

基于主体的建模方法在环境学科中的研究进展

魏泽洋¹, 刘毅^{2*}, 宫曼莉², 陈迪²

(1. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

【摘要】 基于主体的建模方法(ABM)通过自下而上的仿真模拟, 考察系统中微观层面异质性主体的状态和行为特征、主体之间的交互、主体与环境的作用, 来表征系统宏观现象的涌现, 是进行复杂系统模拟和政策评价的重要工具。本文在大量文献调研的基础上, 总结了ABM在水文领域、土地资源管理、大气污染防治及环境政策评价等方面的研究进展, 归纳了其在主体设计、交互关系与规则、系统环境特征等建模范式方面的共性, 论述了该方法对环境系统建模分析的重要意义。

【关键词】 基于主体的建模方法(ABM); 环境复杂系统分析; 水环境管理; 土地资源管理; 大气污染防治; 环境影响评价

【中图分类号】 TP311.561; F205; X321

【文章编号】 1674-6252(2020)01-0130-09

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.01.130

引言

环境系统是一种开放的复杂适应性系统, 不仅涉及环境本身的物理特征, 还涉及经济社会与生态环境之间的复杂交互。这种复杂交互很大程度上源自系统中特征各异的参与主体, 如居民、工业企业、政府等。这些主体拥有不同的决策和行为原则, 并随着科技的发展、信息的传递而采取不断学习的适应性措施^[1]。在不同的时空条件下, 主体与差异多样的环境系统产生不同维度、不同程度的相互作用, 使系统呈现出适应性、演化性、非线性和非均衡性的特点^[2]。基于主体的建模方法(Agent-based Modeling, ABM)建立在复杂适应性系统理论基础上, 借助交叉学科知识和先进的计算机技术, 可以很好地描述各类环境系统中的异质性主体的交互, 设定不同的规则机制, 深入刻画系统中的非线性关系^[3]。本文在大量文献调研的基础上, 分别从纵向的问题领域和横向的系统建模角度进行探究, 综述了ABM在各类环境问题分析中的研究进展及其方法学共性。

1 ABM的多主体系统分析思路

ABM及其所构造的多主体系统(Multi-agent System, MAS)源自计算机领域的分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence, DAI)^[4], 其目标是

构造多种异质性主体, 模拟复杂的微观交互活动来认识某一现象。一般意义上的ABM建模范式包括以下几个部分:

(1) 主体(Agent)。它是ABM的核心组成部分, 是借助计算机技术对现实主体的再现, 具有异质性、自主性、适应性和交互反应等特征。在环境领域, Agent可以是任何作用实体, 如居民、家庭、组织、企业, 乃至动物、植物等^[5]。

(2) 交互作用(Interaction)。一是主体之间的交互作用, 如技术扩散、信息传递、部门管控、贸易等; 二是主体和环境之间的交互, 如资源消耗、污染排放等^[6]。这些交互作用会带来双向反馈, 造成环境的变化, 影响甚至改变主体的行为。

(3) 环境(Environment)。环境是主体间交互作用的场所, 可以是流域、森林等自然属性的环境, 抑或是城市、农场等社会属性的环境。在ABM计算机模拟技术中, 可以采用抽象的网格图像简化真实的环境, 也可以借助GIS等技术再现真实的环境。

(4) 动态环境系统(Dynamic System)。将各类主体和环境耦合在一起, 构成时间上连续、空间上可分的动态环境系统, 观察和比较不同时空条件下宏观现象的涌现结果。

构建多主体系统, 首先要厘清现实系统的结构、功能、各类主体以及系统要实现的目标; 其次需要合

资助项目: 国家自然科学基金“基于居民消费的城市家庭水-能耦合系统高时空精度模拟”(71974110)。

作者简介: 魏泽洋(1998—), 男, 研究方向为环境系统分析等, E-mail: weizy@ruc.edu.cn。

*** 责任作者:** 刘毅(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境系统分析、复杂系统模拟与战略环境影响评价, E-mail: yi.liu@mail.tsinghua.edu.cn。

理设定主体的行为特征、交互规则及系统演化的约束条件,描述系统的关键属性;最后通过基于主体的建模,来研究个体行为对整体系统的影响。在某些情况下,可以将虚拟实验结果与现实世界进行比较、分析和评价,通过可重复的实验来推断总结系统最终行为产生的原因。

