

行为经济与自然过程耦合视角下的 水资源复杂系统建模研究

闫猛¹, 杜二虎², 王宗志³, 张倩^{4,5,6}, 吴锋^{4,5,6}

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055;
3. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在水资源供需矛盾日益严峻的形势下, 如何动态刻画变化环境下个体与群体的用水行为响应与系统演化路径, 建立有效的适应性管理策略已成为水资源管理者和研究者普遍关注的问题。在梳理了国内外水资源适应性管理模型的研究进展的基础上, 以密云水库流域上、下游用水主体的竞争与优化配置建模为例, 解析了不同气候条件下农业水资源利用主体的响应行为模式, 设计了从微观个体用水行为适应自然变化过程模拟宏观流域系统演化的建模技术路线。提出耦合农村与城市的水资源配置模型框架, 系统评估了多智能体建模仿真工具现状, 遵循多智能体的 ODD 协议与粒子群优化算法, 构建了气候变化情景下农户自适应用水行为模型, 为多智能体模型在耦合系统建模、流域尺度的水资源优化配置、适应性管理决策分析提供了借鉴依据。

关键词: 水资源; 配置; 多智能体; 用水行为; 复杂系统

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0053-08

Modeling for the water resource complexity system coupling behavioral economics and natural process

YAN Meng¹, DU Erhu², WANG Zongzhi³, ZHANG Qian^{4,5,6}, WU Feng^{4,5,6}

(1. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Center for Chinese Agricultural Policy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 6. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Contradiction between supply and demand of water resource is increasingly severe. How to characterize individual and group water use behaviors and establish effective adaptive management strategies have become the common concerns of water managers and researchers. In this paper, we briefly introduce the agent-based modeling from the perspective of the theoretical methods and technical tools. We then take water resource use that transferring from agricultural to non-agricultural sectors in Miyun Reservoir Basin as a case, analyze the response behavior patterns of agricultural water resources utilization subjects under different climatic conditions, and proposed an adaptive agricultural water use model in accordance with ODD protocol, which established a roadmap from watershed system at the macro-level to individual water use behaviors at the micro-level. The proposed model includes the framework of water resource allocation model coupling human-natural system and highlights the rural-urban linkage, which provides a decision analysis tool to optimize water resource allocation for a watershed.

Key words: water resource; allocation; multi-agent-based modeling; water use behavior; complex system

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671526, 71774151)

作者简介: 闫猛(1993-), 男, 陕西咸阳人, 在读硕士研究生, 研究方向为多智能体模型应用研究。

通讯作者: 吴锋(1980-), 男, 河北张家口人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事农业政策模拟与仿真研究。

1 研究背景

随着人口增加与经济社会快速发展,人类活动影响水文水资源过程的范围和强度逐渐增加,人与自然相互作用关系日趋紧密。目前人类对自然资源的利用超出其更新能力的 20%,如果各国政府再不进行干预,2030 年后人类的整体生活水平将会下降^[1]。中国作为世界上最大的发展中国家,水资源的稀缺程度尤为突出,作为全球 21 个贫水和最缺水的国家之一,人均淡水占有量仅为世界人均的 1/4^[2]。同时随着人口增长、工业化和城市化进程的加快,使得水资源供应不足与用水短缺等问题制约着经济社会可持续发展^[2-5]。行为经济学融合了传统经济学模型中人理性行为的假设,将心理学、社会学与主流经济学理论结合起来研究人的“非理性”经济行为。人的决策行为存在理性与非理性,目前资源消耗的社会经济系统模型多为理性模型。资源稀缺导致的社会经济发展滞缓现象会随着人类利用行为调控与自然过程变化的适应而得到扭转,因此,开展水资源稀缺区的水资源优化配置与适应性管理是促进区域可持续发展的重要方式。

