耕地利用在资源节约与环境保护方面仍有较大提升空间。

在空间分布格局上,山东省EECLU区域集聚特征明显,高效率水平城市多分布于鲁中和鲁西北地区,低效率水平城市主要为鲁中地区的潍坊市。随着时间的推移,较高效率城市呈现出连片集聚并向鲁中、鲁西北地区蔓延扩张的态势,表明“外围”较高效率地区与“中心”高效率地区之间的空间连结性增强,区域协同演进趋势初步显现。

2.3 耕地利用生态效率影响因素分析

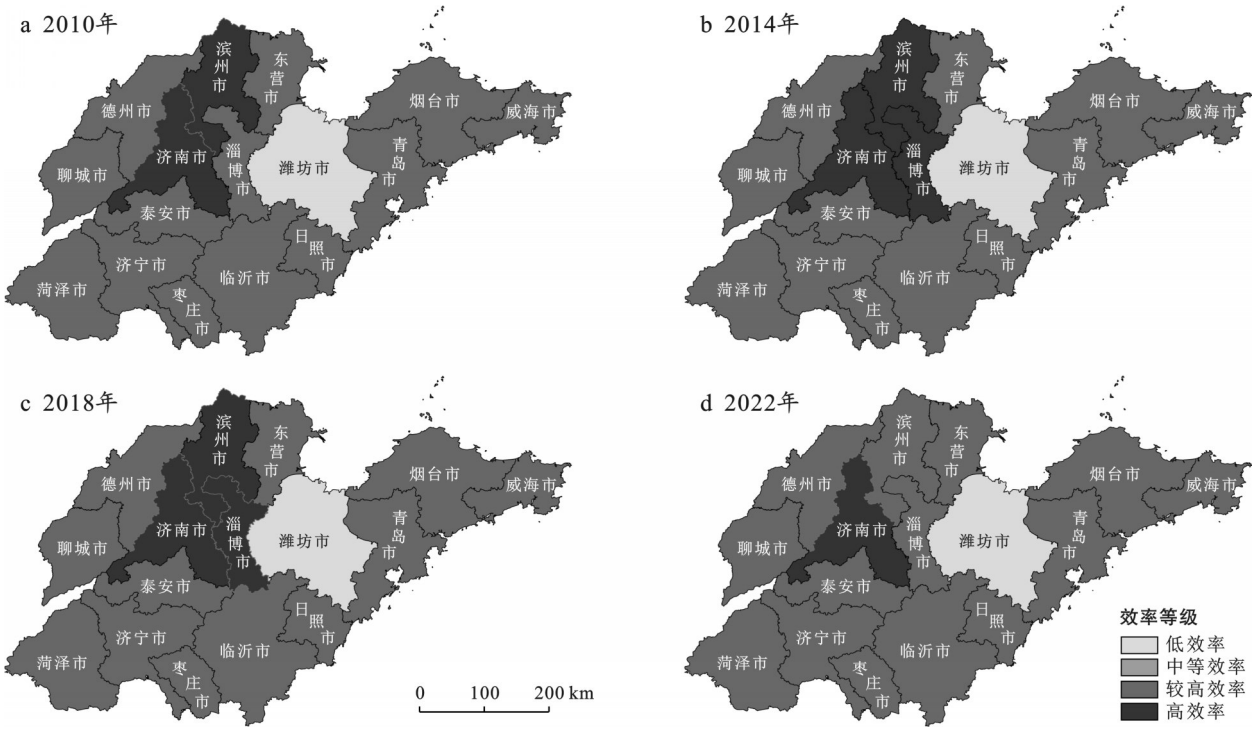
2.3.1 省域尺度耕地利用生态效率影响因素分析

如表7所示,不同变量影响EECLU的方向、程度和显著性水平存在明显差异。根据回归系数,结合前文基准回归模型,最终得出山东省EECLU基准回归方程如下:

$$\begin{aligned}\ln \mathrm{ECLU}_{it} = {} & 1.691^{***} - 0.117^{***} \ln \mathrm{MCI}_{it} + 0.003 \ln \mathrm{LAS}_{it} - 0.004^{*} \ln \mathrm{UR}_{it} \\ & - 0.359 \ln \mathrm{IND}_{it} - 0.006 \ln \mathrm{AMD}_{it} - 0.118^{*} \ln \mathrm{AIA}_{it} + 0.001^{**} \ln \mathrm{FSA}_{it} + \mu_i\end{aligned} \tag{9}$$

