



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目： 基于**地理探测器**的中国农业生态效率时空分异及其影响因素
作者： 汪亚琴, 姚顺波, 侯孟阳, 贾磊, 李园园, 邓元杰, 张晓
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.026
收稿日期: 2021-02-11
网络首发日期: 2021-09-01
引用格式: 汪亚琴, 姚顺波, 侯孟阳, 贾磊, 李园园, 邓元杰, 张晓. 基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.026>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素

汪亚琴^{1,2} 姚顺波^{1,2✉} 侯孟阳^{1,2} 贾磊^{1,2} 李园园^{1,2} 邓元杰^{1,2} 张晓^{1,2}

(¹西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学资源经济与环境管理研究中心, 陕西杨凌 712100)

*通信作者 E-mail: yaoshunbo@163.com

摘要 研究农业生态效率的时空分异及其影响因素对实现中国农业生态高质量发展具有重要意义。基于 2000—2018 年中国 30 个省/区/市的面板数据, 采用超效率 SBM 模型测算省际农业生态效率, 在时间序列、空间可视化及趋势面分析揭示农业生态效率时空演变规律的基础上, 进一步利用地理探测器模型识别影响农业生态效率空间分异的主导因子及其交互作用。结果表明: 2000—2018 年, 中国农业生态效率整体呈现稳定上升的趋势, 但仍然处于较低水平, 存在较大提升空间; 中国农业生态效率具有显著的空间分异特征, 总体上呈现出东西部地区较高、而中部地区较低的空间分布格局; 中国农业生态效率的空间分异受到农业资源禀赋、社会经济、自然生态环境等多种因素的影响, 不同因子对农业生态效率空间分异的影响存在明显差异且因子间交互作用会增强其空间分异。综上, 要关注农业生态效率时空分异的主导因子, 并注重区域间的协同合作, 以实现农业的高质量发展。

关键词 农业生态效率; 地理探测器; 时空分异; 影响因素

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.026

Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on geographic detector

WANG Ya-qin^{1,2}, YAO Shun-bo^{1,2✉}, HOU Meng-yang^{1,2}, JIA Lei^{1,2}, LI Yuan-yuan^{1,2}, DENG Yuan-jie^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}

(¹College of Economics & Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Research Center for Resource Economics and Environment Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract Exploring the spatial-temporal differentiation of agricultural eco-efficiency (AEE) and its driving factors is of vital importance to achieve high-quality agro-ecological development in China. In this study, the super efficiency slack-based measure (SBM) model was adopted to measure the inter-provincial AEE based on the relevant panel data of 30 provinces/regions/cities in China from 2000 to 2018. On the basis of the time series analysis, spatial visualization, and trend surface analysis, the geographical detector model was further used to identify the core driving factors that affected the spatial-temporal differentiation of AEE. The results indicated that from 2000 to 2018, China's AEE level maintained stable upward progress, but it was still at a low level with much room for improvement. The AEE in China exhibited a significant spatial-temporal differentiation, presenting higher levels in the eastern and western parts while lower in the central part. The spatial differentiation of AEE was influenced by many factors, such as agricultural resource endowment, socioeconomic condition, and the natural ecological environment. There were obvious variations in the influence factors on the spatial-temporal differentiation of AEE, and the interactions among factors would enhance the spatial differentiation of AEE. Therefore, due to the spatial-temporal differentiation of AEE, emphasis should be placed on its core driving factors as well as the inter-parts agricultural cooperation in order to achieve high-quality agro-ecological development in China.

Key words agricultural eco-efficiency (AEE); geographical detector; spatial-temporal differentiation; influencing factor

收稿日期: 2021-02-11

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(71773091)和西北农林科技大学经济管理学院研究生科技创新项目(JGYJSCXXM202002)资助
作者简介: 汪亚琴, 女, 1996 年生, 硕士研究生。主要从事资源经济与环境管理研究。E-mail: wang.yaqin@nwfau.edu.cn

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (71773091) and the Graduate Student Science and Technology Innovation Program of College of Economics and Management, Northwest A&F University (JGYJSCXXM2020002).

网络首发时间: 2021-09-01 15:30:51 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20210901.1156.007.html>

中国作为一个农业大国, 农业的发展关乎到国计民生。自 1978 年改革开放以来, 中国农业发展取得了显著的成就, 2019 年农业粮食总产量接近 6.64 亿 t, 占世界粮食总产量的 24.4%。农业的发展为国家经济和社会的可持续发展提供了强有力的保障, 但同时由于化肥、农药、农膜的大量使用也造成了一系列的资源浪费和环境污染问题。《全国农业可持续发展规划(2015—2030)》^[1]中指出: 目前我国化肥农药利用率不足 1/3, 农膜回收率不足 2/3, 畜禽粪污有效处理率不到一半, 秸秆焚烧和海洋富营养化严重, 农业污染问题突出, 严重影响了农业生态效率。2015 年中央农村工作会议指明了农业持续健康发展的战略; 党的十九大报告也指出, 在新时代背景下, 必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念, 要实行最严格的生态环境保护政策; 2021 年中央一号文件则进一步强调了推进农业绿色发展的各项举措。在此背景下, 提高农业生态效率, 实现资源节约和环境保护, 促进农业可持续发展成为中国农业当前及今后发展的必然选择。

农业生态效率是基于德国学者 Schaltegger 等提出的生态效率概念拓展而来的, 目前不同学者对农业生态效率概念的理解存在差异, 尚未有统一明确的定义^[2-3]。本研究中农业生态效率是指在保证农产品数量与质量的前提下, 以尽可能少的资源消耗和环境污染换取尽可能多的农业产出。目前学者们针对农业生态效率已基于微观、中观和宏观 3 个层面^[4-7]进行了相对广泛且比较深入的研究, 主要涉及效率测度^[8-9]、空间分异^[10]、收敛性^[11-12]以及影响因素^[13-14]等。就农业生态效率测度方法而言, 主要涉及生命周期法(LCA)^[15]、能值分析法^[16]、生态足迹法^[17]、随机前沿法(SFA)^[18]和数据包络分析法(DEA)^[19]等, 虽然前人运用上述方法对农业生态效率做出了科学的测算, 但是仍然存在一定的缺陷。其中, LCA 由于研究主观性较强, 研究结果可信度备受争议; 能值分析法存在评价指标过于单一的缺陷; 生态足迹法受制于各产品消费数据的获取, 测算会存在误差^[3]; SFA 虽可以避免不可控因素对效率低下的影响, 但它一般只适用于单输出和多输入生产; 传统 DEA 模型因避免了由于人为确定权重而造成主观性研究争议的优势得到了广泛应用^[20], 但是仍然存在针对效率为 1 的决策单元(DMU)无法做进一步区分的缺陷。然而, 超效率 SBM 模型^[21]的出现不仅有效弥补了上述方法存在的不足与缺陷, 而且还能解决效率测算模型中投入产出的松弛现象, 还能有效弥补传统 DEA 模型针对效率为 1 的 DMU 无法做进一步区分的缺陷, 因此本研究将采用超效率 SBM 模型测度中国农业生态效率。就农业生态效率空间分异而言, 已有文献主要是针对农业生态效率结果进行对比, 对时空格局进行描述分析, 缺少对农业生态效率的集聚效应和空间分异变化趋势的分析, 因此, 本研究拟采用趋势面分析法对中国农业生态效率空间分异规律进行探索。在农业生态效率空间分异影响因素的研究方面, 已有文献大多关注的是对生态效率的影响, 难以解释各因素的空间异质性以及各因素间可能存在的协同或拮抗作用, 而地理探测器可以基于异质性视角对多重共线性免疫、避免因变量与自变量的内生性问题以及定量探测多种不同类型的影响因子^[22-23], 因此, 本研究采用地理探测器对影响中国农业生态效率空间分异的影响因素进行探测。以 2000—2018 年中国各省区市面板数据为研究样本, 将农业碳排放和农业面源污染共同作为非期望产出, 采用超效率 SBM 模型对中国农业生态效率进行测度, 在探究其时间演变规律、空间分布和分异规律的基础上, 利用地理探测器探究影响中国农业生态效率空间分异的影响因素及其交互作用, 以期为中国农业生态效率提升提供数据依据。

