

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20140103

· 农业遥感专栏 ·

农作物空间格局变化研究进展评述^{*}

吴文斌^{1,2}, 杨 鹏^{1,2}, 李正国^{1,2}, 陈仲新^{1,2}, 周清波^{1,2}, 唐华俊^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要 农作物空间格局及其时空动态变化研究具有重要的理论和实际意义, 已经成为地理学和生态学的前沿和热点研究问题。该文从农作物空间格局变化的特征、机理机制和模拟模型等3个方面系统总结了国内外最新研究进展, 讨论了研究中存在的关键问题, 并对未来发展趋势和重点进行了展望。研究认为, 农作物空间格局变化特征研究主要包括基于统计数据的方法、基于遥感信息的方法和基于空间模型的方法。农作物空间格局变化机理研究主要围绕不同自然-社会经济驱动因子对农作物格局演变的作用机制开展, 剖析农作物空间格局演变的内外部原因。农作物空间格局变化模拟模型从早期非空间模型发展到空间模型, 而且越来越多模型对微观农户的作物选择或决策行为及其对农作物空间格局变化的影响给予了很多关注。在未来相当长的一段时间内, 基于多尺度和多信息源数据融合的农作物空间格局变化特征提取、综合自然-社会经济多因素、宏观和微观多层次、静态和动态多机制的农作物空间格局变化机理分析、以及多学科和多方法综合的农作物空间格局变化模拟模型构建将是农作物空间格局变化研究的重点发展方向。

关键词 农作物空间格局 变化 特征 机理 模型

农业土地利用是人类为了自身的生存和发展需求而有意识地对土地资源进行开发、经营和利用的活动, 是土地系统的重要组成部分^[1]。农作物空间格局是一个地区或生产单位作物种植结构、熟制与种植方式的空間表达, 主要包括: 农作物的组成与布局, 即种植什么和在哪里种植的问题; 农作物的复种或休闲, 即一年几熟或几年几熟的问题; 农作物的种植方式, 即如何种植的问题, 包括连作、轮作、间种与套种等^[2]。农作物空间格局是农业土地利用的一种形式和结果, 反映了人类农业生产在空间范围内利用农业生产资源的状况, 是了解农作物种类、结构、分布特征的重要信息, 也是进行作物结构调整和优化的依据。同时, 农作物空间格局特征及其时空动态变化信息也是研究农业生态系统对陆地碳循环贡献, 评价全球变化对区域农业生产影响的基础。因此, 农作物空间格局及其时空动态变化研究具有重要的理论和实际意义, 已经成为地理学和生态学的前沿和热点研究问题^[3]。

人类发展的历史是不断对土地加以开发利用和对土地覆盖进行改造的历史, 农业土地利用或农作物空间格局处于动态变化之中。自20世纪90年代以来, 国际地圈生物圈计划与国际全球环境变化人类行为计划的共同执行土地利用/覆盖变化研究(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)以及后续全球土地计划(Global Land Project, GLP)的实施, 极大促进了“土地变化科学”的诞生与发展^[4-7]。农作物空间格局变化研究无论在理论和方法方面, 还是在实践方面都取得了长足的进展。文章将重点围绕农作物空间格局变化的特征、机理机制和模拟模型等方面的研究进展进行归纳和总结, 讨论已有或目前研究中存在的关键问题, 并对未来发展趋势和重点进行展望, 以飨读者。

1 农作物空间格局变化特征研究

农作物空间格局特征主要包括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。农作物

收稿日期: 2013-11-08 吴文斌为副研究员 杨鹏为研究员 李正国为副研究员 陈仲新、周清波均为研究员 唐华俊为研究员、副院长

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(40930101和41271112)、全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951504)、农业部农业科研杰出人才基金项目

空间格局变化信息获取方法主要有 3 种：基于统计数据的方法、基于遥感信息的方法以及基于空间模型的方法。基于统计数据分析是获取农作物空间格局变化信息的传统方法，已广泛应用于大区域尺度和长时间序列农作物空间格局及其变化分析研究。如张莉等利用统计数据分析了黑龙江省宾县过去 15 年农作物空间格局变化特征和规律^[8]，Lobell 等分析了气候变化影响下全球作物产量的时空格局特征^[9]。统计方法的优势是不仅可以获取统计单元内农作物空间格局变化的数量和速率等特征的详细信息，还可以提供与农作物生长、农业生产紧密相关的其他信息，如作物物候期、灌溉量、施肥量、投入成本和动力费用等。