(1)在自然生态因素方面,复种指数在1%置信水平下负向影响EECLU,这表明复种指数越高,EECLU

越低。复种指数虽然在一定程度上提升了土地产能,但由此带来了水资源的压力、土壤养分的透支、化肥农药累积、绿色技术适配不足等“逆生态化”问题,导致碳排放和面源污染增多,最终影响耕地绿色利用的质量。



注:地图基于审图号GS(2019)1822号的标准地图制作。底图无修改。下同。

图4　山东省耕地利用生态效率空间格局分布

Fig.4　Distribution of spatial patterns of EECLU in Shandong Province

表7　山东省耕地利用生态效率影响因素回归结果

Table 7　Regression results of influencing factors of EECLU in Shandong Province

变量	山东省	鲁东	鲁中	鲁西北	鲁西南
lnMCI	−0.117***(0.044)	−0.362***(0.105)	0.285***(0.104)	0.008(0.273)	−0.066***(0.017)
lnLAS	0.003(0.003)	0.020*(0.012)	−0.028***(0.008)	−0.008(0.015)	0.002***(0.000)
lnUR	−0.004*(0.002)	−0.016***(0.004)	0.000(0.000)	−0.006*(0.003)	0.000(0.001)
lnIND	−0.359(0.238)	−0.862(0.614)	0.098(0.176)	−1.614***(0.612)	0.005(0.065)
ln AMD	−0.006(0.031)	−0.032***(0.001)	−0.239***(0.072)	−0.013(0.046)	0.006(0.019)
lnAIA	−0.118*(0.064)	0.342**(0.147)	−0.304***(0.038)	−0.276**(0.123)	0.038***(0.009)
lnFSA	0.001**(0.001)	−0.899***(0.120)	−0.001(0.000)	0.811***(0.224)	0.000(0.000)
_cons	1.691***(0.330)	2.690***(0.727)	1.289***(0.219)	2.624***(0.119)	1.025***(0.107)
R^2	0.267	0.595	0.904	0.727	0.558

注:*,**,***分别表示在10%,5%,1%的置信水平下显著。

(2)在农业生产条件方面,劳均播种面积对EECLU的影响为正,但不显著。农业产业集聚在10%置信水平下负向显著影响EECLU。这可能是农业产业集聚造成了农机和农用化学制品等农业生产要素的过量投入。同时污染物在有限空间的累积扩散,导致耕地利用成本增加,环境负外部性突出,最终影响EECLU的提升。农业机械密度对EECLU的影响为负,但不显著。

(3)在社会经济因素方面,城镇化水平在10%置信水平下显著负向影响EECLU。这可能由于城镇化扩张,建设用地挤占耕地空间、转移工业污染源,并伴随着农业劳动力的流失,形成了资源环境的双重胁迫,导致EECLU结构性衰减。工业化水平对EECLU的影响为负,但不显著。财政支农水平在5%置信水平下显著正向影响EECLU。其原因可能在于财政支农资金可用于农田水利设施建设、高标准农田建设、农业机械化和农业科技研发等耕地绿色生产技术推广,直接改善了耕地生产条件,最终有

利于EECLU的提升。

2.3.2 区域尺度耕地利用生态效率影响因素分析

考虑到山东省内各地市在资源禀赋、技术水平、经济基础等方面存在显著差异，本文进一步将全省划分为鲁东、鲁中、鲁西北与鲁西南4大区域，探讨耕地利用生态效率影响因素的区域异质性（表7）。整体来看，山东省EECLU的影响因素具有明显的空间异质性，不同地区同一因素的作用方向与强度存在显著差别。

（1）在自然生态因素方面，复种指数在鲁东与鲁西南地区呈现显著负向影响，表明复种强度过高可能导致资源过度消耗与生态环境压力增大，从而抑制效率提升；而在鲁中地区其影响显著为正，说明该地区可能通过优化资源配置，将复种带来的产量增长有效转化为生态效率提升。