1 研究方法 with 指标选取

1.1 研究方法

1.1.1 基于非期望产出的超效率 SBM 模型

传统 DEA 模型会造成投入要素的“拥挤”或者“松弛”, 使计算出的效率值有偏差。为此, Tone^[24]在 2001 年提出非期望产出的 SBM 模型。然而, SBM 模型与传统 DEA 模型一样, 仍无法对效率都为 1 的 DMU 进行进一步区分, 为此, Tone^[24]基于 SBM 模型构建了超效率的 SBM 模型, 其主要将环境污染等非期望产出纳入目标函数, 进而区分有效率 DMU 之间的差异, 计算结果相对更精确。具体模型构建如下:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \rho &= \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x} / x_{ik})}{\frac{1}{r_1 + r_2} (\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{uk}^u)} \\
 \bar{x} &\geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \bar{y}^d \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^d \lambda_j; \\
 \bar{x} &\geq x_k; \bar{y}^d \leq y_{sj}^d; \bar{y}^u \geq y_{uk}^u; \\
 \lambda_j &\geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; j \neq 0 \\
 s &= 1, 2, \dots, r_1; q = 1, 2, \dots, r_2;
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中： n 为DMU的个数； j 为第 j 个DMU； k 为当前效率计算的第 k 个DMU； x 为投入指标； m 为投入指标的数量； i 表示第 i 个投入指标； y^d 和 y^u 分别为期望产出和非期望产出指标； r_1 和 r_2 分别表示期望产出和非期望产出指标的数量； s 、 q 分别表示第 s 、 q 个期望产出、非期望产出指标； ρ 为农业生态效率值； λ 表示权重。

1.1.2 地理探测器

地理探测器是研究地理现象空间分异性，并揭示其背后驱动因素的一种统计学方法。地理探测器的基本假设是：一个研究区分若干子区域，如果子区域方差之和小于区域总方差，则存在空间分异性；如果两变量的空间分布趋于一致，则两者存在统计关联性。核心思想是：如果某个自变量对因变量存在相当重要的影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[22]。此模型包括因子探测、风险探测、交互探测和生态探测4个子探测器，本研究主要使用因子探测和交互探测。

1) 因子探测。用因子探测器计算出各个因子的 q 值，用来定量分析农业生态效率的空间分异性，并探测某因子在多大程度上解释了农业生态效率的空间分异，计算公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{3}$$

式中： $n=1, 2, \dots, L$ ，为自变量 X 和因变量 Y 的分层或分区； N_h 和 N 分别是层 h 和全区域的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差； q 值度量的是解释力，它的值域是0到1， q 值越大代表自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强，反之则越弱。

2) 交互探测。识别不同自变量之间的交互作用，即测度自变量 X_i 和 X_m 交互作用时是否会增强或减弱对因变量 Y 的解释度，或者这些自变量对因变量 Y 的影响是否是相互独立的。测度的具体方法是：以驱动因子 X_1 和 X_2 为例，首先分别计算出两个自变量对因变量 Y 的解释力 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ ，其次计算出两个自变量交互作用时对因变量 Y 的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$ ，然后比较3个计算结果之间的大小，由此做出两个因子交互作用对因变量的影响相对于单个因子是增强还是削弱的判断。判断依据见表1。

表1 双因子交互作用方式的判断依据

Table 1 Basis for judging two factor interaction patterns

判断依据 Basis of judgement	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱 Nonlinear weakening
$\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性增强 Single nonlinear enhancement
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强 Double enhancement
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立 Independence
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强 Nonlinear enhancement

1.2 农业生态效率指标选取

1.2.1 因变量

农业在广义上来讲是指农牧渔业，狭义上来讲是指种植业。本研究选取种植业作为研究对象来测度农业生态效率。农业生态效率 (agricultural eco-efficiency, AEE) 从本质上来讲是指农业产出与农业投入的比值，即以最小的环境代价和最少的资源投入获取最大的农业经济产出。为综合考虑农业经济产出、资源消耗和环境保护三者之间的协调，参考已有研究^[2,8]建立农业生态效率的测度指标体系，依据科学性、准确性、数据可得性和口径一致性原则，最终选取土地、灌溉、化肥、农药、农膜等作为投入变量，以农业总产值为期望产出变量，非期望产出用农业碳排放和农业面源污染排放来表征，其中，碳排放通过化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉和农业机械 6 个指标并乘以相应排放系数来估算，碳排放系数参考已有研究^[25]，农业面源污染通过化肥 (氮和磷) 流失量、农药农膜残留量来表征。基于此构建出中国农业生态效率测度指标体系 (表 2)。

表2 农业生态效率测度指标体系
Table 2 Index system of AEE measurement

主要变量 Primary variable	类型 Type	二级指标 Secondary variable	变量和说明 Variables and descriptions
资源消耗 Resource consumption	劳动力消耗 Labor consumption	劳动力投入 Labor input	农业从业人口 Agricultural population
		土地投入 Land input	农作物播种总面积 Total crop sowing area
	物力消耗 Material consumption	机械投入 Mechanical input	农业机械总动力 Agricultural mechanical power
		用水投入 Water input	有效灌溉面积 Effective irrigation area
		能源投入 Energy input	农用柴油使用量 Agricultural diesel fuel usage
		化肥投入 Fertilizer input	农用化肥施用量 (折纯量) Amount of fertilizer applied in agriculture (Refraction)
	环境成本 Environmental cost	农药投入 Pesticide input	农药使用量 Pesticide usage
		农膜投入 Agricultural membrane input	农膜使用量 Agricultural film usage
		农业产出 Agricultural output	农业总产值 Total value of farm output
		碳排放 Carbon emission	农业碳排放量 Carbon emissions from agriculture
期望产出 Expected output	农业发展 Agricultural development		
非期望产出 Non-expected output	污染排放 Pollution emission	农业面源污染排放 Agricultural non-point source pollution emission	化肥产污流失量 Pollution loss from fertilizer production
			农药农膜残留量 Pesticide and farm membrane residue

AEE: Agricultural eco-efficiency. 下同 The same below.

