

河南省县域农业生产条件时空分异特征与要素关联研究

吴英豪, 肖思凯, 曹正豪

河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月30日

摘要

农业生产条件是保障粮食安全、推进农业现代化的核心物质基础。河南省作为全国第一粮食生产大省, 省域内农业生产条件空间分布极不均衡, 现有研究对县域尺度的精细化时空分析仍有不足。本文以河南省112个县域为研究单元, 基于2000~2021年长时序面板数据, 运用熵值法、地理信息系统空间可视化及相关性分析等方法, 系统探究其农业生产条件的时空分异特征与要素关联。结果表明: 2000~2021年河南省农业生产条件整体持续优化, 各核心指标呈现差异化演变趋势; 空间上呈显著的东高西低、平原优于山地的梯度分异与连片集聚格局, 有效灌溉面积是区域差异的核心决定因素; 多维度要素关联呈现“基建强协同、化肥弱驱动、人口配规模”的耦合特征, 灌溉与机械化要素深度协同, 化肥投入与粮食单产、总产量的关联强度较弱, 增产驱动效应已不显著, 人口规模主要通过生产规模路径影响产出总量; 包含大量非农成分的农村用电量与纯农业生产指标无显著关联, 统计口径对研究结果影响明显。本研究为河南省农业高质量发展和国家粮食安全核心区建设提供了科学依据。

关键词

农业生产条件, 时空分异, 熵值法, 县域尺度, 河南省, 要素关联

Study on the Spatial and Temporal Variation Characteristics and Element Correlation of Agricultural Production Conditions in Counties of Henan Province

Yinghao Wu, Sikai Xiao, Zhenghao Cao

College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: June 25, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

Agricultural production conditions serve as the core material foundation for ensuring food security and advancing agricultural modernization. As the leading grain-producing province in China, Henan Province exhibits a highly uneven spatial distribution of agricultural production conditions within its borders. Existing research on fine-grained spatiotemporal analysis at the county level still falls short. This paper takes 112 counties in Henan Province as research units, utilizes long-term panel data spanning from 2000 to 2021, and employs methods such as the entropy method, geographic information system (GIS) spatial visualization, and correlation analysis to systematically explore the spatiotemporal differentiation characteristics and elemental correlations of agricultural production conditions. The results indicate that agricultural production conditions in Henan Province have been continuously optimized from 2000 to 2021, with various core indicators exhibiting differentiated evolutionary trends. Spatially, there is a significant gradient differentiation and contiguous agglomeration pattern, with higher conditions in the east and lower conditions in the west, and plains outperforming mountainous areas. The effective irrigation area is the core determinant of regional differences. Multidimensional elemental correlations exhibit a coupling characteristic of “strong synergy in infrastructure, weak driving force in fertilizer, and population matching scale”. Irrigation and mechanization elements are deeply synergistic, while the correlation strength between fertilizer input and grain yield per unit area or total output is weak, and the driving effect of yield increase is no longer significant. Population scale mainly affects total output through the production scale path. Rural electricity consumption, which includes a large amount of non-agricultural components, shows no significant correlation with pure agricultural production indicators, and statistical caliber significantly affects research results. This study provides a scientific basis for the high-quality development of agriculture in Henan Province and the construction of a core area for national food security.

Keywords

Agricultural Production Conditions, Spatiotemporal Differentiation, Entropy Method, County Scale, Henan Province, Element Correlation

Copyright © 2026 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

粮食安全是国家安全的重要基石，农业生产条件作为农业再生产的物质前提，直接决定区域农业产出水平、资源利用效率与可持续发展能力。坚守耕地保护红线、夯实粮食安全根基是国家粮食安全战略的核心要求[1]，改善农业生产条件、推进农业现代化是落实这一要求的核心路径。

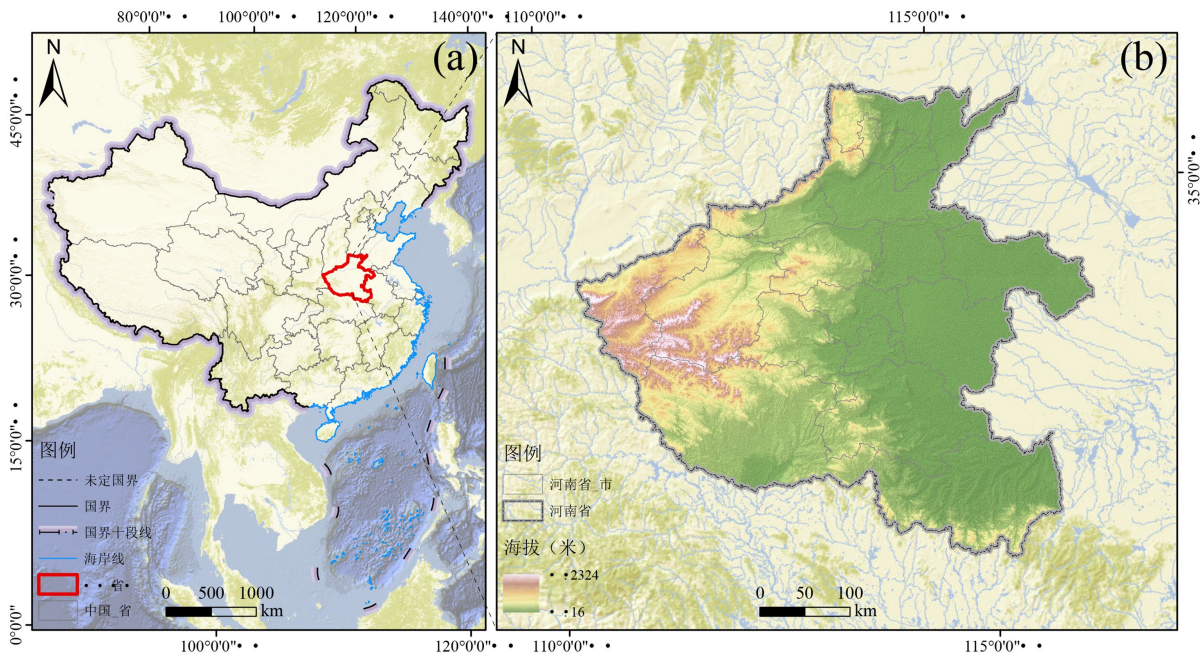
河南省作为全国第一粮食生产大省，粮食总产量连续多年稳定在 650 亿公斤以上[2]，小麦产量占全国四分之一，在国家粮食安全战略格局中具有不可替代的地位[3]。然而，河南省地貌类型复杂多样，平原、山地、丘陵交错分布，受自然禀赋、经济基础、政策导向等多重因素影响，省域内部农业生产条件空间分布极不均衡，不同县域农业基础设施、物质投入水平差异显著。同时，随着农业现代化进程的加快，农业生产要素之间的耦合关系也发生了深刻变化，厘清这些变化规律对于优化农业资源配置、缩小区域发展差距具有重要意义。

