

农作物空间格局研究进展及发展探讨

李海亮¹, 戴声佩¹, 胡盈盈¹, 朱鹏锦², 李茂芬¹, 郑倩¹, 罗红霞¹, 禹萱¹

1. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海南海口 571101; 2. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001

摘要: 农作物空间格局研究具有重要的理论意义和现实意义, 已经成为地理学和生态学研究的前沿和热点。本文总结了农作物空间格局重构方法、驱动力分析和模拟预测等方面的研究进展, 在讨论分析当前研究所存在问题和未来发展趋势的基础上, 提出了农作物空间格局研究工作的思维导图。研究表明, 在农作物空间信息重构领域, 统计调查法、遥感提取法和空间模型分配法均存在优势和缺陷; 在农作物空间格局驱动力分析和模拟预测领域, 仅从自然驱动力或社会经济驱动力单一角度来分析往往难以全面理解农作物空间格局变化过程。研究认为, 基于空间模型的区域农作物空间信息复合重构技术、融合自然和社会经济多因子多尺度的农作物空间格局驱动力研究方法、耦合地理模型和社会经济模型的农作物空间格局模拟预测模型将是农作物空间格局研究领域的重要发展方向。

关键词: 农作物空间格局; 空间信息重构; 驱动力; 模拟预测

中图分类号: S-1; S17 文献标识码: A

Research Progress and Development of Crop Spatial Pattern

LI Hailiang¹, DAI Shengpei¹, HU Yingying¹, ZHU Pengjin², LI Maofen¹, ZHENG Qian¹, LUO Hongxia¹, YU Xuan¹

1. Institute of Scientific and Technological Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning, Guangxi 530001, China

Abstract: The study of crop spatial pattern has important theoretical and practical significance, and has become the frontier and hotspot of geography and ecology. This paper systematically summarized the current progress of allocation method, driving force analysis and simulation of crop spatial pattern. And in this paper, a mind map of research work is presented based on the discussion of the deficiencies and the trends in the study of crop spatial pattern. It is showed that the methods of statistical investigation, remote sensing and spatial model have their advantages and disadvantages in the work of crop spatial information allocation. And it is difficult to fully understand the process of crop spatial pattern change only from the perspective of natural driving force or socio-economic driving force in the work of driving force analysis and simulation of crop spatial pattern. It is suggested that the spatial information comprehensive allocation technology based on spatial model, the multi-factor and multi-scale driving force analysis method combining natural and socio-economic factors, and the simulation model coupling geographical model and socio-economic model will be the important development directions in the field of crop spatial pattern research.

Keywords: spatial pattern of crops; spatial information allocation; driving force; simulation and prediction

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.12.020

土地不仅是人类居住、生活的场所, 同时又是人类活动最基本的生产资料 and 对象。人类所需

绝大部分的食物和原材料供给均产自农业用地, 农业土地利用是人类开发利用土地资源的活动,

收稿日期 2023-03-07; 修回日期 2023-05-21

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 621RC628); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 42107487); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630072023002)。

作者简介 李海亮 (1977—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热带农业遥感; E-mail: fondgis@catas.cn。

是土地系统的重要组成部分^[1]。农作物空间格局是农业土地利用的一种形式和内容,是一个地区农作物种植结构和种植方式的空间表达,是农业土地系统的核心内容之一^[2]。农作物空间格局不仅蕴含了农作物种植结构、空间分布和熟制等关键信息,还反映了农作物生产在空间维度对自然资源和社会资源的利用状况,是农业产业结构优化的重要依据^[3]。同时,农作物空间格局特征和变化信息也是评价全球变化对农业生产影响,研究农业生态系统对陆地碳循环响应的基础^[4]。在全球变化背景下,农业气候资源和社会经济发展发生了明显改变,农作物空间格局也正在发生着变化。同时,农作物空间格局对全球变化的响应又会反作用于农业生态系统,比如全球变化引起农作物空间格局变化,而农作物的生产通过人类活动和自然调节影响所在区域的土壤、气候、地形和水资源等要素,进而对农业生态系统产生反作用。因此,开展农作物空间格局研究具有重要的理论意义和现实意义,已经成为地理学和生态学研究的前沿和热点。

自 20 世纪 90 年代以来,国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Programme, IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)共同发起的土地利用/覆被变化(LUCC)研究计划和全球土地计划(Global Land Project, GLP)极大地促进了土地变化科学的发展。作为土地变化科学的子研究领域,农作物空间格局研究在理论、方法和实践上均取得了快速发展。空间信息重构方法从统计调查法和遥感提取法发展到了空间模型分配法,有效提高了研究结果的精度;空间格局驱动力研究方法从自然因素单一视角发展成基于自然和社会经济多因子的研究方法,更加有助于全面理解农作物空间格局变化的过程;空间格局模拟预测随着地理模型的扩展,趋向于融合社会经济模型与地理模型的复合模型模式。本文将重点围绕农作物空间格局信息重构、驱动力分析和模拟预测等方面的研究进行总结,讨论当前研究中存在的主要问题,并对未来发展进行探讨。

