

工业-环境系统的非线性描述*

漆安慎 赵彩凤 杜婵英 王华东

(北京师范大学物理系, 北京 100875) (北京师范大学环境科学研究所)

摘要 利用自组织的理论与方法建立了一个描述工业-环境系统时间演化的非线性动力学模型。该模型刻画了产值、环保投资、改进生产技术以及环境容量的数量关系, 模型简单且易于应用。本文还应用所建立的模型研究了白银地区工业发展和环境保护问题。

关键词 工业-环境系统, 自组织理论, 非平衡相变, 协调发展。

一般说来, 工业发展与资源、市场调节、企业间的耦合以及环境保护都有密切的关系。其中的环境问题已成为世界性社会问题之一。为了专门研究工业生长和保护环境的基本关系, 本文提供一个关于工业-环境系统的非线性模型, 对产值和环境质量作出理论预测。因仅涉及工业生产和环境以及它们之间的关系, 便于我们讨论两者之间多方面的问题, 对于能源资金丰富且不同行业间无明显耦合的地区, 本模型能直接用于生产与环境的协调控制的规划。对不具备上述特征的地区, 能够给出环境容量允许的产值发展的上限, 同样对既发展经济又改善环境有参考价值。

1 模型的介绍

在 70 年代, 主要由 Prigogine 和 Haken^[1,2]发展的自组织理论不仅被用于物理学, 还用于化学、生物学以及社会经济领域, 同样也可用于工业与环境问题。自组织理论的核心是非平衡相变。当某些具有非线性特征的开放系统离开平衡到相当程度时, 在系统内部涨落的触发下, 从无序状态转变为有序态。一个典型的非平衡相变由 logistic 模型给出, 其动力学方程为^[3]

$$d_t x = \gamma x (1 - x/x_{\max}) \quad (1)$$

其中 x 和 t 各表示状态和时间变量, γ 和 x_{\max} 为参数。当 $x_{\max} \leq 0$ 时, 仅有稳定的定态 $x=0$, 无相变现象。当 $x_{\max} > 0$ 时, $x=0$ 变得不稳定并出现稳定的定态 $x=x_{\max}$, 因而出现在 $(x, x_{\max}) = (0, 0)$ 为分支点或临界点的非平衡二级相变。该模型被广

泛用于生态学、细胞群体动力学等。若用 x 表示年产值, γ 表示产值的内禀增长率, x_{\max} 表示环境容量允许的最高产值。上式变成最简单的工业-环境模型: 产值在环境允许下发展到最大值 $x=x_{\max}$ 。然而, 由于人们的主观能动性, 通过技术改进可减少污染的发生和治理更多的污物, 使 x_{\max} 提高。本文在(1)式的基础上考虑到人的主观能动性建立工业-环境系统的演化模型并将它用于研究白银地区的工业和环境问题。

设想某地区有 n 个工业行业(每行业各含若干企业), 共排出 k 种有害污物, i 行业排出的 j 污物满足:

$$y_{ij} = g_{ij}^p p_{ij} x_i(t) - g_{ij}^z z_{ij} e_{ij} x_i(t-1) \quad (2)$$

$$i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, k。$$

右方第一项表示污物发生量, 第二项表示污物治理量。诸符号含义如下:

x_i : i 行业在 t 年度的产值(万元)。

g_{ij}^p : 基准年度 i 行业 j 污物的发生系数(t /万元)。

g_{ij}^z : 基准年度 i 行业对 j 污物的治理系数(t /万元)。

p_{ij} : i 行业 j 污物发生的技术因子。基准年度取值为 1, 随技术进步而逐渐减小。

z_{ij} : i 行业 j 污物治理的技术因子。基准年度取值为 1, 随治污技术提高而增加。

* 国家“75”科技攻关项目

1993 年 4 月 16 日收到修改稿

e_{ij} : i 行业 j 污物治理投资系数, 可根据实际情况用 t 的某一函数刻画。

在一定发展阶段, 只要设备条件和技术水平未发生根本变革, p_{ij} 与 z_{ij} 只能在某一范围内变化。可根据实际情况选择某一时间函数描述它们的演化。本文选择 logistic 法则^[4]:

