

# 基于 Agent 的农工复合型生态产业园的建模与仿真

黄义乔<sup>1</sup>, 刘晶茹<sup>2</sup>, 王效华<sup>1①</sup> (1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 农工复合型生态产业园是集农业和工业为一体的社会-经济-自然复合区域产业共生系统。构建了一个“企业+农户”的小层面农工复合生态工业园,运用基于 Agent 的建模方法,建立了农工复合型生态产业园产品和废物交换框架模型,通过系统仿真研究了园区经济效益、环境效益和社会效益,从系统仿真角度探讨产业共生行为对农工复合产业生态系统发展演变的影响和作用。仿真结果表明,园区总产值、总利润和园区内共生交易额均随周期的变化保持增长直至平稳,当共生企业加入园区时增幅明显;园区中废物利用率在共生企业加入后迅速增长,农药和化肥使用量逐渐减少,有机肥使用量增加;园区带动生态化种植农户比例的增加表明越来越多的农户选择生态化种植道路。

**关键词:** 农工复合型生态产业园; 产业生态系统; Agent 建模; 仿真

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2015)03-0301-07

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.03.005

**Agent-Based Modeling and Simulation of Agro-industrial Compound Eco-industrial Park.** HUANG Yi-qiao<sup>1</sup>, LIU Jing-ru<sup>2</sup>, WANG Xiao-hua<sup>1</sup> (1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Region Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** An agro-industrial compound eco-industrial park is a society-economy-nature symbiotic system integrating agriculture and industry. A small-scale "enterprise and peasant household" agro-industrial compound eco-industrial park with a product-waste exchanging framework model is built up, using the Agent-based modeling method. Its economic, environmental and social benefits are analyzed through systematic simulation and impacts and effects of the agro-industrial symbiosis on development and evolution of the agro-industrial compound ecosystem discussed in depth from the viewpoint of system simulation. Results of the simulation show that total output, total profit and symbiotic turnover of the park all display a stably rising trend along with cyclic changes and the increase is getting more obvious when symbiotic enterprises join in. The waste recycling rate in the park grows rapidly, the pesticide and chemical fertilizer application rates reduce gradually, and the organic manure application rate increases. Development of the park brings about a high proportion of eco-farming households, indicating that more and more farmers choose the path of eco-farming.

**Key words:** agro-industrial compound eco-industrial park; industrial eco-system; Agent-based modeling; simulation

在产业生态学中,产业系统被视为一种与自然生态系统相类似的封闭体系,区域内的各企业之间相互依存、相互联系,形成类似于生态食物网的“产业生态系统”<sup>[1]</sup>。产业共生作为产业生态学中最具特征的一个分支领域,把不同的企业集聚到一起,使各企业之间通过物质、能量、水和副产品的交换,以及土地、物流、知识和信息等共享来提高资源利用效率,实现集聚区域经济效益、社会效益和环境效益的最大化<sup>[2]</sup>。生态产业园区是产业共生最主要的实践形式<sup>[3]</sup>。与生态产业园的构建理念类似,农工复合型生态产业园是以农产品加工园区为核心,集农户、农民、农田和企业为一体的社会-经济-自然复合区域产业共生系统<sup>[4]</sup>。系统中的农

户、企业和政府等参与者的共生行为决定了系统能否往高效、环保的方向演化发育。

“共生”主要指系统中废弃物的交换,但系统中的主体是否愿意参与交换对共生系统的构建十分重要。因此,系统中参与者的行为模拟对构建共生系统是必要的。基于 Agent 的系统建模的基本思想是通过模拟现实世界,将复杂系统划分为与之相应的 Agent,从研究个体微观行为着手,自下而上,达到研究整个宏观系统行为的目的<sup>[5]</sup>。运用基于 A-

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71173209)