在传统的环境建模分析中,诸如流域内土地利用、工程建设和政策制定等主体活动通常被建模者视为外部干预因素^[7],但事实上环境和人类经济社会是共同演化的整体,所有的行为都可视为系统的内生因素^[8]。由ABM构造的多主体系统形成自每个主体单个行为的聚合,使主体行为对环境的影响能够以一种逻辑严谨、空间上明确的方式被纳入,同时也考虑到不同层次的互动、适应和决策^[9];既能捕捉微观的相互作用,也能产生宏观尺度上的涌现结果,再现环境的连续变化。ABM可以整合传统的研究方法,克服传统方法对复杂环境问题建模的局限性^[10],拓展环境学科的分析边界,提高人们认识和解决各类复杂环境问题的能力。

2 ABM 在环境领域的主要应用

随着近年来计算机仿真技术的深入发展,ABM在环境系统分析中的优势日益显现,被广泛运用于各种研究分析中。本节首先从问题领域角度切入,归纳ABM在环境学科中的研究进展。

2.1 水文资源与水环境管理

正确认识水资源问题的形成根源是水资源管理的重要目标,也是进行合理政策制定的基础。管理政策的制定需要考虑系统中水循环的物理过程、主体和水环境之间的双向反馈,了解系统内的经济、社会、政治等问题^[11]。ABM可模拟水资源问题形成的动态过程。例如,Zellner^[12,13]设计了土地利用和水资源利用耦合模型(WULUM),用于考察限定环境内的水动力学、经济活动和水管理措施,并在美国密歇根州门罗县进行了应用。该模型包括水动力学过程(地下水资源时空分布、生产生活用水等)和土地利用过程(城市土地分区、不同地块上的经济活动)两大部分,通过计算机模拟,发现城市土地分区是导致该地区地下水资源短缺的主要原因,并有针对性地提出了管理建议。类似地,Feuillet和Bousquet^[14]构造了各类水资源利用主体的社会交互模型(SINUSE),描述了突尼斯Kairouan流域地下水资源短缺的形成过程;Moglia等^[15]借助ABM描述了基里巴斯塔拉瓦城的水资源动

态变化;许多借助ABM对气候变化、市场机制、资源时空分布不均等条件下的水资源变化及分配过程进行描述的研究^[16-18],同样加深了人们对复杂水文问题形成过程的理解。

在水环境管理问题上,可使用ABM模拟主体行为和水环境之间的相互作用^[19],对不同政策情景下的相关主体参数进行修改,判断管理政策的效果与影响^[7]。例如,Becu^[20]等以泰国北部区域为例设计了CATCHSCAPE模型,耦合了水文的自然生态特征和流域的社会经济特征(如居民决策、管理协商等),借助复杂的技术指标体系评估不同管理政策(如水价)对水环境系统的影响。研究者也常使用ABM对不同污染防治手段(如排污权交易等)的具体实施程度、作用、影响等进行分析评价。例如,Zhang等^[21]借助ABM构建了太湖武进港流域COD交易的人工市场,引入水质模型(WASP)来预测水污染交易市场对河流水质的影响。研究表明,无交易比例、简单设计的可交易排放许可证(TDP)系统有可能降低某些地区的水质;针对太湖流域水污染中的工业废水问题,焦志倩^[22]等建立了包含工厂、政府在内的多主体系统,模拟工厂对政策的响应,评估了环境税和环境服务费两种政策在控制排污方面的功效。其他一些问题,如水环境退化中产权不明确、成本被外部化等,可通过ABM内部化水环境产权、模拟纠正市场化弊端的法规带来的影响^[12]。同样也可使用ABM模拟不同的水污染产生和管控情景,帮助人们从源头出发、精准应对突发水污染事件,为流域突发水污染事件提供政策建议^[23,24]。

2.2 土地资源管理与利用

ABM可以补充和完善传统的土地动态过程模拟方法,通过与元胞自动机模型(CA)、地理信息系统(GIS)等相结合,能够空间显式地模拟人类等主体的活动对土地利用的影响^[9],同时直观地呈现土地利用的动态变化。例如,Parker和Meretsky^[25]设计的SLUDGE模型模拟了城市土地利用变化过程,将居民生活、经济活动及交通系统间的交互作用纳入分析中,探讨了不同属性的空间外部性、运输成本等因素对城市发展和土地利用模式的影响;Balman等^[26]设计的AGRIPOLIS模型同样为模拟土地利用变化提供了支持。Le等^[27]设计了基于NetLogo平台的LUDAS模型,帮助我们理解决策过程中的主体适应性调整,尤其是主体和系统之间的循环反馈(如家庭农业活动造成生态条件变化,为适应生态条件的变化

而进行土地利用活动的调整)对最终土地利用的影响。ABM还可被运用于解释居民决策、生产和服务机构以及土地利用强度间的相互作用,模拟土地利用变化过程^[28,29]。