1 农作物空间格局重构研究

1.1 统计调查法

农作物种植面积传统提取通常采用人工统计

调查的方法,一般可分为 2 种,一是生产管理部门统计,通过县、市、省、国家统计部门分级统计,逐层汇总上报^[5];二是抽样调查,调查人员根据抽样统计学原理,通过代表性样本,科学统计区域农作物种植面积^[6]。统计调查法在定量研究中具有明显优势,广泛应用于长时间序列、大范围的农作物空间格局研究^[7-8]。陈浩^[9]利用县级统计数据,分析了我国东北地区水稻时空分布变化特征;范玲玲^[10]和王利民等^[11]基于我国 31 个省(市、自治区)小麦种植面积统计数据,系统分析了我国小麦不同时间段的空间分布特征及动态变化规律;佟越强等^[12]基于全球青豌豆统计数据,利用一元线性回归模型以及优势指数等分析了 1961—2018 年全球青豌豆生产的时空变化特征;此外,国内外学者也根据统计数据的统计范围,在不同区域尺度上对农作物空间信息开展了定量研究^[13-15]。

尽管统计调查法在农作物空间格局定量研究中表现突出,但同时存在明显的不足。首先,数据的获取成本较高,需要消耗大量的人力、物力和财力;其次,数据的获取程序较多、耗时较长,时效性较差;再次,数据获取过程受人为因素干扰较大,数据的一致性难以得到保证;最后,统计数据仅能反映统计单元之间的变化,不能反映统计单元内部的差异。

1.2 遥感提取法

遥感技术作为一种新的探测技术,可以大范围、高效率、低成本、跨时空地获取地表信息,正被广泛应用于农业资源调查、农情监测和农业灾害监测等农事活动中,在不同时空尺度下的农作物空间格局研究中发挥了重要作用^[16-17]。目前,多传感器、多时间分辨率、多空间分辨率的多源遥感数据被广泛应用于农作物空间格局重构。低分辨率遥感影像以 NOAA/AVHRR、MODIS 和 SPOTVEGETATION 等类型为主,中分辨率遥感影像主要有 LandsatTM、LandsatMSS、SPOT1、SPOT2、SPOT3、SPOT4、ATSER、HJ-1A、HJ-1B 和 Hyperion 等,高分辨率遥感影像主要有航片、QuickBird、IKONOS、OrbView-3、GeoEye-1、EROS-A、EROS-B 和 SPOT5 等^[18-20]。识别方法从最初的目视解译、非监督分类和监督分类发展到结合数学方法的智能分类方法和基于多源数据融合的分类方法^[21-23],识别能力得到加强,识别精度不断提高。

遥感提取技术根据分类对象的不同可分为基于像元、亚像元和面向对象 3 类。基于像元的分类技术通过农作物的光谱特征分析对每个像元进行分类,是遥感影像分类的传统方法,在理论与技术上发展相对成熟。遥感影像通常包括混合像元和纯净像元 2 种类型,混合像元严重限制了对遥感影像进行精细化的识别,使得遥感数据存在不确定性因素^[24]。亚像元定位技术针对混合像元问题,可以有效提取目标的形状、轮廓等空间分布特征,提高目标识别精度^[25]。基于像元和亚像元进行农作物识别,均是根据光谱信息进行区分的,分类效果不佳,具有一定的局限性,随着越来越多高分辨率遥感影像的投入使用,基于像元和亚像元的分类方法难以满足现实需求^[26]。面向对象的分类技术把遥感影像中具有相似特征的对象划为最小单元,并进行分类,面向对象的分类技术更适合于高分辨率遥感影像,在识别精度、效率和完整性上均高于基于像元或亚像元的分类技术^[27]。但面向对象的分类技术中分割对象和分类对象的过程相互独立,分类精度较依赖于影像分割的效果,同时分类过程需要丰富的先验知识,并进行反复试验才能得到满意的结果,这些因素阻碍了面向对象的分类技术在更大范围的高分遥感影像上应用^[28]。

随着遥感技术与深度学习技术的发展,众多学者把多时相、多时序遥感影像结合深度学习算法应用到农作物空间信息提取,大大提高了农作物类型识别精度。最初基于深度学习的分类精度受图块所包含信息的制约,且相近的图块存在大量的信息重复,影响分类结果的同时降低了计算效率^[29]。为解决这一问题,学者们尝试在分类研究中引入并改进全卷积神经网络 (fully convolutional networks, FCN),形成了一系列语义分割模型^[30]。随着像素级语义分割模型不断出现,农作物空间信息遥感提取精度明显提高^[31]。虽然基于深度学习的农作物遥感提取技术能够取得良好的效果,但仍然存在问题。一是低分辨率遥感影像边界处存在许多混合像元,这给农作物识别制造了很多困难;二是高分辨率遥感影像单幅覆盖面积小,在进行大范围农作物识别时,所用数据量大,需要语义分割网络加快模型的运行速度。因此如何对语义分割网络模型进行改进,使其更好地应用于农作物遥感分类领域是值得思考的问题^[32]。

