

城镇化模式与农业绿色全要素生产率： 基于空间门限面板模型

毛可颖

福建师范大学数学与统计学院，福建 福州

收稿日期：2025年3月21日；录用日期：2025年4月28日；发布日期：2025年5月14日

摘要

“双碳”目标背景下，厘清不同城镇化模式与农业绿色全要素生产率之间的协同关系，对实现农业降污增效具有重要意义。本文基于卫星监测夜间灯光数据构建的复合灯光指数衡量城镇化水平，采用Super-SBM方向函数测算的GML指数评估2000~2022年间中国31个省份的农业绿色全要素生产率，并利用空间门限面板模型实证检验了城镇化水平对农业绿色全要素生产率的非线性门限关系、不同城镇化模式的差异性影响以及农业绿色全要素生产率的路径依赖性。研究结果表明，随着农业产业集聚水平的提高：(1) 城镇化水平与农业绿色全要素生产率之间呈现“先降-后升-再降”的非线性关系。(2) 城镇化深度模式对农业绿色全要素生产率的影响具有三区制门限特征，表现为“先降-后升-再降”的波动趋势，城镇化广度模式则呈现“先降-后升”的双区制门限效应。(3) 在城镇化综合水平、城镇化深度模式与农业绿色技术进步之间，均存在“先降-后升-再降”的非线性关系；在产业较高集聚水平下，二者对农业技术效率的影响由负向正转变；相比之下，城镇化广度模式对两条技术路径的依赖性较低。本文基于上述研究成果所提出的政策建议，对推动农业绿色循环发展和实现“双碳”目标具有重要的参考价值。

关键词

城镇化模式，农业绿色全要素生产率，农业产业集聚，空间门限模型

Urbanization Models and Agricultural Green Total Factor Productivity: Based on the Spatial Threshold Panel Model

Keying Mao

School of Mathematics and Statistics, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 28th, 2025; published: May 14th, 2025

文章引用：毛可颖. 城镇化模式与农业绿色全要素生产率：基于空间门限面板模型[J]. 可持续发展, 2025, 15(5): 149-162. DOI: 10.12677/sd.2025.155134

Abstract

In the context of the “dual carbon” goals, clarifying the synergistic relationship between different urbanization models and agricultural green total factor productivity (GTFP) is crucial for achieving agricultural pollution reduction and efficiency improvement. This study constructs an urbanization index based on satellite-monitored nighttime light data and evaluates the GTFP of 31 provinces in China from 2000 to 2022 using the Super-SBM directional function. A spatial threshold panel model is employed to empirically test the nonlinear threshold relationship between urbanization levels and GTFP, the differential effects of different urbanization models, and the path dependence of GTFP. The results show that as the level of agricultural industrial agglomeration increases: (1) There is a nonlinear relationship between urbanization levels and GTFP that follows a pattern of “decline-rise-decline”. (2) The deep urbanization model has a three-threshold characteristic on GTFP, showing a fluctuating trend of “decline-rise-decline”, while the extensive urbanization model exhibits a two-threshold effect with “decline-rise”. (3) A nonlinear relationship of “decline-rise-decline” exists between the comprehensive urbanization level, the deep urbanization model, and agricultural green technological progress; under high industrial agglomeration levels, the effect of both shifts from negative to positive on agricultural technical efficiency. In contrast, the extensive urbanization model shows lower dependency on both technical paths. The policy recommendations derived from these findings have significant reference value for promoting agricultural green circular development and achieving the “dual carbon” goals.

Keywords

Urbanization Models, Agricultural Green Total Factor Productivity, Agricultural Industrial Agglomeration, Spatial Threshold Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“双碳”目标背景下，准确识别城镇化与农业绿色全要素生产率(AGTFP)的协同关系，对推动节能减污和提升生态环境质量具有重要的现实意义。节能减污作为我国当前经济社会发展的紧迫任务，需要各领域协同发力，通过形成合力实现资源优化配置与生态环境的持续改善。城镇化作为经济现代化的重要动力，是城乡协调发展的关键抓手，其发展模式与方向直接影响农业绿色转型和可持续发展。城镇化不仅通过促进人口与资源集聚，加速产业集聚的形成，为农业绿色技术的推广与应用提供了支持环境[1][2]。但同时也因耕地资源占用和环境压力增加，对农业绿色转型构成潜在威胁[3]。因此，探讨城镇化、产业集聚与农业绿色发展的互动关系及其作用机制，是实现农业可持续发展的重要前提。

现有文献表明，城镇化作为经济发展的重要驱动力，对农业绿色发展产生了复杂而深远的影响。城镇化通过劳动力流动、市场扩展和基础设施改善推动了农业生产方式的现代化和集约化。Lu 等认为，城镇化带来的规模经济效应、要素资源优化配置效应及环境改善效应显著提升了农业绿色全要素生产率[4]。然而，城镇化进程中农业用地的减少、环境污染加剧及资源挤占可能对农业绿色发展造成负面冲击，特别是在过度城镇化背景下，其对农业可持续性的削弱效应更加突出[5]。此外，部分研究指出，城镇化对 AGTFP 的影响并非线性，而是表现出阶段性特征：初期阶段促进 AGTFP 增长，但在过渡阶段则可能产

生负面效应[6]。然而, 这些研究多未深入分析非线性机制, 研究结论仍有拓展空间。

在此背景下, 城镇化与农业产业发展的协调发展显得尤为重要。产业集聚理论表明, 经济活动的空间集聚可通过规模效应、网络效应和技术外溢效应提升区域竞争力[7]。在农业领域, 产业集聚通过技术扩散、资源共享和市场一体化, 促进绿色技术的研发与应用, 并成为绿色技术创新的重要场所[8][9]。特别是在农业机械化和智能化技术快速发展的背景下, 集聚区已成为农业绿色创新的关键载体。然而, 过度集聚可能导致资源配置效率下降, 高密度区域的资源竞争加剧对农业生态环境产生负面影响[10]。因此, 研究城镇化与农业产业集聚的协调关系, 不仅能揭示其对 AGTFP 的双重作用机制, 还为优化城镇化布局 and 促进农业绿色技术发展提供政策依据。

