

# 草原土地利用变化多智能体仿真模型

潘理虎, 秦世鹏, 李晓文

(太原科技大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**国内草原生态系统正面临着利用方式不合理、生态压力不断加剧等一系列严重问题。据此采用多智能体建模思想,基于 Repast Simphony 平台设计并构建草原土地利用变化仿真模型,以模拟和预测草原土地在复杂性、非线性和交互性等多种影响因素下的状态反馈和变化过程。模型针对内蒙古鄂温克旗地区草原土地利用变化实例,详细定义了地理栅格、空间环境以及牧民、牧户和政府三类智能体。采用遗传算法优化草原效益函数,从而对每个地理栅格实现综合效益最优的畜牧业生产模式探索,以此实现政府智能体行为决策的优化。针对不同情景进行了仿真实验,仿真结果表明畜牧业劳动力转移、草原利用模式以及政府政策对于草原生态的可持续发展具有重要影响。模型对现有多智能体系统存在的过度简化与仿真度低等问题具有良好的完善补充作用,且具有较高实用价值,可为政府管理草原和牧民合理利用草原提供决策支持。

**关键词:**草原土地利用;多智能体模型;畜牧业生产模式模拟;Repast Simphony;遗传算法

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2021)05-0186-07

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.05.032

## Multi-Agent Simulation Model of Grassland Land Use Change

PAN Li-hu, QIN Shi-peng, LI Xiao-wen

(School of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** China's grassland ecosystem is facing a series of serious problems, such as unreasonable utilization methods and increasing ecological pressure. According to the idea of multi-agent modeling, we design and build a grassland land use change simulation model based on the Repast Simphony platform to simulate and predict the state feedback and change process of the grassland land under various influencing factors such as complexity, nonlinearity and interactivity. The model is based on the example of grassland land use change in Ewenke Banner, Inner Mongolia, and defines the model's geographic grid, spatial environment, and three types of agents: herders, herdsmen, and the government. The grassland benefit function is optimized by genetic algorithm to explore the animal husbandry production mode with the best comprehensive benefit for each geographic grid of the model, so as to achieve the optimization of government agent behavior decision. Simulation experiments were carried out for different scenarios. The simulation results show that animal husbandry labor transfer, grassland use patterns and government policies have an important impact on the sustainable development of grassland ecology. The model has a perfect complementing effect on the over-simplification and low simulation of the existing multi-agent systems with high practical value, which can provide decision support for the government to manage grasslands and pastoralists to use grasslands rationally.

**Key words:** grassland land use; multi-agent model; simulation of animal husbandry production model; Repast Simphony; genetic algorithm

## 0 引言

草原生态系统是一种重要的可更新资源,具有经济、生态和社会多种功能效益,在国内的畜牧业生产以及生态调节方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。然而,由于草原特殊的自然地理环境,加之草原人口的急剧膨胀和社会经济的发展,草原土地发生了大范围和不同程度的

退化,严重制约了草原生态系统的正常发展<sup>[2-3]</sup>。因此,如何理解和掌握草原土地利用变化的驱动因素和一般发展规律,高效合理地利用草原成为政府和草原人民面临的重大挑战。

草原土地利用变化过程是一个人与自然耦合交织在一起的复杂系统,且该复杂系统各项要素之间存在

收稿日期:2020-06-08

修回日期:2020-10-10

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA20010000);山西省-中科院科技合作重大项目(20151101001);深圳市战略新兴产业发展专项资金(JSGG20170413173425899)

作者简介:潘理虎(1974-),男,博士,教授,通信作者,CCF高级会员(24810s),研究方向为人工智能、软件工程、复杂系统仿真。

众多的非线性关系和复杂的交互行为,从而使得研究复杂化<sup>[4-5]</sup>。而运用多智能体建模仿真思想,可以对非线性的智能体交互进行合理表征<sup>[6]</sup>。周淑丽等<sup>[7]</sup>仅通过将新迁入城市的人口抽象为模型中的智能体来研究广州市的土地动态扩张,以智能体迁入地的地理位置分析了该区域土地扩张的动态趋势。Dan Yan 等<sup>[8]</sup>选取鄱阳湖区为研究区域,利用多智能体系统理论建立了一个土地利用变化模拟系统,使用主成分分析法对驱动因素进行了简化,并将农户主体作为土地利用决策的直接制定者。Kocabas 等<sup>[9]</sup>以温哥华地区为研究区域,使用多智能体模型模拟了居民智能体对土地的利用行为和该区域土地类型的动态变化。纵观以上研究,目前土地利用变化智能体模型的研究区域主要集中在城市和农村,对于其他典型地区的研究较少<sup>[10]</sup>。智能体的决策条件和决策行为较为单一,大多只考虑对于研究问题影响最大的决策条件和行为<sup>[11]</sup>。同时,模型常简化智能体的智能决策能力<sup>[12-13]</sup>。因此,如何细化当前智能体模型中智能体的决策行为,完善模型内部调度和仿真结果的可视化展示,是解决智能体模型现存问题的重点内容。

