

DOI: 10.5846/stxb202010112588

刘珍环, 陆晓君. 农作物景观生态研究: 概念框架与研究方向. 生态学报, 2021, 41(24): 9953-9962.

Liu Z H, Lu X J. The conceptual framework and research direction of cropping landscape ecology. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9953-9962.

农作物景观生态研究: 概念框架与研究方向

刘珍环*, 陆晓君

中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

摘要: 针对当前农业系统中农作物景观变化迅速、人地关系趋于复杂、粮食安全保障需求迫切, 提出景观生态学和农业科学交叉产生的农作物景观生态研究这一新兴研究方向。通过构建农作物景观生态研究的概念框架, 阐明农业生产中复杂的景观等级结构, 为农业可持续发展提供理论依据。综述从农业景观到农作物景观的研究变化, 指出农作物景观具有高动态性、尺度性和格局复杂特征。针对由种植者、消费者、耕地及其周边自然环境组成的农业景观, 需要遵循相应的生态和农业经济发展规律, 研究农作物种植格局变化、农作物的社会-生态效应和农作物种植可持续性的景观生态途径。重点开展以下四个研究方面的内容, 农作物景观时空动态及其形成机理、农作物种植的多功能评价与权衡、景观农艺管理措施及情景模拟、可持续的农作物景观生态评价。从而构建“格局-过程-服务-管理-可持续性”的农作物景观生态研究范式, 为农业可持续发展提供综合的空间分析与管理途径, 为实现农业农村现代化与城乡人类福祉提升提供科学支撑。

关键词: 农作物景观; 生态系统服务; 景观农艺学; 农业可持续发展

The conceptual framework and research direction of cropping landscape ecology

LIU Zhenhuan*, LU Xiaojun

School of geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: In view of rapid crop change in agricultural system, we develop a conceptual framework of cropping landscape ecology to solve the complex interaction between human and agricultural land system, and maintain the urgently demand for food security. Frist, we analyze the hierarchical cropping landscape of agricultural system and spatial mechanism of human-land interaction, which may provide theoretical basis for agricultural sustainable development. The hierarchical level of cropping landscape can be divided into five levels. It is agricultural region, agricultural landscape, agri-ecosystem, farmland patches, and crops, which corresponding to landscape pattern, ecological process, ecosystem services, agricultural management policy and scale. We also summarize the difference between agricultural landscape and cropping landscape, and figure out that cropping landscape has the characteristics of high dynamic and complex pattern in different scales. Then, we design the framework of cropping landscape ecology research, which needs to consider the different agents of famer, consumers, cultivated land and its surroundings. It is suggested to follow the corresponding principles of landscape ecology and agricultural development. The framework can be composed by three parts, the cropping landscape pattern, the social-ecological effect of cropping pattern changes and the landscape ecological approach of agricultural sustainability. Cropping landscape pattern research describes the spatiotemporal pattern and driving mechanism of crop types change, identifies the key socio-economic factors, and understands the relationship between crop pattern and process. The social-ecological effect of crops includes its ecological process, resource environmental effect and crop diversity effect. Based on the scientific paradigm of landscape ecology, the sustainable cropping landscape regulation can be assigned in cropping

基金项目: 国家自然科学基金(41571172)

收稿日期: 2020-10-11; 网络出版日期: 2021-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzhh39@mail.sysu.edu.cn

landscape pattern-ecological process-ecosystem services-crop management-crop system sustainability. Moreover, four aspects are figure out future research, namely spatiotemporal dynamics of cropping landscape and its driving forces, multi-functional agricultural landscape, landscape agronomic management, and agricultural sustainability evaluation approaches. The crop pattern is the premise of relevant research. The multi-functional assessment and trade-off of cropping system are the basis to guide the policy of crop diversity and landscape agronomy management. Landscape agronomy and scenario simulation are the basis for policy makers and farmers to change cropping pattern and function. The sustainable assessment is based on the cropping pattern, process and ecosystem service to formulate the approach and design to evaluate the agricultural sustainability. In general, this study tries to design a sustainable landscape approach to serve the regulation of crop pattern. Cropping landscape ecology can be constructed to provide a comprehensive analysis and management approaches for agricultural sustainable development, and provide scientific foundation to achieve the agricultural and rural modernization and the improvement of human well-being.

Key Words: cropping landscape; ecosystem services; landscape agronomy; Agricultural sustainability

作为地球表层景观的组成部分之一,农业景观是人类社会赖以生存的基础,尤其是农作物格局在不同时空尺度上的变化,直接影响全球作物产量、农产品贸易、粮食安全和可持续发展^[1]。全球农业利用的土地面积约占陆地面积的 25%—30%,占可利用土地的比例接近 50%^[2]。农业景观的形成与区域历史、自然、人文等因素有密切关系,比自然景观具有更大的变异性^[3],而农作物是农业景观的组成核心。据 FAO 统计,全球规模种植的农作物大约有 300 种^[4],农业种植形成许多独特的景观,如中国的水稻、美国的玉米带、马来西亚的橡胶林和菲律宾的椰子林景观^[5]。农作物系统包含单一作物的空间分布特征和多种作物组合形成的种植制度特征,其实质反映了由人类农业生产活动和自然环境构成的复杂耦合系统^[6]。随着人类农业生产活动与自然环境之间不断融合,如何充分认识人类社会-自然生态耦合作用下的农作物种植格局变化,量化格局变化的空间响应是农业可持续发展面临的问题^[7]。

