

复杂性科学在环境科学与工程中的应用

Application of Complexity Science in Environmental Science and Engineering

李慧博/LI Hui-bo¹, 柴立和/CHAI Li-he¹, 石兰兰/Shi Lan-lan²

1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

2. 中国市政工程华北设计研究院, 天津 300074

1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300074, China

[摘要] 复杂性科学作为一门当前国际学术界新兴的学科,其研究问题的方法对其它学科有深刻的启发和广泛的渗透力,已越来越受到包括环境科学与工程在内的各学科科技工作者的重视。在对复杂性科学进行了简单的分析后,主要介绍了复杂性科学方法在环境科学与工程研究中的部分应用,并展示了这一新兴学科学术和应用意义,希望对环境科学与工程领域的研究起到指导作用。

[关键词] 复杂性科学,环境科学,环境工程 **[中图分类号]** X1, N1

[文献标识码] A **[文章编号]** 1000-7857(2005)12-0058-04

Abstract: As a rising subject in the present international academia, complexity science creates widespread illumination and infiltration to many subjects, and attracts lots of attention from almost all fields, including environmental science and engineering. This paper analyzed complexity science briefly, and then introduced its application in environmental science and engineering in part. It was hoped that this paper

收稿日期: 2005-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(50406018)、教育部留学回国人员科研启动基金(413042)

作者简介: 李慧博,女,天津市南开区卫津路 92 号天津大学环境科学与工程学院,硕士生,研究方向为复杂性科学、市政环境给水分析、环境污水处理等; E-mail: fancy2889@yahoo.com.cn

柴立和(通讯作者),男,天津大学环境科学与工程学院,副教授,主要研究方向为环境科学与工程、环境化学和复杂系统理论等; E-mail: lhchai@tju.edu.cn

5 结论

从准同期实验的整定各项实验分析,我们可以得到以下几个结论。

1) 横向比较而言,当频差允许值、电压差允许值不变的情况下,整定同期开关的时间由 0.1 s 至 0.4 s,其冲击电流的大小变化趋势为由小到大。当我们改变频差允许值、电压差允许值,使其在原来的 $\Delta f=0.3$ Hz、 $\Delta U=3$ V 的基础上上下变化,整定同期开关的时间由 0.1 s 至 0.4 s 时,其冲击电流的变化趋势亦然。纵向比较时,当 Δf 、 ΔU 变小时,冲击电流的值也会变小,反之则会变大。

2) 横向比较而言,当电压差允许值、整定同期开关时间不变的情况下,频差允许值由 0.4 Hz 至 0.1 Hz,其冲击电流的大小变化趋势为由大到小。当我们改变整定同期开关时间、电压差允许值,使其在原来的 $\Delta U=3$ V、 $t_{yq}=0.2$ s 的基础上上下变化,频差允许值由 0.4 Hz 至 0.1 Hz 时,其冲击电流的变化趋势亦然。纵向比较时,当 Δf 、 ΔU 变小时,冲击电流的值也会变小,反之则会变大。

3) 横向比较而言,当频差允许值、整定同期开关时间不变的情况下,电压差允许值由 5 V 至 2 V,其冲击电流的大小变化趋势为由大到小。当我们改变频差允许值、整定同期开关时间,使其在原来的 $\Delta f=0.3$ Hz、 $t_{yq}=0.2$ s 的基础上上下变化,频差允许值由 5 V 至 2 V 时,其冲击电流的变化趋势亦然。纵向比较时,即当 Δf 、 t_{yq} 变小时,冲击电流的值也会变小,反之则会变大。

通过以上实验横纵结果的比较,可以看出频差整定值、压差整定值、越前时间整定值越小时,冲击电流越小。但越前时间一定

要考虑断路器主触头动作时间。一般电厂的断路器动作时间在 0.2 s~0.6 s 之间,而本试验台断路器动作时间为 0.04 s,我们可以通过同期开关时间,人为改变断路器的动作时间,从而观察动作时间对冲击电流变化的影响。

总之,本实验台是一个自动化程度很高的多功能试验台。通过本文实验内容的叙述可以为实际发电厂同期并列提供整定参考值,另外,对以上实验再进行扩充,可以进一步研究同步发电机同期并列。

参考文献(References)

- [1] 许克明,田怀智主编. 电力系统自动装置[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [2] 杨传箭. 电力系统运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 马维新主编. 电力系统电压[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [4] 蔡汾主编. 电力系统频率[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 许正亚主编. 电力系统自动装置[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [6] 杨德先,路继明. 电力系统综合实验原理与指导[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] 杨冠城. 电力系统自动装置原理(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [8] 武汉华工大电力自动技术研究所. WDT-Ⅲ 电力系统综合自动化试验台使用说明书.
- [9] 武汉华工大电力自动技术研究所. WDT-Ⅲ 电力系统综合自动化试验台实验指导书.

