doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.062

基于 GEE 的山东省近 15 年农业温室年限识别与优化布局

周奇卓[1]　季　托[2]　许　鹏[3]　陈修宇[4]　陈红艳[1,5]　曹　茜[6]　崔本江[6]

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 泰安 271018;
3. 山东省国土空间规划院, 济南 250014; 4. 山东顺直建设工程有限公司, 巨野 274999;
5. 山东农业大学土肥高效利用国家工程研究中心, 泰安 271018;
6. 泰安市金土地测绘整理有限公司, 泰安 271021)

摘要: 当前农业温室发展中存在设施使用年限过长、设备老化、分布及数量不明,以及部分新建温室选址不合理等问题,导致资源利用效率低下,难以形成高效集约化生产区域。为解决上述问题,本研究基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)平台,利用 Landsat 5 TM 和 Sentinel-2 MSI 影像,采用随机森林、支持向量机和最大似然分类算法,提取山东省近 15 年农业温室的空间分布,并对其使用年限进行分析。进而结合自然和社会经济因素,从高程、河流、土壤有机质、道路和人口 5 个方面进行驱动力分析,摸清主导因素;最后对农业温室发展潜力进行定量评价,并提出优化布局方案。结果表明:整体上随机森林算法的分类精度最高,总体精度始终保持在 83.45% ~92.83%,卡帕系数在 0.753 1 ~0.884 6,表现出更强的鲁棒性和适应性。山东省农业温室面积由 2008 年的100 440 hm^2增长至 2023 年的 473 306.67 hm^2,增幅约 471%。使用 10 年以上的老旧大棚面积为 70 606.67 hm^2,15 年以上的农业温室为 29 493.33 hm^2;农业温室发展受政策、现代化路网及土壤有机质的影响较大;基于潜力评价确定了鲁中(以寿光市和张店区为中心)、鲁东(以平度市和莱西市为中心)和鲁南(以兰陵县和薛城区为中心)3 个农业温室发展潜力区。全省可按核心发展区、建议发展区、改造转移区和一般发展区优化布局,核心发展区以寿光为中心,重点扩建现代化温室;建议发展区集中在鲁中、鲁东、鲁南部分地区,如平度、兰陵等地,通过适度新建温室形成核心发展地区;改造转移区位于潍坊、聊城等老旧温室密集区,需升级改造或逐步转移;一般发展区分布广泛,以生态保护和特色农业为主。研究结果可为农业温室优化布局提供数据和决策支撑,助力乡村振兴。

关键词: 农业温室; 信息提取; 时空演变; 潜力评价; 优化布局; GEE

中图分类号: S127　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0660-13　　**OSID**:

Identification of New and Old Agricultural Greenhouses and Optimization of Layout in Shandong Province

ZHOU Qizhuo[1]　JI Tuo[2]　XU Peng[3]　CHEN Xiuyu[4]　CHEN Hongyan[1,5]　CAO Qian[6]　CUI Benjiang[6]

(1. *College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
2. *College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
3. *Shandong Provincial Institute of Land and Spatial Planning, Ji' nan* 250014, *China*
4. *Shandong Shunzhi Construction Engineering Co., Ltd., Juye* 274999, *China*
5. *National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
6. *Tai'an Jintudi Surveying and Mapping Co., Ltd., Tai'an* 271021, *China*)

Abstract: Current agricultural greenhouse development still faces issues such as excessively long facility service life, aging equipment, unclear distribution and quantity, and irrational siting of some newly built greenhouses, resulting in low resource utilization efficiency and difficulty in forming highly efficient intensive production areas. To address these problems, the Google Earth Engine (GEE) platform with

收稿日期: 2024-12-28　修回日期: 2025-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42477523)、国家重点研发计划项目(2023YFD2303304)、山东省自然科学基金项目(ZR2023MD033)和山东省蔬菜产业技术体系建设专项(SDAIT-05-10)

作者简介: 周奇卓(2001—),男,硕士生,主要从事土壤定量遥感研究,E-mail: zhou7zhuo@163.com

通信作者: 陈红艳(1979—),女,教授,博士,主要从事农业遥感与信息、土地资源利用研究,E-mail: chenhy@sdau.edu.cn

Landsat 5 TM and Sentinel－2 MSI imagery were utilized, employing random forest, support vector machine, and maximum likelihood classification algorithms to extract the spatial distribution of agricultural greenhouses in Shandong Province over the past 15 years and analyze their age. Furthermore, driving force analysis was conducted considering natural and socioeconomic factors—elevation, rivers, soil organic matter, roads, and population—to identify dominant influences. Finally, the development potential of agricultural greenhouses was quantitatively evaluated, and an optimized layout scheme was proposed. Results showed that the random forest algorithm achieved the highest classification accuracy, with overall accuracy consistently ranging from 83.45% to 92.83% and Kappa coefficients between 0.753 1 and 0.884 6, demonstrating stronger robustness and adaptability. The area of agricultural greenhouses in Shandong Province was increased from 100 440 hm^2 in 2008 to 473 306.67 hm^2 in 2023, a growth of approximately 471%. Old greenhouses used for over 10 years covered 70 606.67 hm^2, while those over 15 years accounted for 29 493.33 hm^2. Greenhouse development was significantly influenced by policies, modern road networks, and soil organic matter. Potential evaluation identified three key development zones: central Shandong (centered on Shouguang City and Zhangdian District), eastern Shandong (focused on Pingdu City and Laixi City), and southern Shandong (anchored by Lanling County and Xuecheng District). The province can be optimized into core development zones (e.g., Shouguang in Weifang for modern greenhouse expansion), recommended development zones (e.g., Pingdu and Lanling for moderate new construction to form growth poles), retrofit/relocation zones (e.g., Weifang and Liaocheng for upgrading or phased relocation of aging greenhouses), and general development zones (for ecological protection and specialty agriculture). The findings can provide data and decision-making support for optimizing agricultural greenhouse layouts, facilitating rural revitalization.

Key words: agricultural greenhouse; information extraction; spatiotemporal evolution; potential evaluation; optimization of layout; GEE

0　引言

在乡村振兴战略背景下，推动农业现代化与可持续发展已成为国家发展战略的核心内容之一[1]。设施农业作为农业现代化的重要实践形式，通过运用工业化生产技术，为作物生长创造适宜的环境条件，从而实现高品质、高产量的目标[2]。在我国，设施农业形式多样，其中以农业温室最为普及。尤其在蔬菜种植领域，农业温室的面积已超过设施农业总面积的 80%[3]。截至 2022 年，我国蔬菜大棚占地面积达 2.31×10^6 hm^2，播种面积 4.16×10^6 hm^2。山东省作为我国重要的蔬菜生产基地，其农业温室的建设与发展具备较为完善的体系，然而，也普遍存在使用年限过长、设备老化、数量及分布不清等问题，亟需改造升级[4]，而识别温室的空间分布、新旧程度并进行其驱动力分析是对其有效改造升级的前提。此外，新建温室在选址方面也存在一定的不合理性，限制了农业生产效率和资源利用效率，因此也需开展快速识别与优化。

近年来，利用遥感技术对农业温室进行分布提取已成为研究热点[5]。早期研究[6-8]多基于单一时点的遥感数据，结合光谱特征与几何形态特征提取农业温室分布。这些研究着眼于某一时点的农业温室分布情况及数量评估，虽然取得了较高的提取精度，但其侧重点更多集中于静态分布信息的获取，未能涉及动态变化过程。因此，逐渐有学者基于多个时点影像研究提取农业温室，进而分析其时空动态变化[9-11]。这些研究揭示了农业温室的空间分布与时空演变规律，但对于农业温室使用年限及新旧程度的分析仍显不足。

关于农业温室发展的驱动机制研究也取得了一定进展[12-13]。然而，这些研究多集中于驱动因素的定性或定量分析，对农业温室布局的适宜性和合理性关注不足，难以为温室改造与优化布局提供精准的数据支撑。

