



DOI: 10.5846/stxb202003060421

梁友嘉, 刘丽珺. 森林-农业景观格局变化的社会-生态系统模拟模型方法进展. 生态学报, 2020, 40(24): 9252-9259.

森林-农业景观格局变化的社会-生态系统模拟模型方法进展

梁友嘉^{1,*}, 刘丽珺²

1 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070

2 武汉理工大学航运学院, 武汉 430000

摘要: 社会-生态系统 (SES) 模拟模型是景观格局分析和决策的有效工具, 能表征景观格局变化的社会-生态效应及景观决策的复杂反馈机制。文献综述了森林-农业景观格局的 SES 模型方法进展发现: (1) 多数模型对景观过程与社会经济决策的反馈关系分析不足; (2) 应集成多种情景模拟和景观效应分析方法, 完善现有 SES 模型的理论方法基础; (3) 通过集成格局优化模型和自主体模型会有效改进 SES 模型功能, 具体途径包括: 集成情景-生态效应的景观格局模拟方法、完善景观决策的理论基础、加强集成模型的不确定性分析、降低模型复杂性和综合性、定量数据等。研究结果有助于理解多尺度森林-农业景观格局在社会-生态系统中的重要作用, 能更好地支持跨学科集成模型开发与应用。

关键词: 森林-农业景观格局; 社会-生态系统; 集成建模; 自主体模型; 景观决策

复杂社会-生态系统模拟是区域决策管理的核心议题^[1], 能有效揭示景观格局、生态功能和福祉等的关联影响^[2]。景观格局是土地利用/土地覆被 (Land-Use and Land-Cover, LULC) 的空间异质性分布, 是维持区域生态功能的重要驱动力^[3]。森林-农业景观格局是森林-农业复合生态系统在空间上的分布与组合规律, 表现为大小、形状和属性各异的森林和农业斑块。森林-农业景观对区域的经济生产贡献显著, 与生态系统的生物产量、营养物质循环、系统抗干扰能力等生态功能和生物多样性紧密相关^[4]。通过集成社会-自然科学知识方法, 充分认识森林-农业景观格局变化及其生态效应, 能有效促进可持续性森林-农业景观管理^[5]。社会-生态系统 (Social-Ecological System, SES) 模拟模型是耦合社会-生态系统的互馈过程、因果关系和潜在可持续性途径的知识框架与方法体系^[6], 具有子系统关联、多过程分析、多情景预测和多要素互馈评估等模型功能。在景观格局变化影响的复杂社会-生态系统分析中, SES 模型具有很强的模拟、解释和决策辅助优势, 综述跨学科 SES 模型研究进展并获取模型的潜在优化方案, 将为改善森林-农业复合生态系统治理问题提供一定的集成方法支持。

SES 模型主要与 4 类模型有关联: 1) 系统动力学 (System dynamics): 利用要素的因果反馈关系分析复杂系统的非线性动态行为^[7]; 2) 仿真模型 (Simulation models): 在系统动力学基础上利用计算机仿真模拟系统过程^[8]; 3) 生物经济模型 (Bio-economic models): 集成系统生物物理组分和经济要素, 实现特定资源和经济约束下的经济目标优化^[9]; 4) 自主体模型 (Agent-based models, ABM): 模拟多时空动态的自主体及其与环境交互关系^[10]。在此基础上形成的 SES 模型兼顾了多种社会-生态需求, 注重管理决策优化与规划预测, 相应的集

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601184)

收稿日期: 2020-03-06; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjliang@whut.edu.cn

成建模框架和跨学科方法正快速完善^[11]。综述 2000—2019 年森林-农业景观格局变化的 SES 模型进展,总结集成建模框架与模型方法特征,提出模型优化措施,为认识景观格局在社会-生态集成过程中的关键作用提供交叉学科知识与方法参考。

1 文献计量分析

在 Web of Science 数据库以(“Forest landscape” OR “Agriculture landscape” OR “Forest Agroecosystem”) AND (“Integrated” OR “Integration”) AND (“Social-ecological model” OR “Ecological-economic model”)进行主题词检索(2000—2019 年),总发文量有 3091 篇,总引文数 30750 次,两者增加趋势基本一致(图 1)。发文前三位的专业期刊是《Ecology and Society》(234 篇)、《Agriculture Ecosystems Environment》(56 篇)和《Ecological Economics》(39 篇),综合性期刊《PNAS》(36 篇)和《PLOS One》(55 篇)也贡献较大;发文 600 篇以上的研究领域有环境科学 & 生态学(2143 篇)、生物多样性保护(1170 篇)、农学(976 篇)、心理学(781 篇)、行为科学(684 篇)、林学(684 篇)、企业经济学(673 篇)、社会学(661 篇)和植物科学(646 篇)。