该文采用多智能体建模思想,在计算机中建立一个全面的草原土地利用变化仿真模型。以收集到的内蒙古草地、牧民、牲畜和政策等真实数据作为模型初始化参数,将草原中的牧民、牧户和政府以智能体的形式进行描述。同时依据现实情况和调查数据制定智能体的微观行为规则。通过智能体与空间环境的不断交互有效地还原草原土地利用变化机理和驱动因素,从而分析草原草地类型未来的变化趋势及各驱动因子的作

用结果。最后模拟了不同政策条件对草原土地和草原区牧民产生的影响,为草原发展提供科学指导。

## 1 草原土地利用变化多智能体模型构建

### 1.1 模型概述

草原土地利用变化多智能体模型作为系统仿真模型,主要用途是对在规定时间内范围、规定地理区域内的草原生态系统服务和消耗过程进行仿真,通过分析牧民、牧户等主体在自然环境、社会环境和政府生态政策影响下的决策行为,研究草原生态发展和牧民生产决策的合理化方法。

基于以上目的,结合草原生态系统服务和消耗理论,定义了草原土地利用变化多智能体模型的输入信息和输出结果<sup>[14]</sup>。模型主要将现实草原的自然地理环境、社会经济环境以及牧民、牧户和政府等行为主体数据作为输入信息。之后智能体模型对这些信息进行不断地演化和计算,从而最终输出未来一段时间内的草原利用状态信息、政府政策作用结果以及模型中主体生产生活状况等。目前,现实草原系统主要表现为牧民和牧户以草地为原料进行牧业生产活动,在牧民和牧户不同程度地利用强度下,草原不断更新其状态,并将状态信息反馈给牧民和牧户。牧民、牧户在获得信息后,对自身的生产生活模式进行调整。由此,形成了一个随时间不断演变的时空演化系统。