$$d_t p_{ij} = \gamma_{ij}^p p_{ij} (1 - p_{ij}/p_{ij}^{\max}) \quad (3)$$

$$d_t z_{ij} = \gamma_{ij}^z z_{ij} (1 - z_{ij}/z_{ij}^{\max}) \quad (4)$$

式中, γ_{ij}^p , γ_{ij}^z , p_{ij}^{\max} 和 z_{ij}^{\max} 均为参数。当这些参数的取值确定后, 这两个方程都有如下的显式解:

$$p_{ij} = p_{ij}^{\min} [1 + (\frac{p_{ij}^{\max} - p_{ij}(t_0)}{p_{ij}(t_0)}) e^{-\gamma_{ij}^p t}]^{-1} \quad (5)$$

$$z_{ij} = z_{ij}^{\max} [1 + (\frac{z_{ij}^{\max} - z_{ij}(t_0)}{z_{ij}(t_0)}) e^{-\gamma_{ij}^z t}]^{-1} \quad (6)$$

以上对污物的发生、治理和技术改进与污物排放的关系作了细致的刻画, 这比(5)式前进了一步。

用 p_{ij} 表示每年 i 行业 j 污物的最高允许排放量。 p_{\max} 表示由环境功能和环境质量所决定的对 j 污物排放的最大允许值。显然, $p_{j\max} = \sum_i p_{ij}$, p_{ij} 应如何分配给各行业, 主要与各行业的工艺技术水平有关。当 t 足够大时, 可忽略 $x(t)$ 和 $x(t-1)$ 的区别。参考(2)式, 定义:

$$y_{ij}^0 = g_{ij}^p p_{ij} - g_{ij}^z z_{ij} e_{ij} \quad (7)$$

于是, i 行业的最高年产值 $x_{i\max}$ 满足:

$$x_{i\max}^{-1} = \sum_{j=1}^k W_{ij} y_{ij}^0 p_{ij}^{-1} \quad (8)$$

式中, W_{ij} 表示控制 j 污物的权重, 满足

$$\sum_{j=1}^k W_{ij} = 1$$

最后, 根据(1)式, i 行业的产值满足

$$d_t x_i = \gamma_i x_i (1 - x_i/x_{i\max}) \quad (9)$$

γ_i 为 i 行业产值的内禀增长率。(2)~(9)式给出了各行业产值与污物排放的演化。欲使工业与环境保护协调发展, 必须为改善环境投资, 革新技术, 以减少有害污物的发生和增加治污量。由于环境的改善, 在一定环境容量下又可提高产值, 产值的提高又为改善环境准备了物质条件。以上

方程组为产值和保护环境的相互关系作出了定量的描述。

在应用中, 需首先按历史数据对参数调谐, 再根据方程组预言以后的发展。具体步骤是先选定基准年 $t=t_0$, 令 $p_{ij}(t_0) = z_{ij}(t_0) = 1$ 。根据基准年的历史数据算出 i 行业 j 污物的发生系数和治理系数, 再根据历史数据将(3)、(4)式中的参数调至最佳, 最后调谐 γ_i , 便可对若干年内的产值和排污量作理论预测。

2 模型的应用

现将模型应用于甘肃白银地区, 这是一个已初具规模的新兴工业城市, 工业污染较严重。下文中的“废水”指含酸碱、重金属、尾矿坝渗透水、针织印染工业废水。工业废气最主要的是 SO_2 , 还有工业粉尘、CO、氮氧化物、硫酸雾等。排污最多的有机械、化工、冶金和纺织 4 行业。令顺次对应于 $i=1, 2, 3$ 和 4。现仅考虑上述两类污染物, 令 $j=1, 2$ 顺次对应于工业废水和 SO_2 。