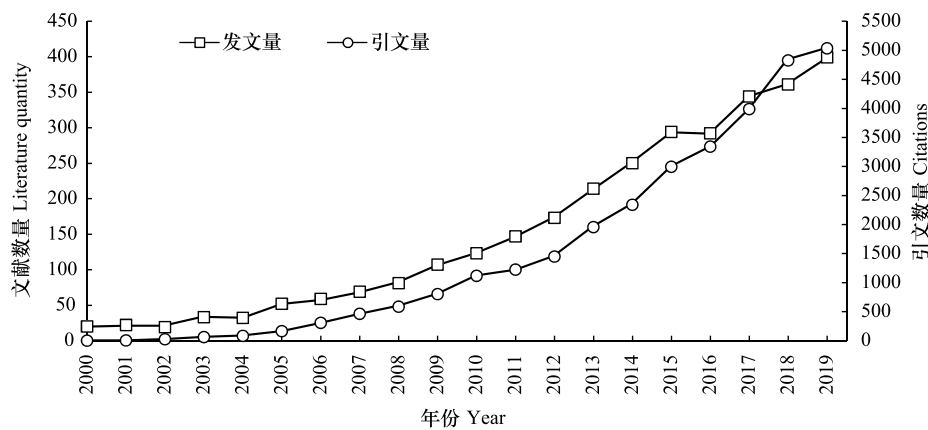


图 1 基于森林-农业景观格局的 SES 模型发文数和引文数

Fig.1 Quantity and citations of papers for social-ecological system models in forest-agroecosystems landscape patterns

2 社会-生态系统模拟模型方法研究进展

2.1 建模框架分析

景观格局与社会-生态过程的互馈关系是发展 SES 模型的理论基础(图 2)。社会经济过程是影响决策的主要驱动力,景观格局是土地所有者、政府和公众等利益相关者实施景观管理的结果,并产生生态效应。生态经济学认为“景观管理”是通过效用最大化将稀缺土地资源变为特定景观的决策方案^[12]，“效用”(Utility)是用于表征参与者满意程度的重要社会-生态指标;景观生态学的格局分析揭示了景观的聚集性程度(如斑块水平)、多样性(如 Shannon 指数)和时空异质性变化等生态效应^[13],还与栖息地分布和生态系统服务关联^[14]。有效调控森林-农田景观要素之间的相互作用机制,会显著提高区域生态系统功能、栖息地连通性和植被稳定性^[15]。

社会经济过程与景观生态效应之间存在复杂反馈,影响利益相关者的决策:在理性土地所有者参与的反馈中,森林-农业景观格局的个体决策变化会影响农林经济总效益,利用生物经济模型能有效评估农林经济风险和土地效益变化^[16-17];在集成政府与公众决策的反馈中主要利用生态系统服务框架和福祉经济方法进行评估^[18],决策过程受景观内生价值、资本和社会成本等福祉要素影响,通过信息法规建设、生态补偿政策等途径实现对社会经济过程的调控^[19],景观管理政策(如生态功能区)也会影响景观格局。社会-生态系统反馈机制还与气候变化、水-能源-粮食安全等系统外部要素存在复杂相互作用,开展社会-经济-生态要素综合分析,借鉴复杂系统研究成果,将为 SES 模型框架扩展提供理论与方法支撑。

