

# 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

王建鹏<sup>1</sup>, 尹士<sup>2</sup>, 马立军<sup>1</sup>, 甘天琦<sup>3</sup>, 徐磊<sup>1,4</sup>

(1.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071001; 2.河北农业大学 经济管理学院, 河北 保定 071000; 3.中南民族大学 经济学院, 武汉 430074; 4.河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000)

**摘要:**为探究河北省耕地生态效率内在提升机制以及实现耕地经济、社会、生态综合效益最大化,以河北省 137 个县域为单元,利用非期望 SBM 模型测度 2000—2017 年河北省县域耕地生态效率,并从省、市、县层次分析耕地生态效率的时空特征,运用空间自相关探寻空间作用关系,采用收敛模型进行了收敛分析。结果表明:(1)从省、市角度来看,河北省耕地生态效率在研究期内大致呈现先下降后上升的趋势,即由 0.773 下降到 0.563,再上升到 0.796,效率水平还有待提高。(2)从县域来看,整体上各县耕地生态效率水平有所提升,但处于无效状态的县域单元较多,占总单元的 89.1%,并且在空间上存在一定的聚集效应。(3)从收敛性情况来看,河北省全省和北部、中部的耕地生态效率整体上均存在不稳定的  $\sigma$  收敛,而南部不存在  $\sigma$  收敛。同时河北省耕地生态效率存在绝对  $\beta$  收敛,主要体现在北部、中部、南部之间,其内部不存在绝对  $\beta$  收敛。河北省耕地生态效率尚存较大提升空间,北部、中部、南部区域内部各县耕地生态效率差异正逐步扩大,区域内各县未来应加强合作,促进区域各县农业协调发展。

**关键词:**SBM 模型; 耕地生态效率; 时空演变; 收敛性分析

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0081-09

## Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Cultivated Land Ecological Efficiency in Hebei Province Based on SBM Model

WANG Jianpeng<sup>1</sup>, YIN Shi<sup>2</sup>, MA Lijun<sup>1</sup>, GAN Tianqi<sup>3</sup>, XU Lei<sup>1,4</sup>

(1.College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China;

2.College of Economics and Management, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000,

China; 3.School of Economics, Central South University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

4.Key Laboratory of Farmland Ecological Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China)

**Abstract:**In order to explore the inherent improvement mechanisms of cultivated lands' ecological efficiency in Hebei Province and maximise the comprehensive benefits of cultivated land economy, society and ecology, taking 137 counties in Hebei Province as a unit, the undesired SBM model was used to measure the ecological efficiency of County Cultivated Land in Hebei Province from 2000 to 2017. The temporal and spatial characteristics of cultivated land ecological efficiency were analysed from the provincial, municipal and county levels. The spatial autocorrelation was used to explore the spatial relationship, and the convergence model was used for convergence analysis. The results show that: (1) From the perspective of province and city, the overall cultivated land ecological efficiency of Hebei Province fluctuated in 18 years, showing a trend of first decreasing and then increasing, that is, from 0.773 to 0.563, and then rising to 0.796. Although it has improved, the overall level needs to be improved. (2) From the perspective of counties, the level of cultivated land ecological efficiency in each county has improved on the whole, but there are many county units in an invalid state, accounting for 89.1% of the total research units, and there is a certain spatial aggregation effect in the space of cultivated land ecological efficiency in each county. (3) From the convergence point of view,

收稿日期:2021-08-07

修回日期:2021-09-06

资助项目:2019 年度河北省社会科学发展研究课题(2019031204012);河北农业大学引进人才科研专项基金项目(YJ201807);保定市哲学社会科学规划课题(2022045)

第一作者:王建鹏(1996—),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为土地评价与可持续利用。E-mail:1136959902@qq.com

通信作者:徐磊(1985—),男,河北唐山人,博士,讲师,主要从事土地资源利用与区域经济发展研究。E-mail:xulei09@163.com

the ecological efficiency of cultivated land in Hebei Province, the north and the central region have an unstable  $\sigma$ -convergence on the whole, but there is no  $\sigma$ -convergence in the south. At the same time, there are absolute  $\beta$  Convergences in Hebei Province, but absolute  $\beta$  Convergence is reflected in the north, central and south, while there is no absolute  $\beta$  Convergence in the interior. There is still much room for improvement in the ecological efficiency of cultivated land in Hebei Province. The differences in the ecological efficiency of cultivated land among counties in the northern, central and southern regions which are gradually expanding. In the future, the counties in the region should strengthen cooperation to promote the coordinated development of agriculture in each county in the region.

**Keywords:** SBM model; ecological efficiency of cultivated land; temporal and spatial evolution; convergence analysis

《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标》中强调“优化发展农村农业,全面推进乡村振兴”,坚持把妥善解决“三农”问题作为全党工作的重中之重<sup>[1]</sup>。我国以占世界不到 10% 的耕地却养活了世界近 20% 的人口<sup>[2]</sup>,在取得重大农业成就的同时,也普遍存在土地环境污染问题以及资源浪费等现象。耕地作为农业生产的基础要素,耕地的生态破坏和粗放利用也长期以来受到学者的重点关注,如何提高耕地资源的综合效益逐步成为学者们研究的热点。此外,农业生产中化肥、农药及地膜等大量的投入和使用也造成了农业碳排放量的逐渐增加,农业已经成为仅次于工业的第二大温室气体排放源。面对我国农业低碳生产的紧迫性,在努力实现“碳中和”与“碳达峰”的目标下,将碳排放作为耕地利用的负外部效应,如何提升耕地的生态效率、降低耕地利用中的碳排放效应,兼顾耕地资源的经济、社会及生态效益,已经成为我国农业产业化发展、耕地高效利用的重要切入点。

