

胡振鹏 甘筱青 贾仁安●主编

自主创新 与 经济社会发展 ——管理科学与系统工程的 理论与应用

ZIZHUCHUANGXIN YU
JINGJISHEHUI FAZHAN
—GUANLIKEXUE YU XITONGGONGCHENG DE
LILUN YU YINGYONG



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

胡振鹏 甘筱青 贾仁安●主编

自主创新

与

经济社会发展

——管理科学与系统工程的 理论与应用

ZIZHUCHUANGXIN YU
JINGJISHEHUI FAZHAN

—GUANLIKEXUE YU XITONGGONGCHENG DE
LILUN YU YINGYONG



中国经济出版社

CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

自主创新与经济社会发展: 管理科学与系统工程的理论与应用 / 胡振鹏, 甘筱青, 贾仁安主编. —北京: 中国经济出版社, 2006. 12

ISBN 7 - 5017 - 7627 - X

I. 自... II. ①胡... ②甘... ③贾... III. ①管理科学—学术会议—文集②系统工程—学术会议—文集 IV. ①C939 - 53
②N94 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 154273 号

出版发行: 中国经济出版社 (100037 · 北京市西城区百万庄北街 3 号)

网 址: www.economyph.com

责任编辑: 夏 冰 (010 - 68355210)

责任印制: 石星岳

封面设计: 白朝文

经 销: 各地新华书店

承 印: 三河市佳星印装有限公司

开 本: 787mm × 980mm 1/16 印张: 24.5 字数: 350 千字

版 次: 2006 年 12 月第 1 版 印次: 2006 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1—2000 册

书 号: ISBN 7 - 5017 - 7627 - X/F · 6340 定价: 48.00 元

版权所有 盗版必究

举报电话: 68359418 68319282

服务热线: 68344225 68369586 68346406 68309176

编委会：（按姓氏笔划为序）

方仁声	邓永翔	邓群钊	尹继东	甘筱青	刘卫东
刘青	朱传喜	阮陆宁	李日志	李凤廷	吴江
吴国琛	何宜庆	陈坤良	杨波	汪勤峰	周绍森
季春涛	胡凯	胡剑芬	胡振鹏	贾仁安	黄代放
黄国勤	黄新建	章先华	谌贻庆	龚循华	曾广兴
谢奉军	傅春	傅跃强	彭道宾		

序言

半个多世纪以来,世界各国都在各自不同的起点上努力寻求实现工业化和现代化的道路。有些国家依靠自身丰富的自然资源增加国民财富,有些国家依附于发达国家的资本、市场和技术,还有一些国家则把科技创新作为基本战略,大幅度提高自主创新能力,形成日益强大的竞争优势,建设创新型国家。中国特定的国情和需要决定了不可能选择资源型和依附型的发展模式,我国只有走创新型国家的发展道路,推动经济增长方式从要素驱动型向创新驱动型的根本转变,使得科技创新成为经济社会发展的动力和全社会的普遍行为,最终依靠制度创新和科技创新实现经济社会持续协调发展。因此,在我国的“十一五”科技规划中,提出了自主创新、重点跨越、支撑发展,引来未来的指导方针,确定了走原始创新、集成创新、消化吸收再创新之路。

江西地处我国中部地区,在十五期间有大的发展,但江西要实现在中部地区崛起,全面建设小康社会的目标,同样必须走创新型发展的道路。按照全面建设小康社会的要求,到2020年,全省人均GDP将接近4000美元,这将意味着我省经济必须保两位数以上的高速增长。如果我省科技创新能力仅保持现有水平,要实现翻两番的目标,就要求很高的投资率,就我省的经济实力来看,这显然是不现实的。只有大幅度提高科技创新能力,才能实现建设小康社会要求的经济增长目标。因此,在江西的“十一五”科技发展规划中明确提出要建设创新型江西。

建设创新型国家、建设创新型江西,人力资源是一个重要因素。我国科技人力资源总量达3200万人,研发人员总数达105万人年,分别居世界第一位和第二位,这是走创新型国家道路的最大优势。