1.3 空间模型分配法

基于空间模型的方法可以归纳为 2 类,一类是考虑农作物光合、呼吸和蒸腾等一系列生理、生化和生长过程,构建基于光、温、水、土壤和地形等自然条件为参数的数学模型,实现对不同农作物空间分布的模拟^[33]。另一类是基于农业生产条件,利用现有数学模型,结合统计数据、遥感影像和其他模拟结果数据,模拟农作物分布变化的复合方法。WU 等^[34]利用 AiC (action in context) 模型,结合统计数据和其他模拟结果数据,对亚洲地区水稻种植区域变化进行了模拟预测研究。YOU 等^[35]应用 SPAM (spatial production allocation model) 模型对多源数据进行交叉信息熵计算,对南美地区农作物空间分布进行了模拟研究。LIU 等^[36]利用最大熵 MaxEnt (maximum entropy model) 模型和 SPAM 模型获得了我国 10 km 像元尺度的水稻分布信息。唐鹏钦^[37]基于交叉信息熵理论,构建了农作物空间信息重构模型 SPAM-China,对东北三省 1980—2010 年水稻、玉米、小麦和大豆的空间分布信息进行了重构。杨其坡^[38]基于 MaxEnt 模型和多时相 Sentinel-2 影像开展了花椒识别研究,总体精度较高。

基于空间模型的方法是在各种预设的条件下对农作物空间分布进行研究,是农作物空间信息研究的一种重要方法。但是,农作物的空间信息变化不只受到模型所设定条件影响,也受到其他复杂因素的影响。如作物过程模型,农作物的空间分布不只受到模型所设定的光、温和水等自然条件的影响,也受到科学技术、生产投入和农业政策等社会经济因子的影响。基于空间模型的方法在理论上可以实现对农作物空间分布的模拟,但若缺乏对其他复杂因素的综合考虑,会影响模拟的效果。

2 农作物空间格局驱动力研究

农作物空间格局的形成和变化是自然因素和人类活动共同作用的产物,农作物空间格局的驱动力一般可分为自然驱动力和社会经济驱动力。农作物空间格局驱动力研究是对农作物空间分布变化内外部因素的剖析,是农作物空间格局模拟预测的基础。

2.1 自然驱动力研究

自然驱动力作为农作物空间格局驱动机制的子系统,包括气候、地形地貌、土壤和水文等。

国内外不少学者围绕自然驱动力与农作物的空间格局变化开展了一系列研究。OLESEN 等^[39]的研究表明, 气候变暖将使欧洲大部分农作物种植区向北移动。ROUNSEVELL 等^[40]以英国西北部为研究区, 分析了土壤和气候条件对小麦、玉米和大豆等农作物空间格局的影响机制。LOBELL^[41]分析了全球气候变化对农作物时空格局的影响。云雅如等^[42]研究指出黑龙江省 1980—2000 年水稻分布向北、向东扩展, 小麦分布向北退缩等农作物空间格局的变化与气候变暖密切相关。李志鹏^[43]初步解析了 1980—2010 年黑龙江省北部区域水稻空间格局演变对气候变化的响应机理。谭杰扬^[44]初步解析了 1980—2010 年东北地区玉米种植面积时空格局演变对气候变暖的空间响应关系。赵彦茜等^[45]研究发现辐射增强和气温升高有利于东北地区水稻种植, 而辐射减弱对南方地区的水稻种植产生不利影响。

2.2 社会经济驱动力研究

与自然驱动力的作用机制相比, 社会经济因子对农作物空间格局的驱动机制更加复杂^[46]。杨万江等^[47]发现中国的水稻种植空间布局受农业劳动力、化肥施用量、有效灌溉面积、水稻单产和耕地面积的影响正在发生着变化。徐慧等^[48]研究了中国大宗农作物的种植成本收益与空间格局变化的关系。王晶等^[49]发现农业生产要素投入、社会经济、资源环境、技术水平和市场要素是影响新疆粮食作物生产空间格局变化的主要因素。胡慧芝等^[50]研究发现长江流域粮食播种面积变化与农业化肥施用量均具显著性正向效益。

农作物空间格局受自然因素和社会经济因素的双重作用, 仅从自然驱动力或社会经济驱动力单一角度来分析农作物空间格局的变化过程可能会存在视角狭窄的问题^[51]。因此, 只有综合考虑自然和社会经济多因素, 并在不同的时空尺度下进行比较研究, 才能更全面、深入地理解农作物空间格局的动态变化特征和其背后的原因。基于多因子多尺度的空间统计分析研究方法, 正成为农作物空间格局动态变化机理研究的重要方向。陈实^[52]综合农业气候因子和人类活动因子, 定量解析了我国冬小麦种植北界界线形成和变迁的影响机制。王铎^[53]研究发现京津冀地区冬小麦种植面积受社会经济驱动力影响显著大于自然驱动力。纪文文^[54]以统计数据为基础, 通过 OLS 回归和空间回归方法分析了虾稻田空间分布格局的自

