

基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展

田光进¹, 邬建国^{2,3,4}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学景观生态与可持续性科学研究中心, 北京 100085

3. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021;

4. School of Life Sciences & Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA)

摘要:土地利用动态变化是全球变化和可持续发展研究的基础,对区域水循环、大气循环、环境质量、气候变化及陆地生态系统生产力等具有重要影响,也是造成生物多样性衰减的最主要原因。目前,建立于复杂性科学基础上的智能体模型(ABM)成为土地利用动态模拟的重要方法。智能体模型能模拟个体或群体的行为及决策模式,从而能将政府、城市规划、房地产开发商、住户等社会群体及个人对土地利用产生的影响进行模拟,同时能对不同社会经济政策对土地动态影响进行模拟。智能体模型在元胞自动机基础上,加入了人为因素的智能体概念,从而能更好地模拟土地动态。在分析总结了智能体模型的相关概念和组织结构,并分析了其在土地利用动态、城市动态模拟及生态过程模拟等方面的应用与元胞自动机的关系,比较了常用的智能体模型的主要软件,最后概括了智能体模型优点、发展趋势及存在的主要问题。

关键词:智能体模型;土地利用动态;复杂性科学;发展动向

文章编号:1000-0933(2008)09-4451-09 中图分类号: 文献标识码:A

Simulating land use change with agent-based models: progress and prospects

TIAN Guang-Jin¹, WU Jian-Guo^{2,3,4}

1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Center for Landscape Ecology and Sustainability Science, Beijing Normal University, Beijing 100085, China

3. Sino-US Center for Conservation, Energy and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

4. School of Life Sciences & Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4451 ~ 4459.

Abstract: Land use and land cover change is fundamentally important for studying global environmental change and sustainability because it has great impacts on biodiversity, ecosystem processes, atmospheric circulation, environmental quality, climate change, etc. Simulation modeling has been important in the study of land use dynamics and, recently, agent-based models (ABMs) have been developed and applied in this field. An ABM is composed of a set of agents interacting in a common environment. Agents have the following characteristics: goal-directed, autonomy, social abilities, reactivity and pro-activities. They can interact with one another and with the environment and complete tasks autonomously without human intervention. They exhibit goal-directed behavior, have their own problem-solving capabilities, and are able to interact in order to reach an overall goal. Agents perceive, produce, transform and manipulate objects in the environment

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571060);国家重点基础研究发展计划资助项目(973)

收稿日期:2007-09-20; **修订日期:**2008-01-30

作者简介:田光进(1970~),山东沂水,副教授。主要从事城镇动态模型、环境遥感、地理信息系统及土地利用等研究。E-mail: tianguangjin@gmail.com

Foundation item: The project was financially supported by the key project of Natural Scientific Foundation of China under grant (No. 40571060), and the project of National Basic Research Program of China(973 Program) under grant (No. 2005CB724204)

Received date:2007-09-20; **Accepted date:**2008-01-30

Biography: TIAN Guang-Jin, Associate professor, mainly engaged in urban dynamic model, remote sensing of environment, GIS and land use *et al.* E-mail: tianguangjin@gmail.com

and reach autonomy cooperatively by sensing activity and modifying their environment. ABMs have an intuitive appeal for simulating complex human-involved processes. They are able to explicitly model individual decision makers and their interactions and simulate complex human behavior and decision processes as they are affected by socioeconomic factors. In urban studies, ABMs have been integrated with human behavior and decisions with cellular automata architecture. In ecology, individual-based models (IBMs) were developed at the end of 1980s which are similar to ABMs in several ways. Now ABMs have been used in economics, sociology, psychology, finance, urban simulation, and other fields. Major platforms include SWARM, RePast, Ascape, and CORMAS. In this paper, we attempt to outline the basic concepts and general modeling framework of ABMs, discuss the pros and cons of these models, and explore their future directions in simulating land use change, urban dynamics, and ecological processes.

Key Words: agent based model; land use dynamic; complex sciences; progress and prospects

土地利用/覆盖变化(land use and coverage change,简称LUCC)是全球变化和可持续发展研究的基础^[1,2]。土地利用变化对区域水循环、环境质量、陆地生态系统生产力等具有重要影响,也是造成生物多样性衰减的最主要原因。随着人类活动范围和强度的不断增加,其影响也越来越大。城镇扩展、农业用地增加、森林被毁、围湖垦地等都急剧的改变了地球表层系统,从而影响了全球气候^[3]、生物多样性和生态系统功能^[4,5],并导致了土地退化^[6]、自然灾害频繁等问题,对人类的可持续发展造成巨大威胁。