### 1.2 模型空间环境

#### 1.2.1 自然地理环境

(1)地域空间与土地类型。

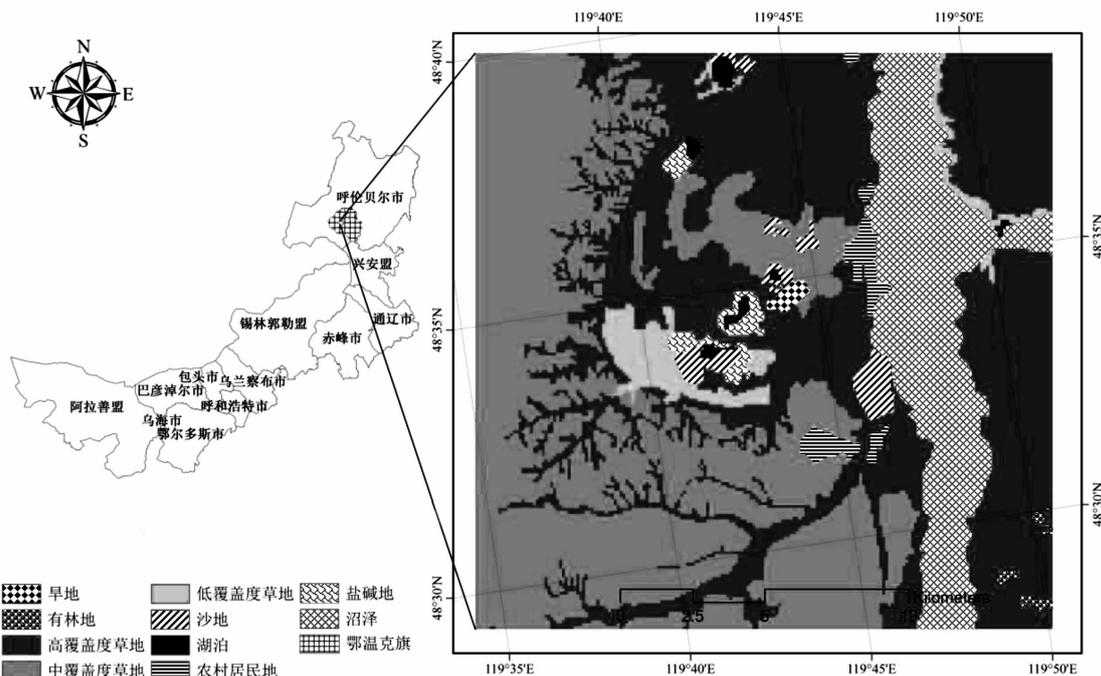


图 1 模型地域空间及土地类型分布

地域空间是指模型研究的地理区域,土地类型则为土地的状态信息。草原土地利用变化模型以国内典型的以草甸草原类型为主的内蒙古呼伦贝尔市作为研究对象,选取呼伦贝尔市鄂温克旗 1 : 10 000 的土地利用图中的 200 \* 200 块栅格为模型的地域空间,如图 1 所示。其中栅格为模型地理空间的最小单位,大小为 100 m \* 100 m。除草地之外,研究区域还包括其他土地类型。由于该文旨在探索在牧业生产作用下的草地利用状态,因此模型对于其他类型土地不做处理。

(2) 草地的生态供给

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是生态研究中用于衡量绿色植物能量生产能力的特定概念<sup>[15]</sup>。该模型中利用此概念来定量计算栅格草地生产的能量,以此表示牧民智能体实际可利用的草原生态能量。模型中的低覆盖度草原、中覆盖度草原和高覆盖度草原对应的单位面积内可利用供给的 NPP 值 (gC/m<sup>2</sup>) 分别为 16.9、33.7 和 52.5。

(3) 草原气候因子。

模型中定义的气候因子为在某范围内波动的随机数,从而更加符合现实草原系统。

1.2.2 社会环境

模型中考虑社会经济环境和人口分布环境两类社

会环境。在本模型中,牧民和牧户在牧业生产活动中所获得的收入与社会经济增长率息息相关。人口分布环境直接决定了智能体的空间地理位置。

1.3 智能体定义

1.3.1 智能体类型及属性

该模型根据现实草原系统的利用模式和运行机理抽象出牧民、牧户和政府三类智能体。

牧民智能体的属性包括 ID、性别、年龄、受教育程度、职业、所在栅格、放牧数量、收入、所属牧户。牧民是进行牧业生产的基本劳动力。

牧户智能体的属性包括牧户 ID 号、所在栅格编号、成员结构、地块数量、拥有地块的坐标。该智能体是由若干个牧民组合而成的。在草原土地利用变化模型中以牧户为单位进行牧业生产活动。

政府智能体的属性包括坐标和管辖区域。政府是草原管理者,可对草原进行一系列的管理工作。

1.3.2 智能体行为

智能体行为是推动模型演化的主要因素<sup>[16-17]</sup>。模型中各智能体根据其在模型中的角色和自身属性具有不同行为。本模型结合现实草原生态消耗与土地利用变化过程抽象定义了模型中的八项主要行为。各项行为的具体描述和适用主体如表 1 所示。

表 1 智能体行为与描述

序号	智能体行为	行为描述	适用智能体
1	自然属性调整	根据模型年份增长,智能体发生的自然属性变更,例如年龄、受教育水平等	牧民智能体
2	劳动力转移	从事牧业生产劳动与其他劳动之间的转换,即放牧与打工职业的选择	牧民智能体
3	生活消耗	智能体为获取生存所需食品(包括粮食、肉、奶)消费产生的消耗	牧户智能体
5	家庭结构调整	因家庭成员属性发生变化而产生的家庭结构改变,包括人数、劳动力结构等	牧户智能体
6	牧业生产活动	通过利用草原提供的生态原料进行家畜的饲养、繁殖与换取经济收入的行为	牧户智能体
7	信息获取	对模型中各类信息的感知,例如草地生态供给能力、草原利用状态等	三类智能体
8	政策调整	政府根据其获取的信息,适时更新其政策的行为,例如草地补贴,鼓励放牧等	政府智能体

1.3.3 土地利用状态衡量指标

模型利用草原生态压力指数定量评估草原土地の利用程度。具体的计算方式如式(1)所示:

$$ECO-P = \frac{Consumed - NPPg}{Supply - NPP} \quad (1)$$

其中, Consumed - NPPg 表示牧户的生产消耗 NPP; Supply - NPP 表示牧户智能体可获得的草原供给 NPP。每个牧户智能体所获取的草原供给 NPP 的计算如式(2)所示:

$$Supply - NPP = \sum_{i=0}^N Y_i * A_i \quad (2)$$

其中, i 表示第 i 类草原; Y<sub>i</sub> 为第 i 类草原实际可利用供给 NPP 值,其数值在 1.2.1 节有详细介绍; A<sub>i</sub> 为牧

