

# 复杂系统顶点赋权因果关系图模型及其应用研究

王翠霞<sup>1,2</sup>, 贾仁安<sup>\*</sup> (1. 南昌大学系统工程研究所, 江西南昌 330047; 2. 江西财经大学信息管理学院, 江西南昌 300013)

**摘要** 构建了介于系统动力学因果关系图模型和流图模型之间的中间模型——复杂系统顶点赋权因果关系图模型, 提出定性与定量相结合的复杂系统顶点赋权因果关系图分析法。通过一个以生猪规模养殖为主体的农业生态系统可持续发展的反馈分析案例, 演示了利用其对系统进行定性与定量相结合的系统分析的基本步骤及优势。

**关键词** 系统动力学; 复杂系统; 顶点赋权因果关系图; 生猪规模养殖; 兰坡村农业生态系统

中图分类号 N941.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2007)06-01574-03

## Research on the Vertex Weighted Causal Loop Diagram Model of Complex System and its Application

WANG Cui-xia et al (Institute of System Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047)

**Abstract** A midst model between Causal Loop Diagram model and Level Rate Diagram model of System dynamics was constructed in this paper, which was named the Vertex Weighted Causal Loop Diagram model. A case of feedback analysis of sustainable development of a scale pig breeding dominating agro-ecosystem was presented to illustrate the predominance and the detailed steps for how to implement a qualitative and quantitative combined analysis by the approach of vertex weighted causal loop diagram model.

**Key words** System dynamics; Complex System; Vertex Weighted Causal Loop Diagram; Pig breeding; Lanpo agro-ecosystem

系统动力学理论是一种以反馈控制理论为基础, 以计算机模拟技术为手段, 通常用以研究复杂的社会经济系统的定量理论<sup>[1-2]</sup>。

系统动力学模型从系统内部的动态结构与反馈机制出发进行系统思考, 能看清复杂现象背后的本质, 是分析研究非线性复杂大系统和进行科学决策的一种有效的理论、方法和手段<sup>[3-4]</sup>, 被称为社会、经济、生态等复杂大系统的实验室, 其应用遍及深入到各个领域。然而系统动力学模型的方程形式灵活, 福瑞斯特等虽然总结出了从结构入手的一些基本方程建立方法<sup>[5]</sup>, 但由于复杂系统其结构流图涉及变量众多, 变量之间错综复杂的因果关系有时难以用数学方程式表达, 其中存在大量模糊概念, 且有的变量之间的关系完全依赖于试验数据, 许多系统动力学建模者尝试与其他理论相结合建立模型方程, 取得了一些理论成果<sup>[6-12]</sup>, 但系统方程的建立仍是一个十分困难的问题, 而且方程的可靠性也无法检验。至今为止, 系统动力学仿真方程式的建立问题成为制约系统动力学定量分析应用发展的瓶颈。

基于此, 笔者构建了复杂系统顶点赋权因果关系图, 提出定性与定量相结合的复杂系统顶点赋权因果关系图分析法, 并通过一个以生猪规模养殖为主体的农业生态系统可持续发展的反馈分析案例, 演示了利用系统的顶点赋权因果关系图分析法对系统进行分析的基本步骤。

## 1 复杂系统顶点赋权因果关系图的概念及其作用

### 1.1 定义

**1.1.1 定义1。** 设时间区间  $T$  上的因果关系图  $G(t) = [V(t), X(t), F(t)]$ , 若由顶点关联弧的关联关系、试验数据或顶点的实际意义等, 给出了  $T$  上某一时刻顶点集  $V(t)$  上所有顶点的值, 代入因果关系图, 所得的具有顶点值的因果关系图称为该时刻的顶点赋权因果关系图, 记作  $D(t) = [V(t), X(t), F(t)]$ 。

**1.1.2 定义2。** 通过建立系统问题的顶点赋权因果关系图模型对系统问题进行分析的方法称为系统的顶点赋权因果关系图分析法。

**1.2 复杂系统顶点赋权因果关系图分析法对系统进行分析的基本步骤** 步骤1。确定系统中要分析的问题。步骤2。建立时间区间  $T$  上问题发展变化的因果关系图  $G(t) = [V(t), X(t), F(t)]$ 。步骤3。对时间区间  $T$  上问题发展变化的因果关系图  $G(t) = [V(t), X(t), F(t)]$ , 给定  $t \in T$ , 确定一关键顶点值, 然后对其余顶点  $V_i(t) \in V(t)$ , 通过  $V_i(t)$  相关弧  $X_{ij}(t)$  的方程, 或  $V_i(t)$  的试验数据, 或其实际意义等, 计算出  $V_i(t)$  的对应值。将所有顶点的值代入因果关系图, 建立刻画系统问题的顶点赋权因果关系图  $D(t) = [V(t), X(t), F(t)]$ 。步骤4。综合建立顶点赋权因果关系图模型的过程, 形成解决系统问题的管理方针及对策。