1992 年生态效率被德国学家 Schaltegger 和 Sturn 提出后,受国内外众多不同领域学者的青睐,被用于不同的领域<sup>[3-4]</sup>。国内外的研究主要集中在产品<sup>[5]</sup>、行业<sup>[6]</sup>、城市<sup>[7-8]</sup>及区域等<sup>[9]</sup>方面,而对农业生态效率,特别是耕地生态效率的研究相对较少。这与农业相较于其他产业更易受到轻视有关。随着对农业的重视和可持续发展的必然要求,国内逐渐开展对耕地生态效率的研究,并取得显著的成果。从研究内容的视角上,研究主要集中于生态效率的测度<sup>[10-12]</sup>、时空特征<sup>[13-15]</sup>、影响因素<sup>[16-18]</sup>、收敛性等<sup>[19-21]</sup>方面。除此之外,还有学者对以低碳视角来分析耕地生态效率的研究,如刘丽钦<sup>[22]</sup>将碳排放和碳汇纳入耕地生态效率中进行测度等。从研究单元尺度视角上,耕地生态效率的研究可分为宏观、中观和微观,并有逐步向微观研究方向发展的趋势<sup>[16]</sup>。宏观上,即以省为研究单元,如潘丹等<sup>[23]</sup>对全国各省的农业生态效率

进行测度和分析;中观上,即以市为研究单元的研究,如张红梅等<sup>[4]</sup>采用 DEA 模型和协调发展模型分析黑龙江省各市耕地生态效率;微观尺度上,即以县镇为研究单元,如王玲<sup>[24]</sup>对西吉县各乡镇的耕地生态效率进行分析。从研究的方法上,关于耕地生态效率的测度有 DEA 模型<sup>[4]</sup>、SBM 模型<sup>[23]</sup>、超效率 SBM 模型<sup>[15]</sup>、混合方向性距离函数模型等<sup>[25]</sup>方法进行测度。

综上所述,已有耕地生态效率的研究成果较为丰富,为本文的选题与写作提供了坚实的理论基础和参考。对于耕地生态效率的研究有以下特征:从研究单元尺度上,大多从中宏观角度考虑,以县为研究单元研究耕地生态效率的研究还比较鲜见;从研究方法上,应用 SBM 模型测度耕地生态效率已经比较成熟,但考虑生态效果,即低碳减排将 CO<sub>2</sub> 作为非期望产出,并同时考虑社会经济效益将农业产值和粮食产量作为期望产出的研究相对较薄弱;从研究内容上,相关研究大多分析耕地生态效率时空特征和影响因素,针对耕地生态效率收敛性的研究还较为欠缺,而分析耕地生态效率收敛水平有助于分析不同区域间耕地生态效率是否存在差异,并剖析该区域差异是否会随时间而消失。区域内及区域之间耕地生态效率差异扩大,不仅加剧耕地生态效率较低地区的资源浪费和环境负外部效应,而且不利于农业生产的协调发展,甚至阻碍地区乡村农业发展的步伐。基于此,本文运用 MATLAB 软件,采用基于规模报酬可变的非径向 SBM 模型,对 2000—2017 年河北省 137 个县级单元耕地生态效率在考虑经济效应、社会效应、生态效应下进行测算,并结合 GIS 空间分析技术,从中宏观尺度(省域和各市,其中省域和各市的数据均为其范围内的各县平均值)和微观尺度(县级单元)出发,分析河北省耕地生态效率的时空特征,并通过收敛性分析,探究河北省全省的耕地生态效率的收敛情况,以期寻求河北省县域耕地生态效率提升的内在机制和演变规律、缩小地区及区域间耕地生态效率的差

距,为促进河北省农业向低排放、低消耗、高产出的方向发展提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河北省位于 36°03′—42°40′N,113°27′—119°50′E,其下设 11 个地级市,共有 49 个市区、21 个县级市、91 个县。东邻北京、天津,是京津冀地区重要组成部分,北与辽宁省和内蒙古自治区接壤,西与山西省交界,南紧邻河南省和山东省。河北省属于大陆性季风气候,辖内地形多样,有平原、高原、山地和丘陵,是华北地区产粮大省<sup>[26]</sup>。市区耕地较少,而县域耕地更具研究价值。因此,本文将 137 个县域(包括县,县级市以及一些近几年才划入市区的市区)作为研究区。

1.2 数据来源

本文利用河北省县域单元的面板数据,主要来源于 2001—2018 年《河北农村统计年鉴》《中国县(市)

社会经济统计年鉴》,部分缺失数据采用插值法或相邻两年均值来替代。此外,为了剔除价值变动的影响,农业产值全部换算成基期为 2000 年的可比数据。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

耕地生态效率的研究旨在尽可能降低资源投入,不断提高期望产出水平,同时降低非期望产出。本文评价耕地生态效率的投入指标参考刘海龙等<sup>[16]</sup>研究成果,分别取土地、劳动、机械、化肥、农膜作为资源投入。考虑社会和经济上的影响,期望产出指标选择粮食产量和农业产值。农业生产的粮食产量关乎社会的稳定,农业产值则关乎从事农业生产人员的收入水平。考虑生态影响,非期望产出指标选取农业碳排放。参考已有文献<sup>[16,27-28]</sup>,结合数据可获性及口径一致性的原则,构建河北省耕地生态效率测度指标体系,见表 1。

表 1 耕地生态效率测度指标

项目	类型	指数	指标层	指标解析
耕地生态效率	能源投入	土地投入	农作物播种面积/hm <sup>2</sup>	表征耕地的实际种植面积
		劳动投入	农业从业人员/人	表征从事农业的人员
		机械投入	农业机械总动力/10 <sup>4</sup> kW	表征农业现代化程度
		资源投入	农用柴油使用量/t	农业生产过程中,化肥、农药、农膜、柴油等都是主要的污染源
		化肥投入	农用化肥施用量(折 t 量)/t	
		农药投入	农药使用量/t	
		农膜投入	地膜使用量/t	
	期望产出	农业产出	粮食总产量/t	农业生产的粮食产出
			农业增加值/万元	农业生产的纯收入
	非期望产出	碳排放	农业排放/t	参考刘海龙 <sup>[16]</sup> 、侯孟阳 <sup>[27]</sup> 、王宝义 <sup>[28]</sup> 等的研究成果

