

文章编号:1003-207(2018)01-0186-11

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.01.019

# 德邦规模养种系统发展对策的关键变量 关联反馈环分析

贾伟强<sup>1</sup>, 王 雯<sup>1</sup>, 贾仁安<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学经济管理学院, 江西 南昌 330063; 2. 南昌大学系统工程研究所, 江西 南昌 330031)

**摘 要:**反馈环结构是复杂系统发生动态变化的核心结构,反馈环结构分析是复杂系统具体管理对策确定的关键。如何对反馈环结构进行流程化分析,实现有效的反馈环开发管理是待深入研究的重要问题。针对以上问题,提出了关键变量关联反馈环四步分析法:首先,利用系统动力学新的入树建模法,构建系统的流率基本入树模型;接着,根据系统发展目标,确定研究的关键变量;然后,用枝向量行列式算法计算出系统全部反馈环,构建关键变量关联反馈环结构流图,确定关联反馈环结构流图主导反馈环;最后,依据关键变量主导反馈环分析,确定管理对策。以德邦规模养种系统发展为例,建立了刻画此复杂系统的含六棵入树的流率基本入树模型。根据系统发展的 3 大目标,确定养殖利润、年种植有机肥施用量、户猪粪年产沼液量 3 个关键变量。在构建 3 个关键变量关联反馈环结构流图基础上,根据德邦规模养种系统发展实践,结合德邦养殖业、沼液资源开发、户用沼气池建设的历史数据,确定 3 个关联反馈环结构流图的主导反馈环。最后,根据主导反馈环分析,确定了系统发展的 3 条管理对策。德邦规模养种系统实施管理对策的实践,验证了 3 条管理对策的有效性,验证了此方法在确定复杂系统管理对策中的可行性。关键变量关联反馈环四步分析法,为反馈环结构分析提供了一种规范性的方法,为复杂系统发展管理对策的制定提供一个可操作的流程。

**关键词:**关联反馈环;反馈动态复杂性;规模养种系统;系统动力学

中图分类号:N949

文献标识码:A

## 1 引言

系统开发是充分认识系统结构,提高系统各部分相互促进的推动力,降低或消除相互依赖的制约力,以增强系统功能。Richardson<sup>[1]</sup>认为反馈环结构是系统内生性的关键,有助于解释动力学模型内观察到的现象。因此,认清系统结构中众多的正、负反馈环的交互作用,才能了解系统的复杂性行为,进行反馈环开发管理。系统动力学的创始人 Forrester<sup>[2]</sup>在系统动力学创建 50 周年年会上强调:系统动力学前 50 年对反馈环技术研究存在不足,下一个 50 年系统动力学研究特别要进行反馈结构的深入研究。

建立反馈环流图模型进行仿真分析,以仿真结果为政策制定提供参考是系统动力学最为广泛的应用。张俊荣等<sup>[3]</sup>构建了京津冀碳排放交易政策仿真模型,探索不同的碳交易机制设计对京津冀地区经济和环境的影响。仲勇等<sup>[4]</sup>建立大型建筑工程项目多资源配置的系统动力学模型,仿真研究了大型建筑工程项目多类型资源的有效配置问题。于宝琴等<sup>[5]</sup>构建了物流服务质量下的配送及时率系统动力学枝模型,对申通、圆通、中通以及韵达四家快递企业进行网购快递物流服务的测评。Madahian 等<sup>[6]</sup>建立关于儿童肥胖问题的仿真分析模型,评估了不同食物摄入量、能量消耗等对儿童肥胖的影响。Bleijenbergh 等<sup>[7]</sup>利用系统动力学模型仿真研究教师雇佣决策中,如何平衡教师性别问题。Villa 等<sup>[8]</sup>在不同订货量和供应商容量下,探讨了延迟下的零售商订货决策。利用反馈环基模进行管理方针生成研究,利用反馈环构建的子系统基模进行仿真研究重要的反馈环分析技术。Senge<sup>[9]</sup>创建了 8 个反馈基模刻画和解释了组织管理中复杂现象的结构原

收稿日期:2016-06-06; 修订日期:2017-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71361022, 71261018);  
航空科学基金项目(2015ZG56029);江西省教育厅高  
校人文社科项目(GL17332)

通讯作者简介:王雯(1990-),女(汉族),江苏连云港人,南昌航空大学经济管理学院硕士研究生,研究方向:管理科学与系统动力学;E-mail:929923938@qq.com.

因,贾仁安等<sup>[10]</sup>、贾伟强等<sup>[11]</sup>拓展了反馈基模的概念,给出了一个确定复杂系统极小反馈基模集的计算技术,进而由极小反馈基模进行管理对策的生成研究。丁雄等<sup>[12]</sup>利用子系统流位反馈环结构分析,生成银河杜仲经济生态系统现代农业区发展对策。Hayward和Boswell<sup>[13]</sup>利用反馈环或反馈环组合,量化反馈环的强度以洞察系统的结构、行为。Kumar等<sup>[14]</sup>通过子系统仿真分析,研究了社区清洁烹饪动态系统的反馈机制,探讨实施有效干预措施的可能性。王翠霞等<sup>[15]</sup>通过系统反馈基模仿真分析,定量论证了规模养殖生态系统管理策略的必要性和效益。

这些反馈动态复杂性的研究中未涉及反馈环的结构分析,而这是系统具体管理对策确定的关键。本研究针对系统发展关键变量全体反馈环,结合实践确定系统动态变化中的起主要支撑作用的主导反馈环及其运作效应,根据反馈环的性质、反馈环结构构成的因果链分析,生成改善反馈环运作效应的管理对策,进行增强系统功能的反馈环开发管理。此创新的方法为反馈环结构分析提供了一种规范性的方法,对复杂系统发展对策的制定具有普遍意义。

