

环境科学的非线性理论及其意义*

叶常明

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要 在前人和本课题研究成果的基础上, 通过综合分析和理论推断, 提出了环境科学的非线性理论概念, 并以若干实例阐述了非线性理论在环境科学研究和污染控制中的指导意义。

关键词 多介质环境, 非线性理论, 界面效应, 污染控制。

1 问题的提出

众所周知, 环境是指人群和围绕人群的空间及其中可以直接或间接影响人类生存和发展的各种因素的总体, 是一个由气圈、水圈、土壤圈和生物圈(包括人类)组成的多介质多界面的复杂的庞大系统。在该系统中, 气、水、土和生物等要素称之为环境介质, 介质与介质之间的边界称之为环境界面。由于环境系统的多元性和开放性, 在环境各圈之间无时无刻不在发生着物质、能量和信息的交换, 这种交换的关键通道是环境界面, 交换的主要驱动力是来源于环境介质之间的势能差。环境科学的主要任务就是研究物质、能量和信息在环境介质内部以及在环境界面上的变化规律, 寻求改善生态环境的有效途径。

已有的研究成果表明, 物质在环境介质或界面的许多现象都表现出非线性的特征, 如气-水界面上物质传输的双膜理论^[1]、水体沉积物对污染物的吸附-解吸动力学过程^[2]、污染物在大气或水体中扩散的费克定律^[3]以及污染物在水环境中所发生的各种转化过程等都是非线性的。特别是污染物在水环境所发生的各种转化过程, 其转化速率除了与污染物本身的浓度有关外, 还与环境要素有关, 如环境介质的 pH(水解反应)^[4]、细菌数量(生化反应)^[5]、自由基浓度(光氧化)^[6]等。由于这些转化速率至少与两个要素有关, 一般都应遵守二级动力学规律, 所以它们都是典型的非线性问题。

在研究环境的净化程度与环境质量的关系时, 曾经发现了一个十分有趣的事实, 即环境

质量并不总是随着环境净化程度的提高而无限制地改善。当环境净化到一定程度时, 如果继续对其净化, 不仅不能使环境质量得到进一步的改善, 反而会使之变坏(图 1)^[7]。这实际上也是一种非线性问题。

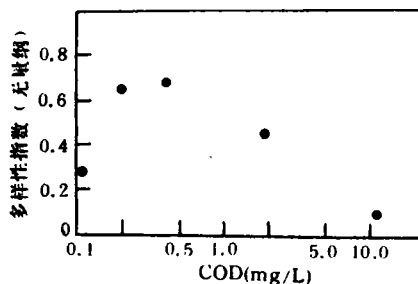


图 1 COD 与浮游植物多样性指数的关系

在污水处理工程实践中, 发现染水处理活动的费用与污水处理厂的规模和处理效率之间有着如图 2 所示的情形^[8]。从图 2 看出, 它们之间的关系是一个非线性的三维结构。当污水处理厂的规模 Q_1 一定时, 其处理费用 $C_1(\eta)$ 在开始时随着效率 η_1 的增加而迅速地增大, 到一定程度之后, 尽管大量地增大费用, 但处理效率却提高很小。当污水处理厂的处理效率一定时, 其处理费用和污水处理厂的规模之间也存在着同样的关系。这种关系实际上是一种非线性关系。

2 非线性在污染物环境行为中的普遍性

环境系统是一个开放的、远离平衡的系统, 具有耗散结构, 因此系统的不同元素之间应该存在着非线性的机制。一般来说, 这些非线性

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期, 1994 10-25

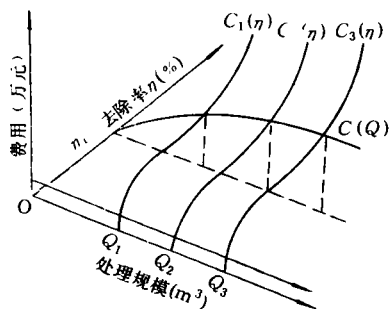


图2 污水处理费用的规模与处理效率的经济效应

的相互作用具有随机性、协同现象和相干效应。由此可以推断非线性行为在多介质(亦称元素)多界面复杂环境系统中具有普遍性。只是由于为了处理问题的方便,过去人们往往将环境行为中的许多非线性问题近似地作为线性问题加以处理。这种近似的处理在某些情况下的确作到了既方便,又不失其合理性;但在许多条件下,这种线性近似处理却难以解释某些现象,这时就必须进行非线性的处理,才能正确地反映客观真实世界。为了进一步说明非线性行为在环境系统中的普遍性,笔者以图形示意的方式,将环境系统中常见的几类非线性问题综合如下:

第一类非线性行为,如图3所示。 c 表示生化耗氧量, t 表示时间。这一类非线性行为包括水环境中发生的生物化学反应时的耗氧量(BOD)随时间的变化、细菌的最大生长比速率与底质浓度间的关系以及在环境中二次污染物生成的一级动力学过程等。

