

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.02.013

# 基于 Agent 的水资源管理模型研究进展

练继建<sup>1</sup>, 徐梓曜<sup>1,2</sup>, 宾零陵<sup>1</sup>, 徐奎<sup>1</sup>, CHAN Hoi Yi<sup>3</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 水利部综合开发管理中心, 北京 100053;  
3. College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Ithaca, NY 14853)

**摘要:** 基于 Agent 的模型 (Agent-based models, ABM) 研究已成为水资源管理研究理论与方法的重要补充。对水资源管理 ABM 研究进行归纳与展望, 有助于探索优化中国水资源管理体制和机制。在阐述水资源管理 ABM 概念及内涵的基础上, 提炼出主体决策规则和互作机制两个建模核心内容, 并对其方法进行了归纳分析; 从流域水资源优化配置、城镇居民用水管理和灌区水资源管理 3 个方面, 对 2009—2018 年主要水资源管理 ABM 研究进行了综述; 针对当前研究的难点与不足, 提出未来研究重点: ① 拓展复杂适应理论在水资源管理领域的应用; ② 加强不确定性水资源管理 ABM 研究; ③ 探索基于机器学习的决策规则建模方法; ④ 重视参数校准和结果校验及检验方法; ⑤ 加强模型表述格式标准化进程; ⑥ 综合权衡水资源管理 ABM 框架。

**关键词:** 复杂适应系统; 水资源系统; 水资源管理; 基于 Agent 的模型

**中图分类号:** TV213.4; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2019)02-0282-12

水资源系统是一个“人类-自然”耦合的复杂系统, 其复杂性主要源于系统内气象、水文、地理等自然要素与社会、经济等人文要素之间存在的多种非线性关系以及要素之间在物质、能量和信息上的交换导致系统整体演化的不确定性<sup>[1-3]</sup>。单一基于自然水循环模式的水资源管理研究方法存在多种缺陷, 必须将天然水循环和人类活动动态耦合, 才能准确反映实际水资源系统的演化过程<sup>[4]</sup>。近年来, 学者们提出将底层主体行为作为系统内生因子进行研究的方法, 以便更好地揭示自然系统与社会经济活动互馈涌现出的宏观结果<sup>[5]</sup>。其中, 基于 Agent 的模型 (agent-based models, ABM) 是实现这种“自底而上”研究路径的重要工具。

早在 20 世纪 70 年代末, Schelling<sup>[6]</sup> 利用类似 ABM 的简单模型对人口迁移问题进行了模拟, 成为 ABM 最早的雏形。90 年代初, Holland<sup>[7]</sup> 提出了复杂适应系统理论 (Complex Adaptive System), 很好地诠释了因微观个体行为的适应性生成宏观系统复杂性的现象, 成为 ABM 建模的重要理论依据。随后, 得益于计算机技术的飞速发展, ABM 被广泛应用于社会学、经济学等领域<sup>[8]</sup>。进入 21 世纪以来, ABM 开始在土地利用/覆盖变化<sup>[9-10]</sup>、环境生态<sup>[11]</sup> 等自然科学领域兴起, 并逐渐为水资源管理学科所用<sup>[12]</sup>。在中国, 水资源规划与管理基于对水资源及其开发利用的调查研究, 通过需、供水预测与水资源配置的动态反馈, 提出优化水资源的合理配置格局<sup>[13]</sup>。这一过程将水的自然循环与人类水资源利用的蓄、供、用、耗、排等过程紧密联系起来, 其本质为一种从微观到宏观、从局部到整体的系统性管理模式。因此, 对国内外水资源管理 ABM 研究进行阶段性总结与展望, 对指导中国水资源管理体制改革, 加强中国水资源管理制度建设具有重要意义。

本文阐述了水资源管理 ABM 的概念和内涵, 归纳出其建模的核心内容及方法; 并对 ABM 应用最为集中的流域水资源优化配置、城镇居民用水管理和灌溉水资源管理 3 个方面研究成果进行综述; 指出当前研究中存在的难点与不足, 并对今后需要加强研究的方向进行了展望。

收稿日期: 2018-06-11; 网络出版日期: 2019-02-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20190226.1112.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0401905); 国家自然科学基金资助项目 (51809192)

作者简介: 练继建 (1965—), 男, 福建建瓯人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水利水电工程等研究。

E-mail: [jjlian@tju.edu.cn](mailto:jjlian@tju.edu.cn)

通信作者: 徐梓曜, E-mail: [zx66@cornell.edu](mailto:zx66@cornell.edu)

# 1 水资源管理 ABM 的概念与建模方法

## 1.1 水资源管理 ABM 的概念和内涵

水资源管理 ABM 是一类以“适应性造就复杂性”为理论基础的跨层次水资源系统模拟模型。将水资源系统或供水系统中各要素抽象成独立、异质的“活的”适应性主体(agent), 通过描述 agent 之间、agent 与环境间的交互作用, 表达出整个水资源系统的宏观涌现结果。所谓适应性, 是指 agent 以水量、货币或信息(水量信息、政策信息等)为交流媒介, 在其相互作用或与环境的动态反馈过程中不断“学习”或“积累经验”, 从而改变自身结构和微观决策行为的性能<sup>[14]</sup>。

水资源管理 ABM 大致用于两个层面的研究: 流域层面和部门层面。在流域层面, agent 代表流域内各用水区或用水部门; 在部门层面, agent 则代表该部门内的底层用水户, 如城镇家庭、灌区农户、工业企业等。因下一层级微观行为互作派生出上一层级水量、经济、环境等特征的变化, 即为宏观涌现结果。具体说来, 用水户 agent 相互作用“涌现”出部门级特征, 部门或用水区 agent 相互作用“涌现”出整个流域的特征。可见, 水资源管理 ABM 通过跨层次涌现, 可有效耦合流域、部门(区域)、用水单元等不同尺度的水资源问题。