## 2 复杂系统顶点赋权因果关系图分析法的应用

**2.1 兰坡村农业生态系统问题的确定** 笔者所选择的分析案例为兰坡村农业生态系统。兰坡村地处井冈山西域, 隶属于江西省萍乡地区, 系统以泰华生猪养殖场规模养殖为主体, 猪场自繁自养, 养殖模式为井冈山西域乃至整个中部地区较典型的丘陵小流域内集约化养猪模式。2005年出栏生猪3000余头, 猪舍建在兰坡自然村较高的坡地上, 面积约21000 m<sup>2</sup>, 猪舍南面有一面积约0.4 hm<sup>2</sup>的池塘, 池塘下有清水灌溉沟渠, 沟渠流经13.3 hm<sup>2</sup>水稻田, 邻近有旱地近16.7 hm<sup>2</sup>。猪场先后建设了共计270 m<sup>3</sup>的3个小型沼气池, 对养殖粪便进行治理, 现已解决了猪粪水的直接排放污染问题。但其厌氧发酵产生的沼气和沼液却因用户、资金、自有土地缺乏等原因长年直接排放, 沼气剩余部分直接排入大气, 沼液与灌溉用水混流不断进入沿途的稻田, 水稻由于过肥而出现“青苗”现象, 影响了产量, 剩余沼液还通过水沟被排入下游水域, 且在近7个月的农闲季节, 沼液全部沿灌溉水渠流入下游水域, 对沿途及下游水域造成了严重污染。

**2.2 系统因果关系图的确定** 笔者设定  $T$  为泰华猪场270 m<sup>3</sup>沼气池已建成并投入使用的的时间区间。经分析, 系统因果关系图(图1)由14个变量即顶点构成, 存在4条正反馈环(以表示), 4条负反馈环(以表示)。