针对城镇化推进模式对农业绿色发展的影响, 部分学者将其细分为“深度推进模式”与“广度推进模式”[6]。这一分类有助于厘清不同模式在绿色发展中的作用机制。城镇化深度推进模式通过优化资源配置、促进技术融合, 显著提升绿色技术应用水平[11][12], 而城镇化广度推进模式可能因土地资源的过度开发和环境压力增加对农业绿色发展产生不利影响[13]。此外, 将 AGTFP 分解为绿色技术进步与绿色技术效率两个维度, 可提供更为细致的分析框架: 绿色技术进步强调新技术的引入与应用, 包括技术创新和管理创新, 而绿色技术效率则关注现有资源的有效利用。这一分解框架能够更清晰地揭示城镇化深度和广度推进在绿色转型中的作用差异, 为理论研究提供全面支持。

本文的研究对城镇化推进与农业绿色全要素生产率之间复杂非线性关系的分析, 可能具有以下边际贡献: 第一, 引入空间门限面板模型, 捕捉城镇化模式对 AGTFP 的复杂非线性影响。以往研究大多采用线性模型分析, 难以捕捉城镇化模式对农业绿色全要素生产率的复杂、非线性影响。相较于传统的线性模型, 本文的方法不仅揭示了非线性关系, 还考虑了空间溢出效应, 为相关研究提供了新的分析框架。第二, 将农业产业集聚水平作为门限变量, 探索其在城镇化模式与 AGTFP 关系中的空间门限效应。现有研究多为假定经济变量在不同农业产业发展水平下的效应一直保持不变, 这种假设过于严格, 往往与客观事实不符。本文的设置突破了以往假设经济变量效应不变的局限, 进一步丰富了城镇化与农业绿色发展关系的理论研究。第三, 考察城镇化模式的差异性影响, 揭示其对农业绿色技术路径的依赖性。现有文献多聚焦于城镇化对农业绿色全要素生产率的总体影响, 但忽视了城镇化内涵的多样性与技术路径传导的多元化。本文将城镇化分为深度模式和广度模式, 并分别考察其对绿色技术进步与技术效率的不同作用, 精准刻画了城镇化推进对农业绿色转型的多样化作用机制。通过这些创新性分析, 本文为理解城镇化与农业绿色全要素生产率的非线性关系及技术路径差异提供了新的视角, 也为相关政策的制定提供了理论依据。

2. 理论模型介绍

2.1. 研究思路

城镇化作为推动经济高质量发展的重要引擎, 是解决“三农”问题的关键路径之一。农业绿色发展既是农业高质量发展的核心内涵, 也是实现乡村振兴的必然要求。二者之间的协调关系在很大程度上决定了农业高质量发展的潜力上限。然而, 这种关系具有较高的复杂性: 理论上, 城镇化能够通过资源优化配置、市场扩展以及绿色技术传播等机制, 对农业绿色全要素生产率(AGTFP)产生正向影响。但与此同时, 过快的城镇化进程可能引发土地资源的过度开发和环境压力, 从而对农业的可持续发展构成潜在威胁。

在此背景下, 农业产业集聚在推动农业发展中发挥了重要作用。基于产业集聚理论, 农业产业的空间集聚能够促进技术扩散、优化资源配置并降低生产成本, 同时也可能加剧环境污染和资源过度开发。因此, 农业产业集聚水平可能通过影响农业生产效率和绿色技术扩散路径, 进一步调节城镇化与 AGTFP

之间的关系。中国农业产业集聚水平呈现明显的区域性差异,高集聚地区通常具备较为完善的基础设施、较强的科技创新能力以及更为发达的市场体系,而低集聚地区则可能面临农业生产效率偏低、环境治理能力薄弱等问题。在这一背景下,农业产业集聚水平不仅影响城镇化对 AGTFP 的作用方向,还可能决定非线性关系的显著性和阈值效应的存在。一方面,集聚效应通过促进资源和知识的高效流动,有助于绿色技术的研发与应用;另一方面,过度集聚可能加剧资源竞争与环境负担,削弱农业生态系统的稳定性。因此,农业产业集聚在不同阶段和不同集聚水平下的影响机制,成为理解城镇化模式与 AGTFP 关系的关键切入点。

基于上述分析,城镇化模式与 AGTFP 的关系可能存在门限效应和空间溢出效应。这表明,其作用机制不仅受到城镇化模式的影响,还因产业集聚水平的差异而表现出显著的非线性特征。为此,本文引入了空间门限面板模型,旨在揭示不同产业集聚水平下,城镇化推进与 AGTFP 之间的非线性作用机制及空间门限效应。通过这种方法,能够更全面地捕捉城镇化、产业集聚与农业绿色发展的动态关系,为理解和优化城镇化模式提供理论支持。

2.2. 空间门限面板模型

本文的核心研究假设是城镇化对 AGTFP 的影响存在非线性门限效应,且受到空间溢出效应的影响。为此,本文构建如下空间门限面板模型,以单门限模型为例:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it} I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2 x_{it} I(q_{it} > \gamma) + \mu_i + \varepsilon_{it}, i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (1)$$

式中, i 表示地区, t 表示样本期; y_{it} 为被解释变量的观测值; x_{it} 为解释变量的观测值; q_{it} 为门限变量的观测值; γ 为门限值; $I(\cdot)$ 为示性函数; μ_i 为个体固定效应; 通过两个示性函数 $I(q_{it} \leq \gamma)$ 与 $I(q_{it} > \gamma)$, 将样本分为两个区制, β_1 与 β_2 分别代表了不同区制下解释变量的弹性系数。

进一步地,在式(1)中加入被解释变量的空间滞后项,将模型拓展为一个带有固定效应的空间单门限面板模型:

$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^N \omega_{ij} y_{jt} + \beta_1 x_{it} I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2 x_{it} I(q_{it} > \gamma) + \mu_i + \varepsilon_{it}, i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

式中, ρ 为空间滞后项的系数, ω_{ij} 为地区 i 与地区 j 之间被解释变量的空间权重。本文采用拟极大似然估计方法对模型进行估计,估计步骤参考相关文献[14]。同理,当模型的门限个数识别为两个及以上时,采用类似方法进行估计。