揭示自然过程与社会经济系统交互机制、耦合规律与互馈效应是优化调控人类水资源利用方式、提高水资源利用效率与生产力的科学决策基础。水资源系统工程科学提供了研究水资源系统的方法论^[6],其中实用性与可行性的主要研究方法为优化模拟^[7],从集中式和分布式两类建模方式刻画水资源复杂系统^[8]。集中式建模是资源总量控制约束的自上而下过程,例如用系统动力学方法分析水资源复杂系统,但很难厘清系统内部要素之间的竞争与影响关系^[9],分布式建模是用水主体自下而上联系聚集的过程,该过程对于探究水资源系统要素间的相互作用以及揭示人类用水与自然水文过程规律之间的关系方面具有独特优势^[10]。多智能体计算模型以计算机科学、生态学和社会学基础理论为依据,基于多智能体理论方法仿真水资源复杂系统在我国水资源领域探索应用已有十多年时间^[11],但受用水主体规则数据缺乏制约未能广泛应用于水资源管理实践。随着大数据技术与信息共享机制发展,提炼人类行为规则研究得到了快速进步,采用多智能体模型理论研究水资源复杂系统的配置与管理成为了研究热点^[12]。

实现自然过程与人类社会经济行为的时空耦合是水资源复杂系统研究的发展方向。目前将多智能

体用于水资源复杂系统的研究更多关注于社会经济方面,而缺乏自然过程方面模型的耦合,包括农民灌溉用水行为研究^[13-14]、水资源交易市场研究^[15-16]、污水排放配额研究^[8,17]、城市居民用水行为研究^[18-21]、城市用水管理研究^[22-23]和城乡用水冲突研究^[15,24]等方面。目前研究中主要通过基于规则和目标优化两种方式对多智能体行为进行刻画,例如在双向拍卖的水权交易研究中,通过设置农民的灌溉和竞价规则揭示农民行为与水资源市场的关系^[16]。在漳河流域水资源冲突研究中,通过设置用水主体的经济效益和社会效益目标确定最优的政府用水政策^[15]。以多智能体为中间件技术耦合自然过程产水与社会经济系统用水规律,但统筹城乡用水主体行为的研究较少,也缺乏在保留经验规则的同时寻求策略最优的研究方法。本文以密云水库流域上、下游用水主体竞争与优化配置系统模拟的需求,设计了密云水库流域农村和城市水资源配置模型框架,以农户适应变化环境下的用水行为模拟为例,在耦合水文过程基础上保留了农民经验规则与寻优的耕种策略,重点阐述了农户用水适应优化的模拟仿真过程。

2 多智能体模型理论及仿真工具

2.1 多智能体的理论方法

多智能体是研究复杂适应系统的主要手段。复杂适应系统理论将宏观系统的复杂性归结为微观主体的适应性,主体的适应性是主体与环境交互过程中不断“学习”或“积累经验”,并根据学到的经验改变自身结构和行为方式^[25]。多智能体模型通常由主体、主体间关系和环境 3 个基本要素组成。其中主体属性用于标识自身状态,主体的行为通常由逻辑和数学语句组成的规则描述,主体可以具有移动和学习等高级行为,但这些行为并非构建一个多智能体模型的必要条件^[26]。通常用 IF - THEN 规则描述主体间的关系,主体随着离散的时间节点模拟真实系统,重复地评估行为规则,产生新的行为,更新主体的状态特征。主体所依存的环境为它们提供了资源和信息,这些资源和信息通过主体与环境的相互作用来流通。

人类行为刻画是多智能体建模的关键。人类作为多智能体常见的刻画对象,其行为上存在差异,并且有着不同的目标、信念与理性程度等,这些因素增加了人类行为模型构建的难度。理解人类如何决策或适应环境变化以及如何将其行为规则应用于实践尤为重要^[27],目前已有多种人类行为决策模型用作

多智能体中人类主体行为的刻画^[28]。常见的人类行为决策模型如表 1 所示,依据实际情况和应用范围进行选择,例如由于数据不足或者缺乏理论支撑,可选择经验/偏好模型或假设检验模型。

表 1 常见的人类行为决策模型

行为模型	应用范围	备 注
微观经济学模型	资源相关	在可选方案集中选择效用值最佳的方案
空间理论模型	位置相关	空间地理信息成为影响决策的主要因素
社会心理及认知模型	社会关系	人类记忆、学习和创新等思想因素所产生的净效应
机构模型	法律政策	人类行为受区域的法律政策等因素影响
经验/偏好模型	逻辑模糊	通过观察数据和现象等提出简单直接的经验法则
启发式规则模型	逻辑模糊	基于数据处理/挖掘,如神经网络、决策树等
进化算法模型	逻辑模糊	受进化论“适者生存”启发而提出的遗传算法
假设检验模型	逻辑模糊	缺乏数据和理论支撑,提出假设规则后进行结果评估