基金项目 国家自然科学基金(70361002)。

作者简介 王翠霞(1968-), 女, 江西德兴人, 在读博士, 讲师, 从事管理科学与系统动力学的教研工作。\* 通讯作者, 博士生导师, 教授。

收稿日期 2006-11-24

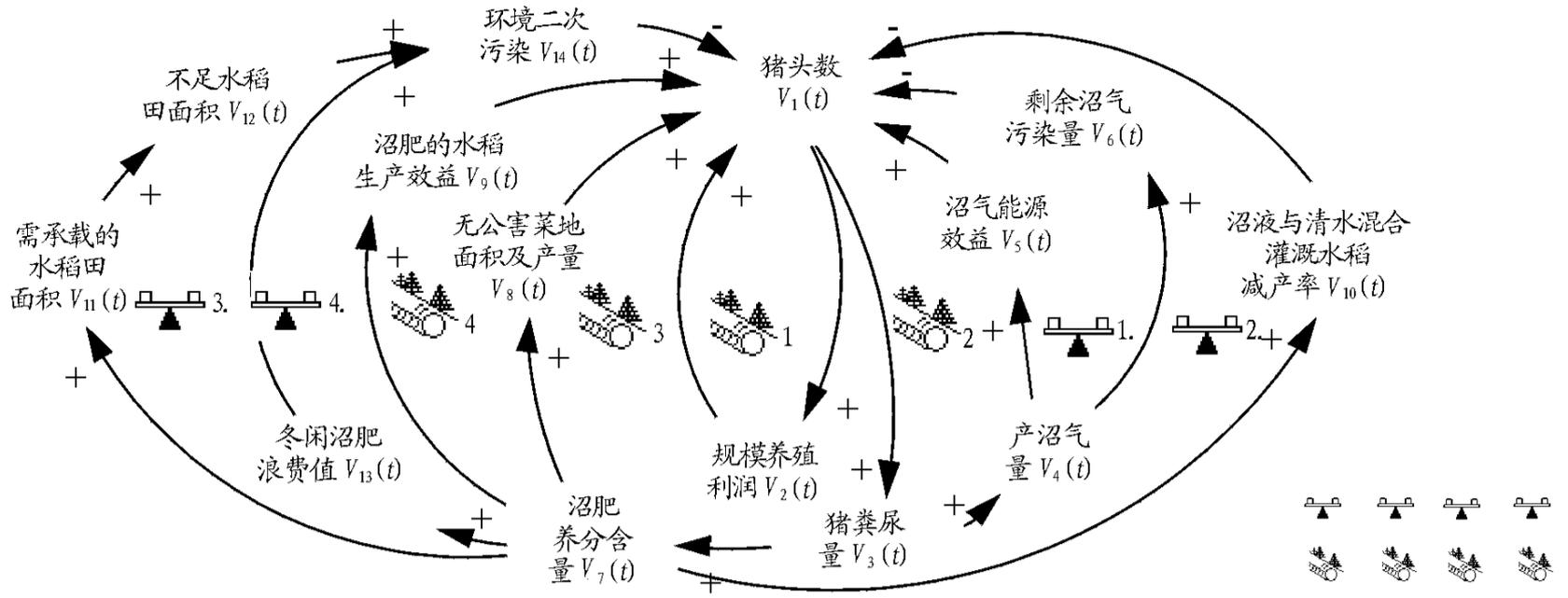


图1 兰坡村以生猪规模养殖为主体的农业生态系统因果关系图

2.3 系统因果关系图各顶点权值的确定及顶点赋权图模型

2.3.1 顶点权值的确定。为了深入刻画兰坡村以生猪规模养殖为主体的农业生态系统存在的问题,在图1所示的因果关系图基础上,取 $t = 2005$ 年,从关键变量年出栏生猪数开始,对此时每个顶点 $v_i(t) \in V(t)$ ,通过 $v_i(t)$ 相关弧 $x_{ij}(t)$ 的方程,或 $v_i(t)$ 的试验数据,或其实际意义等,确定描述各顶点 $v_i(t)$ 的指标并计算出对应值,限于篇幅,不便列出所有14个顶点权值的计算过程,在此仅举例说明。例如已知2005年泰华猪场年出栏生猪3000头,则规模养殖生猪数 $v_1(t) = 3000$ 头/年;规模养殖年利润值 $v_2(t)$ 的计算可通过图1中顶点 $v_2(t)$ 的关联因果链: $v_1(t)$ 规模养殖生猪数 $\pm v_2(t)$ 年规模养殖利润,并根据实际建立的自繁自养模式下的养殖利润公式:平均每头生猪的利润(元/头) = 商品猪价格 $\times$ 每头重量 - (平均每头饲料成本 + 平均每头人工成本 + 平均每头水电成本 + 平均每头防疫成本 + 平均每头母猪平摊成本 +

平均每头设备折旧平摊成本),参照泰华猪场近10年的统计数据计算得出; $v_5(t)$ 顶点年产沼气能源效益的指标的确定则是由于随着向市场经济的过渡,农村地区所消费的能源正逐步由生物质一次能源主导型向商品能源主导型转化,目前我国中部地区农村生活用燃料以煤炭、薪柴为主,因此选择沼气替代燃煤,利于能源的可持续发展、减少薪柴砍伐,利于农村水土保持、环境治理、减少农民生活用能支出,减轻农民负担方面选择年产沼气煤当量、薪柴当量、沼气能源效益值3个指标计算泰华猪场每年产生的42979 m<sup>3</sup>沼气的能源效益;而过剩沼液二次环境污染量各指标的选取是参照《畜禽养殖业污染物排放标准》,其值则是由2006年5月实测数据所得。