遥感技术作为一种高新技术，因成本低、迅速和准确的优点正被广泛应用于对地观测活动中。目前，多传感器、多时间分辨率、多空间分辨率的遥感数据在不同时空尺度的农作物空间格局动态变化研究中得到了广泛应用。农作物遥感识别和变化监测方法从最初目视解译法发展到基于统计学的分类法（如结合地面样点的监督分类方法、多时相分类方法、多元数据结合分类法等），以及其它遥感分类法（如神经网络方法、模糊数学分类法、专家系统分类法、混合像元分解法等）^[3]。自 1997 年起，美国农业部国家农业统计中心利用多源中高分辨率遥感影像，制作美国每年度作物分布图（Cropland data layers, CDL）^[10]。徐新刚等利用高空间分辨率的 QuickBird 数据提取了作物种植面积分布^[11]，张国平^[12]和 Liu 等^[13]等利用 Landsat TM 数据监测了农业耕地或作物空间分布及其动态变化。Jakubauskas 等^[14]和李景刚等^[15]则分别探索了利用低空间分辨率 NOAA/AVHRR 数据进行大区域耕地或作物空间格局动态变化的研究。近几年来，中低空间分辨率的 MODIS 数据更是在大区域的作物空间分布监测中发挥了重要作用^[16-19]。此外，根据作物的生长季节性特点，利用时间序列植被指数构建作物生长曲线，不仅可以实现多种作物空间分类提取，还能获取区域复种指数^[20-22]、轮作方式^[23]、物候特征^[24-25]、耕地废弃^[26]等空间分布格局。

通过将农作物光合、呼吸、蒸腾、营养等一系列生理生化过程所需要的气候和土壤条件等公式化，再与各地域的光、温、水、土壤、地形以及农业生产条件等建立链接，就可以构建空间模型来获取农作物空间格局信息。基于模型的方法主要考虑了与农作物品种相对应的农业气候和土壤条件的阈值区间，实现了对不同农作物的潜在空间分布模拟。Tan 等利用作物潜在热量值、最适生长温度、最低临界生长温度和生育期日数等基本作物生理参数，在全球尺度模拟了单一作物（春小麦或冬小麦）、冬小麦—玉米、水稻—水稻等 7 种作物种植制度的潜在空间分布区域^[27]。基于空间模型的方法不仅可以应用于不同地域尺度的农作物空间分布现状模拟，也可用于未来气候变化情景下的农作物空间分布模拟预测^[28-29]，有效弥补基于统计数据和遥感信息方法的不足。

2 农作物空间格局变化机理研究

农作物空间格局变化机理研究在于了解农作物空间格局从一个状态变化到另一个状态的动态过程，剖析农作物空间格局的演变的内外部原因，确定不同自然—社会经济驱动因子对作物格局演变的作用机制。

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。自然驱动力作为一个系统，可以分成不同的组成部分，如气候、土壤、水文等。各部分还可以继续划分，如气候因素可以细分为平均温度、极端温度、积温、降水、无霜期等^[1]。国内外不少学者应用多种系统分析与数理统计方法分析了自然生态环境变化（如气温增加、降水变化、土壤养分变化等）对农作物空间格局的影响。云雅如等研究指出黑龙江省过去 20 年水稻播种范围向北和向东扩展，种植面积比重显著增加，小麦种植范围大幅向北退缩，与气候变暖带来的积温增加及积温带北移东扩密切相关^[30]。苏桂武和方修琦研究指出京津地区近 50 年来水稻播种面积的变化较降水变化滞后，其结果导致年降雨量变化与当年水稻种植面积变化之间存在显著负相关^[31]。Rounsevell 等则在英国的西北部分析研究了土壤和气候因素变化，对小麦、玉米、大豆和甜菜等作物空间分布动态变化的影响^[32]。刘纪远等研究显示我国水田与旱地分布与 900mm 等降水线的空间分布吻合，水田主要分布在降水量为 1 000 ~ 1 600mm 的地区，水田分布的最北界与年均温度大于 1°C 的地区相对一致，全球气候变化所带来的温度与降水变化将影响我国农业耕作空间分布的变化，也将直接导致相应农作物空间格局的变化^[13]。

人文驱动力作为一个系统,可以分为人口、技术、贫富状况、政治经济状况和文化等。每一部分也可以继续往下分,如人口可以分为农业人口数量、密度、增长速度、年龄结构等。与自然驱动力的作用机制相比,人类活动所产生的驱动机制更加复杂。Xie 等应用多元回归分析方法在江苏吴县研究 1990~2000 年间基本农田保护政策对水稻空间格局影响机制时,发现该政策因素能够显著减缓水稻空间分布缩减趋势,但这种正面效应在很大程度上又受到区域经济发展和城市扩展等诸多经济社会因子的综合影响^[33]。Long 等在江苏昆山的研究则表明,工业化趋势、城镇化进程、人口增长和中国经济改革政策是共同影响该区域 1987~2000 年水稻空间格局演变的 4 个主要人文驱动力^[34]。He 等通过分析区域景观指数 1983~2001 年的动态变化,认为中国北部 13 个省区农田空间格局演变的主要驱动因子是经济的发展和生活水平的显著提高^[35]。Mottet 等分析各种自然—社会经济驱动因子认为,海拔高度和坡度,以及社会经济因素中的交通通达度和土地使用期限等是综合影响欧洲西南部比利牛斯山脉地区玉米等饲料作物空间格局变化的关键驱动力^[36]。Wood 等的研究更是详细比较分析了气候因素、人口增长、农业发展项目、农田休闲耕作制度、土地使用期限等多种自然影响因子和人类活动,对非洲国家塞内加尔中南部地区玉米、水稻、棉花和花生等农作物近 20 年空间格局演变的机理机制^[37]。