户所拥有的该类草原面积,单位为 m<sup>2</sup>。

模型中的草原供给在每个周期会根据当年的气候状况和牲畜数量发生变化。因此,模型设定的草原供给 NPP 的变化规则如式(3)所示:

$$Supply - NPP_i = \alpha_i * \lambda_i * Supply - NPP \quad (3)$$

其中, Supply - NPP<sub>i</sub> 表示第 i 年草原供给 NPP 值; α<sub>i</sub> 表示第 i 年的草原气候因子; λ<sub>i</sub> 表示第 i 年的草原退化因子; Supply - NPP 表示根据式(2)计算得到的初始草原供给 NPP 值。

模型中每个栅格每年的草原草地退化因子与上一年的草原供给 NPP 和上一年的栅格生产消耗有关,具体变化规则如式(4)所示:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & (Supply - NPP_{i-1} \geq Consumed - NPP_{g_{i-1}}) \\ \frac{Supply - NPP_{i-1}}{Consumed - NPP_{g_{i-1}}} & (Supply - NPP_{i-1} < Consumed - NPP_{g_{i-1}}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, Supply - NPP<sub>i-1</sub> 表示第 *i* - 1 年的草原供给 NPP 值; Consumed - NPP<sub>g,i-1</sub> 表示第 *i* - 1 年的生产消耗 NPP 值。

Consumed-NPP<sub>g</sub> 是牧户智能体进行牧业生产活动中, 饲草所需的 NPP 消耗量, 其具体计算方式将在下一章详细介绍。

## 2 智能体行为规则

### 2.1 牧民职业状态转换行为

依据内蒙古统计年鉴数据和草原实地调研问卷数据的分析统计结果, 模型中的牧民智能体被划分为不同职业状态, 并按模型运行周期遵循一定的规则转换。牧民智能体的职业状态共包括学前或初等教育、高等教育、牧民、城市临时打工、城市固定就业、城市退休和草原退休七种。学前或初等教育状态指牧民智能体处于幼儿或九年义务教育阶段; 高等教育状态指牧民智能体处于中专、大学及以上教育状态; 牧民状态代表牧民智能体从事牧业生产活动, 即作为草原生产劳动力的状态; 城市临时打工状态指牧民智能体外出打工的状态; 城市固定就业状态指牧民智能体从事城市正式工作的状态; 城市退休状态和草原退休状态均指牧民智能体已不具有劳动能力, 其区别在于有无退休金。

各职业状态的转换主要是由牧民的年龄增长驱动的。转换规则的具体制定来源于鄂温克旗实际调研数据和内蒙古统计年鉴。

### 2.2 牧户牧业生产行为

当模型中的牧民智能体完成职业状态转换之后, 开始进行牧业生产活动。牧户智能体首先判断其生产劳动力状况, 然后根据判断结果执行牧业生产决策。若该家庭中的生产劳动力大于 0, 则进行正常的牧业生产活动; 否则在模型运行当年的年初, 将饲养的牲畜全部出栏。牧户的生产消耗 NPP 计算方法如式(5)所示:

$$\text{Consumed-NPPg} = \text{NUM} \times \text{GW} \times \text{GD} \times (1 - \text{MC}) \times \text{Fc} \quad (5)$$

其中, NUM 表示饲养牲畜数量; GW 表示单只牲畜一天所需的干草重量; GD 表示牲畜当年的食草天数; MC 表示干草含水比例(15%); Fc 表示草生物量(单位为 g)与碳含量(单位为 gC)的转换系数(0.45)。本模型中, 牧户饲养牲畜的种类为羊。

牧户智能体养羊数量的变化由每年的产仔率和出栏率计算。在模型的实际运行中牲畜出栏率与政策、环境和牧户生产劳动力三个因素有关。出栏率  $\mu$  的具体变化规则如式(6)所示:

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{若 } k = 1 \\ \text{Random}(0.4, 0.6) + k & \text{若 } k \neq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $k$  的计算如式(7)所示:

$$k = \begin{cases} 1 & \text{若 } k_f = 1 \\ k_p + k_e + k_f & \text{若 } k_f \neq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $k_p$ ,  $k_e$ ,  $k_f$  三种影响因素分别表示政策、环境和生产劳动力因子, 它们的取值如式(8)~式(10)所示:

$$k_p = \begin{cases} \text{Random}(0, 0.1) & \text{若政策不鼓励} \\ \text{Random}(-0.1, 0) & \text{若政策扶持} \end{cases} \quad (8)$$

$$k_e = \begin{cases} \text{Random}(0, 0.1) & \text{若 Supply - NPP}_{i-1} < \text{Consumed - NPP}_{g,i-1} \\ \text{Random}(-0.1, 0) & \text{若 Supply - NPP}_{i-1} \geq \text{Consumed - NPP}_{g,i-1} \end{cases} \quad (9)$$

$$k_f = \begin{cases} 1 & \text{若牧业劳动力为 0} \\ \text{Random}(0, 0.1) & \text{若牧业劳动力减少但不为 0} \\ \text{Random}(-0.1, 0) & \text{若牧业劳动力增加} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.3 政府草原综合效益评估