在此基础上,不少学者利用ABM对土地和资源管理政策进行评价。Lansing和Kremer^[30]使用该方法评价了印度尼西亚灌溉制度的选择对土地利用效率的影响;Berger^[31]研究了各类政策(如信贷支持、灌溉设施投资等)对智利一个大型农业区土地利用主体的影响,利用ABM模拟了市场驱动的土地可持续利用技术变革等如何导致了农业就业增加、阻碍了土地资源保护;Filatova等^[32]构建了一个应用于沿海城镇的土地管理模型,探索经济激励对购房消费者等主体、沿海土地市场的影响,指出了利用市场制度保护土地生态系统的政策途径。

此外,ABM还是研究人类活动对地表景观影响的重要工具。传统空间建模多停留在对景观现象的描述和解释,ABM则能够将土地景观等地理空间特征作为人类决策与行为交互的影响对象,详细展现系统的地理空间表现^[33],探究人类活动带来的地表景观变化。例如,描述越南热带雨林边缘“人—环境”耦合系统的MAS-LUCC模型,评价了政策对森林覆盖等土地景观的影响^[34];Anselme等^[35]以法国Lure山区为例,提出了基于主体的生态保护区“生态—社会背景”ABM模型,用以讨论森林聚落、山地景观的形成和保护过程。ABM还有助于理解城市景观的动态性和复杂性,拟合城市地理空间上各主体相互作用、异质性行为、自组织、局部相互作用和宏观城市景观出现^[33]。例如,Brown等^[36]提出了城乡交汇地带住宅开发ABM模型,评估了位于发达地区旁边的绿化带对于延迟绿化带外围城市空间扩展的有效性;Fontaine等^[37]以英国东安格利亚为例提出了未来住宅需求模型,模拟了城区土地利用变化、城市扩张住宅需求变化等城市蔓延的空间格局。

2.3 大气系统模拟及污染防治

大气污染防治领域的ABM模拟比其他环境领域更为复杂^[38],总体研究数量较少,大都运用在城市空气污染物产生、监测与治理等问题上。例如,Epstein等^[39]以洛杉矶城区的气溶胶产生与扩散为例,运用混合双场计算流体动力学(CFD)和ABM技术,模拟了空间分布的群落(如居民区)对物理上污染物扩散的反应,探讨了各种治理政策的有效性;Papaleonid和Iliadis^[40]针对雅典城区的空气污染

问题,设计了一个城区模块化的混合多主体系统,用于主城中心区的空气污染监测与预测;Akopov等^[38]建立了一个基于主体的大气污染动力学模型,以支持城市绿化的优化布局。该模型充分考虑了树丛与企业、工厂及车辆主体产生的大气污染物之间的复杂吸收扩散相互作用,并在亚美尼亚Yerevan地区得到应用。借助实证数据对模型进行了检验,证实了在给定预算约束下,在幼儿园(Kindergartens)及污染排放源周围种植各种类型的树木是该城区的最佳绿化布局策略。其他一些研究,如运用ABM进行空气污染中的人口暴露(Exposure)问题^[41]、描述隧道尾气扩散过程^[42]、城市交通与污染控制^[43]等,同样值得学习和借鉴。

2.4 人类经济活动的环境影响

作为复杂适应性系统的重要组成,生态环境和经济行为往往是密不可分的。一些微观的经济活动变化常带来动态的、不确定的环境变化^[44]。一些学者尝试在重点关注人类生产消费等行为的同时,借助ABM等方法进行拓展延伸,判断人类生产消费等行为造成的环境影响;抑或是在环境管理领域,补充和完善传统的环境影响评价方法,使之具有仿真模拟和宏观现象涌现的一些优点^[45]。例如,Xu等^[46]将ABM自下而上的仿真分析及心理学的概念元理论结合在一起,探讨了图书电子商务市场的动态及相关的行为造成的环境影响。该研究对消费主体及消费规则进行了差异化设计,创新性地将单向的碳排放和能源消耗纳入图书消费系统,虽然未考虑长期的环境反馈及政策情景带来的动态变化,但仍模拟并证实了消费者从“书店购买”转向“电子消费”所带来的节能和减排的可能性。Bichraoui-Draper等^[47]将基于主体的模型和传统的生命周期评价方法相结合(AB-LCA),分析评估经济行为带来的环境影响。他们以柳枝稷(一种生物质能原料)为例,分析了农民的柳枝稷生产决策选择及影响其决策的主要因素、生产模式区别对柳枝稷乙醇的生命周期评价方法之选择带来的差异,同时将潜在的二氧化碳动态变化纳入环境影响评价之中。在其他环境ABM研究中,虽然关注的重点有所侧重,但大都会涉及各类主体的经济行为和生态环境之间的交互和影响^[20,27,35]。在经济—环境研究中动态再现人类经济活动的真实环境影响、借助ABM等方法完善经济社会和自然生态的交叉模拟,在未来或将被更广泛地应用与深入探索。