然驱动力和社会经济驱动力。林正雨等^[55]采用空间面板回归模型, 对四川省 1980—2015 年柑橘生产空间演变的自然驱动力和社会经济驱动力进行了实证分析。安悦^[56]通过对 2016 年湖南省主要农作物种植面积的影响因素进行定量分析, 发现社会经济、自然环境和农业发展等是农作物空间格局变化的关键影响因素。杜国明等^[57]研究发现 2000—2015 年三江平原农作物的种植面积和种植结构受到自然环境、社会经济、科学技术等多因素的共同影响。

3 农作物空间格局模拟预测研究

基于农作物空间格局驱动力研究, 借助农作物空间格局模型模拟分析农作物空间格局变化的时间特征和空间特征, 探索未来情景下的可能变化趋势, 已经成为农业土地变化研究的重要组成部分^[58]。早期的农作物空间格局模型以地理模型为主, 如马尔科夫模型 (Markov Model)、CLUE-S 模型 (Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent)^[59]、元胞自动机模型 (Cellular Automata Model, CA)^[60]和系统动力学模型 (System Dynamic Model, SD)^[61]。其中由适用于大尺度的 CLUE 模型发展而来的 CLUE-S 模型与马尔科夫模型、系统动力学模型相比, 空间表达能力更好^[62]。地理模型综合考虑多驱动因子的影响, 将外部模拟的农作物面积数量逐步分配到一定的地理空间单元中, 得出农作物面积的空间分布和数量变化结果, 可以用以研究农作物空间格局的驱动机制和变化过程, 但不能解释农作物空间格局变化的反馈性和动态性特征。此外, 地理模型基于自然科学方法, 注重对自然环境要素的研究而忽视对人类活动的研究, 往往不能分析个体行为、社会制度和经济体制等对农作物空间格局的影响。

基于主体的 ABM 模型 (Agent-based Model) 被用来评估独立主体在整个系统中的影响, 在社会学、计算机科学、经济学和商务等领域有着相当广泛的应用, 近年来 ABM 模型开始应用于农作物空间格局模拟研究^[63]。以 ABM 模型为代表的社会经济模型可以研究不同层次 (个体、家庭、社区和国家等) 的选择行为对农作物空间格局变化的影响, 极大地丰富和发展了传统研究的理论与方法, 有助于更加科学地理解和解释农作物空间格局变化的复杂性和动态性问题。因此,

社会经济模型与地理模型的耦合对农作物空间格局模拟预测研究显得尤为重要。

4 讨论与探讨

4.1 关于现有农作物空间格局研究的讨论

综上所述，在农作物空间格局重构研究领域，统计调查法、遥感提取法和空间模型分配法均存在优势和缺陷。基于空间模型的复合方法既可以充分利用多尺度、多信息源的数据，又可以弥补单一研究方法的缺陷，能大大提高研究结果的精度，代表了区域农作物空间信息重构技术的重要发展方向，该方法处于探索阶段。在农作物空间格局驱动力研究领域，仅从自然驱动力或社会经济驱动力单一角度来分析农作物空间格局的变化过程可能会存在视角狭窄的问题，基于自然和社会经济多因子多尺度的研究方法，正成为农作物空间格局驱动力研究的重要方向，但相关研究成果尚少；在农作物空间格局模拟预测研究领域，社会经济模型是地理模型的完善与补充，但目前

社会经济模型与地理模型结合的案例还不多见，构建耦合地理模型与社会经济模型、能够阐明微观主体决策和宏观变化互动机理的农作物空间格局模拟预测模型已经成为农业土地变化研究的关键问题之一。

4.2 关于未来农作物空间格局研究的探讨

未来，在农作物空间格局研究领域，需要建立农作物空间格局重构的复合方法，克服农作物空间分布信息获取单一方法的缺陷；在驱动力研究中引入社会经济因子，突破自然因子对农作物空间变化解释力度不够的瓶颈；建立耦合自然和社会经济因子的农作物空间模拟模型，模拟预测未来的变化趋势。此将为农作物空间格局重构及预测研究提供新方法和新思路，促进我国气候变化科学、土地变化科学和农业经济学等交叉学科和领域的发展。

