

资源-环境-经济 (REE) 模型的非线性动力学分析*

李佼瑞 郭宇鸣[†]

(西安财经学院 统计学院, 西安 710100)

摘要 为了寻找可持续的发展道路,探索不同发展模式下的生态环境效应,为可持续发展战略提供理论依据,推动构建环境友好型社会,建立了一个考虑环境污染治理的“资源-环境-经济”(REE)三维动力系统模型,利用非线性动力学理论及数值模拟的方法,理论分析了系统的局部稳定性,对系统的动力学行为进行了数值模拟,着重对污染排放和资源提取这两个重要因素进行研究,讨论其对系统的影响.结果表明,污染排放率和资源提取率对系统有很大影响.当污染排放率在一定范围时,系统出现极限环,形成周期现象.当资源提取率控制到一定范围内,可使经济达到稳定水平的同时,减少环境污染,保证资源储量.此研究对实现“资源-环境-经济”的协调可持续发展具有重要的现实意义.

关键词 资源-环境-经济系统, 非线性动力学, 稳定性, 数值模拟

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-040

引言

中国改革开放近四十年以来,依靠富而廉的资源储量,保持了近四十年的高速经济增长,同时也背负着资源日渐枯竭和生态环境逐渐恶化的后果^[1].纵观古今中外,随着经济的快速增长,带来了环境污染和资源枯竭等问题,但当经济增长水平达到一定高度时,生态环境质量又会随之改善.消耗资源、环境保护和经济增长三者之间存在相互影响、相互制约的内在联系,怎么处理它们之间的关系,做到既能保持经济高速增长、合理节约资源保护资源,又能使环境得到保护甚至改善,实现中国可持续发展的重要战略,是目前急需解决的问题^[2].所以本文将资源-环境-经济综合考虑,建立“资源-环境-经济”(“Resources-Environment-Economy”简称为 REE)三维动力系统模型.

近年来,有关 REE 系统的研究主要集中在系统协调度研究、经验研究和模型研究三个大方面.

系统协调度研究主要是构建一系列水平指标体系,借助数学方法测度 REE 系统协调状态.陈长杰^[3]等构造了隶属函数协调度模型,在回归拟合和协调指数计算的前提下,对中国经济和资源系统的

协调发展状况进行了定量分析,最后,再实证研究的基础上,提出了一些政策建议,为未来中国经济和资源系统协调发展做了有力理论指导;吴玉鸣^[4]等运用耦合协调度模型和熵值赋权法对中国 31 个省级区域若干年间经济增长与环境协调发展的时空分布分别进行了实证研究,并指出系列对策;茹江^[5]等人运用环境承载力的规律及其表达方法,以区域可持续发展为导向,分析了环境与经济综合规划的协调性问题,采用效益化的衡量依据,对某开发区的发展方案进行了评价和筛选.

经验研究是运用了计量的方法以及经验的理论研究.从 Hotelling^[6]的“可耗竭资源经济学”,到 Dasgupta 和 Heal^[7]、Solow^[8]以及 Stiglitz^[9]为代表的经济学家们的研究,使人们不断认识到资源在经济投入要素中的地位.与此同时,在新古典增长理论的框架下,经济-环境二元系统也得到了充分的研究.Forster^[10]假设污染的产生是由于资本的使用引起的,首次将污染存量引入生产函数.更进一步,Forster^[11]又在新古典增长理论的框架下将污染纳入效用函数进行研究.但此后,经济-环境领域的主要研究问题转向“Kuznets Curve”.能源-环境系统的研究重点是解决不可再生资源消费带来环境污染

2017-10-09 收到第 1 稿,2018-01-03 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11572231)

[†] 通讯作者 E-mail: guoyuming0625@163.com

的问题,从而发现更环保的替代能源的研究.然而,新古典增长理论模型认为,REE 体系中长期人均产出不下降是由于自然的技术进步,限制了模型解释确定技术进步的经济因素.后来 REE 体系的研究也逐渐与内生增长模型相结合^[12].陈利顶^[13]等人对长江流域长期以来忽视生态环境所带来的不利于可持续发展战略的矛盾进行了理论研究,对其区域资源环境适应性做了详细评价,对提高长江流域可持续发展的能力提出了建设性的建议.

从现有的文献来看,关于资源、环境、经济等多个子系统放在同一系统中的研究并不多见,即使综合考虑了资源、经济、环境等多个子系统之间的耦合关系,在实际的操作中大部分是侧重于两两系统间.另外一方面,不管是基于传统的统计学方法,还是基于系统动力学方法,其研究仅限于静态的统计描述和系统的定性研究.

王柯敬^[14]等人对资源、环境与经济的三维系统进行了研究,通过对系统整体发展水平以及内部协调状况的探讨,来研究中国资源、环境对经济发展的约束问题;洪开荣^[15]等在将资源、环境、经济、社会四个子系统放在同一系统中进行协调发展性分析,在前人提出的协调发展评价模型的基础上进行拓展;姜涛^[16]等人定性分析了“人口-资源-环境-经济”复合系统,建立了可持续发展多目标最优规划模型,研究了各种经济因素变动和经济结构转变以及发展战略和发展目标之间的关系,分析了中国中长期可持续发展状况;李杰兰^[17]等立足于生态经济理论,运用系统动力学模型方法和 Cobb-Douglas 生产函数,建立了青海省“资源-环境-经济”系统结构模型,理论分析了经济增长、资源枯竭和环境污染之间的反馈关系.以上这些研究避免了两两系统协调性评价的局限性.