2.5 环境政策的实施与评价

环境领域的 ABM 都会涉及环境政策的影响评价。政策可以是资源保护条例、水价电价调整,抑或是交通管控、用地规划等,能够为复杂系统中的主体提供行为交互规则,帮助分析者判断各类政策规则实施效果,为现实社会的环境治理提供指导。上文中有所提及具体的应用,这里不再重复,仅列举与环境政策本身相关的内容。例如,排污权交易被广泛运用于各种污染防治领域,然而排放交易系统中企业之间的动态行为和相互作用相当复杂,传统的建立在静态分析框架下难以模拟真实的经济情况,在某种程度上显得不合理。不少学者利用 ABM 对碳排放交易、排污权交易等政策传导和反馈过程进行了仿真模拟,以识别交易成本、企业反馈、消费需求变化等微观因素对市场效率的动态影响,帮助政府或企业制定效率最大化的行为规则^[48,49]。其他类似的 ABM 应用^[50-52],虽然有不同的政策评价重点,但同样能较充分地理解经济过程,刻画环境和市场动态过程,为政策改进、经济效率的改进提供多样的支持。进一步内化环境因素、真实再现环境系统的反馈,在经济效率改进的同时追求环境生态效率的优化,或许是未来环境政策分析的突破方向。

此外,ABM 在应对气候变化^[53]、自然资源保护与利用^[54,55]、维持生物多样性等领域也有一些出色的研究成果。虽然还未形成较完整的应用体系,但仍是 ABM 研究值得不断探索的方向。

3 环境领域 ABM 方法的特征

如同上文列举的,细分的环境问题领域可作为 ABM 分类的一个依据,但这种划分不可能包括所有符合上述描述的研究成果,也不利于体现环境系统的交叉学科特点。本节将从建模范式或系统本身出发,归纳环境领域 ABM 应用中的方法学共性。

3.1 ABM 的主体分类

主体是 ABM 模型的核心部分,具有异质性、自主性、适应性等特征。虽然大量的研究中对于主体的定义并非完全一致^[56],但仍可以根据主体的一些共性进行归类。首先,主体可按照认知能力的不同分为以下几种类型:

(1) 简单型主体。这是指系统中表现形式提前给定的主体,一般遵循固定的“条件—反射”式的行为规则,常用来表征现实系统中的单一能动性主体(如

树丛、绿化带^[38]、泵站、输水航道等^[18]),或者表征系统的非主要研究对象(如污水处理厂^[57]、邻居、民间团体等^[47])。简单型主体有清楚的规则和行为关系,可以在简化分析的同时保证系统的真实性与合理性,故在 ABM 建模中被广泛使用。但是这类主体缺乏适应性,无法调整自身的行为规则,具有一定的局限性。

(2) 认知型主体。这是指系统中具有自主决策能力、差异性目标的行为主体,是模型核心的研究对象,如 WULUM 模型中的用水主体、政府^[12], SINUSE 模型中的农民^[14], MAS-LUCC 模型中的土地利用主体^[34]等。认知型主体的决策行为过程不再基于固定的模式,而是仿照和再现现实主体的决策思维过程。认知型决策规则通常包含主体的阶段性状态、理解反应过程以及主体的目标,常见的如 BDI 模式(Belief-Desires-Intention),在认知型主体设计中有着广泛的运用^[58]。虽然该类主体的参数设定和行为模拟较为复杂,但有利于研究和分析个体层面的特征^[59],最大程度地还原真实系统的表现。

其次,环境领域的 ABM 常借助“社会—环境”耦合系统,解决发展过程中遇到的环境问题,追求生态环境可持续与社会经济效益的优化。大部分主体都可以按照社会经济属性归为以下几类:

(1) 生产主体。该类主体通过消耗自然及社会资源,为市场提供商品生产,并常具有污染物排放等环境负外部性。常见的如各类制造业排污企业^[21,22]、农场主或农民^[14,27]、森林木材经营者^[54]等。

(2) 消费主体。即经济活动中消耗最终产品,完成“生产—消费”闭环的主体。常见的如上下游企业^[52]、普通消费者乃至购买社会产品与服务的政府机构^[60],都可以作为消费主体进行分析。

(3) 提供基础设施与服务的主体。如提供基础设施服务的政府主体^[31,43]、水电站^[61]等。

(4) 社区生活主体。最常见的如社区居民^[37,41]、家庭主体^[16]等。

(5) 其他主体。这是指系统中其他的经济活动主体,但往往不是研究的主要对象,常表示为简单型主体。

以上几类主体之间存在交叉,说明了同一类主体可能具有多个社会经济属性,在面对不同问题时会有多样的决策和行为方式,这充分体现了 ABM 方法中微观层面复杂多样的主体特征。