## 2 关联反馈环分析法

### 2.1 基本概念

定义1 针对系统发展中的关键变量,建立含关键变量的全体反馈环构成的关联反馈环结构,利用正、负反馈环中变量反馈动态变化特性,进行增强系统功能的管理称为反馈环开发管理。

正反馈环具有变量反馈后同增(减)动态变化特性,负反馈环具有变量反馈后反增(减)动态变化特性。因此,正反馈环结构可形成良性或恶性循环效应。即当正反馈环中某一变量所刻画的情况改善(恶化)时,正反馈的作用将促进情况进一步改善(恶化);负反馈结构可形成制约与调节效应。即当负反

馈环中某一变量所刻画的情况改善(恶化)时,负反馈的作用将制约(调节)情况进一步改善(恶化)。

反馈环开发管理即是利用反馈环中变量反馈动态变化特性,生成促进系统发展的管理对策,实施管理对策增强系统的功能。

定义2 若存在 $K(K > 1)$ 条反馈环相交于同一变量 $V(t)$ ,则称此 $K(K > 1)$ 条反馈环为变量 $V(t)$ 的关联反馈环。

定义3 若变量 $V(t)$ 关联 $K(K > 1)$ 条反馈环,某一时间区间内在系统动态变化中起主要支撑作用的反馈环,称为变量 $V(t)$ 在此时间区间内的主导反馈环。

### 2.2 关联反馈环分析法及其步骤

定义4 在复杂系统发展的反馈环开发管理中,建立系统流率基本入树模型,确定研究的关键变量,确定关键变量的主导反馈环,最后确定系统发展管理对策的分析方法称为关键变量关联反馈环分析法。

关键变量关联反馈环分析法的步骤如下:

步骤1 构建系统流率基本入树模型。

首先,通过科学理论、数据、经验及专家判断力四结合进行系统分析,确定描述系统状态的流位变量;然后,利用流率基本入树建模法构建系统流率基本入树模型。

步骤2 根据系统发展目标,确定研究的关键变量;

步骤3 确定关键变量的主导反馈环。

首先,用枝向量行列式算法计算出系统结构中全部反馈环;其次,确定关键变量的关联反馈环结构流图。最后,确定关联反馈环结构流图主导反馈环。

步骤4 确定系统发展的管理对策。

### 2.3 关联反馈环分析法的逻辑性与科学性

关键变量关联反馈环四步骤分析法,分析步骤的逻辑性强(图1)。

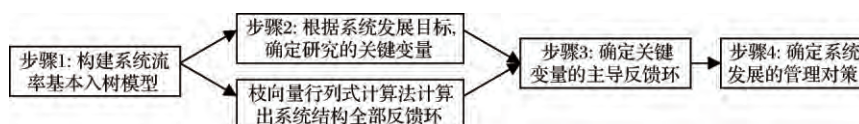


图1 关联变量关联反馈环分析法的逻辑图

在明确系统流位流率系,构建流率基本入树模型的基础上,才可以根据系统发展目标确定研究的关键变量,才可以用枝向量行列式算法计算出系统结构全部反馈环;依据关键变量及全部反馈环,才可

以确定关键变量的关联反馈环结构流图,确定关键变量主导反馈环;依据关键变量主导反馈环,才可以进行主导反馈环分析,确定管理对策。

关键变量关联反馈环四步骤分析法,具有科学

性。步骤 1 中,以钱学森提出的科学理论、数据、经验及专家判断力四结合进行系统分析,确定研究问题的变量边界,建立流位流率系,以流率基本入树建模法建立刻画包括边界中全体变量的流率基本入树模型,实现还原论与整体论相结合原理,提高模型的可靠。步骤 2 中,以系统发展实践为基础,依据系统发展的目标,在包括边界中全体变量的流率基本入树模型中,对流位、流率变量进行深入比较分析,确定关键变量。步骤 3 中,在已建包括边界中全体变量的流率基本入树模型的基础上,用经数学严格证明的枝向量行列式算法计算出系统结构中全部反馈环,确定关键变量的关联反馈环结构流程图,确定关联反馈环结构流程图主导反馈环。步骤 4 中,依据反馈环结构是复杂系统发生动态变化的核心结构,主导反馈环又是动态变化中的起主要支撑作用的反馈环,依据关键变量起主要支撑作用的反馈环进行分析,确定管理对策。因此,关键变量关联反馈环四步骤分析法具有科学性。

### 3 德邦规模养种系统概况及系统流率基本入树模型构建

#### 3.1 德邦区域规模养种系统概况

德邦牧业有限公司(简称德邦牧业)地处江西省鄱阳湖地区九江市德安县高塘乡,是由公司、大学、政府、农户共同参与建设的生态能源经济区,建设面积 66.67 hm<sup>2</sup>。生态经济区由德邦牧业 2005 年投资 178 万元建立,后逐步扩大规模发展而成的生猪养殖公司。

##### 3.1.1 德邦区域规模养种系统发展中的问题是社

会性问题

对德邦牧业规模养种系统发展的研究涉及农业生态环境保护、农产品供给侧结构性改革、解决“三农”问题等社会性问题。

规模养殖过程中粪尿等养殖废弃物过度集中排放,带来规模养殖的初次污染。沼气工程可有效解决养殖废弃物污染,但厌氧发酵产出物沼液、沼气会造成二次污染,在养殖区土壤、水源、空气受污染事件时有发生,养殖污染治理是关系农业生态环境保护的社会性问题。