山东省作为我国农业温室发展的先行地区，面临诸多亟需解决的问题。自 20 世纪 80 年代末开始发展农业温室，90 年代进入快速发展期。然而，由于早期发展过快，目前部分地区出现老旧温室集中连片现象，部分日光温室使用年限甚至超过 25 年[14]。与此同时，部分新建温室因选址不合理，难以形成集约化生产区域，难以满足当前宜机化生产的需求[15]。因此，准确识别山东省农业温室的使用年限，并结合其分布与布局特点，挖掘影响温室发展的关键驱动力，提出优化布局方案，不仅对农业温室的提质增效具有重要意义，也为山东省农业高质量发展和乡村振兴提供科学依据。

鉴于此，本文基于 GEE 平台，利用多时点的

Landsat 5 TM 和 Sentinel－2 MSI 卫星影像，提取山东省 2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年的农业温室分布，分析其时空分布特征及使用年限。同时，结合自然与社会经济因素，探讨影响温室分布的主要驱动力，并对其发展潜力进行定量评价，进而提出优化布局方案。以期为山东省农业温室的合理布局与老旧温室的改造提供科学数据支撑，助力乡村振兴战略的深入实施。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海，地理坐标为北纬 34°22.9′～38°24.0′，东经 114°47.5′～122°42.3′。地势东高西低，以平原和丘陵为主，气候温和湿润，年平均气温 11～14℃，降水量 550～950 mm，适宜农作物生长。

作为重要的农业基地，山东省以粮食作物、经济作物和蔬菜种植为主，特别是蔬菜种植。设施农业发展迅速，温室广泛应用，已成为提高农业生产效率和产品质量的重要手段。山东的农业温室建设起步早，产业体系完善，设施温室的面积和数量在全国占有重要地位。

1.2 数据获取

本文的数据主要来源于谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）平台，利用其提供的 Landsat 5 TM 和 Sentinel－2 MSI 卫星影像数据进行研究分析。GEE 是谷歌推出的一种云计算分析平台，整合了全球范围内的多源地球观测数据，支持用户在云端进行大规模的地理空间数据处理和分析。平台的数据来源涵盖多颗卫星、气象站点和地面观测网络，为研究人员和开发者提供了强大的数据处理和分析能力。

Landsat 5 是美国国家航空航天局（NASA）和美国地质调查局（USGS）合作的一颗卫星，发射于 1984 年，搭载的传感器能够提供高分辨率的多光谱影像数据，涵盖可见光和红外波段，其重访周期约为 16 d，空间分辨率为 30 m。Sentinel－2 是欧洲空间局（ESA）推出的卫星系列，搭载多光谱成像仪，能够获取高分辨率（10～60 m）的多光谱影像数据，包括可见光、红外和近红外波段。Sentinel－2 系列卫星具有较高的重访周期（5 d），能够提供更频繁的地球观测数据。

本研究所使用的其他数据来源包括人口密度数据、河流数据和道路数据等（表 1）。人口密度数据来自欧盟 GHS 人口网格，该数据从 2015 年开始提供全球高分辨率的空间化人口分布信息。河流和道路数据来自 OpenStreetMap，这是一个开放的在线地图项目，提供全球地理信息。高程数据来自美国地质调查局（USGS），涵盖全球的地形特征数据。土壤有机质数据通过 ISRIC 的 SoilGrids 土壤数据集获取，提供全球土壤特性的高分辨率空间分布。

表 1 数据来源及其网址

Tab. 1 Data sources and their websites

数据	数据来源	网址
Landsat 5 TM（2008，2013）	United States Geological Survey（USGS）	https://www.usgs.gov
Sentinel－2 MSI（2018，2023）	European Space Agency（ESA）	https://www.esa.int
人口密度数据	GHS Population Grid	http://data.europa.eu
河流数据	OpenStreetMap	https://www.openstreetmap.org
道路数据	OpenStreetMap	https://www.openstreetmap.org
高程数据	United States Geological Survey（USGS）	https://www.usgs.gov
土壤有机质	SoilGrids	https://www.isric.org/

2 研究方法

研究技术路线如图 1 所示，主要包括数据获取与预处理、农业温室信息提取、新旧程度识别、驱动力分析及优化布局方案制定 5 个主要步骤。首先，基于 GEE 平台获取 Landsat 5 TM 和 Sentinel－2 MSI 影像数据，进行辐射校正、大气校正等预处理，并计算光谱与纹理特征。其次，采用随机森林（RF）和支持向量机（SVM）等分类算法，提取农业温室的空间分布信息，并结合多时点数据叠加分析其新旧程度及时间动态变化特征。随后，结合高程、路网密度、土壤有机质等驱动力因子，利用相关性分析明确农业温室分布的主导驱动力。最后，基于驱动力分析结果开展潜力评价，结合新旧温室的分布特征，提出

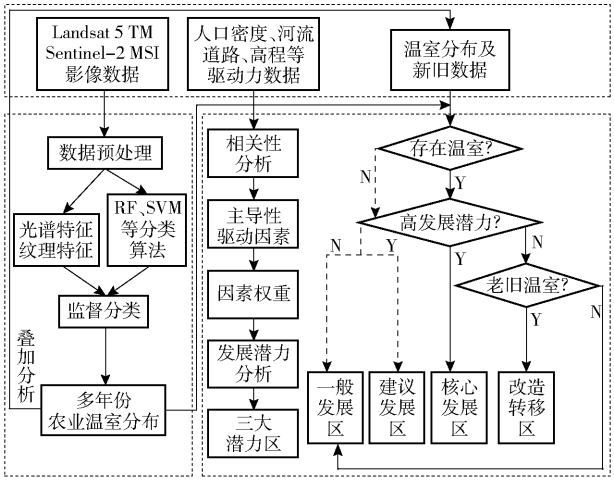


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

山东省农业温室的优化布局方案，包括核心发展区、建议发展区、改造转移区和一般发展区，为科学规划与可持续发展提供依据。

2.1　农业温室提取

2.1.1　影像预处理

在图像预处理阶段，选择 2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年 12 月至 2024 年 1 月成像时间接近且云量较少的影像，因为冬季期间农业温室内部植被的光谱特征较为鲜明，冬季时农业温室内植被保持高绿度，与周围休眠或凋零的植被形成明显对比，有助于在卫星影像上准确识别农业温室区域[16]。依次进行辐射定标、大气校正等预处理步骤，随后进行影像镶嵌，并利用山东省的矢量边界进行裁剪，以获取山东省范围内的影像数据。

2.1.2　特征计算

为提高分类精度，基于处理后的影像数据，计算其光谱特征和纹理特征，以全面表征农业温室的光谱及空间分布特性。

光谱特征是农业温室识别的重要依据，主要包括植被指数和水体指数的计算，具体有：归一化植被指数（NDVI）[17]、土壤调节植被指数（SAVI）[18]和归一化水体指数（NDWI）[19]。

通过计算 NDVI、SAVI 和 NDWI 等光谱特征，可以在多维特征空间中增强农业温室区域与其他地物之间的光谱差异性。其中，NDVI 与 SAVI 结合使用能够更全面地识别植被区域，并在土壤背景复杂的情况下提高分类精度；NDWI 用于剔除水体干扰。在此基础上，利用这些光谱指数对明显的非目标地物（建筑和水体等）进行初步剔除。最终，这些光谱特征将被用于后续的分类算法，形成高维光谱特征集，有效提高农业温室的分类精度与可靠性。

纹理特征是从影像的灰度空间中提取的统计特性，能够有效表征地物的细节信息和空间分布特性，是区分农业温室与其他地物的重要补充特征[20]。通过基于灰度共生矩阵（GLCM）的计算，可以提取影像的多种纹理特征，这些特征能够增强分类模型对细节差异的敏感性，从而提升分类精度[21]。以下是本文采用的纹理特征，主要有：均值（Mean）、对比度（Contrast）、熵（Entropy）和相关性（Correlation）。