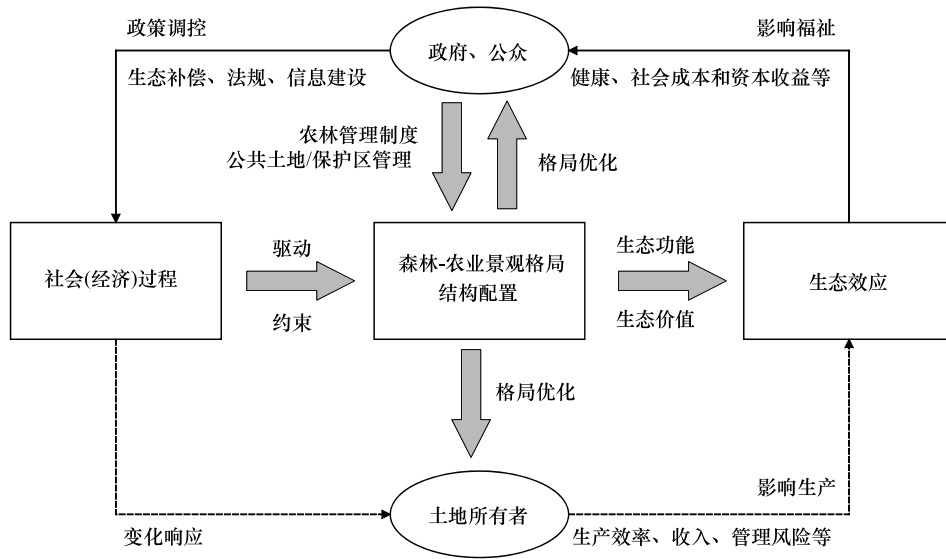


图 2 森林-农业景观格局与社会-生态过程集成的概念框架

Fig.2 Conceptual framework for integrating forest-agriculture landscape patterns and social-ecological processes

2.2 模型方法研究进展

利用 Endnote x9 和文献关键词进一步筛选模型方法文献:(landscape * OR land * OR LU *) AND (econ * OR social) AND (forest * OR agri *) AND (model * OR optim * OR agent) AND (config * OR compos * OR map * OR matrix), 去除社会-生态反馈较少的城市景观类文献。参照关联模型的划分,将 SES 模型分为经验统计模型、系统仿真模型、景观格局优化模型和 ABM(表 1),并对比模型的反馈机制、方法类型、时空尺度、不确定性和复杂性等功能差异。

表 1 文献综述的典型社会-生态系统模型对比

Table 1 Comparison of typical social-ecological models by literature review

模型类型 Model category		反馈类型 Feedbacks	景观 Landscape	时空尺度描述 Spatiotemporal scale	不确定性 Uncertainty	复杂性 Complexity	文献 References
经验统计 Empirical statistical	空间显式	政府	结构+配置	空间连续+时间协变量	预测误差估计	高	[20-21]
	非空间显式	政府+公众		时间协变量		高	[22-23]
系统仿真 System simulation	Markov 链	政府	结构	空间离散+预定义时长	调整转换概率	较高	[24]
	状态-转换模型	政府	结构+配置		调整转换规则		[25]
	元胞自动机	政府+公众	结构		包含随机过程		[26-27]
景观格局优化 Landscape optimization	风险评估	公众	—	空间连续+动态时长	—	高	[28-29]
	经济评估	公众	结构+配置		决策驱动力	较高	[30]
	多准则决策	政府+公众	—		—	较高	[31]
自主体模型(ABM) Agent-based models	—	政府+公众	结构	时空过程动态优化	决策随机性	很高	[32-37]

2.2.1 经验统计模型

经验统计模型用于揭示森林-农业景观格局、社会经济驱动因素和景观生态效应的相关性。如权衡生态系统服务价值发现,森林-农业景观整体与生态服务价值变化正相关^[38],但局部的破碎化景观斑块与气候调节、土壤维持和作物生产等服务价值变化呈负相关^[39],流域尺度下的景观格局变化则与水供给、生物多样性保护和游憩正相关^[40];景观斑块大小是影响经验统计建模尺度与生态系统服务价值的关键变量,亟待深入研究^[41];干旱区的森林-农业景观格局变化受人类生存需求限制,只强调财政支持和增加非农收入会对景观异质性产生负作用^[42],应加强景观异质性的社会经济动因分析;经验统计模型能揭示利益相关者对景观变化的响应程度,但农户投资组合的收入波动较小,主要是受农业补贴影响^[43],应进一步集成多尺度的农林经济理论方法,提高景观分析与统计预测的精度。经验统计模型在表征社会-生态系统的复杂动态反馈方面仍存在局限性。