农业景观是人类经营的近自然景观类型,其演变受到自然条件和人类活动的双重影响。农业景观生态研究可揭示农业生态环境问题,指出农业种植结构调整方向,推动区域农业可持续发展^[8]。国际上,农业景观研究从最初景观格局^[9-10]和过程^[11]方向开展农业景观生态管理^[12-13]、农业生物多样性保护及农业景观可持续性研究^[14],到近期关注农作物变化对人类福祉的影响^[15]。国内,农业景观方面研究从农业景观规划与设计视角设计生态农业^[16]、休闲和都市观光农业^[17]和开展农业景观优化^[18],部分研究农业景观的格局与生态过程^[19-20],农田生态系统服务价值^[21],资源环境效应^[22],但尚较少开展农作物可持续性研究^[23-24]。

农业现代化和集约化生产导致农业景观均质化现象,农田中自然、半自然生境的减少导致农业生态系统多样性、生态系统稳定性和抗干扰能力降低,也导致农业景观与其他景观要素间功能联系减弱^[25]。亟待借助景观生态学科理论,构建农作物管理策略,促进农作物管理及保护生物多样性、提高农业生态系统服务、减少农业污染物排放及缓解和适应气候变化的影响。为此,本研究在梳理农业景观生态研究的基础上,面向从地块到农业区的多尺度研究耦合趋势,构建从农业景观深入到农作物景观的研究框架,为农作物景观生态研究提供理论支撑。

1 农业景观的等级结构

农业景观是农民通过管理其田地和相关特征(如田间边缘和半自然生境区)与自然和社会资源互动的系统^[26]。农业景观比自然景观具有更大的变异性,既受到自然环境的制约,又受到人类活动与社会经济条件的影响和干预^[4]。农业景观与森林景观、城市景观^[27]一样具有很强的空间异质性和等级结构。农业景观等级结构可分为从农业区到农作物的五个等级(图 1),对应着相应的景观格局、生态过程、生态系统服务、农业管理政策及研究尺度(表 1)。农业区的景观生态研究主要针对种植区划、作物分布界线、作物熟制影响下的景

观格局形成机制,关注气候变化、土地利用与社会经济过程对农业景观的影响,制定生产规划、生产结构与布局,农业资源开发与利用及生产基地建设等方面的农业管理政策的影响,通常时间和区域跨度大。景观层级由多个农田生态系统组成,研究农业土地利用斑块的空间格局及其环境变化,关注作物布局、生物多样性保护策略、非点源污染治理策略及生态观光农业规划等政策措施,尺度以区域和年际变化为主。农业生态系统是由多个农田斑块组成的,研究关注农作物类型与生态系统类型的组成格局,注重土壤有机碳管理、病虫害管理及其环境效应。农田斑块层级,关注农作物类型组成及其管理机制,生长期间的水量平衡、土壤过程和作物生产过程等。农作物层级,关注作物混种、轮种和休耕等管理措施下的作物种植模式及作物群落的生态功能;光合作用、水及营养物吸收等生态过程下的农作物格局。从农业景观层级的结构和动态研究尺度深入到农作物层级,有助于理解农业区的从高频动态到低频动态的多尺度等级结构。