沼液生物质资源综合开发利用,创新养种循环经济模式,建设“猪—沼液—特色农产品”沼液种植工程,生产绿色有机农产品,是农业供给侧结构性改革的社会性问题。

分散经营的农户规模小、力量弱,在提升养殖区养种循环生态农业经济效益方面受到制约。发挥企业带动、支持作用,实现场户合作发展,事关“三农”问题解决的社会性问题。

##### 3.1.2 德邦区域规模养殖与沼气工程建设概况

2015 年德邦牧业日均存栏 552 头,年出栏生猪 6579 头,实现利润 99 万元。为治理养殖废弃物初次排放污染制约系统发展,养殖场建立了 800 m<sup>3</sup> 立式和 1200 m<sup>3</sup> 塑料沼气池分级生产子系统,建立 200 m<sup>3</sup> 立式储气柜和 150 m<sup>3</sup> 塑料储气柜及 1.6 km 山地沼气管道储存和输送沼气,建立 40 kw 沼气发电站开发利用沼气能源。表 1 为德邦牧业规模养殖与沼气工程厌氧发酵产出物相关数据。

表 1 2010—2015 年德邦牧业生猪养殖相关变量历史数据

年份	日均存栏(头)	年出栏(头)	利润(万元)	年产猪粪(t)	年产猪尿(t)	猪粪尿年产沼液(t)	猪粪尿年产沼气(m <sup>3</sup> )
2010	516	6044	98	271	429	912	15862
2011	528	6285	126	277	439	933	16231
2012	535	6428	77	281	445	946	16446
2013	542	6638	78	285	451	958	16661
2014	482	5858	15	253	401	852	14816
2015	552	6579	99	290	459	975	16968

##### 3.1.3 德邦沼液资源生物链工程开发实施概况

德邦牧业为消除沼液二次污染制约系统发展,利用系统动力学三阶延迟原理,建立了一级 100 m<sup>3</sup>、二级 80 m<sup>3</sup> 与三级 70 m<sup>3</sup> 的三个同类圆形沼液净化池,2.7 km 山地沼液管道,构成沼液三级

储存、净化、延迟传输子系统。基于此,利用沼液生物质资源种植红薯、蔬菜、水稻、板栗、苗木、棉花等,建立“猪—沼液—苗木”、“猪—沼液—粮”、“猪—沼液—菜”等沼液种植工程子系统。表 2 为德邦牧业猪粪尿沼液资源利用情况相关数据。

表 2 2015 年德邦牧业沼液有机肥施用情况数据(单位:hm<sup>2</sup>)

	红薯	蔬菜	水稻	板栗	苗木	饲料	棉花	雷公竹
种植面积	4.0	8.0	53.3	4.0	666.7	0.67	20.0	1.3
施沼肥面积	3.3	2.0	13.3	1.3	576.0	0.67	20.0	1.3

另外,2013 年德邦牧业种植玉米 8.0 hm<sup>2</sup>,由于经济效益低,2015 年不再自营种植玉米。2015 年公司试点种植经济效益高的雷公竹 1.3 hm<sup>2</sup>,规划未来年种植雷公竹 8.0 hm<sup>2</sup>。

3.1.4 德邦场户合作促进户用沼气池发展概况

德邦牧业地处的德安县高塘乡由政府支持建立 300 余户地下式沼气池,但大部分沼气池因缺乏原料未能正常运行。2009 年初,九江市科技局、德安县农业局、德邦牧业、农户联合成立德安县高塘乡沼液沼液开发利用专业合作社,合作社提供进出料车配置、配件供应、沼气池及管路故障维修等服务,促进全乡户用沼气池开发。德邦牧业建立原料发酵贮存池,会员每年付 40 元会费(作为原料运费)即可免费获得德邦牧业猪粪发酵原料,由合作社统一免费运输至户用沼气池。

由于户用沼气池使用效益低、成本高、缺乏维护与生产管理技术等原因,造成大量户用沼气池闲置或报废。从 2009 年场扶持户用沼气池发展以来,至 2015 年高塘乡户用沼气池闲置率达 95%以上,如何提高户用沼气池使用率是目前面临的一个难题。

3.2 德邦规模养种系统流率基本入树模型的反馈环结构

系统动力学模型的基本单元是流位变量直接或通过辅助变量控制流率变量的子图,这种基本单元子图就是流率基本入树。建立流率基本入树模型后,构造对角置 1 枝向量行列式可计算系统全部反馈环。

3.2.1 建立系统流率基本入树模型

基于钱学森提出的科学理论、数据、经验及专家判断力四结合分析,建立德邦规模养种系统流位流率系:

基于循环经济理论,德邦养种循环经济模式是构造“资源—产品—再生资源”的反馈式生产活动流程。德邦规模养殖的废弃物为猪粪尿,再生资源为沼气、沼液。因此,场年产猪粪尿量、场猪粪尿年产沼液量、场猪粪尿年产沼气量为系统模型中流位变量。

德邦现代农业区是团队的生态农业系统工程科研教学基地,国家自然科学基金委管理学部领导,中

国系统工程学会的理事长、多位副理事长等专家参观、指导基地建设,认同德邦牧业规模养殖是系统的核心,养殖利润增加是系统发展的动力,剩余粪肥及沼气工程厌氧发酵产出物二次污染制约规模养殖的发展。基于专家判断力,在以上流位变量基础上,增加日均存栏、养殖企业利润、场猪粪及沼肥未利用量、场沼液未利用量为系统模型中流位变量。