第二类非线性行为,如图3所示。图中 c 表示污染物浓度, t 表示时间。这一类表示了指数下降型的非线性行为,包括污染物在环境中衰减的一级动力学过程和二级动力学过程等。

第三类非线性行为,如图4所示的钟形曲线。图中 y 表示微生物的浓度或环境质量, x 表示时间或环境净化程度。这一类非线性行为包括微生物在水环境或土壤环境里生长过程中微生物的浓度随时间的变化、化学物对生物的影响过程以及环境的净化程度与环境质量之间的关系等等。

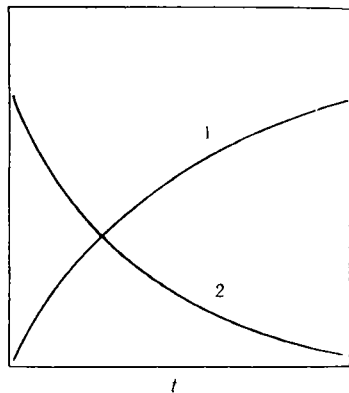


图3 第一类和第二类非线性

1. 第一类非线性 2. 第二类非线性

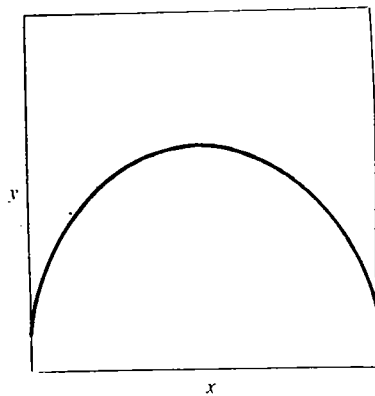


图4 第三类非线性

第四类非线性行为如图5所示的形状。图中 c 表示费用, r 表示处理效率。这一类非线性行为包括当污水处理厂的规模一定时,其处理费用与处理效率的关系等。

第五类非线性行为如图6所示。图中 c 是河水中溶解氧的浓度, x 是沿河流的纵向距离。这一类非线性行为反映了一条河流排入耗氧有机污染物之后,河水的溶解氧浓度开始下降,但是由于河流本身的自净作用,溶解氧降低到一定程度之后沿河下游的距离又逐渐上升的过程。

第六类非线性行为如图7所示。图7中 m 表示动物的数量, t 表示时间, n_1 表示野兔的数目, n_2 表示天敌的数目。这一类非线性行为反映了生态系统中由于生存竞争造成的生物与其天敌的数量随时间的变化而发生的过程。