2.3.2 顶点赋权因果关系图模型。将计算的各顶点的对应值代入图1得兰坡村规模养殖年出栏3000头时的农业生态系统顶点赋权因果关系图(图2)。

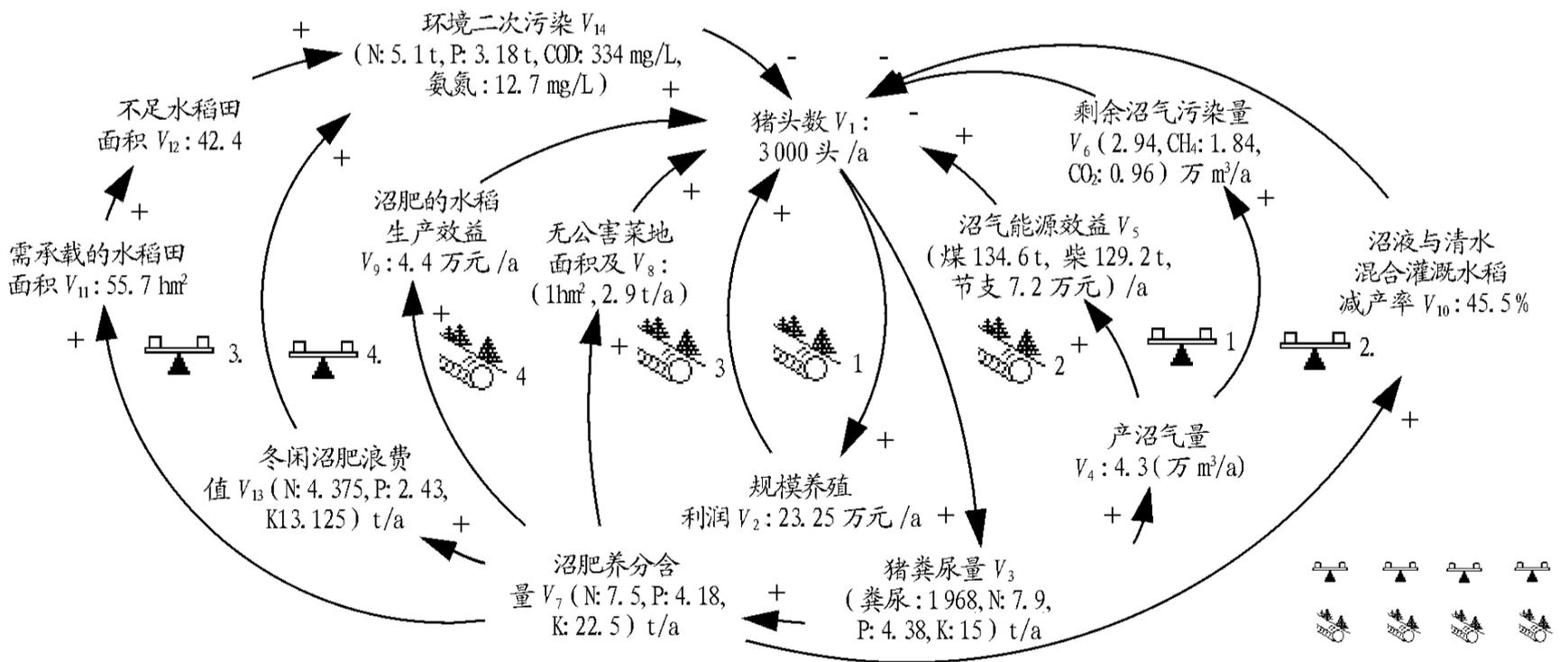


图2 兰坡村规模养殖年出栏3000头时的农业生态系统顶点赋权因果关系图

图2中4个正反馈环各顶点值深刻揭示了系统内规模养殖年出栏3000头时,可获利润23.25万元( $V_2$ );对每年产生的1968 t猪粪尿( $V_3$ )采用沼气技术厌氧发酵,能产生4.3万m<sup>3</sup>的沼气( $V_4$ )及含氮磷钾分别为7.5、4.18、22.5 t的高品质有机肥( $V_7$ );沼气可替代134.6 t燃煤或129.2 t薪柴用作生活用燃料,全年可节约7.2万元的燃料费用支出( $V_5$ );沼肥可替代化肥用于水稻及蔬菜的种植( $V_9$ 、 $V_{10}$ ),促进种植业

的发展。4个负反馈环各顶点值以实际的数据具体地刻画了年出栏3000头养殖规模下,系统内存在的剩余沼气排放产生大气污染、沼液与清水混流使水稻减产、由于承载农田面积的不足及冬闲季节农田的闲置等原因产生的二次污染程度,这四方面的负反馈作用,严重破坏了兰坡村农业生态系统,制约着种植业与养殖业的可持续发展。

3 年出栏1万头的顶点赋权因果关系图及其变化的分析

图2 中各顶点值刻画的是 $t = 2005$  年关键变量生猪年出栏数量 $V_1(t) = 3\ 000$  头/a 时系统变量的值。当生猪年出栏数量增加时,系统各顶点值将随之改变。当养殖规模扩大到