从该地区实际情况看, 大气中 SO_2 含量已超过国家二级标准。但为该地区的工业和环境的协调控制规划提供参考意见, 我们仍以国家二级标准为基础。参照各行业生产和排污情况, 可算出各行业 SO_2 的允许排放值; 参照 1985 年数据, 又可得各行业废水排放允许值, 于是有:

$$(p_{ij}) = \begin{bmatrix} (111 & 223 & 113 & 84.6) \\ \times 10^4 & \times 10^4 & \times 10^4 & \times 10^4 \end{bmatrix} [t]$$

$$\begin{bmatrix} 49.8 & 317.8 & 837.10 & 146 \end{bmatrix}$$

根据 1987 年的数据, 视 e_{ij} 为常数, 有

$$(e_{ij}) = \begin{bmatrix} 0.088\% & 3.029\% & 0.204\% & 0.220\% \\ 0.021\% & 0.752\% & 0.102\% & 0.055\% \end{bmatrix}$$

经调谐所得诸技术因子的有关参数为:

$$(\gamma_{ij}^p) = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 & 0.73 & 0.42 \\ 0.61 & 0.62 & 0.65 & 0.38 \end{bmatrix}$$

$$(p_{ij}^{\max}) = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.80 & 0.77 & 0.36 \\ 0.59 & 0.72 & 0.73 & 0.52 \end{bmatrix}$$

$$(\gamma_{ij}^z) = \begin{bmatrix} 0.19 & 0.17 & 0.275 & 0.35 \\ 0.21 & 0.375 & 0.425 & 0.276 \end{bmatrix}$$

$$(z_{ij}^{\max}) = \begin{bmatrix} 1.75 & 2.58 & 1.16 & 1.71 \\ 1.34 & 2.14 & 2.35 & 1.35 \end{bmatrix}$$

各行业产值的内禀增长率为:

$$(r_i) = (0.9 \quad 0.81 \quad 1.09 \quad 0.87)$$

此外,权重参数的取值是:

$$(W_{ij}) = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.95 & 0.85 & 0.9 \\ 0.1 & 0.05 & 0.15 & 0.1 \end{bmatrix}$$

