

汪 晗,廖英伶,聂 鑫,等. 基于 Multi-Agent System 的土地利用/覆被变化模型研究进展[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):1-7.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.001

# 基于 Multi-Agent System 的土地利用/覆被变化模型研究进展

汪 晗<sup>1</sup>,廖英伶<sup>1</sup>,聂 鑫<sup>1,2</sup>,徐唐奇<sup>3</sup>

(1. 广西大学公共管理学院,广西南宁 530004; 2. 广西大学中国-东盟研究院,广西南宁 530004;

3. 长安大学地球科学与资源学院,陕西西安 710054)

**摘要:**随着对土地利用变化模拟研究的深入,基于多智能体系统的土地利用/覆被变化(multi-agent system models of land-use/cover change,简称 MAS-LUCC)模型得到了学者越来越多的关注。本文在简单回顾土地利用/覆被变化(land-use and land-cover change,简称 LUCC)建模技术和方法的基础上,结合多智能体建模方法在土地利用变化研究中的实证案例,讨论在土地利用变化研究领域多智能体模型(multi-agent system model,简称 MAS)的优势与技术难点,并着重对 MAS-LUCC 模型参数的敏感性和模型的验证进行了探讨。结果表明,MAS-LUCC 模型适用于异构条件下复杂的空间相互作用、分散建模及自主决策的研究。多智能体模型作为今后创建 LUCC 精细尺度模型的重要方法,应重点关注人类与环境的相互作用,优化智能算法,提高模型精度,拓展模型的应用范围。

**关键词:**多智能体模型;土地利用/覆被变化;MAS-LUCC 模型

**中图分类号:**F301.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)13-0001-07

作为全球环境变化研究的核心项目之一,土地利用/覆被变化(land-use and land-cover change,简称 LUCC)及其对生态环境影响的研究对于了解区域生态环境乃至全球环境变化、指导土地利用与生态协调发展具有非常重大的意义,是全球变化和可持续发展关注的重要议题<sup>[1-3]</sup>。自 2005 年全球土地计划(GLP)启动伊始,就强调了对陆地系统中人类-自然耦合系统的综合分析集成模拟研究<sup>[4-5]</sup>,并受到越来越多学者的关注。土地利用/覆被变化模拟的难点在于了解 LUCC 的诸多驱动因子、变化过程及环境效应,揭示自然与人为活动之间的动态反馈机制。多智能体模型(multi-agent system model,简称 MAS)能较好地反映人类社会与自然系统的动态反馈关系,已经逐渐应用到土地利用/覆被变化研究领域<sup>[2,6-10]</sup>。目前已有学者总结了多智能体模型的基本概念及应用领域,概述其在土地利用变化领域的主要研究问题,但很少有人对多智能体系统在实际运作中存在的问题进行归纳,对模型实施与验证方面的研究也比较薄弱。基于此,笔者尝试回答以下几个问题:多智能体模型为何能在众多土地利用变化模拟方法中脱颖而出?到目前为止,研究人员对它进行了怎么样的应用?这个研究领域中还有哪些其他挑战和悬

而未决的问题?通过提供这些问题的答案,笔者希望更多的研究人员能了解 MAS-LUCC 模型的效用以及潜在优势和研究挑战。因此,本文首先简单回顾 LUCC 模型的研究进展,分析多智能体模型的优势,并对其在土地利用变化模拟方面的发展趋势进行展望,着重讨论与模型应用和检验有关的一些问题,整理多智能体模型在现实应用中的技术难点,以期对土地利用变化模拟研究提供参考。

## 1 土地利用/覆被变化模拟

土地利用/覆被变化模拟是土地利用变化研究的重要分支,旨在支持有见地的土地资源管理,尽可能避免由于 LUCC 引起的不可逆转的环境损害。土地利用/覆被变化是由人类活动引起的最深刻的变化之一,建模分析已成为帮助人类认识未来和探索土地利用动态变化对人类和自然长远影响的一种比较好的方法<sup>[11-12]</sup>。LUCC 模型能在空间、时间层面上捕捉人类与土地利用系统的相互作用及可能产生的影响,探索未来的土地利用变化。同时需要考虑大量因素,包括人口、气候、生态系统、科技进步、社会政治态度、社会结构<sup>[13-17]</sup>。

目前,土地利用/覆被变化模拟研究常用方法为基于数学方程的模型、基于经验的统计模型(如 CLUE 模型、CLUE-S 模型)、细胞模型[简称 CM,包括元胞自动机模型(cellular automaton)和马尔科夫模型(Markov)]、系统动力学模型、基于进化理论的模型、混合模型、多智能体模型<sup>[18-26]</sup>。表 1 详细地描述了国际上应用较多、具有代表性的土地利用/覆被变化模拟模型,这些模型模拟了 LUCC 的因果机制和循环反馈;在理解土地利用系统动态和驱动力、评估 LUCC 的综合影响、揭示土地所有者如何影响土地利用发展方向等方面发挥了重要作用<sup>[27]</sup>。

然而,这些模型也存在一定局限性:基于数学方程的模型

收稿日期:2017-11-01

基金项目:国家自然科学基金(编号:71763001、71403045、71403063、71363005、71573101);国家社会科学基金青年项目(编号:13CGL109);教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(编号:10JJD022、14JJD009);中国-东盟经贸合作与发展研究项目;陕西省社会科学基金(编号:12D249)。