2.3. 门限效应及门限个数的检验

首先进行门限效应的存在性检验,原假设为 $H_{10}: \beta_1 = \beta_2$, 对应的备择假设为 $H_{10}: \beta_1 \neq \beta_2$ 。通过构造似然比检验统计量 $F_1 = \frac{S_0 - S_1(\hat{\gamma})}{\hat{\sigma}^2}$ 对空间自回归面板模型进行门限存在性检验,式中 S_0 与 $S_1(\hat{\gamma})$ 分别是 H_{10} 与 H_{11} 成立下的残差平方和, $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N(T-1)} S_1(\hat{\gamma})$ 是误差项方差的一致估计量,采用 Bootstrap 模拟法得到 F_1 的渐进分布及 P 值。

接着对门限的个数进行检验,原假设为 H_{20} : 在空间门限模型中只有一个门限值,对应的备择假设为 H_{21} : 在空间门限模型中有两个门限值。通过构造似然比检验统计量 $F_1 = \frac{S_1(\hat{\gamma}_1) - S_1(\hat{\gamma}_2)}{\hat{\sigma}^2}$ 对空间自回归面板模型进行门限个数检验,式中 $S_1(\hat{\gamma}_1)$ 与 $S_1(\hat{\gamma}_2)$ 分别是 H_{20} 与 H_{21} 成立下的残差平方和,

$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N(T-1)} S_1(\hat{\gamma}^2)$, 采用 Bootstrap 模拟法得到 F_2 的渐进分布及 P 值。同理,当模型的门限个数识别为

两个及以上时，采用类似方法进行估计。

3. 研究设计

3.1. 变量说明与数据来源

3.1.1. 变量说明

被解释变量：农业绿色全要素生产率。现今，农业绿色全要素生产率的测度往往局限于单一污染物(碳排放)，从而产生对农业低碳全要素生产率的测度，缺乏对主要污染源的考虑。然而，在农业生产过程中产生的所有污染物中，农业面源污染最为严重。为了对各种污染物进行统一比较，本文将化学需氧量、总氮和总磷定义为农业面源污染(ANSP)。本文基于 Chen 等提出的建立农业活动与污染之间关系的“自上而下”的库存分析方法对农业面源污染进行测度，建立如表 1 所示的中国农业绿色全要素生产率(AGTFP)指标体系，采用基于 Super-SBM 方向函数的 GML 指数测算 2000~2022 年我国 AGTFP [15] [16]。其中，农业碳排放参考丁宝根等的测算方法进行测度[17]。此外，AGTFP 由于存在小于 1 的观测值，使用 $AGTFP \rightarrow \ln(1 + AGTFP)$ 的方法进行对数化处理，后文所涉及的农业技术进步与农业技术效率使用同等方法处理。

Table 1. Index system of AGTFP
表 1. 农业绿色全要素生产率指标体系

变量名	一级指标	二级指标	三级指标
农业绿色全要素生产率	农业投入	土地投入	农作物播种面积 水产养殖面积
		劳动力投入	农业就业人员数量
		资本投入	农林牧渔业资本存量
		机械投入	农用机械总动力
		自然资源投入	灌溉面积
		农业期望产出	农林牧渔业总产值
	农业产出	农业非期望产出	农业碳排放 农业面源污染

解释变量。城镇化水平(urban)。利用卫星监测数据构造的夜间灯光复合指数表征城镇化水平，将城镇化分为城镇化深度 urban1 与城镇化广度 urban2, urban1 主要侧重城镇化发展质量和功能的完善, urban2 侧重城市的地理扩展、人口分布和城乡互动[6] [18]。

控制变量。本文控制了其他可能影响农业绿色全要素生产率的因素：劳动力文化水平(LabEdu)，用农村劳动力平均受教育水平表示；农业贸易条件(Trade)，用农产品进出口总额与农林牧渔业总产值的比值表示；农业经济基础(GDP)，用人均 GDP 平减指数表示；农业产业结构(AgrStru)，用种植业总产值与农林牧渔业总产值的比值表示；农业公共投资(AgrPay)，用农林水事务财政支出与地方财政总支出的比值表示；受灾程度(Damage)，用农作物受灾面积与种植业总面积的比值表示。

门槛依赖变量。农业产业集聚水平。本文参考韩海彬等的研究，基于区位熵测度农业产业集聚程度，具体公式如下：

$$LQ_{it} = \frac{Q_{it} / \sum_{i=1}^{30} Q_{it}}{G_{it} / \sum_{i=1}^{30} G_{it}},$$

其中, LQ_{it} 表示 t 时期 i 地区的区位熵, Q_{it} 表示 t 时期 i 地区农林牧渔业总产值; $\sum_{i=1}^{30} Q_{it}$ 表示全国农林牧渔业总产值; G_{it} 表示 t 时期 i 地区生产总值; $\sum_{i=1}^{30} G_{it}$ 表示全国生产总值[19]。

本文主要变量的描述性统计见表 2。

Table 2. Descriptive statistics of variables
表 2. 变量的描述性统计结果

变量	变量名称	单位	样本量	均值	最小值	最大值	标准差
AGTFP	农业绿色全要素生产率	--	690	1.027	0.928	1.562	0.070
ATC	农业绿色技术进步	--	690	1.028	0.766	1.562	0.080
AEC	农业绿色技术效率	--	690	1.000	0.817	1.220	0.047
Urban	城镇化推进水平	%	690	0.275	0.098	0.848	0.142
Urban1	城镇化推进深度模式	%	690	0.269	0.101	0.822	0.138
Urban2	城镇化推进广度模式	%	690	0.297	0.005	0.980	0.266
Agg	农业集聚程度	%	690	1.204	0.042	4.561	0.666
LabEdu	农业劳动力文化水平	年	690	7.452	4.351	9.912	0.803
Trade	农业贸易条件	%	690	0.382	0.001	11.307	0.888
GDP	农业经济基础	--	690	1.390	0.949	2.514	0.304
AgrStru	农业产业结构	%	690	0.524	0.339	0.740	0.086
AgrPay	农业公共投资	%	690	8.535	0.621	20.384	4.722
Damage	受灾程度	%	690	0.218	0	0.936	0.162