2.2 非期望产出 SBM 模型

DEA 作为研究组织效率的模型已被广泛运用,并延伸到各个领域。其采用帕累托最优原理,追求一种效率境界,即只有增加投入或减少其他项产出,产出项的产量才能增加或是只有减少产出量或者增加其他投入项的量,投入项才能减少<sup>[29]</sup>。DEA 测算效率也有其弊端,国内外学者不断修正和完善,如麦氏 DEA、SBM、超效率 SBM,也早已将其用于农业生态效率的测算,并取得众多学术成果<sup>[2-3,29-30]</sup>。

本文采用非期望 SBM 模型,其是 Tone<sup>[31]</sup>在前人的基础上提出的一种可以处理非期望产出的并考虑松弛性的模型,公式为:

$$p = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

(1)

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^-, y_0^g = Y^g\lambda - s^g, y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p$  为耕地生态效率值; $m, a, b$  分别为投入、期望产出、非期望产出个数; $x, y^g, y^b$  分别为投入、期望产出以及非期望产出值; $\lambda$  为投入产出权重; $s^-, s^g, s^b$  分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量。从严格意义来说,函数  $p$  关于  $s^-, s^g, s^b$  单调递减,且  $0 \leq p \leq 1$ ,当且仅当  $p = 1$  时决策单元效率相对有效。

2.3 空间自相关模型

耕地生态效率可能受到空间关系的影响。为了探究效率的空间关系,本文运用全局空间自相关模型分析其空间集聚特征,其公式为:

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

(3)

式中: $n$  为县域单元; $\bar{x}$  为评价单元耕地生态效率均

值; $\sigma^2$  为样本方差; $x_i, x_j$  分别为空间位置  $i$  和  $j$  的观察量; $w_{ij}$  则为空间关系,  $i$  和  $j$  相邻, 则  $w_{ij}$  为 1, 不相邻则为 0;  $I \in [-1, 1]$ , 大于 0 为正相关, 小于 0 为负相关, 等于 0 为不相关。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于 SBM 模型的耕地生态效率分析

##### 3.1.1 河北省省域及市域耕地生态效率分析

(1) 河北省省域耕地生态效率分析。如图 1 所示, 2000—2017 年河北省耕地生态效率整体呈现震荡起伏的过程, 其趋势为波动下降再波动上升。这说明 18 a 来河北省耕地生态效率整体上有所提升, 但考虑到历年均未达到 0.8, 说明河北省耕地生态效率还具有很大的提升空间。大体呈现先下降后上升的原因可能是随着经济的发展, 各种农药化肥等的投入使耕地生态效率降低, 但又随着环保意识和认知的提升等因素致使耕地生态效率有所提升。

(2) 河北省市域耕地生态效率分析。考虑到数据可比性和可视化, 运用 ArcGIS 10.6 软件中的自定义分类法, 分别对 2000 年、18 a 年均和 2017 年各市耕地生态效率数据分为 5 类, 分类区间分别  $(0.5, 0.6]$ ,  $(0.6, 0.7]$ ,  $(0.7, 0.8]$ ,  $(0.8, 0.9]$ ,  $(0.9, 1.0]$ , 为了便于描述, 对应的区间分别赋予差、较差、良、较优、优 5 种描述方式, 其结果见图 2。根据 4 幅图以及数据得出以下两点结论。