作者简介:汪 晗(1988—),女,安徽桐城人,博士,副教授,研究方向为土地经济、城市经济。E-mail:hanhan880625@163.com。

通信作者:聂 鑫,博士,教授,研究方向为土地资源经济学。E-mail:toefl678@163.com。

必须获得数值及解析方程组,这限制了土地利用变化模拟对复杂性的要求;系统动力学模型将时间分解成离散的步骤,在LUCC 模型中依赖于显式枚举和功能介绍来表示人类和生态之间的相互作用,但难以与空间关系相适应,无法描述区域空间结构演化过程,同时在处理动力模拟模型的尺度上也有困难,无法模拟聚集尺度行为;Markov 模型主要是针对土地转移速率和概率进行模拟,适用于模拟预测数量的变化,但缺乏对空间属性的表达,通常需要结合其他模型共同发挥作用。元胞自动机模型( cellular automata,简称 CA)和多智能体模型(MAS)是基于复杂系统理论模拟研究的典型代表,在土地利用变化模拟研究中有明显优势。CA 模型模拟 LUCC 中生物物理方面的问题,侧重“人地关系”中的“地”,忽略对“人”的模拟,更适合对景观格局的模拟,而难以模拟土地利用中人类选择和决策行为,不能分析社会体制及宏观政策下土地利用决策行为及其结果的影响作用。

相比其他模型在 LUCC 模拟中表现出的不足,多智能体建模方法则适用于基于个体和环境之间的相互作用,研究人类和土地利用的共同变化过程,因而在当前土地利用模拟界倍受青睐<sup>[28-30]</sup>。多智能体模型由智能体( Agent)、环境与智

能体的行为规则构成。其中,智能体是具有自治能力的异质性个体,有自己的行为准则和知识库,可以根据彼此间及其与环境间的相互作用作出决定,改变行为,整个系统的行为取决于凝集各类型智能体的个人行为。多智能体模型由一个环境中交互的多个智能体组成,能将大而复杂的系统简化成相互通信协作、易于管理控制的系统。一方面,在土地利用/覆被变化研究中,多智能体模型能够在微观层面上表示个体行动者的偏好、互动和人类决策过程,通过这些微观尺度反馈出宏观现象,自下而上地表示土地利用分配,在不同层次上以空间明确的方式考虑人类决策对环境的影响,表现出其对个人决策实体的建模能力。另一个方面,多智能体模型可以在基于个人异质性行为的社会生态时空变化背景下解释未来情景。土地利用变化是一个复杂的过程,在复杂适应系统理论基础上,将多智能体建模方法应用到 LUCC 中<sup>[31-34]</sup>,特别是在模拟人类决策和环境反馈间的相互作用中<sup>[35-36]</sup>,能够捕获土地利用的空间作用和人类决策的复杂性,生动地描述人类-环境系统,将现实世界的概念和结构映射到模型中,克服传统方法的局限性,更好地对复杂土地利用变化过程进行模拟<sup>[29,35,37]</sup>。

表 1 国际上具有代表性的土地利用/覆被变化模型

模型名称	类型	理论方法	应用区域	描述
Patuxent 景观模型	基于经验统计模型	系统论	Patuxent 流域、美国佛罗里达南部大沼泽地	土地利用变化分配是基于经济模拟,考虑区位因素量化其对土地利用价值的影响,用于模拟城市化和居住区位变化的综合经济/生态模型
CLUE-S 模型	基于经验统计模型/混合模型	地理信息系统( GIS )技术、系统论	厄瓜多尔、菲律宾、印度尼西亚	利用经验的动力模型,根据经验量化土地利用/覆被变化与驱动因子的关系,进行多尺度的土地利用和驱动力的交叉分析
元胞自动机模型	细胞模型	GIS 技术、系统论	美国五大湖区底特律、布法罗	运用 GIS 技术和系统动力学理论,实现土地利用变化空间分布变化的模型
马尔科夫模型	细胞模型	转移概率论	加拿大尼亚加拉地区	利用某一系统的现在状况及其发展动向预测该系统未来状况的一种概率预测分析方法与技术,将复杂的土地利用变化过程视为随机过程进行模拟
SD 模型	系统动力学模型/基于经验统计模型	系统论、信息论、控制论、决策论	斯洛伐克东部、中国新疆、中国北京	基于过程的动力模拟模型可以通过分析系统结构,选取适当因素,进而构建不同结构间的反馈关系模拟生态环境和社会经济过程的相互作用引起的 LUCC 格局的时空变化过程
GEOMOD2 模型	混合模型	GIS 技术	哥斯达黎加、印度 格纳格布尔、墨西哥卡拉克穆尔	GEOMOD2 模型结合了细胞模型和系统模型技术方法,读取土地利用栅格化和其他生物地球物理属性的地图,然后使用这些生物地球物理属性的方式来模拟土地利用变化的空间格局
CA - Markov 模型	混合模型	GIS 技术、系统论、转移概率论	佛罗里达州、中国河西走廊、马来西亚兰加特盆地	将不同的模型技术结合起来,寻求最合适的解决手段,集成马尔可夫链和 CA 功能于一体,可运用多标准评价和多目标决策支持系统定义土地利用类型间转移的规则
LUDAS 模型	多智能体模型	系统论、信息论、决策论	越南中部红河流域	提出耦合人类环境系统的通用框架,基于效用最大化的有限理性方法,嵌套基于规则的启发式技术来表示农户土地利用的决策机制,为土地管理规划中的利益相关者提供一个技术决策支持工具