1.2.2 自变量

农业生态效率是一个系统性问题，不仅受到农业生产自身禀赋条件等内部资源条件的影响，还会受到社会经济发展、自然生态环境等外部条件的制约。鉴于此，本研究从农业资源禀赋、社会经济和自然生态环境 3 个方面出发选取自变量，由于在地理探测器中自变量要求是类型变量，因此，本研究进一步对所选自变量进行分类。具体如下：1) 复种指数：全国各类地区复种指数大致为：长城以北地区大部分在 100% 以下；黄河以北、长城以南地区在 120%~150%；长江以北、黄河以南地区为 150%~180%；五岭以北、长江以南地区为 180%~200%。因此，以 100%、120%、150% 和 180% 作为复种指数分类的中断点，将复种指数分为 5 个类别。2) 种植结构和农业机械化强度利用 ArcGIS 中的等间距法分为 8 个类别。3) 农村居民可支配收入、受灾率、降雨、气温和日照等自然环境因素利用 ArcGIS 中的自然断点法分为 6 个类别。4) 财政支农水平通过观测数据结构以 4%、6%、8%、10% 和 12% 作为分类间断点分为 6 个类别。5) 人口城镇化率通过参考已有研究^[26]将 10%、30%、50% 和 70% 作为间断点分为 5 个类别。6) 每公顷化肥使用量以 300 和 500 作为间断点分为 3 个类别^[27]。7)

平均受教育年限依据数据结构被分为 5 个类别。对各自变量进行分类之后,运用 ArcGIS 中的渔网采样功能和提取点功能将各分类后的值提取出来作为地理探测器的输入变量。具体变量设计见表 3。

表3 农业生态效率的影响因素及分类
Table 3 Influencing factors and classification of AEE

表征类型 Type of representation	影响因素 Influencing factor			分类 Classification	
	驱动因子 Driver	变量说明 Variable declaration	符号表示 Symbolic representation	类别数量 Number of categories	类别说明 Category description
农业资源 禀赋 Agricultural resources endowment	复种指数 Multiple-crop index	1 年在同一地块 上种植农作物的 平均次数	X ₁	5	<100%; 100%~120%; 120%~150%; 150%~180%; >180%
	种植结构 Planting structure	粮食作物种植面 积/非粮食作物 种植面积	X ₂	8	等间距分类
	农业机械化程度 Degree of agricultural mechanization(kw·hm ⁻²)	农业机械总动力 / 农作物总播种面 积	X ₃	8	等间距分类
社会经济 因素 Socio-economic Factor	每公顷化肥使用量 Fertilizer usage per hectare(kg·hm ⁻²)	化肥使用总量/ 耕地面积	X ₄	3	<300; 300~500; >500
	人口城镇化率 Population urbanization rate(%)	城镇人口/年末 常住人口	X ₅	5	<10%; 10%~30%; 30%~50%; 50%~70%; >70%
	农村居民 纯收入 Net income of rural residents	农村居民可支配 收入	X ₆	5	自然断点法
	财政支农水平 Financial support for agriculture level (yuan·hm ⁻²)	财政农林水事物 支出/ 农作物总播种面 积	X ₇	6	<4%; 4%~6%; 6%~8%; 8%~10%; 10%~ 12%; >12%
自然生态环境 Natural ecology environment	平均受教育年限 Average years of education	(小学人数×6+ 初中人数×9+高 中人数×12+高 中以上人数 ×16)/总人数	X ₈	5	<6; 6~7; 7~8; 8~9; >9
	受灾率 Disaster rate	农作物受灾面积 / 农作物总播种面 积	X ₉	5	自然断点法
	降水 Precipitation (mm)	降水量	X ₁₀	6	自然断点法
	气温 Temperature(°C)	气温	X ₁₁	6	自然断点法
	日照 Sunshine(h)	日照时长	X ₁₂	6	自然断点法

1.3 数据来源

样本是中国 30 个省区市 2000—2018 年的省际面板数据(不包含港澳台), 受限于数据的可获取性以及考虑到西藏自治区独特的农业生产条件, 未将其纳入实证研究。农业生产和社会经济数据均来自于《中国农村统计资料》^[28]《中国农村统计年鉴》^[29]、各省区市统计年鉴和各省区市统计公报, 对于缺失数据是采用插值法进行填补。气象数据(气温、降水和日照)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的“中国地面气候资料年值数据集”。地理信息基础数据(国界线、省界线)来源于国家地理信息中心数据库的全国 1:100 万基础地理数据库(www.webmap.cn)。

2 结果与分析

2.1 中国农业生态效率测定及其描述性统计

基于 DEA-SOLVER Pro 软件, 本研究采用超效率的 SBM 模型测算出中国 2000—2018 年 30 个省区市的农业生态效率, 并求解出各年份均值 (表 4)。

表4 中国30个省区市农业生态效率
Table 4 AEE of 30 provinces and cities in China

省/区/市 Province/region/city	农业生态效率 AEE		省/区/市 Province/region/city	农业生态效率 AEE	
	均值 Average value	排名 Rank		均值 Average value	排名 Rank
青海 Qinghai	1.10	1	江苏 Jiangsu	0.58	16
北京 Beijing	0.92	2	河南 Henan	0.56	17
海南 Hainan	0.91	3	山东 Shandong	0.55	18
上海 Shanghai	0.87	4	湖北 Hubei	0.54	19
新疆 Xinjiang	0.71	5	浙江 Zhejiang	0.54	20
天津 Tianjin	0.68	6	湖南 Hunan	0.53	21
广西 Guangxi	0.67	7	辽宁 Liaoning	0.48	22
四川 Sichuan	0.67	8	吉林 Jilin	0.45	23
广东 Guangdong	0.65	9	河北 Hebei	0.45	24
黑龙江 Heilongjiang	0.64	10	甘肃 Gansu	0.44	25
宁夏 Ningxia	0.63	11	内蒙古 Inner Mongolia	0.44	26
陕西 Shaanxi	0.61	12	江西 Jiangxi	0.42	27
福建 Fujian	0.60	13	山西 Shanxi	0.38	28
重庆 Chongqing	0.59	14	安徽 Anhui	0.37	29
贵州 Guizhou	0.58	15	云南 Yunnan	0.10	30

从整体来看, 2000—2018 年中国 30 个省区市农业生态效率多处于较低水平, 多数省区市效率值普遍在 0.4~0.7, 仍存在较高的提升空间, 该结果与相关文献^[9,30]的研究比较接近。其中, 农业生态效率值最高的是青海省, 其效率值达到 1.10, 可能的原因是青海省充分依托独特的地理位置和气候条件打造了优质和极具高原特色、青海特点的绿色和有机农产品, 挖掘了绿色食品的品牌、市场和自然资源优势。其次是北京 (0.92)、海南 (0.91) 和上海 (0.87), 其农业生态效率值均在 0.85 以上。具体来看, 北京农业生态效率较高可能是由于其良好的区位条件以及较高的经济发展水平促进了农业生态化发展; 海南地处中国最南端, 属于热带海洋季风气候, 光温充足, 物种资源丰富, 并且海南省不断强化农业的基础、首要、支柱地位, 大力发展绿色农业, 提高了农业生态效率; 上海较高的农业生态效率可能主要是因为经济发展水平较高并且具有标准化的农业生产模式。而山西、安徽和云南的农业生态效率值相对较低, 均不足 0.4, 其中位于西部地区的云南省, 其农业生态效率值仅 0.1, 在全国排名处于最低, 主要原因可能是云南处于中国第一阶梯, 地势较高, 属于山区农业, 交通不便、资源稀缺、水土流失严重, 生产力水平和科技水平都较低。这表明中国农业生态化发展存在较大的资源节约和环境保护提升空间, 应更加重视农业现代化、规模化发展, 加大农业生产、资源节约和环境保护之间的协调力度。