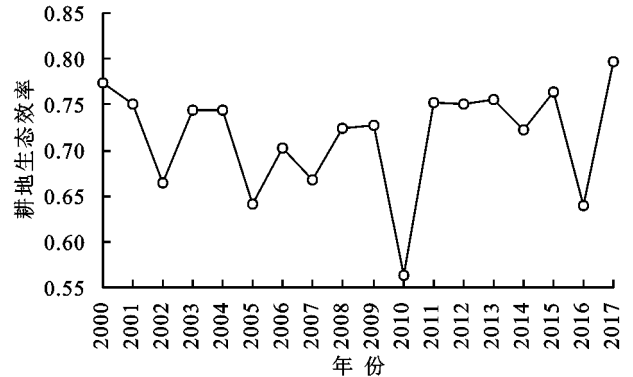


图 1 2000—2017 年河北省耕地生态效率变动趋势

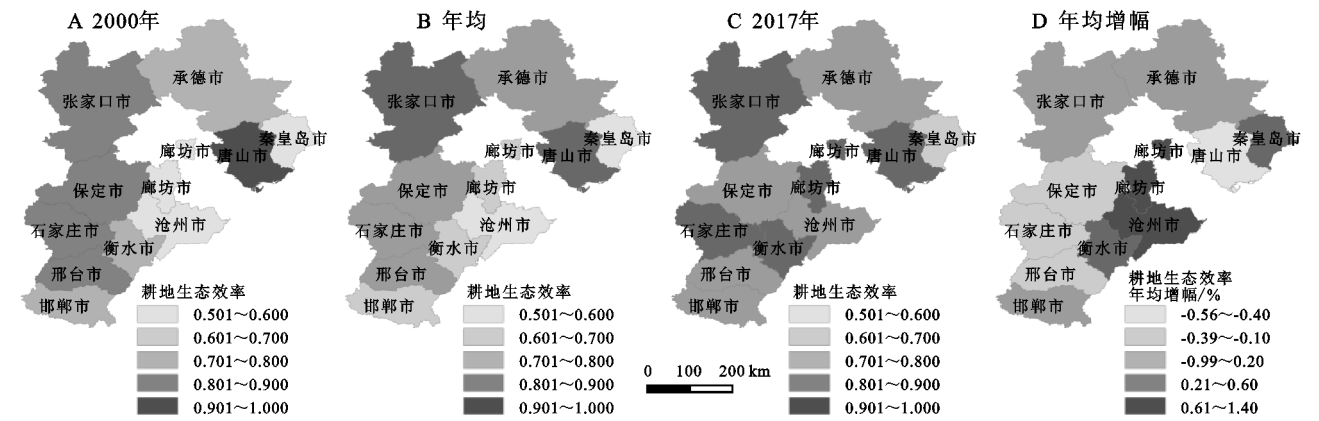


图 2 河北省各市耕地生态效率时空演变

① 2000—2017 年各市耕地生态效率差距在缩短, 整体上有所提升。2000 年唐山市耕地生态效率整体处于优的状态, 廊坊市、沧州市、秦皇岛市 3 市耕地生态效率处于差的状态; 由年均数据可知, 唐山市耕地生态效率的状态由优到较优的转变, 而廊坊市则从差到较差发展; 从 2017 年数据可知, 处于较差状态的沧州市和秦皇岛市也已提升到更高的状态, 各市耕地生态效率为 0.6~0.9。

态分别占 25%, 66.6%, 0%; 从年均可知, 北部 4 市、中部 3 市和南部 4 市耕地生态效率处于较优及以上的状态分别占 50%, 0%, 0%, 处于较差及以下的状态分别占 25%, 66.7%, 50%; 2017 年仅有北部秦皇岛市耕地生态效率处于较差状态, 其他各地耕地生态效率则均处于一般或较优的状态。

② 耕地生态效率在空间上具有差异性, 体现在以下两个方面: 一方面具有区域差异, 即河北中部 3 市(保定市、廊坊市、沧州市)的耕地生态效率明显比北部 4 市(张家口市、承德市、唐山市、秦皇岛市)以及南部 4 市(石家庄市、邢台市、邯郸市、衡水市)的差, 但差距在缩小, 中部 3 市耕地生态效率提升较快。2000 年北部 4 市、中部 3 市和南部 4 市耕地生态效率处于较优及以上的状态分别占 50%, 33.3%, 50%, 处于较差及以下的状

另一方面具有市间差异, 即各市间耕地生态效率发展差异较大, 主要体现在各市级单元的耕地生态效率增幅随时间变化呈现不同特征。对于耕地生态效率较好的市, 其增幅相对较慢并呈现逐年下降的趋势; 而对于耕地生态效率较差的市, 其增幅相对较快。2000—2017 年唐山、石家庄、保定等市的耕地生态效率相对较好, 但随着时间的推移耕地生态效率反而出现缓慢下降的趋势。对于唐山和石家庄而言, 其原因可能与两个城市的经济水平和发展有着密切的关系(两市的 GDP 常年处于全省第一和第二的水



平)。其经济发展水平较高,农业消费市场庞大和消费能力较强,使得更多的资源和资本流入到农业中,投入到耕地上,故其耕地生态效率长期处于较好状态。但是经济发展,使得农民不满农业的低收入,为提高产量而加大对化肥、农药、机械等资源的消耗使得耕地生态效率有所缓慢下降。对于保定和邢台而言,其原因更多与区位有关。保定紧邻北京,农业生产要受到北京农业技术和农业消费市场的影响,北京先进农业技术以及庞大的农业消费市场,使得保定的耕地生态效率处于较高水平,但张家口和廊坊等地农产品正不断蚕食保定农产品在北京的消费市场份额,使得保定农业产出更多依赖产量的提升,而产量的提升则更多依赖石油等资源的消耗,故耕地生态

效率有缓慢下降趋势。而其他城市,尤其是起初耕地生态效率较差地区,如廊坊市和沧州市耕地生态效率的增幅较为明显。这可能与其区位有关,廊坊市紧邻北京、天津,沧州紧邻天津并处于沿海地带,更易使资本和资源以及先进技术和理念等优势条件流入农业生产中,使得其提高耕种水平,形成低碳发展和农业人口转型,促进优化投入产出配置,从而耕地生态效率提升较快。

3.1.2 河北省县域耕地生态效率分析 为了便于直观分析,本文利用 ArcGIS 软件的自定义法和自然间断点法,对 2000 年、18 a 年均、2017 年耕地生态效率和年均增幅数据结合遥感数据进行处理,制作可以反映河北省各县耕地生态效率的地图,见图 3。