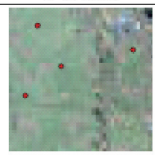
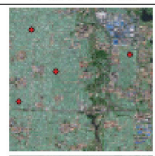
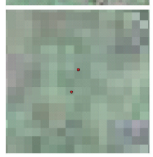
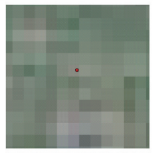
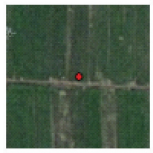
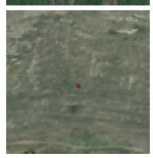
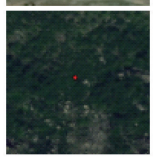
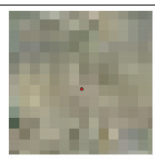
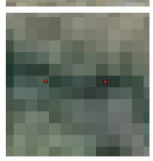
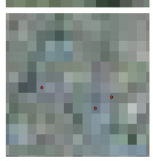
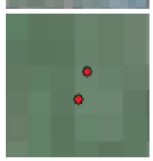
在实际计算中，本文采用 3 ×3 移动窗口对上述 4 种纹理特征进行计算。这种窗口设置能够平衡计算效率和精度，同时捕捉农业温室区域的局部纹理特征[22]。通过结合光谱特征与纹理特征，可以从光谱空间和灰度空间中全面表征农业温室的特性，为后续分类模型提供高精度的输入变量。

2.1.3　监督分类

针对处理后的影像数据，进行监督分类实现不同地物类型的分类，建立如表 2 所示的 3 种分类类别：农业温室、植被和其他类别（主要包括掩膜未完全去除或与农业温室光谱特征类似的地物）。

表 2　训练样本选择

Tab. 2　Selection of training samples

一级类	二级类	影像样点	谷歌地球样点
农业温室	农业温室（亮）		
	农业温室（暗）		
植被	作物		
	草地		
	林地		
其他	裸地		
	阴影		
	彩钢瓦屋		
	道路		

各个年份的影像数据中，确保每个类别包含至少 500 个样本点位（图 2），且样本点位空间分布均匀，其中 70% 用于训练，30% 用于验证，以确保分类模型的训练和评估具有代表性和准确性。在分类方法上，选取了 3 种成熟的分类算法进行监督分类，包

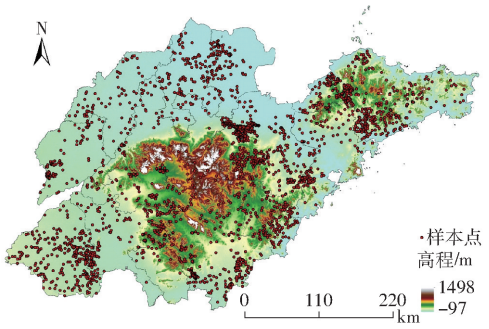


图 2 样本点分布图

Fig. 2 Distribution of sample points

括支持向量机(SVM)、随机森林(RF)和最大似然分类(MLC)。这些方法在遥感影像分类领域具有广泛的应用和成熟的算法体系,能够有效应对复杂的地物覆盖特征,确保农业温室分布的精确提取和识别[23]。

本文中各分类方法的具体参数设置如下:RF 设置的决策树数量为 200,节点最小样本数为 2,最大特征数使用影像波段的平方根,具备较强的鲁棒性和适应性;SVM 使用径向基核函数(RBF),正则化参数 C 设置为 1.0,核参数 gamma 通过交叉验证优化为 0.1,并采用“一对一”策略处理多类别分类问题;MLC 默认假设各类别服从正态分布,按影像各波段计算后验概率,并选择最大概率的类别作为结果。

2.1.4 精度验证

为评估分类模型性能,使用卡帕系数(Kappa coefficient,K)和总体精度(Overall accuracy,OA)作为评价指标。

2.2 农业温室年限识别

根据《农业温室结构荷载规范》(GB/T 51183—2016)和《设施农业小气候观测规范日光温室和塑料大棚》(GB/T 38757—2020)等标准,将农业温室的使用年限分为 4 类:建造时间小于 5 年、5 ~ 10 年、10 ~ 15 年和超过 15 年。不同时间段的温室在材料老化、性能衰减和维护需求上存在差异。小于 5 年的温室采用新技术和材料,性能优良,维护成本低。5 ~ 10 年的温室性能较好,但局部材料可能老化,需要日常维护。10 ~ 15 年的温室逐渐老化,可能影响光照和保温效果,需要全面维修或翻新。超过 15 年的温室由于老化严重,通常需要大规模翻新或拆除重建。本文使用 ArcGIS 10.2 软件分析不同年份温室的分布数据及其老旧程度。

2.3 驱动力分析

以 2023 年农业温室分布数据为例,构建网格化空间框架。根据前人研究[10],为确保格网空间分布可视化效果最佳,将研究区域划分为 2 km × 2 km 的网格单元,并计算每个网格单元内农业温室面积的占比,并将结果划分为 9 个等级,分别表示占比范围:0 ~ 1%、1% ~ 5%、5% ~ 10%、10% ~ 20%、20% ~ 30%、30% ~ 40%、40% ~ 50%、50% ~ 60%、60% 以上,作为衡量农业温室密度的定量指标。同时,统计每个网格单元内的相关驱动力因素,包括平均人口、平均高程、河网密度、路网密度(高速公路和非高速公路)以及土壤有机质含量。

随后,利用 SPSS 软件对农业温室密度与驱动力因素进行 Pearson 相关性分析。通过分析相关系数结果,揭示农业温室密度与人口、地形、交通网络及土壤等因素之间的关系,并进一步探讨各因素间的自相关性,从而确定农业温室的主导性因素。

2.4 农业温室优化布局

2.4.1 发展潜力评价

基于各驱动力因素与农业温室发展的相关性分析结果,对山东省农业温室的发展潜力进行了综合评价。选取与温室分布显著相关的驱动力因素,采用加权定量分析方法,对各区域农业温室的发展潜力进行量化评估。聚焦于潜力评价,未对用地类型等具体因素(如耕地占用情况)进行细化考虑。

为直观展示潜力评价结果,采用自然断点法将评估分值划分为 5 个等级,等级从高到低依次为 1 至 5 级,表示不同的建设潜力。其中,1 级表示最高发展潜力,适宜大规模农业温室的集约化发展;5 级表示发展潜力最低区域,适合保持现状或仅在特殊条件下进行有限的农业发展。

2.4.2 优化布局分析

基于对农业温室使用年限和发展潜力的综合评价,提出了优化布局方案。为便于分析,将温室年限归类为 2 类:新建温室(小于 10 年)和老旧温室(大于 10 年);同时,将发展潜力划分为高发展潜力区(1 ~ 2 级)和一般发展潜力区(3 ~ 5 级)。通过叠加分析温室年限与发展潜力区的空间分布,进一步划定了不同类型区域,为农业温室的合理布局提供了科学指引。

在高发展潜力区中,小于 10 年的新建温室区域被划为核心发展区,适合继续扩建,以形成高效集中的生产区域;大于 10 年的老旧温室区域同样作为核心发展区,建议进行设施升级改造,以提升生产效率和资源利用率;当前无温室的区域被划为建议发展区,适宜通过新建温室来提高该区域的农业生产能力。在一般发展潜力区中,新建温室区域划为一般发展区,可在现有基础上稳步发展,以满足区域内的基本农业需求;老旧温室区域则划为改造转移区,建议逐步减少或转移老旧温室,以便更合理地分配资

源。对于当前无温室的区域，同样划为一般发展区，由于不具备较高的发展适宜性，一般情况下不建议新增温室，除非在特殊需求明确、发展条件具备的情况下，才可适度考虑新建，以确保资源利用的合理性与可持续性。