为进一步探究中国农业生态效率的时间演变规律, 按区域分为东、中、西 3 个地区并与全国整体进行了对比分析, 区域划分参考已有文献^[31] (图 1), 所求得的全国及各区域 2000—2018 年的农业生态效率均值结果见图 2。

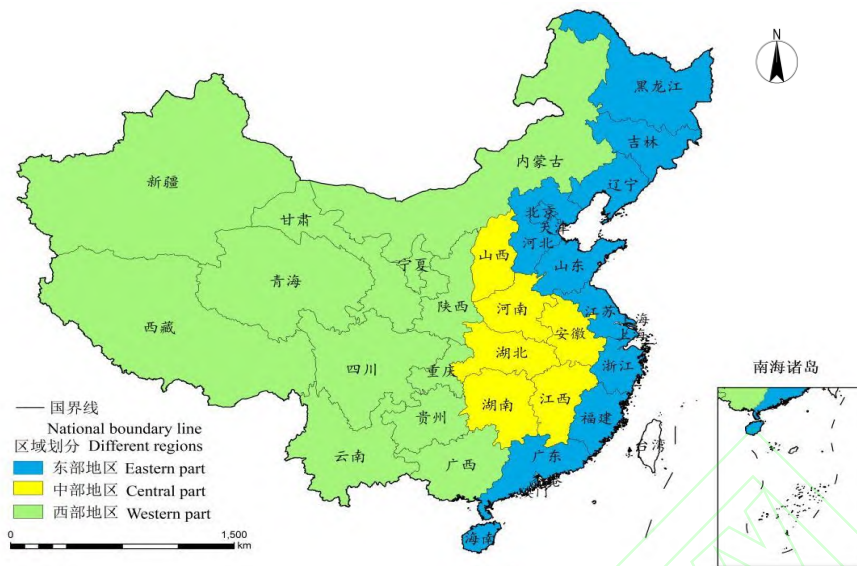


图 1 区域划分说明

Fig.1 Description of regional divisions.

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4634 号的标准地图制作，底图无修改 The map was based on the standard map with the drawing review No. GS(2020)4634 downloaded from the standard map service website of the State Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information, and the base map was not modified. 下同 The same below.

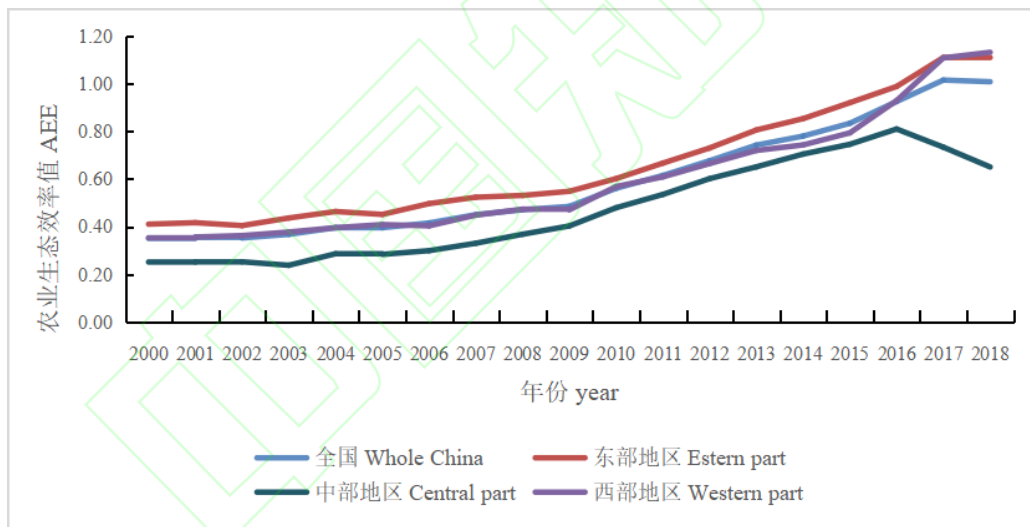


图 2 2000—2018 年中国农业生态效率时间演变

Fig.2 Temporal evolution of AEE in China during 2000-2018.

AEE: Agricultural eco-efficiency. 下同 The same below.

由图 2 可知，中国农业生态效率在 2000—2018 年呈现出稳定上升的趋势，尤其是在 2010 年之后，整体平均水平从 2000 年的 0.35 增长到 2018 年的 1.01，提升速度明显加快，这表明 2010 年中央一号文件《关于加大统筹城乡发展力度进一步夯实农业农村发展基础的若干意见》^[32]首次提出的促进农业发展方式转变战略发挥了重要作用。进一步对比分析东、中、西 3 个地区的农业生态效率值，发现东部地区农业生态化发展水平较高且高于全国平均水平，可能是由于东部地区在农业生态化发展过程中制度设计和执行上比较严格，并且在相应的技术要素投入和管理上处于较高水平。西部地区次之，在 2013 年之前，西部地区的农业生态效率和全国平均水平大体一致，在 2013—2016 年，西部地区的农业生态化发展水平要落后于全国平均水平，但在 2016 年之后，逐渐高于全国平均水平，原因可能是国家出台的重点扶持性政策引领规模化生产对农业生态化发展起到了提升作用。而中部地区的

农业生态化发展水平则最为落后，且在 2016 年之后呈现明显的下降趋势，说明中部地区对农业生态化发展的重视程度不够。

2.2 中国农业生态效率的空间分异特征及其演变规律

根据计算出的中国 30 个省区市农业生态效率，选取 2000、2005、2010、2015 和 2018 年这 5 个较典型的时间点及 2000—2018 年的均值截面样本为基础，借助 ArcGIS 软件绘制中国农业生态效率空间分布图（图 3）。