陈六君^[18,19]等人建立了“环境-经济”耦合系统的动力学模型,对环境污染引发经济衰退的机制进行了详细的理论分析,之后还建立了“资源-环境”系统的动力学模型,并对模型所反映的突变性质及其经济意义进行了分析和解释;本文作者及团队^[20,21]在做了大量相关研究的前提下,提出了带有环境净化的分数阶 Solow 模型^[24],采用离散化处理方法求解该模型,并运用非线性动力学理论、数值模拟和参数分析的方法,分析了环境污染指数和污染治理强度两个参数对经济环境系统动态演化

的影响机理、不同分数阶阶数对模型的动力学行为影响;王洪礼^[22]等人建立了“资源-环境-经济”三维数学模型,利用非线性动力学理论研究了系统稳态的稳定性和分岔现象,并且在此基础上提出了随机因素对模型的影响,进一步研究了随机动力学模型对三个子系统均衡发展的影响,后来运用于海洋生态经济复合系统做了研究.

综上所述,本文基于“资源-环境-经济”三维视角,首次将环境治理因素引入 REE 系统中,建立“资源-环境-经济”(REE)复合系统的三维动态模型,研究系统参数的分岔阈值、动态演化行为,深刻地分析了污染排放率和资源提取率等模型参数对系统的影响.探索可持续发展的道路,讨论不同发展模式下生态环境综合效应,为可持续发展重大战略和构建环境友好型社会提供理论依据,对实现“资源-环境-经济”的协调可持续发展具有重要的现实意义.

1 理论分析与建模

1.1 理论分析

随着经济的快速发展,经济活动带来的环境问题日趋严重,其对于自然资源的消耗以及生产过程中带来的环境污染对自然资源存量 and 环境质量有着直接的影响.环境的污染对于自然资源的生存有着非线性的制约作用,影响生态平衡.污染对于经济发展也有一定的影响,严重的污染会导致经济发展效率变缓.尽管自然资源对于正常的环境污染有着自净的功能,但经济活动日益增长带来的污染也日益严重,超出自然资源的自净能力,也就使得自然资源的更新受阻,从而间接影响经济的发展,导致经济衰退.

如此恶性循环,必然需要采取一定的措施.从经济活动产入手,科学地进行经济结构调整,使得有一部分投资用于污染的治理,虽然直接看起来会使生产资本降低,减缓经济发展,但一定的污染治理会直接改善环境质量,从而进一步使得自然资源存量健康可持续增长,为生产提供资本,为社会生态文明作出努力,从而间接地使得经济健康平稳增长.

1.2 模型建立

根据上述 REE 系统的耦合关系,运用非线性动力学理论,在王洪礼等人^[22]的研究基础上,考虑

环境污染治理因素,建立了“资源-环境-经济”(REE)三维非线性动力系统模型,如下

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{\mu}\right) - cNK - fND + a\eta iKD \\ \frac{dD(t)}{dt} = \varphi DK - \varepsilon D - b\eta iKD \\ \frac{dK(t)}{dt} = \delta cNK - iKD - \gamma K - \eta iKD \end{cases} \quad (1)$$

其中, $N(t)$ 为自然资源存量, $D(t)$ 为污染密度, $K(t)$ 为经济规模. r 为自然资源的自然增长率,表示自然资源的自然更新; μ 为自然资源储量自然增长的半饱和系数; c 为经济活动对资源的提取率; f 为污染导致的自然资源死亡率; a 为环境治理带来的资源补偿参数; η 为环境治理资本弹性参数; i 为污染导致的经济损失参数; φ 为经济活动带来的污染排放率; ε 为环境的自净率; b 为环境治理带来的污染净化参数; δ 为经济活动对资源的利用率; γ 表示经济的自然衰退.

资源子系统表示为 $\frac{dN(t)}{dt}$, 首先, 与其自然生长有关, 其次, 经济活动需要提取资源, 环境污染导致的资源死亡, 这两方面减少了资源储量, 但环境治理改善了资源生长环境, 补偿了资源储量.

环境子系统 $\frac{dD(t)}{dt}$ 在本文中主要表现为环境污染密度, 其主要来源于经济活动的污染排放, 但环境的自净与环境治理带来的污染净化降低了污染密度.

经济子系统 $\frac{dK(t)}{dt}$ 用经济规模来体现, 经济的产出需要提取资源并与资源利用率密切相关, 但其本身具有自然衰退现象, 且环境污染会降低生产效率导致经济损失, 考虑环境治理因素后, 需要根据污染带来经济损失的程度作出响应, 投资治理环境污染.

2 模型动态分析

2.1 均衡点

利用非线性动力学理论, 求系统(1)的均衡点得到零点 $E_0 = (0, 0, 0)$, 系统处于资源存量、环境污染密度、经济规模均为 0 的状态; 边界均衡点 $E_1 = (\mu, 0, 0)$, 系统处于资源具有一定存量, 但经济

始终不发展, 且没有环境污染的状态; 平面型均衡点 $E_2 = \left(\frac{\gamma}{\delta c}, 0, \frac{\delta c r \mu - r \gamma}{c^2 \delta \mu}\right)$, 系统处于资源存量与经济规模达到某一动态平衡水平, 但环境始终没有污染的状态; 内均衡点 $E_* = (N_*, D_*, K_*)$, 且 N_*, D_*, K_* 均不为 0, 此时系统处于较切实际的动态平衡. (其中 N_*, D_*, K_* 利用 MATLAB 软件进行求解, 由于形式过于复杂, 不便呈现)