3.1.2. 数据来源

考虑数据的可获得性, 选取 2000~2022 年 30 个省份(除西藏)的面板数据为样本, 各省份夜间灯光数据来源于哈佛大学社会科学网络数据库。其他指标数据来自 2000~2022 年《中国统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及部分省份的统计年鉴和公开数据。

3.2. 实证模型构建

3.2.1. 模型 I

构建如下空间滞后面板数据模型:

$$AGTFP_{it} = \rho \sum_{j=1}^N \omega_{ij} AGTFP_{jt} + \beta_1 urban_{it} + \tau' C_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

式中, 因变量 $AGTFP_{it}$ 为 t 时期 i 地区的农业绿色全要素生产率水平; ρ 代表空间滞后项系数;

$W_N = (\omega_{ij})_{N \times N}$ 表示空间权重矩阵, 本文采用地理空间邻接矩阵作为空间权重矩阵; 自变量 $urban_{it}$ 代表 t 时期 i 地区的夜间灯光指数, 度量地区城镇化推进水平;

$C_{it} = (LabEdu_{it}, Trade_{it}, GDP_{it}, AgrStru_{it}, AgrPay_{it}, Damage_{it})'$ 代表 t 时期 i 地区影响农业绿色全要素生产率水平的其他相关变量; μ_i 表示地区的个体效应; $\varepsilon_{it} \sim iid(0, \sigma^2)$ 表示随机误差项。

3.2.2. 模型 II

构建如下 K 区制空间门限面板数据模型:

$$AGTFP_{it} = \rho \sum_{j \neq i}^n \omega_{ij} AGTFP_{jt} + \beta'_1 X_{it} I(AGG \leq \gamma_1) + \sum_{k=2}^{K-1} \beta'_k X_{it} I(\gamma_{k-1} < AGG \leq \gamma_k) + \beta'_K X_{it} I(\gamma_{K-1} < AGG) + \mu_i + \varepsilon_{it},$$

式中， $X_{it} = (\text{urban}_{it}, \text{LabEdu}_{it}, \text{Trade}_{it}, \text{GDP}_{it}, \text{AgrStru}_{it}, \text{AgrPay}_{it}, \text{Damage}_{it})'$ 表示各个解释变量； $\beta_k = (\beta_{k1}, \dots, \beta_{k6})'$ ($k = 1, \dots, K$) 表示第 k 个门限制度下与解释变量对应的回归系数向量； K 为实证中需要确定的门限个数； γ_k ($k = 1, \dots, K - 1$) 为识别出的不同门限值，表示城镇化模式在不同区间内的异质性效应； μ_i 表示地区的个体效应； $\varepsilon_{it} \sim iid(0, \sigma^2)$ 表示随机误差项； $I_k(\cdot)$ 为示性函数。

4. 统计检验和实证分析

4.1. 统计检验

4.1.1. 空间相关性检验

莫兰全局指数可以反映数据离散或者聚集的程度。本文利用 2001~2022 年中国 30 个省份农业绿色全要素生产率(AGTFP)的截面数据，计算得到各年份的全局 Moran 指数，结果如表 3 所示。由表 3 可见，2004 年之后的全局 Moran 指数均在 5% 的显著性水平下显著，表明在 2004 年后农业绿色全要素生产率的空间模式发生变化，但仍然基本上可以说明，农业绿色全要素生产率存在一定的空间自相关性，空间集聚现象已客观存在。

为了具象反映空间单元的具体分布，绘制四个具有代表性年份的 Moran 散点图(图 1)。由图 1 可以看出，各省农业绿色全要素生产率大多分布在坐标轴的第一、第三象限，呈现出高 - 高集聚和低 - 低集聚的聚类形态，具有良好的空间集聚特征，印证了采用空间计量模型对 AGTFP 进行进一步分析是合理且有效的。

本文还构造了似然比检验统计量以检验该模型中是否存在空间滞后效应。经计算，模型 I 与模型 II 的固定效应模型、随机效应模型及混合面板模型的似然比检验统计量 P 值均为 0，其中固定效应模型的拟合优度最高，随机效应假设被拒绝(Hausman 检验卡方值 659.030，P 值为 0)，个体固定效应模型结果最优。因此本文最终选用带有个体固定效应的空间模型。

Table 3. Global Moran's I test results
表 3. 全局莫兰检验结果

年份	莫兰指数值	年份	莫兰指数值
2001	0.052	2012	0.372***
2002	0.050	2013	0.380***
2003	0.238	2014	0.387***
2004	0.336**	2015	0.390***
2005	0.444***	2016	0.383***
2006	0.357***	2017	0.384***
2007	0.354***	2018	0.364***
2008	0.385***	2019	0.344***
2009	0.412***	2020	0.283***
2010	0.403***	2021	0.278***
2011	0.052***	2022	0.247***