土地利用动态受到自然因素和社会经济因素等多种因素的影响,其过程和机理是极为复杂的。因此,模拟模型已经成为研究LUCC的主要途径。在土地利用动态模型中,多数是社会经济过程模型。GIS的出现促进了空间模型的发展,空间显式(spatial explicit)模型能更好地模拟和预测土地利用的动态变化过程。

元胞自动机CA(cellular automata)和分形理论大量应用在土地利用动态过程中。随着复杂性理论的发展,建立于自组织理论(self-organization)、复杂适应系统(complex adaptive systems)等方法在土地利用领域及生态学领域得到应用和尝试^[7]。在这些模型中,没有考虑人的行为和决策对土地利用动态的影响,而随着复杂性科学和人工智能的发展,建立于ABM(agent based model)成为模拟土地利用动态的重要方法。

目前,ABM在农业经济、社会科学、决策科学、金融市场、旅游管理^[8,9]、交通领域、资源管理、生态系统^[10]、城市动态模拟等领域得到广泛应用。在经济学中,基于agent的计算经济学(agent-based computation economics, ACE)被提出,并成立了相关组织^[11]。在社会学中,ABM被用来模拟社会现象,agent作为个体被认为是构成社会的基本单元或社会原子^[12]。

ABM通过对人类行为及决策等复杂系统的模拟,将对复杂性问题产生重要影响,从而为解决复杂的环境问题、生态问题、决策问题、经济问题、社会问题、交通拥堵等提供新的方法。本文目的是探讨ABM在土地利用动态模拟方面的国际进展及发展动向。

1 智能体模型(ABM)的概念及组织结构

国内对agent的翻译方法有几种,包括代理、主体、智能体等,认为智能体更能体现agent的主要特性。ABM(agent-based model)可以翻译成智能体模型。在智能体模型中,多数情况下不是单个的智能体,而是多个智能体相互作用的系统,是多智能体模型(multi-agent system,简称MAS)。

虽然智能体被各门学科所应用,但并没有准确的定义,并且在不同学科中的定义有所不同。智能体最早出现在人工智能领域,往往通过描述它的特性来对其进行定义,例如它具有目标性、自主性、能动性、反应性、社会性等特征^[13-15]。目标性是指智能体在复杂动态环境中需要完成一定的目标;自主性是指智能体在没有人类和其它智能体的作用下就可以运行,能够控制其自身状态;能动性指智能体能够与其它智能体或人类相互作用;反应性指智能体需要能感知环境并对环境的变化进行反馈,不仅对环境的变化产生反应(reactive),而且能够产生目标导向的行为(proactive)。社会性是指agent可以和其它agents或人类相互作用。智能体生活在某些特定环境,具有对信息反馈和问题求解能力。

经过综合,将智能体定义为是存在于一定的环境中并与环境环境相互作用的个体,具有很高的自主性和反应性。智能体模型由能自主决策的智能体、环境及定义智能体的规则所组成。

智能体的作用既可以是智能体之间的相互作用,也可以是智能体和环境之间的相互作用^[16]。智能体通过感知器(sensor)来感知环境,并对环境状态的改变(事件)来作出响应(effector),从而体现智能体的能动性^[17](图1)。它们通过交互作用和协调,可以形成一定的系统群体和组织结构,具有自组织、涌现性(emergent)和非线性等特征。

BDI(belief-desire-intention)是描述智能体的一个重要结构^[18,19](图2)。在BDI结构中,信念(beliefs)代表着智能体的信息状态,在此状态智能体的信念是可以改变的。动机(desire)代表着智能体将要执行的状态,如寻找更好的价格,同时智能体的目标是不能相互冲突的。执行(intention)是智能体选择要做,也就是智能体开始执行计划。在ABM建模过程中,实际上是模拟人类的行为和决策过程,需要选择目标,根据自己的知识和信念做决策,并付诸行动。需要假设个体具有群体价值和规则,并随着个体和群体之间的相互作用而变化,个体具有特殊的作用和社会地位^[20]。除信念、动机、愿望外,一些人工智能学者甚至提出将情绪作为智能体行为的一部分^[21,22]。

在计算机软件开发中,经历了从过程、面向对象(object-oriented)到面向目标的嬗变,agent是模拟人类智能行为与决策的重要方法。随着ABM的发展,已经大量应用在社会经济学中,如通过模拟个体和群体的行为及决策来模拟股票市场及社会经济结构的变化、模拟旅游者在选择景点的决策、模拟个体出行决策对交通拥堵等的影响。