基于交流德邦牧业总经理的经验,实践中德邦牧业利用沼气发电为养殖场提供生活用能,为猪舍照明及冬季保暖,实现全部沼气能源的综合开发利用,系统二次污染治理问题为如何综合开发利用沼液资源。因此,场猪粪尿年产沼气量、场沼液未利用量可不设置为系统流位变量。

基于德邦牧业管理信息系统 2010 年至 2015 年统计数据,高塘乡户用沼气池建设的数据,在以上流位变量基础上种植业规模、户猪粪年产沼液量、户猪粪年产沼气量为设置流位变量时需考虑的变量。种植业规模可由辅助变量猪粪沼肥施用面积刻画,户猪粪年产沼液量及户猪粪年产沼气量均可以刻画户用沼气工程发展规模,选择户猪粪年产沼液量为流位变量。

综上,确定如下德邦规模养种系统基本结构的六组流位、流率对(表 3)。

表 3 德邦硅规模养种系统流位流率系

流位变量	流率变量
日均存栏 $L1(t)$ (头)	日均存栏变化量 $R1(t)$ (头/年)
养殖企业利润 $L2(t)$ (万元)	养殖利润变化量 $R2(t)$ (万元/年)
场年产猪粪尿量 $L3(t)$ (t)	场年产猪粪尿变化量 $R3(t)$ (t/年)
场猪粪尿年产沼液量 $L4(t)$ (t)	场猪粪尿年产沼液变化量 $R4(t)$ (t/年)
场猪粪及沼肥未利用量 $L5(t)$ (t)	年猪尿产沼肥量 $R511(t)$ (t) + 年猪粪肥量 $R512(t)$ (t) - 年种植有机肥施用量 $R52(t)$ (t)
户猪粪年产沼液量 $L6(t)$ (t)	户猪粪年产沼液变化量 $R6(t)$ (t/年)

基于此流位流率系,根据德邦规模养种系统实际分析,引入中间变量逐一建立以流率变量为树根,以流位变量或流率变量为树尾的六棵流率基本入树

(图 1a~1f),可建立德邦规模养种系统的新流率基本入树模型(图 2)。

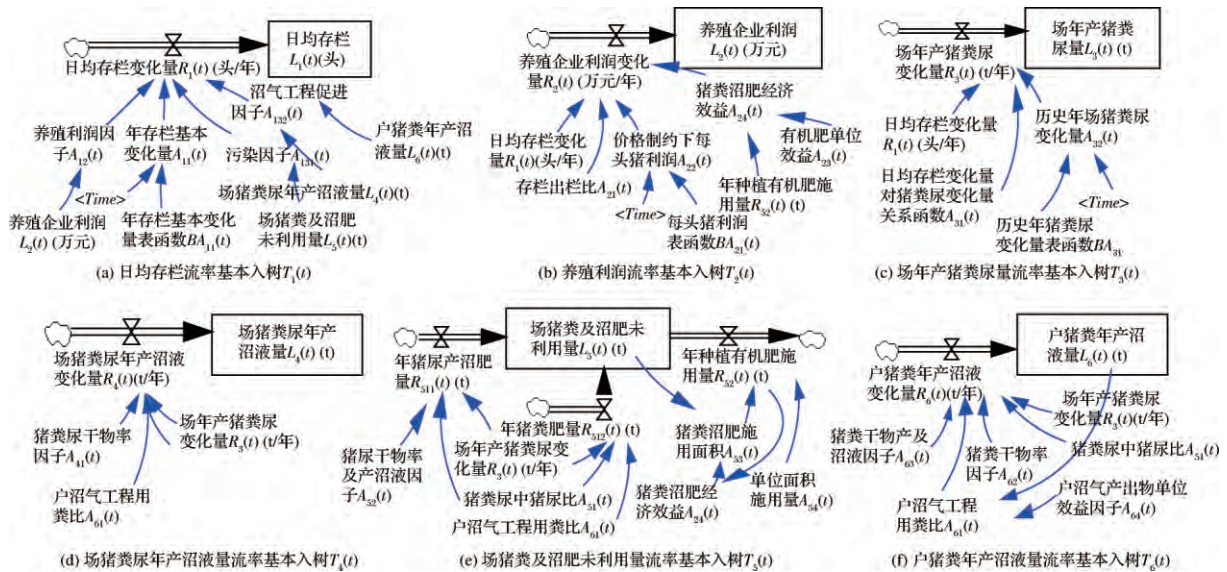


图 2 德邦规模养种系统新流率基本入树模型

### 3.2.2 枝向量行列式计算系统全部反馈环

由流率基本入树模型,观察各流率基本入树中的流位变量对其对应流率变量的控制关系,可得系统流图结构中全部一阶反馈环:入树  $T5(t)$  含  $(R52(t), +, A53(t), +, A24(t), +, R52(t))$ 、 $(L5(t), -, R52(t), +, A53(t), +, L5(t))$  共 2 条一阶反馈环,入树  $T6(t)$  含  $(L6(t), +, R6(t), +, A61(t), +, L6(t))$  1 条一阶反馈环,共 3 条一阶反馈环。

系统二阶(含二阶)以上全部反馈环计算可利用枝向量行列式反馈环算法计算得到<sup>[16]</sup>:

流率基本入树模型的各棵树中,每一树尾含流

$$\begin{vmatrix} 1 & (R1, +, A12, +, L2) & 0 \\ (R2, +, R1) & 1 & 0 \\ (R3, +, R1) & 0 & 1 \\ 0 & 0 & (R4, +, R3) \\ 0 & 0 & (R511, +, R3) + (R512, +, R3) \\ 0 & 0 & (R6, +, R3) \end{vmatrix}$$

$$= (R1, +, A12, +, L2)(R2, +, R1) + (R3, +, R1)(R1, +, A132, +, L6)(R6, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, +, A132, +, L4)(R4, -, A61, +, A64, +, L6)(R6, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, -, A131, +, L5)(R512, -, A61, +, L6)(R6, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R512)(R512, -, A61, +, L6)(R6, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, +,$$

位或流率变量的枝对应一个枝向量,每一枝向量对应枝向量行列式中相应行、列的一个元素,若行列式  $a_{ij}$  位置的元素对应的枝向量不存在则  $a_{ij}$  为 0,按照对角线位置的元素为 1 的规则构造对角置 1 枝向量行列式。

此对角置 1 枝向量行列式具有交换两行或两列后行列式值不变等性质,按行展开除全为加号外也与代数行列式的性质一样。经数学归纳法证明,此对角置 1 枝向量行列式的值与系统中二阶(含二阶)以上全部反馈环一一对应。

构造德邦规模养种系统对角置 1 枝向量行列式并计算得:

$$\begin{vmatrix} (R1, +, A132, +, L4) & (R1, -, A131, +, L5) & (R1, +, A132, +, L6) \\ (R2, +, A24, +, R52) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & (R4, -, A61, +, L6) \\ 0 & 1 & (R512, -, A61, +, L6) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A132, +, L4)(R4, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R511)(R511, +, R3) + (R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R512)(R512, +, R3)$$

系统结构含 8 条二阶及二阶以上反馈环,加上 3 条一阶反馈环,德邦规模养种系统共含 11 条反馈环。



#### 4 系统关键变量关联反馈环分析生成管理对策

在完成步骤1建立德邦规模养种系统流率基本入树模型及系统全部反馈环计算的基础上,本节逐步演示关键变量关联反馈环分析的步骤2~4。

##### 4.1 依据系统发展目标确定系统研究的关键变量

德邦规模养种系统发展目标主要有规模养殖增收与生态环境保护<sup>[17-18]</sup>。另外,系统发展中要解决“场猪粪尿严重污染”与“户用沼气池原料严重短缺”矛盾<sup>[19]</sup>。因此,场支持户用沼气池建设为系统发展目标。

考察德邦规模养种系统的流位流率系中的流位变量、流率变量:规模养殖增收表现为养殖业利润的增加,选取养殖企业利润  $L_2(t)$  为刻画实现规模养殖增收目标的关键变量;生态环境保护通过养殖废弃物初次污染治理与厌氧发酵产出物二次污染治理实现,场全部猪粪尿作为沼气工程发酵原料,消除了初次污染。实践中,场沼气能源全部开发利用,不存在沼气二次污染问题。因此,二次污染治理主要是沼液资源开发利用,选取年有机肥施用量  $R_{52}(t)$  为刻画实现生态环境保护目标的关键变量;户猪粪年

产沼液量可刻画户用沼气池规模,因此,选取户猪粪年产沼液量  $L_6(t)$  为刻画实现场支持户用沼气池建设目标的关键变量。

##### 4.2 确定关键变量养殖企业利润 $L_2(t)$ 主导反馈环与系统发展的管理对策

###### ①构建关键变量关联反馈环流图

在系统全部11条反馈环中,含流位变量养殖企业利润  $L_2(t)$  的全部反馈环有4条,组成的关联反馈环结构图(图3)如下:

反馈环(+1):  $(R_1, +, A_{12}, +, L_2)(R_2, +, R_1)$ ;

反馈环(+2):  $(R_3, +, R_1)(R_1, +, A_{12}, +, L_2)(R_2, +, A_{24}, +, R_{52})(R_{52}, +, A_{53}, +, L_5, +, R_{511})(R_{511}, +, R_3)$ ;

反馈环(+3):  $(R_3, +, R_1)(R_1, +, A_{12}, +, L_2)(R_2, +, A_{24}, +, R_{52})(R_{52}, +, A_{53}, +, L_5, +, R_{512})(R_{512}, +, R_3)$ ;

反馈环(-1):  $(R_3, +, R_1)(R_1, +, A_{12}, +, L_2)(R_2, +, A_{24}, +, R_{52})(R_{52}, +, A_{53}, +, L_5, +, R_{512})(R_{512}, -, A_{61}, +, L_6)(R_6, +, R_3)$ 。