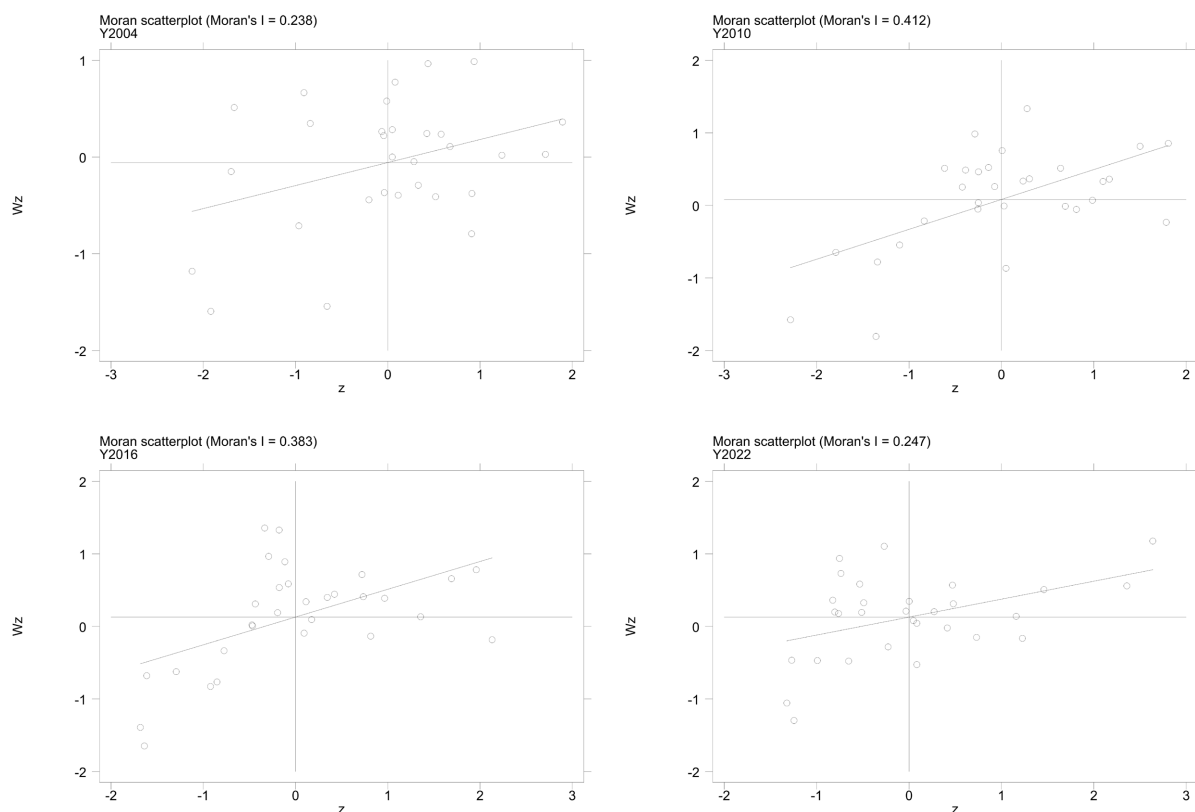


Figure 1. Moran Scatterplots of China's AGTFP in 2004, 2010, 2016, and 2022

图 1. 2004、2010、2016 及 2022 年中国农业绿色全要素生产率 Moran 散点

4.1.2. 门槛效应及个数检验

在门槛效应的存在性检验中, $F_1 = 935.745$, $P = 0.000$, LR 检验在 1% 的水平下拒绝了原假设, 表明空间自回归模型无法解释样本数据中存在的门限效应, 应采用空间门限面板模型进行进一步分析。经过双门限效应检验, 得到 F 统计量为 50.615, P 值为 0, 说明空间回归模型至少存在两个门槛。为控制问题的解释复杂性, 本文不再扩展门限个数, 以双门限(三区制)空间滞后模型结果列示。

4.2. 城镇化对农业绿色全要素生产率的非线性影响

为了比较空间门限面板模型的拟合效果, 同时列出参数面板模型(模型 I)、门限面板模型(模型 II)、空间自回归模型(模型 III)和空间门限面板模型(模型 IV)的回归结果(表 4)。由表 4 可见, 模型 I 的调整后 R^2 为 0.300, 而模型 III 和模型 IV 的调整后 R^2 均达到了 0.6 以上, 表明空间模型的改进提高了拟合优度。模型 II 和模型 IV 的调整后 R^2 分别达到了 0.592 与 0.705, 说明引入非线性门槛效应可以有效提高模型的准确性。模型 III 和模型 IV 的空间相关系数 ρ 大小相近且均显著为正, 这体现了城镇化推进对 AGTFP 的影响具有空间上的正相关性。此外, 模型 IV 的拟合优度在四组模型中最高, 即模型 IV 的解释能力在四组中最优, 表明同时引入空间效应与门限效应这一方法提高了原有模型的可靠性。

为了进一步了解 AGTFP 的区制特征, 本文基于农业产业集聚水平, 将样本划分为三个区制, 并计算各区制下关键变量的平均取值, 结果如表 5 所示。集聚水平低于 0.356 的区域为“产业低集聚区”(区制 I, 占总样本的 10.3%), 集聚水平介于 0.356 至 1.677 的区域为“产业中集聚区”(区制 II, 占总样本的 71.2%), 集聚水平高于 1.677 的区域为“产业高集聚区”(区制 III, 占总样本的 18.5%)。

Table 4. Estimation results under different regression models**表 4.** 不同回归模型下的估计结果

模型	参数面板 模型	门限面板模型			空间自回归 模型	空间门限面板模型		
编号	(I)	(II)			(III)	(IV)		
urban	0.063*	0.084***	0.272***	-0.139***	0.027*	-0.096**	0.079***	-0.146***
LabEdu	-0.05***	-0.004***	-0.030***	-0.002	-0.003***	0.012***	-0.005***	0.000
Trade	0.003***	0.004***	0.012*	0.000	0.004***	0.000	0.004***	0.001
GDP	0.065***	0.059***	0.100*	0.080***	0.022***	-0.011	0.019***	0.031***
AgrStru	0.045	0.031	0.265***	0.018	0.027	0.062	0.091***	0.035
AgrPay	-0.003***	-0.003***	-0.006*	-0.002**	-0.001***	0.004	-0.001***	0.000
Damage	-0.001	0.000	0.037	-0.017	0.002	-0.009	0.002	-0.003
ρ	--	--	--	--	0.603***		0.597***	
门限值	--	$\gamma \leq 1.575$	$1.575 < \gamma \leq 1.660$	$1.660 < \gamma$	--	$\gamma \leq 0.356$	$0.348 < \gamma \leq 1.677$	$1.670 < \gamma$
$\bar{R}^2$	0.300		0.592		0.678		0.705	

Table 5. Mean values of each regime**表 5.** 各区制均值

变量	$\gamma \leq 0.356$	$0.348 < \gamma \leq 1.677$	$1.677 < \gamma$
AGTFP	0.701	0.709	0.699
城镇化水平	0.570	0.249	0.210
劳动力文化水平	7.441	7.475	7.370
贸易依存度	1.013	0.330	0.237
经济基础	1.374	1.387	1.411
农业产业结构	0.463	0.514	0.598
农业公共投资	4.422	8.429	11.163
受灾程度	0.113	0.234	0.216

区制 I 区域的样本主要分布在城镇化水平较高但农业依赖度较低的经济发达地区，其特征是农业生产活动比重较小，资源配置更多向非农业部门倾斜；区制 II 包含劳动力文化水平较高和经济基础较强的区域，农业与非农业部门表现出较高的融合度，具备多产业共存与协同发展的典型特征；区制 III 则以农业集聚度高为显著特征，农业公共投资水平显著高于其他两个区制，涵盖了农业资源密集型的区域，这些地区的城镇化程度和贸易依存度相对较低。