3　结果与分析

3.1　各年份农业温室数量及分布

随机森林(RF)、支持向量机(SVM)和最大似然分类(MLC)3 种机器学习方法各年份农业温室提取精度见表 3。结果显示，这 3 种方法总体精度都在 80% 以上，均能够满足农业温室实际识别需求，但在分类精度上存在差异。其中，RF 总体精度相较于 SVM 提升 1.01 ~ 8.67 个百分点，相较于 MLC 提升 2.25 ~ 11.20 个百分点。这表明 RF 在处理大规模高维度数据时具有显著优势，具有更高的鲁棒性和精度，更适合应用于农业温室分布的高精度提取和大范围区域分析。

表 3　3 种分类方法精度对比

Tab. 3　Accuracy comparison of three kinds of classification methods

年份	RF		SVM		MLC	
	卡帕系数	总体精度/%	卡帕系数	总体精度/%	卡帕系数	总体精度/%
2023	0.872 2	92.67	0.843 1	91.74	0.813 7	90.45
2018	0.884 6	92.83	0.846 3	91.82	0.815 5	90.58
2013	0.753 1	83.45	0.764 4	84.16	0.743 7	83.26
2008	0.765 4	84.37	0.754 1	84.19	0.725 1	81.63

从时间维度来看，2018 年分类结果最优，卡帕系数达到 0.884 6；而 2013 年分类结果相对较差，卡帕系数仅为 0.764 4。整体而言，2023 年和 2018 年分类精度明显高于 2008 年和 2013 年。这一差异主要归因于影像分辨率不同。2018 年和 2023 年采用的 Sentinel－2 影像具有 10 m 的空间分辨率，能够更清晰地捕捉地物细节特征，从而显著提高分类的准确性。而 2008 年和 2013 年使用的 Landsat 5 TM 影像分辨率仅为 30 m，较低的空间分辨率限制了地物特征的辨识度，影响了分类精度的提升。

基于随机森林分类的提取结果(图 3)，2008 年山东省农业温室主要集中分布于寿光市和莘县。随着设施农业的推广，2013 年农业温室在原有基础上向周边区域扩散，同时在枣庄、临沂、泰安、菏泽、济宁、济南等地部分区域逐步形成了集中种植区。至 2018 年，农业温室继续从原有种植区域向周边扩展，同时全省大部分市区开始零星分布农业温室，尤

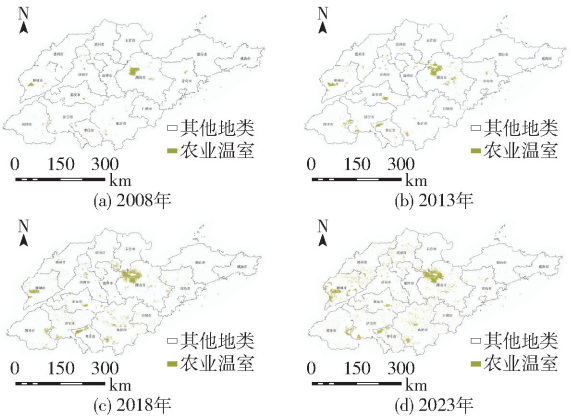


图 3　各年份农业温室提取结果

Fig. 3　Extraction results of agricultural greenhouse in each year

以济宁、潍坊、临沂 3 个市区的扩展最为明显。至 2023 年，全省农业温室呈现以潍坊和聊城为核心的超大规模种植区，以及临沂、枣庄、济南、泰安、菏泽为代表的大规模种植区的空间分布格局。这一分布特征反映了设施农业在山东省逐步扩展和集聚的发展趋势。

由图 4 可见，山东省农业温室面积在过去 15 年间呈现显著的增长趋势。2008 年，全省农业温室面积仅为 100 440 hm^2。在随后的 5 年间，农业温室面积增长约 92 580 hm^2，至 2013 年达到 193 020 hm^2，年均增长 18 513 hm^2。2013—2018 年是农业温室发展的快速增长期，面积增加约 165 520 hm^2，年均增长 33 107 hm^2，至 2018 年，农业温室面积达到 358 540 hm^2。2018—2023 年，农业温室面积继续稳步增长，增加 114 767 hm^2，年均增长 22 953 hm^2，2023 年全省农业温室面积达 473 307 hm^2。这表明，山东省农业温室建设在政策推动和技术发展的支持下，经历了快速扩展和规模化发展的阶段，为设施农业的高质量发展奠定了坚实基础。

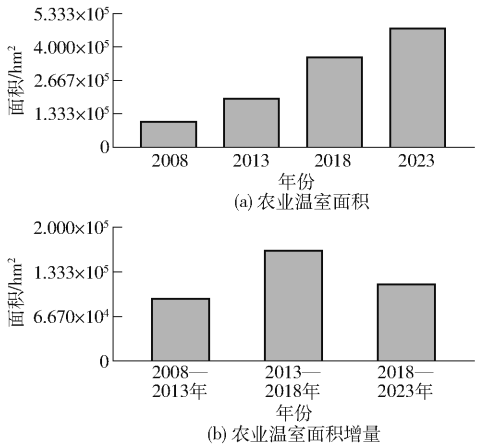
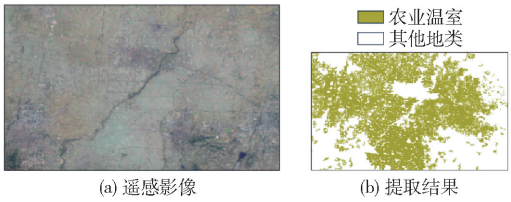


图 4　各年份山东省农业温室面积及增量

Fig. 4　Area and increment of agricultural greenhouse in Shandong Province by year

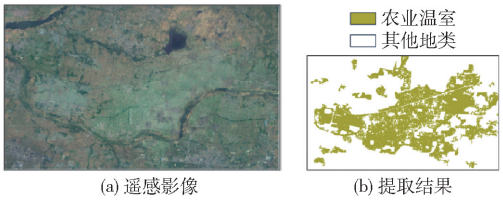
利用2023年结果作为验证,选择市域和县区2个尺度的典型农业温室区(寿光市和泰安市,莘县和兰陵县)进行对比,将其分类结果细节对比遥感影像(图5~8),可以看出,本文所得到的提取结果与实际分布情况具有较好的一致性,证明分类效果良好。



(a) 遥感影像 (b) 提取结果

图5 寿光市分类结果对比

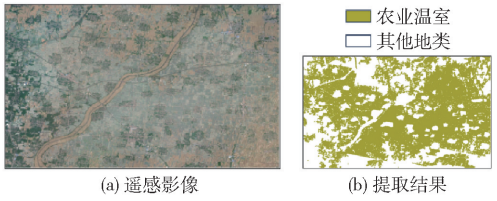
Fig. 5 Comparison of classification results in Shouguang City



(a) 遥感影像 (b) 提取结果

图6 泰安市分类结果对比

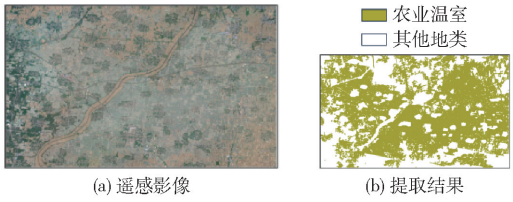
Fig. 6 Comparison of classification results in Tai'an City



(a) 遥感影像 (b) 提取结果

图7 莘县分类结果对比

Fig. 7 Comparison of classification results in Shenxian County



(a) 遥感影像 (b) 提取结果

图8 兰陵县分类结果对比

Fig. 8 Comparison of classification results in Lanling County

由表4可知,从2008年到2023年,山东省各市农业温室面积显著增长。潍坊市作为设施农业的领头羊,其农业温室面积从2008年的48 880 hm^2 增长至2023年的130 520 hm^2,充分体现了其在设施农业领域的强劲发展势头。其他城市如聊城、临沂等,也表现出稳定的增长趋势,农业温室面积逐年扩张。总体而言,山东省农业温室面积从2008年的100 440 hm^2 增长至2023年的473 307 hm^2,增幅接近4倍,呈现出快速发展的态势。