为此，围绕“信息重构—特征描述—驱动分析—未来情景”的工作思路（图 1），开展农作物空间格局重构及预测研究，积极服务农业可持

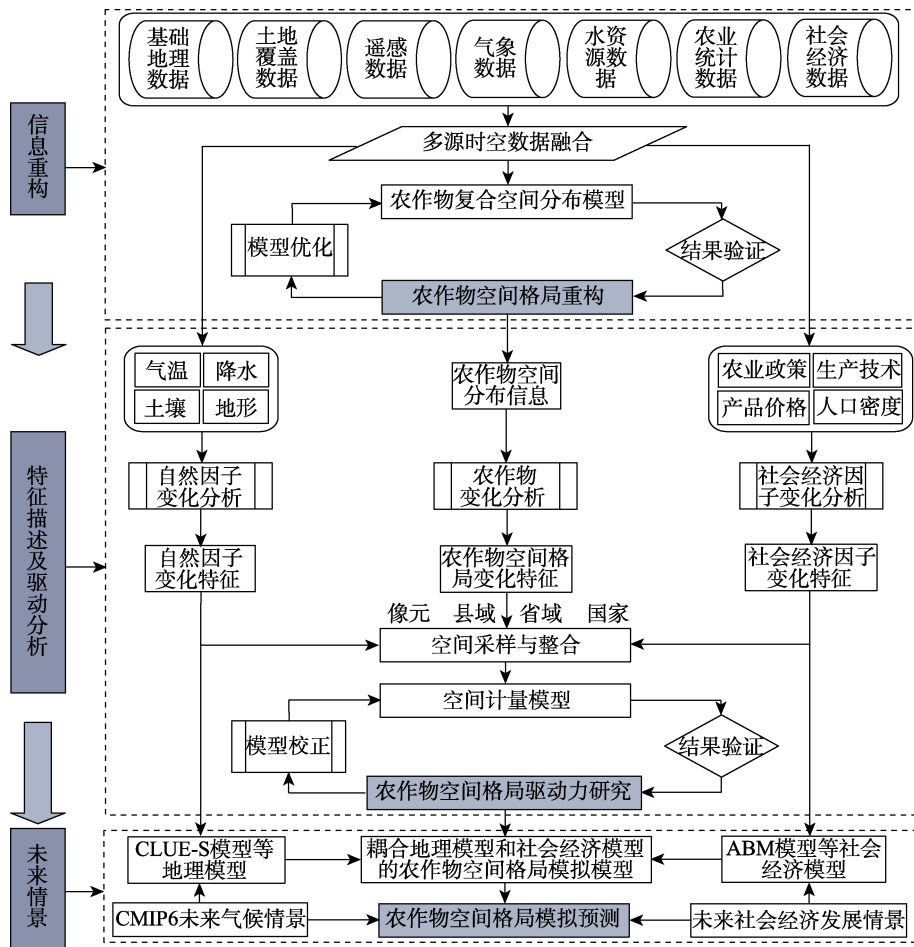


图 1 农作物空间格局研究思维导图

Fig. 1 Study mind map of crop spatial pattern

续发展、农业产业结构调整和优化。“信息重构”板块的研究可以实现主要农作物的种植动态监测,产出农作物系列空间分布“一张图”,相关研究成果可应用于农作物种植结构调整优化和农业生产布局,促进农业高质量发展,保障国家重要物质安全;“特征描述”板块的研究可以实现对农作物及其影响因子变化趋势的动态把握,相关研究成果可应用于农业资源利用、农业区域布局优化和农业结构调整,促进农业资源高效可持续利用,保障农业可持续发展;“驱动分析”板块的研究可以明确自然因素和社会经济因素对农作物空间分布的驱动机制,相关研究成果可应用于当前自然和社会经济条件下农业生态系统的优化,促进农业生态与自然和谐共生,有效保护和改善农业生态、社会 and 经济发展环境;“未来情景”板块的研究可以实现对农作物空间格局未来情景的预测,相关研究成果可应用于未来自然和社会经济条件下农业生态系统适应策略的拟定,提高农业生态系统综合调控能力,推进农业农村高质量发展,为全面推进乡村振兴提供有力支撑。