注:逻辑模糊是指难以用公式表达或梳理推论的问题。

2.2 多智能体模拟工具

多智能体建模仿真过程是计算机语言的实例化。计算机程序设计从解译识别的 0-1 到汇编语言再到结构化的面向过程以及如今的面向对象,计算机语言向着人类更易理解的方式演进。多智能主体本身具备面向对象的思想,尽管主体还具备一些如自主、学习和目标等高级特性,但面向对象编程仍是多智能体模拟仿真的最佳范式。多智能体的广泛应用使得许多模拟工具应运而生,现阶段用于多智能体的模拟软件工具多达 85 种^[29],本文梳理了一些常用于地理信息和社会经济领域的模型软件(表 2)。

多智能体模型涉及要素众多,这为完整描述一

个具体多智能体模型增加了困难,为此许多经验丰富的建模者制定了一系列专用于描述多智能体模型的标准,即 ODD (Overview, Design concepts, Details)^[30]。ODD 中研究区概述(Overview) 通常包括研究目的、研究对象及其状态变量、研究的时空尺度和流程等内容; ODD 中的设计概念(Design concepts) 是衔接具体的多智能体模型与复杂适应系统理论的桥梁,设计概念提供了一套标准方式用来测度多智能体模型中主体的特征,但是在一个具体的模型中并非要回答设计概念的全部特征; ODD 中的详述(Details) 包括模型数据的初始化、数据输入和子系统的详细阐述。

表 2 常用多智能体模拟工具

ABMS 工具	编码语言(API)	应用范围及领域
NetLogo	NetLogo	教育科研、自然社会科学
Repast	Java / C ++ / C# / python	社会科学、地理信息和其他复杂适应系统等
MASON	Java. net	社会科学、物理模拟、人工智能和机器人等
Swarm	Java / Objective - C	社会生物科学、供应链优化、分布式计算等
StarLogo	Java / YoYo	教育、社会自然科学、描述分布式模型行为
OBEUS	Microsoft. NET Framework	地理自动机(GAS)、城市或区域规划
AgentSheets	Java	社会科学教学工具、数学、自然科学等
AnyLogic	Java	制造模拟、商业策略、交通运输、社会经济等
Ascape	Java	社会科学、进化生命游戏、经济社会、政治等
MASS	Java	复杂社会经济系统、交通情形模拟
Mathmatica	Wolfram / C / C ++ / Java	社会和经济行为模拟,复杂适应社会系统等
SimAgent	Prolog / Lisp / Standard ML	科研、教育、社会科学以及进化计算等
Cormas	Smalltalk	可再生自然资源模拟、地理信息、市场经济等
Envision	C ++	地理信息系统、自然资源、环境等
GAME	GAML	空间信息模拟、土地利用、社会经济等
Insight Maker	JavaScript	动态系统模拟、疾病传播等
MATSim	Java	交通运移系统、地理空间系统等

3 密云水库流域水资源系统建模及分析

3.1 密云水库流域上下游水资源复杂系统设计

密云水库流域水资源压力较大,为保障流域下游工业生产与城镇生活用水上游农业生产进行了调控。华北地区是我国水资源短缺矛盾最为严重地区之一,也是区域经济发展不平衡较为突出的地区^[31]。该区域以占据不到全国 1% 的水资源承载了全国 8% 的人口和 11% 的经济总量,同时也是国家重要的粮食主产区^[32]。为了保障北京用水,1999–2005 年密云水库流域上游的承德市水田面积压缩到 $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,造成直接经济损失达 4.0×10^9 元。同时,占密云水库总水量的 50% 以上的上游张家口市赤城县,实施的“退稻改旱”工程年节水 $52 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成直接经济损失占据全县年财政收入的 $1/3$,但却保障了北京市 1.35×10^6 城镇居民的生活用水^[33]。2016 至 2020 年,北京市财政每年在市发展改革委部门预算中安排 72.1×10^6 元,用于北京市支持河北省张承地区发展农业节水项目补助资金,如何在提升流域社会总效益的同时降低上游农业生产的损失是跨行政区政府或水资源管理者需要思考和解决的现实问题。