2 多智能体模型在 LUCC 研究中的应用

多智能体系统源于人工智能,能够模拟复杂的行为,在多元学科领域中都得到广泛的应用<sup>[29,35,38-44]</sup>。21 世纪初,就有学者开始了多智能体模型在土地利用/覆被变化方面的研究,做了大量工作来推动该领域的发展,对已有的关于在空间和环境方面运用 MAS 方法的文章进行了全面的总结,并对各学科领域知识进行了具体分析<sup>[35,45-46]</sup>。随后,整合了土地利用科学中涉及的 MAS 知识并总结了 MAS 在自然地理和人文地理方面的应用,同时强调了环境的空间直观性和异质性以及

基于复杂性理论的人类行为和环境之间的相互作用,为之后土地利用变化研究提供了多学科视角<sup>[30,47-48]</sup>。现在越来越多的学者采用多智能体模型对土地利用/覆被变化的驱动因素及机制、相关政策影响及典型地区的土地利用变化等方面进行深入探讨和研究,相关研究成果也越来越多<sup>[49-54]</sup>。

2.1 对城市土地利用/覆被变化的模拟

城市化是土地利用/覆被变化最典型的形式,将多智能体模型应用于城市系统模拟,如城市土地利用变化、城市规划等,探索城市增长的驱动机制,预测未来变化对实现可持续发展具有重要意义。研究者利用多智能体模型出色地实现了

对城市 LUCC 驱动力的模拟,完成了模拟城市土地利用变化的关键一步。Parker 等基于 Repast 平台研究城市土地收益与农业土地生产力的对立关系及其外部效应,并模拟其对城乡交错带的土地利用格局动态变化的影响<sup>[46]</sup>。Zellner 等研究景观质量、居住点距服务中心的距离等因素对居民居住偏好的影响,并基于 Swarm 开发平台模拟这一系列动态关系对土地利用格局的作用<sup>[55]</sup>。Filatova 等采用基于智能体建模方法模拟土地市场、价格、税收以及生态服务价值等因素对沿海城市土地利用格局及其生态效应的影响<sup>[35]</sup>。

另外,通过基于智能体建模的方法对城市未来土地利用变化结果进行模拟预测,可以为政府提供关于土地利用、土地管理政策制定和决策过程的相关信息,甚至能够以此识别未来发展和土地利用/覆被变化的潜在热点地区。刘小平等提出应用于居民居住区决策行为和地价动态变化的 ABMRL 模型,探索与模拟居民在居住选择时的复杂空间决策行为以及由居民间、居民与地理环境的相互作用而引起的城市居住空间分异的演化过程<sup>[56]</sup>。Zhang 等建立了 1 套时空土地资源分配规则及 1 个基于多智能体系统动态城市扩展模型,模拟居民、农民、政府等不同主体间的相互作用,该模型已用于模拟中国长沙市城市扩张过程,可帮助政府和城市规划者提供土地使用决策支持<sup>[40]</sup>。Murray - Rust 等使用智能体建模结合基于排放情景特别报告 (special report on emissions scenarios,简称 SRES) 的情景分析法评估斯洛文尼亚科佩尔市 LUCC 的未来影响,模拟了土地利用和土地覆被变化对当地居民用地和生活质量损失的潜在影响<sup>[57]</sup>。Zhang 等针对多智能体系统模拟复杂空间系统的能力,结合宏观和微观决策行为,建立了基于多智能体系统的时空动态城市增长仿真模型,解释了城市化的动力机制,为城市管理决策支持提供了一个有效的空间探索工具<sup>[58]</sup>。

## 2.2 对农业区域土地利用/覆被变化的模拟

对农业区土地利用/覆被变化的早期研究主要是基于多智能体模型对 LUCC 驱动力进行分析,并对未来土地利用变化结果进行模拟预测。Manson 等模拟了人口增长、土地利用趋势以及技术使用、政策约束综合作用下的土地利用变化情景 (如毁林开荒、发展农业等)<sup>[59]</sup>。Valbuena 等对荷兰东部农村地区阿彻霍克的农户土地利用行为内外部影响因素进行研究,基于智能体建模方法模拟未来不同场景下农户决策对土地利用格局的影响<sup>[60]</sup>。Schreinemachers 等研究农业技术、市场动态、环境变化以及政策干预对农户土地利用行为的影响<sup>[29]</sup>。

随着多智能体模型理论研究的完善,人文社会经济因素在土地利用变化研究中也渐渐受到重视,对农业区域 LUCC 模拟开始基于农户追求利益最大化的假设,着重对农户决策行为进行模拟。Le 等定义和详述了一种名为土地利用动态模拟器的多智能体系统,用于表示农村森林边缘的人类景观系统,并在越南中部山地分水岭首次实施该模型,详细说明越南热带森林边缘人类 - 环境系统的 MAS - LUCC 模型,综合评估政策对景观和社区动态的影响<sup>[28]</sup>。Polhill 等模拟农户在追求最大收益条件下伴随土地利用的动态变化,其中,地块最大收益可以看成是自然、社会经济、政策、决策者偏好等多个图层属性的叠加<sup>[61]</sup>。Happe 等利用 AgriPol 模型研究丹麦农业结构变化的驱