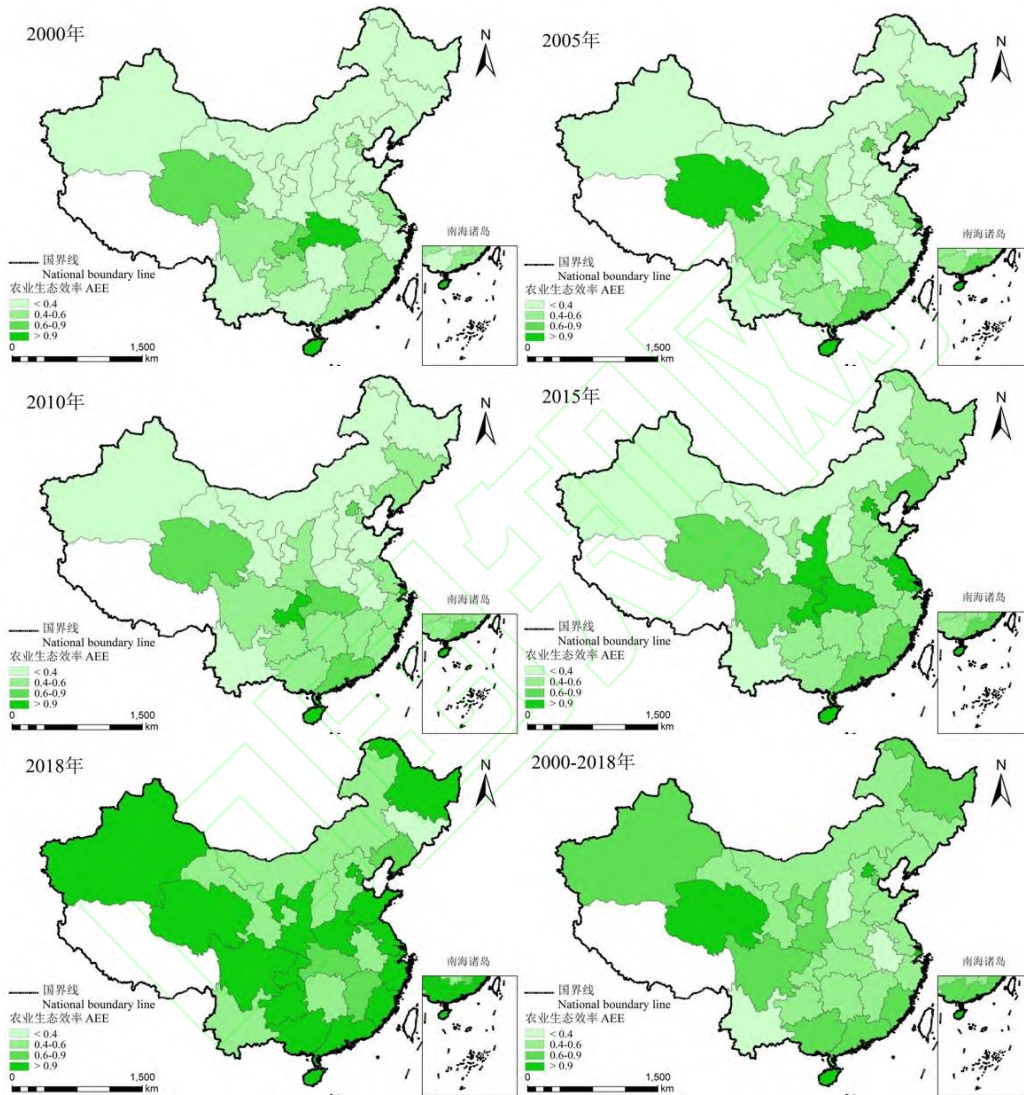


图 3 中国农业生态效率空间分布
Fig.3 Spatial distribution of AEE in China.

整体来看，中国农业生态效率呈现出稳步提升的态势，主要表现为农业生态效率较高的地区数量增加，占比由 2000 年的 6.7% 增加到 2018 年的 66.7%，增长了 60%，增幅明显，但鲜有地区的农业生态效率能达到极高的水平。同时，农业生态效率水平较低的城市的数量呈现出下降趋势，其占比从 2000 年的 76.7% 下降到 2018 年的 3.3%，降幅达到 73.3%。此外，可以发现中国农业生态效率呈现出显著的区域化特征，即农业生态效率水平较高（0.9,+∞）的区域主要由西南部逐渐向东部地区扩散增加，而农业生态效率水平较低（-∞,4）的区域则主要分布在西北、东北以及中部地区的部分省区市，具体主要集中在山西、河北、宁夏和吉林 4 个省区市，且范围逐渐缩减。

为进一步探索分析中国农业生态效率的空间分布特征，识别农业生态效率的空间数据结构，本研

究利用 ArcGIS 中的趋势分析工具, 选取 2000、2005、2010、2015 和 2018 年的中国农业生态效率为研究样本, 以 X 、 Y 和 Z 轴分别表示正东方向、正北方向和垂直方向生成三维趋势图 (图 4), 将中国农业生态效率的集聚效应及相互之间的空间作用机制进行可视化表达。

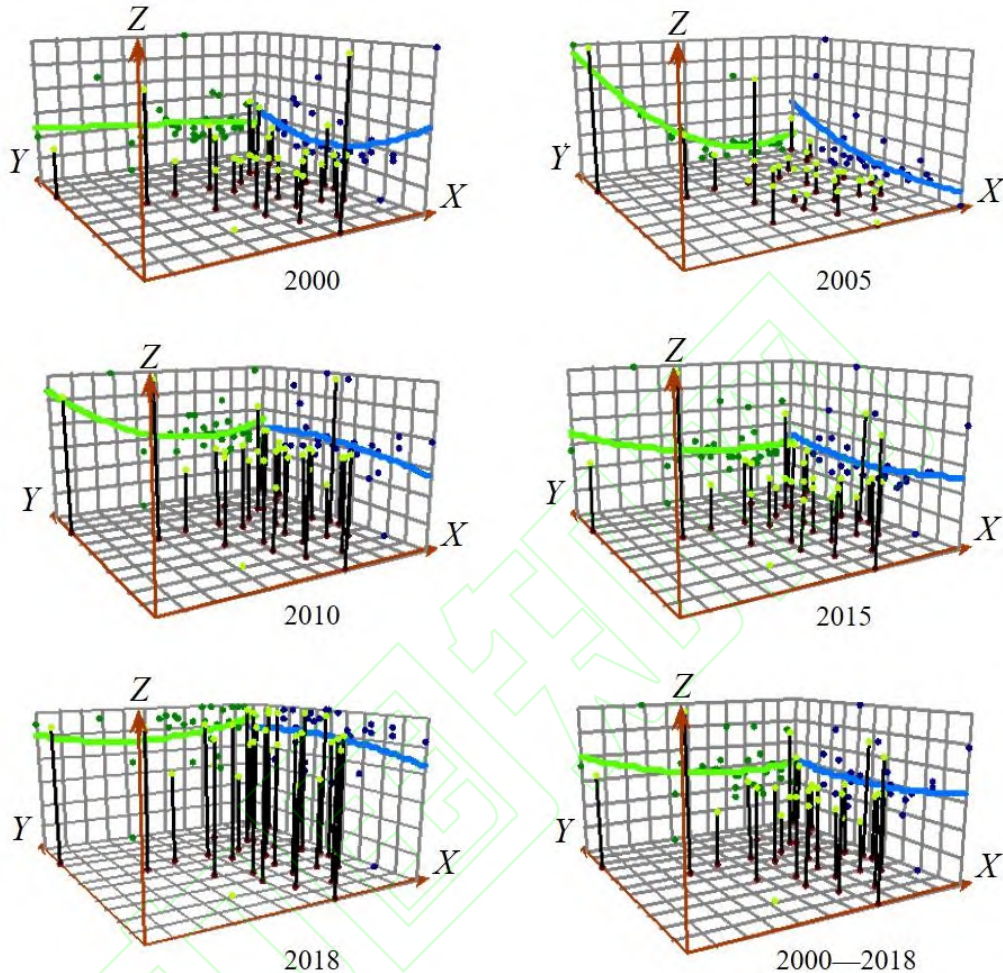


图 4 中国农业生态效率空间格局变化趋势线
Fig.4 Trends of spatial patterns of AEE in China.

