

生态产业共生系统节点稳定性

刘 宁*, 杨 莉, 吴小庆, 温剑锋, 陆根法

(污染控制与资源化国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:在当今市场经济形势下,环境保护有着更长远和现实的意义。生产过程的污染物全过程治理已经是最有效的手段之一,如何在市场经济条件下,通过生态产业共生系统的建设,达到经济发展和环境保护双赢是目前热点,同时也是难点,因为,如何实现市场经济条件下生态产业共生系统的稳定性是核心的关键点。从环境经济学角度出发,以生态产业共生系统的节点稳定性为研究内容,通过节点间相互关联的企业之间的污染物循环利用的关系分析,建立生态产业共生系统中企业之间的节点间污染物循环利用共生经济学模型,在市场经济条件下,基于模型的数学解,通过观察节点处对污染物进行循环利用企业受市场经济影响导致的产品供给变化,研究系统外界市场经济扰动对节点污染物循环利用的供需平衡的影响。研究表明,当市场经济条件下,共生系统节点间污染物供给企业的自身的产品价格弹性等于 1 或小于 1 时,节点稳定性是有条件的,如果污染物供给企业的自身的产品价格弹性大于 1,节点会在稳定点附近周期性振荡,甚至出现混沌现象。结论是市场经济条件下,通过建立生态产业共生系统达到经济发展和环境保护双赢,则必须建立节点间污染物循环利用的市场经济学响应机制,以保障系统的稳定性,真正实现社会、经济和环境的可持续发展。

关键词:生态工业园区;节点;稳定性

文章编号:1000-0933(2009)07-3828-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Research on nodal stability of an eco-industry symbiosis system

LIU Ning*, YANG Li, WU Xiao-Qing, WEN Jian-Feng, LU Gen-Fa

State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Environmental school of Nanjing university, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3828 ~ 3834.

Abstract: The environmental protection has long-term and practical significance in present market economy situation. The pollutant management of throughout the entire production processes has been one of the most effective ways. How to achieve a win-win situation between economic development and environmental protection through the construction of eco-industrial symbiosis systems in a market economy has become a central and difficult issue. It becomes crucial to achieve the stability of eco-industrial symbiosis system in a market economy.

This paper focuses on the node stability of eco-industrial symbiosis system from the view of environmental economics, and set up the Node Symbiotic Economics Model on the enterprises of eco-industrial symbiosis system by analyzing relationship on the pollutants recycle of the inter-node interconnected enterprises. Through the observation of the supply change in the enterprise's recycling contaminants at the node based on the mathematical solutions to the model, the effects of outside disturbances on the balance of supply and demand has been studied.

If the elasticity of the product price is equal to or less than 1, the node can achieve conditional stability and if the elasticity of the product price is more than 1, the node will fluctuate periodically around a stable point, and even chaos can appear.

In conclusions, we have to set up a responding mechanism of the inter-node pollutants recycling market economics to preserve the stability of system and achieve the sustainable development of the society, economy and environment under

基金项目:苏州城市循环经济发展共性技术开发与应用研究资助项目(2006BAC02A18)

收稿日期:2008-04-09; 修订日期:2009-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuning@nju.edu.cn

simplified Eco-industrial Symbiosis System Node Model in this paper. Consequently we can achieve a win-win situation between economy development and environmental protection in a market economy by establishing Eco-industrial Symbiosis System.

Key Words: eco-industrial parks; node; stability

单个企业内部实现循环经济具有一定的局限性。因为肯定会形成企业(工厂)内无法消解的一部分废料和副产品,于是需要从厂外组织物料循环。这就必然需要延长产业链条,将更多地具有关联性的企业或者工厂融合为循环经济的产业体系。本研究将单个企业作为循环经济的最基本的、最小的单元,通过“企业—企业间—产业间”物质和能量循环利用构成的的循环经济体系,单个企业是其最基本的单元,具有关联性的企业是循环经济产业体系中必不可少的关键节点。

1 生态产业共生系统的节点

本研究将生态产业共生系统的“企业—企业间—产业间”这种产业体系的企业从物质循环利用角度分为两类,分别为利用资源进行生产并排出污染物的企业(以下简称企业 I)和对企业 I 产生的污染物进行循环利用的企业(以下简称企业 II)。