根据决策行为划分, agent 分为反应型和思考型两类<sup>[15]</sup>(表 1)。反应型 agent 是根据外部信号或事件被动产生反应; 思考型 agent 则以目标为导向, 其决策行为基于对环境的认知或对以往经验的记忆, 通过逻辑推理和符号操作付诸行动<sup>[16]</sup>。一般而言, 思考型 agent 刻画主体行为的能力更强, 而反应型 agent 具有更高的灵活性和容错性<sup>[17]</sup>。

表 1 水资源管理 ABM 建模的主要内容及分类

Table 1 Main contents and their classifications of agent-based modeling for water resources management

内容	分类			
Agent 类型	反应型 Agent	思考型 Agent		
Agent 决策规则	阈值、“条件-行为”规则	优化法(理性选择)	启发法(有限理性选择)	角色扮演
Agent 互作网络	规则网络(不随机)	复杂网络(半随机)	随机网络(完全随机)	

## 1.2 Agent 决策规则的表达

水资源管理 ABM 建模重点是建立精确且可信的决策规则, 对 agent 水资源利用的供、用、耗、排、节水等一系列行为决策进行模拟<sup>[18]</sup>。决策行为的建立并无统一标准, 主观性较强, 归纳总结可分为 4 类。第一类方法基于阈值或“条件-行为”机制, 这类方法较为简单, 多用于反应型 agent。第二类是优化法, 将 agent 设置为独立的优化程序, 使它们在约束条件下追求自身收益、利润或效用目标函数最大化<sup>[19-20]</sup>。这类模型实质上是一种理性决策理论模型。然而, 因自身知识、能力和信息的局限性, 决策者难以达到完全“理性”。例如, 许多灌区农户将产值最大化作为生产目标, 而非利润最大化。第三类是基于“有限理性决策”理论的启发法, 既可以源于简单的经验法则, 也可运用神经网络<sup>[21]</sup>、进化算法<sup>[22]</sup>、决策树<sup>[23]</sup>等算法建立起“驱动因子-决策行为”预测模型; 或对决策者进行分类, 寻找各类决策者与行为之间的对应关系, 并以概率模型对行为规则加以表述<sup>[24-25]</sup>。最后一类是角色扮演法, 通过组织系统内真实决策者参与情景模拟活动, 定性总结出主体决策意向<sup>[26-29]</sup>。

除了上述 4 类方法外, 还有一些研究试图从心理学<sup>[30]</sup>、空间理论<sup>[31]</sup>等理论出发, 挖掘人类内在在决策规则, 这类方法在水资源管理 ABM 研究中的应用相对较少。

## 1.3 Agent 互动机制的建立

水资源管理 ABM 建模的另一核心任务是建立 agent 互动机制, 即 agent 之间通过一定的信息响应规则相互作用, 进而互为影响决策行为。例如, 流域上下游、干支流之间的用水区在水权和排污权的分配与使用上

相互制约并影响；灌区农户、社区居民之间会因熟人交流而增强节水意识等。建模者可根据实际情况确定 agent 互作内容，并从两方面对 agent 互作机制进行设计。

(1) 基于对现实世界中主体所处环境网络的认识，对 agent 可互作范围及对象进行建模。环境网络由 agent 之间的距离构成，包括地理区位距离<sup>[19]</sup>，经济、文化、民族差异造成的社会距离<sup>[32]</sup>以及两种距离的叠加<sup>[33]</sup>。根据网络节点关联随机程度，agent 关系网络模型可分为 3 类。第一类用以描述地理空间位置的规则网络模型，多用于建立流域层面 ABM 中用水区的区位网络。第二类是存在不确定性的随机网络模型，多用于构建水权市场参与者的交易范围，其实质是一个考虑经验偏好的概率空间模型<sup>[34]</sup>。最后一类是介于前两类之间的复杂网络模型，包括小世界网络、幂律网络、自相似网络等，这类模型常用于描述用水户之间的社会关系网<sup>[35]</sup>。

(2) 基于 agent 行为影响扩散机制，对互动后的决策行为变化进行建模。这方面的建模方法繁多复杂，难以进行系统性分类，但有几种方法在水资源管理研究中较为普遍。第一种是临界值或概率函数表达。例如，某一用水区与其他用水区合作开发水资源的概率，与流域内已实施合作式开发的用水区个数成正比<sup>[36]</sup>。类似地，一些基于社会学理论的影响扩散机制，描述了个体在社会压力作用下其用水行为和节水意识朝主流方向变化的现象<sup>[37]</sup>。另一种为基于复杂机器学习原理(例如贝叶斯推理)的影响扩散机制，即 agent 获取新的信息后重新组织知识结构，其侧重于刻画个体学习和适应能力<sup>[19,38]</sup>。

## 2 水资源管理 ABM 研究进展

### 2.1 流域水资源优化配置研究

流域水资源配置优化策略可分为集中式和分布式两种(图 1)，前者通过规划与模糊数学方法、系统学方法、启发式优化等手段寻求全局最优解<sup>[39]</sup>；可以量化理想状态下系统最佳分配格局，也有助于促进各方合作<sup>[40]</sup>。但它基于几点假设：① 所有用水区或部门均服从于一个“超级机构”；② 其信息完全对等；③ 其边际效益均已知<sup>[41]</sup>。然而，完全信息对等难以实现，且中国一些地区仍存在地方保护主义，流域机构在执行集中式水资源配置时，难以扮演“超级机构”的角色<sup>[42-43]</sup>。分布式优化策略不拘于上述假设，它将流域内各用水区或部门 agent 寄存在相应层级或概化节点中，各 agent 以自身目标为导向优化决策变量，从而将水资源整体目标优化转化成多个子目标优化。