3.2 主体交互关系与规则

合理的模型需要微观上符合逻辑的主体设计,以及与现实相吻合的模拟结果^[1]。这意味着研究者需要严谨地制定主体交互关系与规则,使主体的行为和涌现的宏观结果更贴近实际。常见的主体交互关系可归类为:

(1) 单向关系。如简单的商品买一卖关系、排污—治污关系^[57],用一对一的直线形式即可描述清楚。

(2) 双向反馈。ABM系统的核心关系常用双向反馈的形式展现,表征主体和主体、主体与环境间的交互过程。如家庭生产与土地利用决策和环境变化之间的循环反馈关系^[34],人与人之间的战略博弈论互动^[7],政府管制和排污主体之间的协商交互^[21,22]等。

(3) 多向关系。包括一对多、多对多关系,常用来构造整体系统多层次的交互网络。如WULUM模型中数字化的地下水层和土地利用层之间构成的多向关系网络^[12]。

主体行为规则可分为:简单反应;完全理性,如局部线性关系中的计量经济学假设;有限理性,有限理性常对应认知型主体,通过归纳和学习,不断优化自身目标,是ABM模型中最重要的行为规则。ABM设计也需要合理的系统规则,即借助交叉学科的知识,设定合理的系统目标函数。一般可遵循的系统

规则有:经济学规则,如帕累托最优^[38,61]、利润最大化^[52]等;生态可持续规则,如资源可持续利用^[55]、资源的时空均衡分配^[17];社会效益原则,如空气污染负效应最小化^[39,41]等;其他学科属性的目标约束。研究者可根据自己模型的需要,对系统规则进行科学、合理的设定。

3.3 系统环境特征

环境是主体间交互作用的场所,ABM借助计算机技术对复杂的自然—社会系统进行刻画,模拟再现真实的环境。根据模拟环境的共性,可将其分为“非具体环境”和“具体环境”:若环境特征或环境表现不是模型的一个重要方面,或者只是构造理论上的模型而不立足现实,则可以用数字模拟或实验模拟的方法构造非具体环境。例如,研究排污收费政策时构建的虚拟工业水污染环境^[57]、数字化的隧道污染物扩散环境^[42]等。当研究涉及模拟土地利用模式或景观变化等问题时,研究者常借助GIS、多层结构网格等技术^[1],构造一个立足现实的、具体的环境。例如,利用GIS再现山区的森林景观变化^[35],模拟真实的城市空间扩张过程^[37],探究现实流域地下水位变化及相关主体间的交互^[14]等。

3.4 小结

本文试图构造一个思维框架(图1),把纵向的环境问题领域和横向的系统建模方法特征交叉结合,这一方面有助于归纳各类环境问题的前沿性系统分析成果,另一方面也有助于寻找建模方法学共性,更好地支持今后的研究工作。此外,表1从主体类型、交互关系及系统环境特征三方面对各类环境问题的代表性模型进行了比较。