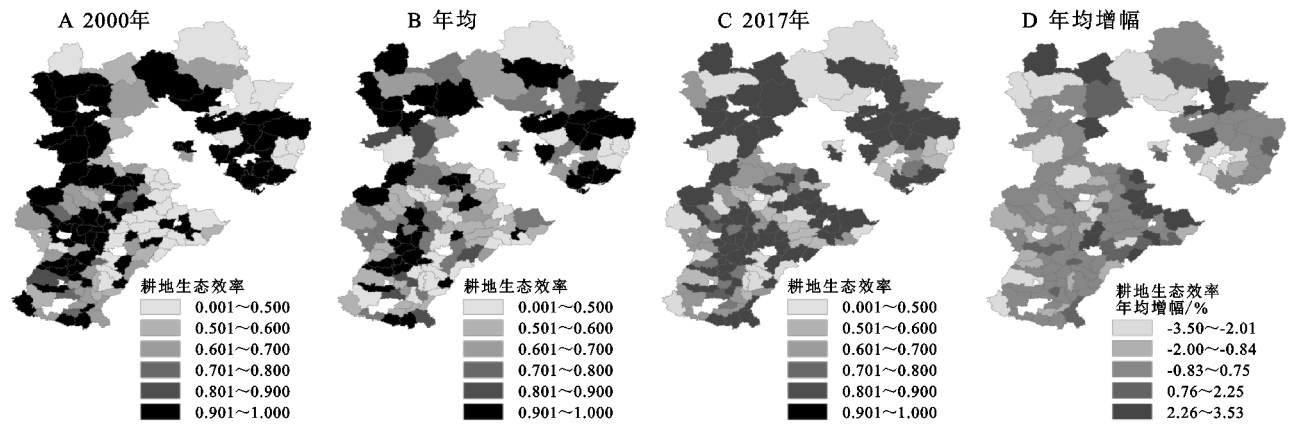


图3 河北省各县耕地生态效率时空演变

就分析结果而言,除少数县的耕地生态效率处于有效状态,绝大多数县的耕地生态效率均处于无效状态,有待进一步改善。容城县、栾城区等 15 个县级单元无论是 2000 年或是 2017 年,还是年均耕地生态效率均为 1,即处于有效状态。这表明这些县级单元的耕地生态效率在河北省长期处于相对最前沿的位置。当然,其数量仅占总研究单元的 10.9%,也就是说绝大多数县级单元处于无效,甚至是低效状态。有些县级单元耕地生态效率虽然从年均上看处于无效状态,但其值接近于 1,如孟村回族自治县、内丘县等 13 个单元。这些地区的耕地生态效率仅有个别年份处于无效,大部分处于有效,即投入产出配置与产出效果处于河北省同县域单元的前沿水平。但是还有占总研究单元的 79.6%,即 109 个县级单元,其耕地生态效率在绝大多数年份都处于无效状态,甚至低效率水平,并且有占 15.3%,即 21 个县级单元耕地生态效率长期低于 0.5。这进一步说明河北省各县的耕地生态效率有很大的改善空间。

各县耕地生态效率的时间演变分析。整体上各县生态效率水平有所提升,特别是耕地生态效率较差的县级单元的提升显著,但各县的耕地生态效率依然

大多处于无效状态,有待提升。其中,2000 年、18 a 年均、2017 年耕地生态效率最低的县,其值分别为 0.319,0.266,0.357,且 2000 年排倒数第一的县,即抚宁区年均水平和 2017 年水平分别已排到 134 名和 118 名,抚宁区耕地生态效率的提升主要得益于抚宁区粮食单产的提高,2000 年其粮食单产为 2.16 t/hm<sup>2</sup>,到了 2017 年粮食单产为 3.09 t/hm<sup>2</sup>,造成 2000 年抚宁区耕地生态效率无效的原因是很多投入和产出指标的冗余或产出不足,其中粮食产出不足是造成耕地生态效率低下的最大的制约因素,经过 18 a 的发展,可能受当地培育种植耐碱粮食品种、土地平整等积极因素影响,期望产出中的粮食产量已达到有效水平,因此抚宁区耕地生态效率有所提升;2000 年、18 a 年均、2017 年排倒数前 10 的县耕地生态效率值平均水平为 0.374,0.353,0.388,导致其耕地生态效率先下降后上升的原因是最初这些地区投入的农药和农膜的过量使用造成冗余增加,期望产出的粮食产量增幅效果不大,产出不足率较高。随着时间的发展,粮食产量的大幅提升,大大降低粮食产量的产出不足率,因此耕地生态效率得以提升。无论是抚宁县还是耕地生态效率最低的 10 个县都受制于其他投入和非期望产出冗余

或是期望产出不足,尤其是农药冗余和农膜冗余较大,使得耕地生态效率依旧较低,有待改善。

(2) 各县耕地生态效率的空间演变分析。首先对 2000—2017 年各县耕地生态效率利用莫兰指数,进行全局空间自相关分析,其结果见表 2。可知,2000—2007 年全球 Moran's  $I$  均通过 5% 的显著性检验,并且其值为正,说明耕地生态效率在该阶段存在显著的正向空间自相关性,即在空间上的集聚分布。但是在 2008—2017 年全球 Moran's  $I$  未通过显著性检验,其值也较小,说明该阶段耕地生态效率空间上的集聚在全局上并不明显。

表 2 2000—2017 年河北省耕地生态效率全局 Moran's  $I$  指数

年份	Moran $I$ 指数	$z$ 得分	$p$ 值
2000	0.103	2.935	0.003
2001	0.067	1.996	0.046
2002	0.136	3.826	0.000
2003	0.143	4.005	0.000
2004	0.129	3.634	0.000
2005	0.092	2.661	0.008
2006	0.156	4.354	0.000
2007	0.085	2.474	0.013
2008	0.023	0.804	0.421
2009	-0.055	-1.268	0.205
2010	0.050	1.544	0.123
2011	-0.012	-0.131	0.896
2012	-0.082	-1.990	0.047
2013	-0.076	-0.076	0.066
2014	-0.013	-0.147	0.883
2015	0.059	1.758	0.079
2016	0.011	0.490	0.624
2017	-0.076	-1.824	0.068
年均	0.057	1.727	0.084

各县耕地生态效率虽然在全局上的集聚效果不佳,但在局部明显存在集聚效应。由图 3 可知,2000 年河北省各县耕地生态效率极高值集中在唐山、张家口、石家庄、保定以及邢台地区的县域,极低值集中在廊坊南部、保定东部、沧州、秦皇岛沿海地区;河北省年均耕地生态效率极高值和极低值减少明显,极高值集聚在唐山—秦皇岛—承德交界地区以及张家口南部和东部、石家庄东南部地区,极低值分布在秦皇岛、沧州、衡水地区;2017 年河北省耕地生态效率极高值集中分布在张家口、石家庄—邢台—衡水交界地区以及在唐山—秦皇岛—承德交界地区,极低值较少,主要分布在承德西北地区以及衡水—邢台交界地区;大部分地区年均变化幅度不大,石家庄部分地区(如平山县、正定县等县域单元)有小幅下降,唐山部分地区