当前国内学界围绕农业生产条件开展了大量研究。在研究尺度上,既有成果多集中于省域、市域等宏观单元,针对县域尺度的精细化时空分析相对不足[4];在研究内容上,多单独聚焦农业机械化、农田灌溉、农资投入等单一要素的时空演变,鲜有将人口规模、生产要素、粮食产出纳入统一分析框架,对县域层面要素耦合机制与产出驱动效应的整合研究有待深化[5];在研究方法上,现有研究多侧重空间格局可视化,对要素间内在关联规律的量化揭示不足;在数据使用上,多数研究仅使用农业生产相关数据,未能结合人口、播种面积、粮食产量等多源数据开展交叉分析,研究结论的实践指导性有待提升。

鉴于此,本文以河南省 112 个县域为研究对象,采用 2000~2021 年长时序面板数据,整合农业生产条件、人口、农产品产量、播种面积等多源数据,通过熵值法计算农业生产条件综合指数,运用 ArcGIS 技术揭示其空间分异与集聚特征,从时间演变、空间格局、要素关联三个维度开展系统分析,旨在厘清河南省农业生产条件的演变规律与内在逻辑,为优化农业资源配置、缩小区域发展差距、推进全域农业现代化提供理论参考与实践依据。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Geographical location map of Henan Province

图 1. 河南省地理区位图

河南省位于中国中东部、黄河中下游,总面积 16.7 万平方公里,辖 17 个地级市、1 个省直辖县级市,共 157 个县级行政区,本文研究范围为剔除各地级市市辖区及数据大量缺失行政单元后的 112 个县域单元,以保证研究对象的可比性。全省地势西高东低,北、西、南三面由太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布,中东部为广阔的黄淮海冲积平原,西南部为南阳盆地(图 1)。平原和盆地占全省总面积的 55.7%,山地占 26.6%,丘陵占 17.7% [6]。

河南省属暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年平均气温 10.5℃~16.7℃,年平均降水量

407.7~1295.8 毫米, 适宜多种农作物生长, 是我国重要的商品粮生产基地和小麦主产区[7]。2021 年, 河南省粮食总产量达 1308.84 亿斤, 占全国粮食总产量的 9.8%, 其中小麦产量 760.64 亿斤, 占全国小麦总产量的 28.3%, 粮食播种面积达 16158.5 万亩, 是全国粮食生产核心区[8]。

2.2. 数据来源与预处理

2.2.1. 数据来源

1) 农业生产条件数据: 2000~2021 年河南省 112 个县域的农业机械总动力(万千瓦)、化肥施用量(吨, 折纯量)、农村用电量(万千瓦时)、有效灌溉面积(千公顷), 数据整理自《河南省统计年鉴》(2001~2022)、各地市统计年鉴及县域国民经济和社会发展统计公报。农村用电量包含农业生产、乡村工业与居民生活用电, 纳入综合指数主要反映县域农村整体电气化水平, 而非纯农业生产电气化程度;

2) 人口数据: 2000~2021 年河南省县域年末总人口(万人), 数据来源同上;

3) 农产品产量数据: 2000~2021 年河南省县域粮食总产量(吨), 数据来源同上;

4) 播种面积数据: 2000~2021 年河南省县域农作物播种面积(亩), 数据来源同上。

2.2.2. 数据预处理

数据预处理流程如下:

1) 缺失值处理: 农业机械总动力缺失率 4.70%, 农村用电量缺失率 4.56%, 化肥施用量无缺失。受统计口径调整影响, 2009~2021 年县域尺度有效灌溉面积公开数据连续性不足。针对面板数据特征, 采用按年份分组中位数插值补齐数值型缺失项, 字符型字段使用前向填充法处理;

2) 异常值识别: 采用四分位距(IQR)法开展异常值检验, 各指标异常样本占比均低于 7.16%, 其中化肥施用量 2010 年极端异常值采用 1%分位缩尾处理, 其余异常样本在合理误差范围内, 予以保留;

3) 标准化处理: 为消除量纲影响, 对原始数值采用极差标准化方法处理, 将数据统一映射至[0, 1]区间;

4) 衍生指标计算: 基于基础数据计算人均耕地面积、粮食单产、单位面积化肥施用量等衍生指标, 用于多维度分析。

经预处理后, 最终形成 2235 条有效平衡面板数据, 数据完整性与可靠性满足实证分析要求。

3. 研究方法

3.1. 熵值法

农业生产条件综合评价的核心在于指标权重的科学确定。现有研究中常用的权重确定方法包括主观赋权法(层次分析法、德尔菲法)和客观赋权法(熵值法、主成分分析法)两类[9]。主观赋权法依赖专家经验, 易受人为因素干扰; 主成分分析法虽能实现降维, 但会损失部分原始信息。熵值法基于指标数据本身的离散程度确定权重, 能够客观反映各指标在综合评价中的重要性, 避免主观偏差[10], 且计算过程透明、结果可重复, 是目前多指标综合评价中应用最广泛的客观赋权方法。因此, 本文采用熵值法计算河南省县域农业生产条件综合指数, 具体计算步骤如下:

3.1.1. 数据标准化处理

由于各指标的量纲、数量级及正负取向存在差异, 需先对原始数据进行标准化处理[11]。本文选取的农业机械总动力、化肥施用量、农村用电量、有效灌溉面积均为正向指标, 采用极差标准化法进行处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个县域第 j 项指标的原始值; $\min(x_j)$ 和 $\max(x_j)$ 分别为第 j 项指标的最小值和最大值; x'_{ij} 为标准化后的值, 取值范围为 $[0,1]$ 。为避免后续计算中出现对数无意义的情况, 对标准化后的值进行平移处理:

$$x''_{ij} = x'_{ij} + 0.0001 \quad (2)$$

3.1.2. 计算指标比重

计算第 j 项指标下第 i 个县域的指标值占该指标总和的比重:

$$p_{ij} = \frac{x''_{ij}}{\sum_{i=1}^m x''_{ij}} \quad (3)$$

式中: m 为全部面板数据量, 本文 $m = 2235$ 。

3.1.3. 计算指标熵值

熵值反映了指标信息的无序程度, 熵值越小, 说明指标值的变异程度越大, 提供的信息量越多, 权重也就越大:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