3 农作物空间格局变化模拟模型研究

农作物空间格局变化模拟模型将土地变化系统中的现实问题归结为相应的数学问题,在此基础上利用数学的概念、方法和理论进行深入的分析 and 研究,从定性或定量的角度来刻画实际问题,并为解决现实问题提供数据或可靠的指导。借助计算机模拟模型,可以有效地分析农作物空间格局变化的速率、数量和空间特征,更好地解释其变化过程和机理机制,并可以探索未来不同情景下的可能变化趋势^[38]。

早期的模型多为非空间模型,如 SALU 模型^[39],侧重于研究分析农作物变化的数量和速率特征,对变化的空间分布并未给予太多考虑。近 10 年来,随着遥感与地理信息系统技术的发展,农作物空间格局变化模拟模型发展到以空间模型为主,如空间统计模型、系统动力学模型、元胞自动机模型等^[40-44]。通过分析农作物空间分布和自然、社会、经济因子之间的相互关系,得到农作物分布的空间适宜性分布图。在综合考虑诸多限制因素和转换规则的前提下,将外部预测和计算的农作物面积变化总体数量逐步分配到一定的地理空间单元中,实现农作物面积数量变化向空间位置变化的转移。

地理空间模型可以分析研究影响作物空间格局变化的主要因子和具体过程,但由于忽略了“人地关系”中“人”的研究,该类模拟往往不能分析作物空间格局变化中的人类选择或决策行为,也不能分析社会体制及宏观政策等对作物空间格局变化的影响作用^[38]。因此,自 20 世纪 90 年代以来,智能体模型 (Agent-based Model, ABM) 被广泛用来模拟研究农户农作物选择行为及其对农作物空间格局变化的影响^[45,46]。Balman 最先利用 ABM 模型分析了不同政策下农场间的竞争关系,以及由此引起的农业土地变化^[47]。Berger 分析研究了农户间的土地利用行为选择,包括农户如何选择新技术及如何参与土地市场活动等^[48]。Evans 等利用效用模型分析农户土地利用行为变化过程以及其对应的地块尺度的土地利用变化,在后续的研究中,整合移民潮、人口变动等因素,模拟了历史时期的毁林造田—弃田再生林过程^[49]。Deadman 等使用启发式与决策树相结合的方法表达决策过程^[50];Manson 认为农户在决策过程中表现出有限理性,即“最优选择”不一定是“最终选择”,在模型中加入了演化算法以更加真实表达农户决策过程^[51]。Polhill 等应用了启发式模仿与改进的算法表达决策过程,突出体现了决策过程中主体之间的相互作用与影响,后续研究将自然、社会经济、政策、以及偏好等整合进入 FEARLUS 模型框架,使模型表达更加真实^[52]。Valbuena 等使用简单的概率法来表达农户决策,但其改进地方在于进行了农户分类,考虑农户类型与决策行为之间存在一定的对应关系^[53]。Mena 等使用了同样的概率法,不同的是将农户的经营策略以特定比例行为限定为“最大收益”、“模仿”、“随机”3 种,这 3 种经营策略分别对应具体的土地利用决策行为^[54]。Becu 等^[55]和 Ziervogel 等^[56]则应用了参与式模拟或角色扮演的方法定性表达农户的决策意向,是传统经验研究方法的重要补充。Gaube 等开发的 SERD 模型中集成了决策树与概率判定的方

法^[57]；Castella 等将启发式方法和参与式模拟相结合^[58]；而 Le 等的 LUDAS 模型中集成了有限理性理论、最大效用模型、空间多项式回归以及启发式算法等多种方法^[59]。在国内，吴文斌等基于离散选择模型建立了一个作物播种面积变化的全球模型，通过模拟作物选择行为对全球主要作物播种面积动态变化进行了模拟研究^[60]；黄河清等利用 LUC - ASM 模型研究了不同农户类型以及自然环境、政府和企业的补贴机制综合影响下的农户土地利用行为^[61]；陈海等则研究了农户间的相互作用及市场因素的影响，并探讨不同尺度下农户土地利用决策过程^[62]。

4 未来研究趋势和重点

4.1 农作物空间格局变化特征研究

基于统计数据、遥感信息和空间模型来获取农作物空间格局及其变化信息的方法各具特色，但也存在不同的缺陷。统计方法用于大范围农作物空间格局变化监测时耗人力、物力和财力，也易受人为因素的干扰。统计数据仅能反映统计单元水平上的数量变化，难以表现统计单元内部作物分布的空间变异性^[63]。遥感方法在农作物空间格局提取中也存在许多亟待解决的问题，如混合像元、大气校正、尺度转换等，同物异谱和同谱异物现象的广泛存在，使得单纯的基于遥感影像分类的方法难以应用于大尺度空间农作物种类的识别，也就难以获取农作物空间格局动态变化的特征。基于模型的方法主要考虑农作物空间分布的气候、地形和土壤等生态环境因子，而对农作物真实空间分布紧密相关的农户种植习惯、农产品价格、农业政策等社会经济因子考虑不够。因此，基于多尺度、多信息源数据融合的复合方法成为农作物空间格局动态变化特征研究的重要方向，可以充分利用多种数据信息的特色，实现优势互补，弥补单一遥感数据和分类方法的缺陷，提高信息获取和分析精度^[64-65]。