早期，一些分布式水资源优化研究采用传统优化方法对微观行为规则进行建模，即 agent 在严格意义约束条件下的决策域内求解<sup>[44-46]</sup>；该方法可实现跨层次的纵向水资源调控与反馈，但对同一层级 agent 之间的横向交互作用描述不足。Yang 等<sup>[41]</sup>基于罚函数法，将 agent 优化方程改造成一个无约束的广义目标函数，并通过逐利参数对同层级 agent 的异质性、博弈及适应过程进行表达。这一方法一定程度推动了分布式水资源优化配置的发展，并被应用于黄河<sup>[47]</sup>、漳河<sup>[48]</sup>等流域的水资源优化配置研究。Zhao 等<sup>[49]</sup>将市场和行政两种分配机制嵌入该罚函数 ABM 框架，并证明降低交易和行政成本、提高水文预报精度可提升水资源利用效益。随后，Giuliani 和 Castelletti<sup>[50]</sup>对用水区间不同程度信息交流下水资源配置进行了模拟评估，结果表明信息对称有效提高了流域尺度经济效益。近几年来，更多研究试图探索多目标视角下流域水资源分布式优化配置。Zhou 等<sup>[51-52]</sup>提出了集成经济发展、社会稳定、生态环保的自适应动态水资源配置模型，并以东江流域为例对模型进行验证。Ding 等<sup>[53]</sup>建立的收益再分配模型同时兼顾了用水效率与公平原则。另一些水资源优化配置 ABM 则旨在应对、协调和缓解流域水资源冲突<sup>[36,54]</sup>。可见，流域水资源优化配置 ABM 经历了从 agent 单一纵向互作到横纵双向互作、单目标到多目标、低通用性到高通用性的转变过程。

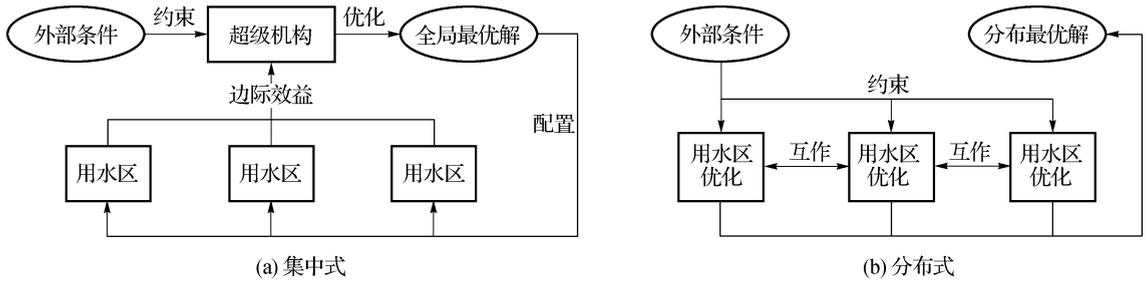


图 1 集中式和分布式水资源优化配置模式

Fig. 1 Centralized and decentralized approaches for optimal water resources allocation

### 2.2 城镇居民用水管理研究

当前, 城镇水资源管理理念已逐渐从供水管理向用水、需水管理转变<sup>[55]</sup>; ABM 将城镇用水直接受惠者的行为, 作为驱动区域整体需水变化的内生动力, 弥补了回归统计法、恩格尔系数法、神经网络理论等传统需水预测方法物理解释能力不强的缺点<sup>[56-57]</sup>。影响居民用水行为的因素分为外部和内部两方面: 外部因素包括政策措施(水价调控、用水管控和节水宣传等)、社会准则、家庭结构、节水技术等; 内部因素包括生活态度、节水意识等心理因素<sup>[58]</sup>。

现阶段多数研究以外部因素驱动微观用水行为进行探究, 根据研究目的大致分为两类。第一类旨在通过模拟居民用水行为的政策响应, 对城镇用水管理决策和政策措施进行评价。Ma 等<sup>[59]</sup>通过模拟政府与居民之间水价协商过程, 检验用水政策的有效性。在此基础上, 一些研究还综合考虑了环境可供水量属性, 以便更好地模拟分析居民用水的供需动态过程(图 2)。Kanta 和 Zechman<sup>[35]</sup>在 ABM 框架下耦合了需水和供水模型, 并对适应性管理策略进行评估。Ali 等<sup>[60]</sup>还嵌入了随机水文条件下的供水调度规则。第二类研究侧重反映经济、社会、文化、科技等因素错综交织给城镇用水管理带来的复杂性, 旨在发现居民需水的主要驱动因子。其中, Galan 等<sup>[61]</sup>认为西班牙某市居民耗水总量的决定因素是居住迁移和节水技术扩散。Chu 等<sup>[62]</sup>分析了 20 世纪 80 年代以来北京居民用水增长及结构变化的成因并提出政策性建议。Yuan 等<sup>[33]</sup>、金菊良等<sup>[56]</sup>建立了相似的 ABM, 均认为水价和可支配收入调控是家庭用水总量控制的关键。

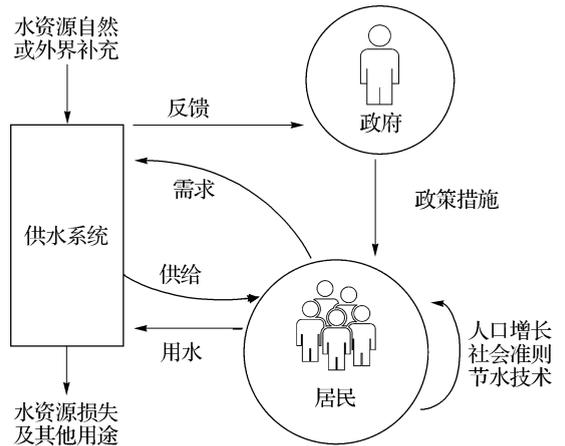


图 2 反馈机制下的城镇居民用水管理 ABM 框架  
Fig. 2 General ABM framework for simulating residential water demand management with feedback loops

随着城镇用水管理 ABM 的发展, 从内部主观因素挖掘用水行为成因的研究逐渐出现。Linkola 等<sup>[63]</sup>基于计划行为理论, 在“信念-愿望-意图”(BDI)框架下建立了居民室内用水行为模型, 认为文化观念等主观因素决定用水习惯。事实上, 内外部因素并不是孤立的, 而是错综交织共同影响, 但主体行为归根结底是意识决定的, 即“外部驱动→态度变化→用水行为”。一些研究人员已经开始从相关角度展开研究。其中, Koutiva 和 Makropoulos<sup>[32]</sup>开发了基于社会心理学理论的 ABM, 细致刻画出居民用水意图对社会影响和供水政策的响应, 并利用雅典市数据进行了模型验证。