动因素,模拟农户在追求利益最大化过程中相对应的土地利用方式的动态变化,并评估其生态影响<sup>[62]</sup>。Polhill 等拟合响应农业环境政策的农户决策,探讨激励机制可以在保护物质方面获得最佳成本效益所需的强度,以通过耦合模型为保护生物多样性提出有针对性的政策建议<sup>[63]</sup>。

综上所述,无论是全球变化或者在大区域层次<sup>[28,57,60,64]</sup> (如瑞士阿尔卑斯山西南的菲斯普市、荷兰东部阿彻霍克地区、斯洛文尼亚科佩尔市等),还是小尺度空间<sup>[65-72]</sup> (如中国陕西省米脂县孟岔村、中国鄱阳湖区、中国贵州省猫跳河流域等),学者们在当下开展的研究都积极地推动 MAS 模型在土地利用变化研究中的应用进程。从抽象的模型设计,到程式化的假设,再到详细的仿真模型,以及适当的情景模拟方案和政策分析,多智能体模型在土地利用变化研究中的重要作用日益凸显,已有一些研究结论被应用<sup>[47,73]</sup>。

## 3 土地利用/覆被变化研究中多智能体模型的技术难点与突破

### 3.1 计算机建模及模型算法的局限

计算机建模技术和分析工具的快速发展,以及全球环境的挑战,指出了使用模拟计算来研究人类系统的新方向。研究人员已经开始在人文地理领域使用这些工具制定方法,寻求包括数字和符号数据在内的计算解决方案。建模技术在土地利用/覆被变化研究的应用中迅速发展,但同时计算机建模自带的局限性使得 MAS - LUCC 模型不得不面临一些挑战。

首先,对复杂的土地利用变化进行模拟,不可避免地要考虑时间和空间的复杂性。研究表明,模拟不同驱动因素对土地利用影响的框架设计需要充分考虑空间的复杂性以及评估时间的复杂度,需在一个跨学科背景下结合不同专业模型,这种框架必须考虑生物物理的影响,以及市场、政策等人文因素的影响。这虽然有一定挑战性,但仍可行,Briner 等以瑞士阿尔卑斯山西南的菲斯普市为研究区,提出 1 个评估山区土地利用变化模型框架,强调环境变化和经济决策间的相互作用对土地利用的影响,该模块化建模框架就较好地解决了空间和时间复杂性的问题<sup>[64]</sup>。

其次,影响土地利用变化驱动的因素多元化,包含自然环境因素和人类决策,复杂多样,考虑到计算机模拟的可行性,模型一般都将因素简化,然后通过参数化方式进行模拟,因此需要进行模型验证考量结果的准确性。

最后,人们对土地利用/覆被变化进行模拟研究寻求的是在社会、经济、生态等全局目标的指引下对多目标、多因素、多约束下的土地资源进行优化管理。多智能体模型的复杂算法 (如遗传算法、微粒群算法、蚁群算法、神经网络、人工免疫系统) 具有内在并行性和高度的智能性,能够制定灵活的模型框架,处理计算复杂型与数据密集型问题,展示空间布局过程。但这些数值优化算法,并非针对地理空间,其数值编码方式未能充分反映土地利用单元之间的拓扑性、空间相关性、与区域性等地理空间特征,无法提供空间分析与计算的数据基础,影响模型的效率和精度,因此,智能模型的算法需朝地理空间化的方向改进。

### 3.2 土地利用动态环境和人类复杂决策难以模拟

相较于其他 LUCC 模型,多智能体模型更适用于模拟人

类行为和生物物理景观之间的互连,但在模拟土地利用变化中人类与环境的关系上仍存在许多挑战。第一,要建立适用于耦合系统的模型应充分考虑动态生物物理环境,然而迄今为止大多数 MAS-LUCC 模型都假定地球环境保持不变,以静态方式处理生物物理环境<sup>[74-76]</sup>。已有研究对人类和生物物理系统的共同演化和相互作用少有涉及,仅有少数研究试图通过 MAS-LUCC 模型探讨人的决策与生物物理过程的联系,如 Matthews 等在尼泊尔棕榈模型中对土壤养分动态进行研究<sup>[77]</sup>。第二,异质性的多智能体系统至关重要,是智能体间不同行为的触发器。虽然现实世界智能体群体通常由具有特定模式的土地利用行为的不同社会群体组成,但许多已有 MAS-LUCC 模型仅通过评估和应用 1 个决策模型来模拟整个群体,未能充分捕捉这种群体间的异质性。另外,从环境方面来看,许多 MAS-LUCC 模型似乎忽略了如地形、土壤属性等决定生物物理异质性程度和土地利用决策的景观变量,因此,如何恰当地表示真实的人类社区和环境异质成为土地利用动态变化模拟研究的关键。第三,在 MAS-LUCC 模型中凭经验难以制定相关的、全面的决策机制。一些土地利用决策模型采用了目标驱动方法来表示优化(或理性)的智能体行为,尽管可以捕捉土地利用决策中的经济权衡,但优化行为的多数假设对发展中国家不适用,因此采用单独的优化方法效率往往很低。同时,要严格验证一系列不同规模人口规则集也是一个巨大的挑战。目前来说,尚无一个能全面考虑各因素的模拟决策技术和理论,因此相关研究人员正在探索一种综合方法来模拟现实世界人口的土地利用决策。