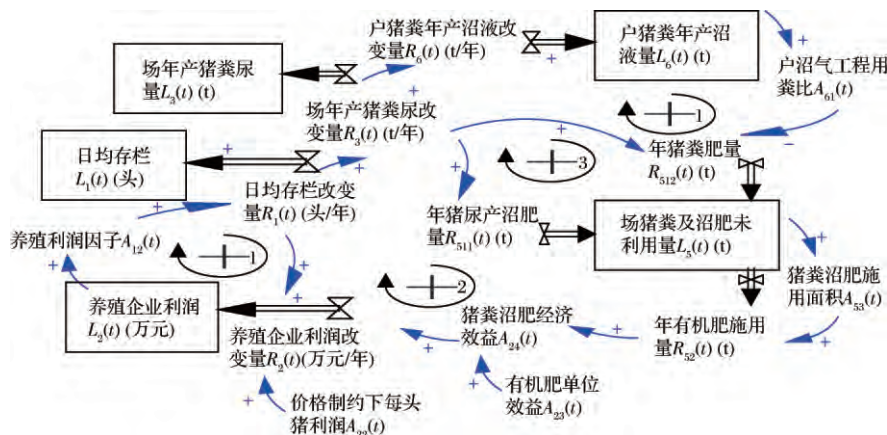


图3 刻画养殖业增收关键变量  $L_2(t)$  关联反馈环流图

###### ②确定关键变量的主导反馈环

反馈环(+1)为刻画日均存栏与养殖企业利润同增、同减反馈变化规律的正反馈环。结合实践及表1的历史数据可得:在研究的时间区间2010年到2015年,日均存栏与养殖利润间无显著的反馈同增、同减变化规律,养殖企业利润  $L_2(t)$  主要受外生变量价格制约下每头猪的利润  $A_{22}(t)$  影响,引起日均存栏  $L_1(t)$  小幅波动,此正反馈环不是关键变量  $L_2(t)$  的主导反馈环。

反馈环(+2、+3)为刻画场周边沼液资源种植工程面积与养殖企业利润同增、同减反馈变化规律的正反馈环。结合实践与两条正反馈环在入树  $T_1(t)$ 、 $T_2(t)$ 、 $T_3(t)$  中的枝结构:污染制约因子  $A_{131}(t)$ 、沼气工程促进因子  $A_{132}(t)$  是影响日均存栏变化量  $R_1(t)$  的关键变量,猪粪沼肥经济效益  $A_{24}(t)$  是影响养殖企业利润变化量  $R_2(t)$  的关键变量,即提高沼液资源种植工程经济效益、消除厌氧发酵产出物二次污染,是德邦规模养种系统发展的

关键<sup>[8]</sup>。因此,反馈环(+2、+3)是关键变量  $L2(t)$  的主导反馈环。

反馈环(-1)为刻画户猪粪年产沼液量与养殖企业利润反增、反减变化规律的负反馈环。结合实践分析:2009 年场开始支持户用沼气池发展,至 2015 年高塘乡户用沼气池闲置率达 95% 以上,且户沼气工程用粪量只占场产猪粪量小部分。因此,此反馈环(-1)不是关键变量  $L2(t)$  的主导反馈环。

### ③ 确定系统发展的管理对策

由以上分析,得系统发展管理对策作用的“杠杆点”在反馈环(+2、+3)上。结合实践分析:2010 年至 2015 年,德邦牧业无偿为周边红薯、水稻、苗木、板栗等种植业提供沼液资源,2013 年德邦牧业自营种植玉米  $8.0 \text{ hm}^2$ ,因经济效益原因至 2015 年不再种植玉米,此 2 条正反馈环因场自营种植业经济效益低,场周边沼液资源种植工程面积与养殖企业利润形成恶性循环的正反馈效应。

因此,反馈环(+2、+3)开发管理方针的为:消除反馈环(+2、+3)恶性循环的正反馈效应,形成良性循环的正反馈效应。

反馈环(+2、+3)恶性循环效应的关键因果链为猪粪沼肥经济效益  $A_{24}(t) \xrightarrow{+}$  养殖企业利润改变变量  $R_2(t)$ ,由关键因果链分析生成养殖企业利润  $L2(t)$  关联反馈环开发管理对策为:

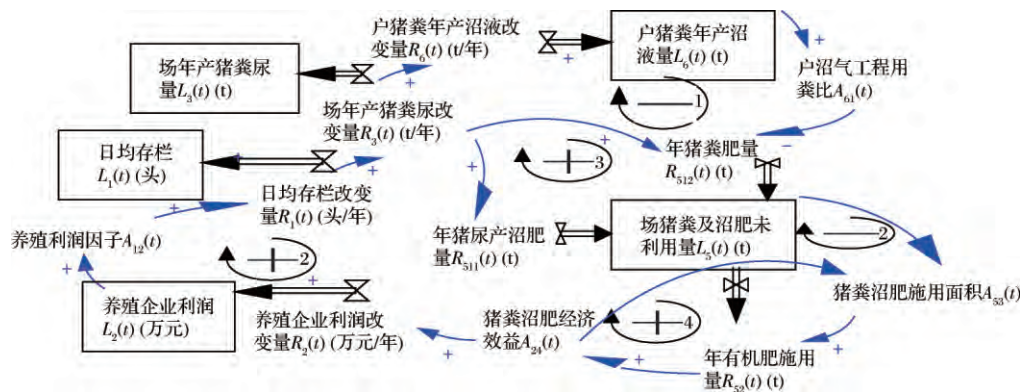


图 4 刻画生态环境保护关键变量  $R52(t)$  关联反馈环流图

### ② 确定关键变量的主导反馈环

反馈环(+2、+3、+4)为刻画场周边沼液资源种植工程面积与年种植有机肥施用量同增、同减反馈变化规律的正反馈环。结合实践分析:2010 年至 2015 年,德邦牧业沼液种植面积稳中减少,场周边沼液资源种植工程面积与年种植有机肥施用量形成恶性循环的正反馈效应。此效应导致场猪粪及沼肥未利用量  $L5(t)$  在养殖区不断累积污染,而系统此

管理对策 1:养殖企业试点种植经济效益高的特色短缺农产品,创建特色农产品品牌,增加特色农产品的价格优势,实现溢价收益,构建养种经济效益互促发展的循环经济发展模式。