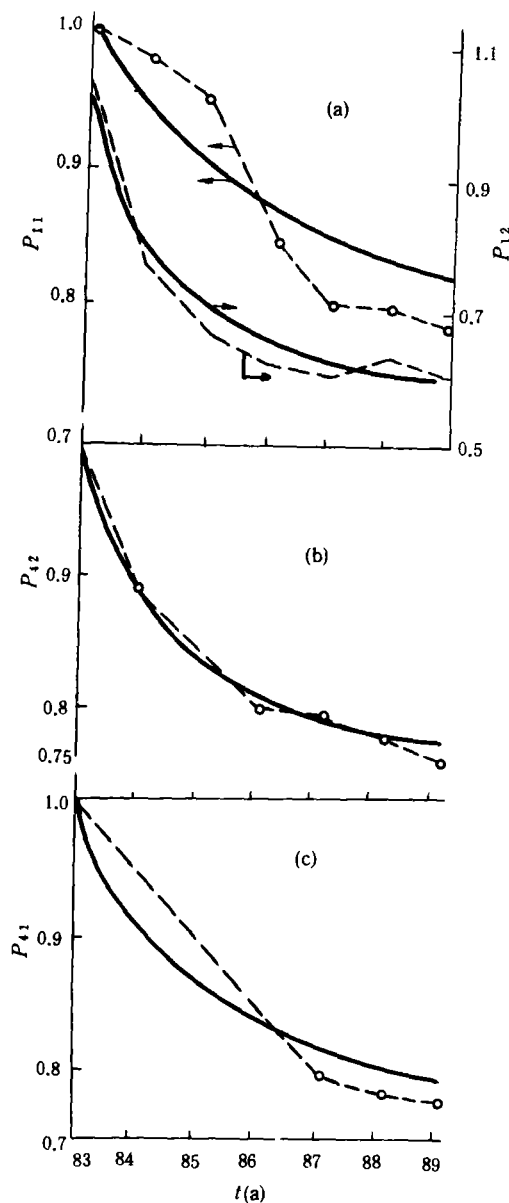


图1 p_{ij} 的理论值与历史数据的比较

(a) 机械工业 (b) 纺织工业

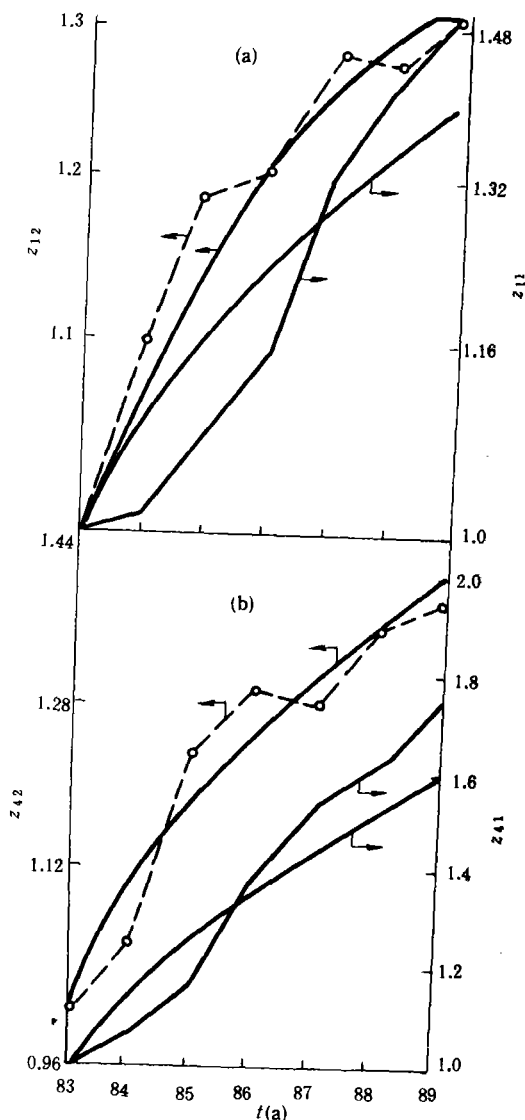


图2 z_{ij} 的理论值与历史数据的比较

(a) 机械工业 (b) 纺织工业

图1给出了机械行业和纺织行业污物发生技术因子理论结果和历史数据的比较。图2给出了这两个行业污物治理技术因子的理论结果与历史数据的比较。为节省篇幅,其它两行业情况从略。所有图中实线表示理论值,虚线表示历史数据。图3表示关于产值的理论值与历史数据的比较。图4给出对产值的理论预测。后二图用点线将纵轴分成了单位标度不同的区段。从图1,2可知过去几年内在减少污染物发生和治污方面有明显进步。描述产值和污染物排放量的理论曲线较平坦。例如1983至1989年机械行业产值分

别为 5.39×10^3 万元和 8.99×10^3 万元,但从图 4 知自 1992 至 1998 年只增加不到 10^3 万元。总之,产值在不久的将来即达上限。这表明按目前微小的环保投资、生产技术和治污措施尚不足以使环境得到有效的改善,环境保护存在的问题已成为进一步提高产值的制约因素。此外,还须看到目前 SO_2 污染已超过国家二级标准的事实。