① 通信作者 E-mail: xhwang@njau.edu.cn

gent 的系统建模方法来研究农工复合产业共生系统,能更全面地了解系统的演变过程及发展方向。近年来,基于 Agent 的建模与仿真已经被应用到各个领域,涉及面非常广,包括经济<sup>[6]</sup>、军事<sup>[7]</sup>、工业<sup>[8]</sup>和农业<sup>[9]</sup>等。虽然基于 Agent 的建模仿真方法被越来越多地运用到产业共生系统领域<sup>[10-11]</sup>,但是目前并没有人建立基于 Agent 的农工复合生态工业园的模型并进行仿真。

## 1 研究概述

### 1.1 研究对象

农工复合型生态产业园由农产品加工园区及其附属区域构成,是一种以工促农、以生产带动环保的新型农工一体化产业共生网络模式。其中,“农”指农业生产活动,主要包括农作物种植、畜禽养殖和水产养殖等;“工”指农产品加工、农业副产品综合利用,以及与前端农业生产活动联系紧密的化肥、农药等农资生产企业。

该文研究对象——佳木斯桦南县农工共生产

业群是一个典型的农工共生产业群,产业群中农业生产活动与农产品加工、农业副产品综合利用共存,有一定的共生基础,根据生态工业园共生设计原则,可挖掘更多的共生潜力。在产业集群原有的共生基础上,加入具有共生潜力的共生企业,遵循王如松等<sup>[12]</sup>提出的横向耦合、纵向闭合、区域联合及功能导向的生态产业园设计原则,构建了一个“企业+农户”的小层面农工复合生态产业园。如图1所示,园区中初始存在具有共生基础的水稻种植农户、玉米种植农户、肉鸡养殖企业、肉鸡加工企业和大米加工企业等参与产品交换,随着这些企业产生的可利用废物越来越多,便催生出一系列具有共生潜力的循环利用废物的共生企业参与废物交换,如羽毛粉厂、血红素加工厂、有机肥生产厂和固体成型燃料厂等。系统中农户和企业、企业和企业之间的交流合作形成产品和共生链网。通过对该系统进行 Agent 模拟来探索构建的模型中产品和共生链网对整个系统经济、环境和社会方面的影响。

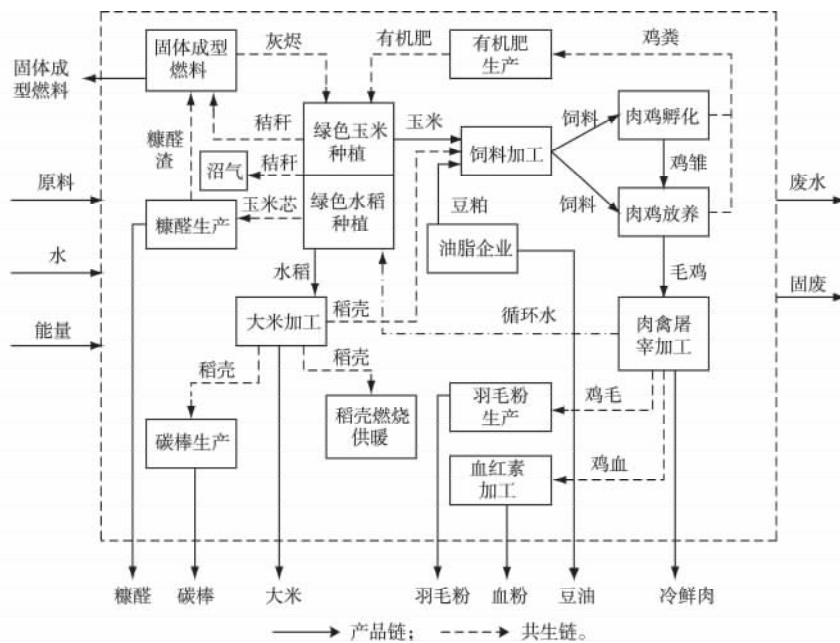


图1 农工复合型生态产业园产业链示意

Fig. 1 Sketch of the industrial chain of the agro-industrial compound eco-industrial park