### 3.3 模型精度研究有待加强

在多智能体模型逐渐受到国内外青睐的同时,研究人员开始关注模拟结果的可信程度。基于智能体建模的本质是在理想情况下寻求微尺度下智能体行为和环境之间的交互信息。模型往往使用决策模型或空间结构构造智能体模型,而且通常包含随机元素,这使一些特性存在较高的敏感性。与其他领域模型一样,需要对构建的智能体模型的精密度和准确度进行评估,验证在复制现实世界趋势和模式方面是否成功。多智能体模型可以通过改进智能体参数化和决策方法,改善由人类因素对空间异质性造成的影响<sup>[78-80]</sup>;从生态角度也可以创建 1 个有效字段数据用于详细表示物种的空间行为和物种多样性<sup>[63,81]</sup>,因此进行敏感性分析和模型验证变得尤为重要<sup>[29,31,34,82-83]</sup>,特别是应用于现实管理策略制定时。

当前 MAS 模型的验证得到了一定重视,相关研究成果也有不少。通常用专家审验或启发式技术、精确算法、专门构建实例等技术 with 智能体建模进行比较来检验模型。Valbuena 等采访了来自研究区域不同地方和区域组织的 5 位专家,通过专家审定方法对模拟结果的合理性进行验证<sup>[60]</sup>。在采用基于智能体建模研究土地配置对丹麦云雀数量的影响时,Parry 等利用计算机代码输出的贝叶斯分析执行参数敏感性分析,以明确具有不确定性的输入参数<sup>[81]</sup>。Balbi 等测试各行参数的最大现实变化,根据最敏感的 4 个参数高、低值的所有可能组合对不同气候变化的 8 个旅游景点相关游客行为参数进行了敏感性分析,并通过社会试验验证了预测结果<sup>[41]</sup>。Marohn 等以该模型重现了不同人群的土地利用程度以验证模型,与其他关键参数进行类比验证模型初始化下能在多大

程度上再现当前系统状态,但这并不能代表模型的有效性<sup>[79]</sup>。Sun 等基于贝叶斯信念网络(Bayesian belief network,简称 BBN)对农户行为性能进行测试,用 80% 的调查样本(509 户农户和 1 973 块地块)进行网络学习,并利用剩余的 20% 进行模型验证,同时对这些结果的稳定性进行测试,通过重复 4 次随机选择的 80% 和 20%,以及通过改变测试数据集测试结果的可靠性<sup>[80]</sup>。最后,研究者们还对模型进行质量评估,审查 BBN 结果的相关性和可靠性。结果显示模型具有较高的预测能力,准确率可达 85%。

验证多智能体模型模拟结果的精度是一个繁琐而又艰巨的任务<sup>[84]</sup>,通过模拟人的决策,多智能体模型处理人类决策和这些决策所作用的社会经济和生物物理系统的复杂性和不确定性<sup>[35,47]</sup>,这种复杂性和不确定性使验证个人决策和相互作用变得更加艰难。准确而严谨的模拟结果有利于将多智能体模型模拟结果应用于现实管理策略的制定中,以更好地提高土地利用效益,谋求人类福祉,而模拟准确与否需要通过验证的方式来判断,因而,对模型验证方面进行更深入的研究对于提高模型精度显得尤为重要。

## 4 研究展望

本文首先设计了一系列的问题,集中对 MAS-LUCC 建模进行探索,表明多智能体模型是研究土地利用/覆被变化过程有效的分析工具,讨论了模型验证的关键性,并指出这些模型在实证应用中面临的挑战,以进一步把握研究的动态,理清研究思路。土地变化是一个极其复杂的问题,本文仅仅是一些初步的总结,在未来 LUCC 时空格局演化与情景模拟的研究中,整合多种工具和学科,开创新的思路和方法用于人类和环境相互作用的动态空间建模,在以下方向仍需加以深入探讨:

### 4.1 扩展多智能体模型的应用

土地利用变化研究涉及人类行为、其他事物、景观格局等多个角度,目前的研究多是将它们分开考量,分别进行建模分析,模型之间相对独立,不能很好地拟合它们之间的耦合关系。而没有一种方法能独立主宰这个新兴领域。相反,在许多情况下,广泛的技术模型开发和实证评估被用来有效解决单一的研究问题。此外,这种多样性将促进建模工作的开展,为进一步的研究奠定了基础。基于智能体建模是自底而上研究中一个十分有效的工具,但其在建模的过程中不可能面面俱到,在具体实施过程中也有一定局限性,因此未来的研究应当对其不断完善与扩展。

首先,影响决策主体进行土地利用决策的因素还有很多,不仅仅是土地拥有者的决策与行为等,应从对决策主体的基础研究入手,对其影响土地利用的方式进行更加全面深入的理解。同时不同模型各有优势与不足,适用范围也不相同,通常单个模型无法完成多目标、多因素、多约束下的土地利用/覆被变化研究,因此,加强基于智能体建模方法与其他技术的综合运用,探索不同模型的整合方式,拓展其应用范围,是 MAS-LUCC 研究的重要方向。其次,应不断尝试加入其他影响土地利用变化的智能体与驱动因子,如植被和气候等,以更全面准确地将现实世界拟合到模型中。最后,深入对尺度之间转换问题的研究从个体决策上升到群体决策,从单一地

块到整体地块,这都需要考虑尺度转换的问题。目前,既有对宏观尺度的研究,也有基于微观尺度的分析,但对尺度转换问题的探讨较少,缺乏对大小尺度连通性的关注,因此宏观、微观之间的尺度转换问题还存在很大的研究空间。要加深对土地利用变化的认识,就要进一步明确尺度之间的关系,探索它们之间的转换规则,实现对土地利用变化深入、全面的理解。