根据循环经济产业体系的发展经验^[1],企业 I 和企业 II 之间污染物循环利用的关系是节点存在的前提和核心。

2 生态产业共生系统稳定性及其节点的稳定性

2.1 生态产业共生系统稳定性

生态产业共生系统的稳定性是指外部扰动引起系统总的污染物的供需平衡失调时,随着时间的推移,系统能否通过自身的调节功能恢复污染物的供需平衡状态^[2]。稳定性对于维持生态产业共生系统良好运转并获得成功至关重要;生态产业共生系统稳定性的影响因素较多,主要存在于内因(系统的结构和技术)与外因两个方面。

目前,生态产业共生系统的稳定性研究大多从当前各国生态产业共生系统运营中出现的不稳定问题的实际出发,从影响生态产业共生系统稳定性的各个方面着手,试图寻找其稳定性影响的因素。

2.1.1 系统稳定性的内因研究

系统稳定性的内因主要从系统结构和技术两方面开展研究。

(1) 系统结构因素

R. Cote 提出可以通过吸引其他公司来填补生态位,增加多样性,提高恢复力和稳定性^[3];而楼园、赵红等人根据生态学基本原理提出了不同的观点^[4],认为生态产业共生系统的稳定性随复杂性的增加而增加,然而到一定程度后,呈反向变化趋势;Anja 从规避生态产业共生系统内部风险角度出发进行研究,认为企业之间依赖性带来系统复杂性,这种复杂性进一步造成:合作程度越高,彼此依赖程度越大,从而风险越大^[5];Pauline 认为可以每月建立工作组,通过那种短期组合的工作组来适应那些生态产业共生系统工作内容中的临时部分,从而可以避免上、下游企业人员的变动^[6];王灵梅等也提出,调节链的存在对增加系统弹性,保证系统的稳定性是很必要的^[7];Gregory 从生态产业共生系统内部结构入手展开研究,明确提出系统关联度的提高,未必就伴随着稳定性提高和环境状况的改善^[8];G. Zilahy 通过对 8 个高耗能企业进行的实证研究,显示影响企业群生态化运作的因素^[9]。因此,根据上述研究结果,可以看出从系统结构角度来看,系统结构越复杂,可能稳定性越差,系统组成单元合作程度越高,依赖程度越大,关联度越高,系统稳定性越差。

(2) 系统技术因素

Gregory 通过 4 个案例研究,认为从技术影响的角度出发“生态工程技术与传统工程技术之间的鸿沟”成为生态化技术执行的束缚因素^[8];秦颖等以卡伦堡生态产业共生系统内的下游企业必须刻意保持(修订)自

身工艺技术参数,从而适应上游企业的特殊品质副产品为案例进行研究,认为生态产业共生系统存在“技术迎合”风险^[10]。

2.1.2 系统稳定性的外因研究

R. R. Heeres 通过比较研究,认为荷兰的生态产业共生系统比美国运营更稳定的原因是政府干预少^[11]; Holly 提到由于影响系统稳定性的外部信息需要去收集、分析、综合,而且内部充满复杂性与不确定性,使得很多情况难以预测^[12]。

2.1.3 综合研究

Sumita 认为有 7 个方面的因素阻碍了生态产业共生系统的稳定发展与未来成功:制度,技术,经济,信息,组织,法律,认知^[13];王兆华指出,当前生态产业共生系统尚不是一个真正意义上的“生态系统”,存在以下几方面的问题:①一家企业的废物未必能分离出有价值且数量充足的,并且能完全被另一家企业所利用;②可以被其它企业利用的某一家企业的可用资源的数量、特性具有一定的不灵活性;③原材料供应的不稳定性;④竞争企业间保密技术的泄露^[14]。

综上所述,生态产业共生系统作为一种基于资源、环境与社会三方面高度协作的先进产业共生模式,在蓬勃发展过程中却有着不容回避的、潜在的稳定性隐患,令人担忧。尽管当前生态产业共生系统稳定性研究伴随着生态产业的开展已经逐渐引起了人们的注意,但是作为一个学术研究领域才刚刚开始^[15,6]。目前研究主要集中在对影响生态产业共生系统稳定性的系统结构分析,定性分析居多,量化研究缺乏;此外缺乏对包括生态产业共生系统稳定性现状、影响因素的影响程度等在内的相关指标的量化研究。