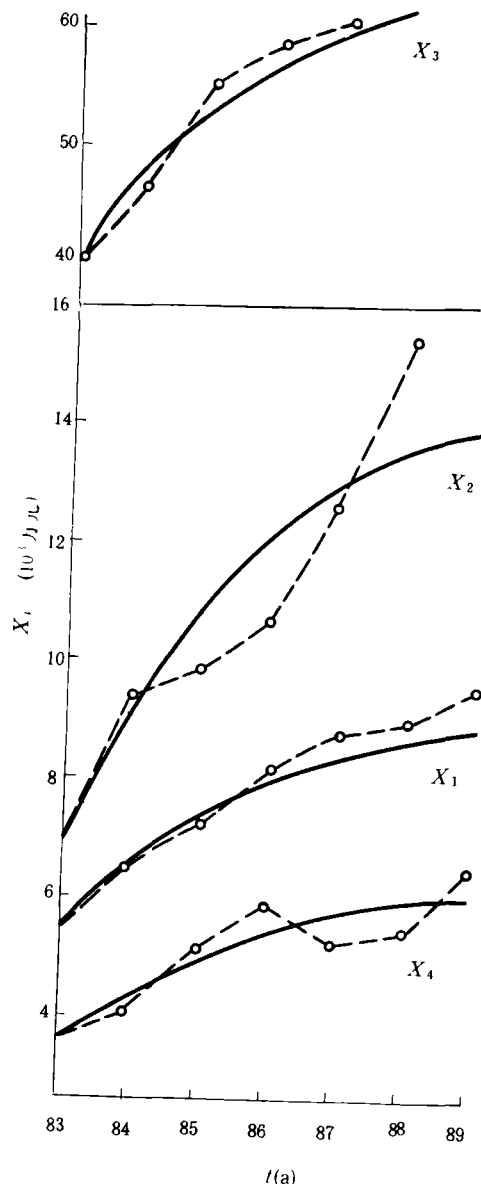


图 3 产值的理论值与历史数据的比较

以上的讨论能够根据一定发展阶段内的生产水平和治污能力从保护环境的角度提供若干

年内产值发展的上限,对考虑宏观规划问题是有参考价值的。当然,从发展经济角度看,除环境问题外,资源、市场调节等因素对生产的制约作用,则需要进一步考虑。

3 讨论

本模型的参数值是根据历史数据得到的,仅适用于一定发展阶段。如生产和治污水平有明显提高,则参数应重新调整赋值,对发展作出新的预测。

本文模型给出的结果能较好地符合实际,表明它有一定的可信度,说明自组织理论确能用于工业-环境系统。它还允许根据实际情况选择适当的函数刻画 e_{ij} , p_{ij} , z_{ij} 等,这表明模型还具有一定的灵活性。模型还有简单易用的特点。

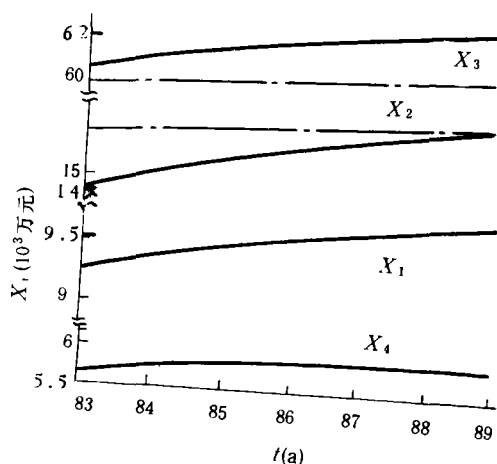


图 4 产值的理论预测

自组织理论的优点还在于能够对于工业-环境系统中存在的参数涨落问题以及环境投资的延时效应问题作进一步的理论研究。这些问题将在以后的文章中讨论。

参考文献

- 1 Nicolis G & Prigogine I. *Self-organization in Nonequilibrium Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1997
- 2 Haken H. *Synergetics* (3rd ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1983
- 3 Edelstein — Kesget. *Mathematical Models in Biology*. New York: Random House, 1988: 119
- 4 Shukla A. *Mathematical Modeling of Environmental and Ecological Systems*. Amsterdam: Elsevier, 1987
- 5 孙本经, 刘培桐, 王华东. 环境科学学报. 1989, 9(1): 1

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

Study on Removing Hexavalent Chromium by Sulfate-Reducing Bacteria (SRIV). Wang Pin et al. (Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 1—4