2.2.2 系统仿真模型

系统仿真利用统计相关性或生物物理过程模型模拟系统变化,主要方法有半定量(如因果循环图)方法、概率转换模型(如 Markov 链、状态-转换模型)和元胞自动机(Cellular Automata, CA)等^[44]。概率转换模型假设离散景观单元在特定时间内按一定转换概率迭代计算,受随机转移概率和转移类型影响^[21],多与经济决策情景集成。如模拟发现北卡罗来纳州森林-农业景观中的林业生物能源需求高于农业,导致区域森林面积增加且结构多样性降低^[23];CA 利用预定义规则模拟景观单元状态及相邻元胞的响应变化,适用于复杂景观格局模拟。如模拟发现农药使用和绿色基础设施投资变化均会影响森林-农业景观格局变化^[45],CLUE-S^[46]和 CA-Markov^[47]等模型已能揭示多种社会经济驱动力对异质性森林-农业景观格局的综合影响,并集成了作物价格波动等随机过程对景观格局的影响^[48]。系统仿真模型多用于描述社会经济过程对森林-农业景观格局的单向作用,社会-生态系统复杂反馈机制模拟仍需加强。

2.2.3 景观格局优化模型

景观格局优化模型通过特定决策准则组合获取最佳的格局优化方案,改进了经验统计和系统仿真模型中预定义假设的局限性^[24]。主要应用有:风险减缓效应评估,如农林景观格局优化和水资源分配模拟^[49]等;森林-农业景观格局的多样性评估,如农林复合经营模式综合分析^[50];利用数学规划方法表征公众对森林-农业景观变化的响应机制^[26]。显式的格局优化模型能集成空间动力学模型及景观格局配置算法:如集成 CA 和多准则优化算法^[51-52],但模型数据获取困难且计算耗时、结果重现性低,增加了优化方案的复杂性和不确定性。格局优化模型能有效揭示异质性景观决策过程,但对格局配置分析不足。

2.2.4 ABM 模型

ABM 主要用于景观尺度的社会-生态系统分析^[28],通过表征决策者和农户、家庭和社区等自主体的交互作用,揭示特定决策规则的时空扩散和复杂反馈。ABM 决策表征的主要方法有规则性方法^[29]、多元回归法^[30]、数学规划^[31]和贝叶斯网络^[53]等。通过与空间数据和地理信息技术集成,模型还用于森林-农业景观组分和格局配置模拟^[54],但多侧重自主体随机分配过程,对格局自相关性和空间数据精度不够重视^[55]。可先通过 ABM 景观生成器获取可用的多种景观格局,再模拟相应景观配置的生态效应以减少数据精度影响^[56]。ABM 为集成森林-农业景观特征、社会-生态过程互馈和景观决策不确定性等提供了建模框架和模拟机理认识。模型在数据需求和复杂性建模准则方面仍有待改进。

3 社会-生态系统模型方法改进的可能途径

针对 SES 模型在森林-农业景观格局复杂反馈机制方面的局限性,以多源数据与模型集成为基本途径,在景观格局和生态效应分析基础上发展嵌套式、模块化的显式建模方法,提出 5 种关联的潜在模型改进途径(图 3),并分析其面临的挑战。

3.1 发展景观格局的情景模拟方法

森林-农业景观格局变化一般通过连续的 LULC 过程模拟实现,为开发参与式的跨学科情景预测方法和

相应的景观格局优化提供了建模基础。情景方法提供多种预定义的森林-农业景观配置方式,能排除社会经济/技术等层面不可行的景观决策和简化情景设置,便于生成利益相关者关注的可用景观格局;情景方法能集成多目标规划与空间模拟功能,适用于模拟森林-农业景观格局的生态效应优化方案。景观格局的情景模拟方法能促进林学、农学和土地变化科学等多学科知识交互,集成结构复杂的多元情景与空间模拟模型,为获取最优的森林-农业景观格局提供参数和策略设计的科学方案。

3.2 提升景观格局的效应集成方法

森林-农业景观格局与多元社会驱动力及其生态效应的空间分析尺度通常不匹配,现有 SES 模型的改进方法主要有栅格矩阵分析、图形网络和地表梯度模拟等^[35]。应以生态系统服务功能为景观格局生态效应的重要指标,细化 SES 模型中不同景观生态系统服务类型的空间模拟,如精细模拟森林群落变化对生态系统功能的直接和间接影响^[36];加强对社会-生态过程影响的景观格局空间自相关性分析,利用 CA、ABM 等模拟和解释森林-农业景观配置问题,如物种入侵及扩散试验、最优农林复合系统投资和土地管理策略等^[37];此外,ABM 的景观生成功能会减少数据需求和降低模型复杂性^[57],为改进森林-农业景观空间自相关性和景观生态效应的决策过程提供方法参考。