2 ABM在土地利用动态研究中的应用

2.1 土地利用和土地覆盖动态模拟

对土地利用造成影响的不仅包括自然地理要素(地形、地貌、资源分布及土壤肥力等),而且包括政府政策、决策、经济增长、人口增长等。随着GIS技术,尤其是栅格数据结构的发展,使元胞自动机模型得到了广泛应用。元胞自动机模型提供了模拟土地利用动态过程及城镇动态过程等空间过程的框架和方法^[23~29]。元胞自动机模型定义元胞在 $t+1$ 时的状态是其在 t 时的状态、邻域和转换规则 T 的函数^[29](式1)。

$$S^{t+1} = f(S^t, \mathcal{N}, T) \quad (1)$$

式中, S^{t+1} , S^t 分别为土地利用在 $t+1$ 和 t 时的状态, $\mathcal{N}$ 为 t 时邻域的状态, T 为转换规则。

在元胞自动机模型中,需要定义模型结构、转换规则和模型参数,而在定义模型结构、转换规则及模型参数方面并没有一致意见。在模型中,主要考虑了元胞本身状态、与邻域关系、道路远近等,而没有考虑人类决策行为对土地利用动态的影响。

智能体模型可以模拟复杂的人类行为及决策,描述不确定性的状态和行为,从而确定不同的行为模式及决策模式对土地利用动态的影响,从而优选最好的决策变量。土地利用动态过程是复杂而且难以定义的,所

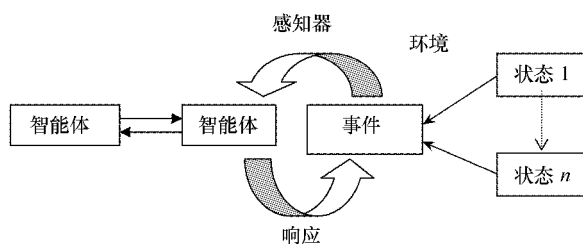


图1 智能体与环境的作用^[17]

Fig. 1 The reciprocal impact of agent and environment^[17]

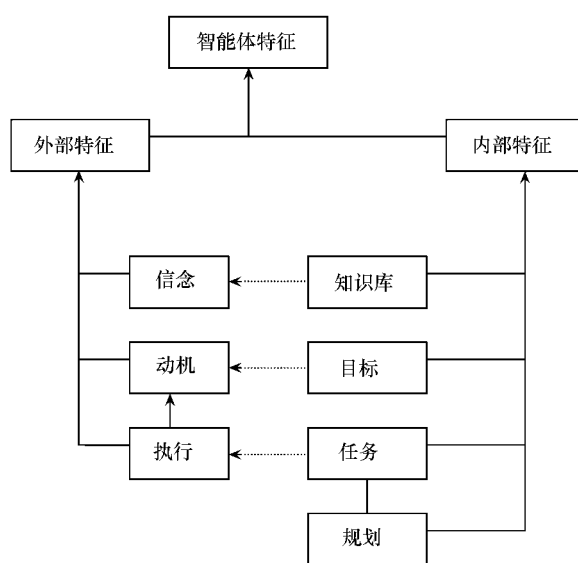


图2 BDI的结构^[19]

Fig. 2 The structure of belief-desire-intention^[19]

以很难提出统一的规则去控制^[30]。根据智能体在决策过程中所起的作用不同,可以将其进行分类。Ligtenberg 在土地利用规划中根据决策者不同将其分为地方政府、农民组织和环境保护者。不同的决策者由于价值观的不同,而具有不同的偏好。价值观是以社会、经济、文化和政治背景为基础的^[30,31]。决策者(或行为者)在观察和感知空间环境基础上,对空间环境具有一定偏好。在决策市场里面,比较个体行为者的偏好,将其偏好作为决策的输入,最终决策在空间系统中实施(图3)。

在模拟城市空间规划过程中对地方政府、农民组织和环境保护者的行为偏好进行了分析。地方政府:城市发展应该集中在现有城市用地周围集中发展,尽可能接近主要道路系统,在娱乐场所一定的范围内,倾向于现在是农用地和草地;农民组织:尽可能远离现有农田和草地,接近现有大城市,保持现有小村庄规模;环境保护者:不要利用开敞空地建设,保留现有果园,接近现有城市用地^[30]。

Janssen 研究了不同政策和制度对放牧者行为的影响,在模型中智能体分为两个层次:放牧人和管理者。放牧人主要管理自己的土地,而管理者将影响所有放牧者的行为。放牧者行为建立于有限理性、社会心理学等,决策规则由实验和模型来获取,同时需要实践的知识。在放牧者的行为可以分为追求经济利益优先和单纯想过放牧者生活,在管理者的决策中可以是环境保政策、稳定政策和市场政策3种^[32]。在土地利用动态模拟中,需要将空间数据和非空间政策相结合,宏观政策和微观决策相结合。