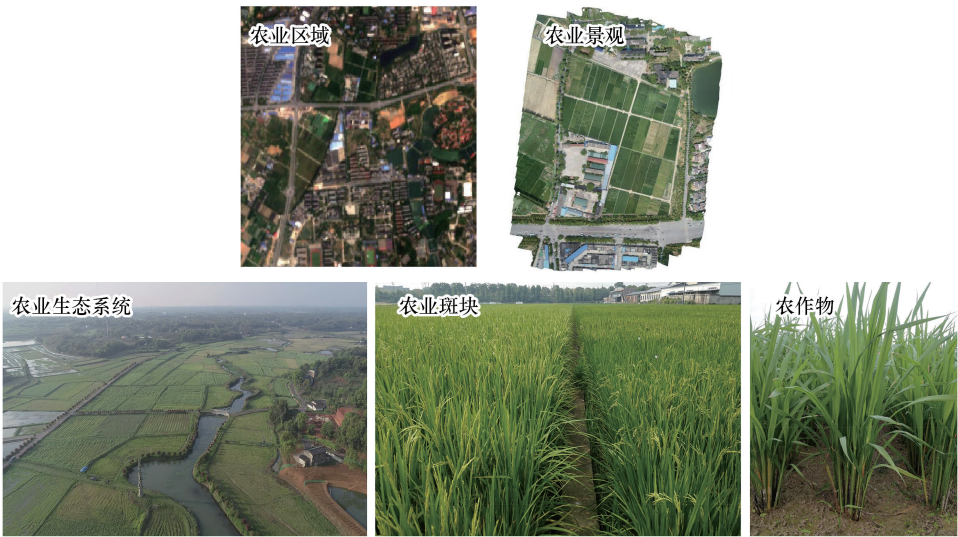


图 1 景观图例

Fig.1 Images of landscape

表 1 农业景观的等级结构

Table 1 The hierarchical level of agricultural landscape					
等级层次 Hierarchical Level	景观格局特征 Landscape patterns	时空尺度 Scales	生态过程 Ecological process	生态系统服务 Ecosystem service	农业管理措施 Agricultural management
农业区域 Agricultural region	景观(城市、农业、自然景观)的空间格局;背景生物物理要素的限制(土壤类型、气候、坡度);种植业大区、农作物熟制,其特点是占主导地位的农作物类型与区域土地利用格局	地市/省级/农业种植区/国家;十年至百年时间	全球变化(气候,CO ₂ , CH ₄ 排放,土地利用变化);区域土地利用格局与农业经济过程密切相关	供给服务、调节服务、支持服务及文化服务	农业资源开发与利用政策、种植业生产结构与布局、农作物商品生产基地、种植业生产规划制定
农业景观 Agricultural landscape	农业土地利用斑块(水田、旱地、果园、菜地、水浇地、农田水利设施用地)的空间格局	通常一公顷到几千平方公里范围;年际到百年	局地尺度的环境变化(土壤有机碳库、非点源污染、农业生物多样性)	供给服务、调节服务、支持服务及文化服务	粮食作物和经济作物布局、农业生物多样性保护策略、非点源污染治理策略、生态观光农业规划等等

续表

等级层次 Hierarchical Level	景观格局特征 Landscape patterns	时空尺度 Scales	生态过程 Ecological process	生态系统服务 Ecosystem service	农业管理措施 Agricultural management
农业生态系统 Agri-ecosystem	农作物类型 (C4/C3 作物) 与生态群落如草类、灌丛、树木、小池塘、沟渠、田坎等等	一公顷到几千平方公里范围; 年内到几十年尺度	管理及其环境效应 (施肥、病虫害治理、收割、灌溉及其降温效应)	供给服务、调节服务、支持服务及文化服务	土壤有机碳管理、病虫害管理
农田斑块 Farmland Patches	农作物类型的组成及其种植制度 (轮茬、多熟制、作物的结构与布局、复种与闲置)	一公顷到 100 公顷范围; 生长季到几十年尺度	水量平衡, 土壤过程, 作物生长过程等等	粮食生产、土壤保持、授粉、病虫害控制、作物基因多样性维持、休闲娱乐、农业景观美学	病虫害管理、作物管理
农作物 Crops	不同的农作物类型 (玉米、小麦、水稻、棉花、水果、蔬菜等) 的分布特征; 种植方式 (间作、套作、单作、混作) 和种植顺序 (轮作、连作); 农作物表型及作物有机体 (叶、根、茎、再生体、碳氮存储库)	一公顷到 100 公顷范围; 单株到地块范围 生长季;	再生和死亡率, 植物群落聚集的生态功能 (NPP, 碳存储), 光合作用	粮食生产、土壤保持、授粉、病虫害控制、作物基因多样性维持、休闲娱乐、农业景观美学	农作物多样性、作物混种、轮种、休耕等等; 施肥、浇水、病虫害管理

2 农作物景观生态研究框架

农作物景观生态学是通过认识和改善农作物景观格局与生态过程关系而实现农业可持续发展的交叉学科。农业可持续发展有很多维度, 但实现农业可持续性的根本目的仍是维持和改善农业景观中粮食生产能力和保障人类福祉。因此, 农作物景观生态学研究可以由三个相互作用的部分构成: 量化农作物种植格局及其形成机制, 评估农作物格局的社会-生态效应, 以及理解和提升农作物种植格局的可持续性 (图 2)。