### 2.3 灌区水资源管理研究

灌区是一个“人类-自然”耦合的半人工生态系统。随着田间尺度水循环研究向灌区水循环关系研究转变,

开展人类活动下灌区水循环转化关系、基于“水-社会经济-生态环境”复合系统下灌区水资源承载力等研究,是灌区水资源管理研究的重要趋势<sup>[64]</sup>。目前国内基于 ABM 的灌区水资源管理研究较少,仅在灌区水资源优化配置研究上有所涉足<sup>[65]</sup>。而国外研究颇为丰富,并与土地利用、环境保护、生物能源、水权和土地交易等内容交叉融合,具有很高的跨学科性;但本质上都是通过模拟农户取水灌溉、作物种植、节水改造等微观决策与自然水循环的协同作用,探究人类与灌区水资源系统的演变机理及二者之间的互作机制。

与居民用水需求不同,农户灌溉水量的弹性很大,对政策、市场、水文气候等因素高度敏感。因此,建立准确的农户决策规则和行为特征极具挑战。一些研究旨在解决灌区地下水衰竭等问题,通过耦合 ABM 和地下水模型,模拟灌区水资源系统演化过程及结果,进而提出可持续的地下水开采方案或政策建议。初期研究主要基于简单经验法则建立行为规则。van Oel 等<sup>[66]</sup>通过问卷调查获得经验数据并绘制出决策流程图,然后赋予农户在各流程端点的决策系数。这一方法忽略了外界变量不确定性导致决策变量的随机性以及同一区域农户的异质性。随着研究不断推进,出现了一些更为复杂的决策模型,如需求模型<sup>[67]</sup>、多目标纳什博弈<sup>[68-69]</sup>、效用函数最大化<sup>[70]</sup>等。一些学者还开发了软件平台,允许建模者灵活调整行为规则和地下水模型参数<sup>[71]</sup>。

从经济学角度对灌溉水资源管理策略进行评价也较为普遍。Mulligan 等<sup>[72]</sup>耦合了农经模型和地下水模型,模拟分析了3种开采策略下的区域经济效益。Arnold 等<sup>[73]</sup>建立了农户风险管理下的行为规则,并对灌区退水再利用的经济效益进行了量化分析。近年来,农业水权交易、农业水污染控制、能源作物等内容也逐渐被引入。Nguyen 等<sup>[74]</sup>对公开交易和协议转让两种水质市场结构进行了比较,认为前者效率更高。Ng 等<sup>[19]</sup>有机结合了 ABM 和水文模型,精细模拟分析了碳交易市场下的粮食和能源作物产量、灌区水质等,对灌区水质政策、“水-能源-粮食”纽带、气候变化下的粮食安全等方面研究具有指导意义。

## 3 水资源管理 ABM 研究展望

### 3.1 拓展复杂适应理论水资源管理应用

对国内外大量文献进行梳理后发现,ABM 理论和方法在流域水资源优化配置、城镇居民用水管理和灌区水资源管理3个方面得到了广泛研究与应用(表2)。虽然复杂适应理论在水资源领域其他方面也有涉及,如工业用水管理<sup>[76]</sup>、供水系统污染事件<sup>[77]</sup>、水污染可视化模拟仿真<sup>[78]</sup>等,但前者研究数量很少,而后两者本质是基于元胞自动机的水污染扩散追踪,即“水质主体”在既定公式下模拟污染浓度变化,因此只是广义上的“活的”主体。然而,ABM 在一些潜在适用的水资源管理热点问题中的应用却相对空白。例如,水权交易价格形成机制实证性研究、分布式水库群联合优化调度、灌区水资源“农业-生活-工业-生态”综合优化配置等,建议未来研究予以拓展。

### 3.2 加强不确定性水资源管理 ABM 研究

水资源系统存在多种不确定性:气候变化、水文条件、供水水量、作物价格等;且这些随机变量之间有着错综复杂的联系。然而,当前水资源管理 ABM 研究大多忽略了这些不确定因素;例如,许多分布式水资源优化配置与调度研究仅在丰、平、枯等典型年份水量下寻优求解。这种基于已知信息建模并制定策略的方法,不但对不确定性缺乏认识,不能完整体现水资源管理的复杂性,也降低了研究成果的有效性和合理性。通过建立不确定条件下的人类-自然耦合模型,综合考虑自然条件不确定性、需水用水不确定性、水资源管理决策不确定性等,才能提高对复杂适应系统不确定性的应对能力。

### 3.3 探索基于机器学习的决策规则建模方法

当前水资源管理 ABM 微观决策规则的建模方法种类繁多,但主要基于方程优化、动力学法、计量回归等传统研究方法,一定程度上可以有效描述主体的行为规律和偏好。但由于主体特征空间大、行为决策影响变量多,且特征与行为间、变量与行为间可能还存在诸多未知非线性关系,难以用方程进行表达。在人工

表2 最近10年(2009—2018年)主要水资源管理ABM研究比较

Table 2 Comparison between the agent-based water resources management models in last decade (2009—2018)