#### 4.2 优化多智能体模型的算法

MAS - LUCC 建模是一种自上而下的模型,它在模拟土地利用空间复杂系统的时空动态方面具有非常突出的优势,但是缺乏全局的寻优计算方式,模拟结果无法满足区域社会、经济、生态目标的要求;相反,另一类采用自上而下建模方法的模型能够考虑区域全局目标,得到一系列的最优解。这类模型主要包括线性规划、遗传算法、微粒群计算、蚁群算法等智能优化算法,它们具有开放性大、效率高、问题优化求解能力强的特点,但由于缺乏微观土地利用变化决策过程,难以反映微观空间演变规律,无法得到合理的配置方案<sup>[85]</sup>,因此可以考虑将这 2 种模型相结合,优势互补。

#### 4.3 重视模型参数的标准化及模型验证

土地利用的决策是多方面的,同时也涉及到不同公共事业类型的评估。针对决策主体决策行为的模拟研究通常是在基于线性规划方法寻求最大化效益的假设下进行的,然后在这种经济合理性条件下对决策过程进行简化。不同研究表明,利润最大化的方法是一个合理的假设<sup>[86]</sup>,因此模型的结果不会因为某种简化而失去有效性。但仍需注意的是,优化模型的结果必须规范性地解释而不是描述性地陈述,评估模型的方法是否适用于不同的方案并对这些结果进行验证由此排除模型参数缺陷的可能性,验证模型的可信度仍是一项重要的工作。目前对 MAS 模型验证方面的研究取得较大的进展,但也意味着其面临更复杂的挑战。验证多智能体模型精度的一个关键性问题是缺乏合适的比较基准,未来应创建一个复合空间单元,将不同土地覆盖模型结合在单一的管理单元中<sup>[87]</sup>,生成与模拟景观属性相匹配的经验分布,开发优化算法细分大型地块<sup>[88]</sup>,优化智能体决策模型中参数化设计。只有合理地适应决策规则和智能体属性演变,才能为推出可供地理参考的环境和社会经济数据打开新的机遇,充分利用好 MAS 方法的潜力。

#### 参考文献:

- [1] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570 - 574.
- [2] Verburg P H, Tabeau A, Hatna E. Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: a study for land use in Europe [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 127(3): S132 - S144.
- [3] 樊杰, 蒋子龙. 面向“未来地球”计划的区域可持续发展系统解决方案研究——对人文 - 经济地理学发展导向的讨论[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1): 1 - 9.
- [4] Verburg P H, Overmars K P. Combining top - down and bottom - up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the dyna - clue model [J]. Landscape ecology, 2009, 24(9): 1167 - 1181.
- [5] Lambin E F, Geist H. Land - use and land - cover change: local

- processes and global impacts[M]. Berlin: Springer. 2006.
- [6] 陈海, 梁小英, 高海东, 等. Multi - agent system 模型在土地利用/覆盖变化中的研究进展[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 345 - 352.
  - [7] 刘纪远, 邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3251 - 3258.
  - [8] Verburg P H, Overmars K P. Combining top - down and bottom - up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the dyna - clue model [J]. Landscape Ecology, 2009, 24(9): 1167 - 1181.
  - [9] Brovkin V, Boysen L, Arora V K, et al. Effect of anthropogenic land - use and land cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the 21st century (Invited) [J]. Journal of Climate, 2013, 26(18): 6859 - 6881.
  - [10] Prestele R, Alexander P, Rounsevell M D A, et al. Hotspots of uncertainty in land - use and land - cover change projections: a global - scale model comparison [J]. Global Change Biology, 2016, 22(12): 3967 - 3983.
  - [11] Rounsevell M D A, Reginster I, Araújo M B, et al. A coherent set of future land use change scenarios for Europe [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 114(1): 57 - 68.
  - [12] Rounsevell M D A, Metzger M J. Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2010, 1(4): 606 - 619.
  - [13] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, et al. The causes of land - use and land - cover change: moving beyond the myths [J]. Global Environmental Change, 2001, 11(4): 261 - 269.
  - [14] O'Neill B C. Erratum: Population scenarios based on probabilistic projections: an application for the millennium ecosystem assessment [J]. Population & Environment, 2005, 26(3): 229 - 254.
  - [15] Abildtrup J, Audsley E, Fekete - Farkas M, et al. Socio - economic scenario development for the assessment of climate change impacts on agricultural land use: a pairwise comparison approach [J]. Environmental Science & Policy, 2006, 9(2): 101 - 115.
  - [16] Grübler A, O'Neill B C, Riahi K, et al. Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES [J]. Technological Forecasting & Social Change, 2007, 74(7): 980 - 1029.
  - [17] Rounsevell M D A, Robinson D T, Murrayrust D. From actors to agents in socio - ecological systems models [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2012, 367(1586): 259 - 269.
  - [18] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 19 - 27.
  - [19] 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[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 573 - 578.
  - [20] 邓祥征, 林英志, 黄河清. 土地系统动态模拟方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2123 - 2129.
  - [21] Kamusoko C, Aniya M, Adi B, et al. Rural sustainability under threat in Zimbabwe - simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov - cellular automata model [J]. Applied Geography, 2009, 29(3): 435 - 447.
  - [22] 聂婷, 肖荣波, 王国恩, 等. 基于 Logistic 回归的 CA 模型改进方法——以广州市为例[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1909 -