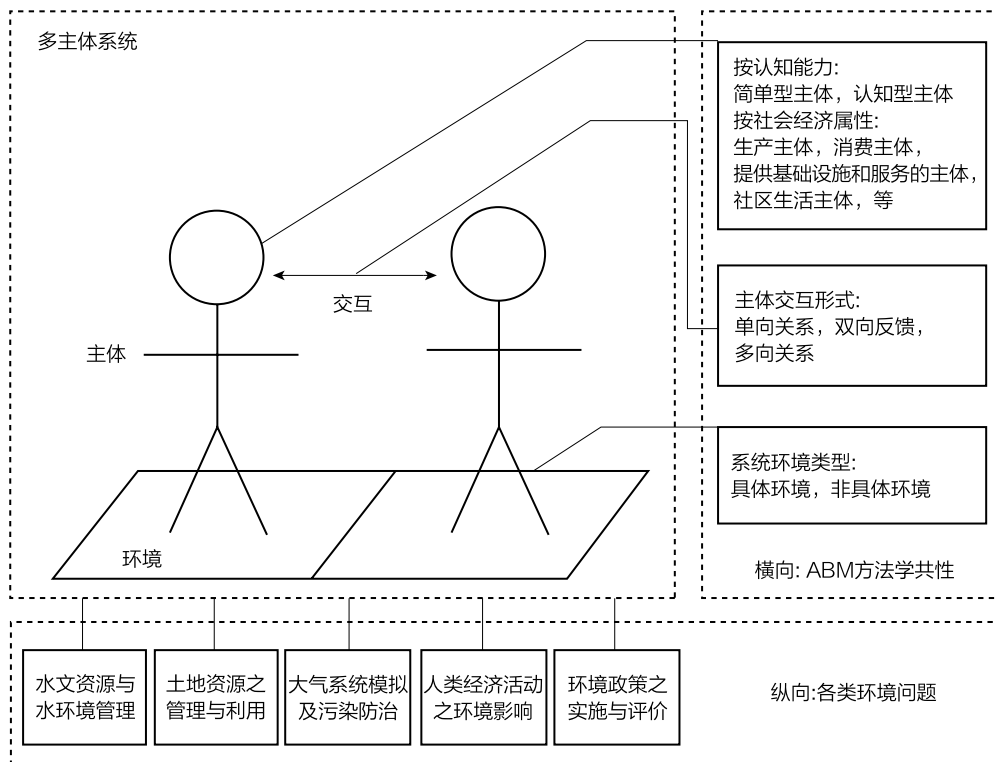


图1 ABM在不同环境领域的方法特征

表1 各环境领域代表性ABM模型方法学特征总结

		水资源—土地利用模型	水资源利用主体交互模型	土地利用动态模型	大气污染物与绿色植物相互作用模型	排污权交易政策影响分析模型
		WULUM	SINUSE	MAS-LUCC	基于 AnyLogic 平台	基于 NetLogo 平台
认知属性主体类型	认知型主体	✓	✓	✓	✓	✓
	简单型主体	✓	✓	✓	✓	✓
社会经济属性主体类型	生产主体	✓	✓	✓		✓
	消费主体	✓	✓			✓
	提供基础设施和服务的主体		✓	✓	✓	✓
	社区生活主体	✓	✓	✓	✓	
主体交互关系	单向关系		✓	✓	✓	✓
	双向反馈	✓	✓	✓	✓	✓
	多向关系	✓		✓		
系统环境特征	具体环境	✓	✓	✓	✓	
	非具体环境					✓

4 环境 ABM 的局限与展望

ABM 涉及多个维度的交互和决策问题，以及不同情景下的系统差异。该方法能够再现真实经济社会发展与生态环境变化之间的动态联系，模拟不同经济情景、政策调节、行为观念导致的环境变化，模拟环境与系统内各类主体之间的交互反馈，抑或是模拟生态环境系统的发展演化过程。虽然基于主体的建模在环境领域取得了很大的进展，但目前关于环境问题的 ABM 研究存在以下几类局限：

（1）一些研究集中从社会经济角度切入去探究经济动态变化及环境的联动变化，以产污、污染浓度变化等环境质量变化作为输出结果，易忽视环境数据的返回输入，对环境的负外部性对系统的反馈欠缺考虑。

（2）一些研究易遵循数理公式、理论模型进行 ABM 演化，特别是在大气污染管控、污染物产生迁移等问题上，以偏向实验的方式把演化转化过程描述得更详细，缺乏与社会经济领域多类主体的耦合分析。

（3）不同的环境 ABM 在问题关注重点、环境特征、模型设计等方面具有很大的差异，一款成功的模型往往很难运用到其他相似的环境问题上，缺乏适应性和拓展性。

此外，基于主体的建模对数据数量和质量要求较高，也需要研究者掌握一些复杂系统理论、计算机编程等，一定程度上增加了其推广难度。但随着大数据、机器学习、高精度建模技术的发展及相关研究的深入，该方法在环境问题上必将有更好的运用。未来

环境 ABM 的研究可从以下几方面进行改进：

（1）完善不同类型环境系统的微观主体行为交互的设计，构建针对不同问题的建模范式。

（2）在进行社会—环境耦合分析时进一步内化环境因素，真实再现环境系统的反馈，在经济效率改进的同时追求环境生态效率的优化。

（3）改进系统的参数率定、模型校验与不确定性分析方法，提高对现实复杂系统不确定性的刻画水平。

（4）尝试在大气污染系统模拟、生物多样性维护、长期生态环境变迁等问题上寻求研究突破，提高 ABM 在环境细分领域的应用能力。

5 结语

本文总结了基于主体建模方法在环境学科中的研究进展，归纳了环境 ABM 模型的建模方法共性。这种“自下而上”的建模方法具有独到的优势，可以被广泛应用于环境细分领域中出现的各种问题，理解环境系统的演化过程。同时也能够充分融合各类学科领域、建模手段、分析方法的长处，将局部的非线性关系有机联系在一起，帮助我们理解微观个体互动、环境变化及宏观现象涌现的过程和逻辑。随着我国环境问题的不断凸显，反映现实复杂环境系统的 ABM 建模方法必将得到更广泛的应用，提高应对环境问题和科学决策的能力，为生态环境—社会经济的可持续发展提供支持。