城镇化水平对 AGTFP 的弹性系数在三个区制间的作用效果存在显著差异，表现出非线性的区制特征。在区制 I，弹性系数为-0.096，表明在低集聚水平下，城镇化对 AGTFP 产生负面影响；在区制 II，弹性系数由负转正，达到 0.079；在区制 III，弹性系数再次转负为-0.146，反映出高集聚水平下“集聚不经济”现象的显现。在城镇化初期，由于大量农业劳动力向非农产业转移，农业生产的人力资源出现短缺，导致农业生产力下降，同时绿色技术的推广受到阻碍。同时，城市扩张带来的环境污染向周边农村地区扩散，进一步加剧农业生态环境的恶化，对 AGTFP 产生抑制效应。但随着城镇化的深入推进，政府

对环境治理的重视程度提高，相应的政策干预措施逐步强化，促进农业现代化进程，并推动绿色技术的研发与应用。此外，城市居民消费升级加快，对绿色农产品的需求增加，进一步推动农业生产向高效、环保方向转型，促进 AGTFP 的回升。

在城镇化进入后期阶段，农业绿色技术进步的边际收益逐渐递减，城镇化对 AGTFP 的促进作用开始减弱，甚至由于农业用地缩减、劳动力进一步流失、环境污染加剧等因素，导致 AGTFP 再次下降。高度城镇化背景下，农业发展空间受限，土地资源的过度占用进一步挤压农业生产，影响绿色技术的有效利用。同时，城镇扩张对农村劳动力的虹吸效应使得农业劳动力进一步减少，绿色生产技术的实施难度加大。

4.3. 稳健性与内生性检验

本文通过以下方式进行了稳健性检验。第一，替换城镇化水平的测度指标。前述结果为使用卫星监测数据构造夜间灯光复合指数测度城镇化水平。此处本文使用城镇人口与常住人口的比值重新测度城镇化水平，结果如表 6 中回归(1)所示，显著性水平与回归系数与前文结果基本一致。第二，替换空间权重矩阵。选择以地理空间邻接矩阵，采用省会城市的经纬度来表示各省位置，估计结果如表 6 中回归(2)所示，与前文结果相符。第三，将数据进行上下 5%缩尾处理，结果见表 6 中的回归(3)，仍然与前述结果一致。

Table 6. Robustness and endogeneity test results
表 6. 稳健性检验与内生性检验结果

	替换解释变量	替换空间权重矩阵	调整样本	新型城镇化政策作工具变量	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
urban	0.237***	0.065*	0.036**		0.062***
工具变量				0.421***	
KP rk LM 统计量				66.219	
LM P 值				0.000	
KP rk wald F 统计量				370.181	
观测值	690	690	690	690	690
$\bar{R}^2$	0.725	0.645	0.679	0.606	0.235

考虑到内生性问题的潜在成因，本文主要关注以下两方面：一是政府的城镇化政策与农业发展政策可能同时对城镇化水平和 AGTFP 产生影响。二是城镇化水平与 AGTFP 之间可能存在双向因果关系。一方面，城镇化水平的提高可以通过促进农业现代化和技术进步，进而提升 AGTFP；另一方面，AGTFP 的改善可能吸引更多资源与投资，从而加速城镇化进程。

新型城镇化政策作为一项旨在促进城镇化发展的政策，与城镇化水平之间存在直接的正向关系。然而，政策的核心目标是推动城镇化发展，而非直接针对农业绿色全要素生产率。此外，新型城镇化政策的实施可视为一种外生冲击，其设定通常独立于城镇化水平和 AGTFP 的动态变化。尽管政策的制定可能受其他宏观经济因素的影响，这些因素未纳入本文的模型中，但由于政策与模型中误差项的相关性较低，其作为工具变量的有效性得以增强。基于此，本文选用新型城镇化政策与城镇化初期水平(2002 年)的乘积作为工具变量，利用两阶段最小二乘法(2SLS)进行估计。结果如列(4)至列(5)所示。

从第一阶段的估计结果来看，工具变量对农业绿色全要素生产率的估计系数显著为正。此外，KP rk

Wald F 统计量大于 Stock-Yogo 给出的 5%水平临界值，说明模型中不存在弱工具变量的可能性。KP rk LM 统计量对应的 P 值为 0.000，显著拒绝了不可识别性的原假设。这进一步证明了工具变量的有效性。观察二阶段估计结果可以发现，城镇化水平的估计系数依然显著为正，与前文结论保持一致。

4.4. 不同城镇化对农业绿色全要素生产率的影响差异及路径依赖

城镇化模式可以分为城镇化深度模式与城镇化广度模式，其与 AGTFP 的区制效应是由哪一种城镇化模式主导的？在产业集聚的门限效应下，城镇化究竟通过何种路径对 AGTFP 产生作用？为探讨这一问题，本文对城镇化模式进行了分解，同时将 AGTFP 进一步拆分为农业绿色技术进步与农业绿色技术效率。基于门限存在性检验与门限效应检验，采用空间门限面板数据模型进行分析，结果如表 7 和表 8 所示。

由表 7 可见，城镇化与 AGTFP 之间呈现显著的三区制门限效应，这一关系主要由城镇化深度模式所主导。在农业产业处于低集聚和高集聚水平时，城镇化深度模式对 AGTFP 的影响显著为负，限制了其发展。这种负面作用可归因于以下两个方面：第一，在低集聚水平下，城镇化深度模式可能导致资源配置的不合理，进而降低农业生产效率；第二，过度城镇化容易加剧资源竞争与环境压力，抑制农业绿色技术的有效应用。然而，当农业集聚水平位于 0.356 至 1.826 之间时，城镇化深度模式对 AGTFP 的影响转为显著正向。这表明，在适度集聚水平下，城镇化与产业集聚能够形成协同效应，城镇化深度通过优化资源配置与促进技术扩散，推动了农业绿色发展。

Table 7. Nonlinear effects of different urbanization patterns on AGTFP
表 7. 不同城镇化模式对农业绿色全要素生产率的非线性影响结果