应用地区/流域	研究应用	Agent 类型	主要微观决策内容	微观决策规则	宏观涌现结果	研究人员/时间
伊朗 Fars 省	灌区	两类均有	农户地下水开采	博弈策略、条件逻辑	灌溉需水减少量	Ghazali 等 <sup>[69]</sup> /2018
美国某流域灌区	灌区	两类均有	农户地下水开采	需水模型、历史经验	地下水水位状态	Noel 和 Cai <sup>[67]</sup> /2017
美国 Raleigh 镇	城镇	反应型	居民用水	条件逻辑	供水可持续性	Ali 等 <sup>[60]</sup> /2017
尼罗河流域	流域	思考型	用水区取用水	平行进化算法	总体经济效益	Ding 等 <sup>[53]</sup> /2016
伊朗 Daryan 地区	灌区	反应型	农户地下水开采	博弈策略、条件逻辑	地下水水位高度	Farhadi 等 <sup>[68]</sup> /2016
希腊雅典市	城镇	思考型	居民用水	行为意图方程	平均家庭用水量	Koutiva 和 Makropoulos <sup>[32]</sup> /2016
青岛市	城镇	反应型	居民用水	计量经济、随机模型	居民用水总量	金菊良等 <sup>[56]</sup> /2015
东江流域	流域	两类均有	用水区取用水	多目标遗传算法	多目标综合效益	Zhou 等 <sup>[51-52]</sup> /2015
美国特拉华河口	灌区	思考型	排污权交易	随机模型、经验偏好	河流水体溶氧量	Zechman 等 <sup>[12]</sup> /2015
莫桑比克 Gaza 流域	流域	思考型	损失赔偿议价	角色扮演	用水冲突情况	Cascalho 和 Mabunda <sup>[27]</sup> /2015
漳河流域	流域	思考型	用水区取用水	用水罚函数最大化	整体经济效益	邵玲玲等 <sup>[48]</sup> /2014
智利某河流域	灌区	思考型	田间灌溉用水分配	收入最大化	农业经济增值	Arnold 等 <sup>[73]</sup> /2014
美国某河流域	灌区	思考型	农户地下水开采	利润最大化	环境和社会效益	Mulligan 等 <sup>[72]</sup> /2014
美国阿灵顿市	城镇	反应型	居民用水	条件逻辑	居民用水总量	Kanta 和 Zechman <sup>[35]</sup> /2014
北京市	城镇	反应型	居民用水	计量经济、随机模型	居民用水总量	Yuan 等 <sup>[33]</sup> /2014
漳河流域	流域	思考型	用水区水权交易	多目标方程优化	流域分水方案	王慧敏等 <sup>[54]</sup> /2014
美国圣华金河流域	流域	反应型	用水户博弈策略	条件逻辑	用水冲突缓解度	Akhbari 和 Grigg <sup>[36]</sup> /2013
非洲赞比西流域	流域	两类均有	水电站调度	目标函数最优	系统的帕累托前沿	Giuliani 和 Castelletti <sup>[50]</sup> /2013
美国、荷兰城镇	城镇	思考型	居民用水	启发法、概率模型	平均家庭用水量	Linkola 等 <sup>[63]</sup> /2013
理论研究	流域	思考型	用水户用水、水权交易或理性违规	效用函数最大化	水价、总体经济效益及公平程度	Zhao 等 <sup>[49]</sup> /2013
美国农业地区	灌区	思考型	买方: 交易价格; 卖方: 减排管理	买方: 交易利润最大化; 卖方: 减排成本最小化	水权市场效率	Nguyen 等 <sup>[74]</sup> /2013
太湖流域	流域	思考型	排污权交易	减排总成本最小化	化学需氧量	Zhang 等 <sup>[34]</sup> /2013
摩洛哥 Tensift 平原	灌区	两类均有	灌溉用水调度	灌溉优先总指数最小化	灌区干旱分布	Belaqiz 等 <sup>[75]</sup> /2013
三江平原	灌区	思考型	农业供水量	缺水、供水成本最小化	流域供需水情况	李晨洋和谢丹丹 <sup>[65]</sup> /2013
黄河流域	流域	两类均有	用水区水权交易	用水效益最大化	用水量 and 经济效益	Yang 等 <sup>[47]</sup> /2012
西班牙某灌区	灌区	思考型	作物选择、灌溉	效用函数最大化等	土地变化、取水量	Holtz 和 Pahl Wostl <sup>[70]</sup> /2012
美国某集水区	灌区	思考型	农户经营计划	效用函数最大化	流域水质	Ng 等 <sup>[19]</sup> /2011
巴西某河流域	灌区	思考型	农户取用水	启发法、概率分布模型	供需水反馈结果	van Oel 等 <sup>[66]</sup> /2010
假想流域	流域	思考型	用水区取水量	用水效益罚函数最大化	流域尺度经济效益	Yang 等 <sup>[41]</sup> /2009
西班牙某市	城镇	思考型	居住迁移和用水	动力学模型、计量经济	居民用水总量	Galan 等 <sup>[61]</sup> /2009
北京市	城镇	两类均有	居民用水	计量经济、随机模型	人均每天用水量	Chu 等 <sup>[62]</sup> /2009

智能蓬勃发展的今天,引入机器学习理论与智能算法来刻画和表达复杂适应系统已成为可能,也将是未来发展的趋势。当前已出现个别以机器学习理论为支撑的水资源管理 ABM 研究<sup>[79-80]</sup>,但多基于 Q-Learning 等简单强化学习算法,且由于基础数据匮乏,计算机只能在浅层构架中进行学习。注重各类数据(如水文气候、社会经济、文化属性等)的长期积累工作,探索将深度强化学习、随机森林、支持向量机等算法嵌入 ABM 框架,通过“大数据”挖掘,创新微观决策行为规则是今后研究的重点和难点。

### 3.4 重视参数校准和结果校验及检验方法

ABM 经常被用来模拟水资源管理政策和策略下系统涌现出的整体现象,从而对政策和策略的有效性做出评价;其作用在于“模拟”和“解释”现象<sup>[12]</sup>。但水资源管理 ABM 往往不具备有效预测能力,不能为实际决策者提供价值信息。对复杂适应系统进行预测,需要对多层级上的多变量进行先行预测,且一些行为规则随机性较强(如在关系网络中选择水权交易对象),难以对存在路径依赖的系统行为进行精确预测。今后可以探索预测型 ABM 并服务于水资源管理实践,但这亟需进一步改进 ABM 参数校准、结果校验和检验的方法。

### 3.5 加强模型表述格式标准化进程

与数学模型通过公式和相关推导过程进行表述不同,ABM 需要通过成百上千行计算机语言代码加以实现。这难以完整收录于期刊文献,即使研究人员开放原代码,其实用性也不容易被学界详细审查<sup>[81]</sup>。特别是水资源管理 ABM 建模方法灵活性很强,模型之间差异性很高,造成研究成果可复制性较差。一些学者已经意识到 ABM 标准化设计的重要性,并提出了 ODD(Overview, Design concepts, and Details)这一目前公认度较高的 ABM 通用格式<sup>[82]</sup>,旨在通过一定逻辑顺序规定模型的结构,从而增加研究的可理解性。未来研究应当采用标准模型表述格式,降低模型之间的差异,促进研究人员交流和研究成果比较。