X 、 Y 和 Z 轴分别表示正东方向、正北方向和垂直方向 X, Y, Z axis meant east, north and vertical direction, respectively.

由图 3 可知, 中国农业生态效率在东西方向上的趋势线表现: 在 2000 年是比较平滑的, 即表明东西差异并不显著; 随着时间的推移其逐渐呈现出明显的“U”型态势, 说明东西空间差异变大; 但随着时间推移东西趋势线“U”型态势逐渐消失, 在 2018 年东略高于西。在南北方向上, 2000 年呈现出明显的“U”型态势, 说明南北空间差异较大; 到了 2010 年, 南北趋势线显现出一个倒“U”型态势, 但是并不显著, 随后又逐渐呈现出南高北低的趋势。从垂直方向来看, 空间中的点在 Z 轴上的高度越来越高, 这表明农业生态效率水平越来越高, 中国农业生态化发展越来越好。从整个时期来看, 无论是东西趋势线还是南北趋势线基本都呈明显的倾斜或弯曲, 证实了中国农业生态效率具有显著的空间分异性。

2.3 中国农业生态效率空间分异的因素识别

本研究从农业基础禀赋、社会经济、自然生态环境 3 个维度分别选取了可能影响农业生态效率空间分异的因素^[33], 并利用地理探测器考察其对农业生态效率空间分异的主导因子及其交互作用。

2.3.1 农业生态效率空间分异的主导因素识别

本研究利用因子探测器得到 2000、2005、2010、2015 和 2018 年这 5 个典型时点的 q 值并对其进行了排序（表 5），各个因子的解释力均通过了 1% 的显著性水平检验。

表5 中国农业生态效率空间分异的因子探测结果
Table 5 Factor detection results of spatial differentiation of AEE in China

因子 Factor	2000		2005		2010		2015		2018	
	q	排序 Rank	q	排序 Rank	q	排序 Rank	q	排序 Rank	q	排序 Rank
复种指数 Multiple-crop index	0.22	1	0.44	2	0.56	1	0.29	2	0.06	11
种植结构 Planting structure	0.21	2	0.16	6	0.06	11	0.02	12	0.10	8
农业机械化程度 Degree of agricultural mechanization	0.09	9	0.49	1	0.49	3	0.14	10	0.46	2
每公顷化肥使用量 Fertilizer usage per hectare	0.10	8	0.00	12	0.10	9	0.31	1	0.07	10
人口城镇化率 Population urbanization rate	0.08	11	0.01	11	0.03	12	0.18	8	0.05	12
农村居民可支配收入 Disposable income of rural residents	0.15	6	0.03	10	0.14	8	0.15	9	0.27	6
财政支农比重 Share of finance in agriculture	0.09	10	0.13	8	0.55	2	0.25	3	0.29	5
平均受教育年限 Average years of education	0.01	12	0.15	7	0.06	10	0.19	7	0.52	1
受灾率 Disaster rate	0.16	5	0.42	3	0.29	4	0.07	11	0.30	4
降水 Precipitation	0.13	7	0.11	9	0.27	5	0.19	6	0.11	7
气温 Temperature	0.19	4	0.21	4	0.24	6	0.25	4	0.09	9
日照 Sunshine	0.20	3	0.18	5	0.18	7	0.24	5	0.35	3

基于横向因子对比角度出发，农业资源禀赋、社会政策和自然环境 3 个维度分别对农业生态效率的影响存在较为显著的差异。综合来看，对农业生态效率空间分异影响较大的因子分别是复种指数、农业机械化程度、财政支农比重、受灾率和日照，这 5 项因子可认为是影响农业生态效率的主导因子，其 q 值均大于 0.2。种植结构、每公顷化肥使用量、农村居民可支配收入、平均受教育年限、降水和气温对农业生态效率空间分异的解释能力相对一般，其 q 值仅介于 0.1~0.2；其中居民收入差距和农村居民文化水平可认为是未来影响农业生态效率空间分异的重要潜在因素，这两者 q 值在 2018 年分别达到了 0.52 和 0.27；人口城镇化率对农业生态效率的解释力相对最弱，5 个典型时点的 q 值除 2015 年外均小于 0.1。

基于纵向时间演变角度，随着时间的推移，各个驱动因子均呈现出波动变化趋势。首先，从主导因子方面来看，农业机械化程度、财政支农比重、受灾率和日照这 4 个因子的解释力整体在提高。具体来讲：农机机械化程度的 q 值从 2000 年的 0.09 上升到 2018 年的 0.46，解释力整体提升幅度十分明显；财政支农比重的 q 值从 2000 年的 0.09 提升到 2018 年的 0.29；受灾率和日照这两个自然因素的 q 值，前者从 2000 年的 0.16 提升到 2018 年的 0.30，后者则从 0.20 提升到 0.35。这表明农业技术水平提高幅度、国家对农业的扶持（行政干预）力度以及自然灾害对农业生态效率空间分异的影响在逐渐强化，而复种指数的解释力则在整体上表现出下降的态势，复种指数反映耕地利用程度，即提高耕地利用程度减弱了农业生态效率的空间分异。此外，主导因子的解释力排序也发生了较大的变化，其中复种指数从 2000 年的排名第 1 下降到 2018 年的第 11，降幅明显；而农业机械化程度和财政支农比重的排序变化发生了明显的增幅，前者从 2000 年的第 9 上升到 2018 年的第 2，后者从 2000 年的第 10 上升到 2018 年的第 5。其次，关注到解释力一般的几个影响因子：平均受教育年限解释力排序由 2000 年的第 12 上升到 2018 年的第 1，成为了影响农业生态效率空间分异的最主要因子，反映出农民自身文化水平（农业基本知识的储备）对农业生态效率空间分异产生了较大影响；种植结构和气温的解释力及其排序均呈下降趋势且降幅明显，意味着农业投入要素结构以及自然条件的变化对农

业生态效率空间分异的影响日趋减弱；其他 3 个（每公顷化肥使用量、农村居民可支配收入、降水）驱动因子的解释力均呈现出波动性变化特征，在整体上表现出不同幅度的下降，但作为重要性因子排名位置变化较小。另外，人口城镇化率对农业生态效率空间分异的解释力及其排序基本稳定，表明城镇化发展吸引农村劳动力非农转移这一变化对农业生产及生态的影响较小。