利用遥感数据和统计数据融合的方法，Leff 等生成了全球 18 种主要作物 10 km 空间分辨率的分布图集^[66]；Ramankutty 等^[67]和 Monfreda 等^[68]则应用线性回归模型将不同空间尺度农作物统计信息分配到全球 10km 分辨率的耕地像元中，最终获取了 11 种主要作物的空间分布信息。然而，这些全球数据集的空间分辨率太粗，不太适合区域尺度的农作物空间格局分析；而且往往都是针对某一特定时间点或时段，缺乏长时间序列的农作物空间分布数据集，无法获取农作物空间格局动态变化信息。因此，迫切需要构建具有普适性的农作物空间格局获取方法或模型，以 5 年或 10 年的间隔周期获取农作物空间分布动态变化特征。

不同数据源之间的尺度、精度、采集方法等差异会影响多源数据的应用过程，如不同遥感数据集采取的分类规则和分类系统可能不相同，遥感数据获取的作物面积与统计数据作物面积数量可能不一致^[69]。如何进行相互验证，以减少数据差异对农作物空间分布研究的影响值得深入分析。因此，开展不同来源的耕地或作物空间分布数据的验证和比对分析研究十分必要，不仅可以帮助数据用户根据研究目的和区域选择适宜的数据产品，也可以为数据生产者提供反馈，以促进数据处理算法的改进，更好地服务于未来农作物空间分布制图。

当前，一些开放的数据共享/验证平台开始出现，进一步丰富了农作物空间格局研究内容。如 Geo - Wiki 通过众包的方式获取足够的地面验证点，将现有全球耕地数据集加以合成，能够重新生成一套精度更高的全球耕地空间数据集^[70]。CropScape 将美国 CDL 作物分布数据集进行开放共享，用户不仅可直接通过网络访问 CDL 数据集，同时还可以根据用户位置获取更为具体的农作物空间格局分析信息^[71]。

4.2 农作物空间格局变化机理研究

农作物空间格局变化问题实质上是“人类—环境”关系问题。现有的农作物空间格局驱动机制研究侧重于应用多种系统分析与数理统计方法分析自然生态环境变化对农作物时空格局的影响，分析对象往往具有一定面积的土地单元，或栅格系统中网格表述的一定面积区域，利用地理网格数据或行政区域社会经济统计数据可以较为容易地建立农作物空间格局变化与环境因子之间的关系。然而，农作物空间格局变化不仅受自然因素的影响，还受社会经济等人文因素的综合作用，仅从自然驱动力或人文驱动力一个角度

来分析往往难以全面理解农作物空间格局的动态变化过程^[1]。因此,必须综合自然—社会经济多因素,同时在不同时空尺度下比较研究农作物空间格局动态变化特征,这样才能真正认识导致其动态变化的原因。

以往机理研究仅能从宏观层面对农作物空间格局变化的驱动机制进行解释,而忽视了农作物空间格局变化中发挥重要作用的人类主体决策行为,难以对微观个体行为给出合理的解。事实上,宏观尺度农作物空间格局是微观层面农户农作物选择决策行为和过程的汇总和综合,亦即宏观尺度格局是从微观过程涌现出的^[72,73]。由于不同决策主体具有不同的自治性、能动性、适应性和交互性特征,使得主体间的农作物选择或决策行为呈现为显著的差异性、动态性和相关性,一定程度上可以科学解释和揭示农作物空间格局变化的原因和过程^[74]。因此,从长远趋势看,如果农作物空间格局机制研究不考虑人类主体决策机制,不从整体和动态的角度来综合考虑“人类—环境”复合关系,就不能很好地解释和预测农作物空间格局变化^[75]。

此外,传统机理机制研究习惯将驱动因子与变化结果静态分割,即简单地认为驱动因子决定了农作物空间格局变化的结果^[76]。这种静态机制假设农作物时空格局变化和其驱动因子之间的因果关系不随时间发生变化。显然,这类静态机制对时间机制关注不够。由于人—地关系的多重性、动态性、异时异地相关性等特征,综合空间机制和时间机制的研究必将是未来农作物空间格局机制研究的方向之一^[77]。这类动态机制综合考虑了农作物空间格局变化的非线性、多维性、路径依赖性和反馈机制,可以更好地描述其复杂性和动态性,更有效地解释其变化的原因、过程和结果。