### 3.6 综合权衡水资源管理 ABM 框架

简单化或全面化是构建水资源管理 ABM 的首要问题。一般取决于研究问题本身以及对模型精度、真实性和普适性的具体要求<sup>[83]</sup>。然而在实际操作中,建模者往往面临两难。过于简单化会导致对主体和水资源系统描述的不足,造成模拟结果受到质疑。例如,将水资源系统内某一属性相同的用水主体简单归为一类,假设它们具有相似的行为规则;这忽略了其他特征异质性造成的潜在行为差异,从而可能在完全相同条件下做出截然不同的决策选择。相反,过于全面化面临着计算量过大、数据难以满足等问题。因此,建模者应当以研究具体目标为导向,综合考虑数据等资源条件,构建简化适当的水资源管理 ABM 框架。

## 4 结 语

综观近年来国内外研究成果,水资源管理 ABM 在理论和方法上均弥补了传统研究方法的不足,积极推动了水资源管理科学的长足发展。但基于复杂适应理论的建模方法难以完全取代传统建模方法,作为传统方法的重要补充,二者呈现出不断融合的趋势。特别是将微观主体行为整合进传统的以自然科学研究为主的水资源管理研究框架,不但符合中国从微观到宏观、从局部到整体的水资源规划与管理策略,还有助于揭示最严格水资源管理制度下不同组织尺度的行为规律及反馈,为进一步优化中国水资源管理体制和机制提供理论支撑。

### 参考文献:

- [1] LIU J G, DIETZ T, CARPENTER S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems [J]. Science, 2007, 317 (5844): 1513-1516.
- [2] LIU J G, DIETZ T, CARPENTER S R, et al. Coupled human and natural systems [J]. Ambio, 2007, 36(8): 639-649.
- [3] 赵建世,王忠静,翁文斌.水资源复杂适应配置系统的理论与模型[J].地理学报,2002,57(6):639-647.(ZHAO J S,

- WANG Z J, WENG W B. Theory and model of water resources complex adaptive allocation system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 639-647 (in Chinese)
- [4] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(12): 1496-1502. (WANG H, WANG J H, QIN D Y, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(12): 1496-1502. (in Chinese))
- [5] GRIMM V, REVILLA E, BERGER U, et al. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems; lessons from ecology [J]. *Science*, 2005, 310: 987-991.
- [6] SCHELLING T C. *Micromotives and macrobehavior* [M]. New York: Norton, 1978.
- [7] HOLLAND J H. *Complex adaptive systems* [J]. *Daedalus*, 1992, 121(1): 17-30.
- [8] NIAZI M, HUSSAIN A. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey [J]. *Scientometrics*, 2011, 89(2): 479-499.
- [9] 余强毅, 吴文斌, 杨鹏, 等. Agent 农业土地变化模型研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1690-1700. (YU Q Y, WU W B, YANG P, et al. Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1690-1700. (in Chinese))
- [10] 田光进, 邬建国. 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. (TIAN G J, WU J G. Simulating land use change with agent-based models: progress and prospects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4451-4459. (in Chinese))
- [11] ROUNSEVELL M, ROBINSON D, MURRAY-RUST D. From actors to agents in socio-ecological systems model [J]. *Philosophical Transactions - Royal Society, Biological Sciences*, 2012, 367(1586): 259-269.
- [12] ZECHMAN E. Using agent-based modeling for water resources planning and management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(11): 1-11.
- [13] 全国水资源综合规划技术大纲[Z]. 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2005. (National comprehensive technical guidelines for water resources planning [Z]. Beijing: The General Institute of Water and Hydropower, Ministry of Water Resources, 2005. (in Chinese))
- [14] 赵建世, 王忠静, 翁文斌. 水资源系统的复杂性理论方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (ZHAO J S, WANG Z J, WENG W B. *The complex adaptive theory of water resources systems: methods and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [15] REMONDINO M. Reactive and deliberative agents applied to simulation of socio-economical and biological systems [J]. *International Journal of Simulations: systems(Science & Technology)*, 2005, 6(12/13): 11-25.
- [16] BANDINI S, MANZONI S, VIZZARI G. Agent-based modeling and simulation: an informatics perspective [J]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*, 2009, 12(4): 4.
- [17] BROOKS R A. Elephants don't play chess [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1990, 6: 3-15.
- [18] ZENOBIA B, WEBER C, DAIM W. Artificial markets: a review and assessment of a new venue for innovation research [J]. *Technovation*, 2009, 29: 338-350.
- [19] NG T L, EHEART W, CAI X, et al. An agent-based modeling of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(9): W09519.
- [20] NAUTIYAL S, KAECHHELE H. Natural resources management in a protected area of the Indian Himalayas: a modeling approach for anthropogenic interactions on ecosystems [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2009, 153 (1/2/3/4): 253-271.
- [21] BECKER T, ILLIGEN C, MCKELVEY B, et al. Using an agent-based neural-network computational model to improve product routing in a logistics facility [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 174: 156-167.
- [22] MANSON S M, EVANS T. Agent-based modeling of deforestation in southern Yucatan, Mexico, and reforestation in the Midwest United States [C]//*Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2007, 104(52): 20678-20683.
- [23] SCHREINEMACHERS P. Land-use decisions in developing countries and their representation in multi-agent systems [J]. *Journal of Land Use Science*, 2006, 1: 29-44.
- [24] 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.
- [25] MENA C F, WALSH S J, FRIZZELLE B G, et al. Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: design and implementation of an agent-based model [J]. *Applied Geography*, 2011, 31(1): 210-222.
- [26] AN L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: review of agent-based models [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 25-36.
- [27] CASCALHO J, MABUNDA P. Agent-based modelling for resources management problem in a role-playing game [C]//Portuguese Conference on Artificial Intelligence, EPIA, 2015: 696-701.
- [28] NAINIVIT W, LE PAGE C, TREBUIL G, et al. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25: 1345-1358.
- [29] CASTELLA J C, TRUNG T N, BOISSAU S. Participatory simulation of land-use changes in the Northern Mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-play game, and a geographic information system [J]. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): 27.
- [30] FEOLA G, BINDER C R. Towards an improved understanding of farmer's behavior: the integrative agent-centered (IAC) framework [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69: 2323-2333.
- [31] 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: 1237-1254.
- [32] KOUTIVA I, MAKROPOULOS C. Modeling domestic water demand: an agent based approach [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016, 79: 35-54.
- [33] YUAN X C, WEI Y M, PAN S Y, et al. Urban household water demand in Beijing by 2020: an agent based model [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28: 2967-2980.
- [34] ZHANG Y, WU 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 and Policy*, 2013, 33: 295-307.
- [35] KANTA L, ZECHMAN E. Complex adaptive systems framework to assess supply-side and demand-side management for urban water resources [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(1): 75-85.
- [36] AKHBARI M, GRIGG N S. A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27: 4039-4052.
- [37] LATANE B. The psychology of social impact [J]. *American Journal of Psychology*, 1981, 36: 343-365.
- [38] NAVARRO D J, GRIFFITHS T L, STEYVERS M, et al. Modeling individual differences using Dirichlet processes [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2006, 50(2): 101-122.
- [39] 陈太政, 候景伟, 陈准. 中国水资源优化配置定量研究进展[J]. *资源科学*, 2013, 35(1): 132-139. (CHEN T Z, HOU J W, CHEN Z. Quantitative studies of the optimization allocation of water resources in China: a review [J]. *Resources Science*, 2013, 35(1): 132-139. (in Chinese))
- [40] ANGHILERI D, CASTELLETTI A, PIANOSI F, et al. Optimizing watershed management by coordinated operation of storing facilities [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139(5): 492-500.
- [41] YANG Y C, CAI X, STIPANOVIC D M. A decentralized optimization algorithm for multiagent system-based watershed management [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45: W08430.
- [42] TIMMERMAN J, LANGAAS S. Water information: what is it good for? The use of information in transboundary water management [J]. *Regional Environmental Change*, 2005, 5(4): 177-187.
- [43] 徐士忠. 漳河上游水事纠纷的现状、存在问题与对策研究[J]. *海河水利*, 2007(2): 10-13. (XU S Z. The current situation, problems and countermeasures of water disputes in the upper reaches of Zhanghe [J]. *Haihe Water Resources*, 2007(2): 10-13. (in Chinese))
- [44] 王慧敏, 佟金萍, 冯小平, 等. 基于 CAS 范式的流域水资源配置与管理及建模仿真[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 12: 118-124, 137. (WANG H M, TONG J P, FENG X P, et al. Complex adaptive system (CAS)-based allocation and management of river basin water resources [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2005, 12: 118-124, 137. (in Chinese))
- [45] 马贞立, 李臣明, 徐立中. 跨流域调水管理多 Agent 仿真环境模型[J]. *水利学报*, 2007(10): 288-292. (MA Z L, LI C M, XU L Z. Multi-agent simulation environment model in water diversion across river basins management [J]. *Journal of Hydraulics*