2.2 局部稳定性分析

根据 Routh-Hurwitz 判据, 下面讨论四个均衡点的局部稳定性:

2.2.1 零点 $E_0 = (0, 0, 0)$

雅可比矩阵

$$J_0 = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

特征值方程

$$|J_0 - \lambda E| = -\lambda^3 + (r - \varepsilon - \gamma)\lambda^2 + r\gamma\lambda + r\varepsilon\gamma = 0 \quad (3)$$

根据 Routh-Hurwitz 判据

$$a_0 = 1, a_1 = \gamma - r + \varepsilon, a_2 = -r\gamma, a_3 = -r\varepsilon\gamma \quad (4)$$

$$\Delta_1 = a_1 = \gamma - r + \varepsilon$$

根据各参数实际意义, $\varepsilon + \gamma \ll r$, 故 $\Delta_1 < 0$, 故均衡点 E_0 不稳定. 从经济角度出发, 不存在资源环境经济均不发展的情况, 所以, 不可能稳定于这种状态.

2.2.2 边界均衡点 $E_1 = (\mu, 0, 0)$

雅可比矩阵

$$J_1 = \begin{bmatrix} -r & -\lambda\mu & -c\mu \\ 0 & -\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \delta c\mu - \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

特征值方程

$$|J_1 - \lambda E| = -\lambda^3 + (\delta c\mu - \varepsilon - \gamma - r)\lambda^2 + (r\delta c\mu - r\varepsilon - r\gamma + \varepsilon c\mu - \varepsilon\gamma)\lambda + (r\varepsilon\delta c\mu - r\varepsilon\gamma) = 0 \quad (6)$$

根据 Routh-Hurwitz 判据

$$a_0 = 1, a_1 = \varepsilon + \gamma + r - \delta c\mu,$$

$$a_2 = r\varepsilon + r\gamma + \varepsilon\gamma - \varepsilon c\mu - r\delta c\mu, a_3 = r\varepsilon\gamma - r\varepsilon\delta c\mu$$

$$\Delta_1 = a_1 = \varepsilon + \gamma + r - \delta c\mu$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon + \gamma + r - \delta c\mu & 1 \\ r\varepsilon\gamma - r\varepsilon\delta c\mu & r\varepsilon + r\gamma + \varepsilon\gamma - \varepsilon c\mu - r\delta c\mu \end{vmatrix}$$

$$= (\varepsilon + \gamma + r - \delta c \mu) (r \varepsilon + r \gamma + \varepsilon \gamma - \varepsilon c \mu - r \delta c \mu) - (r \varepsilon \gamma - r \varepsilon \delta c \mu) \quad (7)$$

对参数取值如下表^[18,19,22],

表 1 参数取值

Table 1 Parameter values

Symbol	Value	Symbol	Value
r	1.90	i	0.15
μ	5.00	φ	0.18
c	0.60	ε	0.10
f	0.25	b	0.50
a	0.50	δ	0.60
η	0.60	γ	0.01

得到:

要使 $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0$, 则在上述参数取值的前提下, 需满足 $c < 0.0034$, 此时 E_1 稳定, 以本文的假设出发, 从经济角度考虑, 经济不发展就不能产生环境污染, 也不可能提取资源, 存在这种定态, 故系统可以稳定到 E_1 . 但从实际的角度看, 这种情况无疑是不可行的, 违背了可持续发展的原则.

2.2.3 平面型均衡点 $E_2 = (\frac{\gamma}{\delta c}, 0, \frac{\delta c \mu - r \gamma}{c^2 \delta \mu})$

雅可比矩阵为

$$J_2 = \begin{bmatrix} r-2 \frac{r \gamma}{\delta c \mu} - \frac{\delta c \mu - r \gamma}{c \delta \mu} & \frac{f \gamma}{\delta c} + \frac{a \eta i (\delta c \mu - r \gamma)}{c^2 \delta \mu} & -\frac{\gamma}{\delta} \\ 0 & \frac{(\varphi - b \eta i) (\delta c \mu - r \gamma)}{c^2 \delta \mu} - \varepsilon & 0 \\ \frac{\delta c \mu - r \gamma}{c \mu} & \frac{(i + \eta i) (r \gamma - \delta c \mu)}{c^2 \delta \mu} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

特征值方程为

$$|J_2 - \lambda E| = \lambda^3 + (-B - A - r) \lambda^2 + (rA + B + AB) \lambda - AB = 0 \quad (9)$$

其中,

$$A = \frac{(\varphi - b \eta i) (\delta c \mu - r \gamma)}{c^2 \delta \mu} - \varepsilon \quad (10)$$

$$B = \frac{\delta c \mu - r \gamma}{\delta c \mu}$$

根据 Routh-Hurwitz 判据,

$$a_0 = 1, a_1 = -B - A - r, a_2 = rA + B + AB, a_3 = -AB$$

$$\Delta_1 = a_1 = -B - A - r$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -B - A - r & 1 \\ -AB & rA + B + AB \end{vmatrix} = -r^2 A - r(-2AB - A^2 - B) + (-B^2 - A^2 B - AB^2) \quad (11)$$

将表 1 参数取值代入, 得 (11) 式中,

$\Delta_1 = -4.1146 < 0$, 故均衡点 E_2 在表 1 参数取值时不稳定, 且从实际角度考虑, 经济的发展必然带来环境的污染, 故当经济规模 K 不为 0 时, 污染密度 D 不可能稳定于 0, 所以 E_2 不稳定.