2.2 生态产业共生系统节点稳定性

节点稳定性是指外部扰动引起节点处污染物的供需平衡失调时,随着时间的推移,此节点能否恢复其供需平衡的状态。本文将进一步研究生态产业共生系统中污染物循环利用的供需平衡,在外部扰动下引起平衡失调时,能否恢复其供需平衡状态的内在性质^[8]。

3 基于非线性经济学的节点稳定性研究

3.1 基本方程的建立

根据非线性经济学基本原理^[16~18,15],对于生态产业共生系统,对于系统中节点处两企业间的污染物供需平衡,在不考虑小循环和大循环对节点处污染物供需产生的影响时,企业 I 的产品产量和其污染物的产生量之间存在线性相关。对于节点供需平衡而言,企业 I 的产品供给增加,其污染物供给也相应增加,从节点污染物供需平衡的扰动分析,这种情况也可以认为是企业 II 产品供给的减少导致的污染物需求减少;另一方面如果企业 I 产品供给减少,其污染物的供给也相应减少,这种情况也可以认为是企业 II 产品供给的增加。这样可以认为企业 I 和企业 II 对节点污染物的供需平衡的扰动存在镜像关系。因此,在本文研究节点供需平衡的扰动时,只考虑企业 II 的对污染物的需求变化^[12]。

在假定技术不变时,本文在建立节点模型时,是通过观察企业 II 的产品供给变化来反映外界扰动对节点供需平衡的影响。

一般来说,最大化和均衡这两种思想,是经济模型结构的核心。在本文研究的生态产业共生系统网络节点模型中,最大化是指企业 II 所做出的最优选择与其特定的目标(利润最大化)相一致;均衡是指节点处企业 II 在最优选择利润最大化时仍然要保持和企业 I 的供需均衡和节点的稳定。那么,这种经济学模型的核心(利润最大化和节点污染物供需均衡)就是本文模型方程建立的基本原则。

在本文模型中,企业 II $t+1$ 时刻的利润最大化通过其产品的价格弹性这个外部变量来反映。而企业 II 自身在 t 时刻对其产品产量的调整速度用一个内部变量来反映。

对于本文研究的生态产业共生系统中的节点,在市场竞争机制下,污染物循环利用的企业 II 对污染物的循环利用,实质上是外部性问题内部化的实现。根据上述分析,如果企业 II 生产是瞬时的,不连续的,那么它就不需要考虑均衡,均衡的目的是为了状态变化时间序列的稳定,没有时间序列,则无所谓稳定和均衡。这样

在 $t+1$ 时刻,企业 II 依据 t 时刻的产品价格期待和技术处理成本,为追求 $t+1$ 时刻的最大利润,其产品最大供给量的静态费用方程如下:

$$x'_{t+1} = \frac{p_t}{d} \quad (1)$$

式中, p_t 为 t 时刻产品的价格; d 为污染物处理技术的费用,故 $d > 0$

在此基础上假设:此节点处企业 II 产品供给量用其产品价格弹性的倒数表示其如下方程:

$$p_t = \frac{b}{x_t^\sigma} \quad b > 0, \sigma > 0 \quad (2)$$

式中, σ 为企业 II 提供的产品价格弹性 (price elasticity) 的倒数; x_t 为 t 时刻此节点处企业 II 的产品供给量。

但是,在实际生产中,企业 II 在 t 时刻,为谨慎起见,会根据 t 时刻的市场情况对 $t+1$ 时刻的产品的供给量进行调整,经过调整以后,其 $t+1$ 时刻的差分方程如下:

$$x_{t+1} = x_t + \alpha(x'_{t+1} - x_t) \quad (3)$$

式中, α 为调整速度,属于系统内部非线性动力学机制的内部控制参量。当 $\alpha = 1$ 时,表示 II 企业根据 t 时刻的产品价格期待和技术费用成本,按照最大利润的静态方程产量去生产。