式中: k 为常数, 与样本数量有关, $k = \frac{1}{\ln m}$, 本文 $k = \frac{1}{\ln 2235} = 0.129668$ 。若 $p_{ij} = 0$, 则定义 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0$ 。

3.1.4. 计算指标差异系数

差异系数反映了指标信息的有效程度, 差异系数越大, 说明指标对综合评价的贡献越大:

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

3.1.5. 计算指标权重

将各指标的差异系数进行归一化处理, 得到各指标的权重:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (6)$$

式中: n 为指标数量, 本文 $n = 4$ 。

3.1.6. 计算综合指数

将标准化后的指标值与对应权重相乘并求和, 得到每个县域的农业生产条件综合指数:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j x'_{ij} \quad (7)$$

式中: S_i 为第 i 个县域的农业生产条件综合指数, 取值范围为 $[0,1]$, 值越大表明农业生产条件越好。

3.2. 空间可视化分析

运用 ArcMap 10.8.2 软件开展空间制图, 基于综合指数采用自然断点法(Jenks Natural Breaks)将结果划分为高、较高、中等、较低、低 5 个等级, 该方法可实现组内差异最小、组间差异最大, 能够客观反

映空间集聚与分异特征。同时依托市域均值绘制热力图，从县域、市域两个尺度开展空间对比分析。

3.3. 皮尔逊相关分析

通过计算皮尔逊相关系数，从生产要素内部耦合、要素对产出的驱动效应、人口与生产体系的联动三个维度，定量分析年末总人口、粮食总产量、粮食单产、单位面积化肥施用量、农业机械总动力、人均粮食产量、有效灌溉面积 7 项核心指标的线性相关程度，揭示各生产要素之间的耦合关联特征[12]。相关系数 r 的取值范围为 $[-1, 1]$ ，绝对值越接近 1，表明相关性越强。

4. 结果与分析

4.1. 指标权重结果与分析

基于 3.1 熵值法计算流程，得到四项评价指标的熵值、差异系数及最终权重，结果见表 1：

Table 1. Evaluation index weight of agricultural production conditions

表 1. 农业生产条件评价指标权重

指标名称	熵值 e_j	差异系数 g_j	权重
有效灌溉面积	0.8696	0.1304	0.4871
农村用电量	0.9282	0.0718	0.2682
化肥施用量	0.9638	0.0362	0.1352
农业机械总动力	0.9707	0.0293	0.1095

从权重计算结果可以看出：

- 1) 有效灌溉面积权重最高(0.4871)，接近总权重的一半，说明该指标在河南省县域间离散程度最高，对农业生产条件综合得分的区域贡献度最大；结合农业生产实际来看，灌溉能力受地形、水资源禀赋约束较强，是形成区域差异的核心基础条件；
- 2) 农村用电量权重次之(0.2682)，反映该指标县域间差异较为显著；
- 3) 化肥施用量、农业机械总动力权重相对偏低，表明两类传统农业投入要素在县域间分布较为均衡，区域差异性较小。

4.2. 农业生产条件时间演变特征

2000~2021 年河南省四项农业生产指标年度均值变化如图 2 所示。整体来看，21 年间全省农业生产条件呈现机械化与电气化快速提升、化肥投入先增后稳、灌溉体系先建后稳的演变特征。

1) 农业机械总动力：增长态势最为强劲。2000 年县域均值为 48.55 万千瓦，2015 年达到峰值后出现明显断崖式下跌，2016 年以来恢复稳步增长，2021 年达到 88.83 万千瓦，21 年累计增幅达 82.96%，年均增速 2.9%。注：2016 年数据突变系国家统计局调整农业机械总动力统计口径所致，调整后不再包含农用运输车(三轮汽车、低速货车)，仅统计纯农业机械动力[13]。剔除统计口径变化影响后，2016~2021 年河南省农业机械总动力仍保持持续增长态势。这一长期增长趋势主要得益于国家农机购置补贴政策的持续实施，极大地激发了农民购买农业机械的积极性，平原地区小麦、玉米等主要农作物生产全程机械化基本实现。

2) 化肥施用量：整体呈现“稳步增长 - 异常波动 - 趋稳回落”的特征。2000 年县域均值为 35640.03 吨，2009 年增长至 52125.02 吨；2010 年出现极端异常峰值，后续分析已对该年度异常值采用 1%分位缩

尾处理,消除极端值干扰;2011年恢复至正常水平后保持平稳波动,2015年达到峰值59,870吨,之后呈现缓慢下降趋势,2021年为52,340吨。剔除2010年异常值后,21年累计增幅约46.25%,年均增速1.8%。特别是2015年国家提出化肥使用量零增长行动以来,化肥施用量逐步回落,表明河南省农业生产正逐步由粗放式投入向绿色集约式发展转变。

