

循环经济“拐点”:理论与实证研究

白露 白永秀 薛耀文 宋 娟

摘要:环境库兹涅茨曲线已被发达国家的历史轨迹所证明,它是末端治理模式的理论依据。我国现阶段经济增长已经开始受制于资源和环境的双重约束,不能再延袭发达国家所走过的末端治理的道路。因此,只有开展循环经济才能到达环境库兹涅茨曲线的“拐点”,才能从根本上改变环境自净化能力消退以及资源濒临枯竭的现状。循环经济的理论充实了环境库兹涅茨曲线的内涵,循环经济的实践也必将使环境库兹涅茨曲线更加完善。

关键词:生产过程末端治理模式 循环经济 环境库兹涅茨曲线

一、引言

环境与经济的关系问题,是人们日益关注的问题,关于这一问题,有一个著名的假定曲线——环境库兹涅茨曲线,环境库兹涅茨曲线反映了经济增长不同阶段所对应的环境状况,即生态与环境恶化同经济发展水平之间遵循倒 U 型的曲线假定。研究西方发达国家二百多年的经济增长道路,可以看出这些国家的经济增长实际上就是经历了环境库兹涅茨曲线所反映的先污染、后治理的过程。即,一个国家工业化的起飞阶段,必然会出现一定程度的环境恶化,当经济增长达到一定程度以后,具备了加大环境治理投入的条件,环境改善随之出现。因此一个国家的政府可以对环境恶化采取无为而治的态度,反正环境恶化不可避免。通过加速经济增长,尽快抵达环境库兹涅茨曲线中对环境改善有利的发展阶段才是解决环境问题的关键。这是末端治理模式的理论依据。西方多数发达国家都是在 20 世纪 70-80 年代、人均国内生产总值(GDP)达到 1 万美元左右时跨越倒 U 型曲线的顶点的。

2005 年我国人均 GDP 只有 1703 美元,并且发达国家实现工业化时的资源、环境初始条件已不复存在,我国现阶段环境退化程度已远远高于西方国家同等收入水平时的退化程度,经济增长已经开始受制于资源和环境的约束。如何才能在较低的经济规模和较低的污染水平下跨越环境库兹涅茨曲线顶点,使顶点向横向左移、再向纵向下移在理论上值得探讨。因此,对我国经济与环境关系的理论研究应突破环境库兹涅茨曲线的视角,本文采用为保持生

态平衡、保护生物资源研究中建立的二物种群体连续系统弱肉强食模型来研究经济-环境问题,希望在理论上有新的尝试。本文通过循环型经济“拐点”理论研究,验证了循环经济发展在环境库兹涅茨曲线“拐点”实现中的加速作用。

二、相关研究回顾

最早提出“循环型经济”一词的是美国经济学家鲍尔丁,他是在 20 世纪 60 年代提出生态经济时谈到循环型经济的。后来循环型经济的理念逐渐细化到生态学、经济学等各个领域。

1999 年,美国 Reed 大学经济系 Chalier Annick 和 Parker Jeffrey 对循环产业的技术革新进行了经济学研究。他们在实例调查基础上,研究循环型经济新技术研发和应用的经济刺激机制。新泽西州立大学也于 1999 年出版了《实用循环技术经济学》,提供了循环型经济的成本效益分析工具。发达国家之所以在较短时间内就把循环经济发展成为一股很大的潮流和趋势,其有力和有效的举措就是以立法为先导,把循环经济全面纳入强有力的法制化轨道加以推进。国外循环型经济法规方面研究的前驱是德国和日本。日本、德国、法国、英国、意大利、西班牙等发达国家,以及新加坡、韩国等高收入国家,都制定了综合性或单项的发展循环经济、资源循环利用的法律。

实践上,代表性的模式有企业内部的杜邦模式、企业之间的卡伦堡模式以及伯丁顿社区城市发展模式。其中,杜邦模式创造性地把循环型经济三原则(Reduce, Reuse, Recycle, 即 3R 原则)发展成为与化

学工业相结合的“3R 制造法”,组织企业内部各工艺路线之间的物料循环利用;卡伦堡模式把不同的工厂联结起来,形成共享资源和互换副产品的产业共生组合;英国伯丁顿社区由伦敦最大的商住集团皮保德、环境专家及生态区域发展工作组联合开发,实现了“零能源发展”,最大限度地利用自然能源,减少环境破坏与污染,实现零化石能源使用,能源需求与废物处理实现基本循环利用。这些设计理念和实践是引领各国循环型经济发展的典范。

近年来,我国在生态工业园区和循环经济省市的规划建设实践的同时,启动了循环经济的理论和方法研究。中国循环型经济发展论坛 2005 年年会透漏消息:《循环型经济法》已开始起草,争取在 2007 年将法律草案提请全国人大常委会审议。我国对于循环型经济的理论研究,重点多在于循环经济内涵、循环经济发展模式、循环经济产业发展战略、循环经济政策体系、循环经济立法、循环经济评价指标体系等方面。然而,为什么发展循环型经济,“环境库兹涅茨曲线”是否适用于中国,中国应该是什么样的发展曲线等这些循环型经济的最本质的问题尚需理论界进行更加深入的探讨。