在“十五”期间,南昌大学管理科学与工程博士学位点和其它研究教学部门一样,一直坚持自主创新的研究与办学方向,与企业、学会紧密结合,进行自主创新的理论与应用研究,取得了初步成果。在2006年全

国科学技术大会结束后的第三天，江西省系统工程学会、南昌大学管理科学与工程博士学位点联合召开了自主创新研究成果交流研讨大会，总结过去，展望未来。

本专集编辑了学者们在管理科学、工业工程与管理工程、系统工程、信息管理与信息系统、工程管理、科技管理学科研究范围内，管理学前沿、经济学前沿和科学研究方法论前沿方面的创新研究成果。它的出版对加强南昌大学管理科学与工程博士学位点的学科建设，系统工程学会的发展，将起到积极的作用。我希望学者们为实现更多自主创新成果，为江西经济社会发展作出新的贡献。

南昌大学校长 周文斌

2006 年 12 月

目 录

序 言

1. 发展循环经济的技术经济分析 胡振鹏 汪勤峰 / 1
2. 构建现代教育经济理论新框架 周绍森 胡德龙 / 36
3. 高校新校区建设与可持续发展
..... 甘筱青 阮陆宁 胡凯 黎凯 / 54
4. 江西软件产业发展对策及其动态反馈复杂性分析
..... 贾仁安 杨波 邓永翔 章先华 胡振鹏 甘筱青 黄代放 / 69
5. 创新创业 探索超越 黄代放 / 159
6. 论“山江湖工程”的探索与创新 吴国琛 / 164
7. 论江西生态安全与生态建设 黄国勤 / 173
8. 江西省工业园区投入产出比较分析 黄新建 谢奉军 / 197
9. 基于 AHP 的中部地区主导产业选择方法研究 黄新建 谢奉军 / 208
10. Optimality Conditions for Henig and Globally proper Efficient
Solutions with Ordering Cone Has Empty Interior X. H. Gong / 215
11. E - Sh 风险下的证券组合投资多目标决策模型 何宜庆 / 240
12. 水资源管理中行政与经济处罚效率的博弈分析 傅春 / 251

13. 一项关于江西省产业结构与产业关联状况的实证研究
 彭迪云 王秀芝 罗世勇 / 259
14. 概率分析中的若干问题(1) 朱传喜 / 286
15. 实平面代数曲线的切线之确定 曾广兴 / 291
16. 省域经济运行评价指标体系研究 尹继东 彭道宾 / 317
17. 旅游需求、开发与旅游资源价值 谌贻庆 甘筱青 / 335
18. 基于顾客导向的政府公共服务平台的建设
 李凤廷 刘卫东 傅跃强 陈坤良 / 342
19. 沼气建设的创新思考 方仁声 / 351
20. 地方财政收支计量经济模型 吴江 / 356
21. 鄱阳湖湿地恢复的战略分析 李日志 刘青 / 362
22. 振兴昌九工业走廊的政策支持体系研究 谢奉军 胡剑芬 / 378

后 记

发展循环经济的技术经济分析

胡振鹏 汪勤峰

〔摘要〕 循环经济是一种新的经济发展模式。本文通过案例研究和循环经济生产模型创建、求解,探索了循环经济地内涵和理论基础;分析了企业内部、工业园区和社会层面发展循环经济的技术经济特征。在企业内部“变废为宝”是发展循环经济的基础,要坚持减量化、再利用、资源化原则改善生产流程,延长和拓展产品链,将污染物尽可能的在企业内转变为产品;工业园区是发展循环经济的有效模式,既发挥了专业化生产的优势,又实现了产业集聚的效应;社会层面发展循环经济,要将生产和生活消费的废弃物加工利用,从供给和需求关系上建立起需求引导生产的良性的循环机制。最后,针对我国发展循环经济的实际情况,提出了相应的对策建议。