### 1.2 研究方法

基于 Agent 的建模 (Agent-based model, ABM) 是一种计算模型,用来模拟复杂系统中独立存在的主体的行为或者主体间的交互。Agent 的概念在不同学科领域中有着不同的含义和理解,常见的中文译名包括“主体”、“代理”、“智能体”和“行动者”

等。在农工复合生态工业园中,Agent 是指在一定的外部环境中能独立自主运行的主体,受外部环境影响的同时也能影响外部环境,它具有独立自主、社会能性、反应性和主动性的特征<sup>[13]</sup>。

运用 ABM 方法对系统进行建模的过程中,Agent 设计由建模者对研究对象进行抽象和简化,并

用数学模型表达。对模型进行仿真分析的步骤主要有:(1)建立 Agent 模型;(2) Agent 设计;(3)交互机制设计;(4)仿真实现;(5)仿真结果分析。该文旨在建立农工复合型生态产业园的 Agent 模型,并对其进行仿真模拟,分析系统演化过程中的经济效益、环境效益和社会效益,从系统仿真角度探讨“农工复合型生态产业园”的产业模式,从而对农工复合共生系统的优化提出政策建议和管理措施。

## 2 模型建立

### 2.1 模型框架设计

农工复合型生态产业园主要由农户、企业和政府等独立自主的主体组成,主体之间的交互主要有产品交换和废物交换两类过程。从研究对象系统中抽象出园区的产品和废物交换框架模型(图2)。

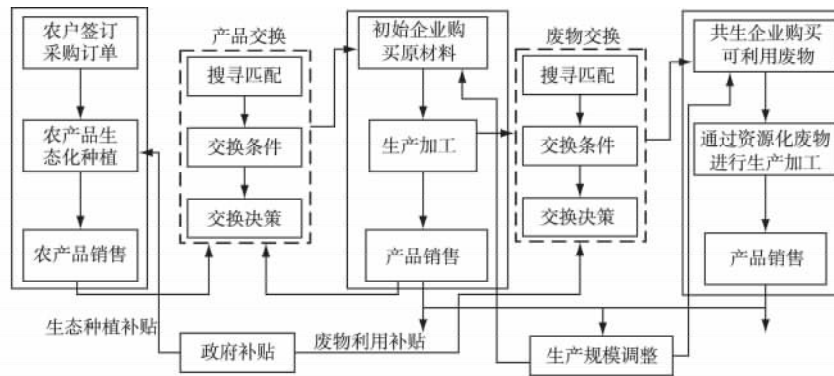


图2 园区产品和废物交换框架模型

Fig. 2 Model of the product-waste exchanging framework

园区中一部分农户与农产品加工企业签订采购订单,根据订单合同要求进行生态化种植。园区发展初期主要为农副产品加工企业,企业之间发生产品交换,交换过程主要为产品搜寻匹配、交换条件确定和交换决策。企业生产加工过程中产生废物,随着园区中可利用废物逐渐增多到一定数量时,涌现出一系列共生企业,共生企业与初始加工企业进行废物交换,通过资源化废物进行生产加工,废物交换过程与产品交换过程类似。政府对农户的生态化种植和企业循环利用废物行为提供补

贴,促进生态化种植和废物交换。

### 2.2 Agent 设计

Agent 设计是基于 Agent 的建模仿真方法中最核心的一部分。Agent 设计不仅包括 Agent 自身的设计,还包括对 Agent 所处环境的描述。根据上述模型框架和 Agent 重要特征,设计农户 Agent、企业 Agent、政府 Agent 和自然环境 Agent 4 类 Agent。