三、“生产过程末端治理”模式下经济 - 环境分析模型

环境库兹涅茨曲线反映的是西方发达国家二百多年来的经济增长道路先污染、后治理的过程,是末端治理模式的理论依据。因此,我们将分析限定在末端治理模式下,即,开始注意环境问题,但其具体做法是“先污染、后治理”,强调生产过程的末端采取措施治理污染。

(一) 假设与建模

模型的假设如下:(1) 忽略经济社会、环境之外的其他可能导致中止中国发展的非可控因素;(2) “生态阈值”足够大,生态环境可逆,在治理和自净化作用下生态环境能够完全恢复;(3) 人类经济社会发展模式界定为先污染、后治理的“末端治理”模式;(4) 人类经济行为界定为前半段污染后半段开发的人类行为;(5) 考虑制度和法制因素对人类经济行为因子的强制性作用;(6) 环境污染因子确定为大气因子、水因子、固废因子、噪声因子和健康因子等;(7) 自然资源因子为气候资源、水资源、土地资源、生物资源、矿产资源、能源资源等资源;(8) 人类欲望无止境,历史无限长,也即人类经济行为动机永远存在。

设环境污染因子为 $Y(t)$, 人类经济行为因子为 $X(t)$ 。生态系统是一个通过自组织作用形成的自组织系统,是具有自调节能力的自控系统。当 $X(t) = 0$ 即人类不作为时,由于环境具有自我调节能力,环

境污染因子 $Y(t)$ 以系数 $\lambda (\lambda > 0)$ 减少,即 $\frac{dY}{dt} = -\lambda \cdot Y$ 。人类的末端治理行为,尤其是对于能源产品的开发和利用行为造成对环境的破坏,环境污染因子增大,设增大程度与人类经济行为因子 $X(t)$ 成正比,于是相对完善率为 $\lambda_X = -\lambda + \gamma \cdot X$ 。常数 $\gamma > 0$, 反映了人类经济行为导致环境污染的程度。如果不存在环境污染因子的反噬作用,为了谋求经济利益,人类经济行为将以系数 $\rho (\rho > 0)$ 增加,即 $\frac{dX}{dt} = \rho \cdot X$ 。但是由于人类经济行为造成了对环境的极大破坏,达到一定程度时,环境污染因子极度恶化,环境会惩罚人类。当意识到环境的反噬作用,政府会通过制度和法制来约束人类经济行为。设改善的程度与环境污染因子 $Y(t)$ 成正比,于是人类经济行为的相对增长率为 $\rho_Y = \rho - \mu Y$ 。常数 $\mu > 0$, 反映了环境受破坏后对人类经济行为的调节限制。所以模型可归结为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X(\rho - \mu \cdot Y) \\ \frac{dY}{dt} = Y(-\lambda + \gamma \cdot X) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

首先求平衡点,令 $\frac{dX}{dt} = 0$, $\frac{dY}{dt} = 0$, 得 $(0, 0)$ 和 $\left(\frac{\lambda}{\gamma}, \frac{\rho}{\mu}\right)$ 。

假若只考虑 $\left(\frac{\lambda}{\gamma}, \frac{\rho}{\mu}\right)$ 的稳定性,则可做变量代换使原点为平衡点,令 $X(t) = \frac{\lambda}{\gamma} + \varphi(t)$, $Y(t) = \frac{\rho}{\mu} + \psi(t)$, 代入(1)式得:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = -\mu\psi\left(\frac{\lambda}{\gamma} + \varphi\right) \\ \frac{d\psi}{dt} = \gamma\varphi\left(\frac{\rho}{\mu} + \psi\right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

设 $|\varphi(t)| = \frac{\lambda}{\gamma}$, $|\psi(t)| = \frac{\rho}{\mu}$, 去掉二次项使之线性化,得:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\lambda\mu}{\gamma}\psi \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{\rho\gamma}{\mu}\varphi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

可以求得上式系数行列式的特征根为 $\pm \sqrt{\lambda\rho}i$ 。故线性方程组的通解为:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \varphi_0 \cos(\sqrt{\lambda\rho}t) \\ \psi(t) = \psi_0 \sin(\sqrt{\lambda\rho}t) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(二) 模型与环境库兹涅茨曲线的一致性分析

第一, φ 和 ψ 的线性化解,既不增长也不化解,而是连续振动。这意味着人类经济行为因子与环境污染因子之间的平稳是亚稳定状态,是一种广义稳定;在平衡点邻域内显示出稳定的有界循环。