年出栏1 万头,按同样方法可计算各顶点值,代入图1 得年出栏生猪1 万头时的顶点赋权因果关系图(图3)。

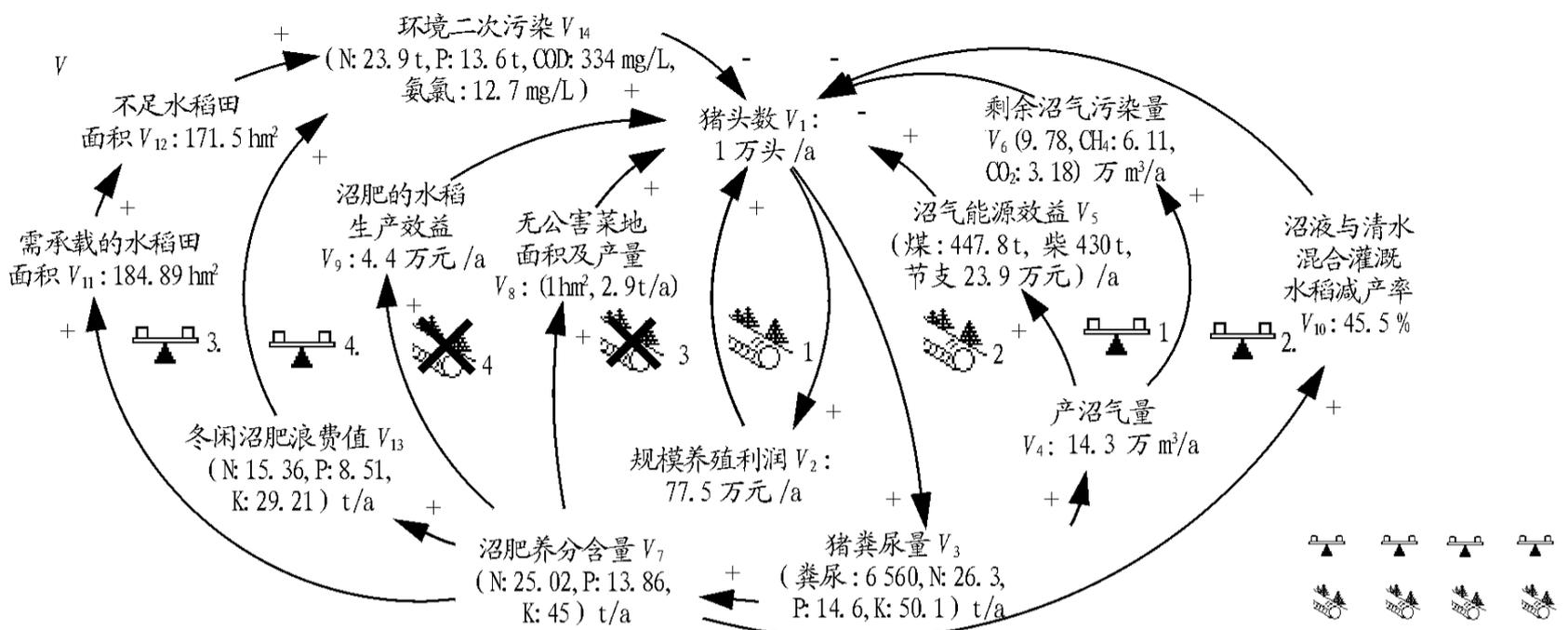


图3 兰坡村规模养殖年出栏1 万头时的农业生态系统顶点赋权因果关系图

### 3.1 分析四个正反馈环的变化

**3.1.1 正反馈环1( 1)** 为利润正反馈环。规模养殖的直接动力是利润,这是一个主导反馈环。当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头,增长233%时,反馈环中规模养殖利润 $V_2(t)$ 由23.25 万元/a(图2)增至77.5 万元/a(图3),增长率233%,揭示出在商品猪市场售价稳定的条件下,养殖利润与生猪出栏数按同比例增长,这是此正反馈环的一个重要特性。

**3.1.2 正反馈环2( 2)** 为沼气能源效益正反馈环。当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,反馈环中沼气潜在的能源效益 $V_5(t)$ ,其年产沼气的煤当量由334.6 t/a(图2)增至447.8 t/a(图3),薪柴当量由129.2 t/a(图2)增至430 t/a(图3),沼气潜在能源收入由7.2 万元/a(图2)增至23.9 万元/a(图3),三项增长率均达233%,与生猪出栏数按同比例增长,说明此正反馈环中生猪出栏数与沼气能源效益的正反馈作用按同比例加强。