具体的 Agent 设计分为目标模块、属性模块、知识库模块和行为模块 4 个模块,主要内容见表 1。

表1 Agent 设计的具体内容

Table 1 Details of the Agent designing

Agent 类型	目标模块	属性模块	知识库模块	行为模块
农户 Agent	经济、环境、社会	种植农产品类型和产量;原料类型和用量;废物类型和产量;化肥农药类型和用量;污染物排放类型和排放量;劳动力数量	交易产生的决策条件、市场价格、经济子系统评价指标体系和社会子系统评价指标体系	信息交流、协商合作、粮食种植、施药施肥、粮食出售和污染排放
企业 Agent	经济、环境、社会	产品类型和产量;原料类型和用量;废物类型和产量;可利用废物类型和用量;污染物排放类型和排放量;提供就业数量	决策条件、循环利用的废物价格制定策略、市场价格、经济子系统评价指标体系和社会子系统评价指标体系	信息交流、合作协商、产量决策、循环利用废物价格制定、生产、销售、废物再利用和污染排放
政府 Agent	经济、环境、社会	税率、单位污水处理费和废物利用补贴率	污染物排放标准	园区管理、征收排污费和发放废物利用补贴
自然环境 Agent	环境	污染物排放系数	环境子系统评价指标体系	资源供给、接纳污染物和环境评价

### 2.3 Agent 交互机制设计

#### 2.3.1 产品交换机制设计

产品交换组成了农工复合型生态产业园中产品链。系统中的产品交换是某企业  $X$  发出购买请求,然后由信息公告平台——“黑板”发布信息,符合供应条件的供应商均发出报价。假设有  $n$  家供应商进行报价,将这  $n$  个报价按照冒泡排序法进行排序,得到一个数值依次从小到大的报价序列  $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ 。企业  $X$  先与报价  $S_1$  的供应商进行协商合作,如未达成或者还需再购买,则再询问报价  $S_2$  的供应商,依此类推,直到购买完成或者询问完报价  $S_n$  的供应商。

#### 2.3.2 废物交换发生条件

农工复合型生态产业园中,共生链的主要构成是废物的交换。如图3所示的废物交换模型中,Agent1 作为 Agent2 的上游,出售可利用废物给 Agent2 供其进行生产。

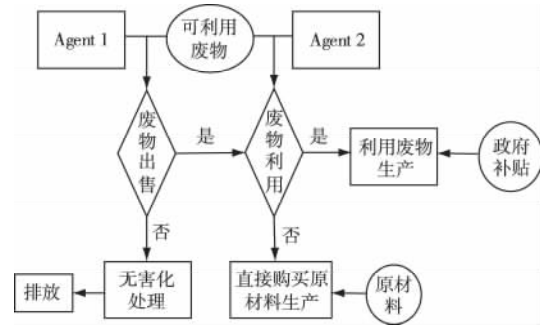


图3 园区废物交换模型示意

Fig.3 Sketch of the waste exchanging model

当废物交换将要发生时,Agent 1 与 Agent 2 之间的经济关系见表2。当 Agent 2 利用废物进行生产得到的收益大于直接购买原材料进行生产得到的收益时,废物交换 ( $\alpha$ ) 产生,即  $\alpha = [(Q_2 \times P_2 + C_3) - (Q_0 \times P_0 + C_2)] - (Q_2 \times P_2 - Q_0 \times P_{原}) > 0$ 。

表2 园区废物交换 Agent 之间的经济关系

Table 2 Economic relationship between waste exchanging Agents in the park

项目	Agent 1		Agent 2	
	出售给 Agent 2	无害化处理后排放	购买废物后作为原料	直接购买可替代原料
成本	0	$C_1$	$Q_0 \times P_0 + C_2$	$Q_0 \times P_{原}$
收入	$Q_0 \times P_0$	0	$Q_2 \times P_2 + C_3$	$Q_2 \times P_2$
收益	$Q_0 \times P_0$	$-C_1$	$(Q_2 \times P_2 + C_3) - (Q_0 \times P_0 + C_2)$	$Q_2 \times P_2 - Q_0 \times P_{原}$

$Q_0$  为废物交换量;  $P_0$  为废物交换价格;  $C_1$  为废物无害化处理成本;  $C_2$  为废物再利用处理成本;  $Q_2$  为 Agent 2 生产的产品量;  $P_2$  为 Agent 2 生产的产品价格;  $C_3$  为利用废物所获政府补贴;  $P_{原}$  为可替代原材料价格。