模型在每个仿真年份计算每个栅格的综合效益, 包括经济效益和生态效益。具体计算方式分别如式(11)与式(12)所示:

$$\text{Benefit - Econ}_t = C * \text{Consumed - NPPg}_t \quad (11)$$

$$\text{Benefit - Ecol}_t = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^t (1 - \text{ECO} - \text{P}_{i-1}) * C(\text{Supply - NPP}_i - \text{Consumed - NPPg}_i) \quad (12)$$

其中,  $C$  表示单位 NPP 对应的价值, Consumed-NPP<sub>g</sub><sub>*t*</sub> 和 Supply-NPP<sub>*t*</sub> 分别表示第 *t* 年牧业生产消耗 NPP 值和草原生态供给 NPP 值, ECO-P<sub>*t-1*</sub> 表示上一年该栅格的草原生态压力指数。

栅格综合效益为经济效益与生态效益的加权总和。该文采用遗传算法优化栅格综合效益, 使其最大<sup>[18-19]</sup>。采用下述方法将最大化问题转换为最小化问题。目标函数及约束条件如式(13)所示:

$$\min \text{Benefit}_t(\text{Consumed - NPPg}_t) = I_{\max} - (\alpha_1 \text{Benefit - Econ}_t + \alpha_2 \text{Benefit - Ecol}_t) \quad (13)$$

其中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为经济效益和生态效益的权重, 累加和为 1;  $I_{\max}$  为一个常量, 是根据模型最大供给栅格所求的效益最大值, 由模型敏感性测试设定。约束条件: 生产消耗不可超过生态系统服务供给; 经济效益和生态效益达到一定程度的均衡, 即:  $|\alpha_1 - \alpha_2| \leq 0.4$ 。

使用遗传算法求解使栅格综合效益最优的 Consumed - NPP<sub>g</sub> 后, 将其作为政府智能体当年的决策参数, 之后政府参考该值对模型栅格区域进行相应调整, 并将调整策略运用于下一年仿真。调整策略具体表现为政府智能体每年获取使用遗传算法求解的生产消耗 NPP 参数, 并与当年实际生产消耗 NPP 量进行对比, 若其差距超过实际值的一半, 则政府调整该栅格

的相应政策,若其差距在剩余范围内,则政府维持该栅格的现有生产模式。

### 2.4 智能体行为交互

在草原土地利用变化多智能体模型运行的每个周期内,模型中的各类智能体遵循各自的行为规则不断地与其他智能体和草原土地环境进行交互。在这一过程中,各类智能体不断感知其他智能体信息和草原环境信息,以此来做出符合自身角色的动作和行为,并将这些动作和行为带来的影响效应反馈于模型的空间环境。在草原土地利用变化多智能体模型中,智能体的交互流程如图 2 所示。模型依据牧民的自然人属性调整、职业状态转换和行为规则完成周期性更新,并将更新结果作用于牧户智能体。同时牧户智能体遵循牧户生产消耗行为规则进行牧业生产行为,将生产消耗数据传递给模型的草原环境,从而计算出草原的土地利用状态。之后,政府和牧户智能体根据草原的实时状态做出响应动作,从而最终完成人与草原土地的交互反馈。

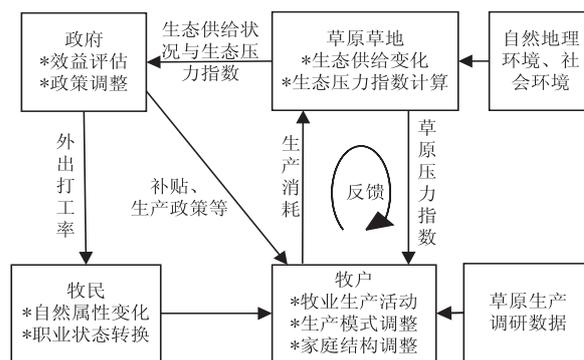


图 2 智能体交互流程

## 3 模型实现与实验分析

### 3.1 模型实现

该研究遵循模型规则并在 Repast Symphony 仿真平台的基础上<sup>[20-21]</sup>,设计开发了草原土地利用变化多智能体仿真模型。结合草原生态系统消耗过程以及多智能体系统特性将草原土地利用变化仿真系统的结构分为四个模块,如图 3 所示。