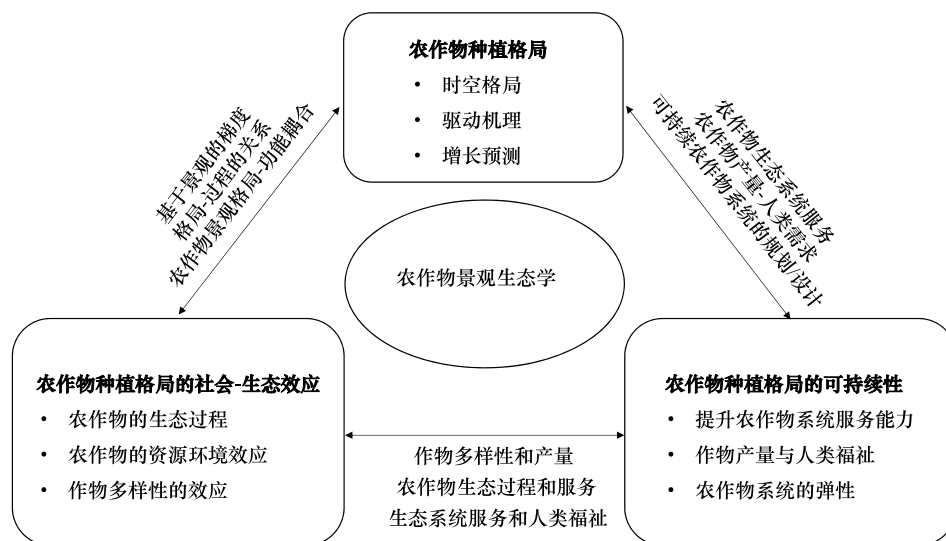


图 2 农作物景观生态的研究框架

Fig.2 A framework of cropping landscape ecology

2.1 农作物种植格局时空变化

农作物景观格局研究通过描述农作物的时空格局和驱动机制,识别关键的社会经济因子和资源环境驱动因子,开展农作物的时序变化监测与预测,从农作物分布理解农作物格局-过程关系。近些年,农作物空间格局在农业学者和地理学者的共同努力下,应用统计数据 and 遥感监测数据极大地推进了农作物分布制图^[28]。通过作物种植结构、熟制与种植方式的空间表达^[29],推动农作物的高频动态监测和空间变化研究^[30-31]。随着遥感技术的兴起,大量作物被遥感识别和动态监测^[32],多传感器、多时间分辨率、多空间分辨率的遥感数据在农作物空间分布研究中广泛应用^[33]。Xiao 等^[34-35]运用水稻特有的物候信息建立了指数,获取了中国和东南亚等地的单、双季水稻的中低分辨率空间分布制图^[36];Dong 等^[37]进一步结合 Google Earth Engine 平台提供的遥感大数据源,改进了水稻提取算法,推进到中高分辨的水稻制图。除了水稻作物之外,大量的其他种类作物也通过遥感技术开展空间制图,如小麦^[38-39]、玉米^[40]和经济作物^[41]。

经济农作物空间制图^[42-43]、多作物一张图^[44]等时效性数据越来越受到重视,多源空间数据被大量应用到农作物时空动态分布与预测研究中^[45-46]。美国通过建立作物遥感制图,逐年更新全国作物种植面积统计的计划^[47]。虽然已有大量的农作物空间制图研究,但缺乏农作物景观格局及其变化相关研究。究其原因首先是农业领域没有认识到农作物景观格局变化的重要性;其次,农作物景观的高动态性和作物单一性也使景观格局分析难以显现效益。未来需要在国家和农业区尺度上加强高时空动态特性的农作物景观制图及预测能力^[48]。通过构建机理模型解析农作物景观动态变化的原因^[49],模拟未来农作物动态结构变化^[50]。

农作物景观以田块为基础,作物在田块中分布较为规则、类型相对一致,适合开展景观生态研究(图2)。首先,聚焦农作物种植格局、形成及驱动机理、农作物种植面积动态增长预测,通过高频率、大范围、多种类的农作物监测与预测、土地利用变化的动态模拟等结合有效地推进农作物景观格局变化研究;然后,运用景观梯度分析,格局-过程耦合以及格局-功能耦合等经典景观生态学理论和方法,阐释农作物种植格局的社会-生态效应,可极大地促进农作物景观生态学的理论发展;最后,农作物种植格局与农业可持续性密切相关,是提升农业生态系统服务能力的对象,也是农业生态系统维持韧性的基础,通过评估农作物种植格局引起的生态系统服务变化,大规模调整农业种植结构^[51],设计和规划可持续性的农业系统是关联农作物种植格局与农业可持续发展的景观生态学途径^[52]。

2.2 农作物种植格局的社会-生态效应

农作物的社会-生态效应包含了其生态过程、资源环境效应和农作物多样性的效应等(图2)。全球变化、土地利用变化、局地环境变化及农业管理措施变化对农田生态系统产生了重要影响,改变农作物种植的生态过程^[53](表1)。农业生态过程的研究,在农作物层级关注农作物的作物类型和种植模式,作物物候及生长过程、光合作用及植物群落聚集的生态功能^[54];在农田斑块层级,重点关注水量平衡、农田土壤过程、作物生长等生态过程的影响及机制^[55-56];在农业生态系统层级,需要考虑施肥、病虫害治理、收割、灌溉等农田管理及其环境效应^[57];在农业景观层级,明晰农作物景观变化对生物多样性、农田生境破碎化、种群和群落过程、生态系统服务和农业景观多功能性的影响^[58];在农业区域层级,关注全球变化(极端气候、CO₂和CH₄排放、耕地变化)引起的农业经济过程变化^[59]。气候变化过程对早期的农业景观起到主导性作用,而当前农业技术的进步,农业人口密度、农产品价格、经济效益、市场因素以及区域农业政策等对农业生态过程和景观格局都有显著影响^[60]。

耕地数量减少和质量下降,农业用水受限,农业劳动力数量锐减和农业环境污染加剧等资源环境问题一直是约束农业可持续发展的重要条件,转变农业土地利用方式,减少农业作物的生态足迹和温室气体排放,是通过改变农作物种植格局调控社会-生态效应的重要途径^[61]。此外,农药使用格局特征与环境过程、有机废弃物循环利用带来的新型污染物(抗生素抗性基因、微塑料等)的生态过程响应及其环境效应等,与农业土壤健康和食品安全密切关联,也可以是农作物种植格局的社会-生态效应的主要内容。农作物随经济活动变化频繁,均质化和集约化是农业区的典型种植模式,对景观功能和生态过程都产生显著性的影响^[62]。以提升耕

地资源、水质和农业投入利用效率为切入点,构建健康、安全和可持续的农业资源环境系统^[63]。

尽管与自然生态系统相比,农业生态系统服务能力有所下降,但其在提供农产品的同时还在向人类提供大量的生态系统服务^[64],其中粮食生产、土壤保持、授粉、病虫害控制、作物基因多样性维持、休闲娱乐和农业景观美学等多项生态系统服务都是农业生态系统的重要功能。研究表明农业区维系了全球约 50% 的野生濒危物种^[61]。农业景观生物多样性丧失严重,特别是遗传资源保护、害虫生物控制、自然授粉及鸟类和昆虫类栖息地的功能丧失^[61];农田半自然生境面积减少,食物链网络简化,直接导致生物多样性的损失^[65]。