基于上述分析,生态产业共生系统中的某节点,企业 II 在 $t+1$ 时刻的产品供应量为 x_{t+1} ,则 x_{t+1} 的时间序列的非线性差分动力学方程如下:

$$x_{t+1} = x_t + \alpha(x'_{t+1} - x_t) = (1 - \alpha)x_t + \frac{\alpha p_t}{d} \quad \alpha \in [0, 1] \quad (4)$$

式中, α 是企业 II 对产品产量的调整速度; d 为企业 II 对污染物循环利用技术费用。

在 t 时刻,将式(2)带入式(4),则有:

$$x_{t+1} = (1 - \alpha)x_t + \frac{b\alpha}{dx_t^\sigma} \quad (5)$$

最后得:

$$z_{t+1} = (1 - \alpha)z_t + \frac{\alpha}{z_t^\sigma} \quad (6)$$

式(6)是在某节点处,企业 I 的污染物供给不变情况下,假定企业 II 的污染物需求和其产品供给线性相关前提下,内部控制参量为调整速度 α ,外部变量为价格弹性的倒数 σ 时的离散模型。

4 分析

4.1 当 $\alpha = 1$ 时

当 $\alpha = 1$ 时,式(6)转化为下式:

$$z_{t+1} = \frac{1}{z_t^\sigma} \quad (7)$$

$\alpha = 1$ 暗示了系统内此节点处的企业 II 一直不需要调整其产品的产量,此节点状态变化随时间的演变特征满足上述离散差分方程。

式(7)的离散差分方程其变化特征取决于外部变量价格弹性的倒数。其解如下:

当价格弹性大于 1 ($\sigma < 1$) 时,其轨道变化特征是趋近于稳定点 1;

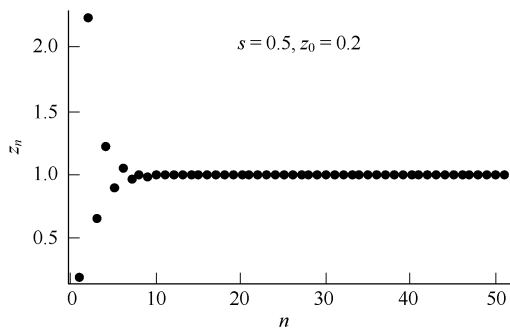
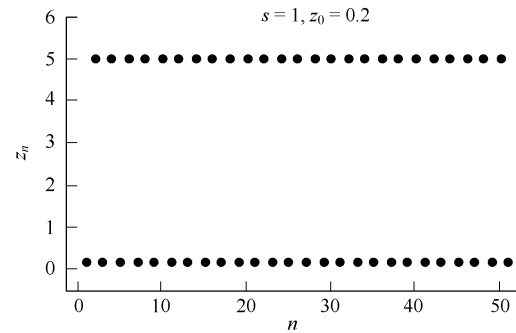
当价格弹性等于 1 ($\sigma = 1$) 时,其轨道变化特征是在 1 和 2 之间周期振荡;

当价格弹性小于 1 ($\sigma > 1$) 时,其轨道变化特征是周期振荡并且很快达到无穷大。详见图 1、图 2 和图 3。图 3 用的是对数坐标。

4.2 当 $\alpha \in [0, 1)$ 时

当 $\alpha \in [0, 1)$ 时,式(7)转化为下式:

$$z_{t+1} = (1 - \alpha)z_t + \frac{\alpha}{z_t^\sigma} \quad (8)$$

图1 $\sigma < 1$ 轨道趋于稳定点 1Fig. 1 The path is close to steady point 1 when $\sigma < 1$ 图2 $\sigma = 1$ 轨道在 1 和 2 之间振荡Fig. 2 The path is concussive between 1 and 2 when $\sigma = 1$

$\alpha \in [0, 1)$ 暗示了系统内此节点处的企业 II 以一种谨慎的态度,在考虑市场因素的情况下,根据 t 时刻对市场的分析判断来调整其 $t + 1$ 时刻的产品产量。

首先,给出(8)的数学解。一般而言,离散映射的差分方程的定点也存在稳定性问题。可以令 x_f 表示定点的位置,则根据递推关系式可得:

$x_f = F(x_f)$ 根据式(8),有:

$$F(x) = (1 - \alpha)x + \frac{\alpha}{x^\sigma}$$

设外界影响(微扰)使 x 偏离 x_f 一极小量:

$$x = x_f + \varepsilon$$

则:

$$x_{n+1} = x_f + \varepsilon_{n+1} = F(x_n) = F(x_f) + F'(x_f)\varepsilon_n + O(\varepsilon_n^2)$$

如果只保留一次项,则得到:

$$\varepsilon_{n+1} = F'(x_f)\varepsilon_n$$

所谓稳定,就是要求经过迭代后的 $|\varepsilon|$ 越来越小。因此离散映射的稳定性条件是:

$$\left| \frac{\varepsilon_{n+1}}{\varepsilon_n} \right| = |F'(x_f)| < 1$$

可以看出 $x_f = 1$ 是满足 $x_f = F(x_f)$ 的唯一一个值。

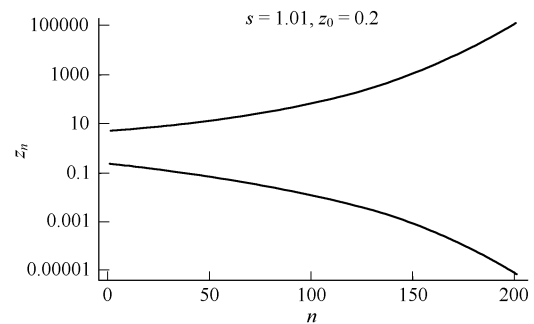
对于由稳定过渡到不稳定的临界情形:

$$|F'(x_f)| = 1$$

根据非线性动力学的理论,在临界值 $\sigma = \frac{2-\alpha}{\alpha}$ 的时候,轨道会出现倍周期分岔,即 x_n 的值会在两个定点之间来回变化,出现周期为 2 的分岔现象。随着 σ 的增大,会出现 4 周期、8 周期等等越来越密的分岔,直到 σ 达到另外一个值时,即过渡到混沌现象。

式(8)的离散差分方程变化特征为:当 $\sigma < (2-\alpha)/\alpha$ 时,变化轨道趋近于一个唯一稳定的定点 1;当 $\sigma = (2-\alpha)/\alpha$ 时,这个唯一稳定的定点 1 有强烈的振荡;当 $\sigma > (2-\alpha)/\alpha$ 时,轨道表现为周期性振荡或者混沌。上述 4 种理论分析结果详见图 4 ~ 图 7。

$(2-\alpha)/\alpha > 1$ 时,对于 $\sigma > (2-\alpha)/\alpha$ 情况,有 $\sigma > 1$,也就是价格弹性小于 1 这种情况也可以认为企业 II

图3 $\sigma > 1$ 轨道周期振荡并且很快达到无穷大Fig. 3 The path surges regularly and reach to infinite quickly when $\sigma > 1$