参考文献

- [1] 余强毅, 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 周清波, 陈仲新. Agent 农业土地变化模型研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1690-1700.
YU Q Y, WU W B, YANG P, TANG H J, ZHOU Q B, CHEN Z X. Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1690-1700. (in Chinese)
- [2] 李海亮, 郑倩. 在气候变暖的背景下农作物空间格局重构研究[J]. 中国农村科技, 2022(8): 62-63.
LI H L, ZHENG Q. Research of crop spatial information allocation under climate warming[J]. *China Rural Science & Technology*, 2022(8): 62-63. (in Chinese)
- [3] 夏天, 吴文斌, 余强毅, 杨鹏, 周清波, 唐华俊. 农作物空间格局动态变化模拟模型(CROPS)构建[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 44-51.
XIA T, WU W B, YU Q Y, YANG P, ZHOU Q B, TANG H J. Simulating the spatial dynamics of cropping pattern: the crops model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(1): 44-51. (in Chinese)
- [4] 吴文斌, 杨鹏, 李正国, 陈仲新, 周清波, 唐华俊. 农作物空间格局变化研究进展评述[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 12-20.
WU W B, YANG P, LI Z G, CHEN Z X, ZHOU Q B, TANG H J. Overview of research progresses in crop spatial pattern changes[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(1): 12-20. (in Chinese)
- [5] 郭泽林, 赵旭. 山东省粮经作物播种比例演变及结构优化研究——基于 1986—2015 统计数据[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(7): 164-171.
GUO Z L, ZHAO X. Evolution and structure optimization of grain and cash crops in Shandong province—based on 1986—2015 statistics data[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(7): 164-171. (in Chinese)
- [6] 申克建, 何浩, 蒙红卫, 孙冠楠. 农作物面积空间抽样调查研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(4): 11-16.
SHEN K J, HE H, MENG H W, SUN G N. Review on spatial sampling survey in crop area estimation[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(4): 11-16. (in Chinese)
- [7] 宋艳玲, 刘波, 钟海玲. 气候变暖对我国南方水稻可种植区的影响[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(4): 259-264.
SONG Y L, LIU B, ZHONG H L. Impact of global warming on the rice cultivable area in Southern China in 1961—2009[J]. *Climate Change Research*, 2011, 7(4): 259-264. (in Chinese)
- [8] OLMSTEAD A L, RHODE P W. Adapting North American wheat production to climatic challenges, 1839—2009[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(2): 480-485.
- [9] 陈浩. 中国东北地区水稻时空分布变化及其驱动因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
CHEN H. Spatio-temporal variation of rice area in Northeast China and its driving factors[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2017. (in Chinese)
- [10] 范玲玲. 过去 65 年中国小麦种植时空格局变化及其驱动因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
FANG L L. Spatio-temporal variation of wheat cultivation in China and its driving factors during the past 65 years[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018. (in Chinese)
- [11] 王利民, 刘佳, 季富华, 姚保民, 杨福刚. 中国小麦面积种植结构时空动态变化分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(18): 12-23.
WANG L M, LIU J, JI F H, YAO B M, YANG F G. Analysis of spatial-temporal dynamic change of wheat planting structure of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(18): 12-23. (in Chinese)
- [12] 佟越强, 聂江文, 臧华栋, 杨亚东, 曾昭海. 1961—2018 年全球青豌豆生产时空变化及发展趋势[J]. 作物杂志, 2022(3): 47-54.
TONG Y Q, NIE J W, ZANG H D, YANG Y D, ZENG Z H. Spatio-temporal dynamics and development tendency of global green pea production from 1961 to 2018[J]. *Crops*,

- 2022(3): 47-54. (in Chinese)
- [13] 李海亮, 刘恩平, 胡盛红, 刘海清, 戴声佩. 基于 GIS 的世界木薯生产时空变化分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(15): 268-274.
LI H L, LIU E P, HU S H, LIU H Q, DAI S P. Analysis on the temporal-spatial changes of cassava production in the world based on GIS[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(15): 268-274. (in Chinese)
- [14] LI Z G, LIU Z H, ANDERSON W, YANG P, WU W B, TANG H J, YOU L Z. Chinese rice production area adaptations to climate changes, 1949—2010[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(4): 2032.
- [15] 刘冬, 余侃华, 师小燕, 舒瑞妍. 陕西省种植业结构变化及时空演变分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(9): 251-261.
LIU D, YU K H, SHI X Y, SU R Y. Analysis of structural changes and spatial-temporal evolution of planting industry in Shaanxi[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(9): 251-261. (in Chinese)
- [16] 陈涛. 基于 GEE 的油菜种植面积遥感提取分析研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
CHEN T. Research on extraction and analysis of rapeseed planting area based on GEE[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] 黄安东. 基于时序遥感影像的安徽省种植制度动态监测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
HUANG A D. Dynamic monitoring of cropping system in Anhui province based on time-series remote sensing images[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [18] 许青云, 杨贵军, 龙慧灵, 王崇倡, 李鑫川, 黄登成. 基于 MODIS NDVI 多年时序数据的农作物种植识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 134-144.
XU Q Y, YANG G J, LONG H L, WANG C C, LI X C, HUANG D C. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 134-144. (in Chinese)
- [19] MAUS V, CMARA G, APPEL M, PEBESMA E. Dtsat: time-weighted dynamic time warping for satellite image time series analysis in R[J]. Journal of Statistical Software, 2019, 88(1): 1-31.
- [20] 张悦琦, 李荣平, 穆西哈, 任鸿瑞. 基于多时相 GF-6 遥感影像的水稻种植面积提取[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 189-196.
ZHANG Y Q, LI R P, MU X H, REN H R. Extraction of paddy rice planting areas based on multi-temporal GF-6 remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 189-196. (in Chinese)
- [21] GALFORD G L, MUSTARD J F, MELILLO J, GENDRIN A, CERRI C, CERRI C. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 576-587.
- [22] URSANI A A, KPALMA K, LELONG C C D, RONSIN J. Fusion of textural and spectral information for tree crop and other agricultural cover mapping with very-high resolution satellite images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 5(1): 225-235.
- [23] 潘力, 夏浩铭, 王瑞萌, 牛文辉, 田海峰, 秦耀辰. 基于 Google Earth Engine 的淮河流域越冬作物种植面积制图[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 211-218.
PAN L, XIA H M, WANG R M, NIU W H, TIAN H F, QIN Y C. Mapping of the winter crop planting areas in Huaihe River Basin based on Google Earth Engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 211-218. (in Chinese)
- [24] 徐慧, 张鹏林. 遥感影像像元不确定性对 SVM 分类结果可靠性影响研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 57-61.
XU H, ZHANG P L. Influence of remote sensing image pixel uncertainty on SVM classification reliability[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(5): 57-61. (in Chinese)
- [25] 游炯, 裴志远, 王飞, 吴全, 郭琳. 基于改进多元纹理信息模型和 GF-1 影像的县域冬小麦面积提取[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 131-139.
YOU J, PEI Z Y, WANG F, WU Q, GUO L. Area extraction of winter wheat at county scale based on modified multivariate texture and GF-1 satellite images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 131-139. (in Chinese)
- [26] 李昌俊. 基于深度学习的农业遥感图像耕地提取技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
LI C J. Research on cultivated land extraction technology of agricultural remote sensing images based on deep learning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [27] XUN L, WANG L. An object-based SVM method incorporating optimal segmentation scale estimation using bhattacharyya distance for mapping salt cedar (*Tamarisk* spp.) with QuickBird imagery[J]. GIScience & Remote Sensing, 2015, 52(3): 257-273.
- [28] 叶自然. 基于深度学习的农村住房遥感信息提取研究及时空演变应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
YE Z R. Study on deep learning-based extraction of rural housing and its spatiotemporal evolution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [29] ZOU Q, NI L H, ZHANG T, WANG Q. Deep learning based feature selection for remote sensing scene classification[J].

- IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(11): 2312-2325.
- [30] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, MURPHY K, YUILLE A L. Deeplab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(4): 834-848.
- [31] WEI S, ZHANG H, WANG C, WANG Y, XU L. Multi-temporal SAR data large-scale crop mapping based on U-Net model[J]. Remote Sensing, 2019, 11(1): 68.
- [32] 高黎. 基于多源遥感影像的冬小麦空间分布提取技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- GAO L. Research on spatial distribution extraction technology of winter wheat based on multi-source remote sensing images[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [33] 杨鹏, 吴文斌, 周清波, 查燕. 基于光谱反射信息的作物单产估测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 262-268.
- YANG P, WU W B, ZHOU Q B, ZHA Y. Research progress in crop yield estimation models based on spectral reflectance data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 262-268. (in Chinese)
- [34] WU W B, SHIBASAKI R, YANG P, TANG H J. Modeling changes in paddy rice sown areas in Asia[J]. Sustainability Science, 2010, 5: 29-38.
- [35] YOU L, WOOD S, WOOD-SICHTA U. Generating plausible crop distribution maps for Sub-Saharan Africa using a spatially disaggregated data fusion and optimization approach[J]. Agricultural Systems, 2009, 99(2/3): 126-140.
- [36] LIU Z H, YANG P, TANG H J, WU W B, ZHANG L, YU Q Y, LI Z G. Shifts in the extent and location of rice cropping areas match the climate change pattern in China during 1980—2010[J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(5): 919-929.
- [37] 唐鹏钦. 基于空间信息重构技术的东北三省作物种植结构时空演变研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- TANG P Q. Study on spatial-temporal evolution of crop planting patterns in Northeast China based on spatial information reconstruction technology[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [38] 杨其坡. 基于MaxEnt模型和多时相Sentinel-2影像的花椒识别研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- YANG Q P. Research on pepper identification based on Maximum Entropy model and multi-temporal Sentinel-2 images[D]. Chongqing: Southwest University, 2019. (in Chinese)
- [39] OLESEN J E, BINDI M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(4): 239-262.
- [40] ROUNSEVELL M D A, ANNETTS J E, AUDSLEY E, MAYR T, REGINSTER I. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 95(2/3): 465-479.
- [41] LOBELL D B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1443-1452.
- [42] 云雅如, 方修琦, 王媛, 陶军德, 乔佃锋. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-705.
- YUN Y R, FANG X Q, WANG Y, TAO J D, QIAO D F. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang province during the past two decades[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 697-705. (in Chinese)
- [43] 李志鹏. 近 30 年黑龙江水稻种植区域遥感提取及其时空变化分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- LI Z P. Landsat Image-based analysis on spatial-temporal changes of rice area in Heilongjiang province during the past three decades[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [44] 谭杰扬. 中国东北玉米时空格局对气候变暖的空间响应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- TAN J Y. Spatial response of maize distribution to climate warming in Northeast China during 1980—2010[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [45] 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 柏会子. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 317-326.
- ZHAO Y X, XIAO D P, TANG J Z, BAI H Z. Effects of climate change on the yield of major grain crops and its adaptation measures in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 317-326. (in Chinese)
- [46] 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J]. 经济地理, 2001, 21(1): 95-100.
- CHEN Y Q, YANG P. Recent progresses of international study on land use and land cover change(Lucc)[J]. Economic Geography, 2001, 21(1): 95-100. (in Chinese)
- [47] 杨万江, 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J]. 经济地理, 2011, 31(12): 2086-2093.
- YANG W J, CHEN W J. Studies on the spatial distribution changing of China's rice production and its influencing factors[J]. Economic Geography, 2011, 31(12): 2086-2093. (in Chinese)
- [48] 徐慧, 汪权方, 李家永, 张景雄, 孙佩. 1980年以来中国大宗作物空间格局变化分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 55-66.
- XU H, WANG Q F, LI J Y, ZHANG J X, SUN P. Variation of staple crops' spatial pattern in China since 1980a[J]. Re-