A strain of sulfate-reducing bacteria capable of reducing hexavalent chromium was isolated from electroplating sludge by using Hungate anaerobic technique. The strain was a motile curved rod, possessing singly polar flagella. The cell was 0.5—0.8 μm in length, non-sporing, non-capsules, Gram-negative. The oxidation was incomplete, leading to acetate production; and glucose, sucrose, pyruvate, $\text{H}_2 + \text{CO}_2$, alcohol, and formate were fermented in the absence of an external electron acceptor. These characteristics established the isolate as *Desulfovibrio* sp. Reclaiming of hexavalent chromium with the isolate has shown that it was resistant to Cr(VI) concentrations of up to $10 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ at the optimum temperature 30°C and at optimum pH 7.0. And under such conditions, the optimum Cr(VI) concentration for its growth was $4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$. The removal of Cr(VI) was 99.8%. SRIV strain was a engineered strain in removing Cr(VI) from wastewater.

Key words: sulfate-reducing bacteria, chromium, electroplating wastewater.

Inhibition of Nickel to the Anaerobic Digestion.

Wang Jusi et al. (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 5—8

The inhibition of nickel ion to anaerobic digestion was described in this paper. Nickel ion was added at different concentrations in three experimental digesters. No inhibition effect on the anaerobic system was observed when daily addition of nickel to the digester was less than 36.4 mg/L. When the daily addition of nickel was 40—60 mg/L, or more than 80 mg/L, however, digestion system was inhibited significantly or seriously, respectively. Toxicity of nickel to anaerobic system was found to be dependent on the concentration of dissolved nickel ions in digester. The system was not affected when the concentration of dissolved nickel ion is less than 2.5 mg/L. At the ratio of concentration of daily nickel addition to activated sludge (dry weight) being less than 0.08 (w/w), the digestion system would be normally running.

Key words: nickel, anaerobic digestion, inhibition effect.

Crops Lead Pollution by Sludge Land Application.

Yang Zhuoya, Wang Hongkang. (Resource and Environment College, Beijing Agricultural

University, Beijing, 100094); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 9—11

Pot experiments and field trails were conducted to study the effect of soil lead levels on phytotoxicity, growth and tissue accumulation in soybean and rice grown on sludge treated calcareous soil. The results indicated that lead didn't cause significant growth depression symptoms of the two crops. The lead tolerabilities of two crops were equal. As a whole, the higher lead concentration in soil would bring about higher lead concentration in crops tissue. The lead accumulation rate of the two crops was different, soybean absorbed fewer lead than rice. Soil lead concentration 260 mg/kg would make rice seed lead concentration to reach 1 mg/kg. This value was suggested as critical level in the soil, and 600 mg/kg was calculated as maximum permissible concentration in sludge when it is applied on cropland.

Key words: lead, sludge, soybean, rice, control standard.

Nonlinear Description of Industry-Environment

Systems. Qi Anshen et al. (Department of Physics, Beijing Normal University); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 12—15

In this note, a nonlinear dynamic modeling describing the time evolutions of industry-environmental systems is established using the theory and method of self-organization. The model characterizes the interactions amongst the output, the investment in environment protection, the improvements in production technique and pollution control, and the environmental capacity. The modeling is simple and easy to use. Additionally, the modeling is employed to study the problems of industry development and environmental pollution in Baiyin region, Gansu Province.

Key words: industry-environment system, the theory of self-organization, nonequilibrium phase transition, coordinative development.

Current Level and Distribution of Environmental Radiation in Beijing. Zhang Wenying et al. (Beijing

Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 16—19

This paper reports the environmental radiation level in Beijing. The monitoring sites were set up by net-grid method. In Beijing the grid point-weighted average values for γ radiation dose and cosmic ray outdoors radiation dose are 56.2 and 32.3 nGy/h, respectively. The area-weighted average values of U-238, Th-232, Ra-226, K-40 and Cs-137 in soil are 19.4, 34.1, 21.4, 662 and 8.3 Bq/kg, respectively. The concentration range of U, Th and