第二,令 $\sqrt{\rho}T=2\pi$,则环境污染曲线和人类经济行为曲线振动周期 $T=2\pi/\sqrt{\rho}$ 。

第三,环境污染曲线和人类经济行为曲线的振动相位差为 90° ,其图像见图 1。

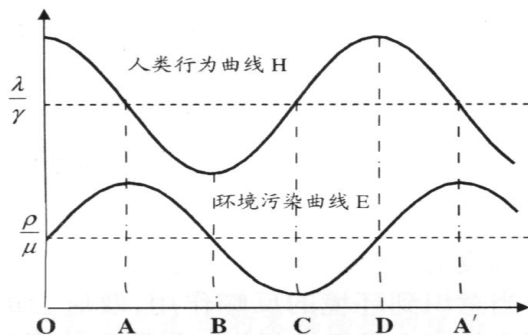


图 1 末端治理模式下人类行为因子和环境污染因子作用图示

图 1 表明,人类行为导致了环境污染,同时也作用于治理污染,二者的周期一致。在 OA-AB 阶段,人类行为主要表现为使环境污染减少的治理行为,在 BC-CD 阶段,人类行为主要表现为使环境污染增加的开发行为。OA 段:人类意识到环境问题的严重性开始进行治理,但因为超出了环境容量,人类治理行为作用难以立刻扭转局势,环境污染仍然呈上升势头;AB 段:由于不能看到明显效果,环境污染更加严重,人类的治理行为加大,在法制和制度的强制作用下环境污染开始逐渐下降。可见,环境污染的减少滞后于人类经济行为。在人类行为最严重时,也即人类大肆开发、超生态发展生产时,环境污染因子并非最严重,而在之后的 $1/4$ 个周期逐渐过渡到污染最高峰。BC 段:由于环境污染的限制减弱,人类又开始进行新一轮的开发行为,但是由于环境治理的作用延续存在,这一阶段环境环境污染仍然是减少的;CD 段:人类开发行为最终导致环境新一轮的破坏,由于环境自净化能力的存在,在环境承载能力以内,污染并非很严重。DA 段:重复 OA 段。这也有一个滞后期,环境对于人类开发行为的约束滞后于环境污染。这说明法制和制度的作用往往是迟缓的,也就是在生态环境承载力已经接近极限的情况下人类开发行为才开始有所收敛。当人类意识到环境对自身的威胁并开始治理时,效果也并非立竿见影,而是仍要伴随环境一段时间的恶化才能达到一定的治理效果,达到环境污染低谷。滞后期均为 $1/4$ 周期。

在“生态阈值”足够大的假设条件下,环境与人类行为关系存在“双赢”区间 (AC 区间)和“两难”区间 (CA 区间),这与“环境库兹涅茨曲线”的观点是一致的。其中,A 点与 A 是“环境库兹涅茨曲线”中环境由坏变好的“拐点”(环境变化的临界点而非

数学意义上的拐点),也即环境污染由增加变为减少的“拐点”。

同时,模型也进行了一定时空范围内的扩展。为使环境恢复到平衡状态,末端治理的发展模式是“先污染,后治理”,因此倒 U 型曲线发展只是漫长的人类发展历史中的一个周期。而人类经济的发展史是由无数个环境污染倒 U 型曲线构成的。

第四,从解中消去时间 t ,得:

$$\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\psi}{\psi_0}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

这说明环境与人类经济间是相辅相成、相互制约的关系,这条轨线在总体相空间的图形见图 2。

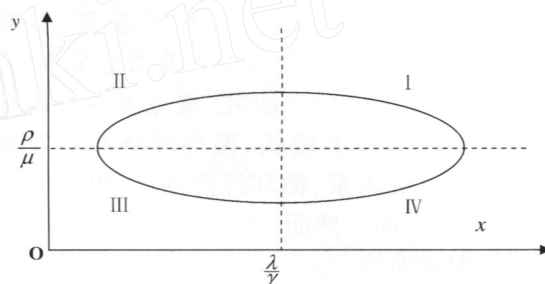


图 2 人类末端治理行为因子和环境污染因子作用轨线在总体相空间的图形

$X = \frac{\lambda}{Y}, Y = \frac{\rho}{\mu}$,将总体相平面分成了四个空间。

$$\begin{aligned} & \therefore \frac{dX}{dt} < 0, \frac{dY}{dt} > 0; \quad \therefore \frac{dX}{dt} < 0, \frac{dY}{dt} < 0; \quad \therefore \frac{dX}{dt} > 0, \\ & \frac{dY}{dt} < 0; \quad \therefore \frac{dX}{dt} > 0, \frac{dY}{dt} > 0. \end{aligned}$$