2.3 农作物种植格局可持续性的景观生态途径

“格局-过程-功能-服务-可持续性”的级联范式影响着当代景观生态学的理论与实践^[66]。通过定量分析农作物种植格局的动态特性,评估其对农作物生态过程和功能的影响,提升农业生态系统服务能力,实现农业可持续发展,也可遵循“格局-过程-服务-管理-可持续性”范式开展农作物景观生态研究(图 3)。农作物种植格局的大规模变化与农业管理措施与政策如高标准农田建设、耕地质量建设、农业土地规模化经营密切相关,基于此开展农业生态修复、提升农业生态系统服务能力、保护生物多样性是农业可持续发展的景观调控途径^[62]。将农作物景观生态调控途径通过农作物景观格局、生态过程、生态系统服务、农田生产管理和农作物种植可持续性五个部分进行解构,开展方法集成,研究目标和内容有机结合,为实现农业生物多样性保护和粮食稳产增产的生态系统权衡与协同的多重目标实现双赢(图 3)。

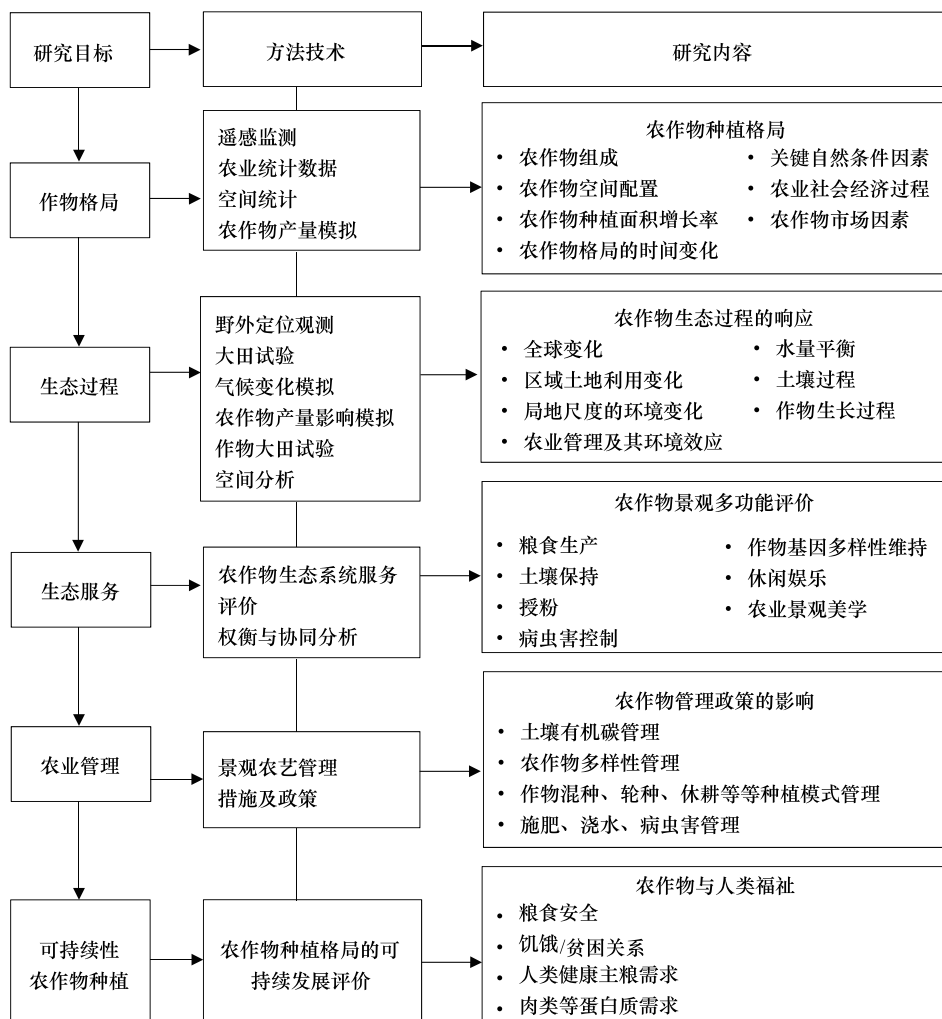


图 3 农作物种植系统可持续性的景观生态途径

Fig.3 An integrated landscape ecology approach for cropping system sustainability

3 农作物景观生态研究的主要方向

基于农业景观等级结构及农作物景观生态研究框架的梳理,当前农作物景观生态研究可从农作物格局时空动态及其形成机理、农作物种植的多功能评价及权衡、景观农艺管理措施及情景模拟、可持续的农作物种植系统的景观生态评价四方面入手开展农作物景观生态研究,其关联关系见图 4。其中,农作物格局时空动态及其形成机理是数据与理论基础,为相关研究的前提;农作物种植的多功能评价及权衡是指导农业作物多样性战略规划及农业管理措施制定的依据;景观农艺管理措施制定及其情景模拟为政策制定者和农户生产者等依据格局和功能的变化及其空间结构优化提供实践应用和策略;可持续途径评价与设计是在格局、过程和服务规律基础上,基于管理措施情景,制定评判可持续能力的途径与设计,最终服务于调控农作物种植格局。