**3.1.3 正反馈环3( 3)** 为无公害蔬菜地面积及产量正反馈环。由于农户自给蔬菜地面积保持不变,3 000 头的沼液已足够蔬菜种植的需要,其产量也保持不变,所以养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,此正反馈环失去正反馈作用。

**3.1.4 正反馈环4( 4)** 为沼肥替代化肥、农药用于水稻生产效益正反馈环。同样由于水稻田面积未因生猪养殖规模的增加而改变,仍保持13.3  $\text{hm}^2$  不变,当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,沼肥替代化肥农药用于水稻生产效益也保持4.4 万元/a 不变,此反馈环失去正反馈作用。

### 3.2 四个负反馈环的变化

**3.2.1 负反馈环1( 1)** 为剩余沼气污染量制约反馈环。当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,反馈环中剩余沼气的量,由2.94 万 $\text{m}^3$ /a(图2)增至9.78 万 $\text{m}^3$ /a(图3),增长率233%,其中所含甲烷、二氧化碳按同比例增长,即剩余沼气污染量对养殖规模扩大的制约作用按同比例增强。

**3.2.2 负反馈环2( 2)** 为沼液与清水混流灌溉使水稻减产负反馈环。反馈环中年出栏3 000 头时减产率45.5%为一

实测数据,当养殖规模增至1 万头时,其值暂不能确定,但可以肯定若不采取任何其他有效措施,此值一定会大于45.5%,即此负反馈环的制约作用将加强。

**3.2.3 负反馈环3( 3)** 为因消纳沼液水稻田面积不足造成环境二次污染负反馈环。此反馈环中,由于水稻田面积未因生猪养殖规模的增加而增加,致使消纳沼液水稻田的不足面积由原42.4  $\text{hm}^2$  增至184.8  $\text{hm}^2$ ,增长率达336%,对生猪养殖规模扩大的制约力度增加。

**3.2.4 负反馈环4( 4)** 为冬闲季节沼肥浪费,N、P 流失造成环境二次污染而制约生猪养殖规模扩大的负反馈环。近7 个月的冬闲季节,水田不需灌溉,沼肥除极少一部分被农户用于闲散菜地浇灌外,绝大部分不被利用,造成极大的资源浪费。当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,浪费流失的氮由每年4.375 t(图2)增至15.36 t,磷由每年2.43 t(图2)增至8.51 t,对生猪养殖规模扩大的制约力度增加。

综上所述,当养殖规模由年出栏3 000 头增至1 万头时,4 条正反馈环其中有2 条因系统内现有土地资源有限而失去正反馈作用,而4 条负反馈环对生猪规模养殖的制约作用增强。

### 4 基于顶点赋权因果关系图分析法的农业生态系统可持续发展管理对策

**4.1 对策1:** 在发展生猪规模经营,实现农民增收时,考虑生态成本,强调适度规模 “农业、农村、农民”问题是我国发展急待解决的问题,而解决“三农”问题的核心是转变经济增长方式,促进农民增收。图2.3 的正反馈环 1 反映出在商品猪售价不变的条件下,当年出栏生猪数为3 000 头时,规模养殖利润为23.25 万元/a,年出栏1 万头时,规模养殖利润为77.5 万元/a,由此可见养殖规模的扩大有利于提高养殖利润,应该扩大养殖规模。

然而,笔者在计算养殖利润时,未考虑环境污染治理成本,长期以来人类无成本地使用着自然资源,肆意地向环境排放废弃物,致使生态环境急剧恶化。为此建议在发展生猪

(下转第1596 页)

(上接第1576页)