在智能体作出决策时,Ligtenberg 建立了偏好函数,每个智能体都作出对某种土地利用的偏好,同时个体的偏好受到其它个体偏好的影响。然后按照偏好函数对空间元胞将转换的偏好进行排序,从而确定土地利用元胞的转换类型^[30]。Evans 对智能体的活动如农业、放牧、植树及土地闲置建立效用函数,效用函数不仅包括经济利益,而且包括美学观赏价值等^[33]。在每年,智能体根据过去的信息和期望,根据最大效用函数作出决定。

在建立智能体模型时,智能体的行为既可能是寻求经济利益的最大化,也可以是寻求社会效益的最大化。既可以是建立自然保护区,也可以是首先满足居民的住房需要。需要对过程进行描述、建立智能体行为的空间模型等。在建立土地利用动态模型中,利用智能体模型模拟人类的决策行为,利用元胞自动机的方法求取每个元胞的土地利用转换规则,从而模拟土地利用的动态变化过程。

2.2 城市动态模拟

在城市动态模型方面,有两类重要方法。其一是统计物理学模型,包括相关渗透(correlated percolation)^[34]、绝缘体衰减(dielectric breakdown)和有限扩散集聚(diffusion-limited aggregation)^[34,35]模型,这些模型利用人口密度对城市增长模式进行了研究,将城市生长过程看成为理想化的物理过程,模拟因素较少,不能更好地模拟城市动态的复杂性。

其二是建立于元胞自动机的城市动态变化模拟模型,该类模型以单元空间为基础,利用邻近函数来计算每一单元在时间 t 的状态转换,需要定义模型的结构、转换规则和模型参数,从而模拟城市动态扩展过程,并利用已有的转换规则和参数预测城市未来的变化趋势^[39],往往是针对某个城市扩展的模拟。由于元胞自动机模型是“自下而上”的模型,能够对城市土地利用层次化、模块化分解,突破了原有的研究模式。

Batty 利用城市土地结构具有不同的生命周期、距离、方向、密度阈值、转换概率等建立城市动态演化模型^[23,24];White 和 Engelen 利用人口经济和政策因素模拟了荷兰的城市土地利用特征^[25,26];Clark 利用地形、道路、居民点数据对旧金山海湾地区城市发展进行了模拟并进行预测,控制参数随着环境而改变^[37]。Wu 利

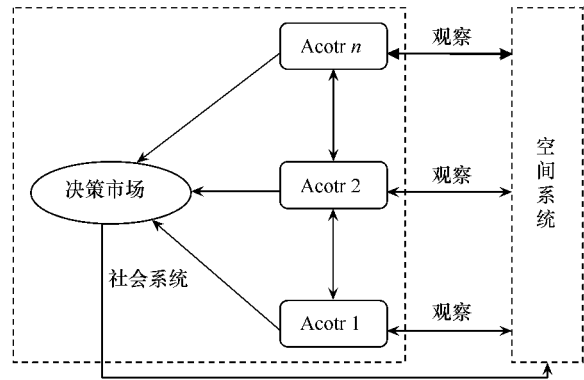


图3 Multi-actor 空间规划概念性框架^[30]

Fig. 3 Spatial concept framework of multi-actor^[30]

用元胞自动机与层次分析法(analytic hierarchy process,简称 AHP)模拟了土地利用动态变化^[27]。Li 和 Yeh 将主成分分析、人工神经网络、多准则判断等方法被用于城市动态变化模拟中^[28,38~40]。Ward 利用随机约束性 CA 模型对城市扩展进行分析^[41]。在模型的校验方面,Clarke 利用历史土地利用数据作为检验点对单元自动机模型发展了验证方法^[37],Li 和 Yeh 利用神经网络对验证问题提出了解决的方法^[36]。

由于城市本身是复杂的系统,模型涉及因素较多,并且转换规则和参数在某个城市模拟较好,在其它城市可能适应性较差。城镇动态模型缺乏随机事件对城镇化过程影响的模拟,因而土地利用政策、市场机制等偶然性因素没有在城镇动态模拟中反映出来。元胞自动机模型提供了研究复杂自适应系统的框架,可以模拟由大量简单元素组成的宏观的城市结构,具有简化的特征。但由于简化的限制导致其不能模拟真实世界的现象,也不能更好地处理社会和空间的细节^[42]。同时,元胞自动机模型对城市增长模式的过程、成因缺乏解释^[43]。几乎没有考虑政府、房地产开发商、居民等对城市土地利用变化起决定作用的动态社会环境及相互作用^[44]。