对 $t+1$ 时刻产量的调整,客观上起到防止了节点趋向不稳,甚至可能出现的混沌。

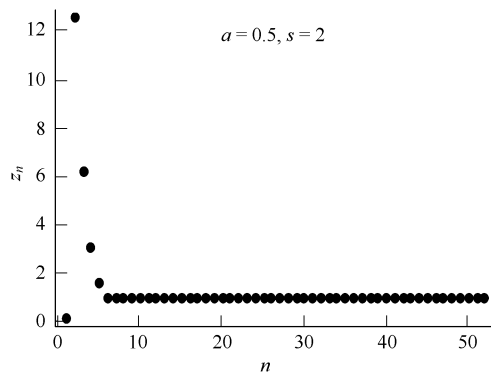


图4 轨道趋于唯一稳定点1的情况

Fig. 4 Condition that the path is close to the only steady point 1

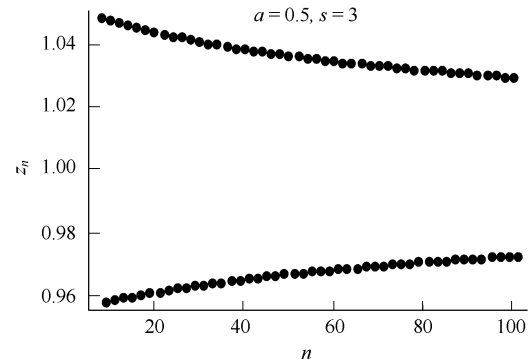


图5 倍周期为2的分叉

Fig. 5 The bifurcate condition when double period is 2

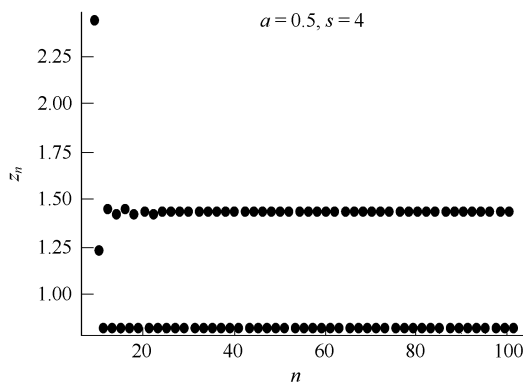


图6 倍周期大于2的分叉

Fig. 6 The bifurcate condition when double period is larger than 2

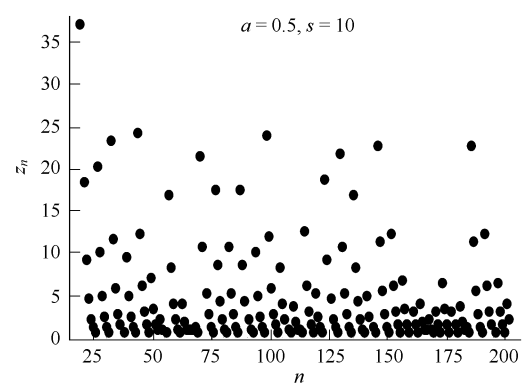


图7 倍周期达到一定值时的混沌现象

Fig. 7 The chaos phenomenon when double period reach to a certain value

5 节点模型解的稳定性讨论

(1) 当 $\alpha = 1$ 时

$\alpha = 1$ 时,表示企业Ⅱ根据 t 时刻的产品价格期待和技术费用成本,按照最大利润的静态方程产量去生产。此时,对于节点而言,只有在 $\sigma < 1$ 时,也就是价格弹性大于 1 时,这意味着产品的价格弹性必须是有弹性的。这时,节点的变化特征是趋于稳定;其它情况此节点都有周期性振荡,当价格弹性小于 ($\sigma > 1$) 1 时,其轨道变化特征是周期振荡并且很快达到无穷大。

因此,对于节点处的企业Ⅱ而言,如果产品的价格弹性大于 1,节点的变化特征是趋于稳定;但是当产品的价格弹性等于 1 时,节点处于稳定的周期振荡状态;当产品的价格弹性小于 1 时,节点会短时间内急剧振荡,并很快趋于无穷,其状态属于强不稳定状态。

上述结论对于生态产业共生系统节点稳定性的指导意义在于,如果节点的企业Ⅱ要想以最大利润的静态方程产量去生产其产品,那么只有在其产品的供给价格弹性大于 1 时才行,否则,此节点状态将趋于周期性振荡的不稳定状态。

(2) 当 $\alpha \in [0, 1)$ 时

节点状态只有在 $\sigma < (2 - \alpha)/\alpha$ 时,才趋近于一个唯一稳定状态,图 5;而当 $\sigma = (2 - \alpha)/\alpha$ 时,节点在唯一的稳定状态附近 2 倍周期振荡,图 6;当 $\sigma > (2 - \alpha)/\alpha$ 时,节点表现为在稳定状态附近大于 2 倍周期性振荡,图 7;甚至当 α 达到一定值时,此节点出现混沌现象,图 8。

因为, $\alpha \in [0, 1)$, 所以 $(2 - \alpha)/\alpha > 1$, 那么, 对于 $\sigma \leq 1$ 的情况(这时, 产品价格供给弹性大于等于 1), 总有 $\sigma < (2 - \alpha)/\alpha$, 也就是说, 这时节点的状态处于稳定状态。当 $\sigma > 1$ 时(这时, 产品价格供给弹性小于 1), 为防止节点行为在稳定点附近倍周期振荡或出现混沌现象, 必须使 α 值能够满足 $\sigma < (2 - \alpha)/\alpha$, 这时节点才处于稳定状态, 因此, 企业 II 的供给弹性小于 1 时, 价格弹性越小, σ 值就越大, 那么越容易出现倍周期振荡或混沌现象。