### 4.3 确定关键变量年种植有机肥施用量 $R52(t)$ 主导反馈环与系统发展的管理对策

#### ① 构建关键变量关联反馈环流图

在系统全部 11 条反馈环中,含流率变量年种植有机肥施用量  $R52(t)$  的全部反馈环有 5 条,组成的关联反馈环结构图(图 4)如下:

反馈环(-1):  $(R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R512)(R512, -, A61, +, L6)(R6, +, R3)$ ;

反馈环(-2):  $(L5(t), -, R52(t), +, A53(t), +, L5(t))$ ;

反馈环(+2):  $(R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R511)(R511, +, R3)$ ;

反馈环(+3):  $(R3, +, R1)(R1, +, A12, +, L2)(R2, +, A24, +, R52)(R52, +, A53, +, L5, +, R512)(R512, +, R3)$ ;

反馈环(+4):  $(R52(t), +, A53(t), +, A24(t), +, R52(t))$ 。

动态发展阶段管理的关键是消除沼液二次污染制约,因此反馈环(+2、+3、+4)是关键变量  $R52(t)$  的主导正反馈环。

同图 3 中的分析,图 4 中反馈环(-1)不是关键变量  $R52(t)$  的主导正反馈环。

反馈环(-2)为刻画场周边沼液资源种植工程面积与年种植有机肥施用量反增、反减变化规律的负反馈环。结合实践分析:2010 年至 2015 年,德邦





正反馈效应。

因此,反馈环(+5、+6、+7、+8)开发管理方针为:消除反馈环(+5、+6、+7、+8)恶性循环的正反馈效应,形成良性循环的正反馈效应。

反馈环(+5、+6、+7、+8)中形成恶性循环正反馈效应的关键因果链为:户沼气工程用粪比  $A61(t) \xrightarrow{+}$  户猪粪年产沼液改变量  $R6(t)$ 。由关键因果链分析生成户猪粪年产沼液量  $L6(t)$  关联反馈环开发管理对策为:

管理对策 3:通过政府财政补贴、成立专业合作社等方式,减少户用沼气池使用成本。通过与高校科研院所合作,解决户用沼气建设与运营中的技术问题。通过发展区域特色种植业,提高农户沼气工程运营的经济收益。

## 5 德邦规模养种系统管理对策实践

德邦牧业实施现代农业区建设对策的管理原理为:通过养殖企业、农户、政府、院校研究部门的各自目标和责任的实现,实现现代农业区建设的总目标<sup>[20]</sup>。

### 5.1 实施管理对策 1,养殖企业建设养种互促发展的循环经济模式

2013 年至 2015 年间,场不断试点“猪—沼液—玉米”、“猪—沼液—马铃薯”等沼液种植工程,由于经济效益原因,养殖场自营的沼液种植工程效益不佳。在多次、多地调研考察后,2015 年养殖场新开发“猪—沼液—雷公竹”沼液种植工程。雷公竹种植经济效益高,2015 年每亩可获利润 5 万元左右,每年可消纳沼液  $180 \frac{t}{hm^2}$ 。目前场试点种植  $2.0 hm^2$  雷公竹,未来规划种植  $8.0 hm^2$  雷公竹。

此管理对策的实施,是通过养殖企业创新养种循环经济模式,发挥企业在农业供给侧结构性改革中的带动、示范作用,实现企业增收目标。

### 5.2 实施管理对策 2,场履行环境责任与周边企业、农户共同开发沼液种植工程

场已建且不断运行沼液三级储存、净化、传输系统。与周边企业合作,为江苏阳光集团  $576.0 hm^2$  苗木种植提供沼液肥料,开发“猪—沼液—苗木”沼液种植工程。与周边农户合作,为周边农户蔬菜、水稻、棉花等种植业提供沼液肥料,开发“猪—沼液—蔬菜”、“猪—沼液—水稻”等沼液种植工程。通过以上工程,2015 年共开发猪粪沼肥施用面积  $616.6 hm^2$ 。

此管理对策的实施,在养殖企业实现增收目标的同时,落实了企业生态环境保护的社会责任,发挥了养殖企业带动农户增收、促进种植企业发展中的社会作用。

### 5.3 实施管理对策 3,落实多主体目标责任,扶持户用沼气池发展

2009 年成立高塘乡沼液沼液开发利用专业合作社,配备原料粪车等设备,场无偿为无养殖农户和临时缺料农户提供猪粪发酵原料,极大地促进了户用沼气池的发展。2015 年,科研院所深入实地研究提供户用沼气工程实施方案和管理技术,合作社将原料运输、进出料责任落实到人,共同解决户用沼气池生产、管理技术难题。政府部门为每户沼气池提供 30 元/年的补贴,促进户用沼气池发展。2015 年末 168 户农户使用户用沼气池,户沼气池使用率从 5% 提高到 56%。

此管理对策的实施,实现了政府支持企业、农户增收,促进农村经济发展的目标,落实了政府财政补贴、引导成立专业合作社的责任;实现了高校科研院所科研成果创新与服务社会的目标,落实了高校科研院所解决户用沼气建设与运营中的技术难题的责任;实现了农户利用沼液能源、沼液资源增加经济收益的目标,落实了农户支持养殖企业生态环境保护中的责任。

## 6 结语

本文根据流率基本入树模型计算系统全体反馈环,根据系统发展目标确定研究的关键变量,进而构造关键变量关联反馈环流图,根据关键变量关联反馈环流图中主导反馈环分析,确定系统发展管理对策。由此,得到规范化的关键变量关联反馈环分析法。以德邦区域规模养种系统发展为例,利用此创新的分析方法生成促进系统发展的三条管理对策,实施管理对策的实践,验证了此创新方法在确定复杂系统发展管理对策中的有效性。关键变量关联反馈环分析法充实和完善了复杂系统的分析方法,是反馈环开发管理的一个规范化方法,对于复杂系统发展对策的制定具有普遍意义。

## 参考文献:

- [1] Richardson GP. Reflections on the foundations of system dynamics[J]. System Dynamics Review, 2011, 27 (3):219—243.