- sources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1): 55-66. (in Chinese)
- [49] 王晶, 肖海峰. 2000—2015 年新疆粮食生产时空演替与驱动因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(2): 58-66. WANG J, XIAO H F. The spatial-temporal pattern changes and driving factors of grain production in Xinjiang province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(2): 58-66. (in Chinese)
- [50] 胡慧芝, 王建力, 王勇, 龙晓泳. 1990—2015 年长江流域县域粮食生产与粮食安全时空格局演变及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 122-130. HU H Z, WANG J L, WANG Y, LONG X Y. Spatial-temporal pattern and influencing factors of grain production and food security at county level in the Yangtze River basin from 1990 to 2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 122-130. (in Chinese)
- [51] 唐华俊, 陈佑启, 邱建军, 陈仲新. 中国土地利用/土地覆盖变化研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. TANG H J, CHEN Y Q, QIU J J, CHEN Z X. Research on land use/land cover change in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [52] 陈实. 中国北部冬小麦种植北界时空变迁及其影响机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. CHEN S. The spatiotemporal shift of the northern limit of winter wheat in northern China and its influence mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
- [53] 王铎. 京津冀冬小麦时空分布格局变化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. WANG D. Spatiotemporal pattern of winter wheat in Beijing-Tianjin-Hebei region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
- [54] 纪文文. 湖北省潜江市水稻田时空格局变化及其驱动机制研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2021. JI W W. Study on the spatial-temporal patterns and driving mechanisms of rice-crayfish fields in Qianjiang city, Hubei province[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021. (in Chinese)
- [55] 林正雨, 陈春燕, 刘远利, 何鹏, 廖桂堂, 高文波, 曹杰, 邵周玲. 四川柑橘生产空间的时空演化及驱动机制研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(3): 58-69. LIN Z Y, CHEN C Y, LIU Y L, HE P, LIAO G T, GAO W B, CAO J, SHAO Z L. Spatial and temporal evolution and driving mechanism of citrus production area in Sichuan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(3): 58-69. (in Chinese)
- [56] 安悦. 湖南省农作物种植结构时空演变及影响因素研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. AN Y. Study on the evolution and driving mechanism of crop planting structure in traditional agricultural areas—a case study in Hunan province[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [57] 杜国明, 张扬, 李全峰. 21 世纪以来三江平原农作物种植结构演化研究[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(5): 736-744. DU G M, ZHANG Y, LI Q F. The evolution path of crop structure in the Sanjiang plain in the 21st century[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(5): 736-744. (in Chinese)
- [58] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 陈佑启, VERBURG P H. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 456-468. TANG H J, WU W B, YANG P, CHEN Y Q, VERBURG P H. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 456-468. (in Chinese)
- [59] 周锐, 苏海龙, 王新军, 李月辉, 胡远满, 许博涵. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2262-2270. ZHOU R, SU H L, WANG X J, LI Y H, HU Y M, XU B H. Simulation of land use change in Xinzhuang town under different scenarios based on the CLUE-S model and Markov model [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2262-2270. (in Chinese)
- [60] 孙玮健, 张荣群, 艾东, 王大海. 基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(Suppl. 1): 254-261. SUN W J, ZHANG R Q, AI D, WANG D H. Driving force analysis and scenarios simulation of land use based on cell automata model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Suppl. 1): 254-261. (in Chinese)
- [61] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化 SD 模型与模拟[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062-1084. CAO Q W, GU C L, GUAN W H. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1062-1084. (in Chinese)
- [62] 王艳妮. 基于 ABM 和 CLUE-S 的区域土地利用变化模拟研究——以陕西省米脂县为例[D]. 西安: 西北大学, 2016. WANG Y N. The simulation of the regional land-use change based on ABM and CLUE-S model: a case study of Mizhi county Shaanxi province[D]. Xi'an: Northwest University, 2016. (in Chinese)
- [63] 余强毅, 吴文斌, 陈羊阳, 杨鹏, 孟超英, 周清波, 唐华俊. 农作物空间格局变化模拟模型的 MATLAB 实现及应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 105-114. YU Q Y, WU W B, CHEN Y Y, YANG P, MENG C Y, ZHOU Q B, TANG H J. Model application of an agent-based model for simulating crop pattern dynamics at regional scale based on MATLAB[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 105-114. (in Chinese)