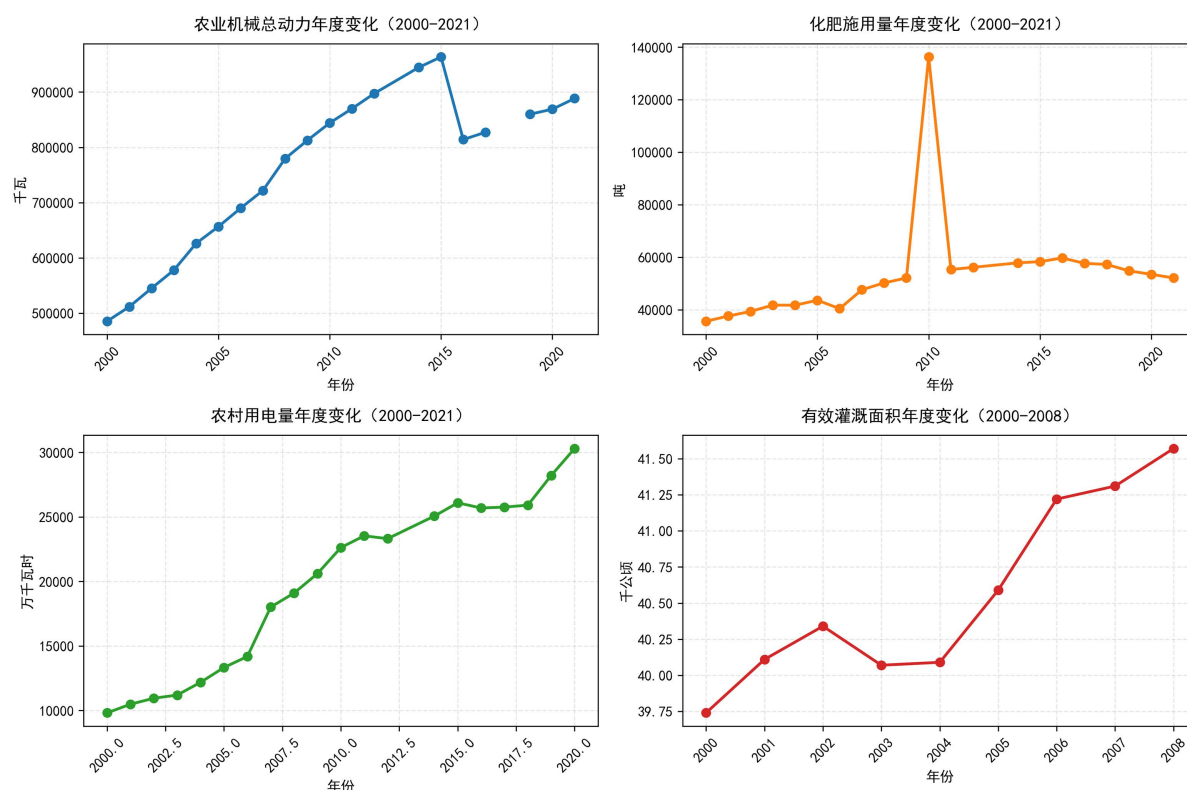


Figure 2. Annual change trend of agricultural production indicators in Henan Province (2000~2021)

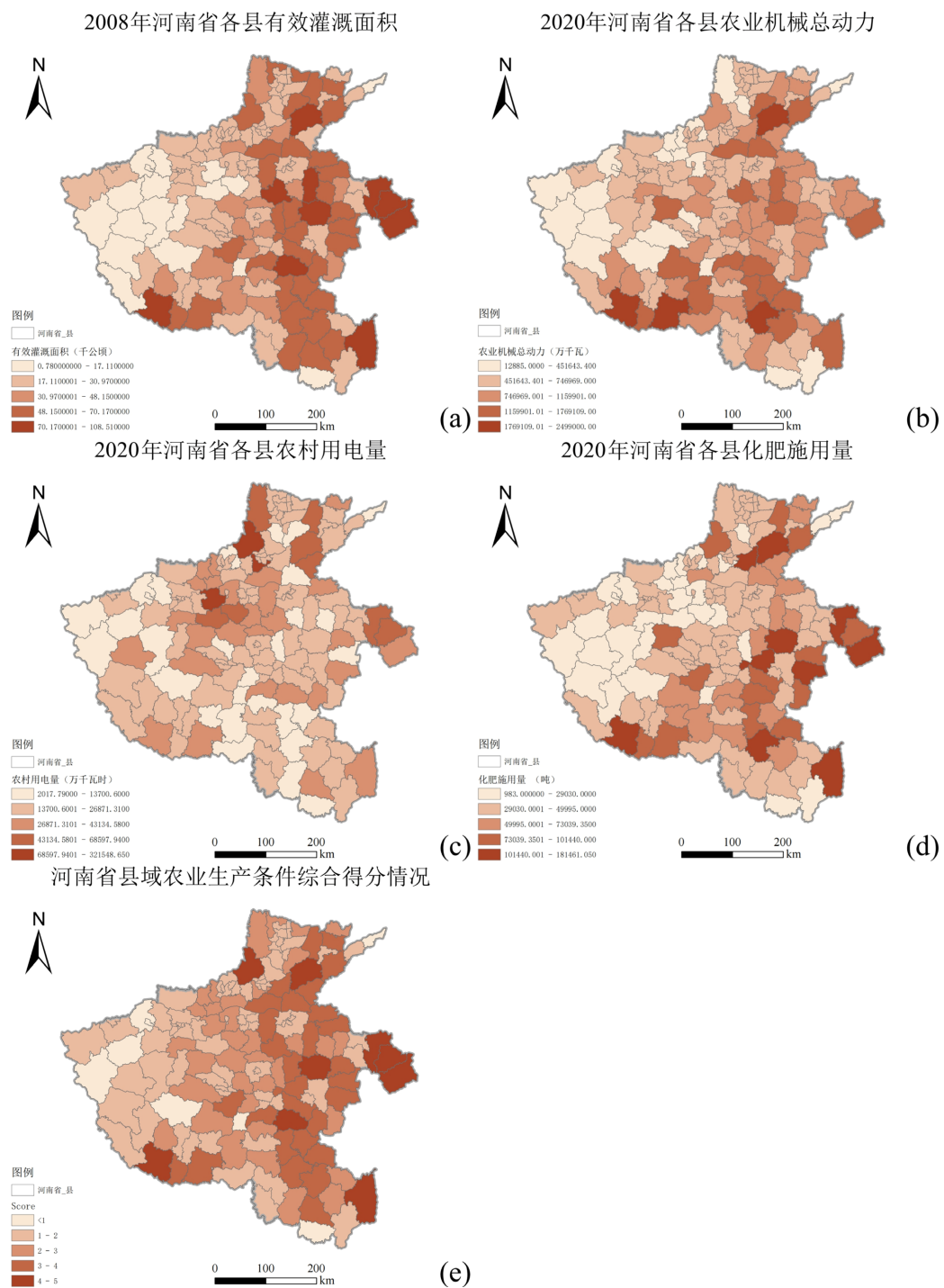
图2. 河南省农业生产指标年度变化趋势(2000~2021)

3) 农村用电量:保持持续高速增长态势,是四项指标中增幅最大的一项。2000年县域均值为9817.22万千瓦时,2021年增长至30,480万千瓦时,累计增幅达210.47%,年均增速5.4%。农村用电量的快速增长,一方面反映了农业电气化水平的提高和设施农业的蓬勃发展,另一方面也体现了乡镇工业、农村服务业等农村二三产业的快速扩张。

4) 有效灌溉面积:呈现“先增长后稳定”的阶段特征。2000年县域均值为39.74千公顷,2000~2008年持续增长,2008年达到峰值41.52千公顷,之后基本保持稳定。这表明河南省农田灌溉体系在2008年已基本建成,现有水利设施覆盖范围接近区域承载上限,之后主要以现有设施的维护和改造升级为主。

4.3. 农业生产条件空间分异格局

基于熵值法计算2020年河南省112个县域农业生产条件综合指数(各指标权重见表1),采用自然断点法划分为高、较高、中等、较低、低5个等级,对应分级赋值依次为5~1分[14]。利用ArcMap 10.8.2绘制空间分布图(图3);同时基于2000~2021年均标准化数据绘制各地级市农业生产条件热力图(图4),从县域和市域两个尺度揭示空间分异特征。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. Spatial distribution map of comprehensive index of agricultural production conditions in counties of Henan Province
图 3. 河南省县域农业生产条件综合指数空间分布图