智能体模型充分利用元胞自动机的理论框架,并将人类行为与决策引入空间模型中,从而能更好地模拟城市动态增长过程。SIMPOP 是建立于知识的模拟长期居住模式的系统,规则和参数被引入智能体模型,每个居住单元是独立的,可以跟其它居住单元相互作用。模型模拟了从同质、农业和分散的村庄发展到多功能、竞争和层次性的城市居住地^[45]。在建立智能体模型中,最重要的是模拟个体或群体的决策行为模式。Fernandez 利用调查的方法模拟住户的决策模式,利用因子分析和聚类分析的方法对住户选择搬到居住区的行为进行了模拟,通过调查可以看到住户选择行为的异质性和复杂性^[46]。刘小平利用智能体模型模拟了城市中居民、房地产商、政府等多智能体之间,以及多智能体与环境之间的相互作用而导致城市空间结构的演化过程,模拟了土地利用动态变化情况^[47]。

2.3 生态过程模拟

基于个体的生态学模型在 20 世纪 70 年代后零星出现,到 1988 年才逐渐成为生态模型的一种方法^[48]。基于个体的模型(individual-based models,简称 IBM)用来模拟不同生物数量的变化及与自然因素之间的关系。出现基于个体的生态学模型的原因是因为个体特征在状态变量及经典种群生态学中没法体现出来^[49]。

虽然都是基于个体的生态学模型,智能体模型强调生物的自主性及与环境的关系。智能体模型更强调智能体及社会组织的决策过程,智能体并不一定是个体,而有可能是群体(如兽群、村落等)^[50]。

Bousquet 利用智能体模型模拟了 3 种鱼类在 Niger 河的生物多样性策略。在河流冲积平原上,不同季节不同生境下食物提供的数量不同,智能体(生物)通过不同的繁殖及移动行为(代表不同的调节机制)对环境变化作出反应^[51]。同时,智能体模型被应用在模拟蚂蚁和迁徙鸟类的群体行为,模拟动物行为与动物社会的关系^[52,53]。在生态学中,主要用来模拟社会与自然的关系。在智能体做决策过程中,BDI 结构(图 2)是一种重要的思维框架。智能体选择目标,根据自己的信念做决策,并且付诸行动。智能体对其它智能体具有一定的态度,这种态度可以来自于自己的经验,也可以是社会的声誉。

随着智能体模型在生态学中的应用,可以更好地模拟生物的个体与群体行为,以及它们对自然环境的适应策略,从而能更好地理解行为生态学及系统生态学中的复杂问题。

3 智能体模型应用中的主要软件及比较

目前 ABM 已经广泛应用于社会经济、心理学、金融、城市动态模拟等方面。同时,许多机构开发了相关软件来模拟各种社会系统、生态系统和自然系统。目前主要主流开发平台有 SWARM, RePast, Ascape 和 CORMAS,都是用面向对象语言写的。这些软件主要功能是提供模型的基本框架和模型库,使用者可以在其基础上进行开发,一般需要使用用户对 C、C++ 或 Java 语言具有一定的掌握。同时,这些软件包主要是面向过程开发,没有能更好地跟 GIS 软件(如 ArcGIS、ArcView、MapInfo 等)相结合。

所有开发平台都建立了很多的类库、几百个方法,因此开发平台的复杂性是推广应用的主要障碍。使用者必须读懂大量的编码,熟悉平台的类库。软件平台都是各自开发,缺乏共同的基础,也是阻碍平台推广的重

要原因。但这些软件在不断改进,随着越来越多的人参加到软件的应用及开发过程中,软件将不断发展。

SWARM 是最早开发的 ABM 软件,由美国 Santa Fe 研究所开发。该研究所成立于 1984 年,是私立非赢利机构,其目的是促进跨学科发展。研究对象包括复杂性物理学、进化系统、复杂系统的信息过程、人类行为动态及定量等。SWARM 主要由 C 开发,需要较强的编程技巧,目前主要由 SWARM 集团维护(表 1)^[54]。SWARM 具有一些 Java 简单的类,从而使用 Java 的编程者能调用 C 的类库。SWARM 提出了完整的包括收集、行动、观察者等概念框架^[55]。主要包括标准对象设计、创造路线、分析工具及支持层次和并行过程的核心。SWARM 是最强也是得到广泛应用的软件包,具有广泛的通用性,而不是集中在某个领域。适合于存在大量 agent 的系统,可以广泛用于化学、生态、经济、社会学等各种领域。

RePast 由芝加哥大学在 SWARM 基础上开发的,主要是用 Java 写成,主要应用于社会学领域^[54]。RePast 在支持网络模型方面功能较强,其目的在于建立能相互定义、复合的自我包括的 agents 模型,具有事件驱动的功能。