3.3 完善景观决策的理论方法基础

森林-农业景观决策的核心目标是效益最大化,但 SES 模型决策规则多缺乏完整的理论方法支持^[58]。应充分整合个体、群体和机构等层面的森林-农业景观决策案例,系统认识社会经济决策的经验、标准和规律,整合多源认知信息以降低决策的不确定性;利用经济学方法集成景观决策知识,如通过风险规避的效用函数评估多功能农业景观格局变化^[59];改进 SES 模型中的完全理性假设^[60],发展基于有限理性假设的情景和模型预测方法;调整传统的系统建模目标,重视从多尺度、多主体景观决策的不确定性中寻求方法突破;继续完善多元决策主体参与的模型理论和模拟方法^[61],凝练利益相关者参与森林-农业景观模型验证和决策的实践途径。

3.4 加强模型的不确定性分析

SES 模型对不确定性分析普遍重视不足,如收集的 131 个 ABM 案例研究中只有 15 个涉及不确定性分析;不确定性分析会有效促进森林-农业景观多样性和生态效应的系统评估,如对公共生态系统服务供给和相应效益进行综合调控,减缓景观决策的系统风险^[62];应在森林-农业景观格局、社会经济过程和生态效应的复杂反馈中加强不确定性分析,如利用模糊建模方法表征流域尺度森林-农业景观空间相互作用的不确定性^[63],将景观效用函数纳入 SES 模型决策模拟;引入稳健优化方法以改进 SES 模型中相关性数据的协方差估计^[64];集成时间动态方法(如递归效用函数),获取多尺度社会-生态过程反馈的动态经济偏好或外部价格波动^[65]。

3.5 降低模型数据的复杂性

SES 模型开发应遵循模块化的简约原则,如采用逐步混合方法集成简单模型与包含景观发生器的 ABM^[66];应进一步集成和规范多源的定量-定性数据,以更好地表征社会-生态系统过程以外的文化、制度和福祉等复杂模型信息^[67];SES 模型的数据集成仍面临挑战:一是对定性数据共享和重复利用认识不足,共享数据保密性、匿名性和知情权等复杂伦理问题尚未得到解决;二是多元数据类型及元数据索引库相对较少。

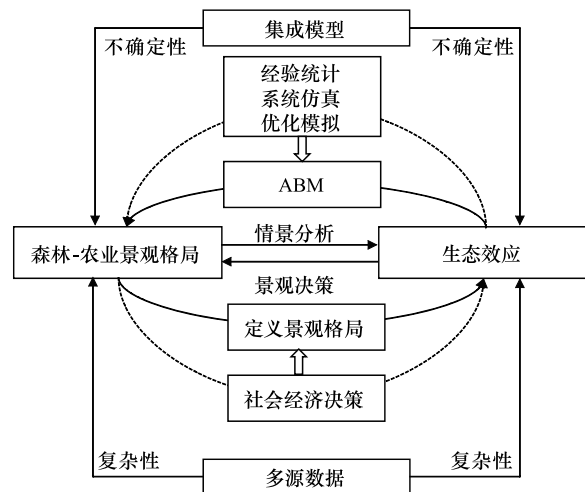


图3 社会-生态系统模型中潜在的改进途径之间的概念联系

Fig.3 Conceptual links between potential pathways in social-ecological system models

可能解决途径有:建立标准模型数据库和数据使用政策,增加定性-定量数据重复使用机会;调整数据管理政策以鼓励建模者共享数据,提高集成数据的编制预算以增加数据的生产和数据库建设。

森林-农业景观变化受多种社会经济决策过程的综合影响,SES 模型在表征景观决策驱动因素、格局变化和生态效应互馈等方面有显著优势。综述表明:景观组分的多样性能降低森林-农业景观系统的社会-生态风险;应尽快发展森林-农业景观格局的情景模拟和效应集成方法,完善模型理论方法基础;最受关注的 SES 模型是景观格局优化模型和 ABM,通过加强不确定性分析、降低模型复杂性和数据集成等途径可能会改进 SES 模型功能,为跨学科集成模型发展提供理论方法支持。

参考文献 (References):