#### 2.3.3 废物交换定价策略

废物价格的制定关系到共生链能否保持稳定。由表2可知,影响废物价格的因素主要有废弃物的无害化处理成本、废物再利用处理成本、可替代原材料的价格和政府对于利用废物循环进行生产的企业的补贴。

当 Agent 1 产生  $Q_0$  的废物,出售给 Agent 2, Agent 2 对废物进行再利用时,Agent 1 获得的共生收益 ( $R_{1,1}$ ) 为出售废物的收益与节省的废物无害化处理费用之和,即  $R_{1,1} = Q_0 \times P_0 + C_1$ 。Agent 2 获得的共生收益 ( $R_{1,2}$ ) 为资源化废物带来的节省原材料的收益、所获政府补贴之和与废物再利用处理成本的差值,即  $R_{1,2} = Q_0 \times P_{原} + C_3 - (Q_0 \times P_0 + C_2)$ 。Agent 1 和 Agent 2 的共生收益之和为  $R_1 = R_{1,1} + R_{1,2}$ 。当  $R_1$  达最大时,废物价格  $P_0$  为最优废物价格。

### 3 仿真结果及分析

运用 Matlab 2014a 软件对模型进行仿真,模拟系统仿真时间为 10 a,均分为 120 个周期。仿真数

据来源为佳木斯桦南县农工复合型生态产业园企业调研数据,仿真分析主要就仿真运行过程中园区的经济效益、环境效益<sup>[14]</sup>和社会效益<sup>[15]</sup>3 个方面的变化展开。

#### 3.1 经济效益

主要通过产值和利润来考察园区的经济效益。由图4~5可知,0~120周期,园区总产值和总利润初期保持持续增加,从第24周期开始增幅明显,增长持续到约80周期后趋于平稳。总产值从第1周期2.21亿元增长到第120周期的5.37亿元,总利润从第1周期的0.64亿元增长到第120周期的1.73亿元。

园区内共生交易额可反映园区中废物的交换状况。如图6所示,仿真运行到第8个周期后陆续有共生企业碳棒生产厂和稻壳燃烧供暖公司加入园区,园区中出现废物交换过程,园区内共生交易额从第8个仿真周期开始有较大增长(图7);第24周期前后加入园区的共生企业数量最大,分别加入了糠醛厂、固体成型燃料厂、羽毛粉生产厂、血红素

加工厂和沼气生产厂,因此第 30 周期后园区内共生交易额呈直线增长。第 31 周期之后共生交易额保持持续增长,第 80 周期后由于产能上限的原因而趋于平稳。第 120 周期时园区内共生交易额达到 1.35 亿元,占园区总产值的 25.1%。

用率的高低反映出系统环境效益的好坏。废物的综合利用包括秸秆、鸡粪、鸡毛、鸡血、豆粕、玉米芯和稻壳等,图 8 显示,废物综合利用率从第 24 周期开始直线增长,第 32 周期之后一直保持稳定增长,第 80 周期后保持平稳,综合利用率最高达到 47%。