密云水库流域水资源复杂系统建模流程涉及农村、城市和政府(水库)3 个子系统之间的相互影响和时间调度。依据密云水库流域上下游相关用水主体,划分的研究对象有农民、政府(水库)和城市居民,并将三者之间的交互流程概述为 4 步(图 1)。第 1 步政府根据自然过程水文模型模拟水库库容量的动态变化趋势,权衡本年度城市居民、农村和生态用水的比重,决定水量分配,主要调控行为是农民旱地补贴、用水价格和节水器具补助以及政策约束;第 2 步农民根据自己和周围邻居去年的平均亩收入情况及今年政府的旱地补助金额,决定土地耕种结构;第 3 步政府根据水库水量的动态变化确定城市的最佳供水量,城市居民选择相应室内室外用水行为;第 4 步政府根据农民收益、城市居民用水满意度和生态指标评估社会总效益。

依据研究主体的差异,对涌现的理解具有层次性,如果只关注农业生产与农民行为之间的关系,则农业部门的效益就是研究的系统属性(涌现特征),而在一个农村与城市的耦合系统中,农村和城市的社会总效益即为研究的系统属性。主体适应性表现为政府根据城市水资源短缺的状况,实行农业用水向非农业用水转移的调控措施、水权交易方式、补贴

措施。农业用水缩减的情况下,农户采取种植结构调整与灌溉节水技术;农民根据周围其他人的收益状况和自己的“经验”,决定今年的种植结构。城市居民根据水资源的供给变化,改变室内室外的用水行为,如中水回用、节水器具、淋浴时间与生活行为的调整。农户与城镇居民都展示了主体学习能力,同时政府根据往年政策实施的效果,出台旱地补助金额与用水价格调整等调控行为,政府主体调控目标包括农业生产效益和城市用水满意度。模型详述即数据的初始化、数据输入和子系统的详细阐述,本文重点以农户系统为例解析多智能体模型的构建方法,对变化环境下密云水库流域上游农户自适应用水行为模型的构建进行详述(图 2)。

变化环境下农业适应性行为逻辑解析是多智能体模型的关键。农民的差异性行为参数包含了旱地占总耕种面积比 μ (表示农民土地结构耕种的差异性)、敏感因子 α 、学习因子 β 和信息半径 r (表 3)。仿真模拟的第 1 步是农民行为参数初始化,本研究用蒙特卡洛方法对农民行为参数进行初始化;第 2 步农民依据 μ 确定水稻和玉米的耕种面积,根据每天的气象条件确定灌溉用水量,每天的用水量分为两种情况:一种是灌溉用水量无限制,即作物在没有水分胁迫的情况下充分生长,另一种是灌溉用水量有限制,该情形下设定农民优先灌溉水稻;第 3 步农民根据农作物产量、作物价格和政府的旱地补贴确定本年度自己的收益;第 4 步农民确定一定范围内周围邻居的平均亩收入状况;第 5 步农民向平均亩收入优于自己的农民学习,更新本年度土地耕种结构。农户的适应性行为规则的目标是收入。 I_t 为当前农民去年的平均亩收入, $I_{t,i}$ 为第 i 个农民去年的平均亩收入, $I_{t,r}$ 为信息半径 r 内农民去年的平均亩收入; μ_t 为去年农民的旱地占比, μ_{t+1} 为当前年份农民的旱地占比, $\mu_{t,i}$ 为信息半径 r 范围内去年平均亩收入大于等于 I_t 农民旱地占比的平均值, $\mu_{t,r}$ 为信息半径 r 范围内去年平均亩收入大于 I 农民旱地占比的平均值; $P(I_{t,r} > I_t)$ 为在信息半径 r 范围内,任意农民平均亩收入大于当前农民平均亩收入概率(表 4)。决策规则通过表 4 中的 3 个公式表达,公式(1)表示有邻居平均亩收入明显高于自己时向其学习;公式(2)表示当邻居中平均亩收入高于自己的人数达到一定比例时向其学习;公式(3)表示延续自己去年的耕种策略,采取该策略的农民一种是因为信息半径太小或敏感因子太大导致无法及时地调整自己的耕种策略,另一种是该农民本身就是“优势主体”。