参考文献

[1] 褚俊英, 陈吉宁, 邹骥, 等. 基于复杂系统建模的水管理政策研

- 究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(6): 29-34.
- [2] MURPHY P. Symmetry, contingency, complexity: accommodating uncertainty in public relations theory[J]. Public Relations Review, 2000, 26(4): 447-462.
- [3] HECKBERT S, BAYNES T, REESON A. Agent-based modeling in ecological economics[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1185(1): 39-53.
- [4] BOUSEQUET F, LE PAGE C. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review[J]. Ecological Modelling, 2004, 176(3-4): 313-332.
- [5] JENNINGS N R. On agent-based software engineering[J]. Artificial Intelligence, 2000, 117(2): 277-296.
- [6] FERBER J. Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence[M]. Harlow, England: Addison-Wesley Professional, 1999.
- [7] TESFATSION L, REHMANN C R, CARDOSO D S, et al. An agent-based platform for the study of watersheds as coupled natural and human systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 89: 40-60.
- [8] SIVAPALAN M, KONAR M, SRINIVASAN V, et al. Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene[J]. Earth's Future, 2014, 2(4): 225-230.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] MULLER B, BALBI S, BUCHMANN C M, et al. Standardized and transparent model descriptions for agent-based models: Current status and prospects[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 55: 156-163.
- [12] ZELLNER M L. Embracing Complexity and uncertainty: the potential of agent-based modeling for environmental planning and policy[J]. Planning Theory & Practice, 2008, 9(4): 437-457.
- [13] ZELLNER M L, THEIS T L, KARUNANITHI A T, et al. A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2008, 32(6): 474-488.
- [14] FEUILLETTE S, BOUSQUET F, LE GOULVEN P. SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(5): 413-427.
- [15] MOGLIA M, PEREZ P, BURN S. Modelling an urban water system on the edge of chaos[J]. Environmental Modelling and Software, 2010, 25(12): 1528-1538.
- [16] BITHELL M, BRASINGTON J. Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution[J]. Environmental Modelling and Software, 2009, 24(2): 173-190.
- [17] VANOEL P R, KROL M S, HOEKSTRA A Y, et al. Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(4): 433-443.
- [18] 李臣明, 徐立中, 戴治波, 等. 基于 Swarm 的跨流域调水多 Agent 交互和协作仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2146-2151.
- [19] BLAIR P, BUYTAERT W. Socio-hydrological modelling: a review asking "why, what and how?"[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1): 443-478.
- [20] 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[J]. Ecological Modelling, 2003, 170(2-3): 319-331.
- [21] ZHANG Y L, WU Y Y, YU H, et al. Trade-offs in designing water pollution trading policy with multiple objectives: A case study in the Tai Lake Basin, China[J]. Environmental Science & Policy, 2013, 33: 295-307.
- [22] 焦志倩, 张伟光, 王红瑞, 等. 基于多主体建模工业废水污染控制模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 486-492.
- [23] 解建仓, 李维乾, 李建勋, 等. 基于 Multi-Agent 的流域突发水污染扩散模拟[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(1): 13-19.
- [24] 李建勋, 解建仓, 高阳, 等. 基于复杂 agent 的水污染运移仿真模拟[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(4): 1078-1081.
- [25] 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(2-3): 233-250.
- [26] BALMANN A. Farm-based modelling of regional structural change: A cellular automata approach[J]. European Review of Agricultural Economics, 1997, 24(1): 85-108.
- [27] LE Q B, SEIDL R, SCHOLZ R W. Feedback loops and types of adaptation in the modelling of land-use decisions in an agent-based simulation[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 27-28: 83-96.
- [28] MURRAY-RUST D, BROWM C, VAN VLIETJ, et al. Combining agent functional types, capitals and services to model land use dynamics[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 59: 187-201.
- [29] LANSING J S, KREMER J N. Emergent properties of balinese water temple networks: coadaptation on a rugged fitness landscape[J]. American Anthropologist, 1993, 95(1): 97-114.
- [30] 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.
- [31] FILATOVA T, VOINOV A, VAN DER VEEN A. Land market mechanisms for preservation of space for coastal ecosystems: An agent-based analysis[J]. Environmental