（2）在农业生产条件方面，劳均播种面积在鲁东与鲁西南地区显著促进效率提升。这与其在规模化经营与机械化推广方面的优势有关。而在鲁中地区则表现为抑制作用，可能因过度依赖农业机械及化学制品投入而增加了碳排放和面源污染。农业机械密度在鲁东与鲁中地区均呈现显著负向影响，反映其虽然节约了劳动成本，但也因化石能源消耗增加而对生态环境产生压力。农业产业集聚的影响存在明显分化：在鲁东与鲁西南地区表现为规模经济带来的正向效应，而在鲁中与鲁西北地区则出现规模不经济，对效率产生抑制作用。

（3）在社会经济因素方面，城镇化水平在鲁东与鲁西北地区显著抑制效率提升，可能源于城镇扩张引发的耕地非粮化、非农化及农业劳动力流失。工业化水平仅在鲁西北地区表现出显著负面影响，说明当地工业化进程可能加剧了人地矛盾与农业劳动力短缺。财政支农的影响亦呈现区域差异：在鲁西北地区显著促进效率提升，表明资金可能更多用于改善生产条件和推广绿色技术；在鲁东地区则表现为抑制作用，可能因补贴结构偏重于化肥、农药等化学品，加剧了碳排放与面源污染。

3 结 论

（1）山东省EECLU整体处于较高水平，但研究期内呈“W”型波动下降趋势，尚未实现效率最优。要素投入与非期望产出冗余是制约效率提升的主要因素，其中化肥、农膜要素投入冗余及碳排放、面源污染非期望产出冗余尤为突出。空间上，EECLU呈现“西高东低，南北极化”的分异特征，高效率区在鲁中、鲁西北集聚，区域协同演进趋势初显。

（2）研究期内山东省EECLU年均ML指数为0.995 2。效率下降是管理退化与技术退步共同作用的结果。分城市看，仅济宁、威海、日照、聊城4市ML指数大于1，其余城市均小于1，且效率提升路径呈现显著分化，存在“管理-技术双驱动”“管理主导”“技术主导”等模式，表明单一改进路径难以适用于所有地区。

（3）EECLU变化受多因素协同驱动，且存在显著区域异质性。其中，复种指数、城镇化水平及农业产业集聚因加剧资源环境压力而显著抑制效率提升，财政支农则通过改善生产条件与推广绿色技术显著促进效率。区域尺度上，同一因素的作用方向与强度差异明显，反映了EECLU影响机制的复杂性。

4 建 议

本研究在充分借鉴相关研究成果的基础上[3,7]，以“双碳”目标为视角，创新性地将耕地碳吸收纳入评价指标体系，对山东省EECLU的时空演变及影响因素进行了系统分析。后续研究可在更精细尺度（如县域）开展效率测度与机理解析，并借助空间计量模型、门槛效应检验等方法，进一步揭示效率的空间溢出效应及各因素间的非线性关联，从而在微观机理与复杂系统层面深化对耕地绿色转型路径的认识。

基于上述研究结果，提出以下建议以提高山东省EECLU。

（1）优化要素配置，推广绿色低碳技术。研究显示山东省整体存在要素投入与非期望产出冗余并存、技术效率与技术进步双衰退的问题。因此，推动耕地资源集约利用与农业绿色转型，在技术层面，可优先推广秸秆还田、保护性耕作等减排固碳技术；管理政策上可设立低碳补贴，制定农资投入标准，完善奖惩机制，促进绿色集约化利用，避免“有技术无效率”现象。

（2）加强区域协作，发挥高效区示范作用。山东省耕地生态效率呈“西高东低，南北极化”的空间分异格局，可探索建立跨区域协同机制。一方面，总结鲁西南、鲁西北等高效率区的规模经营与绿色生产经验，建设省级示范推广基地；另一方面，打破制度壁垒，搭建要素流动平台，促进技术、人才向鲁中、鲁东等低效区扩散，可借助“核心区—辐射带—联动网”的空间传导模式，推动全域效率均衡提升。

（3）实施分区调控，推动区域协同提升。根据各区域影响因素差异，采取针对性调控措施。鲁东地

区应调控复种强度与机械密度,推动财政支农向绿色技术补贴倾斜;鲁中地区需维持适度复种,防止机械与化学品投入过度;鲁西北应协调工业化、城镇化与农业发展,强化财政支持的生态导向;鲁西南可依托规模经营优势,抑制复种过度的生态损耗。全省应建立“分区指导,动态评估”的政策工具箱,构建优势互补,协同提升的耕地生态治理格局。

参考文献(References)

[1] Xia Longlong, Cao Liang, Yang Yi, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production [J]. Nature Food, 2023,4(3):236-246.