2.2.4 内均衡点 $E_* = (N_*, D_*, K_*)$

利用 MATLAB 计算结果显示 N_*, D_* 有两个值, 则均衡点 E_* 分为两个:

$$E_{*1} = (N_{*1}, D_{*1}, K_*) , E_{*2} = (N_{*2}, D_{*2}, K_*) \quad (12)$$

根据实际意义, 参数任意取值时, 应当保证均衡点 E_* 在空间坐标系中处于第一卦限, 这是因为资源存量、环境污染密度和经济规模在任何情况下都不应该出现负值, 所以 N_*, D_*, K_* 都为正值, $E_* = (N_*, D_*, K_*)$ 必将稳定于空间坐标系的第一卦限. 但将表 1 参数取值代入, $D_{*2} = -0.0403 < 0$, 不符合上述要求, 故不存在 $E_{*2} = (N_{*2}, D_{*2}, K_*)$, 后文只研究 $E_{*1} = (N_{*1}, D_{*1}, K_*)$, 后文的 $E_* = (N_*, D_*, K_*)$ 都是指此处的 $E_{*1} = (N_{*1}, D_{*1}, K_*)$.

$E_* = (N_*, D_*, K_*)$ 的雅可比矩阵为

$$J_* = \begin{bmatrix} r-2 \frac{rN_*}{\mu} - cK_* - fD_* & -fN_* + a\eta i K_* & -cN_* + a\eta i D_* \\ 0 & (\varphi - b\eta i) K_* - \varepsilon & (\varphi - b\eta i) D_* \\ \delta c K_* & -(i + \eta i) K_* & \delta c N_* - \gamma - (i + \eta i) D_* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C \\ 0 & GK_* - \varepsilon & GD_* \\ \delta c K_* & -IK_* & F - ID_* \end{bmatrix} \quad (13)$$

特征方程为

$$|J_* - \lambda E| = \begin{vmatrix} A - \lambda & B & C \\ 0 & GK_* - \varepsilon - \lambda & GD_* \\ \delta c K_* & -IK_* & F - ID_* - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^3 + (ID_* + \varepsilon - GK_* - A - F) \lambda^2 + [(GK_* - \varepsilon)(A + F - ID_*) + A(F - ID_*) - \delta c K_* C + IK_* GD_*] \lambda + (\varepsilon - GK_*) [A(F - ID_*) - \delta c K_* C] - AIGK_* D_* - \delta c K_* BGD_* \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} A = r - 2 \frac{rN_*}{\mu} - cK_* - fD_* \\ B = -fN_* + a\eta i K_* \\ C = -cN_* + a\eta i D_* \\ G = \varphi - b\eta i \\ I = i + \eta i \\ F = \delta c N_* - \gamma \end{cases} \quad (15)$$

根据 Routh-Hurwitz 判据,

$$\begin{cases} a_0 = 1 \\ a_1 = ID_* + \varepsilon - GK_* - A - F \\ a_2 = (GK_* - \varepsilon)(A + F - ID_*) + A(F - ID_*) - \delta cK_* C + IK_* GD_* \\ a_3 = (\varepsilon - GK_*)[A(F - ID_*) - \delta cK_* C] - AIGK_* D_* - \delta cK_* BGD_* \end{cases} \quad (16)$$

$$\Delta_1 = a_1, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} \quad (17)$$

此处着重分别讨论污染排放率 φ 和对资源的提取率 c 这两个参数对系统稳定性的影响.

由 Routh-Hurwitz 判据, E_* 稳定需要 (17) 式中 $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0$.

由于形式复杂, 利用 MATLAB 软件进行计算, 分别讨论 φ 和 c .

① c 取值 $c = 0.6$, 讨论污染排放率 φ :

当 $0 < \varphi < 0.606$ 时, 取 $\varphi = 0.6$, 此时 $\Delta_1 = 0.9252, \Delta_2 = 0.0009$, 满足 $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0$, 即此时 E_* 稳定.

当 $\varphi > 0.606$ 时, $\varphi = 0.7$, 此时 $\Delta_1 = 0.9307, \Delta_2 = -0.0113$, 不满足 $\Delta_1 > 0, \Delta_2 < 0$, 即此时 E_* 不稳定.

② 参考①中讨论, 经 MATLAB 计算:

当 $0 < \varphi < 0.606$ 时, c 取任意值 ($c > 0$) 均可保证 E_* 稳定.

当 $\varphi > 0.606$ 时, c 取任意值 ($c > 0$) E_* 始终不稳定.

综上所述, 零点 $E_0 = (0, 0, 0)$, 平面型均衡点 $E_2 = (\frac{\gamma}{\delta c}, 0, \frac{\delta c \mu - r \gamma}{c^2 \delta \mu})$ 不稳定; 边界均衡点 $E_1 = (\mu, 0, 0)$

当 $c < 0.0034$ 时稳定; 内均衡点 $E_* = (N_*, D_*, K_*)$ 当 $0 < \varphi < 0.606$ 时, E_* 稳定, 当 $\varphi > 0.606$ 时不稳定.

3 数值模拟

在前文的理论分析的前提下, 利用四阶 Runge-Kutta 算法对模型 (1) 进行数值求解, 并模拟其动力学行为.