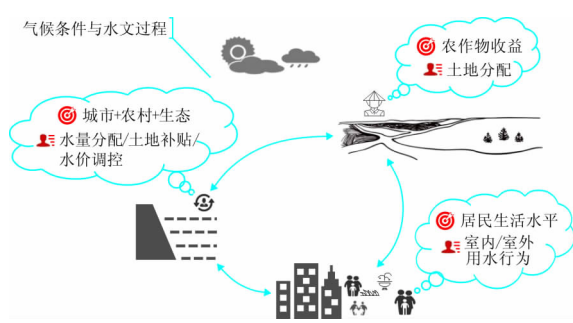


图 1 密云水库流域用水主体行为关系

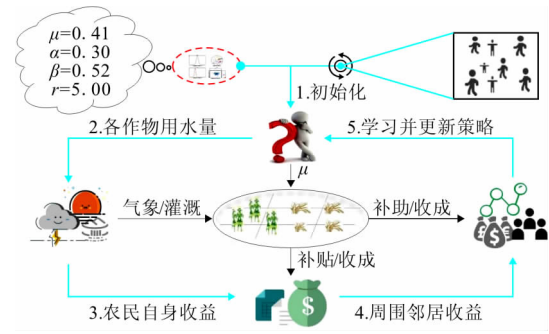


图 2 农户自适应用水行为模型流程

表 3 农民行为参数

行为参数	表示意义
旱地占比 μ	旱地耕种面积占农户总耕种面积的百分比,取值范围为 $[0, 1]$ 。
敏感因子 α	农户调整自身行为策略时周围邻居中高于自身平均亩收入时的比例。
学习因子 β	农户的学习能力,值为 1 表示毫无保留地学习,取值范围为 $[0, 1]$ 。
信息半径 r	影响农户行为的邻居范围,可以用地理空间表示,也可以通过数量表示。

表 4 农民土地耕种行为策略

IF	THEN
$\exists I_{t,i}, (I_{t,i} > 4\alpha \cdot I) \ \& \ (I_{t,i} > I_t)$	$\mu_{t+1} = \mu_t + \beta \cdot (\mu_{t,i} - \mu_t)$ (1)
$P(I_{t,r} > I_t) > (0.5\alpha)$	$\mu_{t+1} = \mu_t + \beta \cdot (\mu_{t,r} - \mu_t)$ (2)
$P(I_{t,r} \leq I) \leq (0.5\alpha)$	$\mu_{t+1} = \mu_t + \beta \cdot (\mu_t - \mu_{t-1})$ (3)

注:公式(1)的“4”和公式(2)的“0.5”表示不同情况的敏感度系数,例如公式(2)中的“0.5”表示若 $\alpha = 1$ 时,周围邻居有一半(0.5)平均亩收入高于自己时,向高于自己收入的农民学习。

3.2 密云水库流域上游农户用水自适应行为模型验证分析

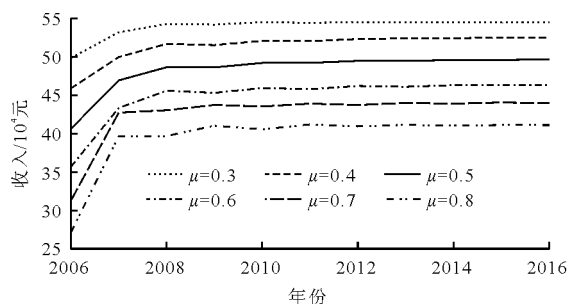
密云水库流域上游农户种植行为直接影响流域的水资源配置。本研究在梳理农户智能体模型建模逻辑的基础上以密云流域上游农业用水主要地区(赤城县、丰宁县和滦平县)的 150 户农民为研究对象进行水资源利用优化仿真模拟。调研区每户农民水稻与玉米的耕地总面积在 0.23 ~ 0.33 hm² 间,2006 – 2016 年农户的生产状况基于调研规则分析进行了模型化。本子系统模型的目的是探究水资源“稻改旱”政策对农民生产的影响。首先应考虑的是灌溉用水量无限制条件下农民行为的生产效应,本文就该情境下单一行为因素对农业生产的影响进行了模拟验证。仿真结果符合实际,水量充足的条件下水稻的收益高于玉米,因此灌溉水量无限制时该地区的耕种作物应主要以水稻为主,这是检验多智能体模型是否合理的基本依据,同时本文并未考虑作物种子和化肥价格变化以及家庭结构对农民耕种行为的影响。