由表5可见,在县区尺度上,部分县区的农业温室发展尤为迅猛。例如,寿光市农业温室面积从2008年的19 253 hm^2 增长至2023年的54 060 hm^2,

表4 山东省市域各年份农业温室面积

Tab. 4 Area of agricultural greenhouses of city areas in Shandong Province hm^2

地区	2023年	2018年	2013年	2008年
潍坊市	130 520	115 380	82 040	48 880
聊城市	80 647	53 740	24 247	13 720
临沂市	61 793	34 127	13 647	8 387
枣庄市	28 707	24 680	12 953	5 573
德州市	25 053	20 073	11 180	5 453
济宁市	24 907	18 133	10 400	3 307
菏泽市	23 960	17 900	10 300	3 240
滨州市	23 240	16 853	7 613	3 080
泰安市	17 067	13 933	7 307	2 213
济南市	16 760	12 493	3 227	2 000
青岛市	12 173	8 513	2 893	1 513
淄博市	9 987	7 213	2 667	1 400
东营市	6 007	5 420	1 747	1 033
日照市	5 847	4 373	1 673	440
烟台市	5 067	3 693	1 060	167
威海市	1 580	2 027	60	33
总计	473 313	358 553	193 013	100 440

表5 山东省县区各年份农业温室面积(前5位)

Tab. 5 Area of agricultural greenhouses of county areas in Shandong Province (Top 5)

县区	2023年	2018年	2013年	2008年
寿光	54 060	51 547	31 620	19 240
青州	37 713	38 240	18 647	14 880
莘县	32 420	19 607	12 487	8 087
滕州	19 407	18 420	11 113	7 407
兰陵	16 780	16 807	10 200	3 793

突显了其在设施农业发展中的领先地位。其他县区如兰陵、青州和莘县也表现出持续增长的趋势,反映了设施农业在山东省各区域的深入推广和快速扩展。

3.2 农业温室年限

由图9可见,使用时间超过15年的农业温室与2008年农业温室的空间分布高度一致,主要集中在潍坊和聊城,并逐步向周边扩展。整体上,使用年限小于5年的农业温室广泛分布,特别在潍坊、聊城和

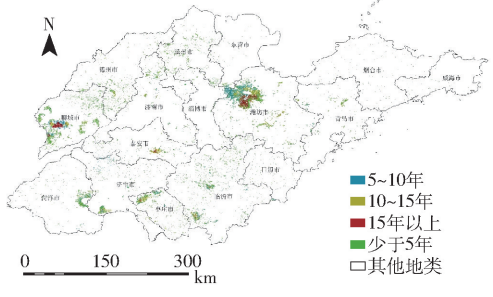


图9 山东省农业温室使用年限及分布

Fig. 9 Distribution of agricultural greenhouse by year of use in Shandong Province

临沂较为显著，表明山东省设施农业近几年发展迅速，潍坊、聊城和临沂成为重要核心发展地区。使用年限为 5～10 年和 10～15 年的农业温室分布相似，说明这一阶段产业发展较为平稳，潍坊、聊城和临沂的集中分布为这些地区成为设施农业中心打下了基础。

根据山东省各市域农业温室新旧程度面积数据（表 6），山东省农业温室的分布与使用年限呈现出明显的多样化特征。潍坊市在各年限段均拥有最大的农业温室面积，表明其在设施农业发展中持续保持了领先优势。聊城市和临沂市紧随其后，分别在各年限段展现出相对较大的农业温室面积，显示出两市在设施农业扩展上的显著成效。此外，德州市农业温室面积增长迅速，小于 5 年的农业温室面积达 24 000 hm^2，比前一个年限段增长约 10%。

表 6　山东省典型市域农业温室新旧程度面积

Tab. 6　Area of agricultural greenhouses with different usage ages of city areas in Shandong Province　hm^2

地区	小于 5 年	5～10 年	10～15 年	15 年以上
潍坊市	65 307	30 633	17 720	16 860
聊城市	52 673	12 207	7 167	8 600
临沂市	48 460	8 480	4 587	1 140
德州市	24 000	5 467	3 867	1 053
滨州市	21 847	4 147	3 713	927
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
总计	324 700	78 007	41 113	29 493

从全省范围来看，不同年限段的温室面积分布也体现出一定的差异性。小于 5 年的农业温室占比最大，达到 324 700 hm^2；5～10 年的农业温室面积为 78 007 hm^2，潍坊市、聊城市和临沂市是主要的集中区域；10～15 年的农业温室面积为 41 113 hm^2，主要分布在潍坊市、聊城市、枣庄市和泰安市，分别为 17 720、7 167、4 587、3 867 hm^2。大于 15 年的农业温室面积为 29 493 hm^2，潍坊市和聊城市仍然占据主导地位。

总体来看，山东省农业温室在使用年限上的分布呈现出以潍坊市为核心、聊城和临沂市为重要区域的多层次格局，反映了全省设施农业在空间和时间上的动态发展特点。全省农业温室的分布在新旧程度上呈现以小于 5 年的新建温室为主导，5～15 年温室逐步递减，超过 15 年的老旧温室主要集中于传统设施农业核心区域。

3.3　农业温室驱动力分析

通过对 2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年农业温室密度的分析，揭示了山东省农业温室的空间分布变化规律。由图 10 可见，2008 年，农业温室主

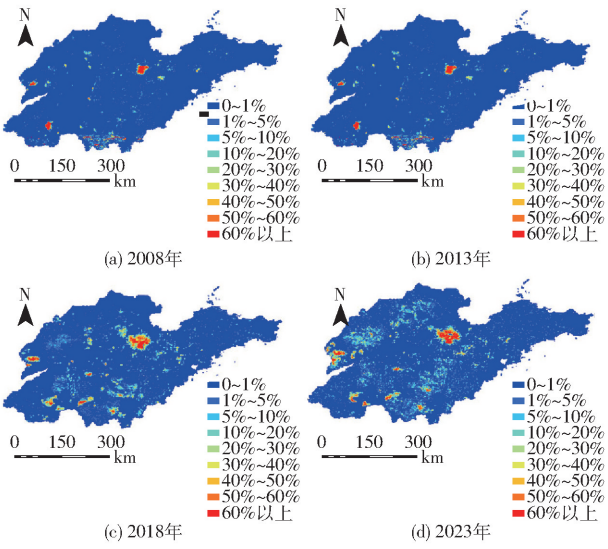


图 10　山东省各年份农业温室密度图

Fig. 10　Density maps of agricultural greenhouse in Shandong Province by year

要分布在寿光、青州、莘县、冠县及部分其他地区，呈局部集中分布。2013 年，随着政策支持，潍坊市的农业温室向周边扩展，形成以潍坊青州寒亭为中心的集中种植区，其他地区如莘县、商河县、滕州市等也形成了温室集中区。2018 年，农业温室分布进一步向周边扩展，特别是在与河南省交界的区域，莘县成为第 2 个主要种植区，全省 4 级和 5 级密度的温室显著增加。到 2023 年，山东省形成了以寿光市和莘县为核心的 2 个种植中心，多个县区发展成为大规模种植区，构建了完整的农业温室空间格局。

在提取农业温室密度与相关驱动因素的数据时，由于山东省幅员辽阔，部分网格数据为 0，导致数据分布偏态，影响统计分析准确性。因此，分析前去除了数值为 0 的记录和异常值，最终保留了 1 500 条数据。由图 11 可见，高速公路密度和路网密度与农业温室密度表现出显著的正相关（相关系数分别