[2] 韩佳敏,孟梅.“双碳”目标下新疆耕地利用生态效率时空演变特征及原因分析[J].中国农机化学报,2025,46(2):287-294.
Han Jiamin, Meng Mei. Analysis on characteristics and causes of spatial and temporal evolution of cropland utilization eco-efficiency in Xinjiang under the “dual-carbon” target [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025,46(2):287-294.

[3] 李继霞,王华春,樊骋琳.“双碳”目标下中国耕地利用生态效率的区域差异、动态演进及收敛性[J].华中农业大学学报(社会科学版),2023(5):167-181.
Li Jixia, Wang Huachun, Fan Chenglin. Regional differences dynamic evolution and convergence of ecological efficiency of cultivated land use in China under the dual carbon target [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023(5):167-181.

[4] 吴昊玥,孟越,黄瀚蛟,等.中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J].自然资源学报,2022,37(5):1148-1163.
Wu Haoyue, Meng Yue, Huang Hanjiao, et al. Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1148-1163.

[5] 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 Zhaoxue, Sun Ping, Zhang Jingqi. 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.

[6] 马林燕,张仁慧,潘子纯,等.中国省际耕地利用生态效率时空格局演变及影响因素分析:基于2000—2019年面板数据[J].中国土地科学,2022,36(3):74-85.
Ma Linyan, Zhang Renhui, Pan Zichun, et al. Analysis of the evolution and influencing factors of temporal and spatial pattern of eco-efficiency of cultivated land use among provinces in China: Based on panel data from 2000 to 2019 [J]. China Land Science, 2022, 36(3): 74-85.

[7] 范正根,邓超,范雨琪,等.“双碳”目标视角下耕地利用生态效率测度及其时空特征:以长江中下游粮食主产区为例[J].生态经济,2023,39(11):119-127.
Fan Zhenggen, Deng Chao, Fan Yuqi, et al. Measurement of eco-efficiency for cultivated land use and its spatial-temporal characteristics from the perspective of “double carbon” target: Taking the main grain producing areas in the mid and lower reaches of the Yangtze River as an example [J]. Ecological Economy, 2023,39(11): 119-127.

[8] 张启岚,吕晓.“双碳”目标下如何提升农户耕地绿色利用效率:要因探索与路径分析[J].中国土地科学,2025,39(3):70-79.
Zhang Qilan, Lyu Xiao. Improving farmers' cultivated land green use efficiency under the “dual carbon” target: Key factors and configuration paths [J]. China Land Science, 2025,39(3):70-79.

[9] 朱红波,丁未来,周瑞彤.长江经济带耕地利用生态效率评价与空间格局分析[J].长江流域资源与环境,2025,34(1):87-99.
Zhu Hongbo, Ding Weilai, Zhou Ruitong. Evaluation of ecological efficiency and spatial pattern analysis of cultivated land utilization in the Yangtze River economic zone [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(1):87-99.

[10] 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.
Liu Mengba, Zhang Anlu, Wen Gaohui. Regional differences and spatial convergence in the ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the Yangtze region [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(2):477-493.

[11] 张荣天,焦华富.中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J].农业工程学报,2015,31(2):277-287.
Zhang Rongtian, Jiao Huafu. Spatial-temporal pattern differentiation and its mechanism analysis of using efficiency for provincial cultivated land in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):277-287.

[12] 朱文娟,孙华.江苏省县域耕地利用生态效率时空动态性及驱动机制[J].长江流域资源与环境,2024,33(4):784-798.
Zhu Wenjuan, Sun Hua. Spatio-temporal dynamics and driving mechanism of cultivated land use eco-efficiency at county scale in Jiangsu Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(4): 784-798.

[13] 杨欣,杜梦晴,肖豪立,等.湖北省县域新型城镇化与耕地利用生态效率时空耦合关系研究[J].长江流域资源与环境,2024,33(10):2180-2190.
Yang Xin, Du Mengqing, Xiao Haoli, et al. Coupling relationship between new-type urbanization and farmland utilization eco-efficiency at county-level in Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(10):2180-2190.

[14] 王鹏程,张利国,陆汝成."边境-粮食-生态"安全视域下耕地利用生态效率演变特征与机制:以中越边境地区为例[J].生态学报,2024,44(11):4637-4649.
Wang Pengcheng, Zhang Liguo, Lu Rucheng. Evolution characteristics and mechanism of cultivated land use eco-efficiency from the triple-security perspective in China-Vietnam border area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(11):4637-4649.