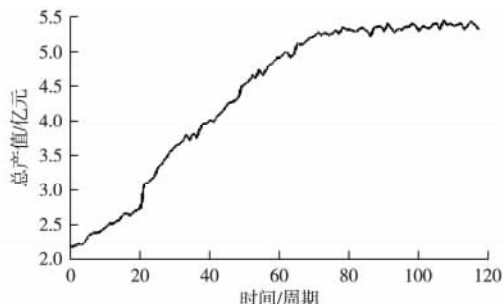


图 4 园区总产值随时间的变化

Fig. 4 Changes of total output of the park with time

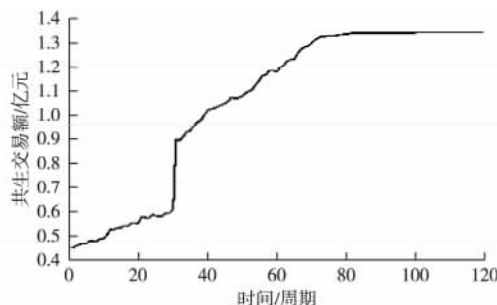


图 7 园区内共生交易额随时间的变化

Fig. 7 Changes of symbiotic turnover in the park with time

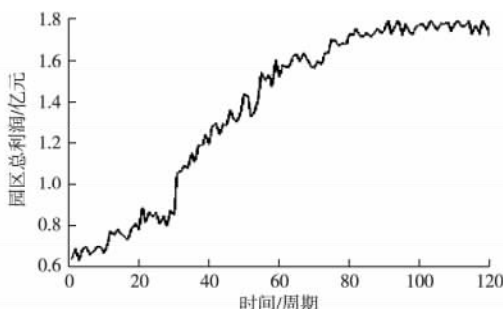


图 5 园区总利润随时间的变化

Fig. 5 Changes of total profit of the park with time

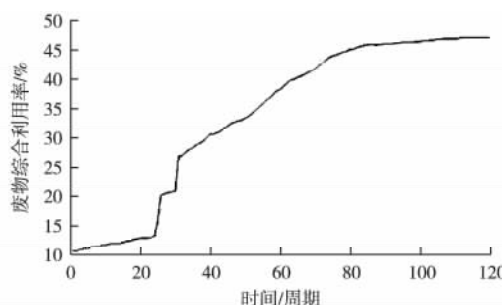


图 8 园区废物综合利用率随时间的变化

Fig. 8 Changes of integrated waste recycling rate of the park with time

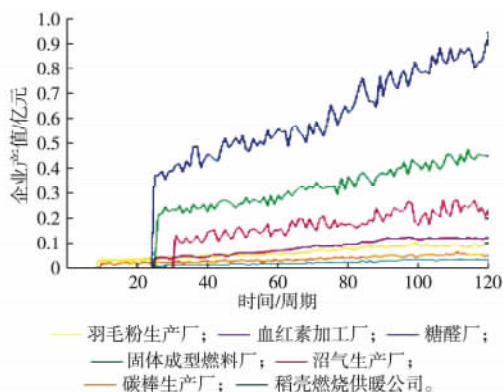


图 6 园区共生企业产值随时间的变化

Fig. 6 Changes of output of the symbiotic enterprises in the park with time

### 3.2 环境效益

所研究的农工复合型生态产业园中,对环境的影响最明显的因素是系统中固体废物的排放,废物利

用率的高低反映出系统环境效益的好坏。废物的综合利用包括秸秆、鸡粪、鸡毛、鸡血、豆粕、玉米芯和稻壳等,图 8 显示,废物综合利用率从第 24 周期开始直线增长,第 32 周期之后一直保持稳定增长,第 80 周期后保持平稳,综合利用率最高达到 47%。

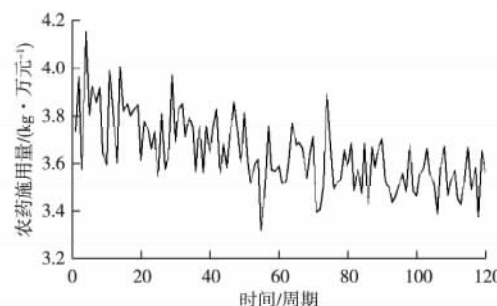


图 9 园区单位产值农药施用量随时间的变化

Fig. 9 Changes of pesticide application rate per unit of output value in the park with time

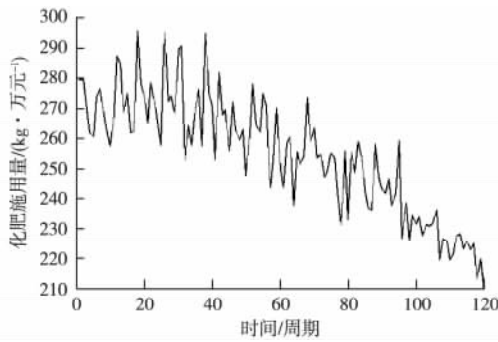


图 10 园区单位产值化肥施用量随时间的变化

Fig. 10 Changes of chemical fertilizer application rate per unit of output value in the park with time