第一象限(先期治理阶段):人类行为与环境污染是反向的,人类行为减少,环境污染增加,与图 1 中的 OA 阶段相对应;第二象限(着力治理阶段):人类行为与环境污染是同向的,均趋于减少,与图 1 中的 AB 阶段相对应;第三象限(先期开发阶段):人类行为与环境污染是反向的,人类行为增加,环境污染减少,与图 1 中的 BC 阶段相对应;第四象限(着力开发阶段):人类行为与环境污染是同向的,均趋于增加,与图 1 中的 CD 阶段相对应。环境污染因子 Y 由增加变为减少的临界点为 A,此处 $X^* = \lambda\gamma^{-1}$, $Y^* = \rho\mu^{-1} + \psi_0 = \rho\mu^{-1} + \psi(\pi(2\sqrt{\rho})^{-1})$ 。可见,环境自净化能力越强,人类对于环境的污染程度越小,环境的承载力越大,环境恢复得越快,“拐点”(临界点)到达得越早。

第五,从对非线性微分方程组的直接讨论也可知道轨线是一簇以平衡点为中心越来越扩展的封闭曲线。封闭曲线对应着(1)式的周期解,记周期为 T , $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为在一个周期内 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的平均值。由方程组(1)变化形式积分以及 $X(T) = X(0)$, $Y(T) = Y(0)$,则有:

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\mu} \left\{ \rho T - \ln \frac{X(T)}{X(0)} \right\} = \frac{\lambda}{\gamma} \\ \bar{Y} = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\gamma} \left\{ \ln \frac{Y(T)}{Y(0)} + \lambda T \right\} = \frac{\rho}{\mu} \end{cases} \quad (6)$$

用平均值 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 表示周期性变化的 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的大小。上面的分析表明,人类经济行为因子最终获取的使用价值取决于环境污染因子方程 $\frac{dY}{dt} = Y(-\lambda + \gamma \cdot X)$ 中的 λ 和 γ ,而环境污染因子取决于人类经济行为因子方程 $\frac{dX}{dt} = X(\rho - \mu \cdot Y)$ 中的参数 ρ 和 μ 。

当人类经济行为因子自增长系数 ρ 下降时,环境污染因子将会降低,即:如果开发获得的经济收入降低时,对于人类经济行为的刺激减小,人类的无度开发行为会有所收敛,环境质量就会提高;而机制比较健全和有力时,即 μ 增大时,也将使环境污染因子减小。从而可以认为:若环境恶化到一定程度,人类的开发代价甚高或是受益很少时,将迫使人类改变策略,在发展经济的同时就注重保护环境;机制和法规足够完善,也能够有效的减少污染。另一方面,环境自我调节能力 λ 的无限容纳性将导致人类经济行为的循环往复,假若环境净化能力减弱,若欲使环境恢复平衡,人类掠夺性开发将不得不有所收敛和改变。在而人类经济行为导致环境污染程度极度加深时,即 γ 增大时,人类为了长远的可持续发展,也将减少人类经济行为。^⑩

(三) 模型对环境库兹涅茨曲线的横向影响分析

在“生态阈值”足够大的假设下,环境永远能够回到平衡状态,与末端治理行为之间重复着周而复始的循环。然而这一假设过于严格且不现实。同时,制度和法制的作用也并非绝对有效,甚至往往是低效的。否则,世界上最早制定出保护森林法律的楼兰古国文明就不会覆灭了。^⑪通常超出生态阈值后对于生态环境的破坏都是不可逆、难以恢复的,^⑫人类对于环境的破坏也不会因为法律适可而止的。

随着环境资源的减少,环境资源产品越来越稀缺,其价值也越来越高。环境资源产品带来的超额利润对于人类的刺激越来越强烈,即 ρ 逐渐增大,致使环境污染不断加重并持续累积。

自然生态系统的环境容量能力是有限的,即有“容量”限制。这个“容量”限制类同于环境库兹涅茨曲线中的阈值的概念,也即在先变坏又变好的循环过程中,一旦超过生态不可逆的阈值水平,环境的自净化能力^⑬就会逐渐发生退化。环境因子的自净化能力 λ 减弱,会造成曲线振动周期的大幅度加长。当达到极限状态时,超过了最大“容量”,环境会完全

丧失自净化能力。这时单靠人类对环境的调节净化,其作用毕竟有限,生态恶化难以遏制。而在这个过程中,人类经济行为将因为环境的约束发生相应的改变, $\bar{X}$ 减小,最终随着生态的终结而终结。

环境因子与人类经济行为因子演化模型的具体变化趋势如图 3, 仅是一个示意图,在现实中其周期相对于人类社会的发展历史是相当长的,人类所能观察到的可能仅仅是“环境库兹涅茨倒 U 型曲线”这一个周期内的情况。同时,不同的国家和地区有不同情形。有些国家和地区对于环境的过度破坏可能造成环境根本没有恢复的可能,这样可能连一个周期都难以为继。这样环境曲线并非“库兹涅茨倒 U 型曲线”,而是呈直线上升却无拐点的单调递增毁灭曲线。