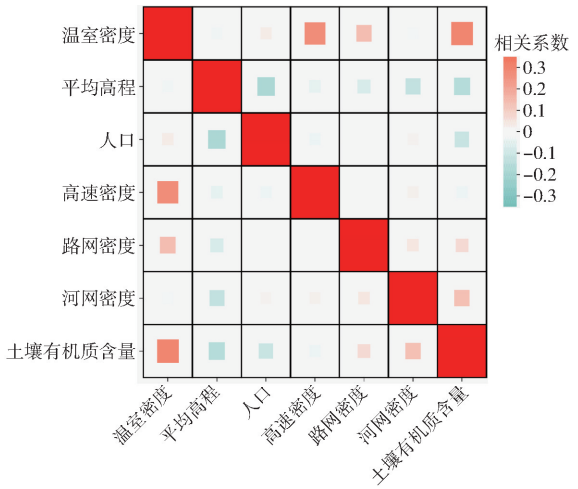


图 11　驱动力因素相关性分析

Fig. 11　Correlation analysis of driving force factors

为 0.280 1 和 0.145 3)。表明交通发达地区农业温室建设活跃,良好的交通条件便于农产品流通和市场接入,促进了温室建设。而平均高程和河网密度与农业温室密度的相关性极弱(相关系数分别为 -0.027 7 和 -0.025 5),表明地理环境因素对农业温室分布影响有限。此外,虽然人口与农业温室密度有轻微的正相关(相关系数为 0.037 5),但相关性不强,这可能是因为人口密度高的地区土地使用竞争激烈,导致农业用地被其他用地挤压。最后,土壤有机质呈现最高的正相关(相关系数为 0.301 8),其直接影响作物的生长和产量,能够提供更丰富的养分和更好的水分保持能力,有助于提高农业温室的生产效益。进一步研究可以发现,各指标之间的相关性总体较低,其绝对值最大为 0.192 2,远低于一般认为存在多重共线性的阈值(0.8),因此可以认为指标间的独立性较强[24]。

综上,交通基础设施和土壤有机质是农业温室分布和扩展的主导性驱动因素,相比之下,地理环境因素和人口密度对农业温室的分布影响相对有限。

3.4 山东省农业温室优化布局

3.4.1 发展潜力分析

研究表明,各因子的相关系数能够较好地反映其对温室发展的影响程度[25]。因此,基于相关性分析结果,选取了高速密度、路网密度和土壤有机质含量作为发展潜力评价因子,并根据它们与温室密度相关性确定权重,分别为 0.35、0.18 和 0.47。高速密度与路网密度通过 ArcGIS 软件的线密度分析功能计算,土壤有机质含量则来源于 SoilGrids 数据集。

根据结果(图 12),山东省农业温室大部分地区发展潜力为 2 级到 4 级,1 级和 5 级较少,整体潜力较大。发展潜力较大的地区包括鲁中潜力区、鲁东潜力区和鲁南潜力区。鲁中潜力区以张店区和寿光市为中心,蔬菜种植产业成熟,寿光市是全国著名蔬菜基地,交通和土壤条件优越,支持温室发展。鲁东潜力区以平度市和莱西市为中心,交通发达,土地资源丰富,发展潜力大。鲁南潜力区以薛城区和兰陵县为中心,土壤肥沃,有机质含量高,地理位置优越,市场潜力大。综上,此 3 个中心具有较强的发展潜力,适合大规模农业温室的发展。

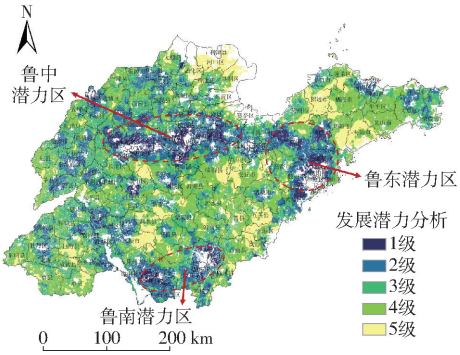


图 12 山东省各县区农业温室发展潜力

Fig. 12 Development potential of agricultural greenhouse in each county of Shandong Province

3.4.2 优化布局建议

根据山东省农业温室发展潜力与使用年限的综合分析,提出了优化布局方案,将全省划分为核心发展区、建议发展区、改造转移区和一般发展区(图 13)。核心发展区主要集中在寿光市,因其优越的交通和高土壤肥力,是设施农业的中心,适宜扩展温室规模。建议发展区包括鲁中、鲁东和鲁南的无温室区域,具有较高发展潜力,适合新建温室提升生产能力。改造转移区主要位于潍坊和聊城等早期发展地区,这些温室存在低效和资源浪费,需要改造或转移。一般发展区适宜性较低,通常不建议新增温室,除非有特殊需求和发展条件。

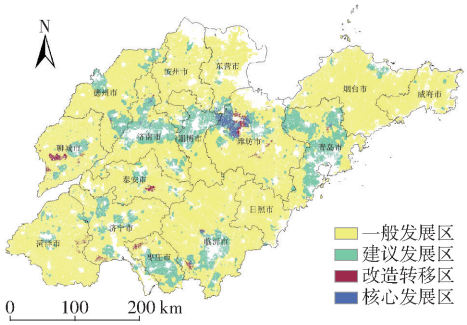


图 13 山东省农业温室优化布局方案

Fig. 13 Optimal layout scheme of agricultural greenhouses in Shandong Province

4 讨论

4.1 山东省老旧温室分布及现状分析

本研究通过叠加分析 2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年 4 个年份的温室分布数据,对山东省农业温室的新旧程度及其空间分布进行了系统识别。结果表明,山东省农业温室的新旧程度呈现出显著的区域差异。

超过 15 年的老旧温室面积为 29 493 hm^2,主要集中于潍坊市和聊城市;10 ~ 15 年的农业温室总面积为 41 113 hm^2,分布在潍坊市、聊城市、枣庄市和泰安市。这些地区设施农业发展较早,积累了丰富经验和较高管理水平,为温室扩张和提升效益提供支持[26]。然而,根据《农业温室结构荷载规范》(GB/T 51183—2016),塑料薄膜温室的使用年限通常为 15 年,日光温室和塑料温室的使用年限为 10 年。超过使用年限的老旧温室普遍存在结构设计不合理、通风透光条件较差以及不利于机械化作业等问题,不仅影响生产效率,还增

加了维护成本[27]。例如，老旧拱棚多采用竹木混合或水泥预制件结构，限制了通风和机械化作业，易造成高温高湿小气候。厚土墙日光温室则使用焊接钢管或木结构，荷载设计不足，难以应对大风雪灾等极端天气，容易倒塌或功能受损。因此，潍坊、聊城、枣庄和泰安的老旧温室亟需改造，以满足现代设施农业的需求。

4.2　山东省农业温室优化布局

通过对山东省农业温室发展潜力与新旧程度的综合分析，将全省划分为核心发展区、建议发展区、改造转移区和一般发展区，并提出优化布局方案。

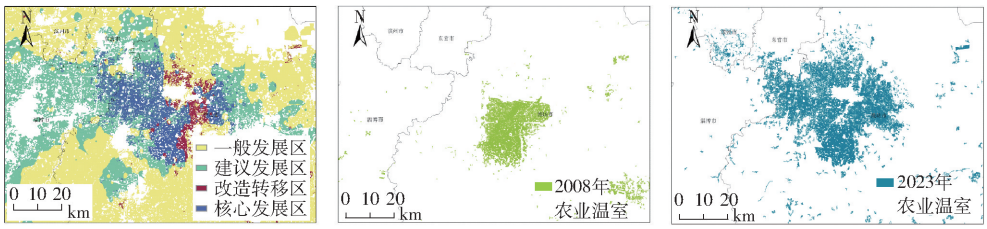
核心发展区主要集中在寿光市，该地区地理位置优越，交通便利，土壤肥力高，为扩展农业温室提供了良好条件。未来应继续发挥该区域优势，优先配置资源，以提升生产效率并扩大产业规模。这与该地区设施农业的集中度一致，为温室发展提供持续技术支持和市场需求，形成产业集群效应。

建议发展区包括鲁中、鲁东和鲁南等地，这些地区农业温室潜力较高，发展前景良好。特别是鲁中和鲁东，虽然目前温室建设水平有待提高，但凭借丰富土地资源和适宜的设施农业条件，未来具有广阔的拓展潜力。合理布局和适度建设温室可以提升农业生产能力，推动现代化农业，特别是蔬菜等高附加值作物的种植[28]。