(如滦州市、丰南区等县级单元)有大幅下降,廊坊大部分地区(如广阳区、固安县等)和沧州沿海地区(如青县、东光县等县级单元)的耕地生态效率有小幅甚至大幅改善。对比 2000 年数据、18 a 年均数据、2017 年数据以及年均增幅数据,各县耕地生态效率略有提升,体现在耕地生态效率集低值区域大幅减少,廊坊的广阳区和安次区尤为突出,从 2000 年的极低值提升到 2017 年的极高值,这可能与其临近京津地带,农业生产资源投入和先进技术以及节约低耗理念等积极因素更易流入该县级单元,使其耕地生态效率得到大幅提升,而沧州沿海地区相对内陆地区更易接触到更多的资源和资金,加上其农业受盐渍化等的消极影响,该地区对农业更加重视,故该地区各县耕地生态效率有所提升。对于秦皇岛的若干县域单元的耕地生态效率长期处于低值,其原因可能是将发展中心放在经济效益较高的其他行业,从而忽视相对弱势的农业的发展,再加上经济的快速发展也一定程度上加剧了农业碳排放,导致其耕地生态效率长期处于低水平的无效状态。

3.2 耕地生态效率的收敛性分析

耕地生态效率的收敛性分析可以更清楚地了解随时间变化,地区间是否还存在耕地生态效率差距,是否生态效率较差地区的增速比较好地区更快,从而最终都达到相同的水平。或者反过来说检验是否存在效率上的“马太效应”,即耕地生态效率较好地区是否会与耕地生态效率差的地区差距逐渐扩大。常用的收敛分析有  $\sigma$  收敛和  $\beta$  收敛,而  $\beta$  收敛又分为绝对  $\beta$  收敛和条件  $\beta$  收敛。为了解河北省内部耕地生态效率收敛情况,本文根据地理纬度与耕地生态效率时空演变特征将河北省分为北部(即张家口市、承德市、唐山市、秦皇岛市的县级单元)、中部(即保定市、廊坊市、沧州市的县级单元)、南部(即石家庄市、邢台市、邯郸市、衡水市的县级单元),采用  $\sigma$  收敛和绝对  $\beta$  收敛来检验河北省各县、北部各县、中部各县以及南部各县的耕地生态效率的收敛性。

3.2.1 耕地生态效率  $\sigma$  收敛分析 耕地生态效率  $\sigma$  收敛是分析不同地区间的耕地生态效率差异变化的水平趋势,通常用标准差和变异系数来验证<sup>[32]</sup>,其公式为:

$$S = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2\right] / N}$$
(4)

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}_i}$$
(5)

式中: $S$  为标准差; $Y_i$  为地区  $i$  的耕地生态效率; $\bar{Y}_i$  为

地区  $i$  的耕地生态效率的平均值;  $N$  为地区区数量;  $CV$  为变异系数。

根据河北省各县耕地生态效率计算出标准差和变异系数,分析河北省和 3 个区域县域耕地生态效率的  $\sigma$  收敛情况。

从全省视角分析(图 4),可知河北省县域耕地生态效率的标准差和变异系数在 2000—2017 年同步呈现波动起伏的趋势,但整体呈现下降的趋势,说明河北省县域耕地生态效率整体上  $\sigma$  收敛,但这种收敛性并不稳定,具有“总体收敛,局部发散”的特点。

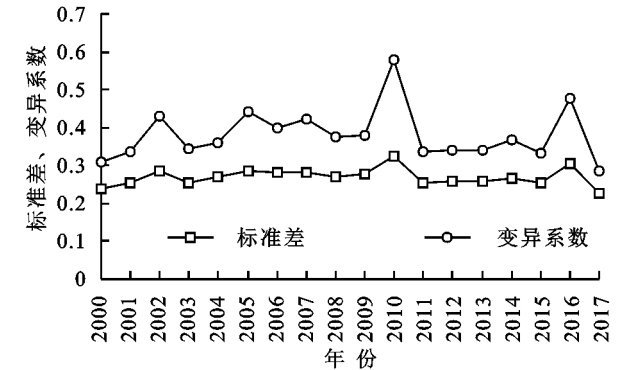


图 4 河北省县域耕地生态效率  $\sigma$  收敛结果

从北部、中部、南部 3 个区域分析,由于全省和 3 个区域的标准差和变异系数的变化趋势十分相近,本文仅展示变异系数,见图 5。可以发现北部、中部和南部同河北省收敛变化趋势大致相似,其中北部和中部整体上具有同全省相同特点的不稳定的  $\sigma$  收敛,但相比较而言,北部稳定性最好,中部稳定性最差,但中部的  $\sigma$  收敛效果最好。这是因为中部地区的廊坊和沧州大部分县在 2000 年耕地生态效率较低,到 2017 年耕地生态效率提升较快,耕地生态效率年增速分别达到了 1.37%, 1.10%,而保定大部分县耕地生态效率在 2000 年处于较好状态,但 2017 年有所下降,年均增幅为 -0.4%,因此  $\sigma$  收敛效果较好一些。而南部整体上有微弱的上升,但局部有下降趋势,这表明南部不存在  $\sigma$  收敛,具有“总体发散,局部收敛”的特点。

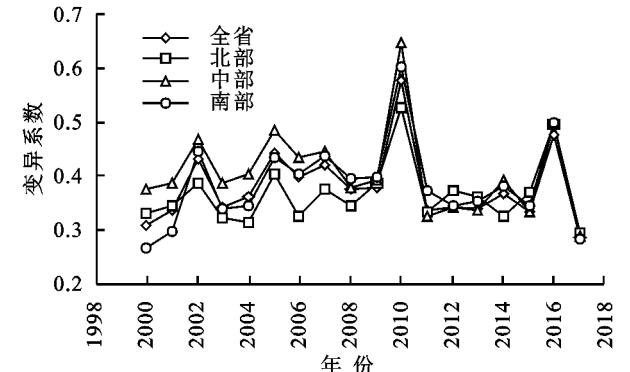


图 5 河北省及其北中南部县域耕地生态效率  $\sigma$  收敛结果

3.2.2 耕地生态效率绝对  $\beta$  收敛分析 耕地生态效率绝对  $\beta$  收敛是检验是否存在耕地生态效率暂时落后地区追赶暂时领先地区的趋势,最终都达到一个共同稳定值的现象<sup>[33]</sup>,其公式为:

$$\frac{1}{T} \ln \left( \frac{I_{i,t+T}}{I_{i,t}} \right) = \alpha + \beta \ln I_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (6)$$