规模经营,计算养殖利润时计入生态成本,考虑环境对废弃物的消纳能力,强调养殖的适度规模。

**4.2 对策2:**加大沼气工程的开发力度,提高沼气和沼液利用资源的使用效率。图2和图3顶点 $V_2(t)$ 值揭示养殖规模若由3000头增至1万头(增长233%),则猪场的年粪尿产出也将相应增加233%,定量正反馈环2的变化清晰地显示了猪粪尿通过沼气技术可开发的潜在再生生物质能源价值。但4条负反馈环的顶点值变化又深刻地昭示了沼气、沼肥由于用户不足、承载农田面积不足及冬闲季节农田的闲置等问题更加突出,而致使二次污染程度加剧,4条负反馈环的制约力度随养殖规模的扩大而加强。要解决这一瓶颈问题,促使兰坡村农业生态系统的可持续发展,对于仍不富裕的中部农村来说,高额的投资与运行成本是无法承受的,而一味地限制养殖数量又不利于农民增收。因而建议针对当地的自然生态环境条件,充分开发和提高系统内资源的使用效率。如泰华猪场,可利用其系统内还未开发的 $16.7\text{ hm}^2$ 的旱地和 $13.3\text{ hm}^2$ 冬闲田,开发“猪-沼-菜(果)”工程,增强种植业发展对规模养殖的正反馈作用,即增强3、4的反馈力度,这不仅能极大地提高系统对沼肥的消纳能力,使水稻、蔬菜种植效益正反馈环恢复,又能有效地治理过剩沼肥的污染,而且绿色无公害水稻、蔬菜产业的发展能为农民带来可观的收入,同时也为养殖业规模的进一步扩大提供环境保障,使整个农业生态系统良性循环、可持续发展。

**4.3 对策3:**实行沼液与灌溉用清水分流工程,从根本上解决水稻青苗减产的问题。系统顶点赋权因果关系图2和图3负反馈环2,揭示了由于生猪规模养殖猪粪尿剧增,沼肥流入灌溉水渠,使水稻因沼肥过度灌溉而“青苗”减产,3000头时减产率就已高达45.5%,1万头时将更高,因此,必须进行规划、投入,解决灌溉问题。建设专用沼液管道,实施沼液与灌溉用水分流是一有效而又可行的措施,泰华

猪场的实践证明,沼液与灌溉用水分流工程,能从根本上解决因沼肥过度灌溉而导致的水稻青苗问题。

## 5 结论

复杂系统顶点赋权因果关系图模型,是在因果关系图基础上进行定性与定量相结合的模型,通过不同时期模型顶点权值的比较分析,揭示系统的结构变化规律,有针对性地提出管理对策。案例兰坡村以生猪规模养殖为主体的农业生态系统的系统顶点赋权因果关系图分析,揭示了复杂系统顶点赋权因果关系图模型作为系统动力学因果关系图模型和流图模型之间的中间模型,具有以下优势与作用:可直接从顶点赋权深度对问题进行因果关系分析;可对某些试验性较强,建立系统变量仿真方程困难的问题进行定量因果关系分析;通过对系统在某些时刻关键变量的表象的定量分析,为用流图模型对系统进行整体仿真研究提供建立系统变量仿真方程的信息积累。

## 参考文献

- [1] FORRESTER JAY W. Industrial dynamics [M]. Portland OR, USA: Productivity Press, 1961.
- [2] 王其番. 高级系统动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [3] PETER MS. The fifth discipline the art and practice of the learning organization [M]. Great Britain: Century Business, 1993.
- [4] WANG QI-FAN, NING XIAO-QIAN, YOU JION. Advantages of system dynamics approach in managing project risk dynamics [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2005, 44(2): 201 - 206.
- [5] 贾仁安, 丁荣华. 系统动力学—反馈动态性复杂分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [6] 贾仁安, 徐南孙, 伍福明, 等. 作流率基本入树嵌运算建立主导结构反馈模型 [J]. 系统工程理论与实践, 1999(7): 69 - 76.
- [7] 贾仁安, 伍福明, 徐南孙. SD 流率基本入树建模法 [J]. 系统工程理论与实践, 1998(6): 18 - 23.
- [8] 胡玲, 贾仁安. 强简化流率基本入树模型及枝向量矩阵反馈环分析法 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(11): 83 - 88.
- [9] 贾仁安, 胡玲, 丁荣华, 等. 系统动力学简化流率基本入树模型及应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(10): 137 - 144.
- [10] 程进, 王华伟, 何祖玉. 基于遗传算法的系统动力学仿真模型研究 [J]. 系统工程, 2002, 20(3): 77 - 80.
- [11] 林文浩. 系统动力学模型关键参数的遗传算法估计 [J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2002, 31(3): 404 - 407.
- [12] 张林刚, 严广乐, 路晓伟. 系统动力学模型结构分析中表函数的改进方法 [J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(9): 303 - 308.