- [1] Defries R, Nagendra H. Ecosystem management as a wicked problem. *Science*, 2017, 356(6335): 265-270.
- [2] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005: 77-101.
- [4] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [5] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, Ribeiro M C, Paglia A P. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1247-1257.
- [6] Chopin P, Bergkvist G, Hossard L. Modelling biodiversity change in agricultural landscape scenarios—a review and prospects for future research. *Biological Conservation*, 2019, 235: 1-17.
- [7] Veldkamp A. Investigating land dynamics: future research perspectives. *Journal of Land Use Science*, 2009, 4(1-2): 5-14.
- [8] Landis D A. Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic and Applied Ecology*, 2017, 18: 1-12.
- [9] Castro L M, Härtl F, Ochoa S, Calvas B, Izquierdo L, Knoke T. Integrated bio-economic models as tools to support land-use decision making: a review of potential and limitations. *Journal of Bioeconomics*, 2018, 20(2): 183-211.
- [10] Schlüter M, Müller B, Frank K. The potential of models and modeling for social-ecological systems research: the reference frame ModSES. *Ecology and Society*, 2019, 24(1): 31.
- [11] 马学成, 巩杰, 柳长青, 张金茜. 社会生态系统研究态势: 文献计量分析视角. *地球科学进展*, 2018, 33(4): 435-444.
- [12] Bartuszevige A M, Taylor K, Daniels A, Carter M F. Landscape design: integrating ecological, social, and economic considerations into conservation planning. *Wildlife Society Bulletin*, 2016, 40(3): 411-422.
- [13] Frazier A E, Kedron P. Landscape metrics: past progress and future directions. *Current Landscape Ecology Reports*, 2017, 2(3): 63-72.
- [14] Santana J, Reino L, Stoate C, Moreira F, Ribeiro P F, Santos J L, Rotenberry J T, Beja P. Combined effects of landscape composition and heterogeneity on farmland avian diversity. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(4): 1212-1223.
- [15] Ribeiro P F, Santos J L, Santana J, Reino L, Leitão P J, Beja P, Moreira F. Landscape makers and landscape takers: links between farming systems and landscape patterns along an intensification gradient. *Landscape Ecology*, 2016, 31(4): 791-803.
- [16] Paul C, Weber M, Knoke T. Agroforestry versus farm mosaic systems—comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. *Science of the Total Environment*, 2017, 587-588: 22-35.
- [17] Paul C, Knoke T. Between land sharing and land sparing—what role remains for forest management and conservation? *International Forestry Review*, 2015, 17(2): 210-230.
- [18] Wright W C C, Eppink F V, Greenhalgh S. Are ecosystem service studies presenting the right information for decision making? *Ecosystem Services*, 2017, 25: 128-139.
- [19] Voinov A, Seppelt R, Reis S, Nabel J E M S, Shokravi S. Values in socio-environmental modelling: persuasion for action or excuse for inaction. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 53: 207-212.
- [20] Walz U, Syrbe R U. Linking landscape structure and biodiversity. *Ecological Indicators*, 2013, 31: 1-5.
- [21] Daniel C J, Frid L, Sleeter B M, Fortin M J. State-and-transition simulation models: a framework for forecasting landscape change. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7: 1413-1423.
- [22] Elsawah S, Pierce S A, Hamilton S H, van Delden H, Haase D, Elmahdi A, Jakeman A J. An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 93: 127-145.