〔关键词〕 循环经济 废弃物再利用 技术经济分析

§1 引言

党的十六届五中全会指出:“发展循环经济,是建设资源节约型、环境友好型社会和实现可持续发展的重要途径。坚持开发节约并重、节约优先,按照减量化、再利用、资源化的原则,大力推进节能节水节地节材,加强资源综合利用,完善再生资源回收利用体系,全面推行清洁生产,形成低投入、低消耗、低排放和高效率的节约型增长方式”。循环经济是一种节约资源、与环境和谐相处的新型工业化模式,也是把经济发展和生态环境保护有机结合起来、互相促进的经济发展模式。循环经济的思想萌芽可以追溯到环境保护兴起的 20 世纪 60 年代。1962 年美国生态学家卡尔逊发表了《寂静的春天》,指出生物界以及人类所面临的危险,敲响了经济持续高速增长危害资源和环境的警钟。美国经济学家 K. 鲍尔丁提出可

以把传统的依赖资源消耗的线形经济增长方式,转变为依靠生态型资源循环的经济增长方式,“宇宙飞船理论”就是循环经济理论的早期代表。随后,德国、日本为了缓解消费中产生的废弃物压力,开始采取循环经济的措施。20世纪80年代末,美国杜邦化学公司为了加强成本管理、减少污染物排放,提出“3R制造法”,即现在所说的3R原则:减量化(Reduce)、再循环(Recycle)和再利用(Reuse)^[1,2]。90年代,随着可持续发展理念的普及和深入,反思污染物“末端治理”的实践,循环经济的思想在不断的探索中成熟起来。1999年,上海将循环经济纳入《中国21世纪议程——上海行动计划》,进入21世纪以来,我国开始生态工业园区的试点工作,许多地方和企业着手循环经济的探索与实践^[3-7]。2005年全国人大常委会启动了循环经济立法的调研,国务院颁发了《关于加快发展循环经济的若干意见》,要求在重点行业、重点领域、重点园区和重点城市组织开展循环经济试点工作。11月,国家发展改革委、环保局等六部委联合启动了这项工作,共有7个重点行业的42家企业、4个重点领域的17家单位、13个产业园区和10个省市成为国家第一批循环经济试点单位。

由于循试点工作刚开始起步,思想观念、法制建设、体制机制、激励政策和技术创新等方面难以适应发展循环经济的现实要求,理论上也存在许多模糊认识和误区,比如循环经济的内涵是什么,其理论基础是什么;与污染物末端治理、资源综合利用、清洁生产的联系与区别在哪里;循环经济在节约资源、保护环境方面具有正外部性,但有些情况下经济上可能不合理,需要采取那些措施来协调这一矛盾等。因此,从我国循环经济发展的实践出发,利用系统科学和技术经济的理论方法,研究和探讨这些问题,对循环经济健康发展具有一定理论价值和实践意义。

§2 循环经济是一种新的经济发展模式

2.1 循环经济的内涵

中国人口众多,人均资源相对贫乏。土地、淡水、能源、矿产资源和环境状况对经济发展已构成严重制约。长期以来“高投入、高消耗、高污染、低效益”为主的粗放型增长方式,导致了生产效益低下、资源高

耗、能源紧缺、环境污染、生态破坏等日益严重的问题。传统经济以高开采、低利用、高排放为特征，对资源的利用是粗放的和一次性的，许多有用的成分当作废弃物排放到周边环境之中，随着所创造财富的增加，消耗的资源就越多，产生的废弃物也就越多，对资源环境的负面影响就越大。循环经济是在深刻认识资源消耗和环境污染之间关系基础上，借鉴生态学规律，将清洁生产和废弃物综合利用融为一体，把传统经济中“资源—产品—污染排放”单向流程转变为“资源—产品—再生资源”的反馈式流程，以“减量化、再利用、再循环”的原则调整产业结构、改变消费行为，回收废弃物再利用，从源头预防污染产生或降低单位产出的污染物排放，使物质和能源得到合理和持续利用，把经济活动对自然环境的影响降低到尽可能小的程度。

循环经济综合了资源节约与综合利用、污染治理和清洁生产等生产方式的长处，借鉴生态学原理，从人与自然和谐相处的目标出发，把自然—经济—社会作为一个复合系统，对物质转化、能量利用的全过程采取战略性、综合性、预防性措施，降低经济活动对资源环境的过度使用以及对人类所造成的负面影响，使人类经济社会的循环与自然循环更好地融合起来，实现一定区域内物质流、能量流、资金流的系统优化配置。所以循环经济是资源节约与综合利用、污染治理和清洁生产等概念综合与升华，相互之间既有紧密地联系，又有本质的区别，是统筹与被统筹的关系。