2.3.2 农业生态效率空间分异的交互作用识别

为进一步探究不同驱动因子之间发生交互作用时对农业生态效率解释力的变化情况，重点选取因子探测中筛选出来的主导因子以及后续排序上升为第一的平均受教育年限分析影响农业生态效率空间分异的交互机制。同样以 2000、2005、2010、2015 和 2018 年这 5 个年份作为研究样本进行分析，探测结果表明（表 6）：在研究期间，各个因子之间存在较为紧密的联系，而并非是相互独立的关系。驱动因子交互作用得到的 q 值均表现出不同程度的提高，即双因子的综合作用会提高对农业生态效率空间分异的解释力。从作用类型来看，几个主导因子间交互作用类型有超过 65% 是非线性增强的，其余均为双因子增强。从时间变化角度来看，各双因子交互的解释力存在差异，且随着时间的推移呈现出波动性变化特征。具体来看：复种指数与农业机械化程度交互作用对农业生态效率的解释力随着时间的推移呈现出递增的态势，由 2000 年的 0.25 增长到 2018 年的 0.88，其作用类型经历了“非线性增强→双因子增强→非线性增强”的变化过程，这主要是由于复种指数单因子经历了先上升又下降后又上升的变化。复种指数与财政支农比重交互作用的解释力则呈先上升后下降的变化特征，作用类型由非线性增强变为双因子增强，这主要与复种指数单因子的变化有关。复种指数与平均受教育年限交互作用的解释力则呈现上升的态势，作用类型也为非线性增强，这得益于居民的受教育水平单因子对农业生态效率空间分异的影响越来越大。复种指数与受灾率和日照时长发生交互作用时，作用类型均经历了“双因子增强→非线性增强”的变化，表明复种指数与这两类自然因子的叠加效应强化了农业生态效率空间分异。农业机械化程度与财政支农比重交互时的解释力与作用类型呈不稳定变化，即解释力为先上升后下降，且下降幅度甚微，而作用类型则经历了“非线性增强→双因子增强→非线性增强→双因子增强”的变化，这主要是由于平均受教育年限单因子解释力变化是波动的，而农业机械化程度的解释力也经历了先上升后下降的变化。农业机械化程度与平均受教育年限交互时解释力从 2000 年的 0.14 增长到 2018 年的 0.82，增幅明显，且作用类型相对比较稳定，除了 2018 年表现为双因子增强外，其余均为非线性增强。农业机械化程度与受灾率和日照时长的交互作用类型均经历了“非线性增强→双因子增强→非线性增强”的变化，解释力与 2000 年相比均有明显上升，表明农业机械化程度与自然环境因素交互作用时对农业生态效率空间分异的影响十分重要。财政支农比重与其他几个主导因子交互作用的类型表现为不稳定变化，但从时间角度来看，解释力与 2000 年相比呈增强趋势，再一次表明了财政支农对农业生态效率空间分异的重要性。自然因素受灾率与日照时长交互作用时解释力不断提升，作用类型也较稳定，除了 2018 年为双因子增强外，其余年份均为非线性增强。

表6 中国农业生态效率空间分异的交互探测结果
Table 6 Interactive detection results of spatial differentiation of AEE in China

因子交互 Factor interaction	2000		2005		2010		2015		2018	
	q	类型 Type	q	类型 Type	q	类型 Type	q	类型 Type	q	类型 Type
$X_1 \cap X_3$	0.35	NE	0.77	DE	0.69	DE	0.83	NE	0.88	NE
$X_1 \cap X_7$	0.35	NE	0.82	NE	0.69	DE	0.50	DE	0.38	DE
$X_1 \cap X_8$	0.36	NE	0.75	NE	0.73	NE	0.66	NE	0.80	NE
$X_1 \cap X_9$	0.31	DE	0.82	DE	0.73	DE	0.38	NE	0.62	NE
$X_1 \cap X_{12}$	0.40	DE	0.53	DE	0.79	NE	0.58	NE	0.76	NE
$X_3 \cap X_7$	0.27	NE	0.74	NE	0.70	DE	0.71	NE	0.56	DE
$X_3 \cap X_8$	0.14	NE	0.77	NE	0.57	NE	0.44	NE	0.82	DE
$X_3 \cap X_9$	0.36	NE	0.77	DE	0.57	DE	0.56	NE	0.90	NE
$X_3 \cap X_{12}$	0.33	NE	0.63	DE	0.88	NE	0.90	NE	0.91	NE
$X_7 \cap X_8$	0.20	NE	0.26	DE	0.69	DE	0.40	NE	0.55	DE
$X_7 \cap X_9$	0.34	NE	0.57	NE	0.67	DE	0.52	NE	0.47	DE
$X_7 \cap X_{12}$	0.35	NE	0.57	NE	0.90	NE	0.49	DE	0.71	NE
$X_8 \cap X_9$	0.24	NE	0.77	NE	0.56	NE	0.52	NE	0.82	DE
$X_8 \cap X_{12}$	0.27	NE	0.43	NE	0.48	NE	0.82	NE	0.71	DE

DE: 双因子增强 Double enhancement; NE: 非线性增强 Nonlinear enhancement.

3 结语

本研究基于 2000—2018 年中国 30 个省区市农业生产的面板数据, 采用超效率 SBM 模型对中国 30 个省区市的省际农业生态效率进行测度, 采用趋势面法分析了空间分异特征, 并利用地理探测器探究了影响中国农业生态效率空间分异的因素, 得到主要结论如下: 1) 2000—2018 年中国农业生态效率整体呈现出稳定上升的趋势, 全国平均水平由 2000 年的不到 0.4 提升到 2018 年的 1.0。但多数省份农业生态效率处于较低水平, 仍存在较大的提升空间。2) 东、中、西 3 个区域的农业生态效率也均呈现出稳定上升的态势。且在 2010 年之后, 农业生态效率提升的速度在加快。中国农业生态效率具有显著的空间分异特征, 总体上呈现出东西部地区较高、中部地区较低的空间分布格局。3) 农业生态效率的空间分异受到农业基础禀赋、社会经济、自然生态环境等 3 方面的影响, 且不同因子对

农业生态效率空间分异的影响存在显著差异。复种指数、平均受教育年限、农业机械化程度、财政支农比重、受灾率和日照是影响空间分异的主导因子，而种植结构、每公顷化肥使用量、农村居民可支配收入、降水和气温等是影响空间分异的重要因子。各个主导因子之间发生交互作用时增强了对农业生态效率空间分异的影响，增强类型以非线性增强为主，双因子增强为辅。

综合上述分析主要得到以下启示：第一，中国农业生态效率虽然在稳定提升，但仍存在较大的提升空间，即中国农业生态化发展在资源节约和环境保护方面还有一段路要走。第二，中国农业生态效率存在显著的空间分异特征，为此各地区应结合自身的农业生态发展状况制定相应的发展策略，同时要注重区域间的协同合作，在合作中达到提升。第三，影响中国农业生态效率空间分异的因素是多方面的，且不同驱动因子的影响也存在明显差异，因此，要重点关注主导因子并改善其对农业生态效率空间分异的影响，以期实现中国农业的高质量可持续发展。本研究较为系统地分析了中国农业生态效率的时空分异及其影响因素，但对不同因子具体的作用方向仍有待探究。