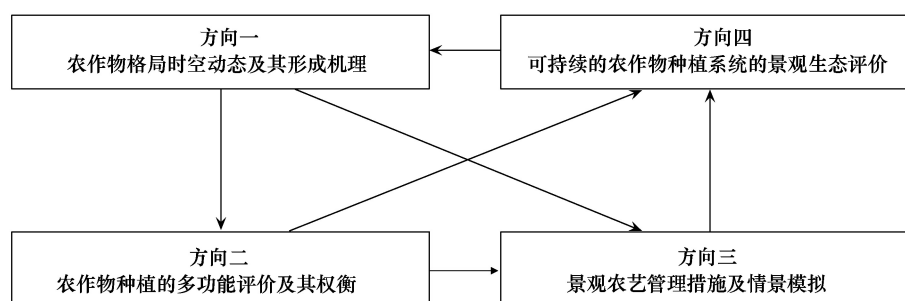


图 4 农作物景观生态的近期研究方向

Fig.4 The research directions of cropping landscape ecology

3.1 农作物格局时空动态及其形成机理

农业景观格局与生态过程是景观生态学研究的传统领域,是农作物景观受到农业综合布局和种植制度的结果,然而各尺度上的农作物种植格局变化规律及其形成机理尚不完全清晰。未来需要针对农作物的高动态性及均质性,开展农业景观格局方面的研究;重点探讨农作物组成、空间配置及其种植面积的变化,阐释农作物景观格局变化规律及其驱动机制。加强遥感监测能力与统计数据的精度,分析农作物景观的年内、年际动态特征,针对全国、区域及局地尺度的农作物组成特征,开展农作物格局动态分析及其驱动机制的关键自然条件变化、农业社会经济要素及市场要素对信息快速反映的农作物系统动态模拟,为进一步的农作物生态过程、生态系统服务及农业管理提供基础数据。

3.2 农作物种植的多功能评价及权衡

多功能农业景观是促进农业可持续发展与人类福祉提升的重要途径^[22]。农业景观多功能评价,通过集成现有的农业生态系统服务评价模型,针对农业景观多功能的特性,开展粮食生产、土壤保持、自然授粉、病虫害控制、作物多样性基因维持、休闲娱乐及农业景观美学等生态系统服务的评价,提升农田生态系统生态服务能力^[67]。目前,农业景观服务的权衡与协同尚未清晰。农业多种功能之间的关联,多功能农业景观的空间制图、农业多功能相互作用机理解析、动态演变及其趋势预测、情景模拟等尚待推进^[68]。我国农业发展进入新阶段,绿色发展和集约化生产成为新趋势,高标准农田建设及农业土地整理,改变了区域农业的生态系统服务能力;授粉服务、调节服务和水土涵养等多方面的生态服务发生了变化,揭示多功能农业景观的权衡机理,实现农业景观功能的综合效益最大化,是当前农业景观多功能评价关键问题^[69]。

3.3 景观农艺管理措施及情景模拟

农业管理主要开展农田土壤有机碳、种植模式、作物多样性管理等技术措施,以及施肥、浇水及病虫害管理等对农作物种植格局的影响。景观农学是明晰农作物格局的农业管理产生特征与通过探讨农业管理实践是如何影响景观格局,进而推进农业景观设计;开展农业管理、自然资源与景观格局之间的关系及其如何影响农业景观动态^[26]。景观研究向决策者提供有关农业景观动态带来正面和负面影响需要面对的知识^[26],以便

促进对多功能景观设计的支持。以往,景观农艺忽视农田周边的局地景观,产生了不少的农业生态环境问题^[70],需反思农业的增长模式,减少对自然资源的影响和提升农业生态系统服务的能力。提升作物空间异质性是增加营养多样性的有效方法,但利用农作物空间异质性制定粮食稳定增产的政策尚未引起决策者重视,需要制定管理措施情景模拟的方式,为决策者提供政策工具。

3.4 可持续的农作物种植系统的景观生态评价

维持农业可持续发展的一个关键问题是如何满足对初级产品日益增长的需求,同时保留甚至加强生态系统服务。农业可持续性考虑为当今人口提供充足的粮食、纤维和燃料供应,同时不损害向子孙后代提供同样服务的能力^[14]。农业可持续性取决于多种因素,例如:分析的目的、生产和分配系统、政策条件、利益相关者的价值、位置、时间影响、空间尺度、基数和情景^[14],在当地和不同的农业生态、经济和社会条件的具体限制范围内实现。农业生产涉及以合理的价格为所有人都提供高质量的饮食,维持农民的收入,维持农业系统的自然资源基础(如土壤质量),以及维持生态系统的支持和供给功能。农作物与人类福祉更多涉及粮食安全,解除饥饿,对主粮和蛋白质需求等等。因此,有必要基于长时序序列数据的农作物景观格局与农业生态系统服务动态变化规律,以人类需求与福祉为目标,调控农业生产活动和开展农业景观可持续性能力设计。

致谢:感谢湖南省农业科学院谭杰扬老师提供水稻影像与图片,感谢北京大学彭建教授,北京师范大学刘焱序博士对写作的帮助。

参考文献(References):