从县域尺度来看，河南省农业生产条件呈现出连片式集聚分布的显著特征：

1) 高值区(综合得分 >4)：共 11 个县域，均位于黄淮海平原和南阳盆地的核心区域，耕地集中连片度超过 85%，地形坡度普遍小于 5°，农业机械化作业条件优越，有效灌溉面积占耕地面积比重普遍超过

75%，化肥施用量和农村用电量均处于全省前列，是河南省小麦、玉米等大宗粮食作物的核心产区。值得特别指出的是，郑州市及周边县域(荥阳市、新郑市、中牟县)并未进入高值区，综合得分集中在 2~3 分区间，主要原因是近年来城镇化进程加速导致优质耕地大幅减少，农业投入的非农化转移趋势明显，农业生产功能逐步让位于城市服务功能。

2) 较高值区($3 < \text{综合得分} \leq 4$): 共 31 个县域，分布在高值区外围，包括驻马店市、许昌市、漯河市及新乡市东部。农业生产条件整体较好，但局部受地形或水资源条件影响存在一定差异。

3) 中值区($2 < \text{综合得分} \leq 3$): 共 36 个县域，主要位于豫中及豫西南地区，包括郑州市、平顶山市、南阳市大部。地形由平原向丘陵过渡，耕地破碎化程度有所提高，农业生产条件中等。

4) 较低值区($1 < \text{综合得分} \leq 2$): 共 26 个县域，分布在豫西山地区丘陵边缘，包括洛阳市北部、焦作市西部及鹤壁市西部。地形起伏较大，耕地零散，灌溉条件较差，农业生产基础相对薄弱。

5) 低值区($\text{综合得分} \leq 1$): 共 8 个县域，集中在三门峡市及洛阳市西南部。这些县域均位于山区或深丘陵地带，耕地破碎化程度极高，地块平均面积小于 0.3 公顷，坡度大于 15° 的耕地占比超过 40%，农业机械化作业难度极大，有效灌溉设施覆盖不足 30%，农业投入产出效率仅为平原县域的 50%左右，是河南省农业生产条件最为薄弱的区域。

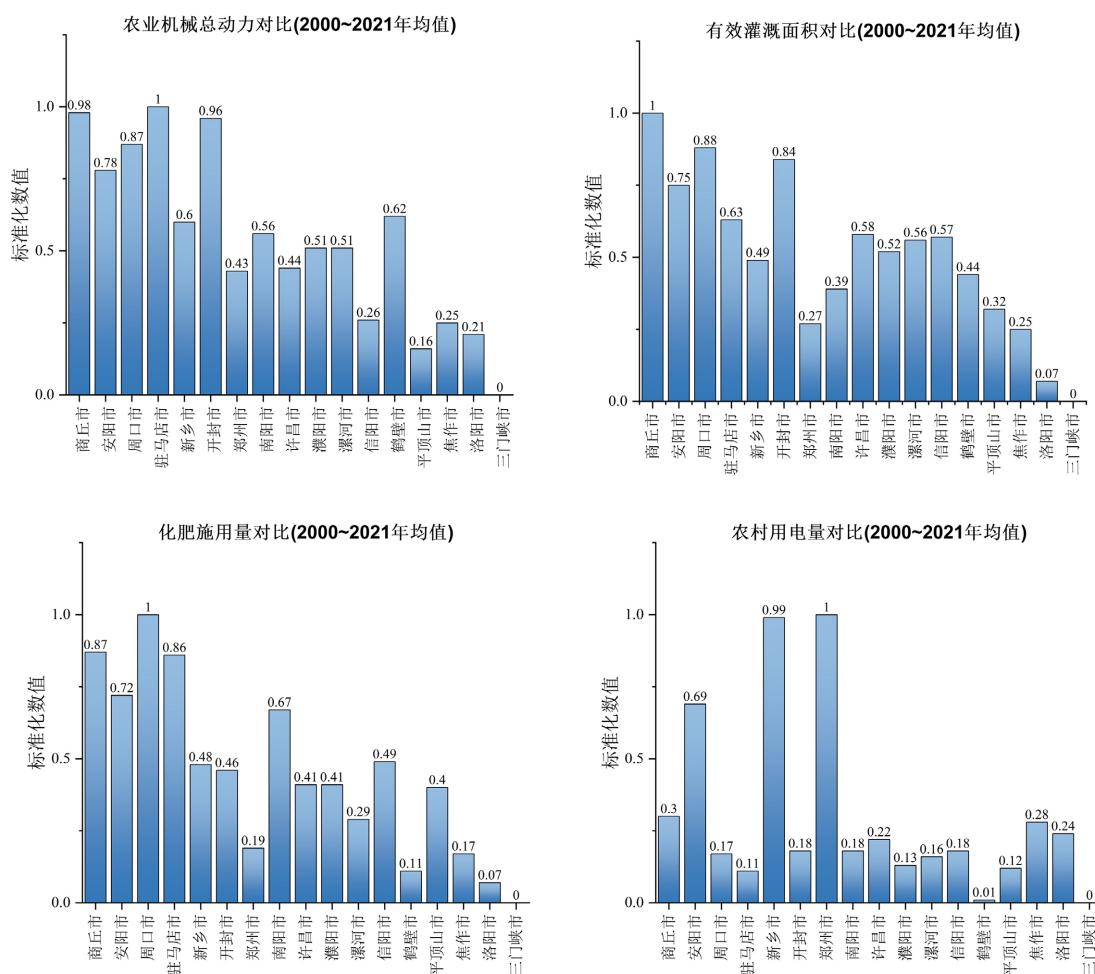


Figure 4. Comparison of agricultural production conditions across prefecture-level cities in Henan Province (average values from 2000 to 2021)

图 4. 河南省各地级市农业生产条件对比(2000~2021 年均值)

从市域尺度来看，河南省农业生产条件整体呈现“东高西低、平原优于山地”的梯度分异格局，与县域尺度分布规律高度一致(图 4)：

- 1) 综合排名：商丘市、安阳市、周口市、驻马店市、新乡市位列前五位，综合指数均在 0.6 以上；三门峡市、洛阳市、焦作市、平顶山市、鹤壁市位列后五位，综合指数均在 0.3 以下。
- 2) 分指标差异：有效灌溉面积的区域差距最为突出，商丘市平均有效灌溉面积是三门峡市的 20 余倍；农业机械总动力和化肥施用量的区域差距次之；农村用电量受区域经济发展水平影响较大，省会郑州市位居全省首位。

总体而言，自然地理格局是造成河南省农业生产条件空间分异的基础性因素，地形起伏度、耕地连片性、水资源禀赋等直接决定了农业基础设施的建设成本与利用效率；区域经济发展水平则通过影响农业投入能力，进一步放大了这种空间差异。