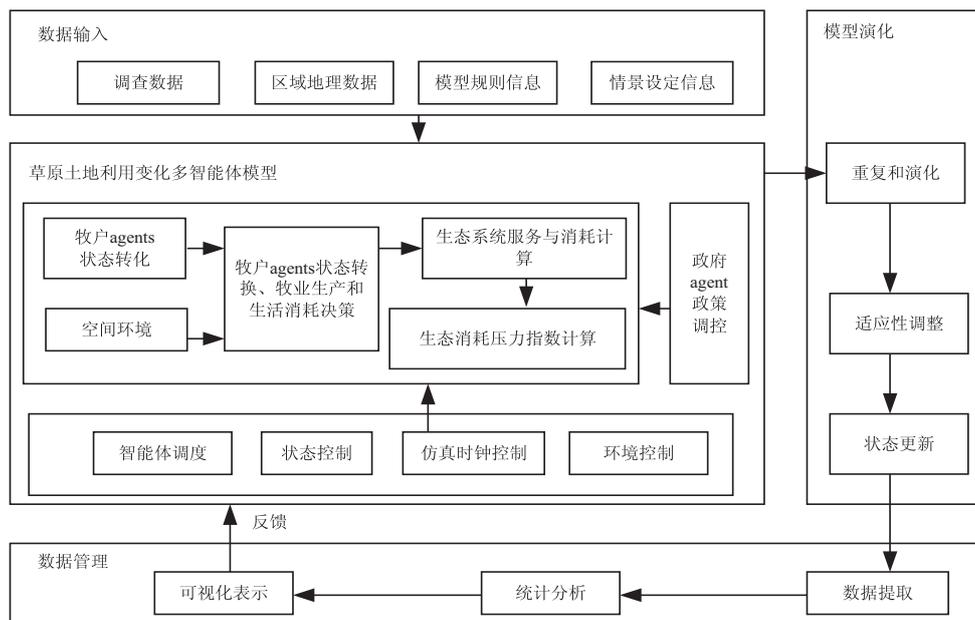


图 3 草原土地利用变化多智能体模型运行架构

数据输入模块为模型提供了可操作的数据,可实现模型中的智能体、空间环境等要素的初始化。

多智能体模型模块刻画智能体之间的数据传递和智能体与空间环境的交互反馈。该模块描述了智能体的重要行为决策,并对草原生态供给与消耗情况进行计算,从而完成模型中所有与智能体相关的行为活动。模块控制部分包括智能体调度、状态控制、仿真时钟控制和环境控制,主要负责实现模型各项要素的有序运转。

模型演化模块根据仿真年份的不断推进实现模型事件的重复和演化,智能体根据其获取到的信息和学

习结果做出自适应调整。

数据管理模块在每个仿真年份可将仿真结果进行提取、统计与可视化表示,并将其最新数据保存至存储器中,作为模型下一年运行时的变量。

### 3.2 实验与分析

#### 3.2.1 模型设定与实验数据

模型对鄂温克旗 40 000 户家庭进行模拟仿真,对草原生态压力指数采取分级显示机制,将其按照数值大小分级,并使用不同灰度进行可视化展示。模型产生的各类统计数据通过 excel 表格和折线统计图实时统计与显示。模型运行参数如表 2 所示。

表 2 模型运行参数与变化规则

参数名称	来源	运行变化规则
进城打工率	内蒙古社会经济统计年鉴	据情景变化
出生率/死亡率	调查数据	不变
返牧率	内蒙古社会经济统计年鉴	不变
出栏率	调查数据	据情景变化
产仔率	调查数据	0.55-0.65
个体最大养殖数量	调查数据	不变
气候因子	内蒙古统计年鉴	0.05-0.15
草原生态供给	光能利用率遥感模型估算	随草原类型变化
成人标准花费/元	中国营养学会居民膳食指南	不变
牧业产物价格	内蒙古社会经济统计年鉴	随经济波动
社会经济增长率	内蒙古社会经济统计年鉴	不变

3.2.2 仿真情景与结果

根据研究区现状及未来可能的发展趋势,在仿真实验时,设计三种情景,模拟各情景未来 30 年生态消耗状况及草原生态压力的发展。

(1) 正常情景。

此情景模拟草原现阶段情况下的运转情况,不考虑政府通过综合效益评估而对草原实施的政策调整,结果如图 4 所示。草原生态系统消耗压力保持下降趋势,如图 4(a)。说明此情景下,基于目前调研数据发展的草原生态系统不会过载。原因在于牧民养殖牲畜数量的持续下降,由此带来的生产消耗的下降,如图 4(b)。