- [1] 王仰麟. 农业景观格局与过程研究进展. 环境科学进展, 1998, 6(2): 30-35.
- [2] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418 (6898): 671-677.
- [3] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析. 生态学报, 1995, 15(2): 113-120.
- [4] Jacques P J, Jacques J R. Monocropping cultures into ruin: the loss of food varieties and cultural diversity. *Sustainability*, 2012, 4(11): 2970-2997.
- [5] Spencer J E, Horvath R J, 张落成. 农业景观的形成与演化. 世界农业, 1997, 11: 10-12.
- [6] 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. 地理学报, 2009, 64(4): 456-468.
- [7] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 夏天, 杨鹏, 李正国. 农业土地系统研究及其关键科学问题. 中国农业科学, 2015, 48(5): 900-910.
- [8] 赵华甫, 张凤荣. 北京市农业景观格局变化及功能区划. 农业工程学报, 2008, 24(S1): 78-84.
- [9] Corry R C. Characterizing fine-scale patterns of alternative agricultural landscapes with landscape pattern indices. *Landscape Ecology*, 2005, 20 (5): 591-608.
- [10] Ruiz J, Domon G. Analysis of landscape pattern change trajectories within areas of intensive agricultural use: case study in a watershed of southern Québec, Canada. *Landscape Ecology*, 2009, 24(3): 419-432.
- [11] Brady M, Sahrbacher C, Kellermann K, Happe K. An agent-based approach to modeling impacts of agricultural policy on land use, biodiversity and ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2012, 27(9): 1363-1381.
- [12] Orchard P W, Hackney B. A simple tool for extending agronomic management on a landscape basis. *Landscape Ecology*, 2016, 31(2): 239-242.
- [13] Augstburger H, Jacobi J, Schwilch G, Rist S. Agroecosystem service capacity index—a methodological approach. *Landscape Online*, 2018, 64: 1-48.
- [14] Dale V H, Kline K L, Kaffka S R, Langeveld J W A. A landscape perspective on sustainability of agricultural systems. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1111-1123.
- [15] Corry R C. How measures of agricultural landscape patterns are affected by crop rotation dynamics. *Landscape Ecology*, 2019, 34(9): 2159-2167.
- [16] 王仰麟, 陈传康. 论景观生态学在观光农业规划设计中的应用. 地理学报, 1998, 53(S1): 21-27.
- [17] 黄姣, 马冰滢, 李双成. 农业多功能性与都市区土地利用管理——框架和案例分析. 地理研究, 2019, 38(7): 1791-1806.
- [18] 冯舒, 汤茜, 丁彦彦. 农业景观农地和非农绿地斑块属性特征及其结构优化研究——以河南省封丘县为例. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 733-740.
- [19] 付梅臣, 胡振琪, 吴淦国. 农田景观格局演变规律分析. 农业工程学报, 2005, 21(6): 54-58.

- [20] 赵羿, 郭旭东. 景观农业研究的兴起及其实际意义. 生态学杂志, 2000, 19(4): 67-71.
- [21] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 645-651.
- [22] 张保华, 谷艳芳, 丁圣彦, 梁国付. 农业景观格局演变及其生态效应研究进展. 地理科学进展, 2007, 26(1): 114-122.
- [23] Yu Q Y, Hu Q, Van Vliet J, Verburg P H, Wu W B. GlobeLand30 shows little cropland area loss but greater fragmentation in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 66: 37-45.
- [24] 胡琼, 吴文斌, 宋茜, 余强毅, 杨鹏, 唐华俊. 农作物种植结构遥感提取研究进展. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1900-1914.
- [25] 彭建, 赵士权, 田璐, 刘焱序, 刘志聪. 北京都市农业多功能性动态. 中国农业资源与区划, 2016, 37(5): 152-158.
- [26] Benoît M, Rizzo D, Marraccini E, Moonen A C, Galli M, Lardon S, Rapey H, Thenail C, Bonari E. Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 2012, 27(10): 1385-1394.
- [27] Zhang C, Wu J G, Grimm N B, McHale M, Buyantuyev A. A hierarchical patch mosaic ecosystem model for urban landscapes: model development and evaluation. *Ecological Modelling*, 2013, 250: 81-100.
- [28] 黄青, 唐华俊, 吴文斌, 李丹丹, 刘佳. 农作物分布格局动态变化的遥感监测——以东北三省为例. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2668-2676.
- [29] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 周清波, 陈仲新. 农作物空间格局遥感监测研究进展. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2879-2888.
- [30] 唐华俊. 农业遥感研究进展与展望. 农学学报, 2018, 8(1): 175-179.
- [31] 董金玮, 吴文斌, 黄健熙, 尤南山, 何盈利, 闫慧敏. 农业土地利用遥感信息提取的研究进展与展望. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 772-783.
- [32] 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. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 12-20.
- [33] Liu Z H, Hu Q, Tan J Y, Zou J Q. Regional scale mapping of fractional rice cropping change using a phenology-based temporal mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(7): 2703-2716.
- [34] Xiao X M, Boles S, Frolking S, Li C S, Babu J Y, Salas W, Moore III B. Mapping paddy rice agriculture in south and southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 95-113.
- [35] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, Zhuang D F, Frolking S, Li C S, Salas W, Moore III B. Mapping paddy rice agriculture in southern china using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 480-492.
- [36] Zhang G L, Xiao X M, Dong J W, Kou W L, Jin C, Qin Y W, Zhou Y T, Wang J, Menarguez M A, Biradar C. Mapping paddy rice planting areas through time series analysis of MODIS land surface temperature and vegetation index data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 106: 157-171.
- [37] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, Zhang G L, Qin Y W, Thau D, Biradar C, Moore III B. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 142-154.
- [38] Lobell D B, Asner G P. Cropland distributions from temporal Unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3): 412-422.
- [39] 王利民, 刘佳, 姚保民, 高建孟, 杨福刚. 综合 NDVI 时序特征的冬小麦混合像元分解及面积估算. 中国农学通报, 2019, 35(27): 23-33.
- [40] 刘佳, 王利民, 滕飞, 杨福刚, 姚保民. 玉米大豆轮作遥感监测技术研究. 中国农学通报, 2017, 33(8): 144-153.
- [41] Hu Q, Sulla-Menashe D, Xu B D, Yin H, Tang H J, Yang P, Wu W B. A phenology-based spectral and temporal feature selection method for crop mapping from satellite time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 80: 218-229.
- [42] 王利民, 刘佳, 高建孟. 中国苹果空间分布格局及年际动态变化分析. 中国农业信息, 2019, 31(4): 84-93.
- [43] Wang J, Xiao X M, Liu L, Wu X C, Qin Y W, Steiner J L, Dong J W. Mapping sugarcane plantation dynamics in Guangxi, China, by time series sentinel-1, sentinel-2 and Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111951.
- [44] 刘佳, 王利民, 季富华, 滕飞, 姚保民. 农作物种植面积“一张图”遥感监测业务设计及应用. 中国农业信息, 2018, 30(4): 77-89.
- [45] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 李志鹏, 吴文斌, 杨鹏, 游良志, 唐华俊. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析. 地理学报, 2013, 68(5): 680-693.
- [46] 黄青, 唐华俊, 周清波, 吴文斌, 王利民, 张莉. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测. 农业工程学报, 2010, 26(9): 218-223.
- [47] Johnson D M. A 2010 map estimate of annually tilled cropland within the conterminous united states. *Agricultural Systems*, 2013, 114: 95-105.
- [48] Schaller N, Lazrak E G, Martin P, Mari J F, Aubry C, Benoît M. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology*, 2012, 27(3): 433-446.
- [49] Hu Y N, Fan L L, Liu Z H, Yu Q Y, Liang S F, Chen S, You L Z, Wu W B, Yang P. Rice production and climate change in northeast China: evidence of adaptation through land use shifts. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2): 024014.
- [50] 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. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 44-51.