研究设置不同的参数情景模拟分析了农民收入与灌溉用水量的变化。情景 1 设定敏感因子、学习因子和信息半径 ($\alpha = 0.8, \beta = 0.5, r = 5$),研究不同的旱地占比对农业收入的影响(图 3(a)),其中横坐标为年份,纵坐标为 150 个农户的耕种总收入,农民通过调整旱地占比来增加收入,所有收入曲线最后趋于平稳的同时存在差异,这说明农民学习调整耕种结构的能力有限,最终的收益会受最初的种植结构影响。图 3(b)为情景 1 中旱地占比 $\mu = 0.5$ 时,作物灌溉用水量以及降雨随时间的分布,其中横坐标为年份,纵坐标分别为灌溉用水量和降雨量,由图 3(b)可以看出降雨量与作物灌溉量存在明显的相关性,随着时间推移,水稻与玉米水量消耗比例变化较小,这表明耕种结构已经趋于平稳。情景 2 设定旱地占比、学习因子和信息半径 ($\mu = 0.5, \beta = 0.5, r = 5$),研究不同的敏感因子对农民收入的影响(图 3(c)),由图 3(c)可知农民的收入随着敏感因子变小而增加,这表明及时调整种植策略通常会使得农民收益增加,但降雨量的迅速变化也影响农

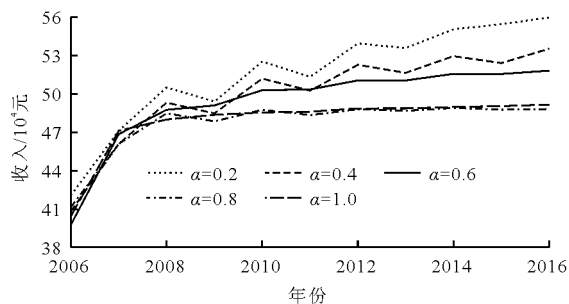
民收入,此时频繁调整耕种策略反而会降低农民收益。例如 2008 年充足的雨量使得水稻耕种面积大的农户获得更多的收益,但 2009 年降雨量迅速减少使得水稻总产量下降,如图 3(c)中 $\alpha = 0.4$ 和 $\alpha = 0.6$ 敏感因子较大的农户未在 2009 年及时调整耕种策略反而取得更高的收益。图 3(d)是图 3(c)中敏感因子 $\alpha = 0.2$ 的情况,与图 3(b)比较可以发现敏感因子的减小使得作物灌溉用水量明显上升,同时可以发现玉米灌溉用水占比逐渐减少,这表明水稻逐渐成为该地区的主要农作物。

情景 3 主要模拟农民学习行为的影响。图 4(a)为其他行为参数一定的条件下 ($\mu = 0.5$, $\alpha = 0.6$, $r = 5$),不同的学习因子 β 对农民收入的影响。图 4(a)表明农民收益随学习因子增大而增加,同时当学习因子为 1 时,即“非常谦虚”地向周围农户学

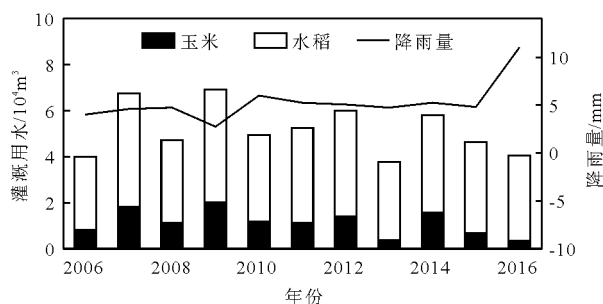
习时能取得较好的收益结果。情景 4 探究信息半径与总体收益的关系。图 4(b)是在图 4(a)情况下学习因子 β 为 1 时信息半径对农民收入的影响,图 4(b)表明信息半径大的农民开始会取得相对较好的收益结果,但随着时间推移其收益却低于信息半径较小的农民,例如图 4(b)中在 2012 年以前, $r = 7$ 时的农民相较于 $r = 3$ 时的农民在收入上占有优势,但在 2012 年以后却恰恰相反,这种现象出现的原因是农民在较大范围内毫无保留地向他人学习时会过早地陷入收入上的局部最优,这从图 4(b)中 $r = 9$ 和 $r = 7$ 时农民收入趋于平稳可以体现。至此,本文在农村与城市水资源配置与管理模型框架下,以密云水库流域上游农业用水智能体模拟建模为研究对象阐述了模型建模与结果验证工作。