[15] 杨和平,李红波.农业新质生产力对耕地利用生态效率的影响:以长江经济带为例[J].中国土地科学,2024,38(11):94-104.
Yang Heping, Li Hongbo. Impact of agricultural new quality productivity on ecological efficiency of cultivated land use: A case study of the Yangtze River economic belt [J]. China Land Science, 2024,38(11):94-104.

[16] 邹玉友,丛亿,韩苗,等.东北黑土区数字普惠金融对耕地利用生态效率的影响及其空间溢出效应[J].农业现代化研究,2024,45(2):232-243.
Zou Yuyou, Cong Yi, Han Miao, et al. The influence of digital inclusive finance on the ecological efficiency of cultivated land utilization and its spatial spillover effect in the northeastern black soil area [J]. Research of Agricultural Modernization, 2024,45(2):232-243.

[17] 黄佟,曲艺,舒帮荣,等.耕地利用规模对耕地生态效率的影响研究:以黄淮海地区为例[J].农业现代化研究,2023,44(6):1070-1081.
Huang Tong, Qu Yi, Shu Bangrong, et al. The impacts of farmland operational scale on farmland ecological efficiency: A case study of the Huang-Huai-Hai plain [J]. Research of Agricultural Modernization, 2023,44(6):1070-1081.

[18] 胡贤辉,蔺思琪,何庆,等.耕地细碎化、耕地经营规模对农户耕地利用生态效率的影响:以常德市为例[J].中国土地科学,2023,37(4):95-106.
Hu Xianhui, Lin Siqi, He Qing, et al. Effects of cultivated land fragmentation and cultivated land operation scale on ecological efficiency of farmers' cultivated land use: A case study of Changde City [J]. China Land Science, 2023,37(4):95-106.

[19] Hu Xianhui, Lin Xiaxia, Wen Gaohui, et al. The impact of cultivated land fragmentation on farmers' ecological efficiency of cultivated land use based on the moderating and mediating effects of the cultivated land management scale [J]. Land, 2024,13(10):1628.

[20] 吴诗嫚,丁如,匡兵,等.土地综合整治对耕地利用生态效率的影响研究:基于农户微观数据的实证分析[J].中国土地科学,2023,37(11):95-105.
Wu Shiman, Ding Ru, Kuang Bing, et al. Impact of comprehensive land consolidation on ecological efficiency of cultivated land use: Empirical analysis based on the micro survey data of farmers [J]. China Land Science, 2023,37(11):95-105.

[21] 薛选登,谢宇.黄河流域粮食主产区耕地利用生态效率时空差异与空间收敛:来自60个地级市的经验证据[J].中国农业资源与区划,2024,45(4):52-65.
Xue Xuandeng, Xie Yu. The spatial-temporal differences and spatial convergence of ecological efficiency in cultivated land utilization in the main grain-producing areas of the Yellow River basin: Evidence from 60 prefecture-level cities [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(4):52-65.

[22] Ke Xinli, Zhang Ying, Zhou Ting. Spatio-temporal characteristics and typical patterns of eco-efficiency of cultivated land use in the Yangtze River economic belt, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023,33(2):357-372.

[23] 张惠中,宋文,张文信,等.山东省耕地"非粮化"空间分异特征及其影响因素分析[J].中国土地科学,2021,35(10):94-103.
Zhang Huizhong, Song Wen, Zhang Wenxin, et al. Analysis of spatial differentiation characteristics and influencing factors of non-grain cultivated land in Shandong Province [J]. China Land Science, 2021,35(10):94-103.

[24] 柯楠,卢新海,匡兵,等.碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J].中国土地科学,2021,35(8):67-76.
Ke Nan, Lu Xinhai, Kuang Bing, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China [J]. China Land Science, 2021,35(8):67-76.

[25] 韩海彬,王娇芬.技术异质性下中国耕地利用生态全要素生产率时空演变及提升路径[J].资源科学,2023,45(2):235-249.
Han Haibin, Wang Jiaofen. Spatiotemporal evolution and improvement pathway of ecological total factor productivity of cultivated land use in China under technological heterogeneity [J]. Resources Science, 2023,45(2):235-249.

(下转第277页)