6 结论

本文运用非线性经济学构建模型, 并得出其数学解。通过以上分析可以得出对于节点处对节点上游企业的污染物进行循环利用的企业, 当其生产的产品价格弹性等于 1 或小于 1 时, 其必须调整好控制参量 α , 使得必须满足 $\sigma < (2 - \alpha)/\alpha$, 这时节点时间序列的演变才会趋于稳定, 如果不能满足这个条件, 那么节点会在稳定点附近倍周期振荡, 甚至出现混沌现象。

因此, 为使工业园区稳定的发展, 根据其产品价格弹性的不同, 要很好的控制企业的调整速度参数 α 的取值, 保证工业园区的稳定发展。

References:

- [1] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice, the evolution of inter-dependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, 1997, 1 (1): 67–80
- [2] Li B. *Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [3] Cote R. Designing Eco-industrial Parks; a Synthesis of Some Experiences. *Journal of Cleaner Production*, 1998, 6: 181–188.
- [4] Lou Y, Zhao H. Analysis of the Model of Ecological System and the Abiotic Factors of the Environment. *Quantitative & Technical Economy*, 2001, 3: 61–64.
- [5] Fleig A K. Eco-industrial Parks A Strategy Towards Industrial Ecology in Developing and Newly Industrialized Countries. Eschbom, Germany: Deutsche Gesellschaft for Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2001.
- [6] Deutz P, Gibbs D, Proctor A. Eco-industrial Development: its Potential as a Stimulator of Local Economic Development. New Orleans: Annual Meeting of the Association of American Geographers, 2003. 11–15.
- [7] Wang L M, Zhang J T. Applications of Ecological Theories for Eco-industrial Development. *Environmental Protection*, 2003, 7: 57–60.
- [8] Rose G D. Social experiments in innovative environmental Management: The Emergence of Eco-technology. Waterloo, Ontario, Canada: Dissertation for Ph. D. in Planning in Waterloo University, 2003.
- [9] Zilahy G. Organizational Factors Determining the Implementation of Cleaner Production Measures in the Corporate Sector. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12: 311–319.
- [10] Qin Y, Wu C Y, Wu C G. There Existing Problems During the Operation of Eco-industrial Symbiosis Networks (ESN) and the Research on Flexibility. *Journal of Soft Science*, 2004, 2: 38–41.
- [11] Heeres R R, Vermeulen W J V, de Walle F B. Eco-industrial Park Initiatives in the USA and the Netherlands: First Lessons. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12: 985–995.
- [12] Morehouse H M. A Spatial Decision Support System for Environmentally Sustainable Communities. Ann Arbor, MI: Dissertation PhD in Clark University, 2002.
- [13] Majumdar S. Develop an Eco-industrial Park in the Lloydminster Area. Ottawa, CA: Dissertation for Master of Science in Civil Engineering, University of Calgary, 2001.
- [14] Wang Z H. The Research of Industrial Symbiosis Networks in EIPs. Dalian: Dissertation for PhD of Management in Dalian University of Technology, 2003.
- [15] Hsieh D. Chaos and nonlinear dynamics: application to financial markets. *Journal of Finance*, 1991, 46: 1839–1877.
- [16] Blank S. Chaos in futures markets? A non-linear dynamical analysis. *The Journal of Futures Markets*, 1991, 11: 711–728.
- [17] Bohan J. Relative strength: further positive evidence. *J. Portfolio Manage*, 1981: 36–39.
- [18] Brush J. Eight relative strength methods compared. *J. Portfolio Manage*, 1986: 21–28.

参考文献:

- [2] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 楼园, 赵红. 企业生态系统模型及非生物环境因素分析. *数经济技术经济研究*, 2001, 3: 61–64.
- [7] 王灵梅, 张金屯. 生态学理论在生态工业发展中的应用, *环境保护*. 2003, 7: 57–60.
- [10] 秦颖, 武春友, 武春光. 生态工业共生网络运作中存在的问题及其柔性化研究. *软科学*, 2004, 2: 38–41.
- [14] 王兆华. 生态工业园工业共生网络研究. 大连: 大连理工大学博士论文, 2003.