变量	城镇化深度模式			城镇化广度模式	
urban	-0.075**	0.046***	-0.096***	0.057***	-0.027**
LabEdu	0.011***	-0.006***	0.003	0.000	-0.005***
Trade	0.000	0.004***	0.000	0.003**	0.004***
GDP	-0.018	0.022***	0.027***	0.002	0.038***
AgrStru	0.037	0.079***	-0.003	0.039	0.063**
AgrPay	0.004*	-0.001***	0.000	0.000	-0.001***
Damage	-0.010	0.001	0.004	-0.002	0.002
ρ		0.608***		0.566***	
门限值	$\gamma \leq 0.356$	$0.356 < \gamma \leq 1.826$	$1.826 < \gamma$	$\gamma \leq 1.049$	$1.049 < \gamma$
$\bar{R}^2$		0.720		0.699	

与城镇化深度模式不同，城镇化广度模式与 AGTFP 之间呈现显著的“先升 - 后降”非线性关系。在农业产业集聚水平低于 1.049 时，城镇化广度模式显著推动 AGTFP 的增长，这是因为城镇化扩张改善了市场规模和基础设施，提升了农业生产的整体效率。然而，当集聚水平超过 1.049 时，城镇化广度的作用开始转为负面。过度扩张引发资源竞争、环境压力增大以及对农业用地的过度占用，最终抑制了农业绿色发展。

为了进一步探讨城镇化对 AGTFP 的影响路径，本文检验了 AGTFP 是否具有技术路径依赖性。由表 8 可见，城镇化综合水平对农业绿色技术进步表现出“先降 - 后升 - 再降”的显著非线性门限效应，而对绿色技术效率的影响在区制 II 中显著为负，在区制 III 中显著为正。这种非线性特征表明，城镇化对农业

绿色发展的路径依赖性随产业集聚水平的变化而异。

Table 8. Threshold effect test of different urbanization patterns on the decomposition of AGTFP
表 8. 不同城镇化模式对农业绿色全要素生产率分解的门限效应检验

变量		绿色技术进步				绿色技术效率	
模型		(I)				(II)	
综合 水平	urban	-0.090*	0.144***	-0.199***	0.009	-0.116***	0.109***
	ρ		0.521***			0.365***	
	门限值	$\gamma \leq 0.439$	$0.439 < \gamma \leq 1.703$	$1.703 < \gamma$	$\gamma \leq 1.067$	$1.067 < \gamma \leq 1.822$	$1.822 < \gamma$
	$\bar{R}^2$		0.665			0.530	
深度 模式	urban1	-0.067**	0.092***	-0.133***	0.017	-0.075***	0.078***
	ρ		0.521***			0.365***	
	门限值	$\gamma \leq 0.439$	$0.439 < \gamma \leq 1.703$	$1.703 < \gamma$	$\gamma \leq 0.974$	$0.974 < \gamma \leq 1.822$	$1.822 < \gamma$
	$\bar{R}^2$		0.665			0.530	
广度 模式	urban2	0.061***	-0.013	-0.004	-0.002		-0.032
	ρ		0.523***			0.344***	
	门限值	$\gamma \leq 1.049$	$1.049 < \gamma \leq 1.656$	$1.656 < \gamma$	$\gamma \leq 1.814$		$1.814 < \gamma$
	$\bar{R}^2$		0.594			0.474	

城镇化深度模式对农业绿色技术进步与绿色技术效率的影响趋势与城镇化综合水平一致，进一步说明该模式对农业绿色发展具有重要的支持作用。然而，绿色技术效率对城镇化的门限值更高，通常需要更高的产业集聚水平才能实现有效的资源共享与技术溢出效应。相比之下，绿色技术进步在较低集聚水平下即可受到城镇化的正向推动，这是由于基础设施改善与市场环境优化更有利于技术创新的早期发展。

相较而言，城镇化广度模式对农业绿色技术进步的影响仅在区制 I 中显著为正，而在区制 II 与区制 III 中不显著，对绿色技术效率的弹性系数亦无统计意义。这反映了城镇化广度模式的局限性，仅在较低集聚水平下能够通过促进资源有效配置与绿色技术扩散，对农业绿色发展产生积极作用。

综上所述，城镇化与 AGTFP 的三区制门限效应主要由城镇化深度模式主导。不同阶段下，城镇化推进在农业绿色发展中呈现出多样化作用，并通过绿色技术进步这一关键路径影响 AGTFP。相较而言，城镇化广度模式的路径作用较为有限，其积极效应仅体现在较低的产业集聚水平下。

5. 结论与建议

随着城镇化进程的不断推进，城镇化对农业生产及其绿色全要素生产率(AGTFP)的影响愈发深远和复杂。在此背景下，本文以农业产业集聚为门限变量，利用空间滞后门限面板模型，系统探讨了城镇化推进对 AGTFP 的非线性关系。研究结果表明：(1) 城镇化水平与 AGTFP 之间呈现“先降 - 后升 - 再降”的三区制门限关系，存在两个显著的农业产业集聚门限值。当产业集聚水平突破第一个门限值时，城镇化对 AGTFP 的提升作用开始显现；然而，当跨越第二个门限值后，AGTFP 则出现下降趋势。这表明，大多数省份已越过第一个拐点，但仍有近三成省份处于区制 I 或区制 III，面临城镇化与农业产业集聚不

协调的问题。(2) 城镇化深度模式对 AGTFP 的影响呈现出显著的“先降 - 后升 - 再降”的非线性特征。在低集聚和高集聚水平下, 城镇化深度模式对 AGTFP 的作用呈现抑制效应, 而在中等集聚水平时, 则表现为显著的促进作用。相比之下, 城镇化广度模式与 AGTFP 的关系为“先降 - 后升”的双区制门限特征。在低产业集聚水平下, 城镇化广度模式能够显著促进农业绿色发展; 但当集聚水平超过一定阈值后, 其效应转为负面。(3) 城镇化综合水平与城镇化深度模式对 AGTFP 均存在“先降 - 后升 - 再降”的三区制门限关系。其对农业绿色技术效率的路径依赖度较低, 在突破一定产业集聚水平后表现为“先升 - 后降”的非线性影响。相比之下, 城镇化广度模式对技术路径的促进作用具有局限性, 仅在低产业集聚阶段对农业绿色技术进步表现出正向效应。