- [23] Costanza J K, Abt R C, McKerrow A J, Collazo J A. Bioenergy production and forest landscape change in the southeastern United States. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(5): 924-939.
- [24] Kennedy C M, Hawthorne P L, Miteva D A, Baumgarten L, Sochi K, Matsumoto M, Evans J S, Polasky S, Hamel P, Vieira E M, Develey P F, Sekercioglu C H, Davidson A D, Uhlhorn E M, Kiesecker J. Optimizing land use decision-making to sustain Brazilian agricultural profits, biodiversity and ecosystem services. *Biological Conservation*, 2016, 204: 221-230.
- [25] Castro L M, Calvas B, Knoke T. Ecuadorian banana farms should consider organic banana with low price risks in their land-use portfolios. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0120384.
- [26] Uhde B, Hahn W A, Griess V C, Knoke T. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: a critical review. *Environmental Management*, 2015, 56(2): 373-388.
- [27] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B H, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Termansen M. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [28] Levin S, Xepapadeas T, Crépin A S, Norberg J, de Zeeuw A, Folke C, Hughes T, Arrow K, Barrett S, Daily G, Ehrlich P, Kautsky N, Mäler K G, Polasky S, Troell M, Vincent J R, Walker B. Social-ecological systems as complex adaptive systems: modeling and policy implications. *Environment and Development Economics*, 2013, 18(2): 111-132.
- [29] Villamor G B, Le Q B, Djanibekov U, van Noordwijk M, Vlek P L G. Biodiversity in rubber agroforests, carbon emissions, and rural livelihoods: an agent-based model of land-use dynamics in lowland Sumatra. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 61: 151-165.
- [30] Valbuena D, Verburg P H, Veldkamp A, Bregt A K, Ligtenberg A. Effects of farmers' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: an agent-based approach. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(2): 98-110.
- [31] Dislich C, Hettig E, Salecker J, Heinonen J, Lay J, Meyer K M, Wiegand K, Tarigan S. Land-use change in oil palm dominated tropical landscapes-An agent-based model to explore ecological and socio-economic trade-offs. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0190506.
- [32] 梁友嘉, 刘丽珺. 生态系统服务与景观格局集成研究综述. *生态学报*, 2018, 38(20): 7159-7167.
- [33] 张行, 梁小英, 刘迪, 史琴琴, 陈海. 生态脆弱区社会—生态景观恢复力时空演变及情景模拟. *地理学报*, 2019, 74(7): 1450-1466.
- [34] Estrella R, Cattrysse D, van Orshoven J. Comparison of three ideal point-based multi-criteria decision methods for afforestation planning. *Forests*, 2014, 5(12): 3222-3240.
- [35] Dragicevic A, Boulanger V, Bruciamacchie M, Chauchard S, Dupouey J L, Stenger A. Network connectivity value. *Journal of Theoretical Biology*, 2017, 419: 310-322.
- [36] Drechsler M, Surun C. Land-use and species tipping points in a coupled ecological-economic model. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 86-91.
- [37] Epanchin-Niell R S, Wilen J E. Individual and cooperative management of invasive species in human-mediated landscapes. *American Journal of Agricultural Economics*, 2014, 97(1): 180-198.
- [38] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, Wunder S, Seppelt R, Scholes R J, Oszwald J. Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 2018, 150: 96-106.
- [39] Liang Y J, Liu L J, Huang J J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0172494.
- [40] Polasky S, Johnson K, Keeler B, Kovacs K, Nelson E, Pennington D, Plantinga A J, Withey J. Are investments to promote biodiversity conservation and ecosystem services aligned? *Oxford Review of Economic Policy*, 2012, 28(1): 139-163.
- [41] Zhang Z M, Gao J F. Linking landscape structures and ecosystem service value using multivariate regression analysis: a case study of the Chaohu Lake Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 3.
- [42] Ochoa W S, Härtl F H, Paul C, Knoke T. Cropping systems are homogenized by off-farm income—empirical evidence from small-scale farming systems in dry forests of southern Ecuador. *Land Use Policy*, 2019, 82: 204-219.
- [43] Matthies B D, Jacobsen J B, Knoke T, Paul C, Valsta L. Utilising portfolio theory in environmental research—new perspectives and considerations. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 926-939.
- [44] Mas J F, Kolb M, Paegelow M, Camacho Olmedo M T, Houet T. Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 51: 94-111.
- [45] Grashof-Bokdam C J, Cormont A, Polman N B P, Westerhof E J G M, Franke J G J, Opdam P F M. Modelling shifts between mono- and multifunctional farming systems: the importance of social and economic drivers. *Landscape Ecology*, 2017, 32(3): 595-607.
- [46] Verburg P H, Alexander P, Evans T, Magliocca N R, Malek Z, Rounsevell M D A, van Vliet J. Beyond land cover change: towards a new generation of land use models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 38: 77-85.