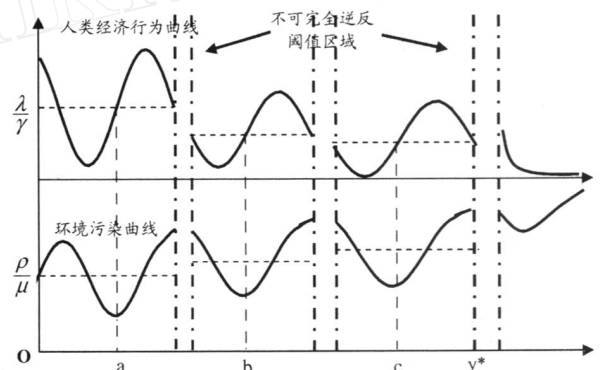


图 3 末端治理模式下人类行为因子和环境污染因子演化示意图

Oa 阶段:经济发展造成的污染未超过环境承载力的阶段,环境自净化能力为 100%。ab、bc 阶段:环境倒 U 型曲线在不完全逆反假设下的作用曲线,环境自净化能力分别为 60%、10%。最终环境不能承载点也即图 1 中的 A 点。求模型的解析解:由于环境污染因子依赖于人类的活动,假设 Y 是 X 的函数,则由导数的锁链法则,可得:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY/dt}{dX/dt} = \frac{Y(-\lambda + \gamma \cdot X)}{X(\rho - \mu \cdot Y)}$$

方程是一个可分离的一阶微分方程。解之,得:
 $\rho \ln Y + \lambda \ln X - \mu Y - \gamma X = k$ (k 为常数)

运用自然对数和指数函数的性质,方程可改写为:

$$\frac{Y^\rho X^\lambda}{e^{\mu Y + \gamma X}} = K \quad \dots\dots\dots (7)$$

不同的国家和地区,经济发展与环境污染的现状不同,也即初始值 X_0 、 Y_0 不同,从而计算出的 K 值不同。不同的 K 值,决定了不同的 X 、 Y 关系,临界点的 Y^* 值也就不同。

四、循环经济模式下经济 - 环境分析模型

发展循环经济不仅意味着经济形态的转变,更意味着一场深刻的经济、社会和文化变革。它要求

人类生产、生活、组织方式和价值观念发生根本转变,并将对政治、经济、文化、社会产生革命性影响。向整体可持续发展经济转变的实质是技术、经济、文化模式的跃迁与进化。与生物进化不同,人类经济、社会系统的进化同时受自然条件(自然选择)和社会因素的双重选择。因此,实现经济整体可持续发展是一个复杂的科学、技术、经济、文化、教育、社会与自然复合问题。

(一)模型的建立

循环经济改变了末端治理“资源 - 产品 - 污染排放”单向流动的线性经济,形成一个“资源 - 产品 - 再生资源 - 再生产品”的反馈式流程,其特征是低开采、高利用、低排放。所有的物质和能源要能在这个不断进行的经济循环中得到合理和持久的利用,以把经济活动对自然环境的影响降低到尽可能小的程度。循环经济要求运用生态学规律而不是机械论规律来指导人类社会的经济活动。基于循环经济基本理念对于末端治理经济与环境关系进行改进,建立循环经济模式达到成熟状态时的经济与环境关系模型。

(1)忽略经济社会、环境之外的其他非可控因素。(2)人类经济社会发展模式界定为 3R 的循环经济模式。(3)人类循环经济行为界定为循环经济发展到成熟阶段时追求经济效益的行为。(4)将循环经济建设与维护成本视为对于人类循环经济行为的固定比例阻碍。(5)环境污染因子确定为大气因子、水因子、固废因子、噪声因子和健康因子等。(6)人类欲望无止境,历史无限长,也即人类经济行为动机永远存在。

假设目前的环境自净化能力为 $\alpha\lambda$ ($0 < \alpha < 1$),人类循环经济行为相对增加了净化能力,设增加 u 。人类循环经济行为对环境污染因子的影响为 $\beta\gamma$ ($\beta \rightarrow 0$);人类循环经济行为以 $k\rho$ ($k > 1$) 增加,环境不再成为经济社会发展的制约。 λ 、 γ 、 ρ 、 u 均大于零。所以模型可归结为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X \cdot k\rho \\ \frac{dY}{dt} = Y (\beta\gamma \cdot X - \alpha\lambda - u) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

因为循环经济趋势是 $\beta \rightarrow 0$ 。假设在循环经济的比较成熟完善状态下 $\beta\gamma \cdot X = u$,即人类完全可以处理自己带来的污染,实现完全循环。则方程组(8)的解为:

$$\begin{cases} X = e^{k\rho t + c_1} \\ Y = e^{-\alpha\lambda t + c_2} \end{cases}$$