- 1919.
- [23] Guan D, Gao W, Su W, et al. Modeling and dynamic assessment of urban economy – resource – environment system with a coupled system dynamics – geographic information system model [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1333 – 1344.
- [24] 郭欢欢, 李波, 侯鹰, 等. 元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1336 – 1344.
- [25] Memarian H, Balasundram S K, Talib J B, et al. Validation of CA – Markov for simulation of land use and cover change in the Langat Basin, Malaysia [J]. Journal of Geographic Information System, 2012, 4(6): 542 – 554.
- [26] Subedi P, Subedi K, Thapa B. Application of a hybrid cellular automaton – markov (CA – Markov) model in land – use change prediction: a case study of saddle creek drainage basin, Florida [J]. Science & Education, 2013, 1(6): 126 – 132.
- [27] Verburg P H, Kok K, Veldkamp A. Pixels or agents? Modelling land – use and land – cover change [J]. Ihdip Update, 2005, 3(2005): 308 – 324.
- [28] Le Q B, Park S J, Vlek P L G, et al. Land – use dynamic simulator (LUDAS): a multi – agent system model for simulating spatio – temporal dynamics of coupled human – landscape system. I. structure and theoretical specification [J]. Ecological Informatics, 2008, 3(2): 135 – 153.
- [29] Schreinemachers P, Berger T. An agent – based simulation model of human – environment interactions in agricultural systems [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(7): 845 – 859.
- [30] An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: review of agent – based models [J]. Ecological Modelling, 2012, 229(4): 25 – 36.
- [31] 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 [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(2): 314 – 337.
- [32] Janssen M A, Ostrom E. Guest editorial: empirically based, agent – based models [J]. Ecology and Society, 2006, 11: 2, 37.
- [33] Fontaine C M. Residential agents and land use change modelling [D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2010.
- [34] Haase D, Haase A, Kabisch N, et al. Actors and factors in land – use simulation: the challenge of urban shrinkage [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 35(5): 92 – 103.
- [35] Filatova T, Voinov A, Anne V D V. Land market mechanisms for preservation of space for coastal ecosystems: an agent – based analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(2): 179 – 190.
- [36] 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: 2. scenario – based application for impact assessment of land – use policies [J]. Ecological Informatics, 2010, 5(3): 203 – 221.
- [37] Macal C M, North M J. Tutorial on agent – based modelling and simulation [J]. Journal of Simulation, 2010, 4(3): 151 – 162.
- [38] Simon C, Etienne M. A companion modelling approach applied to forest management planning [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(11): 1371 – 1384.
- [39] Murillo J, Busquets D, Dalmau J, et al. Improving urban wastewater management through an auction – based management of discharges [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(6): 689 – 696.
- [40] Zhang H, Zeng Y, Bian L, et al. Modelling urban expansion using a multi agent – based model in the city of Changsha [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4): 540 – 556.
- [41] Balbi S, Giupponi C, Perez P, et al. A spatial agent – based model for assessing strategies of adaptation to climate and tourism demand changes in an alpine tourism destination [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 45(45): 29 – 51.
- [42] Leahy J E, Reeves E G, Bell K P, et al. Agent – based modeling of harvest decisions by small scale forest landowners in Maine, USA [J]. International Journal of Forestry Research, 2013.
- [43] Acosta L A, Rounsevell M D A, Bakker M, et al. An agent – based assessment of land use and ecosystem changes in traditional agricultural landscape of Portugal [J]. Intelligent Information Management, 2014, 6(2): 55 – 80.
- [44] Meiyappan P, Dalton M, O'Neill B C, et al. Spatial modeling of agricultural land use change at global scale [J]. Ecological Modelling, 2014, 291: 152 – 174.
- [45] Bousquet F, Page C L. Multi – agent simulations and ecosystem management: a review [J]. Ecological Modelling, 2004, 176(3/4): 313 – 332.
- [46] Parker D C, Meretsky V. Measuring pattern outcomes in an agent – based model of edge – effect externalities using spatial metrics [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 101(2): 233 – 250.
- [47] Matthews R B, Gilbert N G, Roach A, et al. Agent – based land – use models: a review of applications [J]. Landscape Ecology, 2007, 22(10): 1447 – 1459.
- [48] Torrens P M. Agent – based models and the spatial sciences [J]. Geography Compass, 2010, 4(5): 428 – 448.
- [49] Arifin S M N, Arifin R R, Pitts D D A, et al. Landscape epidemiology modeling using an agent – based model and a geographic information system [J]. Land, 2015, 4(2): 378 – 412.
- [50] Badmos B K, Agodzo S K, Villamor G B, et al. An approach for simulating soil loss from an agro – ecosystem using multi – agent simulation: a case study for semi – arid Ghana [J]. Land, 2015, 4(3): 607 – 626.
- [51] Brändle J, Langendijk G, Peter S, et al. Sensitivity analysis of a land – use change model with and without agents to assess land abandonment and long – term re – forestation in a swiss mountain region [J]. Land, 2015, 4(2): 475 – 512.
- [52] Clark J K, Crabtree S A. Examining social adaptations in a volatile landscape in northern mongolia via the agent – based model ger grouper [J]. Land, 2015, 4(1): 157 – 181.
- [53] Deng D, Bennett D, Secchi S. Investigating impacts of alternative crop market scenarios on land use change with an agent – based model [J]. Land, 2015, 4(4): 1110 – 1137.
- [54] Olabisi L S, Wang R Q, Ligmann – Zielinska A. Why don't more farmers go organic? Using a stakeholder – informed exploratory agent – based model to represent the dynamics of farming practices in the philippines [J]. Land, 2015, 4(4): 979 – 1002.
- [55] Zellner M L, Riolo R L, Rand W, et al. The problem with zoning: nonlinear effects of interactions between location preferences and