- [47] Behera M D, Borate S N, Panda S N, Behera P R, Roy P S. Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA) - Markov model - A geo-information based approach. *Journal of Earth System Science*, 2012, 121(4): 1011-1024.
- [48] Djanibekov U, Khamzina A. Stochastic economic assessment of afforestation on marginal land in irrigated farming system. *Environmental and Resource Economics*, 2016, 63(1): 95-117.
- [49] Mahabadi S A, Bavani A R M, Bgheri A. Improving adaptive capacity of social-ecological system of Tashk-Bakhtegan Lake basin to climate change effects—a methodology based on Post-Modern Portfolio Theory. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2018, 18(4): 365-378.
- [50] Stan K, Sanchez-Azofeifa A, Espirito-Santo M, Portillo-Quintero C. Simulating deforestation in Minas Gerais, Brazil, under changing government policies and socioeconomic conditions. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0137911.
- [51] Verhagen W, van der Zanden E H, Strauch M, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Optimizing the allocation of agri-environment measures to navigate the trade-offs between ecosystem services, biodiversity and agricultural production. *Environmental Science & Policy*, 2018, 84: 186-196.
- [52] Kaim A, Cord A F, Volk M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 105: 79-93.
- [53] Kerebel A, Gélinas N, Déry S, Voigt B, Munson A. Landscape aesthetic modelling using Bayesian networks: conceptual framework and participatory indicator weighting. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 185: 258-271.
- [54] Gonzalez-Redin J, Gordon I J, Hill R, Polhill J G, Dawson T P. Exploring sustainable land use in forested tropical social-ecological systems: a case-study in the wet tropics. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 940-952.
- [55] Kelley H, Evans T. The relative influences of land-owner and landscape heterogeneity in an agent-based model of land-use. *Ecological Economics*, 2011, 70(6): 1075-1087.
- [56] Langhammer M, Thober J, Lange M, Frank K, Grimm V. Agricultural landscape generators for simulation models: a review of existing solutions and an outline of future directions. *Ecological Modelling*, 2019, 393: 135-151.
- [57] Gimona A, Polhill J G. Exploring robustness of biodiversity policy with a coupled metacommunity and agent-based model. *Journal of Land Use Science*, 2011, 6(2/3): 175-193.
- [58] Kremmydas D, Athanasiadis I N, Rozakis S. A review of agent based modeling for agricultural policy evaluation. *Agricultural Systems*, 2018, 164: 95-106.
- [59] Chopin P, Blazy J M, Guindé L, Wery J, Doré T. A framework for designing multi-functional agricultural landscapes: application to Guadeloupe Island. *Agricultural Systems*, 2017, 157: 316-329.
- [60] Groeneveld J, Müller B, Buchmann C M, Dressler G, Guo C, Hase N, Hoffmann F, John F, Klassert C, Lauf T, Liebelt V, Nolzen H, Pannicke N, Schulze J, Weise H, Schwarz N. Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models—a review. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 87: 39-48.
- [61] Salvini G, Ligtenberg A, van Paassen A, Bregt A K, Avitabile V, Herold M. REDD+ and climate smart agriculture in landscapes: a case study in Vietnam using companion modelling. *Journal of Environmental Management*, 2016, 172: 58-70.
- [62] Knoke T, Paul C, Hildebrandt P, Calvas B, Castro L M, Härtl F, Döllner M, Hamer U, Windhorst D, Wiersma Y F, Curatola Fernández G F, Obermeier W A, Adams J, Breuer L, Mosandl R, Beck E, Weber M, Stimm B, Haber W, Fürst C, Bendix J. Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications*, 2016, 7: 11877.
- [63] Ou G L, Tan S K, Zhou M, Lu S S, Tao Y H, Zhang Z, Zhang L, Yan D P, Guan X L, Wu G. An interval chance-constrained fuzzy modeling approach for supporting land-use planning and eco-environment planning at a watershed level. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 651-666.
- [64] Ferreira B M, Soares-Filho B S, Pereira F M Q. The Dinamica EGO virtual machine. *Science of Computer Programming*, 2019, 173: 3-20.
- [65] Cai Y Y. Computational methods in environmental and resource economics. *Annual Review of Resource Economics*, 2019, 11: 59-82.
- [66] Sun Z L, Lorscheid I, Millington J D, Lauf S, Magliocca N R, Groeneveld J, Balbi S, Nolzen H, Müller B, Schulze J, Buchmann C M. Simple or complicated agent-based models? A complicated issue. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 86: 56-67.
- [67] Alexander S M, Jones K, Bennett N J, Budden A, Cox M, Crosas M, Game E T, Geary J, Hardy R D, Johnson J T, Karcher S, Motzer N, Pittman J, Randell H, Silva J, da Silva P P, Strasser C, Strawhacker C, Stuhl A, Weber N. Qualitative data sharing and synthesis for sustainability science. *Nature Sustainability*, 2020, 3(2): 81-88.