在已有研究^[22]中, 参考表 1 中有关参数取值, 得到系统稳定到一点:

$$N_* = 1.6156, D_* = 3.8109, K_* = 0.5556$$

(N_*, D_*, K_* 分别为资源、环境、经济系统的数值模拟稳定值)

对系统 (1), 基于文献 [18, 19, 22] 的参数取值, 见表 1, 并设初值 $N(0) = 1, D(0) = 1, K(0) = 1$,

进行数值模拟, 得到时序图和相轨图, 如图 1 所示.

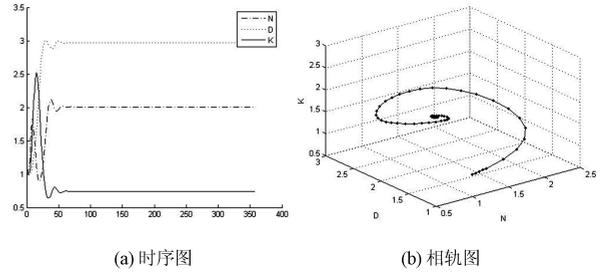


图 1 引入环境治理因素的模型 (1) 时序图及系统相图
Fig.1 Time series and system phase plot of model (1) with environmental governance factors

引入环境治理因素后系统稳定点

$$N_* = 2.0070, D_* = 2.9688, K_* = 0.7407$$

由图 1 可得, 系统 (1) 与已有研究^[22]相比, 环境污染稳定到较低水平, 经济发展与资源储量稳定到较高水平, 且更早达到稳定状态. 这主要是由于系统 (1) 考虑了环境污染的治理, 将经济的产出分割出一部分来补偿环境污染对经济生产带来的损失, 其主要表现在对污染的治理和对资源的保护. 通过有效控制污染及合理管理资源, 进而降低了环境污染水平, 提高了资源存量水平. 表面上经济产出再投入的比例减少, 但其污染治理和资源保护的成效使得污染水平降低而减少了环境污染对经济的损失, 提高了经济发展水平, 形成了良性循环.

政府在实际中也是这么操作的.

控制污染的方式主要有指令控制手段和经济激励手段, 前者是指通过立法手段设定环境质量指标进行强制执行, 其简单易行, 见效较快, 但成本较高; 后者是人工设计的利用经济因素调动人们的积极性以鼓励人们保护环境的机制, 主要有收费、环境税、排污权交易、补贴、环境金融工具等.

管理资源的方式. 政府在不同的资源种类各有不同的管理策略, 总的原则有以下两点: 第一, 资源资本收益的增长率要等于其他财产的利率, 这样, 所有者就不会对保留地下资源和开采资源这两种选择有偏爱; 第二, 争取发现新资源或资源的有效替代和技术的进步, 不论是再生资源对非再生资源的替代还是新型资源对旧资源 (稀缺资源) 的替代, 非再生资源和旧资源 (稀缺资源) 的边际开采成本必须上升到足够高, 这样再生资源和新型资源才会市场上站稳脚跟, 同时, 技术的进步会提高资源的利用率, 从而减少资源的开采.

在现实中不论运用哪一种手段来达到污染治

理和资源管理的目的,成效都是不一样的.这也就是本文研究污染排放率 φ 和资源提取率 c 这两个参数对系统影响的意义.

3.1 污染排放率 φ 对系统的影响

环境的污染物主要来自经济活动生产, $\varphi(0<\varphi<1)$ 表示经济活动带来的污染排放率,值越大,说明污染排放率越高,值越小,说明污染排放率越低.

对系统(1)给定参数值,除 φ 外,见表 1,且给定初值 $N(0) = 1, D(0) = 1, K(0) = 1$,运用 MATLAB 软件对数值解进行模拟绘图,得到当 $c = 0.6$ 时, φ 取不同值时系统的时序图及相图,如图 2~3 所示.

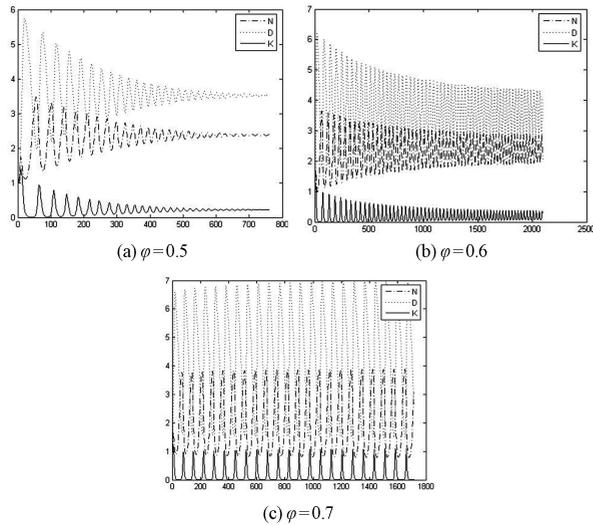


图 2 $c = 0.6$ 时随参数 φ 变化的 N-D-K 的时序图
Fig.2 Time series plot of N-D-K with φ variation when $c = 0.6$