- externalities on land use and utility[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2010, 37(3): 408–428.
- [56] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 基于多智能体的居住区位空间选择模型[J]. *地理学报*, 2010, 65(6): 695–707.
- [57] Murray – Rust D, Rieser V, Robinson D T, et al. Agent – based modelling of land use dynamics and residential quality of life for future scenarios[J]. *Elsevier Science Publishers B. V.*, 2013, 46(46): 75–89.
- [58] Zhang H, Jin X, Wang L, et al. Multi – agent based modeling of spatiotemporal dynamical urban growth in developing countries: simulating future scenarios of Lianyungang City, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(1): 63–78.
- [59] Manson S M, Evans T. Agent – based modeling of deforestation in southern Yucatán, Mexico, and reforestation in the Midwest United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20678–20683.
- [60] Valbuena D, Verburg P H, Bregt A K, et al. An agent – based approach to model land – use change at a regional scale [J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(2): 185–199.
- [61] Polhill J G, Sutherland L A, Gotts N M. Using qualitative evidence to enhance an agent – based modelling system for studying land use change[J]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2010, 13(2): 10.
- [62] Happe K, Hutchings N J, Dalgaard T et al. Modelling the interactions between regional farming structure, nitrogen losses and environmental regulation[J]. *Agricultural Systems*, 2011, 104(3): 281–291.
- [63] Polhill J G, Gimona A, Gotts NW, et al. Nonlinearities in biodiversity incentive schemes: a study using an integrated agent – based and metacommunity mode[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2013, 45: 74–91.
- [64] Briner S, Elkin C, Huber R, et al. Assessing the impacts of economic and climate changes on land – use in mountain regions: a spatial dynamic modeling approach [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 149: 50–63.
- [65] 薛领, 诸叶平, 雪燕, 等. 基于 Agent 的农业经济智能决策支持系统研究[J]. *土壤与作物*, 2004, 20(3): 172–176.
- [66] 田光进, 邹建国. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4451–4459.
- [67] 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[J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1448–1456.
- [68] 陈海, 杨维鸽, 梁小英, 等. 基于 multi – agent system 的多尺度土地利用变化模型的构建与模拟[J]. *地理研究*, 2010, 29(8): 1519–1527.
- [69] 潘理虎, 黄河清, 姜鲁光, 等. 基于人工社会模型的退田还湖生态补偿机制实例研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2007–2017.
- [70] 王磊. 2011 土地利用变化的多尺度模拟研究——以贵州猫跳河流域为例[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [71] 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[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1518–1530.
- [72] 常笑, 刘黎明, 刘朝旭, 等. 农户土地利用决策行为的多智能体模拟方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(14): 227–237.
- [73] Berger T, Troost C. Agent – based modelling of climate adaptation and mitigation options in agriculture [J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2014, 65(2): 323–348.
- [74] Berger T. Agent – based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis [J]. *Agricultural Economics*, 2001, 25(2/3): 245–260.
- [75] Happe K. Agricultural policies and farm structures: agent – based modelling and application to EU – policy reform[J]. *Studies on the Agricultural & Food Sector in Transition Economies*, 2004, 30(12): 1209–12.
- [76] Brown D G, Robinson D T. Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent – based model of urban sprawl[J]. *Ecology & Society*, 2006, 11(1): 709–723.
- [77] Matthews R, Selman P. Landscape as a focus for integrating human and environmental processes [J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2006, 57(2): 199–212.
- [78] Gaube V, Remesch A. Impact of urban planning on household's residential decisions: an agent – based simulation model for Vienna [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45: 92–103.
- [79] Marohn C, Schreinemachers P, Dang V Q, et al. A software coupling approach to assess low – cost soil conservation strategies for highland agriculture in Vietnam [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45(1): 116–128.
- [80] Sun Z, Müller D. A framework for modeling payments for ecosystem services with agent – based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45(7): 15–28.
- [81] Parry H R, Topping C J, Kennedy M C, et al. A Bayesian sensitivity analysis applied to an agent – based model of bird population response to landscape change [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45(45): 104–115.
- [82] Murillo J, Busquets D, Dalmau J, et al. Improving urban wastewater management through an auction – based management of discharges [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(6): 689–696.
- [83] Polhill J G, Izquierdo L R, Gotts N M. What every agent – based modeller should know about floating point arithmetic [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(3): 283–309.
- [84] Messina J P, Evans T P, Manson S M, et al. Complex systems models and the management of error and uncertainty[J]. *Journal of Land Use Science*, 2008, 3(1): 11–25.
- [85] 袁满, 刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 191–199.
- [86] Rounsevell M D A, Annetts J E, Audsley E, et al. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 95(2): 465–479.
- [87] Robinson D T, Sun S, Hutchins M, et al. Effects of land markets and land management on ecosystem function: a framework for modelling exurban land – change[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45(1): 129–140.
- [88] Wickramasuriya R, Chisholm L A, Puotinen M, et al. A method to dynamically subdivide parcels in land use change models [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(8): 1497–1513.