Ascape 是由 Washington D. C. Brookings Institute 开发的软件平台,也是由 Java 开发的,其界面更容易理解,更容易利用,但不是事件驱动的。主要也是应用在社会经济系统中,在模型中有 20 多个演示程序。Agent 存在于 scapes 中,软件本身是 agents 的集成。Scapes 提供了 agent 交互作用的线索和指导 agent 行为的规则,并提供了控制和修改参数的机制。

CORMAS(common-pool resources multi-agent system)是做多元 agent 系统的编程环境,是在法国 Montpellier 开发的,它提供了协调模型开发的框架。是由 Smalltalk 进行开发的,它提供了与 MapInfo 的接口,主要用于经济和生态模拟和资源管理中,在软件平台中提供了大量模型。

表 1 智能体模型(ABM)主要软件比较^[54]
Table 1 The major software packages of agent-based model^[54]

	SWARM	RePast	Ascape	CORMAS
开发单位	Santa Fe 研究所	University of Chicago	Brookings Institute, Washington D. C	CIRAD, Montpellier, France
开发时间	1990 年代	1999	1997	1996
网址	http://www.swarm.org	http://repast.sourceforge.net	http://www.trook.edu/es/dynamics/models/ascape	http://cormas.cirad.fr
开发语言	Objective C/Java	Java	Java	Smalltalk
要求开发经验	要求技巧较强	Java 编程技巧	不需要现有模型的经验、改变模型的技巧及较强的扩展技巧	如果参加技术培训,不需要其它基本编程技巧
是否事件驱动	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No
与 GIS 接口	Kenge/GIS library	正在开发	试用	能够从 MapInfo 输入和输出数据,与 ArcView 可以通过 ODBC 和 DDE 进行动态连接
主要应用领域	自然与社会科学、军事及商业用途	社会科学	社会与经济系统	经济与生态模拟,自然资源管理

4 智能体模型在土地利用动态模拟的发展动向及存在的问题

土地利用动态已经成为影响全球变化的重要因素^[56]。人类对地球表层的改变导致了地表能量和水循环的变化,并引起气候变化^[57];土地利用变化引起了生物多样性的减少,生境的退化,从而导致生态系统功能的变化^[58]。

土地利用动态变化受到自然及社会经济过程等多种因素的影响,因此需要综合社会学、经济学和生态学等多学科的成果。智能体模型能模拟人类复杂的行为及决策模式,可以更好地模拟复杂的土地利用决策问题,从而能为土地利用动态变化模拟提供新的方法。

智能体模型在土地利用等领域得到重视和应用,主要是由于它具有如下优点:

(1) 智能体模型能模拟个体或群体决策行为,同时考虑其相互作用,并将微观决策和宏观现象相结合^[59]。其取代了传统的概率或微分方程,并通过个体或群体对环境具有一定的反馈行为^[60]。土地利用及其动态在其形态及结构方面都具有异质性,造成其动态变化的驱动机制也具有异质性。现有方法主要是进行均一化从而忽视了驱动机制的差异。由于均一化的影响从而不能更好地预测土地利用的未来情境。尽管智能体是建立在个体和群体决策基础上的,但在建立模型中,往往将复杂的个体简化为同质的类,从而简化了个体复杂的行为和过程。如果按照真实世界模拟个体,将会大量增加迭代的次数。因此,在土地利用模拟过程中用组织或团体的决策比用个体的智能体更符合现实^[30]。

(2) 智能体模型将社会过程及经济因素同土地利用动态结合起来,能模拟人类复杂的行为和决策模式,并弥补了元胞自动机模型的不足,从而为解决复杂的土地利用模型提供了新的方法。智能体模型涉及复杂系统的许多元素、行为者(决策者)及驱动因子,这些元素相互联系、相互依赖,从而构成了具有层次异质性的复杂系统^[67]。在系统中,某些单个元素是不可预测的,整体作用的结果与个体因子简单聚合的结果是不同的,也就是整体大于部分之和,从而具有“涌现性(emergent)”^[68]。但智能体模型仍然在不断发展过程中,随着计算机技术及人工智能等科学的发展,智能体模型会不断的提高模拟模拟土地利用动态过程的水平。

(3) 在土地利用模拟中,必须考虑时间和空间的尺度问题。尺度问题在地理学、生态学领域中成为重要的问题^[63~65],但在社会科学领域中讨论相对较少^[66]。在土地利用动态模拟中,需要将土地利用的空间尺度和时间尺度与复杂的社会经济问题相结合。智能体模型能提供解决社会经济因素与土地利用动态空间数据的平台,从而有利于解决复杂的土地利用动态模拟问题。