第七类非线性行为,如图8所示。这一类非线性行为呈S形状,它表示微生物的宏观行为。

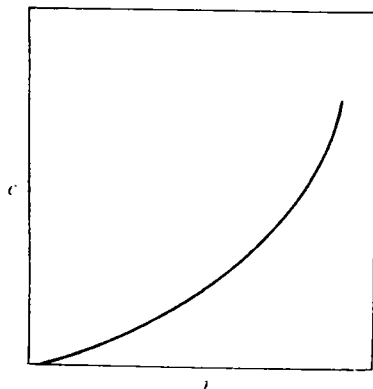


图 5 第四类非线性

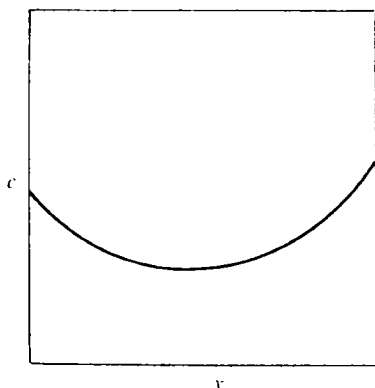


图 6 第五类非线性

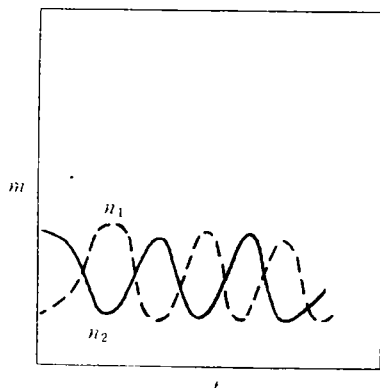


图 7 第六类非线性

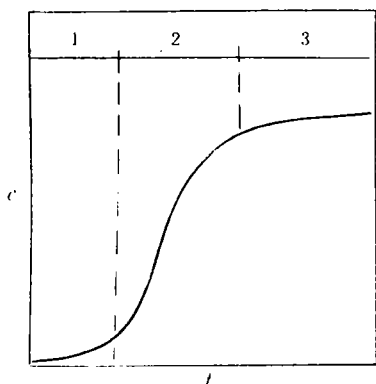


图 8 第七类非线性

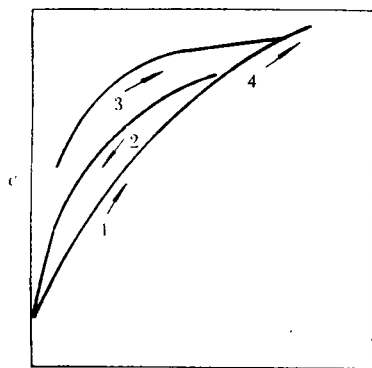


图 9 第八类非线性

一般分三个阶段,其中第一阶段为适应期,第二阶段为指数生长期,第三阶段为内源呼吸期。

第八类非线性行为,如图 9 所示。这一类非线性行为表示有机污染物在土壤或底部沉积物上的多层吸附过程。图 9 中 1 表示吸附;2 表示解吸;3 表示新吸附;4 表示新的解吸,最后形成一系列从基本的单层吸附曲线发散出来的吸附-解吸的曲线族。

仅就上述所列举的部分例子足以看出,非线性行为在污染物的环境行为中的普遍性。

3 非线性研究在环境科学中的意义

研究污染物在环境系统中的非线性行为对环境科学的理论发展和污染控制的实际应用具有十分重要的推动作用。具体可以从如下几方面的加以说明。

3.1 理论意义

首先,系统科学的发展和所取的最新成果,为环境系统的非线性行为的研究提供了理论依据。环境本身是一个典型的开放系统,具有耗散的结构。这就有可能利用耗散结构理论和协同学的原理从宏观上对环境系统的非线性行为进行研究,同时这种非线性行为的研究成果反过来也可以丰富系统科学的内容。

其次,由于非线性行为的复杂性,通过对这类问题的研究和解决,必须会在环境科学研究的方法学方面有所发展,到目前为止,可以这么说,环境科学的研究还没有自己系统的方法学,基本上都是借用了相关学科的研究方法,如环境化学主要是化学的原理和方法;环境生物学主要是生物学的原理和方法;环境地学主要是地学的原理和方法。在实际工作中虽然也有交叉,但还未形成一个环境科学的独立完整的方法学体系。环境系统非线性行为的研究有可能在环境科学理论和方法学体系的形成方面有所突破。

第三,关于环境系统非线性行为的研究,目前在国际上还属于起步阶段,为了更准确地

反映客观事实,这一领域的研究必须成为下个世纪环境科学理论研究的方向。这可以从非线性光学、非线性物理和非线性规划等学科的发展历程予以推测,它们的研究一般都是由线性问题开始,后来推进到非线性问题的研究,两者互相补充,使实际问题的解决不断向纵深发展。

需要强调的是,不能误认为环境行为的非线性理论是对线性分析的提炼,因而只具有学术的意义。实践证明,环境系统非线性行为的研究在解决环境的实际问题中具有很大的实际意义,它使理论更接近于实际情况,而且能说明和解决许多在线性假设下所不能解释和解决的现象和问题。

3.2 实践意义

在水处理的吸附工艺和天然水矿物质对有机污染物的吸附研究中,一般都涉及到非线性吸附问题,特别是在吸附剂的有机碳含量很低的情况下尤其是这样。这种非线性研究对吸附工艺设计参数的确定和底泥沉积物污染标准的制定具有重要的实际意义。

人们在模拟河流水质的污染时,通常使用BOD-DO 耦合模型。这时用改进型的GMDH (Group Method of Data Handling)法,通过实际测量数据建立的非线性模型。该模型与物理模型具有相似的结构,但可以得到比物理模型还要好的预测精度。这就将河流水质的模拟和河流水质规划问题建立在更加科学的基础之上。用更为复杂的非线性生态模型来描述河流的水质问题,将会得到更为满意的结果。

再如,前面提到的环境质量与环境净化程度之间非线性的研究,能够确定在什么样的环境净化程度下,可以得到最好的环境质量,将环境污染的控制建立在可靠的科学基础之上,以避免盲目性。

最后,污水处理厂的费用和处理效率之间的非线性关系。这种非线性关系表明,污水处理厂的处理效率应保持在一个合适的水平,以便找到费用效率之间的最佳偶合。这样既可满

足环境质量的要求,又可减少处理费用。

4 结论

非线性是环境过程的重要行为之一。这种行为在多介质多界面复杂环境系统中具有相当的普遍性。研究这种非线性行为不仅对环境科学的理论发展具有重大的意义,而且在污染物控制的工程实践中具有重要的实用价值。同时,在目前的热点问题全球变化和温室效应的研究中也具有广阔的应用前景。尽管多介质多界面环境系统的非线性行为具有如此的普遍性和重要性,但是由于它的复杂性,目前还未见到这种问题研究的系统报道。