- [51] 罗其友, 刘洋, 唐华俊, 周振亚, 尤飞, 高明杰. 新时期我国农业结构调整战略研究. 中国工程科学, 2018, 20(5): 31-38.
- [52] 王仰麟, 韩荡. 区域农业持续性与持续发展研究. 自然资源学报, 1998, 13(4): 297-303.
- [53] 张小飞, 彭建, 王仰麟, 吴文斌, 杨鹏, 刘焱序, 宋治清, 薛怡珍. 全球变化背景下景观生态适应性特征. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1167-1175.
- [54] 刘玉洁, 葛全胜, 戴君虎. 全球变化下作物物候研究进展. 地理学报, 2020, 75(1): 14-24.
- [55] 孙波, 朱兆良, 牛栋. 农田长期生态过程的长期试验研究进展与展望. 土壤, 2007, 39(6): 849-854.
- [56] 张少良, 张海军, 肖梓良, 曲凤娟, 王雪珊, 霍纪平, 张兴义, 刘晓冰. 东北典型黑土区农田景观多尺度土壤养分时空分异研究进展. 东北农业大学学报, 2020, 51(7): 86-96.
- [57] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 王玉英, 李晓欣, 董文旭. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501-1514.
- [58] van Zanten B, Verburg P H, Espinosa M, Gomez-Y-Paloma S, Galimberti G, Kantelhardt J, Kapfer M, Lefebvre M, Manrique R, Piore A, Raggi M, Schaller L, Targetti S, Zasada I, Viaggi D. European agricultural landscapes, common agricultural policy and ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 309-325.
- [59] 俄有浩, 霍治国, 赵花荣, 马玉平. 华北平原农田 CO₂ 浓度变化特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6613-6620.
- [60] 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. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2032-2037.
- [61] Zhang G L, Xiao X M, Dong J W, Xin F F, Zhang Y, Qin Y W, Doughty R B, Moore III B. Fingerprint of rice paddies in spatial-temporal dynamics of atmospheric methane concentration in monsoon Asia. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 554.
- [62] 孙玉芳, 李想, 张宏斌, 陈宝雄, 李焱奎, 刘云慧, 宇振荣. 农业景观生物多样性功能和保护对策. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 993-1001.
- [63] 石玉林, 唐华俊, 王浩, 高中琪, 汪林, 张红旗, 刘宏斌, 罗其友, 王立新, 席北斗, 黄彩红, 李瑞, 许尔琪, 崔正国. 中国农业资源环境若干战略问题研究. 中国工程科学, 2018, 20(5): 1-8.
- [64] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [65] Li L, Hu R C, Huang J K, Huang J K, Bürgi M, Zhu Z Y, Zhong J, Lü Z. A farmland biodiversity strategy is needed for China. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(6): 772-774.
- [66] 中国生态学会. 2016-2017 景观生态学学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2018: 3-3.
- [67] 汤茜, 丁圣彦. 多功能农业景观: 内涵、进展与研究范式. 生态学报, 2020, 40(13): 4689-4697.
- [68] 彭建, 吕慧玲, 刘焱序, 陈昕, 胡晓旭. 国内外多功能景观研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(4): 465-476.
- [69] 彭建, 刘志聪, 刘焱序. 农业多功能性评价研究进展. 中国农业资源与区划, 2014, 35(6): 1-8.
- [70] 宇振荣, 胡敦孝, 王建武. 试论农田边界的景观生态功能. 生态学杂志, 1998, 17(3): 53-58.