目前,智能体模型成为研究土地利用动态等科学问题的热点之一,在理论和实践方面取得很大进展,但模型仍然存在较多问题。智能体模型提供了建立模型的框架和结构,由于社会经济系统本身的复杂性,很难有统一的模式。智能体模型能描述复杂的数学关系,输出的结果可随着初始状态和参数的变化而变化^[30],具有较强的灵活性。但模型的灵活性增加了模型的不确定性,为模型的验证和移值带来了困难。智能体模型力图模拟个体及群体行为及决策模式,但个体决策行为具有极大的复杂性。复杂性科学本身研究仍然处在发展中,仍有许多未知领域需去研究探索。同时,如何选择决策行为模型也是模拟个体行为的重要内容^[30]。在决策支持方面,智能体模型更多地作为科学研究去探索内部知识,而不是作为实际的决策支持系统^[61]。很多模型对未来土地利用情境进行了预测,而实际上未来是不可预测的^[62]。当然,这并不能否认用预测不同决策模式下未来情境作为参考还是具有理论和实践意义的。

References:

- [1] Rindfuss R R, Walsh S J, Turner B L II, Fox J, Mishra V. Developing a science of land change: challenges and methodological issues. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 2004, 101(39): 13976—13981.
- [2] Li X B. A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 554—558.
- [3] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528—531.
- [4] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, *et al.* The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289: 395—396.
- [5] Sala O E, Chapin F S I, Armesto J J, *et al.* Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 2000, 287: 1770—1774.
- [6] Riley W J, Matson P A. Nloss: a mechanistic model of denitrified N₂O and N₂ evolution from soil. *Soil Science*, 2000, 165: 237—249.
- [7] Wu J G. The ten issues of landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2074—2076.
- [8] Deadman P, Gimblett H R. The role of goal-oriented autonomous agents in modelling people-environment interactions in forest recreation. *Mathematical and Computer Modelling*, 1994, 20: 121—131.
- [9] Gimblett H R, Roberts C, Daniel T C. Intelligent agent modelling for simulating and evaluating river trip scheduling scenarios for the Grand Canyon National Park. In: H R Gimblett ed. *Integrating GIS and Agent based modelling techniques for Understanding Social and Ecological Processes*. Oxford: Oxford University Press, 2002. 245—275.
- [10] Grimm V, Revilla E, Berger U, Jeltsch F, *et al.* Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science*, 2005, 310: 987—991.
- [11] Tesfatsion L. How economists can get alive. In: Arthur W, Durlauf S, Lane S eds. *The Economy as an Evolving Complex System II*. Addison-Wesley, Santa Fe, 1997, 533—564.

- [12] Weber M. *Economie et Socié. Plon, Paris, 1971.*
- [13] Gao B, Fei Q. Mapping real world into MAS world-discussion on complex systems modeling based on MAS. *Studies in Science of Science*, 2005, 23(2): 179–183.
- [14] Ligtenberg A, Bregt A, Lammeren R. Multi-actor based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 56: 21–33.
- [15] Ligtenberg A, Wachowicz M, Bregt A K, Beulens A, Kettenis D L. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72: 43–55.
- [16] Weiss G. *Multiagent systems, A modern approach to distributed artificial intelligence.* London: MIT Press, 1999.
- [17] Sengupta R R, Bennett David A. Agent-based modelling environment for spatial decision support. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17(2): 157–180.
- [18] Henderson-Sellers B. Who needs an OO methodology anyway? *Journal of Object Oriented Programming*, 1995, 8(6): 6–8.
- [19] Henderson-Sellers B, Tran Q N, Debenham J. An etymological and metamodel-based evaluation of the terms “goals and tasks” in agent-oriented methodologies. *Journal of Object Technology*, 2005, 4(2): 131–150.
- [20] Bousquet F, Page C L. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 2004, 176: 313–332.
- [21] Shoham Y. Agent-oriented programming. *Artificial Intelligence*, 1993, 60: 51–59.
- [22] Maes P. Intelligent software. *Scientific American*, 1995, 273: 84–86.
- [23] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21: 531–548.
- [24] Batty M, Xie Y. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban System*, 1999, 23: 205–233.
- [25] White R, Engelen G, Uijee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 323–343.
- [26] White R, Engelen G. High resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban System*, 2000, 24: 383–400.
- [27] Li X, Yeh A G O. Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS and cellular automata. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(4): 471–477.
- [28] Wu F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(8): 795–818.
- [29] Wu F L. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP—derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 1998, 12(1): 63–82.
- [30] Ligtenberg A, Wachowicz M, Bregt A K, Beulens A, Kettenis D L. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72: 43–55.
- [31] Ligtenberg A, Bregt A K, Lammeren R. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 56: 21–33.
- [32] Janssen M A, Walker B H, Langridge J, Abel N. An adaptive agent model for analysing co-evolution of management and policies in a complex rangeland system. *Ecological Modelling*, 2000, 131: 249–268.
- [33] Evans T P, Kelly H. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change. *Journal of Environmental Management*, 2004, 72: 57–72.
- [34] Hernan A M. Modeling urban growth patterns with correlated percolation. *Physics review E*, 1998, 58: 7054–7063.
- [35] Hernan A M. Modelling urban growth patterns. *Nature*, 1995, 377: 608–612.
- [36] Li X, Yeh A G O. Neural network based cellular automata for realistic and idealized urban simulation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 159–166.
- [37] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automata model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 247–261.
- [38] Yeh A G O, Li X. Sustainable land development model for rapid growth areas using GIS. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 1998, 12(2): 169–189.
- [39] Li X, Yeh A G O. Constrained cellular automata for modelling sustainable urban form. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 289–298.
- [40] Li X, Yeh A G O. The application of principal analysis and cellular automata in the spatial decision and urban simulation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 8: 683–690.
- [41] Ward D P, Murray A T, Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth. *Computers, Environment and Urban system*, 2000, 24: 539–558.
- [42] Torrens P M. Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools. In: S S Geertman and J Stillwell eds. *Planning support systems in practice.* London: Springer-Verlag, 2002. 205–222.
- [43] Torrens P M, O’ Sullivan D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28: 163–168.