对于复杂环境系统非线性行为的研究,应当以非线性理论和协同学原理为指导,在分子水平上,通过同位素标示方法研究污染物在环境界面的物理、化学和生物效应;在微观水平上,用统计热力学方法研究污染物在环境中的物理、化学和生物过程;在宏观水平上,通过非线性模型的建立,研究污染物的分布状态和控制途径。

参考文献

- 1 Mackay D., Solubility, Partition Coefficient, Volatility and Evaporation Rate, in the Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 2, Part A, Edited by O. Hatzinger, Springer-Verlag, Berlin, 1980
- 2 David A S and Robert C K., Transport and Remediation of Surface Contamination: Coloidal, Interfacial and Surfactant Phenomena. ACS Symposium Science, 1992
- 3 Bowden K F., Fundamentals of Dispersion, in Mathematical and Hydraulic modelling of Estuarine Pollution, edited by A. L. H. Game son, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, LONDON, 1972
- 4 Mabey W. and Mill T., Critical Review of Hydrolysis of Organic Compounds in Water Under Environmental Conditions, J. Phys. Chem, 1978, 7:383-415
- 5 Painter H A and King E F., Biodegradation of Water-Soluble Compounds, in the Handbook of Environmental Chemistry, Edited by O. Hutzinger, Vol. 2 Part C, 1985, 87-120
- 6 Zeep R G, Wolfe N L et al., Singlet Oxygen in Natural Water, Nature, 1977, 267(5610):421
- 7 Tai S and Goda T. Water Quality Assessment Using the Theory of Entropy, in River Pollution Control, Edited by M. J. Stiff, Ellis Horwood Limited, 1980: 319-330
- 8 Russel D. and Edward M. Model of the Saint John River, United States, in Models for Water Quality Management, Edited by Asit K. Biswas, McGRAW-HILL, 1981:91-127

With the rapid development of economy, surface and ground waters in Beijing area have been polluted much more seriously in recent years, causing the situation of shortage in water resources to be steadily deteriorated and the sustainable development of economy in Beijing to be restricted greatly. Based on the socio-economic conditions and water environment in 1991 in Beijing, direct sewage discharge coefficient, complete sewage discharge coefficient, direct COD discharge coefficient and complete COD discharge coefficient were used to comprehensively analyse the current status of sewage discharge from Beijing. Appropriate measures have been suggested for improving the water environment condition.

Key words: sewage discharge coefficient, COD coefficient, water pollution, water diversion.

Direct Thermochemical Liquefaction Technology for Treatment of Municipal Sewage Sludge. He Pinjing et al. (School of Environ. Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 75–78

The direct thermochemical liquefaction technology developed in the 1980s was used in the treatment of sewage sludge and resource recovery. Over 40% of organic matter in sewage sludge were converted into a fuel oil with a caloric power of ≥ 33 MJ/kg while TOC being converted at a rate of up to about 90%. The whole process was found to be a net energy exporting process. A review was also given on the development, current status and prospect of this process.

Key words: sludge treatment, direct thermochemical liquefaction, conversion of sludge to fuel oil.

Nonlinear Theory in Environmental Sciences and It's Implication. Ye Changming (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 79–82

A nonlinear theory in environmental science was suggested with an integrated analysis and theoretical judgement based on previous work. The implication of nonlinear theory for environmental

scientific research and pollution control was discussed by taking several examples.

Key words: multimedia environment, nonlinear theory, interface effect, pollution control.

Mechanism of Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. Wu Xiaolei (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084);

Chin. J. Environ. Sci., **16**(3), 1995, pp. 83–86

A detailed investigation was made on the configuration and mechanism of constructed wetlands. It was concluded that the high efficiencies of removing nitrogen, phosphorus and organics are mainly due to the synchronization of physical, chemical and biological processes, and due to the alteration of aerobic, anoxic and anaerobic conditions. For municipal wastewater containing less COD, BOD₅ and COD removal rates are greater than 80%, and BOD₅ in effluent is around 10 mg/L. The removal rates of total nitrogen and total phosphorus are greater than 60% and 90%.

Key words: constructed wetlands, wastewater treatment, organics, nitrogen removal, phosphorus removal.

Physiological Properties of Luminescent Bacteria and Its Application in Environmental Monitoring.

Huang Zheng and Wang Jialing (Institute of Environmental Medicine, Tongji Medical Univ., Wuhan 430030); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(3), 1995, pp. 87–90

A review was made on the following three respects: the physiological properties of luminescent bacteria, the utilization of luminescent bacteria toxicity test (L. B. T test) in environmental monitoring and the new progress of this technique. The advantages of L. B. T test were evaluated and its trends of future were suggested. It was predicated that L. B. T test would become an important method in environmental monitoring.

Key words: luminescent bacteria, toxicity test, environmental monitoring.