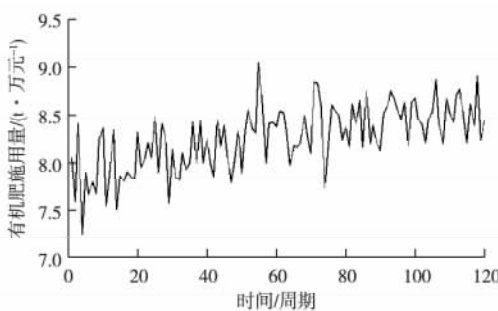


图 11 园区单位产值有机肥施用量随时间的变化

Fig. 11 Changes of organic fertilizer application rate per unit of output value in the park with time

### 3.3 社会效益

园区的社会效益主要体现在园区提供就业数量和带动农户与企业合作进行生态化种植方面。随着园区中企业数量的逐步增加,提供就业数量将显著增加。图 12 显示,随着仿真运行周期的增加,直到仿真进行到约第 80 周期时园区带动生态化种植农户比例保持稳定,从 16% 逐渐升高到 33.1%。

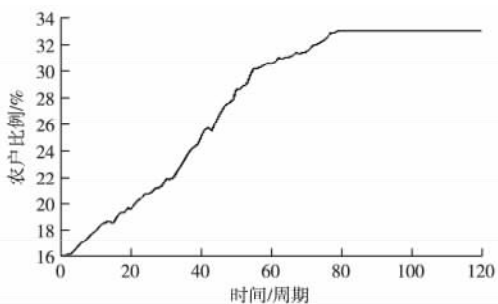


图 12 园区带动生态化种植农户比例随时间的变化

Fig. 12 Changes of proportion of eco-farming households in the park with time

## 4 讨论与结论

系统中的产品链使园区中的产品供销得到保证,产品链网更加稳定,还可充分利用地理优势,节约物流成本。共生链的形成使系统中的废物转变为原料,得到了有效利用,不仅提高了系统的经济效益,也减少了资源的浪费和污染的排放,使环境效益得到提高。此外,因共生链而产生的企业也为系统增加了就业,提高了社会效益。具体表现如下:

(1) 农工复合生态工业园的 Agent 模型仿真结果显示,园区的产值和利润都保持稳定增长并趋于平稳,其中第 24 周期后增速加快,得益于共生企业的加入和发展带来的产品和废物交换,相应地,园区内交易额也急速增长;第 80 周期后,上述 3 个指标均在稳定增长后保持平稳发展,这是由企业产能上限带来的系统稳定。增长的波动是由于企业产量的调整和市场的不稳定性所致。园区中产品和废物交换不仅使园区产值增加,还使废物得到有效的资源化利用,节省大量原材料,为园区带来良好的经济效益。

(2) 园区中的废物综合利用率从第 24 周期开始直线增长,是由于第 24 周期前后大量共生企业加入园区,废物交换的发生使得大量废物得到资源化利用;第 80 周期后废物交换保持平稳,因此废物综合利用率平稳发展,达到 47%。废物的综合利用有效地减少了园区中废物对环境的污染。

农药和化肥的使用是导致农业面源污染的重要因素。园区中与企业签订订单合同的农户进行生态化种植,种植过程中的农药、化肥和有机肥施用均严格按照订单合同执行,企业安排专业指导人员为农户提供农药,规定农户使用有机肥并搭配少量化肥进行种植。未与企业签订订单的农户自主选择农药、化肥和有机肥的种类和用量。生态化种植的产品价格高于普通种植产品,并且政府将对生态化种植的农户提供补贴。园区中单位产值农药施用量呈逐渐下降趋势,单位产值化肥施用量也逐渐下降,单位产值有机肥施用量呈上升趋势,当系统发展成熟以后都保持平稳发展。园区中农药、化肥的有效控制和有机肥施用的大力推进为减少农业面源污染做出贡献。