4.3 农作物空间格局变化模拟模型研究

地理模型和社会经济模型自从不同的角度对农作物空间格局变化进行了模拟,都发挥了重要作用。但是,这两类模型也存在不足,因为农作物空间格局的形成和变化是不同尺度的自然和人文因素综合作用的结果,反映了“人地关系”的复杂性问题。人—地关系作为一个复杂开放的巨系统,变化过程的复杂性和动态性,驱动因子和驱动机制多样性,相互作用、互为因果关系,使得其边界模糊和重叠,难以进行界定和结构化处理^[78]。可见,“人类”和“土地”的综合研究是农作物空间格局动态变化模拟研究的难点和焦点之一,综合模拟模型研究成为未来一个重要的研究方向,这对于自然科学和社会科学融合和综合研究也是一个巨大挑战^[79]。如作物生长模型 EPIC 与农业经济贸易模型 IFPSIM 相结合,用于模拟未来全球主要农作物空间格局变化^[28,80]; Dyna-CLUE 模型将 CLUE-S 与植被动态变化算法相结合,模拟未来欧洲耕地废弃或扩张的动态变化过程^[81]。

农作物空间格局变化过程在不同尺度上发生、作用和演变,影响着农作物空间格局变化的实际速率和空间分布。因此,农作物空间格局变化具有明显的多时空尺度特性,多尺度、多层次的综合是农作物空间格局变化模拟模型的新要求^[82]。多尺度、多层次的综合主要包括自顶而下和自底而上两种结构。选择何种模型结构主要取决于研究的农作物对象和变化过程。如一些农作物空间格局变化直接受本地过程和驱动力直接决定,这类变化模型应遵循自底而上的方法;而诸如农业经济作物空间分布的扩展变化等,很大程度上为区域或国家尺度上的市场需求所导向,此类变化模型以利用自顶而下的结构模型为适合。不管何种结构的模型,不同空间尺度间的反馈和关联性也是不可忽略的。微观尺度农户的农作物选择决策行为可能受更大尺度上的反馈力影响而发生变化,如个体农户如果都选择相同的作物种植方式,可能会导致该区域或更高层次区域市场的农产品饱和或过剩,那么农户层面上的最优作物选择将不再是最优化选择,其种植作物可能随之发生变化。同样,区域尺度上的农作物需求,往往会因为微观尺度上的土地资源的有限性和立地条件的不适宜性而得不到实现,这可能会诱发其它区域微观尺度上的农作物空间格局发生变化和调整。多尺度综合中的尺度推移包括尺度扩展和尺度收缩也是一个值得深入探讨的问题。从目前已有的研究看,表述地理、生态环境的空间数据和时态数据的尺度推移的理论和方法已经比较成熟;但对于反映社会、经济状态的属性数据的尺度推移研究刚处于起步阶段,尚需要加强研究^[83]。

模型验证是农作物空间格局变化模拟模型的新挑战。模型验证常涉及到对模型结构和变量间关系合理

性的检验、模型输出结果与实际观测值的比较分析、模型敏感性以及不确定性分析等。早期模型验证以简单的视觉验证和专家知识验证等为主,但由于过多的人为因素的参与,使得该验证方法具有很强的主观性,验证结果也就不一^[84]。因此,客观的模型验证和评价方法成为将来模型发展的主流方向。最常用的方法是统计法,对线性回归模型来说,常用统计量有决定系数(R^2);对于非线性回归模型(如 logistic 模型),评定方法有类决定系数(pseudo- R^2)、Kappa 系数和 ROC 曲线^[85-86]等。此外,其它方法,如景观指数法^[87]和模糊集法^[88]等也得到了应用。任何模型验证过程都具有尺度依赖性。因此,近年来很多学者提出了基于多尺度的模型验证方法,检查模型对于尺度的敏感性和有效性^[89-90]。虽然以上验证方法得到了很好的应用,但目前还没有一个评价模型结果和参考数据吻合程度的统一标准和规范。Pontius 等提出了一个衡量模型验证效果的基本标准,就是模型模拟结果和参考数据的相似度必须高于该参考数据和零效模型的相似度^[86],否则,模型验证不是理想的。

5 总结

总之,近年来国内外众多学者围绕农作物空间格局变化的特征、机理机制和模型模拟等方面开展了大量深入研究,在理论研究和方法应用方面都取得了显著进展,为掌握农作物空间格局变化的过程、规律和原因,评估变化的综合影响,服务政策部门决策支持等发挥了重要作用。但是,农作物空间格局变化实质上反映了“人类—环境”的复杂性问题,其科学研究仍然面临诸多难点和挑战。解决这些复杂性科学问题,迫切需要从系统观和整体观的角度来综合考虑人地复合关系。因此,多尺度、多数据、多因素、多模型和多方法的综合研究将是未来农作物空间格局研究的重要方向和重要内容,这也必将有力促进自然科学和社会科学的融合和综合研究。