式中:  $I_{i,t}$ ,  $I_{i,t+T}$  分别为各地区在  $t$  期、 $t+T$  期的耕地生态效率;  $T$  为时间跨度;  $\alpha$  为常数项;  $\beta$  为收敛系数;  $\epsilon_{i,t}$  为随机扰动项。若  $\beta$  为负值且显著,说明存在绝对  $\beta$  收敛。

根据表 3 显示可知,  $\beta$  系数小于 0,且结果具有显著性,河北省县域耕地生态效率存在绝对  $\beta$  收敛,即各县级单元之间存在随时间推移,耕地生态效率较差的地区在追赶较好地区,各地区间差距在逐渐缩小。但是北部、中部以及南部都不存在绝对  $\beta$  收敛,说明在北部、中部、南部地区各县耕地生态效率差异不会消失,这与全省收敛情况有一定出入,综合考虑说明在全省范围内存在绝对  $\beta$  收敛,但并不存在于北部、中部、南部区域内,而存在于 3 个区域间,即随着时间的推移,河北省北部、中部、南部内的各县的耕地生态效率之间差距会拉大,但 3 个区域间各县的耕地生态效率之间的差距会缩小。

表 3 河北省及其北中南部县域耕地生态效率绝对  $\beta$  收敛结果

项目	全省	北部	中部	南部
$\sigma$	-0.4607882***	0.447502***	0.4323767***	0.46412***
$\beta$	-0.1968435***	0.1443536***	0.213514***	0.203755***
$R^2$	0.2308	0.2253	0.2162	0.2304
$F$	698.07***	173.7***	205.78***	294.67***

注:\*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 10%, 5%, 1% 下显著。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 从省、市角度来看,河北省总体耕地生态效率在 18 a 内波动起伏,大致呈现先下降后上升的趋势,整体水平有待提高,各市耕地生态效率存在差距缩小和水平提升的时间特征以及区域差异和市间差异的空间特征。在区域差异上,河北中部 3 市的耕地生态效率明显比北部 4 市以及南部 4 市的差,但差距在缩小,中部 3 市耕地生态效率提升较快。在城市之间差异上,各市之间耕地生态效率发展差异较大,主要体现在各市级单元的耕地生态效率增幅随时间变化呈现不同特征,此外,各市耕地生态效率增幅情况不一,且耕地生态效率较好的地区增幅较慢甚至略有下降趋势,较差地区增幅较快。



(2) 从县域来看,整体上各县耕地生态效率水平有所提升,但耕地生态效率处于有效状态的县级单元较少,仅占10.9%,大多县级单元处于无效状态,而且存在一定的空间聚集效应。从时间上分析,整体上各县生态效率水平有所提升,特别是耕地生态效率较差的县级单元的提升显著;从空间上看,通过全局空间自相关分析,河北省各县耕地生态效率在2000—2007年有明显时空分布特征,即存在正向自相关,在2008—2017年全局上空间特征并不明显,但局部仍具有空间特征,即局部空间集聚效应,体现在唐山、石家庄、张家口等地区的县级单元长期处于耕地生态效率极高值,耕地生态效率增长较快地区集中在廊坊地区以及沧州沿海地区。

(3) 从收敛性情况来看,河北省和北部、中部的县域耕地生态效率整体上均存在不稳定的 $\sigma$ 收敛,具有“总体收敛,局部发散”的特点。而南部不存在 $\sigma$ 收敛,具有“总体发散,局部收敛”的特点。同时河北省耕地生态效率存在绝对 $\beta$ 收敛,但绝对 $\beta$ 收敛体现在北部、中部、南部之间,其内部各县则不存在绝对 $\beta$ 收敛。

## 4.2 建议

(1) 从耕地生态效率的时间演变特征来看,耕地生态效率较差的地区提升较快,耕地生态效率较好地区有缓慢下降趋势。因此,经济和耕地生态效率较高的县级单元,要侧重生态保护和资源节约,以防耕地生态效率下降;经济差但耕地生态效率好的县级单元,应在保障耕地生态效率不降低的前提下增加农业投入和产出;经济好但耕地生态效率差的单元,要充分利用经济优势,加大对耕地的经济投入,调整资源投入结构,从而提升耕地生态效率;经济和生态效率较差单元,要优化资源配置,发展特色农业产业,从而改善耕地生态效率水平。

(2) 从耕地生态效率的空间演变格局来看,耕地生态效率高集聚区,如唐山、石家庄等地区的县域未来应加强先进技术和要素配置分享,将有利要素流通过到周边耕地生态效率相对较差区域,以改善周边耕地生态效率;耕地生态效率低集聚区域,特别是沿海和临近北京、天津或石家庄的县级单元应充分发挥区位优势,向周边耕地效率较好区域学习,以提升自身耕地生态效率。

(3) 从耕地生态效率的收敛特征来看,河北省北部、中部、南部区域内部各县耕地生态效率差距扩大,不利于农业生产的协调发展,如果不加约束和管控,耕地生态效率较差地区不仅会浪费资源,带来环境污

染,还会对周边地区带来较强的负外部效应。因此河北省北部、中部、南部各县应相互合作,进一步探索耕地生态效率收敛机理,缩小区域内部耕地生态效率差异,促进区域各县农业协调发展。