- [44] Benenson I, Omer I, Hatna E. Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2002, 29: 491—512.
- [45] Sanders L, Pumain D, Mathian H, Gu rin F, Bura S. SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 287—305.
- [46] Fernandez L E, Brown D G, Marans R W, Nassauer J I. Characterizing location preferences in an exurban population: implications for agent-based modeling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, 32(6): 799—820.
- [47] Liu X P, Li X, Yeh A G O. Multi-agent systems for simulating spatial decision behaviors and land use dynamics. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(11): 1184—1194.
- [48] Huston M, DeAngelis D, Post W. New computer models unify ecological theory. *Bioscience*, 1988, 38: 682—691.
- [49] Grimm V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling*, 1999, 115:128—148.
- [50] Bouquet F, Page C L. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 2004, 176: 313—332.
- [51] Bouquet F, Cambier C, Morand P. Distributed artificial intelligence and object-oriented modelling of a fishery. *Mathematical computer modelling*, 1994, 20:97—107.
- [52] Hogeweg P, Hesper B. Individual-oriented modelling in ecology. *Mathematical Computer Modelling*, 1990, 13:89—90.
- [53] Renolds C. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 1987, 21:25—34.
- [54] Parker D C, Berger T, Manson S M, *et al.* Agent-based models of land-use and land-cover change. Report and review of an international workshop October 4—7, 2001, Irvine, California, USA.
- [55] Minar N, Burkhart R, Langton C, Askenazi M. The Swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations. Report No. 96-06-042. Santa Fe, NM: Santa Fe Institute, 1996.
- [56] Foley J A, DeFries R, Asner G P, *et al.* Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309:570—574.
- [57] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423, 528—531.
- [58] Schr ter D, Gramer W, Leemans R. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310:1333—1337.
- [59] Matthews R B, Gilbert N G, Alan R, Polhill J G, Gotts N M. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 2007, 22: 1447—1459.
- [60] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 1171—1183.
- [61] Wu J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25(4): 367—380.
- [62] Parker D C, Evans T P, Meretsky V. Measuring emergent properties of agent-based land-cover / land-use models using spatial metrics. Prepared for the 7th annual conference of the Society for Computational Economics, Yale University, June 28—29th, 2001.
- [63] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73 (6): 1943—67.
- [64] Wu J, Loucks O L. From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Quarterly Review of Biology*, 1995, 70: 439—466.
- [65] Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19:125—138.
- [66] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, Hoffmann M J, Deadman P. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314—337.
- [67] Wu W B, Yang P, *et al.* Agent-based model for land-use/cover change: a review. *Scientific Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 573—578.
- [68] Lempert R. Agent-based modeling as organizational and public policy simulator. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 2002, 99:7195—7196.

参考文献:

- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆盖变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 554—558.
- [7] 邬建国. 景观生态学中的十大研究论题. *生态学报*, 2004, 24(9): 2074—2076.
- [36] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟. *地理学报*, 2002, 57(2): 159—166.
- [39] 黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟. *地理学报*, 1999, 54(4): 289—298.
- [40] 黎夏, 叶嘉安. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用. *中国科学 D 辑*, 2001, 8: 683—690.
- [47] 刘小平, 黎夏, 叶嘉安. 基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟. *中国科学 D 辑*, 2006, 36(11): 1027—1036.
- [61] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 唐华俊, 陈仲新. 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.