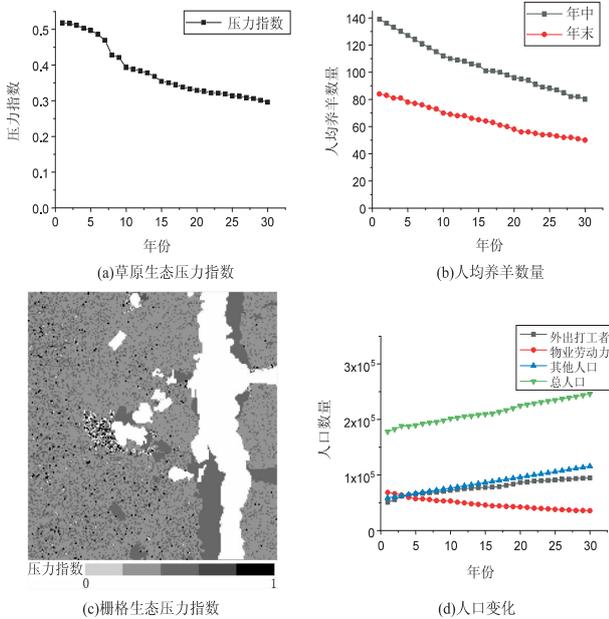


图 4 正常情景仿真结果

(2) 进城打工率提高情景。

此情景仅调节牧民进城打工概率,在原本的基础上增加 0.1,其余参数与正常情景一致,得到仿真结果如图 5 所示。通过观察可知,草原生态压力指数同样呈逐渐下降趋势,且对比正常情景,其下降幅度更大。

分析模型中各类人口发现,此情景中,牧民数量逐渐下降如图 5(d),从而使得牧业生产劳动力减少,牲畜养殖数量与牧户的牧业生产收入大幅下降,如图 5(b)。这表明,牧民进城务工率的提高使草原系统的生态服务供给难以得到有效利用。

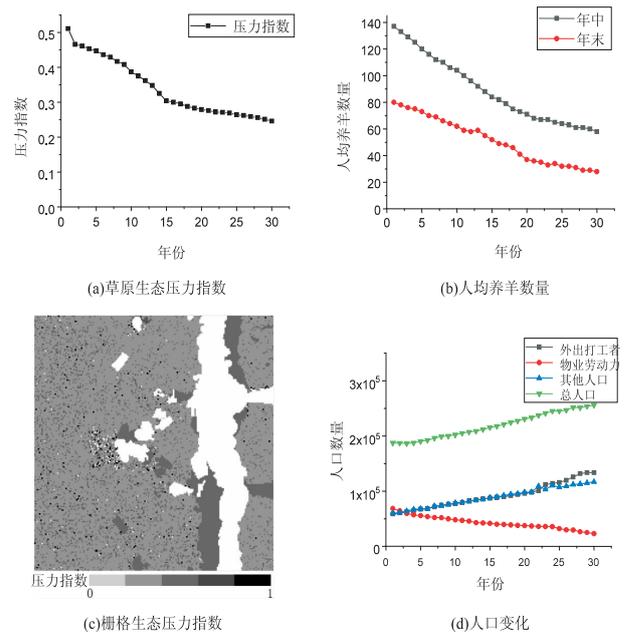


图 5 打工率提高情景仿真结果

(3) 政府宏观调控情景。

此情景模拟了政府评估栅格综合效益,对利用模式不合理的栅格实行政策管理,结果如图 6 所示。

通过仿真结果可知,生态系统压力初期持上升趋势,之后始终保持稳定。栅格平均生态效益经过前期的小幅下降后保持稳定,并未发生明显继续下降现象,如图 6(d)。牧民的牧业收入在前期保持增长,当增长到一定值后保持稳定。仿真结果表明,政府对于牲畜数量过多的栅格实行养殖限制,在一定程度上保护了草原生态。此种情景下,牧民的收入和栅格平均生态收益都维持在一个相对高的范围内,实现了一种草原利用的合理模式。