基于上述研究结论, 本文提出以下有针对性的政策建议:

第一, 精准制定城镇化推进策略, 助力农业绿色发展。根据各省份所在的区制特征, 制定差异化的城镇化推进方案: 对于处于区制 I 的省份, 应优先加强基础设施建设和技术支持, 优化城镇化模式, 推动农业绿色发展。同时实施分区分级政策, 及时调整区域发展策略; 对于已跨越第一个门限值但面临第二个门限挑战的省份, 应注重城镇化质量的提升, 避免过度规模扩张, 转向紧凑型、生态友好的城镇化模式, 避免资源浪费和生态破坏。对于处于区制 III 的省份, 应控制城镇化广度的过快扩张, 降低资源消耗与环境负担, 推动区域协调发展。

第二, 优化城镇化模式与农业产业协同发展, 促进产业共荣。在中等集聚水平地区, 重点支持城镇化深度模式与农业绿色技术创新的协同发展。通过政策配套和资源倾斜, 提升农业产业链的生态效益, 同时鼓励技术和经验在周边省域的扩散, 形成区域联动效应。在低集聚和高集聚水平地区, 应针对性地促进绿色技术和低碳产业的发展。对于低集聚地区, 优先完善基础设施建设, 加强城乡融合, 推动城镇化广度的合理扩展; 而在高集聚地区, 应适度控制城镇化的过快扩张, 防止生态环境恶化, 通过技术引导和政策干预推动绿色农业技术的持续创新。

第三, 强化绿色技术创新推广, 实现城乡协同共赢。针对中高集聚水平地区, 应加大农业绿色技术研发与应用的投入, 推动技术创新向规模化方向发展, 减少资源浪费与污染排放, 提升农业绿色技术效率。由于城镇化广度模式对技术进步的作用有限, 政府在推进城镇化过程中应注重前期绿色技术投入。特别是在初期发展阶段, 加强基础设施建设与技术支持, 为绿色技术的广泛应用创造条件。对于进入高集聚水平的地区, 应加速绿色技术的自主创新, 扩大技术成果的转化与应用范围, 逐步形成农业绿色发展的长效机制。

参考文献

- [1] Wu, J. and Bai, Z. (2022) Spatial and Temporal Changes of the Ecological Footprint of China's Resource-Based Cities in the Process of Urbanization. *Resources Policy*, **75**, Article ID: 102491. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102491>
- [2] Cheng, Z., Li, X. and Zhang, Q. (2023) Can New-Type Urbanization Promote the Green Intensive Use of Land? *Journal of Environmental Management*, **342**, Article ID: 118150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118150>
- [3] Liu, Y. and Zhou, Y. (2021) Reflections on China's Food Security and Land Use Policy under Rapid Urbanization. *Land Use Policy*, **109**, Article ID: 105699. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105699>
- [4] Lu, W. and Chen, W. (2024) Influence of New Urbanization on Grain Green Total Factor Productivity: The Mediating and Regulating Effects. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **32**, 529-545.
- [5] Aubry, C., Ramamonjisoa, J., Dabat, M., Rakotoarisoa, J., Rakotondraibe, J. and Rabeharisoa, L. (2012) Urban Agriculture and Land Use in Cities: An Approach with the Multi-Functionality and Sustainability Concepts in the Case of Antananarivo (Madagascar). *Land Use Policy*, **29**, 429-439. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.08.009>
- [6] 方芳, 赵军, 黄宏运, 等. 城镇化推进模式与我国农业低碳全要素生产率——来自双源夜间灯光证据[J]. 统计研究, 2024, 41(4): 111-125.

- [7] Guo, H., Xu, S. and Pan, C. (2020) Measurement of the Spatial Complexity and Its Influencing Factors of Agricultural Green Development in China. *Sustainability*, **12**, Article 9259. <https://doi.org/10.3390/su12219259>
- [8] 银西阳, 贾小娟, 李冬梅. 农业产业集聚对农业绿色全要素生产率的影响——基于空间溢出效应视角[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 110-119.
- [9] Li, E., Coates, K., Li, X., Ye, X. and Leipnik, M. (2017) Analyzing Agricultural Agglomeration in China. *Sustainability*, **9**, Article 313. <https://doi.org/10.3390/su9020313>
- [10] Kanter, D.R., Musumba, M., Wood, S.L.R., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., *et al.* (2018) Evaluating Agricultural Trade-Offs in the Age of Sustainable Development. *Agricultural Systems*, **163**, 73-88. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.010>
- [11] Shen, Z., Wang, S., Boussemart, J. and Hao, Y. (2022) Digital Transition and Green Growth in Chinese Agriculture. *Technological Forecasting and Social Change*, **181**, Article ID: 121742. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121742>
- [12] Lin, B. and Chen, Z. (2018) Does Factor Market Distortion Inhibit the Green Total Factor Productivity in China? *Journal of Cleaner Production*, **197**, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.094>
- [13] Zahoor, Z., Latif, M.I., Khan, I. and Hou, F. (2022) Abundance of Natural Resources and Environmental Sustainability: The Roles of Manufacturing Value-Added, Urbanization, and Permanent Cropland. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 82365-82378. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21545-8>
- [14] Li, F., Chen, J., Chen, H. and Zhuo, Z. (2022) How to Reduce PM_{2.5}? Perspective from a Spatial Autoregressive Threshold Panel Model. *Ecological Indicators*, **143**, Article ID: 109353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109353>
- [15] Chen, M., Chen, J. and Du, P. (2006) An Inventory Analysis of Rural Pollution Loads in China. *Water Science and Technology*, **54**, 65-74. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.831>
- [16] Chen, Y., Miao, J. and Zhu, Z. (2021) Measuring Green Total Factor Productivity of China's Agricultural Sector: A Three-Stage SBM-DEA Model with Non-Point Source Pollution and CO₂ Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **318**, Article ID: 128543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128543>
- [17] 丁宝根, 赵玉, 邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 1-11.
- [18] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 168-175, 241.
- [19] 韩海彬, 杨冬燕. 农业产业集聚对农业绿色全要素生产率增长的空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 29-37.