参考文献

- [1] 唐华俊,陈佑启,邱建军,等. 中国土地利用/土地覆盖变化研究. 北京:中国农业科学技术出版社,2004
- [2] 唐华俊,吴文斌,杨鹏,等. 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
- [3] Verburg P H, Mertz O, Erb K, et al. Land system change and food security: towards multi-scale land system solutions. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(5):494~502
- [4] Reenberg A. Land system science: handling complex series of natural and socio-economic processes. Journal of Land Use Science, 2009, 4(1):1~4
- [5] Rindfuss R R, Walsh S J, Turner B L, et al. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(39):13976~13981
- [6] Rounsevell M D A, Pedrolí B, Erb K, et al. Challenges for land system science. Land Use Policy, 2012, 29(4):899~910
- [7] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(52):20666~20671
- [8] 张莉,吴文斌,杨鹏,等. 黑龙江省宾县农作物格局时空变化特征分析. 中国农业科学,2013,46(15):3227~3237
- [9] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. Science, 2011, 333(6042):616~620
- [10] Boryan C, Yang Z, Mueller R, et al. Monitoring US agriculture: the US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer Program. Geocarto International, 2011, 26(5):341~358
- [11] 徐新刚,李强子,周万村,等. 应用高分辨率遥感影像提取作物种植面积. 遥感技术与应用,2008,23(1):81~86
- [12] 张国平,刘纪远,张增祥. 近10年来中国耕地资源的时空变化分析. 地理学报,2003,58(3):323~332
- [13] Liu J, Liu M, Tian H, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990—2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98:442~456
- [14] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37:127~139
- [15] 李景刚,何春阳,史培军,等. 中国北方13省1983年后的耕地变化与驱动力研究. 地理学报,2004,59(2):274~282
- [16] Xiao X, Boles S, Liu J, et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. Remote Sensing of Environment, 2005, 95:480~492
- [17] Wardlow B D, Egbert S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: An assessment for the U. S. Central Great

Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 1096 ~ 1116

- [18] 熊勤学, 黄敬峰. 利用 NDVI 指数时序特征监测秋收作物种植面积. *农业工程学报*, 2009, 25 (1): 144 ~ 148
- [19] 张莉, 吴文斌, 左丽君, 等. 基于 EOS/MODIS 数据的南方水稻面积提取技术. *中国农业资源与区划*, 2011, 32 (4): 39 ~ 44
- [20] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 近 20 年中国耕地复种指数的时空变化. *地理学报*, 2005, 60 (4): 559 ~ 566
- [21] 唐鹏钦, 吴文斌, 姚艳敏, 等. 基于小波变换的华北平原耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2011, 27 (7): 220 ~ 225
- [22] Sakamoto T, Nguyen N V, Ohno H, et al. Spatio - temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 1 ~ 16
- [23] Lunetta R S, Shao Y, Ediriwickrema J, et al. Monitoring agricultural cropping patterns across the Laurentian Great Lakes Basin using MODIS - NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12 (2): 81 ~ 88
- [24] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化. *生态学报*, 2009, 29 (4): 1777 ~ 1786
- [25] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 东北三省耕地物候期对热量资源变化的响应. *地理学报*, 2011, 66 (7): 928 ~ 939
- [26] Alcantara C, Kuemmerle T, Prishchepov A V, et al. Mapping abandoned agriculture with multi - temporal MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 334 ~ 347
- [27] Tan G., Shibasaki R. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 2003, 168: 357 ~ 370
- [28] Wu W, Shibasaki R, Yang P, et al. Global - scale modelling of future changes in sown areas of major crops. *Ecological Modelling*, 2007, 208 (2 ~ 4): 378 ~ 390
- [29] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. *中国农业科学*, 2010, 43 (2): 329 ~ 336
- [30] 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景. *自然资源学报*, 2005, 20 (5): 697 ~ 705
- [31] 苏桂武, 方修琦. 京津地区近 50 年来水稻播种面积变化及其对降水变化的响应研究. *地理科学*, 2000, 20 (3): 212 ~ 217
- [32] Rounsevell M D A, Annetts J E, Audsley E, et al. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 95: 465 ~ 479
- [33] Xie Y, Yu M, Tian G, et al. Socio - economic driving forces of arable land conversion: a case study of Wuxian City, China. *Global Environmental Change*, 2005, 15: 238 ~ 252
- [34] Long H, Tang G, Li X, et al. Socio - economic driving forces of land - use change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83: 351 ~ 364
- [35] He C, Li J, Wang Y, et al. Understanding cultivated land dynamics and its driving forces in northern China during 1983—2001. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15 (4): 387 ~ 395
- [36] Mottet A, Sylvie L, Nathalie C, et al. Agricultural land - use change and its drivers in mountain landscapes: a case study in the Pyrenees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114: 296 ~ 310
- [37] Wood E C, Tappan G G, Hadj A. Understanding the drivers of agricultural land use change in south - central Senegal. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59: 565 ~ 582
- [38] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化模型最新研究进展. *地理学报*, 2009, 64 (4): 456 ~ 468
- [39] St  phenne N, Lambin E F. A dynamic simulation model of land - use changes in Sudano - sahelian countries of Africa (SALU). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 145 ~ 161
- [40] Pontius J R G, Cornell J D, Hall C A S. Modeling the spatial pattern of land - use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 191 ~ 203
- [41] Verburg P H, Soepboer W, Limpiada R, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE - S model. *Environmental Management*, 2002, 30: 391 ~ 405
- [42] Wu W, Shibasaki R, Yang P, et al. Modeling changes in paddy rice sown areas in Asia. *Sustainability Science*, 2010, 5: 29 ~ 38
- [43] 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. *地理学报*, 2004, 59 (4): 599 ~ 608
- [44] 李黔湘, 王华斌. 基于马尔柯夫模型的洪渡湖流域土地利用变化预测. *资源科学*, 2008, 30 (10): 1541 ~ 1546
- [45] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展. *地理学报*, 2011, 66 (11): 1518 ~ 1530
- [46] 余强毅, 吴文斌, 杨鹏, 等. Agent 农业土地变化模型研究进展. *生态学报*, 2013, 33 (6): 1690 ~ 1700
- [47] Balmann A. Farm - based modelling of regional structural change: A cellular automata approach. *European Review of Agricultural Economics*, 1997, 24 (1 - 2): 85 ~ 108
- [48] Berger T. Agent - based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 2001, 25 (2 - 3): 245 ~ 260
- [49] Evans T P, Manire A, de Castro F, et al. A dynamic model of household decision - making and parcel level landcover change in the eastern