- lic Engineering, 2007(10): 288-292. (in Chinese))
- [46] 丁威. 基于 Multi-agent 理论的多湖连通水资源优化配置和调度[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (DIND W. Water resources optimal allocation and dispatch based on multi-agent theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [47] YANG Y E, ZHAO J, CAI X. Decentralized optimization method for water allocation management in the Yellow River basin [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138: 313-325.
- [48] 邵玲玲, 牛文娟, 唐凡. 基于分散优化方法的漳河流域水资源配置[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2029-2037. (SHAO L L, NIU W J, TANG F. Decentralized optimization method for water resources allocation in the Zhang River basin [J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2029-2037. (in Chinese))
- [49] ZHAO J, CAI X, WANG Z. Comparing administered and market-based water allocation systems through a consistent agent-based modeling framework [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 123: 120-130.
- [50] GIULIANI M, CASTELLETTI A. Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources system by agent-based optimization [J]. Water Resources Research, 2013, 49: 3912-3926.
- [51] ZHOU Y, GUO S, XU C Y, et al. Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management: I: methodologies [J]. Journal of Hydrology, 2015, 531(3): 964-976.
- [52] ZHOU Y, GUO S, XU C Y, et al. Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management: I: case study [J]. Journal of Hydrology, 2015, 531(3): 977-991.
- [53] DING N, ERFANI R, MOKHTAR H, et al. Agent based modelling for water resources allocation in the transboundary Nile River [J]. Water, 2016, 8(4): 139.
- [54] 王慧敏, 于荣, 牛文娟. 基于强互惠理论的漳河流域跨界水资源冲突水量协调方案设计[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(8): 2170-2177. (WANG H M, YU R, NIU W J. Water resources allocation coordination program design of Zhanghe river basin transboundary water resources conflicts based on strong reciprocity theory [J]. System Engineering Theory and Practice, 2014, 34(8): 2170-2177. (in Chinese))
- [55] BIERKENS P. Global hydrology 2015: state, trends and directions [J]. Water Resources Research, 2015, 51: 4923-4947.
- [56] 金菊良, 崔毅, 张礼兵, 等. 基于多智能体的城镇家庭用水量模拟预测分析[J]. 水利学报, 2015, 46(12): 1387-1397. (JIN J L, CUI Y, ZHANG L B, et al. Simulation and prediction analysis of urban household water demand based on multi-agent [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(12): 1387-1397. (in Chinese))
- [57] 张志果, 邵益生, 徐宗学. 基于恩格尔系数与霍夫曼系数的城市需水量预测[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1304-1309. (ZHANG Z G, SHAO Y S, XU Z X. Prediction of urban water demand based on Engel Index and Hoffmann Coefficient [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1304-1309. (in Chinese))
- [58] 钟方雷, 郭爱君, 蒋岱位, 等. 面向需水管理的居民用水行为研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 446-454. (ZHONG F L, GUO A J, JIANG D W, et al. Research progress regarding residents' water consumption behavior as relates to water demand management: a literature review[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 446-454. (in Chinese))
- [59] MA Y, SHEN Z, KAWAKAMI M, et al. An agent-based approach to support decision-making of total amount control for household water consumption [M]. Geospatial Techniques in Urban Planning. Berlin: Springer, 2012: 107-128.
- [60] ALI A M, SHAFIEE M E, BERGLUNG E Z. Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: climate, population growth and water shortages [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 28: 420-434.
- [61] GALAN J M, LOPEZ-PAREDES A, OLMO R. An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W05401.
- [62] CHU J, WANG C, CHEN J, et al. Agent-based residential water use behavior simulation and policy implications [J]. Water Resources Management, 2009, 23: 3267-3295.
- [63] LINKOLA L, ANDREWS C J, SCHUETZE T. An agent based model of household water use [J]. Water, 2013, 5: 1082-1100.
- [64] 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 等. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 287-295. (QI X B, HUANG Z D, QIAO D M, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 287-295. (in Chinese))