## 参考文献:

- [1] 新华社.中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议公报[EB/OL].新华网,2020-10-29[2021-08-07]. [http://www.xinhuanet.com/2020-10/29/c\\_1126674147.htm](http://www.xinhuanet.com/2020-10/29/c_1126674147.htm).
- [2] Li G C. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008[J]. *China Economic Quarterly*, 2014,13(2):537-558.
- [3] Norse D. Low carbon agriculture: Objectives and policy pathways[J]. *Environmental Development*, 2012,1(1):25-39.
- [4] 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.
- [5] Hahn T, Figge F, Liesen A, et al. Opportunity cost based analysis of corporate eco-efficiency: A methodology and its application to the CO<sub>2</sub>-efficiency of German companies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010,91(10):1997-2007.
- [6] Willison J H M, Côté R P. Counting biodiversity waste in industrial eco-efficiency: fisheries case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009,17(3):348-353.
- [7] 邵必林,杨会会,王茹.关中城市群生态效率评价:基于功能分工视角的分析[J].*国土与自然资源研究*,2021(3):61-66.
- [8] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].*地理学报*,2018,73(7):1242-1252.
- [9] 孙振清,鲁思思,刘保留.省级区域生态效率评价及提升路径研究:基于超效率SBM模型和Tobit回归[J].*生态经济*,2021,37(1):124-129.
- [10] 任红霞.基于DEA模型的农业生态效率综合测度[J].*统计与决策*,2019,35(6):99-103.
- [11] 崔叶辰,韩亚丽,吕宁,等.基于超效率SBM模型的农业生态效率测度[J].*统计与决策*,2020,36(21):87-90.
- [12] 李新月.吉林省农业生态效率测度研究[J].*北方经贸*,2021(5):4-6.
- [13] 胡卫卫,于水,马智源,等.基于DEA-Malmquist模型的江苏省农业生态效率时空差异分析[J].*水土保持通报*,2018,38(2):297-302.
- [14] 刘华军,石印.中国农业生态效率的空间分异与提升潜力[J].*广东财经大学学报*,2020,35(6):51-64.
- [15] 蒋璟,曹月娥,赵珮珮,等.新疆伊犁州农业生态效率时空差异探究:基于超效率非期望SBM模型和



Malmquist 指数[J].西北师范大学学报:自然科学版, 2021,57(2):101-109.

[16] 刘海龙,王虎,谢亚林,等.集中连片特困区耕地生态效率的时空演变特征及影响因素分析:以吕梁山区为例[J].水土保持研究,2020,27(2):323-329.

[17] 许标文,王海平,杨军,等.丘陵山区地块尺度耕地生态效率及其影响因素分析[J].福建农业学报,2018,33(12):1317-1323.

[18] 崔宁波,王欣媛,于尊.东北粮食主产区耕地生态效率评价及影响因素分析[J].生态经济,2021,37(7):104-110.

[19] 娄诚.长江中游地区耕地利用效率时空演变特征及影响因素研究[D].南昌:江西财经大学,2019.

[20] 鲁庆尧,王树进,孟祥海.基于 SBM 模型的我国粮食生产生态效率测度与 PS 收敛检验[J].农村经济,2020(12):24-32.

[21] 徐祥.中国粮食主产区农业生态效率评价、收敛性及影响因素研究[D].安徽蚌埠:安徽财经大学,2020.

[22] 刘丽钦.低碳视角下福建省农业生态效率研究[D].福州:福建省师范大学,2018.

[23] 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.

[24] 王玲.西吉县农业生态效率评价及影响因素分析[D].银川:宁夏大学,2019.

[25] 杨皓然,吴群.碳排放视角下的江苏省土地利用转型生态效率研究:基于混合方向性距离函数[J].自然资源学报,2017,32(10):1718-1730.

[26] 张浩,李世平,靳亚亚,等.河北省耕地利用效率空间差异及影响因素[J].水土保持研究,2016,23(3):185-191.

[27] 侯孟阳,姚顺波.1978—2016 年中国农业生态效率时空演变及趋势预测[J].地理学报,2018,73(11):2168-2183.

[28] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率测度及时空差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.

[29] 吴济华,何柏正.组织效率与生产力评估:资料包络分析法[M].北京:经济管理出版社,2015.

[30] Lio M C, Hu J L. Governance and agricultural production efficiency: A cross-country aggregate frontier analysis[J]. Journal of Agricultural Economics, 2009,60(1):40-61.

[31] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002,143(1):32-41.

[32] 姚升.安徽省农业全要素生产率差异及收敛性分析[J].重庆理工大学学报:社会科学版,2016,30(6):31-38.

[33] 孙欣,赵鑫,宋马林.长江经济带生态效率评价及收敛性分析[J].华南农业大学学报:社会科学版,2016,5(15):1-10.

~~~~~

(上接第 80 页)

[26] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014,115: 123-133.

[27] 朱海,胡顺军,刘翔,等.不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征[J].生态学报,2017,37(3):860-867.

[28] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文), 2021,19(3):72-80.

[29] 丁爱强,徐先英,刘江,等.民勤绿洲自然稀疏人工梭梭林土壤水分动态[J].水土保持研究,2018,25(5):192-198.

[30] 陈丽艳,王城城,赵从举,等.海南西部桉树林地土壤水分多时间尺度变化特征分析[J].干旱区资源与环境, 2020,34(1):163-170.

[31] Singh J, Milchunas D, Lauenroth W. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland [J]. Plant Ecology, 1998,134(1):77-89.

[32] Hawley M E, Jackson T J, Mccuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1983,62(4):179-200.

[33] Mall R K, Gupta A, Singh R, et al. Water resources and climate change: An Indian perspective[J]. Current Science, 2006,90(12):1610-1626.

[34] 陈媛媛.杉木人工林土壤水分与环境因子关系研究[D].长沙:中南林业科技大学,2013.

[35] 韩湘云,景元书,李根.低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J].生态学杂志,2013,32(9):2368-2374.

[36] 徐勇峰,郭俨辉,季淮,等.洪泽湖湿地杨树林土壤水分变化及其与气象因子的关系[J].浙江农林大学学报, 2018,35(1):20-28.

[37] 黄晓宇,韩永贵,韩磊.宁夏河东沙区人工林土壤水分时空变化及其与气象因子之间的关系[J].东北林业大学学报,2020,48(5):29-34.