资源节约主要指降低资源消耗，资源综合利用则强调从不同层面、不同方位充分利用自然资源，使有限资源发挥最大的效益。循环经济比资源节约更深入、广泛，坚持“变废为宝、化害为利”的理念，在综合利用的基础上，还追求资源尽可能多方位、多层次的重复利用，将上游工序或企业的废弃物变成下游工序或企业的原料，将消费后的废旧物资回收利用，生产出更多的产品，使资源得到高效、充分的利用，尽可能对生态环境不产生或少产生不利影响。原材料利用的减量化以及废弃物的回收利用，一直是我国资源节约的主要手段，也是循环经济的重要内容之一。

污染治理，是发达国家在工业化过程中大量生产、大量消费、大量废弃造成环境污染以后采取的补救措施，主要是“末端治理”，例如进行污水处理、垃圾填埋等。污染治理通过一定技术和资金投入，把污染物质分解成无害物质后再排放，不产生经济效益。循环经济将废弃物作为资源，生产出新产品。在一定的技术、经济条件下，并非所有的废弃物都能够全

部资源化,或多或少总有些所以有害物质无法利用,需要处理后排放。所以循环经济不排除污染治理。

清洁生产强调生产的全过程控制,达到提高资源利用率、减少污染物排放的目的,主要着眼于单个企业内部的生产流程控制,“末端治理”也是清洁生产的手段之一。循环经济在更广泛的层面、更大空间范围内配置资源,循环经济可分为三个层次:“小循环”停留在企业的生产层面;“中循环”在工业园区或区域的企业之间进行;“大循环”推进到社会层面。三个层面共同作用,在生产领域,通过废弃物的再利用来延长产品链或产业链,将上游企业的废物变成下游企业的原料;从消费环节上讲,反对大手大脚、恣意浪费,提倡科学、文明和节俭的消费方式,尽可能减少对资源的依赖,并回收利用消费后的废旧物资,建立全社会的循环利用的体制;从供给和需求关系上讲,优化产业结构,建立起需求引导生产的良性的循环机制。

2.2 循环经济是一种新的经济发展模式

循环经济是一种节约资源、与环境和谐相处的新型工业化模式,是把经济发展和生态环境保护有机结合起来、互相促进的新的经济发展模式。循环经济把自然资源和生态环境作为公共财富进行管理,并纳入到市场机制之中,充分发挥科技进步和人力资源的作用,达到节省资源、保护环境,促使社会经济可持续发展的目的。

传统工业按“资源—产品—污染排放”单向流动,以高开采、低利用、高排放为特征。设企业的生产函数为 $f(\cdot) = \{x, y(x)\}$,这里 $x, y(x)$ 分别为主产品 A 和废弃物的数量(生产工艺过程确定了废弃物与的数量关系)。设 $c_x(x)$ 为生产费用,企业的目标函数为: $\text{Max } p_x x - c_x(x)$,由一阶导数得出 $p_x = c'_x(x^*)$,即商品的价格等于边际生产成本。这种发展模式下,废弃物未处理就排放到自然环境中。

随着环境问题的凸现,为了保护环境,人们开始重视“末端治理”。设 $w_y(y(x))$ 为处理废弃物达标排放费用,目标函数为“三废”达标排放的前提下企业生产净效益最大:

$$\text{Max } p_x x - c_x(x) - w_y(y(x)) \quad (1)$$

$$\text{求解可知: } p_x = c'_x(x^*) + w'_y y'(x^*) \quad (2)$$

即边际生产费用和废弃物边际处理费用之和等于产品 A 的市场价格。

从技术的角度来看,循环经济把生产、消费活动组织成一个“资源—产品—再生资源”的反馈式流程,使物质和能量在不断循环中得到合理、持久的利用,尽可能减少经济活动对生态环境的不利影响。循环经济并非不计成本地将废弃物加工利用,设企业具有一定技术和条件将废弃物加工成产品 B,生产函数为 $g(y)$ 、费用函数 $c_y(y)$,产品 B 的市场价格为 p_y 。企业的生产模型为:

$$\text{Max } p_x x - c_x(x) + p_y g(y(x)) - c_y(y(x)) \quad (3)$$

$$\text{求解式 (3) 得: } p_x = c'_x(x^*) + c_y y'(x^*) - p_y g'(y) y'(x^*) \quad (4)$$