改造转移区反映了山东省农业温室发展中面临的现实挑战。以潍坊市为例，改造区主要集中在东部（图 14a），早期温室缺乏规划，导致老旧设施积累，存在资源利用低效和生产能力不足的问题。近年来，潍坊的温室逐渐向西扩展（图 14b、14c），可能与前期规划不足有关，东侧老旧温室被淘汰，新增温室向西发展。优化方案与这一趋势一致，验证了布局调整策略的可行性。除了淘汰不合格的老旧温室外，应注重改造现有设施，引入新技术和智能管理系统，以提升生产能力、资源利用效率，延长设施寿命，并推动产业升级[29]。

一般发展区由于整体发展适宜性较低，资源条件和基础设施较为薄弱，因此不建议新增温室建设。对于这些区域，未来的农业发展应更多关注于提升现有设施的生产效率和引导其他农业形式的发展，如发展休闲农业、农产品深加工等替代产业，以避免过度依赖单一的农业温室建设，减少对环境和资源的压力。

总体来看，本研究的优化布局方案为山东省农业温室的长远发展提供了科学的指导依据。未来的布局调整应充分考虑区域特点、资源禀赋、设施老化问题以及技术创新等因素，推动农业温室在不同区域内的合理发展与可持续利用。



(a) 优化布局方案　(b) 2008年农业温室分布　(c) 2023年农业温室分布

图 14　潍坊市温室优化布局方案和历史分布

Fig. 14　Optimized layout plan and historical distribution of greenhouses in Weifang City

4.3　农业温室发展的影响因素

本研究系统分析了山东省农业温室发展的主要驱动力，研究表明，农业温室的分布受多种因素影响。交通基础设施是农业温室发展的重要驱动力之一。交通基础设施的完善能够显著降低设施农业的建造成本、运营成本和管理成本，同时拓宽产品的销售途径，提高产品的平均利润，增加种植户收入[30]。因此，集中连片发展温室和改造老旧温室对提升经济效益和生产效率至关重要。土壤有机质对农业温室的发展起着重要作用[31]。土壤有机质通过改善土壤结构，提升土壤通气性和排水能力[32]，减少化肥使用，降低生产成本，优化农业生产条件[33]。

政策扶持在农业温室建设中起到了重要作用[34]。由于温室建设成本高，前期投资需求大，政策支持至关重要[35]。过去 15 年，相关政策每年都对设施农业提出明确要求。2007 年，农业部发布发展现代农业的意见，强调设施农业的重要性；2008 年再次提出促进设施农业发展的意见。2008 年后，设施农业发展加速，山东省温室面积从 100 440 hm^2 增长到 193 020 hm^2，增幅超过 92%。2014 年、2017 年，农业部发布支持设施农业发展的通知，进一步推动其发展。到 2018 年，山东省温室面积已达 358 540 hm^2，较2008 年增长 357%。2023 年，中央一号文件提出发展现代设施农业，提出提升老旧温室和利用戈壁、沙漠等区域发展设施农业；同年，农业农村部发布《设施农业现代化提升行动实施方案（2023—2025 年）》，进入新时期，要求更加科学、高效、节约地建设农业温室。

4.4 局限性和不足

本研究揭示了农业温室新旧程度及其空间分布特征,但仍存在一些局限性。首先,研究基于 2008 年、2013 年、2018 年和 2023 年的温室分布数据,尽管能反映总体变化趋势,但由于数据采集间隔较大,可能未充分捕捉到温室的修建或翻新,导致一些较新的温室未被及时识别或误判为老旧,从而影响结果精度。其次,研究使用的遥感数据分辨率较低,可能影响温室边界清晰度和新旧程度判定[36-37]。未来研究可考虑使用更高频次的时间序列数据和高分辨率遥感影像,以提高准确性和可靠性。

5 结论

(1)利用 GEE 平台和随机森林分类算法,系统分析了山东省农业温室过去 15 年(2008—2023 年)的时空变化趋势。研究结果表明,山东省农业温室面积从 2008 年的 100 440 hm^2 增长至 2023 年的 473 307 hm^2,增幅达 471%。其中,使用时间超过 10 年的老旧温室面积为 70 607 hm^2,而超过 15 年的为 29 493 hm^2。这表明,在过去 15 年间,山东省农业温室快速发展的同时,老旧化现象也较为突出。

(2)通过驱动力分析发现,农业温室的建造受政策支持、种植区域的选择、现代化路网布局以及土壤有机质分布的显著影响。进一步分析发现,山东省农业温室的 3 个发展潜力中心为:鲁中发展区(以寿光市和张店区为中心)、鲁东发展区(以平度市和莱西市为中心)以及鲁南发展区(以兰陵县和薛城区为中心)。这些区域因其良好的自然与政策条件具备显著的发展优势。

(3)基于发展潜力的评价结果,提出了山东省农业温室的优化布局建议,将全省划分为 4 类区域:核心发展区、建议发展区、改造转移区和一般发展区。其中,核心发展区集中于寿光市,适宜进一步扩大农业温室规模;建议发展区位于鲁中、鲁东和鲁南潜力区内,可适度新建农业温室;改造转移区主要分布于潍坊市、聊城市等老旧温室集中区域,需逐步实施升级改造;一般发展区适宜性较低,不建议新增农业温室。上述建议可为山东省农业温室的科学规划与集约化发展提供指导,推动设施农业规模化提升,促进乡村振兴和产业高质量发展。

参 考 文 献

[1] 林欣怡,汪小钦,汤紫霞,等. 基于面向对象 CNN 和 RF 的不同空间分辨率遥感影像农业大棚提取研究[J]. 遥感技术与应用,2024,39(2):315-327.
LIN Xinyi, WANG Xiaoqin, TANG Zixia, et al. Agricultural greenhouse extraction based on object-oriented CNN and RF from remote sensing images with different spatial resolutions[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(2): 315-327. (in Chinese)

[2] 邢希君,宋建成,吝伶艳,等. 设施农业温室大棚智能控制技术的现状与展望[J]. 江苏农业科学,2017,45(21):10-15.
XING Xijun, SONG Jiancheng, LIN Lingyan, et al. Current status and prospects of intelligent control technology for greenhouse facilities in protected agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(21): 10-15. (in Chinese)

[3] OU C, YANG J, DU Z, et al. Landsat-derived annual maps of agricultural greenhouse in Shandong Province, China from 1989 to 2018[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4830.

[4] GUO B, ZHOU B, ZHANG Z M, et al. A critical review of the status of current greenhouse technology in China and development prospects[J]. Applied Sciences, 2024, 14(13): 5952.

[5] 陈仲新,任建强,唐华俊,等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. 遥感学报,2021,20(5):748-767.
CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, TANG Huajun, et al. Progress and prospects of agricultural remote sensing research and applications[J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 20(5): 748-767. (in Chinese)

[6] 赵璐,任红艳,杨林生. 基于高分二号遥感数据的农业阳光大棚提取[J]. 遥感技术与应用,2019,34(3):677-684.
ZHAO Lu, REN Hongyan, YANG Linsheng. Agricultural greenhouse extraction based on GF-2 remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(3): 677-684. (in Chinese)

[7] 刘森,马丙成. 基于高分辨率影像的农业大棚信息提取[J]. 现代信息科技,2023,7(22):146-149.
LIU Sen, MA Bingcheng. Agricultural greenhouse information extraction based on high-resolution imagery[J]. Modern Information Technology, 2023, 7(22): 146-149. (in Chinese)

[8] CHEN W, LI J, WANG D. et al. Large-scale automatic extraction of agricultural greenhouses based on high-resolution remote sensing and deep learning technologies[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(48): 106671-106686.

[9] LIU X, XIN L. Spatial and temporal evolution and greenhouse gas emissions of China's agricultural plastic greenhouses[J]. Science of The Total Environment, 2023, 863: 160810.