责任编辑 李建龙

责任编辑 张凤丽

参考文献

- [1] 中华人民共和国农业部、国家发展和改革委员会、科技部，等. 全国农业可持续发展规划（2015—2030年）[EB/OL].（2015-05-28）[2021-02-15]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201505/t20150527_4620018.htm [Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, et al. The National Agricultural Sustainable Development Plan (2015-2030) [EB/OL]. (2015-05-28) [2021-02-15]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201505/t20150527_4620018.htm]
- [2] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 11-19 [Wang B-Y, Zhang W-G. A research of agricultural eco-efficiency measure in China and space-time differences. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 11-19]
- [3] 聂弯, 于法稳. 农业生态效率研究进展分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1371-1380 [Nie W, Yu F-W. Review of methodology and application of agricultural eco-efficiency. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1371-1380]
- [4] 贾琳, 夏英. 农户粮食生产规模效率及其影响因素分析——基于黑、豫、川三省玉米种植户的调查数据. 资源科学, 2017, 39(5): 924-933 [Jia L, Xia Y. Scale efficiency of grain production and influencing factors based on survey data from Heilongjiang, Henan and Sichuan. *Resources Science*, 2017, 39(5): 924-933]
- [5] Maxime D, Marcotte M, Arcand Y. Development of eco-efficiency indicators for the Canadian food and beverage industry. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14: 636-648
- [6] 张颖聪, 杜受祐. 四川省农业生态系统能值评价及动态计量分析. 应用生态学报, 2012, 23(3): 827-834 [Zhang Y-C, Du S-H. Energy evaluation and dynamic measurement analysis of agro-ecosystems in Sichuan Province of Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 827-834]
- [7] 高鸣, 宋洪远, Carter Michael. 粮食直接补贴对不同经营规模农户小麦生产率的影响: 基于全国农村固定观察点农户数据. 中国农村经济, 2016(8): 56-69 [Gao M, Song H-Y, Carter M. The impact of grain direct subsidy on wheat productivity of farmers with different business scales: Based on the data of rural households with fixed observation points nationwide. *Chinese Rural Economy*, 2016(8): 56-69]
- [8] 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. 生态学报, 2013, 33(12): 3837-3845 [Pan D, Ying R-Y. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3837-3845]
- [9] Liu YS, Zou LL, Wang YS. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China in recent 40 years. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104794, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104794>
- [10] 刘应元, 冯中朝, 李鹏, 等. 中国生态农业绩效评价与区域差异. 经济地理, 2014, 34(3): 24-29 [Liu Y-Y, Feng Z-C, Li P, et al. Performance and regional difference in Chinese ecological agriculture. *Economic Geography*, 2014, 34(3): 24-29]
- [11] 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 characteristics on agro-ecological efficiency in China from a spatial perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 116-126]
- [12] 余泳泽. 中国省际全要素生产率动态空间收敛性研究. 世界经济, 2015, 38(10): 30-55 [Yu Y-Z. Study on dynamic spatial convergence of total factor productivity in China. *The Journal of World Economy*, 2015, 38(10): 30-55]
- [13] 吴小庆, 王亚平, 何丽梅, 等. 基于AHP和DEA模型的农业生态效率评价——以无锡市为例. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 714-719 [Wu X-Q, Wang Y-P, He L-M, et al. Agricultural eco-efficiency evaluation based on AHP and DEA model: A case study of Wuxi City. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(6): 714-719]
- [14] Xie H, Zhang Y, Yongrok C. Measuring the cultivated land use efficiency of the main grain-producing areas in China under the constraints of carbon emissions and agricultural nonpoint source pollution. *Sustainability*, 2018, 10, <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/6/1932/pdf>
- [15] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. 生态学报, 2006, 26(11): 3898-3906 [Lyu B, Yang J-X. Review of methodology and application of eco-efficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3898-3906]
- [16] Odum HT. Self-organization, transformity and information. *Science*, 1988, 242: 1132-1139

- [17] Rees WE. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4: 120-130
- [18] Lio MC, Hu JL. Governance and agricultural production efficiency: A cross-country aggregate frontier analysis. *Journal of Agricultural Economics*, 2009, 60: 40-61
- [19] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法. 北京: 中国人民大学出版社, 1988 [Wei Q-L. DEA Method for Evaluating Relative Effectiveness. Beijing: China Renmin University Press, 1988]
- [20] 徐维祥, 徐志雄, 刘程军. 黄河流域地级城市土地集约利用效率与生态福利绩效的耦合性分析. 自然资源学报, 2021, 36 (1): 114-130 [Xu W-X, Xu Z-X, Liu C-J. Coupling analysis of land intensive use efficiency and ecological well-being performance of cities in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36 (1): 114-130]
- [21] 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. 地理学报, 2018, 73 (11): 2168-2183 [Hou M-Y, Yao S-B. Spatial-temporal evolution and trend prediction of agricultural eco-efficiency in China: 1978-2016. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73 (11): 2168-2183]
- [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116-134]
- [23] 樊涵, 杨朝辉, 王丞, 等. 贵州省自然保护区时空演变特征及影响因素. 应用生态学报, 2021, 32 (3): 1005-1014 [Fan H, Yang Z-H, Wang C, et al. Temporal-spatial variation and the affecting factors of protected areas in Guizhou, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (3): 1005-1014]
- [24] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130: 498-509
- [25] 李波, 张俊飏, 李海鹏, 等. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 (8): 80-86 [Li B, Zhang J-B, Li H-P, et al. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21 (8): 80-86]
- [26] 戚伟, 刘盛和, 金浩然. 中国户籍人口城镇化率的核算方法与分布格局. 地理研究, 2017, 36 (4): 616-632 [Qi W, Liu S-H, Jin H-R. Calculation method and spatial pattern of urbanization rate of registered population in China. *Geographical Research*, 2017, 36 (4): 616-632]
- [27] 任世鑫, 李二玲, 邓晴晴, 等. 中国三大粮食作物化肥施用特征及环境风险评价. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (12): 2936-2947 [Ren S-X, Li E-L, Deng Q-Q, et al. Characteristics of chemical fertilizer application and environmental risk assessment of three major food crops in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28 (12): 2936-2947]
- [28] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2001—2019 [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China Agriculture Statistical Report*. Beijing: China Agriculture Press, 2001—2019]
- [29] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2019 [Department of Rural Social and Economic Investigation of the National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistic Press, 2001—2019]
- [30] 田伟, 杨璐嘉, 姜静. 低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的 SBM 模型. 中国农村观察, 2014 (5): 59-71, 95 [Tian W, Yang L-J, Jiang J. Measurement and analysis of the Chinese agricultural eco-efficiency from the perspective of low carbon: Based on SBM model of the undesirable outputs. *China Rural Survey*, 2014 (5): 59-71, 95]
- [31] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 等. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24 (1): 47-54 [Cheng J-H, Sun Q, Guo M-J, et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24 (1): 47-54]
- [32] 中共中央, 国务院. 关于加大统筹城乡发展力度进一步夯实农业农村发展基础的若干意见[EB/OL]. (2010-01-31) [2021-02-15]. http://www.gov.cn/jrzq/2010-01/31/content_1524372.htm [the Central Committee of the Communist Party of China, the State Council. Opinions on strengthening the overall planning of urban and rural development and further consolidating the foundation of agricultural and rural development[EB/OL]. (2010-01-31) [2021-02-15]. http://www.gov.cn/jrzq/2010-01/31/content_1524372.htm]
- [33] 刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理. 地理学报, 2012, 67 (8): 1011-1020 [Liu Y-S, Yang R. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (8): 1011-1020]