即随着时间的推移,环境污染会慢慢消减,循环经济行为成指数级增长;此时,经济将呈现极大发

展,环境污染不断消融,真正实现可持续发展。

循环经济也是一种以资源的高效利用和循环利用为核心,是对“大量生产、大量消费、大量废弃”的传统增长模式进行根本变革,实现可持续发展的一种经济增长模式。循环经济理念在发展思路彻底改变重开发、轻节约、重速度、轻效益、重外延发展、轻内涵发展,片面追求 GDP 增长,忽视资源和环境的倾向,加快经济增长方式的转变。^⑮资源分为可再生与不可再生资源。可再生资源的消耗、经济行为在传统经济模式下的关系模型和环境污染、经济行为在传统经济模式下的关系模型雷同,不再赘述。

(二)实证分析

以资源型省份山西省为例。山西省是一个以能源原材料为支柱产业的省份,经济初级化特征明显,经济增长几乎完全依赖于煤炭资源。由于长期过度开发,山西省的生态问题相当严峻,资源浪费和生态破坏问题严重。山西省的经济行为主要是煤的开采,在煤开采过程中,主要污染是大气污染以及水污染。因采煤造成的水污染、大面积的地下水枯竭,导致了山西省 20 万人吃水困难。假设煤开采造成的地下水污染可以治理、地下水消耗可以完全恢复。

1. 山西省目前状况的模型建立与分析

以 2005 年为基底。山西省 2005 年产煤量为 5.5 亿吨,即 $X(0) = 5.5$;2004 年山西省产煤总量为 4.93 亿吨,所以末端治理经济行为增长率 $\rho = 11.56\%$ 。由于煤炭业再次升温,2002 年山西省经济出现了奇迹般的转折。山西省 GDP 增长率由 2001 年的 1.5% 陡增至 2003 年的 12.5%,而在这奇迹的转变中煤炭等高污染高耗能行业为山西省 GDP 增长的贡献率创记录的达到 68%。根据前后的转变,认为由于政策允许的刺激作用煤炭等对于 GDP 增长作用为 7.48%;同理也可认为由于污染严重国家及各级政府对煤的开采量及使用量限制造成丧失 GDP 增长 7.48% 的机会损失,即限制调节系数 $\mu = 7.48\%$ 。据多年的平均数据显示,山西省水资源污染修复能力 $\lambda = 37.97\%$;每产出 1 吨煤就要付出 2.48 吨地下水的代价,山西省地下水总量年平均为 93 亿立方米,则每 1 吨煤要损失 26.67%,即 $\gamma = 26.67\%$ 。^⑯据 2005 年对 10 个城市 53 眼地下水井监测结果显示,有 49.1% 的水源井超过《地下水质量标准》类标准,受到严重污染。经初步测算,山西省地下水总量年平均为 93 亿立方米,则 2005 年地下水受污染量为 45.663 亿立方米,即 $Y(0) = 45.663$ 。则有:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X \cdot (11.56\% - 7.48\% \cdot Y) \\ \frac{dY}{dt} = Y \cdot (-37.97\% + 26.67\% \cdot X) \\ X(0) = 5.5, Y(0) = 45.663 \end{cases}$$

煤产量与环境污染程度数值解见图 4。

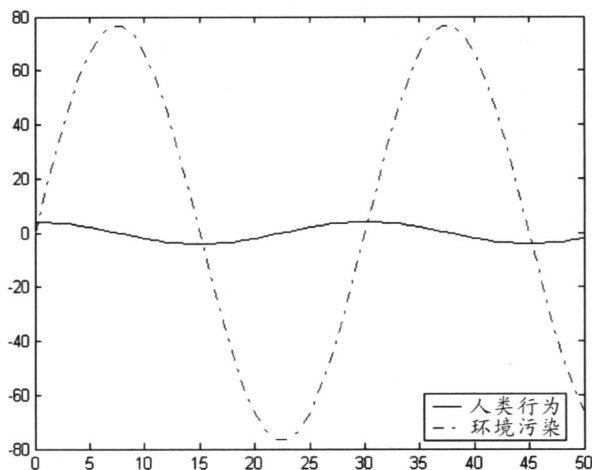


图 4 山西省煤产量与环境污染程度数值解

图 4 中,人类行为曲线的波幅很小。可见即使地下水污染可以治理、地下水消耗可以完全恢复,目前山西省环境状态对于采煤后再治理的末端治理行为的人类行为的限制也相当大。而地下水污染可以完全治理、地下水消耗可以完全恢复的假设是不成立的,所以山西省煤产量与环境污染最终的走向会是类似于阻尼振动的振幅越来越小的震荡波型曲线。当 Y 超过 Y^* 时,地下水污染将无法恢复。