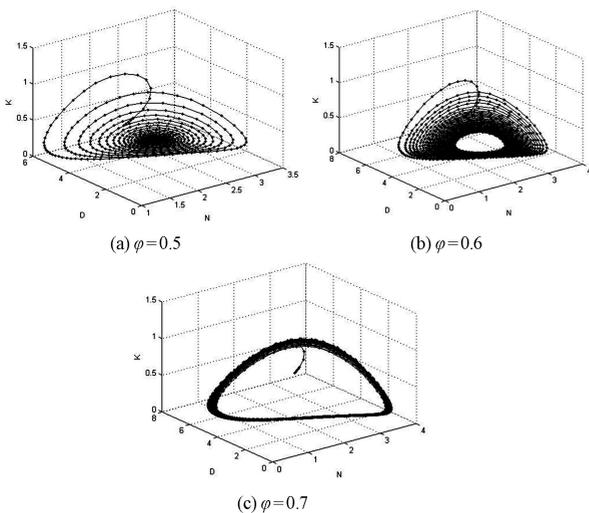


图 3 $c = 0.6$ 时随参数 φ 变化的 N-D-K 的系统相图
Fig.3 System phase plot of N-D-K with φ variation when $c = 0.6$

图 2~3 显示模型(1)随参数 φ 变化的 N-D-K 时序图及相图.经计算及数值模拟显示,模型(1)存

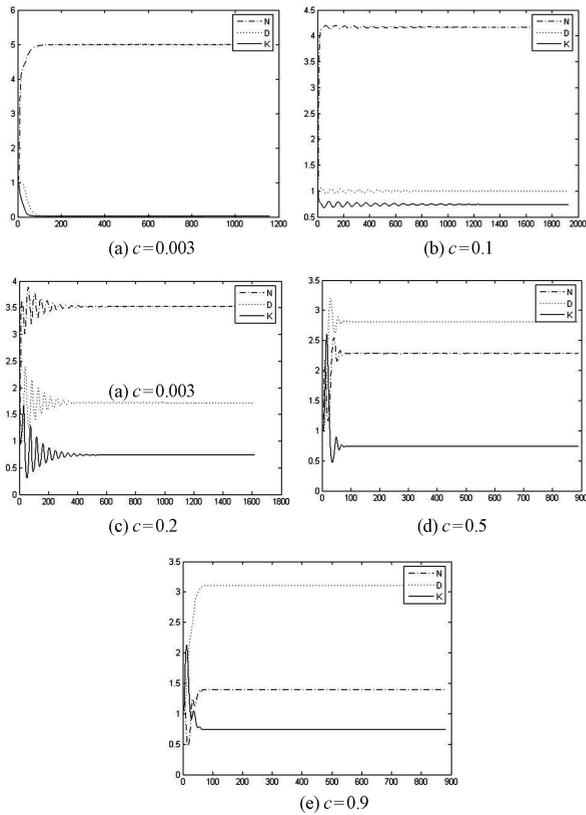
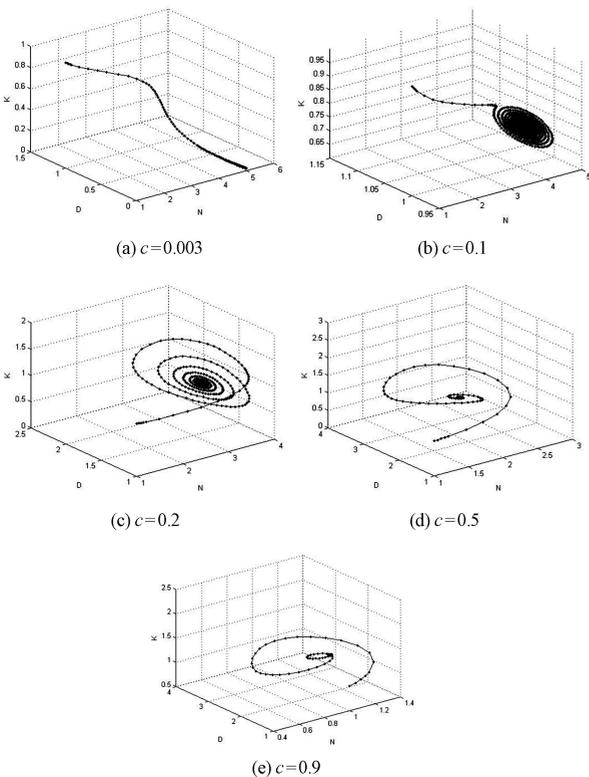
在临界值 $\varphi \approx 0.606$, 当 $0 < \varphi < 0.606$ 时, E_* 稳定, 当 $\varphi > 0.606$ 时 E_* 不稳定. 如上图所示, $\varphi = 0.5$ 时, 系统相图收敛于一点; $\varphi = 0.7$ 时, 相图出现极限环, 系统呈周期震荡. 从经济角度来看, 污染排放率 φ 越小, 即产生的污染量较小, 对经济生产的损失较轻, 对资源的破坏也小, 即相互影响较小, 从而使得 REE 系统在短暂的波动后达到了稳定状态; 但随着污染排放率 φ 的增加, 即产生的污染量较大, 对经济生产带来了较为严重的损失, 且对资源有一定的破坏作用, 资源的更新受阻, 间接影响了经济的发展, 导致经济衰退, 此时整个系统又进入另一阶段, 经济的衰退使得产量减少, 污染排放减少, 对经济生产的损失减轻, 同时对资源的破坏减少, 资源更新率逐渐恢复, 经济又可以较快发展. 但到一定程度又回到了污染严重的状态. 这便是图 2~3 中图(c)所示的情况, 系统呈周期波动状态. 且 φ 越大, 波动周期越短, 系统波动越强烈, 此时资源-环境-经济发展不稳定, 不利于社会平稳发展.

3.2 资源提取率 c 对系统的影响

经济生产需要提取自然资源为原料, 资源提取率 $0 < c < 1$, 表示经济生产活动消耗或提取资源的速率, c 越大, 提取的资源越多; c 越小, 提取的资源越少.