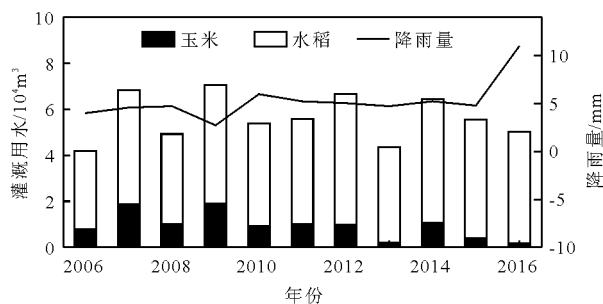
(a) 旱地占比对农业收入的影响



(c) 敏感因子对农业收入的影响

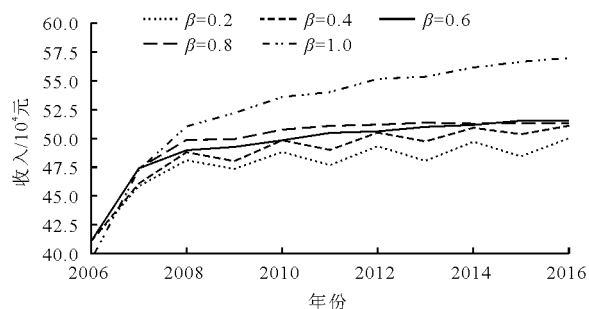


(b) 情景1中旱地占比为0.5时作物灌溉用水量及降雨量分布

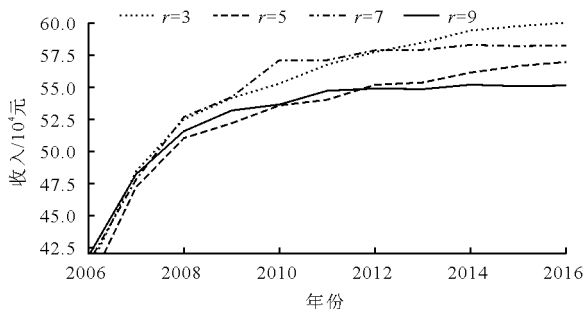


(d) 情景2敏感因子为0.2时作物灌溉用水量及降雨量分布

图 3 旱地占比 μ 和敏感因子 α 的生产效应



(a) 学习因子对农业收入的影响



(b) 信息半径对农业收入的影响

图 4 学习因子 β 和信息半径 r 的生产效应

4 结 论

本文以复杂适应系统理论为基础,从理论方法和技术工具两方面介绍了基于多智能体模拟水资源复杂适应系统的研究进展与设计思路。研究提出了从系统属性到个体行为建模的方法路线,为多智能体在流域水资源优化配置与适应性管理的研究提供了科学借鉴。其主要工作与结论如下:

(1) 针对密云水库流域上下游的用水矛盾与水资源优化配置问题,遵循建立多智能体模型的 ODD 框架协议,提出了农村与城市耦合的水资源配置与适应性管理建模框架,构建了变化环境下农民用水自适应行为模型。

(2) 基于多智能体模型仿真模拟刻画水资源复杂系统不同于简单数理统计和逻辑推理方法,该方法关注的是事物之间的相互影响、主体的学习适应能力与系统层级的优化。本研究借鉴启发式粒子群优化算法思想,使刻画变化环境下农民种植适应行为具备经验规则和策略寻优两种特点,并在农业用水量无限制的情景下,进行农民行为分析与模型结果验证。

(3) 水资源系统的复杂性要求自然过程模型和社会经济模型耦合来提供更为丰富的研究视角。人类对赖以生存的水资源需求不断增加扰动了自然水文过程,反之自然水文过程的变化也影响了人类的生活方式与生产行为,水资源成为耦合自然过程与社会经济系统的中间件。本文在农户自适应用水行为模型中不仅描述了气象和水文因素下农作物生长的自然过程,而且刻画了农户通过“学习”寻求自身经济收益增长的行为,用农户智能体作为自然过程与经济过程的契合点。本研究用蒙特卡洛方法初始化农户主体,用世界农粮组织提供的农作物需水模型^[34]描述农作物的自然生长过程,粒子群体中的粒子通过跟踪自身和周围两个“极值”更新速度与位置以促进群体运动从无序到有序的演化,农业生产中农户通过观察自己与邻居的收入状况更新耕种策略,表现出自适应的农业生产活动,与前者不同的是后者关注的是农民自身行为对寻求经济收益最优过程的影响。这种基于自然过程构建的多智能体模型更具有实际意义,为探究水资源复杂系统更为普遍的演化规律提供了思路。

参考文献:

[1] VOEROESMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M

O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555 - 561.