将 $X(0)$ 、 $Y(0)$ 代入(7)式,得

$$K = \frac{45.663^{11.56\%} \times 5.5^{37.97\%}}{e^{7.48\%} \times 45.663 + 26.67\% \times 5.5} = 0.0225$$

$$X^* = \frac{\lambda}{Y} = X \left(\frac{\pi/2}{20.95\%} \right) = 1.424 \text{ 代入(7)式,得}$$

$$\left[\frac{Y \left(\frac{\pi/2}{20.95\%} \right)^{11.56\%}}{e^{7.48\%} \times Y \left(\frac{\pi/2}{20.95\%} \right) + 26.67\% \times 1.424} \right] \times 1.424^{37.97\%} = 0.0225$$

解之得:

$$Y^* = Y \left(\frac{\pi/2}{20.95\%} \right) = 78.409$$

$Y = 45.663 < 78.409$, 山西省尚未达到临界值。

由于对于人类行为空间很小,末端治理情况下要求山西省必须牺牲经济发展才能保证环境系统的恢复,或是牺牲生态平衡保证经济高速发展,也即受山西省处于“两难”境地。为此,必须借助于循环经济作用,使经济与环境和谐发展,尽早达到拐点。

2. 山西省循环经济成熟情况下的模型建立与分析

下面仍以 2005 年为基底,来观察一下循环经济的作用。假设循环经济发展到成熟阶段,山西省改善产业结构,在保证 GDP 增长的前提下降低煤炭业的比重,延长煤炭产业链,实现山西省的可持续发展。在保持经济增长率不变的情况下,通过科技创新等方式使循环经济行为代替了末端治理行为,用清洁可持续的产业代替了高能耗、高污染的煤

开采产业,假设循环经济行为为 $k_p = 20\%$ 。通过提高洗煤技术作用处理每 1 吨煤地下水损失量由 26.67% 降低为 1%。目前山西省大多数城市仅能处理三级水,成熟循环经济下假设水处理技术提高到可处理劣五级,水能够完全循环利用,水净化能力为 $\lambda = 100\%$ 。

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X \cdot 20\% \\ \frac{dY}{dt} = Y \times (-100\% + 1\% \cdot X) \\ X(0) = 5.5, Y(0) = 45.663 \end{cases}$$

解之得, $X = e^{0.2t+1.7}$, $Y = e^{-t+0.05e^{0.2t+1.7}+3.55}$, 将

解析解用数值解表示,见图 5。

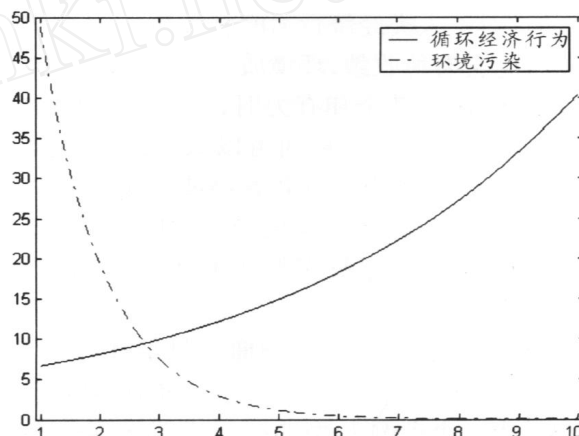


图 5 循环经济行为与环境污染程度的演化曲线图

循环经济的作用是明显的,它能够明显消化污染,使经济呈持续上升趋势。通过以上分析,可以发现循环经济的主要作用所在以及发展的必要性。当然,山西省的循环经济尚未发展到成熟阶段,可能目前的作用曲线幅度不会这么大,然而至少发展循环经济的导向是正确的。

六、结束语

人类经济发展必然耗费资源,也必定会对环境产生一定的影响。人类作为生态环境的因素之一,为了自身的可持续发展,必须在经济社会发展的同时,兼顾考虑到资源和环境的问题,实现经济、社会和资源环境的协调发展。

对发达国家环境问题进行研究产生的“环境库兹涅茨倒 U 型曲线”有其合理性的一面。在国民收入较高水平时,人类有可能研发出更好的环境治理技术,发现新的资源替代品,实现倒 U 型曲线的“拐点”。但就我国的现实情况而言,环境和资源承载力都已接近极限,未来经济与社会的发展越来越受制于环境和资源的约束。如果仍然任其发展,可能在“拐点”实现以前,环境系统已经濒临崩溃,资源已近

枯竭。

通过本文的分析研究,得出如下结论:

(1)在环境污染能够被完全治理、资源能够完全再生的假设下,“环境库兹涅茨倒U型曲线”是成立的。

(2)在弱肉强食模型基础上建立的经济与环境关系二维模型,能揭示出与环境库兹涅茨曲线相同的经济-环境协调发展关系,说明了模型的正确性。但同时又揭示出了比环境库兹涅茨曲线更具体的经济与环境的关系。认为环境污染相对于人类经济行为有一个滞后期,滞后期为 $1/4$ 周期。

(3)当人类经济行为因子自增长系数 ρ 下降时,环境污染因子将会降低,即:如果开发获得的经济收入降低时,对于人类经济行为的刺激减小,人类的无度开发行为会有所收敛,环境质量就会提高。