比较式 (2)、(4) 可知,当生产两种产品的边际费用减去产品 B 的边际收益小于产品 A 的市场价格时,将废弃物加工成产品,发展循环经济在经济上是可行的。即:

$$c'_x(x^*) + c_y y'(x^*) - p_y g'(y) y'(x^*) < c'_x(x^0) + w'_y y'(x^0) = p_x \quad (5)$$

只要式 (5) 成立,循环经济不仅从源头上减少了资源消耗和环境污染,如果在行业、全社会、推进,形成新的均衡后,即 $p_y^* = c'_x(x^*) + c_y y'(x^*) - p_y g'(y) y'(x^*) < p_x$ 。这样就提高了经济效益和社会福利。

由此可见,循环经济是人类经济社会发展历史阶段的产物,作为传统的“大规模生产、大规模消费、大规模废弃”生产消费模式的对立物出现,用整体、系统的视角,寻求一条可持续发展的道路。这是人类突破资源与环境对经济社会发展的制约的一次升华,从废弃物自由排放到末端治理,再到废弃物资源换;从清洁生产到消费产生的废弃物再利用和科学合理地节制消费;从企业层面开始,扩展到园区(区域)和全社会,全面促使节约高效型国民经济体系的形成和壮大。“猪—沼—果”生态农业模式从微观的角度说明了这一过程。

§3 案例 1:“猪—沼—果”生态农业模式

20 世纪 80 年代初,江西开始实施“山江湖综合开发治理工程”,把湖泊、河流、丘陵、山区作为一个完整的生态经济系统来统筹规划、综合管理、系统治理、全面开发,坚持“立足生态、着眼经济、系统开发、综合治理”的方针,以科技创新为依托,把治山治水与发展经济结合起

来,把经济社会发展和环境保护、生态建设统一起来,探索强省富民的可持续发展的道路^[9]。在山江湖综合开发治理过程中,赣州的群众总结各地经验,创建了符合当地实际的“猪—沼—果”生态农业模式。具体做法是:一家农户将厕所、猪牛栏和沼气池(约6—10m³)结合在一起,养猪4—6头,种植果树10hm²左右;人、畜粪便在沼气池发酵,产生的沼气用作家庭能源;沼液和沼渣作为栽种果树、粮食的肥料。这一模式深受农民欢迎,逐步在全省推广,衍生成“猪—沼—菜”、“猪—沼—鱼”等多种模式,在山江湖开发治理的各项工程的广泛应用。目前,全省家用沼气池保有量达103.87万个,占农户总数的13%,兴建大、中型沼气工程250处。农业部把这一模式作为发展生态经济的南方模式加以推广。

3.1 “猪—沼—果”生态农业模式是一种循环经济模式

“猪—沼—果”模式以沼气池为核心,把种植(粮油作物、果树、蔬菜和牧草等)、养殖(猪、牛、鹅、鸭、水生物等)和生活三个孤立的活活动组合成一个开放式的互补系统,使物质充分循环,让自然散发掉的生物质能集中利用。如图1所示,传统种养模式本质上是生态系统中“生产者(农作物)—消费者(人和动物)—还原者(微生物)”的物质能量转化过程,人畜粪便直接或堆沤发酵后作肥料施用,由于微生物密度较小,分解成作物可直接吸收的物质过程缓慢,时间较长,相当一部分营养物质随着降水或灌溉流失掉了,产生面源污染,粪便中的生物质能也慢慢地散失了。据统计,用传统的封沤发酵处理人畜粪便后施用,氮、磷分别损失50%、30%左右。