上述空间格局直观呈现了河南省农业生产条件的区域差异，而要素间的耦合关联与驱动效应，是理解这一空间格局形成机制、揭示农业生产系统运行规律的核心切入点。下文进一步通过相关性分析，从多维度揭示县域农业要素间的内在联动特征。

4.4. 农业生产要素关联性分析

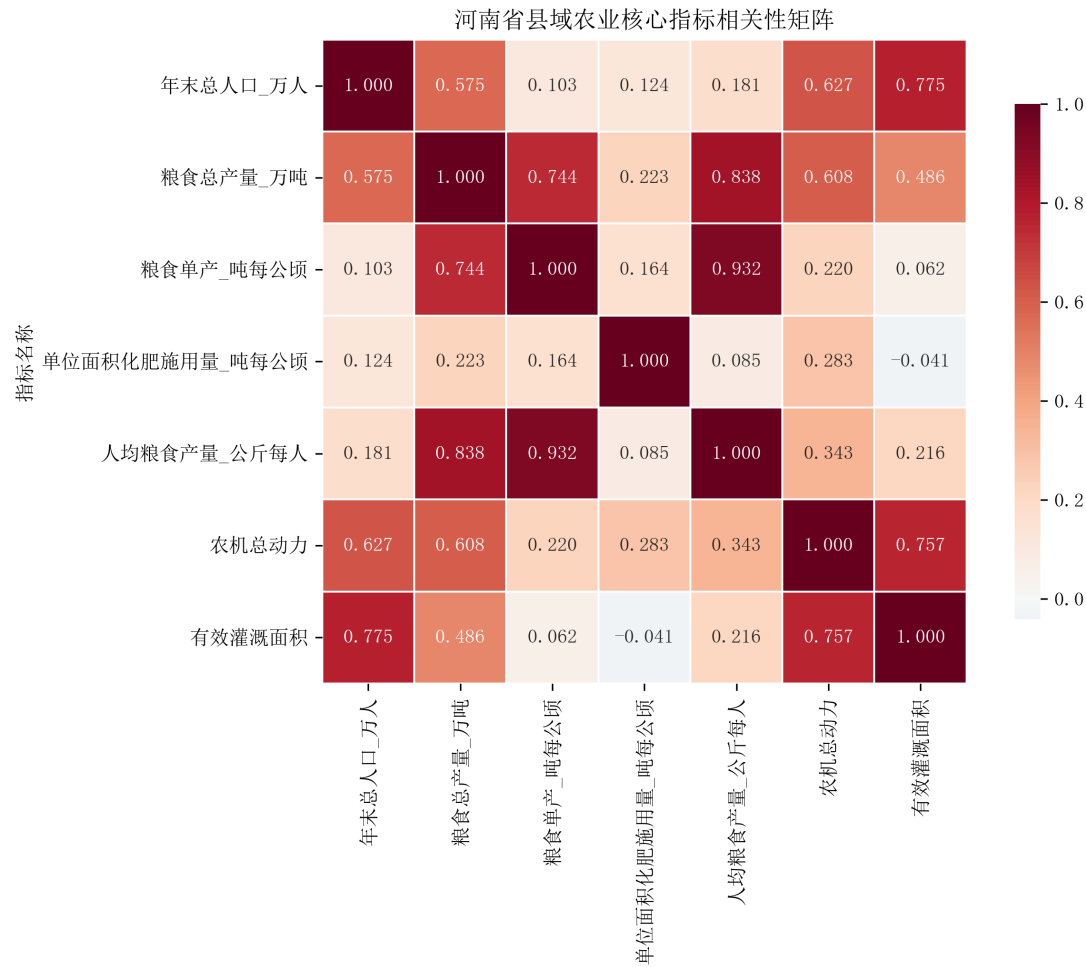


Figure 5. Correlation matrix of core agricultural indicators in counties of Henan Province
图 5. 河南省县域农业核心指标相关性矩阵

为系统揭示河南省县域农业生产要素与人口规模、粮食产出之间的联动机制，本研究选取年末总人口、粮食总产量、粮食单产、单位面积化肥施用量、人均粮食产量、农业机械总动力、有效灌溉面积 7 项核心指标，基于县域面板数据计算皮尔逊相关系数，构建多维度关联性矩阵展开分析，结果如图 5 所示。经显著性检验，农村用电量与其余核心指标在 0.05 水平下无统计学意义，故未纳入核心关联矩阵分析。整体来看，各指标间关联强度差异显著，农业生产要素与粮食产出、人口规模呈现出“基建强协同、化肥弱驱动、人口配规模”的多层次耦合特征。

4.4.1. 农业生产要素内部耦合特征

三项核心农业生产要素中，农田基建类要素呈现高度协同性，而化肥投入要素表现出较强的独立性，要素间并非同步增长的绑定关系：

灌溉与机械化形成强协同演进格局：有效灌溉面积与农业机械总动力的相关系数达 0.757，呈显著强正相关。这一特征与河南省高标准农田建设的实践路径高度契合——灌溉体系完善的区域通常同步开展田块整治与机耕道配套，为大中型农业机械作业创造了基础条件，二者在农田基础设施升级过程中形成了相互支撑、同步提升的协同模式，印证了农田水利建设是农业机械化推广的核心载体。

化肥投入与基建要素呈现脱钩趋势：单位面积化肥施用量与有效灌溉面积的相关系数仅为-0.041，与农业机械总动力的相关系数为 0.283，均处于弱相关水平。这表明县域化肥投入强度并未随灌溉、机械化条件的改善呈现同步增长，一方面反映出河南省化肥减量增效政策已取得阶段性成效，化肥投入逐步脱离与传统基建要素的绑定增长模式；另一方面也说明种植结构、农户耕作习惯等因素对化肥投入强度的影响，已超过基础设施条件的约束作用。

4.4.2. 生产要素对粮食产出的驱动效应

从生产要素与粮食产出的关联结果来看，不同要素的产能驱动效应存在明显分异，基建类要素的支撑作用显著强于化肥要素，粮食增产动力已发生结构性转换：

农田基建类指标与粮食总产量呈显著正相关，对粮食产能的支撑作用更为突出：农业机械总动力、有效灌溉面积与粮食总产量的相关系数分别为 0.608、0.486，均呈显著正相关。这说明县域粮食产出规模的提升高度依赖农业机械化水平与灌溉保障能力，二者构成了河南省粮食综合产能的基础底盘，农田基础设施建设对粮食产能提升的边际效益仍处于较高水平，是稳产保供的核心抓手。