对系统(1)给定参数值, 除 c 外, 见表 1, 且给定初值 $N(0) = 1, D(0) = 1, K(0) = 1$, 运用 MATLAB 软件对数值解进行模拟绘图, 得到当 $\varphi = 0.18$ 时, 当 c 取不同值时, 系统的时序图及相图如图 4~5 所示.

如图 4~5 显示模型(1)随参数 c 变化的 N-D-K 时序图及相图. 经计算及数值模拟显示, 模型(1)存在临界值 $c \approx 0.0034$, 当资源提取率特别小 ($c < 0.0034$) 时, 系统稳定在 $E_1 = (\mu, 0, 0)$; $c > 0.0034$, 系统稳定在 $E_* = (N_*, D_*, K_*)$, 但当资源提取率逐渐增大时, 经济水平始终稳定在 0.8 左右不变, 资源稳定水平随 c 增长而降低, 污染稳定水平随 c 增长而增长. 从经济角度来看, 当资源提取特别少时, 不能支持经济发展, 从而不会产生污染, 故经济与污染稳定于 0; 当资源提取越来越多时, 可以适应经济发展的需要, 但当过多提取资源时, 在满足经济发展之余, 可能导致资源浪费, 造成生态失衡, 环境污染更加严重, 资源更新受限, 系统虽然处于稳定状态, 但从实际角度来说, 无疑是违背可持续发展的原则, 没有走最优路线. 故应当保证资源提取率 c 为 $0.1 < c < 0.2$, 从而使经济达到稳定水平的同时, 减少环境污染, 保证资源储量.

图4 $\varphi=0.18$ 时随参数 c 变化的 N-D-K 的时序图Fig.4 Time series plot of N-D-K with c variation when $\varphi=0.18$ 图5 $\varphi=0.18$ 时随参数 c 变化的 N-D-K 的系统相图Fig.5 System phase plot of N-D-K with c variation when $\varphi=0.18$

4 结论

对于引入环境污染治理因素的“资源-环境-经济”(REE)三维动力系统模型的稳定性分析,讨论了污染排放和资源提取两个重要因素对系统的影响,我们主要得到以下几点结论:

(1)通过将环境治理项引入模型后,模型数值模拟的均衡点值较之前具有明显趋好变化.从经济意义来看,环境污染的治理和资源的有效管理,可以使环境污染稳定到较低水平,经济发展与资源储量稳定到较高水平,且更早达到稳定状态.

(2)污染排放越小,对经济生产的损失较轻,对资源的破坏也小,即相互影响较小,从而使得 REE 系统在短暂的波动后达到了稳定状态;随着污染排放的增加,系统呈周期波动状态.且污染排放越大,波动周期越短,系统波动越强烈,数值模拟相图出现极限环,此时资源-环境-经济发展不稳定,不利于社会平稳发展.

(3)当资源提取特别少时,不能支持经济发展,从而不会产生污染,故经济与污染稳定于 0;当资源提取越来越多时,能够满足经济发展需求,REE 系统能够达到稳定状态,但当资源提取过多时,可能会产生资源浪费,使得生态失衡,违背了可持续发展的原则,没有走最优路线.故应当保证资源提取率 c 为 $0.1 < c < 0.2$,从而使经济达到稳定水平的同时,减少环境污染,保证资源储量.

本文研究了“资源-环境-经济”(REE)三维动力系统的确定性模型,经济系统具有较强的随机性,后续可考虑建立带有随机因素的三维模型,REE 系统在实际中具有一定时间记忆性,未来可尝试引入分数阶,进一步贴近实际进行研究.

参考文献

- 1 于立宏,贺媛. 能源替代弹性与中国经济结构调整. 中国工业经济, 2013(4):30~42 (Yu L H, He Y. Economic substitution elasticity and china's economic structure adjustment. *China Industrial Economy*, 2013(4):30~42 (in Chinese))
- 2 毕宏杰,冯玉广. 城市能源-经济-环境系统的 Brusselator 模型. 系统科学学报, 2013,21(4):93~96 (Bi H J, Feng Y G. Brusselator model of urban energy-econom-