如图2所示,“猪—沼—果”模式在传统种养方式的转化循环中嵌入沼气池,在池内放进沼气菌群,人畜粪便进入沼气池以后,在缺氧环境和一定温度、湿度和酸碱度条件下,这些菌群为了自身的生存和繁育,逐步地将粪便中的碳水化合物、蛋白质和脂肪等有机物分解成为沼气、沼液和沼渣。沼气池将一系列复杂的生化反应过程集聚在一起,加快了反应速率、提高了分解效率,并收集、储存、输送沼气,用于家庭烧饭照明,使传统种养模式中散失掉的生物质能得到充分的利用。沼液中含有丰富的氮、磷、钾、钠、钙营养元素,基本上可以直接被作物吸收;沼渣中除了沼液中所含的营养物质外,还有腐植酸、沼气菌等,大部分可直接被作物吸收,仅少量残余的有机质还要经土壤中的微生物分解,比传统施肥方式

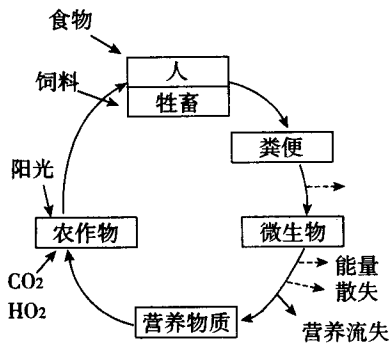


图 1 传统种养模式

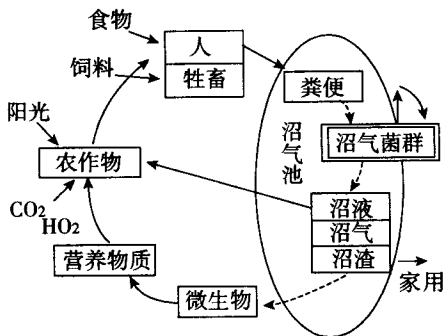


图2 猪—沼—果生态农业模式

所流失的养分要小得多，氮、磷仅损失 5%、2% 左右，对环境污染减轻很多。

“猪—沼—果”模式具有循环经济的本质特征：以生态经济原理为基础，包含了清洁生产和绿色消费的内容，体现了“减量化、再利用、再循环”原则，具有良好的生态效益与经济效益。

3.2 “猪—沼—果”模式是一种超循环结构

“猪—沼—果”模式是一个超循环结构。德国科学家、诺贝尔化学奖得主 M. 艾根提出了“超循环论”。他认为^[10]：在生化反应中存在转化反应循环和催化反应循环等多种型式：在转化反应循环中，酶 E 和反应物 S 作用，生成 ES，ES 再转化为 EP，EP 最后释放出酶 E 和生成物 P，继而酶又加入到下一轮反应中去。这一过程可以表示为 $S \xrightarrow{E} P$ 。光合作用就是一种转化反应循环。如果在转化反应循环中至少一种中间物 ES 或 EP 是催化剂，这样的循环就是催化反应循环。其过程可以表示为： $S \xrightarrow{I} I$ ，或者写作： $S + I \rightarrow 2I$ 。这一过程称为“自催化”或“自复制”。在一个转化反应循环中耦合进一个或几个自复制循环，或者若干自复制循环耦合成一个循环，称为超循环。M. 艾根^[10]认为，所谓超循环是经过循环系统把自催化或自复制单元连接起来的系统，其中至少一个自复制单元既能指导自己复制，又对下一个中间物的产生提供催化帮助。自复制循环之间的耦联必然形成一个更高层次的循环，而只有这种完整的系统才称得上是超

循环。

在“猪—沼—果”模式中，沼气池起到关键作用。人畜粪便进入沼气池以后，通过沼气菌群进行厌氧发酵，分解人畜粪便等基质，摄取少量养料和能量，促进自身生存和不断繁衍；沼气菌群的增加，又进一步使更多的基质得到分解。在这一过程中，沼气菌群起到自催化或自复制作用，与基质相互依存，相互促进，只要源源不断地提供人畜粪便等基质，沼气菌群就不断繁衍。形成了以沼气池为载体、沼气菌群为核心的自复制单元。耦合到传统种养模式的简单循环中，形成一个更复杂的封闭循环，使一系列复杂的生化过程凝集在沼气池中，“通过循环连接而联系起来的所有物种稳定地、受控地共存”^[10]，“猪—沼—果”模式就形成了超循环结构（图2）。