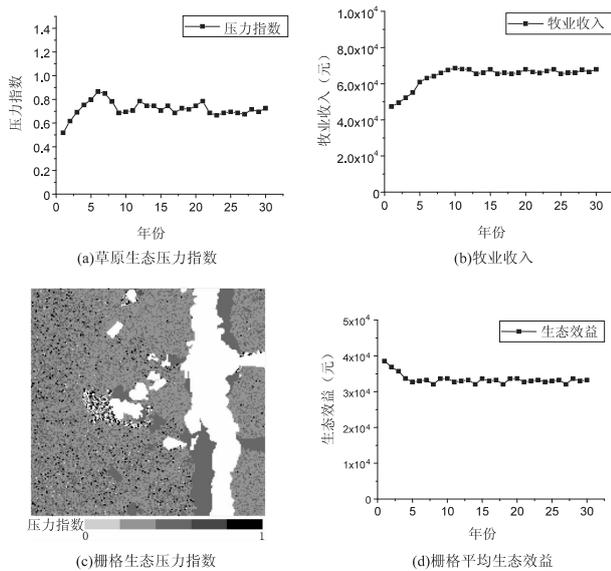


图6 政府政策调整情景仿真结果

#### 4 结束语

在计算机中针对具体现实问题构建多智能体模型来分析以人类活动为中心的复杂现实现象,是目前对于解决社会问题较为新颖且有效的方式。该文采用多智能体建模技术构建了一个完整的草原土地利用变化仿真模型,综合考虑草原系统中影响草地类型变化的各项环境因素,并依据现实情况和调查数据制定智能体的微观行为规则,实现了从微观到区域的多智能体模拟仿真。仿真结果证明了模型对于分析草原土地利用变化过程的正确性和有效性,对于完善现有智能体模型具有重要意义。目前,所构建的仿真模型是针对一个相对独立的空间区域进行研究的,在接下来的工作中,还需对空间尺度大的、包含不同草原类型的区域进行研究,从而构建大规模的草原仿真模型。

#### 参考文献:

- [1] 刘宇晨,张心灵. 草原生态保护补奖政策对牧户收入影响的实证分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(2):60-67.
- [2] JOHN R, CHEN J, GIANNICO V. Grassland canopy cover and aboveground biomass in Mongolia and Inner Mongolia: spatiotemporal estimates and controlling factors[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 213:34-48.
- [3] 王治良,路春燕. 呼伦贝尔草原区土地利用及景观格局变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(12):91-97.
- [4] 焦燕,侯建华,赵江红,等. 内蒙古农牧交错带土地利用变化对作物生长季 N<sub>2</sub>O 排放量的影响[J]. 环境科学研究,2015,28(1):16-22.
- [5] 潘理虎,闫慧敏,黄河清,等. 北方农牧交错带生态系统服务合理消耗多主体模型构建[J]. 资源科学,2012,34(6):1007-1016.
- [6] NORTH M J, COLLIER N T, OZIK J, et al. Complex adap-

- tive systems modeling with Repast Symphony[J]. Complex Adaptive Systems Modeling, 2013, 1(1):1-26.
- [7] 周淑丽,陶海燕,卓莉,等. 基于矢量的城市扩张多智能体模拟——以广州市番禺区为例[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2):202-210.
- [8] DAN Yan, HUANG Heqing, LIU Gaohuan, et al. A multi-agent model to simulate regional land use change with an application to the Poyang Lake Area of China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(4):349-358.
- [9] KOCABAS V, DRAGICEVIC S. Bayesian networks and agent-based modeling approach for urban land-use and population density change: a BNAS model[J]. Journal of Geographical Systems, 2013, 15(4):403-426.
- [10] 闫丹,黄河清,潘理虎,等. 多主体系统理论在鄱阳湖区土地利用时空变化过程研究中的应用[J]. 资源科学, 2013, 35(10):2041-2051.
- [11] KLEIN I, LEVY N, BEN-ELIA E. An agent-based model of the emergence of cooperation and a fair and stable system optimum using ATIS on a simple road network[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2018, 86(1):183-201.
- [12] 张赞,郭创,杨彬. 多智能体的飞机机电作动系统协调控制研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(10):103-107.
- [13] 彭金金,孔雪松,刘耀林,等. 基于智能体模型的农村居民点空间优化配置[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(5):52-58.
- [14] GANG C, ZHOU W, WANG Z, et al. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015, 201(1):57-68.
- [15] 闫慧敏,甄霖,李凤英,等. 生态系统生产力供给服务合理消耗度量方法——以内蒙古草地样带为例[J]. 资源科学, 2012, 34(6):998-1006.
- [16] 李青山,王璐,褚华,等. 一种基于智能体技术的软件自适应动态演化机制[J]. 软件学报, 2015, 26(4):760-777.
- [17] LHAKSMANA K M, MURAKAMI Y, ISHIDA T. Role-based modeling for designing agent behavior in self-organizing multi-agent systems[J]. International Journal of Software Engineering & Knowledge Engineering, 2018, 28(1):79-96.
- [18] 李岩,袁弘宇,于佳乔,等. 遗传算法在优化问题中的应用综述[J]. 山东工业技术, 2019(12):242-243.
- [19] BOYD J C, JOHN S. Genetic algorithm for scheduling of laboratory personnel[J]. Clinical Chemistry, 2020, 47(1):118-141.
- [20] NORTH M J, COLLIER N T, OZIK J. Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony[J]. Complex Adaptive Systems Modeling, 2013, 1(1):1-26.
- [21] 王宇宾. 基于 Repast Symphony 平台的建模与仿真技术[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(10):17-22.