(4)机制比较健全和有力时,即 μ 增大时,也将使环境污染因子减小。从而可以认为:若环境恶化到一定程度,人类的开发代价甚高或是受益很少时,将迫使人类改变策略,在发展经济的同时就注重保护环境;机制和法规足够完善,也能够有效地减少污染。

(5)环境库兹涅茨倒U型曲线只是社会发展过程中的一个片断。从更为长期的角度看,环境-经济模型是由一个个倒U型曲线组成的连续系统,这就需要加入自净化能力的变化进行修正。在环境污染存在不完全逆反、资源能够部分再生的假设下,环境污染曲线呈递阶性成长循环,人类行为受限越来越大。

(6)循环经济行为能够有效消融污染,解决存在不完全逆反环境污染、资源只能部分再生情况下的经济发展受限制的问题。然而,不足在于,对于资源的考虑并不到位,资源的限制作用未充分体现。作为经济发展的一个重要层面,资源因素不可或缺。对于经济、环境、资源互动关系的考虑需要进一步加深。

(7)山西省煤产量与环境污染最终的走向是类似于阻尼振动的振幅越来越小的震荡波型曲线。当超过时,地下水污染将无法恢复。目前,山西省的 Y 小于 Y^* ,尚未达到临界值。而末端治理情况下要求山西省必须牺牲经济发展才能保证环境系统的恢复,或是牺牲生态平衡保证经济高速发展,也即受山西省处于“两难”境地。假设山西省已经到达循环经济成熟阶段,通过水处理技术提高可使目前山西省大多数城市仅能处理三级水提升到可处理劣五级,由此水就能够完全循环利用。因此,必须借助循环经济作用,使经济与环境和谐发展,尽早达到拐点。

环境库兹涅茨曲线已被发达国家的历史轨迹所

证明,循环经济模式也正在被许多国家探索和实践着。综合分析,可发现这两项研究尽管形式不一、侧重点不同,但并不相互脱离与冲突,循环经济这一新的经济模式在认可环境库兹涅茨曲线的同时,也体现着经济与环境的互动关系。循环经济是实现经济与环境最佳互动关系的发展模式。循环经济的理论充实了环境库兹涅茨曲线的内涵,循环经济的实践也必将使环境库兹涅茨曲线更加完善。不同的国家或地区有不同的经济与环境关系,适用于不同的发展策略,为推动循环型经济的理论研究在各个地区进行了有益的探索。至于怎样针对各个地区状况实现循环经济,是今后研究的重点。

注释:

吴季松:《循环经济的由来与内涵》,载《科技术语研究》,2006(1),第51~54页。

Chalier, A. and Parker, J., 1999. The Economics of Technological Innovation in Recycling, U.S. Oregon: Reed College.

Morris, J., 1999. Practical Recycling Economics: Making the Numbers Work for Your Program, New Brunswick: Rutgers, the State University of New Jersey.

汤天滋:《主要发达国家发展循环型经济经验述评》,载《财经问题研究》,2005(4)。

刘学敏:《英国伯丁顿社区发展循环型经济的启示》,载《中国经济时报》,2005-02-28; 黄贤金:《循环经济:产业模式与政策体系》,南京,南京大学出版社,2004。

秦静:《循环型经济法起草工作启动》,见法制网,2005-11-26。

“双赢”区间内,通过环境自净化及末端治理行为实现经济发展的同时环境污染减少。

“两难”区间内,人类的无序开发行为造成环境污染的大量增加,进入发展经济和保护环境的两难之地。

杨先明、黄宁:《环境库兹涅茨曲线与增长方式转型》,载《云南大学学报》(社科版),2004(6)。

齐欢、王小平:《系统建模与仿真》,61~65页,北京,清华大学出版社,2004。

⑪张利库、白露:《资源-环境-经济协调关系仿真研究》,载《经济理论与经济管理》,2007(5)。

⑫李晨:《每采1吨煤即损失2.48吨地下水 山西欲解无水之忧》,见中国经济网,2005-03-09。

⑬吴瑞林:《不能躺在“环境库兹涅茨曲线”上等拐点》,载《中国环境报》,2006-08-25。

⑭环境因子的自净化能力与污染量及污染消除时间有关。某给定的环境,如污染较轻,恢复均衡的时间就较短,自净化能力作用强。污染严重,净化时间增强,导致自净化能力下降。污染量与净化时间并非绝对线性关系。在特殊情况下,污染恶化到一定极限程度,污染净化时间就会变得很长,以至于无法依靠自净化来消除污染,系统便自进入一种恶性循环之中。

⑮刘志远、吕春艳、王丽娜:《和谐社会与循环型经济》,载《市场现代化》,2005(7)。

(作者单位:西北大学经济与管理学院 西安 710049)

太原科技大学经济管理学院 太原 030024)

(责任编辑:Q、K)