上面笼统地把沼气发酵作为一个环节进行粗略的分析。根据微生物学研究结果，沼气发酵是过程十分复杂，大致可以分为四个阶段，依次由四大类群的微生物参与作用：

第1阶段：水解发酵性细菌将复杂有机物水解成相应的单体，并对水解产物进行发酵。

第2阶段：产氢产乙酸细菌利用第一阶段的发酵产物，形成乙酸和氢气。

第3阶段：产甲烷细菌把前几个阶段中产生的乙酸裂解成甲烷和二氧化碳，或将氢和二氧化碳还原为甲烷和水。

第4阶段：某些同型产乙酸细菌可将氢和二氧化碳还原成乙酸，乙酸再由产甲烷细菌裂解为甲烷和二氧化碳。

这四个阶段本质上是四大类群的微生物参与的若干个相互联接的自复制过程，按照 M. 艾根的理论，可以用下述动力方程表示：

$$\dot{X}_i = (A_i Q_i - D_i) X_i + \sum w_{ik} X_k - w_{0i} X_i \quad (i=1, 2, 3, 4, \dots)$$

这是一个典型的超循环结构的动力方程，式中 i 为上述四阶段中任一阶段或某一阶段中某一过程（如第3阶段包含产甲烷细菌把乙酸裂解成甲烷和二氧化碳和将氢和二氧化碳还原为甲烷和水两个过程）， X_i 为状态变量，表示第 i 阶段相应产物的浓度（如第1阶段的有机物单体，第2阶段的乙酸）；导数 $\dot{X}_i$ 为浓度变化的速率； A_i 表示微生物 i 分解上阶段产物的分解率， Q_i 表示正确分解率； D_i 为合成率，即 A_i 的逆反应速率；

W_{ik} 表示第 k 阶段突变成成为 X_i 的概率（如第 4 阶段中某些产乙酸细菌可将氢和二氧化碳还原成乙酸，成为第 2 阶段的产物）； W_{0i} 表示代表稀释率（如第 2 阶段除产生乙酸外，还产生氢气，稀释了乙酸浓度）。动力方程意义表示某一阶段相应产物浓度的变化率等于自复制率加上突变率，减去迁移（逆反应）率。沼气产生过程就是一系列这样的动力方程相互作用过程。在传统种养模式中一个个孤立的生化反应被沼气池集结在一起，沼气菌种和生化反应的各种中间物一起相互作用，形成一系列具有自复制、自催化功能的超循环结构的结点。

3.3 “猪—沼—果”模式的效益

M. 艾根^[10]认为：“超循环结构代表了组织的一个新层次”，具有以下特点：

1. 利用自催化或自复制作用，使相互竞争要素得到整合、形成协同作用，从而具备复杂的非线性动力机制，这种“内连接和协同性质使系统向优化功能方向进化”。

2. 超循环结构具有“一旦则永存”的选择结果，就是说超循环结构一旦建立，由于自催化或自复制机制，系统功能不断增强。“控制论”中，正反馈因素强一点，系统功能强一些，正反馈因素弱一点，系统功能也弱一些；但在超循环中，催化因素减弱一些，可以通过自复制机制恢复，一段时间之后，系统功能仍然得到增强。

3. 超循环系统的组织结构丰富多样，结合更紧密有序，信息得到整合，能量被高度地集聚，物质可以得到多层次的充分利用，系统具有更高的效率。

M. 艾根^[10]还认为：从生物生化的角度看，“超循环是能够允许可复制的功能连接进化的最简单系统”，“这种类型的功能组织也是分布广泛的，并在神经网络或者在社会组织中起着某种作用”^[10]。作为一种超循环结构，“猪—沼—果”模式也具有上述特征。沼气池聚集了一系列复杂的生化过程，达到“一旦则永存”的效果，使一种生物的废弃物成为另一种生物的养料或生产原料，实现物质循环利用，能量高效转换，使经济发展、资源节约和生态环境保护有机结合起来。

(1) 能量高效聚集，充分利用。沼气的主要成分是甲烷，约占