- Modelling & Software, 2011, 26(2): 179-190.
- [32] 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.
- [33] LE Q B, PARK 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.
- [34] ANSELME B, BOUSQUET F, LYET A, et al. Modelling of spatial dynamics and biodiversity conservation on Lure mountain (France)[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(11): 1385-1398.
- [35] BROWN D G, PAGE S E, RIOLO R, et al. Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(12): 1097-1109.
- [36] FONTAINE C M, ROUNSEVELL M D A. An agent-based approach to model future residential pressure on a regional landscape[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1237-1254.
- [37] AKOPOV A S, BEKLARYAN L A, SAGHATELYAN A K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 116: 7-25.
- [38] EPSTEIN J M, PANKAJAKSHAN R, HAMMOND R A, et al. Combining computational fluid dynamics and agent-based modeling: a new approach to evacuation planning[J]. *PLoS One*, 2011, 6(5): e20139.
- [39] PAPALEONIDAS A, ILIADIS L. Hybrid and reinforcement multi agent technology for real time air pollution monitoring[M]// ILIADIS L, MAGLOGIANNIS I, PAPADOPOULOS H, eds. *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [40] BECKX C, PANIS L I, ARENTZE T, et al. A dynamic activity-based population modelling approach to evaluate exposure to air pollution: Methods and application to a Dutch urban area[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(3): 179-185.
- [41] RIDLEY P. Modelling pollution dynamics of longitudinally ventilated road tunnels[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 163: 55-64.
- [42] GURRAM S, STUART A L, PINJARI A R. Agent-based modeling to estimate exposures to urban air pollution from transportation: Exposure disparities and impacts of high-resolution data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 75: 22-34.
- [43] LANSING J S. Complex Adaptive Systems[J]. *Annual Review of Anthropology*, 2003, 32: 183-204.
- [44] SCHWARZ N, ERNST A. Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations-An empirical approach[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2009, 76(4): 497-511.
- [45] XU M, ALLENBY B, KIM J, et al. A dynamic agent-based analysis for the environmental impacts of conventional and novel book retailing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(8): 2851-2857.
- [46] BICHRAOUI-DRAPER N, XU M, MILLER S A, et al. Agent-based life cycle assessment for switchgrass-based bioenergy systems[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 103: 171-178.
- [47] ZHANG B, ZHANG Y L, BI J. An adaptive agent-based modeling approach for analyzing the influence of transaction costs on emissions trading markets[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 482-491.
- [48] HUANG H F, MA H W. An agent-based model for an air emissions cap and trade program: a case study in Taiwan[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 613-621.
- [49] SICHAO K, YAMAMOTO H, YAMAJI K. Evaluation of CO2 free electricity trading market in Japan by multi-agent simulations[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3309-3319.
- [50] PURNOMO H, SUYAMTO D, IRAWATI R H. Harnessing the climate commons: an agent-based modelling approach to making reducing emission from deforestation and degradation (REDD)+work[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, 18(4): 471-489.
- [51] 李昊, 赵道致. 基于多 Agent 的碳排放权交易机制建模与仿真[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(25): 9-14.
- [52] 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: 29-51.
- [53] MORENO N, QUINTERO R, ABLAN M, et al. Biocomplexity of deforestation in the Caparo tropical forest reserve in Venezuela: An integrated multi-agent and cellular automata model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(5): 664-673.
- [54] BONE C, DRAGIĆEVIĆ S. Simulation and validation of a reinforcement learning agent-based model for multi-stakeholder forest management[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(2): 162-174.
- [55] SPIEGEL M, REYNOLDS P F, BROGAN D C. Grand challenge case studies in a simulation curriculum[C]//2006 ACM/IEEE Winter Simulation Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2006.
- [56] 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.
- [57] BORDINI R H, HÜBNER J F, WOOLDRIDGE M. Programming Multi-Agent Systems in Agent Speak Using Jason [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [58] CARLEY K M, PRIETULA M J, LIN Z. Design versus cognition: the interaction of agent cognition and organizational design

- on organizational performance[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 1998, 1(3): 1-19.
- [59] 徐敏杰, 胡兆光. 基于 Agent 的经济政策对电力消费影响模拟实验 [J]. 系统管理学报, 2011, 20(5): 539-548.
- [60] ZHOU Y L, GUO S L, XU C Y, et al. Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management (II): Case study[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 977-991.
- [61] GIGERENZER G, SELTEN R. Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2001.

Review of the Application of Agent-Based Modeling in Environmental Science

WEI Zeyang¹, LIU Yi^{2*}, GONG Manli², CHEN Di²

(1. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: From bottom-up, agent-based modeling (ABM) has become an important technique in environmental science, which investigates heterogeneous agents and the interactions at micro-level, represents the emergence of phenomena at macro-level. This paper summarizes the application of ABM in different environmental issues such as water environment management, land resource management, prevention and control of air pollution, evaluation of environmental policy, etc., and also explores the commonalities of ABM's paradigms in model design, interaction rules, and system environmental characteristics. This paper is aimed to provide a review of agent-based modeling in environmental science so that researcher can link their need to the current state of the modeling techniques that are currently used to satisfy them. Besides, the significance of ABM in environmental system analyzing is discussed.

Keywords: agent-based modeling (ABM); complex adaptive system; water environment management; land resource management; air pollution prevention and control; environmental impact assessment