- [2] Forrester J W. System dynamics — The next fifty years [J]. System Dynamics Review, 2007, 23(2): 359—370.
- [3] 张俊荣,王孜丹,汤铃,等. 基于系统动力学的京津冀碳排放交易政策影响研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3): 1—7.
- [4] 仲勇,陈智高,周钟. 大型建筑工程项目资源配置模型及策略研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3): 125—132.
- [5] 于宝琴,武淑萍,杜广伟. 网购快递物流服务系统测评的枝模型仿真[J]. 中国管理科学, 2014, 22(12): 72—78.
- [6] Madahian B, Klesges R C, Klesges L, et al. System dynamics modeling of childhood obesity[J]. BMC Bioinformatics, 2012, 13Suppl(12): 1—2.
- [7] Bleijenbergh I, Vennix J, Jacobs E, et al. Understanding decision making about balancing two stocks: The faculty gender balancing task [J]. System Dynamics Review, 2016, 32(1): 6—25.
- [8] Villa S, Gonçalves P, Arango S. Exploring retailers' ordering decisions under delays[J]. System Dynamics Review, 2015, 35(1): 1—27.
- [9] Senge P M. The fifth discipline—The art and practice of the learning organization [M]. New York: Doubleday Publishing, 1991.
- [10] 贾仁安,涂国平,邓群钊,等. “公司+农户”规模经营系统的反馈基模生成集分析[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(12): 107—117.
- [11] 贾伟强,孙晶洁,贾仁安,等. SD模型的系统极小反馈基模集入树组合删除生成法——以德邦规模养殖系统发展为例[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 427—441.
- [12] 丁雄,王翠霞,贾仁安. 系统发展对策生成子系统流位反馈环结构分析法——以银河杜仲生态系统现代农业园区建设为例[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(9): 2312—2321.
- [13] Hayward J, Boswell G P. Model behaviour and the concept of loop impact: A practical method[J]. System Dynamics Review, 2014, 30(1): 29—57.
- [14] Kumar P, Chalise N, Yadama G N. Dynamics of sustained use and abandonment of clean cooking systems: Study protocol for community-based system dynamics modeling [J]. International Journal for Equity in Health, 2016, 15(1): 1—8.
- [15] 王翠霞,贾仁安,邓群钊. 中部农村规模养殖生态系统管理策略的系统动力学仿真分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(12): 158—169.
- [16] 贾仁安,丁荣华. 系统动力学——反馈动态复杂性分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [17] 贾仁安等. 组织管理系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [18] 贾伟强,贾仁安,兰琳,等. 消除增长上限制约的管理对策生成法——以银河杜仲区域规模养种生态能源系统发展为例[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(6): 1278—1289.
- [19] 刘静华,贾仁安,袁新发,等. 反馈系统发展对策生成的顶点赋权反馈图法——以鄱阳湖区德邦生态能源经济反馈系统发展为例[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 423—437.
- [20] 贾晓菁,贾仁安,王翠霞. 自然人造复合的开发原理与途径——以区域大中型沼气能源工程系统开发为例[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(2): 369—375.

## Analysis of Key Variables Correlation Feedback Loop of the Development Countermeasures of the System of Debang Scale Breeding and Cultivating

JIA Wei-qiang<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, JIA Ren-an<sup>2</sup>

(1. School of Economics and management, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. System Engineering Institute, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The feedback loop structure is and the core structure of dynamic changes in complex systems, and the analysis based on the feedback loop structure is the key to the specific management countermeasures of such systems. How to analyze the feedback loop structure and realize the effective feedback loop development management is an important problem to be studied deeply. In order to solve the above problems, a four-step analysis method of key variable correlation feedback loop is proposed: Firstly, the flow rate is established into the basic tree model of the complex systems by using the new branch vector determinant algorithm of system dynamics. Secondly, on the basis of the system development goal, the key variables are determined. Thirdly, the total feedback loop of the system is calculated by using the vector Algorithm, key variables associative feedback loop structure flow diagram are constructed, and determines the associative feedback loop structure flow diagram's dominant feedback loop is determined. Finally, according to

the key variables leading feedback loop analysis, the management strategy is determined. By taking the system of Debang scale breeding and cultivating for example, the basic tree model of the flow rate of six trees is established including. According to the three major goals of system development, the three key variables including: aquaculture profit, annual application amount of organic fertilizer application, household pig manure annual output of biogas slurry are determined. Based on the construction of three key variables associated with the feedback loop structure, according to the development of Debang scale breeding system, combined with historical data of Debang aquaculture industry, biogas slurry development, household biogas digesters construction, the dominant feedback loop of three associated feedback loop structures is determined. Finally, according to the analysis of the dominant feedback loop, the three management strategies of the system development are determined. During the Practice of Management Countermeasures of Debang Scale Breeding System, the effectiveness of the three management strategies is verified, and the feasibility of this method in determining the complex system management countermeasures is verified. The four-step analysis method of key variable correlation feedback loop provides a normative method for feedback loop structure analysis, and also provide an operational process for the development of complex systems development management strategies.

**Key words:** correlation feedback loop; feedback dynamic complexity; scale breeding and cultivating system; system dynamics