[10] 朱德海,刘逸铭,冯权泷,等. 基于 GEE 的山东省近 30 年农业大棚时空动态变化研究[J]. 农业机械学报,2020,51(1):168-175.
ZHU Dehai, LIU Yiming, FENG Quanlong, et al. Study on the spatiotemporal dynamic changes of agricultural greenhouses in Shandong Province over the past 30 years based on GEE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

2020, 51(1): 168 – 175. (in Chinese)
[11] 李黔湘. 基于高分遥感数据的农业大棚面积提取及分析——以北京市大兴区为例[J]. 北京水务,2016(6):14 – 17.
LI Qianxiang. Agricultural greenhouse area extraction and analysis based on high-resolution remote sensing data: a case study of Daxing District, Beijing[J]. Beijing Water Affairs, 2016(6): 14 – 17. (in Chinese)
[12] YU B, SONG W, LANG Y. Spatial patterns and driving forces of greenhouse land change in Shouguang City, China[J]. Sustainability, 2017, 9(3): 359.
[13] CHEN Y, WANG Z, YOU K, et al. Trends, drivers, and land use strategies for facility agricultural land during the agricultural modernization process: evidence from Huzhou City, China[J]. Land, 2024, 13(4): 543.
[14] 王桂萍,李霞,张伟丽,等. 山东冬暖大棚番茄潜叶蛾色板监测技术[J]. 应用昆虫学报, 2024, 61(4):758 – 764.
WANG Guiping, LI Xia, ZHANG Weili, et al. Color plate monitoring technology for tomato leaf miner in winter greenhouse tomatoes in Shandong[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2024, 61(4):758 – 764. (in Chinese)
[15] LIU Y, WANG A, HOU J, et al. Comprehensive evaluation of rural courtyard utilization efficiency: a case study in Shandong Province, Eastern China[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(9): 2280 – 2295.
[16] CHEN S, ZHU Y, CHEN Y, et al. Usage strategy of phase change materials in plastic greenhouses, in hot summer and cold winter climate[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115416.
[17] GAO L, WANG X, JOHNSON B A, et al. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: a review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159: 364 – 377.
[18] ZHEN Z, CHEN S, YIN T, et al. Using the negative soil adjustment factor of soil adjusted vegetation index (SAVI) to resist saturation effects and estimate leaf area index (LAI) in dense vegetation areas[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2115.
[19] SEKERTEKIN A. A survey on global thresholding methods for mapping open water body using Sentinel – 2 satellite imagery and normalized difference water index[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(3): 1335 – 1347.
[20] DUAN M, SONG X, LIU X, et al. Mapping the soil types combining multi-temporal remote sensing data with texture features [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107230.
[21] LIU Y, GUO L, GAO H, et al. Machine vision based condition monitoring and fault diagnosis of machine tools using information from machined surface texture: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 164: 108068.
[22] LI T, YANG N, XIAO Y, et al. Virus detection light diffraction fingerprints for biological applications[J]. Science Advances, 2024, 10(11): eadl3466.
[23] BILLAH M, ISLAM A K M S, MAMOON W B, et al. Random forest classifications for landuse mapping to assess rapid flood damage using Sentinel – 1 and Sentinel – 2 data[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2023, 30: 100947.
[24] GE D, WANG Z, TU S, et al. Coupling analysis of greenhouse-led farmland transition and rural transformation development in China's traditional farming area: a case of Qingzhou City[J]. Land Use Policy, 2019, 86: 113 – 125.
[25] JONES C, KAMMEN D M. Spatial distribution of US household carbon footprints reveals suburbanization undermines greenhouse gas benefits of urban population density[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(2): 895 – 902.
[26] 徐风霞, 单英超, 高学芹. 寿光 2024 年冬季气候特征及对农业影响分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 716 – 723.
XU Fengxia, SHAN Yingchao, GAO Xueqin. Analysis of winter climate characteristics in Shouguang and their impact on agriculture in 2024[J]. Climate Change Research Letters, 2024, 13(3): 716 – 723. (in Chinese)
[27] 刘建, 王宝龙, 李原欣. 海南省利用光伏连栋温室建设永久性常年蔬菜基地的可行性分析[J]. 农业工程技术 (温室园艺), 2020, 40(28): 24 – 29.
LIU Jian, WANG Baolong, LI Yuanxin. Feasibility analysis of building a permanent year-round vegetable base using photovoltaic connected greenhouses in Hainan Province[J]. Agricultural Engineering Technology (Greenhouse Horticulture), 2020, 40(28): 24 – 29. (in Chinese)
[28] CASTRO R P, DINHO da SILVA P, PIRES L C C. Advances in solutions to improve the energy performance of agricultural greenhouses: a comprehensive review[J]. Applied Sciences, 2024, 14(14):6158.
[29] GHIASI M, WANG Z, MEHRANDEZH M, et al. A systematic review of optimal and practical methods in design, construction, control, energy management and operation of smart greenhouses[J]. IEEE Access, 2023,12:2830 – 2853.
[30] 韩林娟,刘昊,周海霞. 农业经济与农产品物流园区规模耦合协调发展研究——以山东省寿光市为例[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(19): 236 – 239.
HAN Linjuan, LIU Hao, ZHOU Haixia. Study on the coupled and coordinated development of agricultural economy and agricultural product logistics park scale: a case study of Shouguang City, Shandong Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(19): 236 – 239. (in Chinese)
[31] 韩博,金晓斌,顾铮鸣,等. 乡村振兴目标下的国土整治研究进展及关键问题[J]. 自然资源学报, 2022, 36(12): 3007 – 3030.
HAN Bo, JIN Xiaobin, GU Zhengming, et al. Research progress and key issues of land consolidation under the goal of rural revitalization[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 36(12): 3007 – 3030. (in Chinese)

[32] YAN B, DENG T, SHI L. Towards sustainable productivity of greenhouse vegetable soils: limiting factors and mitigation strategies[J]. Plants, 2024, 13(20): 2885.
[33] LIU J, SHU A, SONG W, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
[34] 魏秀菊, 朱明, 廖艳. 推动农业工程发展 保障我国粮食安全[J]. 科技导报, 2023, 41(20): 5 - 19.
WEI Xiuju, ZHU Ming, LIAO Yan. Promoting the development of agricultural engineering to ensure food security in China [J]. Science and Technology Review, 2023, 41(20): 5 - 19. (in Chinese)
[35] 孙玉栋, 李浩任. 乡村振兴战略实施中财政引导市场机制参与的模式, 问题及对策研究[J]. 公共管理与政策评论, 2021, 10(4): 49 - 60.
SUN Yudong, LI Haoren. Mode, issues, and countermeasures of fiscal guidance for market mechanism participation in the implementation of the rural revitalization strategy[J]. Public Administration and Policy Review, 2021, 10(4): 49 - 60. (in Chinese)
[36] HONG R, XIAO B, YAN H, et al. Multitemporal greenhouse mapping for high-resolution remote sensing imagery based on an improved YOLOX[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107689.
[37] ZHANG Z, RONG J, QI Z, et al. A multi-species pest recognition and counting method based on a density map in the greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108554.

(上接第 584 页)

[17] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 30(2): 328 - 341.
[18] XIA G S, BAI X, DING J, et al. DOTA: a large-scale dataset for object detection in aerial images[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 3974 - 3983.
[19] SHI P, ZHAO Z, FAN X, et al. Remote sensing image object detection based on angle classification[J]. IEEE Access, 2021, 9:118696 - 118707.
[20] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLO v7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 7464 - 7475.
[21] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020: 12993 - 13000.
[22] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330 - 1334.
[23] SHAMI T M, EL-SALEH A A, ALSWAITTI M, et al. Particle swarm optimization: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10031 - 10061.
[24] CHEN T, GUESTRIN C. Xgboost: a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd ACM Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 785 - 794.
[25] DING J, XUE N, LONG Y, et al. Learning RoI transformer for oriented object detection in aerial images[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 2849 - 2858.
[26] XIE X, CHENG G, WANG J, et al. Oriented R - CNN for object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021: 3520 - 3529.