- Amazon. *Ecological Modelling*, 2001, 143 (1–2): 95 ~ 113
- [50] Deadman P, Robinson D, Moran E, et al. Colonist household decision making and land – use change in the Amazon Rainforest: an agent – based simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31 (5): 693 ~ 709
- [51] Manson S M, Evans T. Agent – based modeling of deforestation in southern Yucatán, Mexico, and reforestation in the Midwest United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104 (52): 20678 ~ 20683
- [52] Polhill J G, Sutherland L, Gotts N M. Using qualitative evidence to enhance an agent – based modelling system for studying land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2010, 13 (2): 10 ~ 15
- [53] Valbuena D, Verburg P H, Bregt A, et al. An agent – based approach to model land – use change at a regional scale. *Landscape Ecology*, 2010, 25 (2): 185 ~ 199
- [54] Mena C F, Walsh S J, Frizzelle B G, et al. Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent – based model. *Applied Geography*, 2011, 31 (1): 210 ~ 222
- [55] Becu N, Perez P, Walker A, et al. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand: Description of the CATCHSCAPE model. *Ecological Modelling*, 2003, 170 (2–3): 319 ~ 331
- [56] Ziervogel G, Bithell M, Washington R, et al. Agent – based social simulation: a method for assessing the impact of seasonal climate forecast applications among smallholder farmers. *Agricultural Systems*, 2005, 83 (1): 1 ~ 26
- [57] Gaube V, Kaiser C, Wildenberg M, et al. Combining agent – based and stock – flow modelling approaches in a participative analysis of the integrated land system in Reichraming, Austria. *Landscape Ecology*, 2009, 24 (9): 1149 ~ 1165
- [58] Castella J, Boissau S, Trung T N, et al. Agrarian transition and lowland – upland interactions in mountain areas in northern Vietnam: application of a multi – agent simulation model. *Agricultural Systems*, 2005, 86 (3): 312 ~ 332
- [59] Le Q B, Park S J, Vlek P L G. Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi – agent system model for simulating spatio – temporal dynamics of coupled human – landscape system: scenario – based application for impact assessment of land – use policies. *Ecological Informatics*, 2010, 5 (3): 203 ~ 221
- [60] 吴文斌, 杨鹏, 谈国新, 等. 基于 LOGIT 模型的世界主要作物播种面积变化模拟研究. *地理学报*, 2007, 62 (6): 589 ~ 598
- [61] 黄河清, 潘理虎, 王强, 等. 基于农户行为的土地利用人工社会模型的构造与应用. *自然资源学报*, 2010, 25 (3): 353 ~ 367
- [62] 陈海, 王涛, 梁小英, 等. 基于 MAS 的农户土地利用模型构建与模拟——以陕西省米脂县孟岔村为例. *地理学报*, 2009, 64 (12): 1448 ~ 1456
- [63] You L, Wood S, Wood – Sichra U. Generating plausible crop distribution maps for Sub – Saharan Africa using a spatially disaggregated data fusion and optimization approach. *Agricultural Systems*, 2009, 99: 126 ~ 140
- [64] Frolking S, Qiu J, Boles S, et al. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochemical cycles*, 2002, 16 (1091), doi: 10.1029/2001GB001425
- [65] Portmann F T, Siebert S, D? ll P. MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high – resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24 (1): B1011
- [66] Leff B, Ramankutty N, Foley J A. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical cycles*, 2004, 18 (1009), doi: 10.1029/2003GB002108
- [67] Ramankutty N, Evan A T, Monfreda C, Foley J A. Farming the planet 1. geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: B1003
- [68] Monfreda C, Ramankutty N, Foley J A. Farming the planet: 2. the geographic distribution of crop areas and yields in the year 2000. *Global Biogeochemical cycles*, 2008, 22, (1003), doi: 10.1029/2007GB002952
- [69] Verburg P H, Neumann K, Nol L. Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 2011, 17 (2): 974 ~ 989
- [70] Fritz S, McCallum I, Schill C, et al. Geo – Wiki: An online platform for improving global land cover. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 31 (0): 110 ~ 123
- [71] Han W, Yang Z, Di L, Mueller R. CropScope: a Web service based application for exploring and disseminating US conterminous geospatial cropland data products for decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 84: 111 ~ 123
- [72] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 等. 基于 Agent 的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展. *地理科学*, 2007, 27 (4): 573 ~ 578
- [73] Overmars K P, Verburg P H, Veldkamp A. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. *Land Use Policy*, 2007, 24: 584 ~ 599
- [74] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi – agent systems for the simulation of land – use and land – cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93: 314 ~ 337
- [75] Grimm V, Revilla E, Berger U, et al. Pattern – oriented modeling of agent – based complex systems: lessons from ecology. *Science*, 2005,