- [65] 李晨洋, 谢丹丹. 基于复杂适应理论的农业水资源优化配置: 以三江平原为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 296-299. (LI C Y, XIE D D. Optimal allocation of agricultural water resources based on the complex adaptive system theory: a case study of the Sanjiang Plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 296-299. (in Chinese))
- [66] van OEL 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 and Software, 2010, 25: 433-443.
- [67] NOEL P H, CAI X. On the role of individuals in models of coupled human and natural systems: lessons from a case study in the Republican River basin [J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 92: 1-16.
- [68] FARHADI S, NIKOO M R, RAKHSHANDEHROO G R, et al. An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: a case study [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 348-358.
- [69] GHAZALI M, HONAR T, NIKOO M R. A hybrid TOPSIS-agent-based framework for reducing the water demand requested by stakeholders with considering the agents' characteristics and optimization for cropping pattern [J]. Agricultural Water Management, 2018, 199: 71-85.
- [70] HOLTZ G, PAHL WOSTL C. An agent-based model of groundwater over-exploitation in the Upper Guadiana, Spain [J]. Regional Environmental Change, 2012, 12: 95-121.
- [71] CASTILLA-RHO C, MARIETHOZ G, ROJAS R, et al. An agent-based platform for simulating complex human-aquifer interactions in managed groundwater systems [J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 73: 305-323.
- [72] MULLIGAN K B, BROWN C, YANG Y E, et al. Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling [J]. Water Resources Research, 2014, 50: 2257-2275.
- [73] ARNOLD R T, TROOST C, BERGER T. Quantifying the economic importance of irrigation water reuse in a Chilean watershed using an integrated agent-based model [J]. Water Resources Research, 2014, 51: 648-668.
- [74] NGUYEN N P, SHORTLE J S, REED P M, et al. Water quality trading with asymmetric information, uncertainty and transaction costs: a stochastic agent-based simulation [J]. Resource and Energy Economics, 2013, 35: 60-90.
- [75] BELAQZIZ S, FAZZIKI A E, MANGIAROTTI S, et al. An agent based modeling for the gravity irrigation management [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 804-813.
- [76] 黄家伟. 基于 Agent 的复杂水资源系统仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (HUANG J W. A study of agent-based simulation in complex water resources system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [77] SHAFIEE M, ZECHMAN E M. An agent-based modeling approach to evaluate protective action strategies in a water distribution contamination event [C]//Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, 2012: 276-282.
- [78] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于元胞自动机与智能体的水污染可视化模拟仿真[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 213-220, 227. (LI W Q, XIE J C, LI J X, et al. Visualization simulation of water pollution based on cellular automata and intelligent agent [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science), 2013, 41(3): 213-220, 227. (in Chinese))
- [79] NI J J, LIU M H, REN L, et al. A multiagent Q-learning-based optimal allocation approach for urban water resource management system [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(1): 204-214.
- [80] RIEKER J D, LABADIE J W. An intelligent agent for optimal river-reservoir system management [J]. Water Resources Research, 2012, 48: W09550.
- [81] GRIMM V, BERGER U, DEANGELIS D, et al. The ODD protocol: a review and first update [J]. Ecological Modelling, 2010, 221: 2760-2768.
- [82] GRIMM V, BERGER U, BASTIANSEN F, et al. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models [J]. Ecological Modelling, 2006, 198: 115-126.
- [83] 陆志翔, Yongping Wei, 冯起, 等. 社会水文学研究进展[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 772-783. (LU Z X, WEI Y P, FENG Q, et al. Progress on socio-hydrology [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 772-783. (in Chinese))

## Progress of Agent-based modeling for water resources management: a review\*

LIAN Jijian<sup>1</sup>, XU Ziyao<sup>1,2</sup>, BIN Lingling<sup>1</sup>, XU Kui<sup>1</sup>, CHAN Hoi Yi<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *Comprehensive Development and Management Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;*

3. *College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA*)

**Abstract:** Agent-based modeling (ABM) has enriched the theory and methods of research in water resources management. Better understanding of the state-of-the-art of ABM and its potential in the field of water resources management can promote institutional development and reform in China's water resources management system. In this paper, while ABM of water resources management (WR-ABM) is defined, its key components—agent decision rules and agent interactions—are identified and their modeling approaches are summarized. Various WR-ABMs applied in basin-scale optimal water allocation, urban household water use and agricultural water management published during the period of 2009—2018 are carefully reviewed. Future research on the use of WR-ABMs that should address the challenges and weakness in the water resources management are discussed and several research directions are recommended herein: ① further expanding the use of complex adaptive system theory in the field of water resources management; ② coupling ABM and water resources system models that include uncertainties; ③ exploring the use of machine learning algorithms in the decision-making modeling; ④ improving the methods used in the model parameter calibration, result verification and validation; ⑤ using standard documentation protocol, such as the ODD protocol, for the description of models; and ⑥ achieving comprehensive and optimal balance between completeness and simplification in model design.

**Key words:** complex adaptive system; water resources system; water resources management; agent-based models

---

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0401905) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51809192).