- ic-environment system. *Journal of Systems Science*, 2013, 21(4):93~96 (in Chinese))
- 3 陈长杰,马晓微,魏一鸣等. 基于可持续发展的中国经济—资源系统协调性分析. 系统工程, 2004, 22(3): 34~39 (Chen C J, Ma X W, Wei Y M, et al. Based on the sustainable development of China's economic-resource system coordination analysis. *Systems Engineering*, 2004, 22(3):34~39 (in Chinese))
 - 4 吴玉鸣,张燕. 中国区域经济增长与环境的耦合协调发展研究. 资源科学, 2008, 30(1):25~30 (Wu Y M, Zhang Y. Study on the coupling and coordinated development of regional economic growth and environment in china. *Resources Science*, 2008, 30(1):25~30 (in Chinese))
 - 5 茹江,李彬,徐云麟等. 本溪经济技术开发区环境-经济协调发展研究. 环境科学, 1995, 16(6):47~49, 72 (Ru J, Li B, Xu Y L, et al. Studies on the coordinated development of environment and economy in benxi economic and technological development zone. *Journal of Environmental Science*, 1995, 16(6):47~49, 72 (in Chinese))
 - 6 Hotelling H. The economic of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 1931, 39(2):137~175
 - 7 Dasgupta P, Heal G. The optimal depletion of exhaustible resources. *The Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*. U.K.:Oxford University Press, 1974, 41:3~28
 - 8 Solow R M. Intergenerational equity and exhaustible resources. *Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible*. U.K.:Oxford University Press, 1974, 41:29~45
 - 9 Stiglitz J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. *The Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*. U.K.:Oxford University Press, 1974, 41:123~137
 - 10 Forster B A. A note on economic growth and environmental quality. *The Swedish Journal of Economics*, 1972(6):281~85
 - 11 Forster B A. Optimal capital accumulation in a polluted environment. *Southern Economic Journal*, 1973(39):544~547
 - 12 张华,魏晓平. “能源-经济-环境”系统的约束与解约束:理论与实证. 北京理工大学学报(社会科学版), 2015, 17(3):53~59 (Zhang H, Wei X P. Constraints and solutions of “Energy-Economy-Environment” system: theory and empirical. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition)*, 2015, 17(3):53~59 (in Chinese))
 - 13 陈利顶,傅伯杰. 长江流域可持续发展的基础与资源环境适应性评价. 环境科学, 1999(2):93~95 (Chen L D, Fu B J. Fundamental and sustainable development of resources and environment in the yangtze river basin. *Journal of Environmental Science*, 1999(2):93~95 (in Chinese))
 - 14 王柯敬,赵艳轲. 中国资源-环境-经济复合系统发展及协调状况研究:2000-2012. 中央财经大学学报, 2014(6):74~82 (Wang K J, Zhao Y K. Research on the development and coordination of china's resources-environment-economy complex system: 2000-2012. *Journal of Central University of Finance and Economics*, 2014(6):74~82 (in Chinese))
 - 15 洪开荣,浣晓旭,孙倩. 中部地区资源-环境-经济-社会协调发展的定量评价与比较分析. 经济地理, 2013, 33(12):16~23 (Hong K R, Huan X X, Sun Q. Quantitative evaluation and comparative analysis of resource-environment-economy-social coordinated development in central china. *Political Geography*, 2013, 33(12):16~23 (in Chinese))
 - 16 姜涛,袁建华,何林等. 人口-资源-环境-经济系统分析模型体系. 系统工程理论与实践, 2002(12):67~72 (Jiang T, Yuan J H, He L, et al. Population-Resources-Environment-Economic system analysis model system. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2002(12):67~72 (in Chinese))
 - 17 李杰兰,陈兴鹏,王雨等. 基于系统动力学的青海省可持续发展评价. 资源科学, 2009, 31(9):1624~1631 (Li J L, Chen X P, Wang Y, et al. Evaluation of sustainable development in qinghai province based on system dynamics. *Resources Science*, 2009, 31(9):1624~1631 (in Chinese))
 - 18 陈六君,毛潭,刘为等. 环境恶化与经济衰退的动力学模型. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(5):617~622 (Chen L J, Mao T, Liu W, et al. Environmental dynamics and economic dynamics of economic recession. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 40(5):617~622 (in Chinese))
 - 19 陈六君,方福康. 自然资源环境系统的突变机制. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(2):1~8 (Chen L J, Fang F K. Modeling mechanism of natural resources and envi-

- ronment system. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004,1(2):1~8 (in Chinese))
- 20 林子飞,徐伟,韩群. 基于分数阶导数的经济波动模型的稳定性研究. *动力学与控制学报*, 2017,15(3):242~249 (Lin Z F, Xu W, Han Q. Study on the stability of economic fluctuation models based on fractional order derivatives. *Journal of Dynamics and Control*, 2017,15(3):242~249 (in Chinese))
- 21 李俊瑞,张艳霞. 带有环境净化的双随机参数 SOLOW 模型的稳定性. *统计与信息论坛*, 2016(6):7~13 (Li J R, Zhang Y X. Stability of dual stochastic parameters so-
- low model with environmental purification. *Journal of Statistics and Information*, 2016(6):7~13 (in Chinese))
- 22 王洪礼. 发展中国家的环境经济模型的非线性动力学模型研究. 中国力学学会一般力学专业委员会. 第八届全国动力学与控制学术会议论文集. 中国力学学会一般力学专业委员会, 2008:1 (Wang H L. Study on the nonlinear dynamics model of environmental economy model in developing countries. In: Editorial conference of the 8th national conference on dynamics and control. Chinese Society of Mechanics General Mechanics Professional Committee, 2008:1 (in Chinese))

NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF RESOURCE-ENVIRONMENT-ECONOMY (REE) MODEL *

Li Jiaorui Guo Yuming[†]

(Statistical Institute, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)

Abstract In order to find the sustainable development model and reveal the environmental effects of different development models, this paper provides a theoretical basis for the sustainable development and environment-friendly society construction. This paper establishes a “resource-environment-economy” (REE) three-dimensional Dynamic system model, and the nonlinear stability of the system is analyzed by nonlinear dynamic theory and numerical simulation. The dynamic behavior of the system is simulated numerically, and the two important factors of pollution emission and resource extraction are studied emphatically to discuss their impact on the system. The results show that the pollution rate and resource extraction rate have a great influence on the system. When the pollution emission rate is in a certain range, the system appears limiting ring and forms the periodic phenomena. When the resource extraction rate is controlled to a certain extent, the economy can achieve a stable level, environmental pollution is also reduced and resource reserves are ensured. This paper has important practical significance to realize the coordinated and sustainable development of “resource-environment-economy”.

Key words resource-environment-economic system, nonlinear dynamics, stability, numerical simulation