[2] 王 熹, 王 湛, 杨文涛, 等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. *环境工程*, 2014, 32(7): 1 - 5.

[3] 《中国环保产业》编辑部. 国家出台《海水利用专项规划》[J]. *中国环保产业*, 2005(10): 42 - 42.

[4] 时 佳, 薛联青, 陈新芳, 等. 基于综合赋权法的叶尔羌河流域水资源承载力可变模糊综合评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5): 32 - 36.

[5] 杨红霞, 蔡 昕. 基于 WDO - PP 模型的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 68 - 75.

[6] 金菊良, 魏一鸣, 丁 晶, 等. 水资源系统工程的理论框架探讨[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(2): 130 - 137.

[7] 游进军, 甘 泓, 王 浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(3): 1 - 5.

[8] YANG Yichen E, ZHAO Jianshi, CAI Ximing. Decentralized optimization method for water allocation management in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2012, 138(4): 313 - 325.

[9] ILICH N. Shortcomings of linear programming in optimizing river basin allocation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): 187 - 194.

[10] NOËL P H C. Studying coupled human and natural systems from a decentralized perspective: the case of agent-based and decentralized modeling[D]. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-champaign, 2015.

[11] NIAZI M, HUSSAIN A. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey [J]. *Scientometrics*, 2011, 89(2): 479.

[12] BERGLUND E Z. Using agent-based modeling for water resources planning and management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(11): 04015025.

[13] NOËL P H C, CAI Ximing. 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 & Software*, 2017, 92: 1 - 16.

[14] SCHREINEMACHERS P, BERGER T. An agent-based simulation model of human-environment interactions in agricultural systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(7): 845 - 859.

[15] 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 - 2178.

[16] DU Erhu, CAI Ximing, BROZOVIC N, et al. Evaluating the impacts of farmers' behaviors on a hypothetical agricul-

- tural water market based on double auction[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5):4053–4072.
- [17] IFTEKHAR M S, TISDELL J G, CONNOR J D. Effects of competition on environmental water buyback auctions[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 127(8):59–73.
- [18] CHU Junying, WANG Can, CHEN Jining, et al. Agent-based residential water use behavior simulation and policy implications: A case-study in Beijing City[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(15):3267–3295.
- [19] ATHANASIADIS I N, MENTES A K, MITKAS P A, et al. A hybrid agent-based model for estimating residential water demand[J]. *Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 2005, 81(3):175–187.
- [20] KOUTIVA I, MAKROPOULOS C. Modelling domestic water demand: An agent based approach[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 79:35–54.
- [21] SCHLÜTER M, PAHLWOSTL C. Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: an agent-based model of water use in a river basin[J]. *Ecology & Society*, 2007, 12(2):375–386.
- [22] ALI A M, SHAFIEE M E, BERGLUND 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.
- [23] GIACOMONI M H, KANTA L, ZECHMAN E M. Complex adaptive systems approach to simulate the sustainability of water resources and urbanization[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management Asce*, 2013, 139(5):554–564.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] WOOLDRIDGE M. *An Introduction to multiagent systems*; 2nd Edition[M]. John Wiley sons, 2009.
- [27] GIMBLETT R H. *Integrating geographic information systems and agent-based technologies for modeling and simulating social and ecological phenomena*[M]. Oxford University Press, New York, 2002:1–20.
- [28] AN L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 229(4):25–36.
- [29] ABAR S, THEODOROPOULOS G K, LEMARINIER P, et al. Agent based modelling and simulation tools: A review of the state-of-art software[J]. *Computer Science Review*, 2017, 24:13–33.
- [30] RAILSBACK S F, GRIMM V. *Agent-based and individual-based modeling: A practical introduction*[M]. Princeton University Press, 2011.
- [31] 李九一, 李丽娟. 中国水资源对区域社会经济发展的支撑能力[J]. *地理学报*, 2012, 67(3):410–419.
- [32] 王学, 李秀彬, 辛良杰. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算[J]. *地理学报*, 2013, 68(5):694–707.
- [33] 林惠凤, 刘某承, 熊英. 流域水资源保护补偿标准研究——以京冀“稻改旱”工程为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3):7–12.
- [34] ALLEN R G. *Crop evapotranspiration*[M]. John Wiley & Sons, 2005.