化肥投入的单产驱动效应已进入边际递减阶段：单位面积化肥施用量与粮食单产的相关系数仅为 0.164，与粮食总产量的相关系数也仅为 0.223，均呈极弱正相关。这一结果表明，当前河南省县域粮食单产的提升已逐步摆脱对化肥要素的路径依赖，单纯增加化肥投入对产量的拉动作用十分有限，粮食增产的核心驱动力正由“要素投入型”向“效率提升型”转型，与河南省推进绿色农业、减肥增效的发展方向一致。

单产提升是人均粮食保障的核心来源：粮食单产与人均粮食产量的相关系数高达 0.932，粮食总产量与人均粮食产量的相关系数也达到 0.838，均呈极强正相关。这说明在县域人口规模相对稳定的背景下，通过单产提升带动总产量增长，是提升县域人均粮食占有量、强化粮食安全保障能力的核心路径。

4.4.3. 人口规模与生产体系的联动特征

年末总人口与各项指标的关联结果，反映出人口规模对农业生产布局的基础性调节作用，其影响主要体现在生产规模层面，而非生产效率层面：

人口规模与农田基建高度匹配：年末总人口与有效灌溉面积的相关系数达 0.775，与农业机械总动力的相关系数为 0.627，均呈强正相关。人口规模较大的县域通常耕地资源更为集中，农业生产的规模化需

求更强，灌溉与机械化配套水平也相应更高，形成了“人口规模－耕地资源－基建配套”的正向匹配格局。

人口规模不直接决定生产效率：年末总人口与粮食总产量的相关系数为 0.575，呈中等强度正相关；但与粮食单产的相关系数仅为 0.103，几乎无线性关联。这说明人口大县的粮食产出优势主要来源于耕地规模与基建配套带来的总量效应，而非单产水平的领先，人口规模通过扩张生产规模带动总产出，并不直接提升单位面积生产效率。

4.4.4. 小结

整体而言，河南省县域农业生产体系呈现出鲜明的结构性特征：灌溉与机械化两大基建要素深度协同，构成了粮食产能的核心支撑；化肥投入对增产的驱动作用持续弱化，粮食增长动力已完成阶段性转换；人口规模通过匹配耕地与基建影响产出总量，并不直接决定生产效率。未来河南省粮食产能提升应持续聚焦高标准农田建设与农机装备升级，巩固化肥减量增效成果，以单产水平的稳步突破强化粮食安全长效保障能力。

5. 讨论

5.1. 核心发现与已有研究的对比验证

5.1.1. 时空分异格局的共识与细化

本研究发现河南省县域农业生产条件呈现“东高西低、平原优于山地”的梯度分异与连片集聚格局，这与史焱文等[4]对河南省农业生产效率的空间格局研究结论具有高度一致性，说明农业生产条件与生产效率在空间分布上存在强耦合性，自然地理本底是二者共同的基础约束。但既有研究多将空间差异归因于自然与经济因素的综合作用，本研究通过熵值法的权重拆解进一步明确：有效灌溉面积在四项指标中权重最高，是县域间农业生产条件综合得分差异的最主要贡献指标，对全省空间分异格局的解释力最强，这一结论从指标离散度视角，细化了黄淮海粮食主产区农业生产条件空间分异的关键贡献因子，也与项鑫等[15]关于耕地气候生产潜力的研究形成呼应——灌溉条件是消解降水时空波动、稳定生产潜力的核心变量。

从全国同类区域的研究来看，山东、河北等黄淮海平原省份的县域农业发展也呈现类似的平原—山地梯度差异，但河南省的东西分异梯度更为陡峭，核心原因在于豫西伏牛山区与豫东平原的地形落差更大、水土资源组合的空间错配更显著，这也凸显了国家粮食核心产区内部自然禀赋对农业发展的刚性约束。

5.1.2. 要素耦合关系的异同辨析

在要素关联层面，本研究提出的“基建强协同、化肥弱驱动”特征，与国内既有研究存在共识也呈现出阶段性差异。

一方面，灌溉与机械化的强协同关系在全国高标准农田建设区域普遍存在，王熙栋[16]的研究也从工程层面证实了农田水利与宜机化改造的协同路径，本研究基于县域长时序面板数据量化了二者的相关系数(0.757)，为这一协同规律提供了河南样本的实证支撑。

另一方面，化肥投入与粮食产出的弱相关性结论，与 21 世纪初“化肥是粮食增产核心动力”的经典结论形成明显差异。早期研究多显示化肥施用量与粮食产量呈显著正相关，而本研究基于 2000~2021 年数据发现，当前河南省化肥投入对单产的驱动效应已进入边际递减阶段，这一变化与徐珂怡等[5]发现的高标准农田建设推动耕地绿色利用的趋势相契合，反映了我国农业由“要素驱动”向“效率驱动”转型的阶段性特征。

值得注意的是,本研究证实包含大量非农成分的农村用电量与纯农业生产指标无显著关联,这一结论对以往研究中“直接以农村用电量衡量农业电气化水平”的常用做法提出了方法修正。多数同类研究未对农村用电量的统计口径进行辨析,而本研究通过多指标交叉验证发现,该指标掺杂了乡镇工业、农村生活用电成分,若直接纳入农业生产条件评价会造成结果偏差,这一发现对同类研究的指标选择具有参考价值

5.2. 要素关联特征的内在机理与理论解释

5.2.1. 基建要素强协同：要素互补性与规模效应的双重作用

从诱致性技术创新理论与生产要素互补理论来看,灌溉与机械化的强协同格局具有内在必然性。根据速水佑次郎-拉坦的诱致性技术变迁理论,区域资源禀赋会诱导适配性技术的选择与推广:豫东平原耕地连片、水资源相对充足的禀赋条件,既降低了灌溉工程的建设成本,也为大中型农业机械提供了作业空间,二者在高标准农田建设中形成“田-水-路-机”的配套体系,呈现典型的互补型要素特征——灌溉条件的改善提升了耕地产出预期,刺激了农机投入的增长;而机械化的推广又要求田块规整、灌排配套,反过来推动了灌溉体系的完善。

同时,规模效应进一步强化了这种协同关系。耕地规模越大的县域,农田基建的单位成本越低、投资回报周期越短,地方政府与经营主体的投入意愿越强,最终形成“资源禀赋-基建投入-规模效益”的正向循环,持续拉大平原与山区的生产条件差距。

5.2.2. 化肥驱动弱化：边际递减规律与要素替代的共同结果

化肥投入驱动效应的弱化,可通过边际报酬递减规律与要素替代理论共同解释。根据边际报酬递减规律,在耕地面积、品种技术等条件相对稳定的前提下,化肥投入超过临界点后,单位投入的增产效应会持续下降。河南省作为传统农业大省,化肥施用强度长期处于较高水平,2015年前后已接近投入产出的临界点,继续增施化肥的增产空间十分有限。