(3) 园区中企业队伍的不断扩大大为当地创造了更多的就业岗位;园区带动生态化种植农户比例随着仿真运行周期的增加而增加,这表明“企业+农户”订单合作形式吸引越来越多的农户选择生态化种植道路;直到仿真进行到约第 80 周期该比例保持

稳定,这是由于农户与企业签订的订单数量受到企业产能的限制。

所构建的农工复合型生态产业园系统是在现有工业园雏形上延伸和拓展而来,由于能力限制,模型构建过程中忽略部分企业和现实因素,与园区的实际现实情况有一定差距。在抽象构建农工复合型生态产业园 Agent 模型框架时,着重考虑系统中的产品和废物交换过程,并未将系统中的水循环和能量流等过程纳入研究范围。从系统建模与仿真角度来研究农工复合型生态产业园,需要大量的数据来支持模型的建立与仿真,所需数据多为实地调研数据,可获得性难度大,因此个别数据的获得采用了网络调研方式,与系统的实际情况有差异。该文不足之处还需更进一步的研究与完善。

#### 参考文献:

- [1] FROSCHE R A, GALLOPOULOS N E. Strategies for Manufacturing [J]. *Scientific American*, 1989, 261(3): 144 - 152.
- [2] 袁增伟, 毕军. 产业生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 35 - 43.
- [3] 石磊. 工业生态学的内涵与发展 [J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3356 - 3364.
- [4] 刘瑞权, 刘晶茹, 赵秀丽, 等. 农工共生型虚拟生态产业园构建研究 [C] // 2012 中国可持续发展论坛 2012 年专刊 (一). 北京: 中国人口·资源与环境, 2013: 165 - 169.
- [5] 罗批, 司光亚, 胡晓峰, 等. 基于 Agent 的复杂系统建模仿真方法研究进展 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2003, 14(1): 78 - 82.
- [6] TEFATSION L. Agent-Based Computational Economics: Modeling Economies as Complex Adaptive Systems [J]. *Information Sciences*, 2003, 149(4): 262 - 268.
- [7] GIACHETTI R E, MARCELLI V, CIFUENTES J, et al. An Agent-Based Simulation Model of Human-Robot Team Performance in Military Environments [J]. *Systems Engineering*, 2013, 16(1): 15 - 28.
- [8] 蒋雯, 郝时雄. 基于 Agent 理论的工业设计系统研究 [J]. *现代制造工程*, 2003(3): 12 - 14.
- [9] MACMILLAN W, HUANG H Q. An Agent-Based Simulation Model of a Primitive Agricultural Society [J]. *Geoforum*, 2008, 3(2): 643 - 658.
- [10] BICHRAOUI N, GUILLAUME B, HALOG A. Agent-Based Modeling Simulation for the Development of an Industrial Symbiosis- Preliminary Results [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, 17: 195 - 204.
- [11] 李健, 魏增强. 基于 MAS 的生态工业系统信息模型 [J]. *中国农机化*, 2010(4): 49 - 52, 41.
- [12] 王如松, 蒋菊生. 从生态农业到生态产业: 论中国农业的生态转型 [J]. *中国农业科技导报*, 2001, 3(5): 7 - 12.
- [13] COLMAN A M. The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration [J]. *Complexity*, 1998, 3(3): 46 - 48.
- [14] 芮俊伟, 周贝贝, 钱谊, 等. 生态工业园区生态效率评估方法研究及应用 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(4): 466 - 470.
- [15] 梁丽红, 钱谊, 孙靖, 等. 生态工业园建设水平的定量评估方法介绍及应用 [J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 326 - 328.

作者简介: 黄义乔 (1989—), 女, 四川德阳人, 硕士生, 主要研究方向为产业生态学。E-mail: huang\_yiqiao@126.com

(责任编辑: 李祥敏)