310: 987 ~ 991

- [76] Veldkamp A. Investigating land dynamics: Future research perspectives. *Journal of Land Use Science*, 2009, 4 (1): 5 ~ 14
- [77] Lambin E F, Geist H J (eds). *Land use and land cover change. Local processes and global impacts. Global change – IGDP series*, Springer Dordrecht, 2006
- [78] Yu Q, Wu W, Yang P, et al. Proposing an interdisciplinary and cross – scale framework for global change and food security researches. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156: 57 ~ 71
- [79] Wu W, Verburg P H, Tang H. Climate change and the food production system: impacts and adaptation in China. *Regional Environmental Change*, 2013, DOI 10.1007/s10113-013-0528-1
- [80] Wu W, Yang P, Meng C, et al. An integrated model to simulating sown area changes for major crops at a global scale. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51 (3): 370 ~ 379
- [81] Verburg P H, Overmars K. Combining top – down and bottom – up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna – CLUE model. *Landscape Ecology*, 2009, 24 (9): 1167 ~ 1181
- [82] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 1171 ~ 1183
- [83] 张秋菊, 傅伯杰. 关于景观格局演变研究的几个问题. *地理科学*, 2003, 23 (3): 264 ~ 270
- [84] Lambin E F, Geist H J, Lepers E. Dynamics of land – use and land – cover change in tropical regions, *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28: 205 ~ 41
- [85] Pontius J R G, Cornell J D, Hall C A S. Modeling the spatial pattern of land – use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 191 ~ 203
- [86] Pontius J R G, Huffaker D, Denman K. Useful techniques of validation for spatially explicit land – change models. *Ecological Modelling*, 2004, 179: 445 ~ 461
- [87] Lesschen J P, Verburg P H, Staal S J. Statistical methods for analyzing the spatial dimension of changes in land use and farming system. *LUC Report Series No. 7*, 2005
- [88] Hagen A E. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographic Information Systems*, 2003, 173: 235 ~ 249
- [89] Kok K, Farrow A, Veldkamp A et al. A method and application of multi – scale validation in spatial land use models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 223 ~ 238
- [90] Veldkamp A, Verburg P H, Kok K et al. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. *Environmental Modeling and Assessment*, 2001, 6: 111 ~ 121

OVERVIEW OF RESEARCH PROGRESSES IN CROP SPATIAL PATTERN CHANGES

Wu Wenbin^{1,2}, Yang Peng^{1,2}, Li Zhengguo^{1,2}, Chen Zhongxin^{1,2}, Zhou Qingbo^{1,2}, Tang Huajun^{1,2,*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

2. Key Laboratory of Agri – Informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract Spatial patterns of crops and their dynamics have enormous consequences for both environmental sustainability and food security; It thus has been the important research topics of geography and ecology communities. This paper systematically summarized the current progress in crop pattern studies over the latest decade, specifically focusing on the spatial – temporal characteristics, driving mechanism and simulation models of crop pattern changes. It found that the spatial – temporal change characteristics were studied by the methods such as statistical approach, remote sensing, and spatial modeling techniques, while the driving mechanism was normally illuminated by a proper selection of regional – scale biophysical – socioeconomic variables and further attention was paid to the endogenous – exogenous factors that could potentially influence the stakeholders' decision on making a crop choice. Moreover, the simulation platforms were developing quickly and experiencing a transition from the traditional non – spatial expression of crop structure to the new spatially – explicit representation of crop allocation. This paper also identified the key issues that were still relevant and tried to specify the future prospect and priorities in this field. It was believed that in a long – term, cross – scale and multi – source data coupling was the most trusted way for mapping the spatial – temporal distribution of crop pattern; proper selections on biophysical – socioeconomic variables, micro/macro perspective, and static/dynamic scheme will benefit the analysis on the driving mechanism of crop pattern dynamics; interdisciplinary and multi – methods integration was the most effective approach to improve the current understanding of crop pattern simulation.

Keywords crop pattern; change; characteristics; mechanism; model