与此同时,农田基建升级与品种技术进步形成了对化肥的要素替代:有效灌溉面积的稳定保障了作物水分供给,减少了因干旱导致的化肥养分浪费;良种与绿色栽培技术的推广提升了作物养分利用效率,二者共同替代了部分化肥的增产作用。叠加化肥零增长、减肥增效等政策的引导,化肥投入与粮食增产逐步脱钩,成为农业绿色转型的典型标志。

5.2.3. 人口-规模匹配：粮食主产区的生产逻辑验证

本研究发现人口规模主要通过生产规模路径影响产出总量,与单产效率无显著关联,这符合大宗粮食主产区的农业生产逻辑。对于河南这样的粮油主产区,农业生产以规模化的大田种植为主,劳动密集度较低,人口规模并不直接对应劳动投入强度;人口大县往往对应更大的耕地面积与粮食播种面积,生产规模的扩张直接带动总产量提升,而单产水平更多由基建、品种、技术等因素决定。

这一结论也修正了“人口密度越高、农业集约化水平越高”的泛化认知——该规律更多适用于高附加值园艺农业或人多地少的丘陵山区,而在平原粮食主产区,人口规模的核心作用是匹配耕地规模、支撑生产体系,而非提升单位面积的集约化程度。

5.3. 研究的理论贡献与实践启示

本研究的理论贡献主要体现在两方面:一是在县域尺度细化了粮食主产区农业生产条件的时空分异机制,明确了有效灌溉面积的核心驱动作用,补充了黄淮海平原农业地理研究的微观实证证据;二是揭示了农业转型期生产要素耦合关系的结构性变化,验证了“基建要素互补、化肥要素替代”的演变规律,

为粮食主产区要素耦合研究补充了县域尺度的长时序实证证据。

实践层面,本研究结论为河南省乃至全国同类粮食主产区提供了两点明确启示:其一,农业基建投入应遵循协同规律,避免单一要素孤立投入,以高标准农田为载体统筹灌排、机耕、电力等配套建设,最大化协同增益;其二,粮食增产路径应彻底摆脱对化肥等传统农资的路径依赖,转向基建升级与技术进步驱动,这是保障粮食安全与实现农业绿色发展的双重要求;其三,应遵循区域分异规律实施差异化施策:东部平原产区侧重灌排体系提质与农机装备升级,挖掘协同增益;西部山地丘陵区侧重补齐灌溉设施短板,优先提升基础生产保障能力。

5.4. 研究局限性与展望

本研究仍存在一定不足:其一,指标体系有待完善,仅选取了四项核心指标构建农业生产条件综合评价体系,未纳入耕地质量、农业科技水平、防灾减灾能力等维度,未来可进一步丰富指标体系,开展多维度综合评价;其二,受统计口径调整影响,2009~2021年县域尺度有效灌溉面积公开数据连续性不足,虽采用中位数插值法处理,仍可能对局部年份的分析结果产生小幅影响,后续可通过水利部门专项数据补充完善,农村用电量含一定非农成分,可能对综合评价结果产生小幅干扰,后续可采用纯农业生产用电数据进一步优化;其三,本文侧重时空特征描述与线性相关性分析,仅能揭示指标间的线性关联,无法识别非线性耦合关系与空间溢出效应,也未构建计量模型定量识别各驱动因子的贡献度与因果方向,对驱动机制的揭示有待深化。

未来可结合地理探测器等方法,识别不同地形分区下农业生产条件的驱动因子异质性,同时引入空间计量模型探究要素溢出效应,为差异化的农业政策制定提供更精准的支撑。

参考文献

- [1] 赵晓宇,孙春强,崔荣国,等.基于粮食安全的中国耕地保护阈值研究[J].资源科学,2024,46(12):2355-2366.
- [2] 河南省人民政府办公厅关于加强高标准农田建设打造全国重要粮食生产核心区的实施意见:豫政办〔2020〕14号[EB/OL].2020-05-12.<https://www.henan.gov.cn/2020/05-12/1453639.html>,2026-06-12.
- [3] 李振玲.中原经济区SWOT分析及发展战略研究[J].现代交际,2014(2):159.
- [4] 史焱文,王巧红,李二玲,孙宇航.粮食主产区农业生产效率时空演变及影响因素研究——以河南省为例[J/OL].农业现代化研究:1-15.<https://link.cnki.net/doi/10.13872/j.1000-0275.2025.0128>,2026-07-17.
- [5] 徐珂怡,易小燕,吴银毫,张泽蔚.高标准农田建设对耕地绿色利用的影响研究[J].农业现代化研究,2024,45(4):600-610.
- [6] 河南省人民政府关于印发河南林业生态省建设规划的通知:豫政〔2007〕81号[EB/OL].2007-12-19.<https://www.henan.gov.cn/2007/12-19/237314.html>,2026-06-12.
- [7] 河南省统计局.河南统计年鉴2025[M].北京:中国统计出版社,2025.
- [8] 2021年河南省国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].2022-03-10.<https://tjj.henan.gov.cn/2022/03-10/2412169.html>,2026-06-12.
- [9] 沈光辉,叶彤,孙小坚,等.贝叶斯修正的AHP——熵值法在教育测评中的应用[J].心理学探新,2023,43(3):269-277.
- [10] 贾艳红,赵军,南忠仁,等.基于熵权法的草原生态安全评价[J].生态学杂志,2006,25(8):1003-1008.
- [11] 康馨,姜哲.区域承载力定量研究——以武汉为例[J].科技风,2012(14):197,199.
- [12] 洪业应,安和平.基于粮食安全与化肥投入的协调发展研究——以毕节地区为例[J].农业现代化研究,2011,32(5):577-580.
- [13] 雷龙涛,沈威,刘敏,等.河南省县域农业生产效率时空演变分析——基于粮食生产视角[J].江苏农业科学,2017,45(13):253-259.
- [14] 罗莎莎,王旭东,赖庆标,等.东南丘陵山区市域农业生产适宜性分析及空间优化调控——以福建省三明市为

- 例[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 932-942
- [15] 项鑫, 马泉来, 孙晓兵, 杨延伟, 路中, 周浩. 气候变化背景下河南省耕地气候生产潜力时空演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2026, 33(3): 321-328.
- [16] 王熙栋. 农田水利灌溉系统与高标准农田“宜机化”改造的协同路径[J]. 工程管理与技术, 2025, 7(8): 165-170.