(责任编辑 胡春华)

had instructive significance to researchers in environmental science and engineering.

Key Words: complexity science, environmental science, environmental engineering

Document Code: A

CLC Numbers: X1,N1

Article ID: 1000-7857(2005)12-0058-04

1 引言

环境和发展是当今世界的两大主题,尽管人们对环境并不陌生,但是环境科学的产生并不是那么顺利。环境科学是伴随着对环境问题及其解决途径的研究而诞生和发展的。尽管环境问题由来已久,但是真正引起人们重视是在本世纪六七十年代一些工业化国家先后出现一些重大公害事件之后。20世纪70年代末,人们认为环境问题仅仅是由工业污染物排放引起的疾病问题,人们更倾向于解决问题的线性模式——终端治理;但是实际上,人类面临的环境系统是一个多因素、多变量、非线性的复杂巨系统。从80年代起,环境问题日益显示出其复杂性,出现了若干全球性问题,主要是臭氧层破坏、大面积生态破坏、全球升温、资源不足以及突发性的污染事件迭起。这些环境问题具有全球性、长期性、共同性、关联性、复杂性等特征,使得解决环境问题的方法和思维也发生了重要的改变,传统的线性思维模式已经不能成功地解决和解释这类新的问题。在此背景下,最为迫切的是,环境科学将如何在横向上吸取各个前沿学科的精华,形成自己独特的新研究方法,从而深入解决环境的复杂性,这就使这一学科焕发出新的活力。

当前国际学术界正兴起一门新的前沿科学——非线性科学和复杂性科学。这一学科的思维及其研究问题的特有方法就是针对复杂系统而言的,对于解决今天的环境复杂性问题可谓有其独到之处。对于环境科学这样的跨越自然学科、社会学科和技术学科的学科领域,非线性科学和复杂性科学对其具有重要的方法论意义,而且一些复杂的环境问题必须借助这样的思维方法才能得以深入解决^[1]。本文将致力于讨论非线性科学理论和复杂性科学理论在环境科学与工程中的应用研究,这一前瞻性和探索性的研究试图为环境科学的研究传统带来一些深刻变革。

2 复杂性科学的概貌

自近代科学诞生以来,人们对客观对象的分析主要运用的是还原论的方法。而人类面临的实际系统是复杂多变的,是一个涉及到多种因素和多方面相互作用的复杂系统,是没法还原而必须从整体论的角度去把握的。20世纪出现了专门探索复杂性的复杂性科学^[2-3]。

非线性科学和复杂性科学的发展主要经历了3个阶段^[4-9]:自20世纪20年代到

60年代为第一阶段,贝塔郎菲提出的一般系统论、维纳提出的控制论、申农提出的信息论、诺依曼提出的元胞自动机等是这个时期复杂性研究的代表性成果,标志着复杂性研究的起源和萌芽;60年代到80年代为第二阶段,普利高津的耗散结构、哈肯的协同论、艾根的超循环论等自组织理论、汤姆的突变论、混沌学理论以及后来的分形论是这个阶段的代表性成果,标志着复杂性研究在自组织理论、非线性科学方面已经取得了比较明确的成果;80年代至今为第三阶段,它是复杂性科学真正诞生的时代,它是在自组织理论和非线性科学理论的基础上发展起来的。1984年,诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼、安德逊和诺贝尔经济学奖获得者阿若等人,聚集了一批从事物理、经济、理论生物、计算机等科学的研究人员,组成了桑塔费研究所,专门从事复杂性科学研究,提出了复杂适应系统理论。另外自20世纪90年代初以来,中国的钱学森教授领导的系统科学学派也在复杂性科学研究中进行了许多创造性的探索,提炼出了复杂巨系统的概念,并创造性地提出了“从定性到定量的综合集成法”以及“从定性到定量的综合集成研究厅体系”。美国的桑塔费复杂性科学研究所、中国的钱学森教授领导的系统科学学派以及后来的一系列复杂性科学研究所的创立和兴起大大促进了复杂性科学研究的发展,复杂性科学研究从此引起了国际社会众多有识之士的高度关注。目前国际上已经掀起了一股研究复杂性和非线性问题的热潮,并正在与各门学科进行交叉,在环境科学领域,它也有了一定的应用。环境系统的复杂特性应成为非线性科学关注和研究的焦点,研究复杂性科学在环境科学与工程中的应用具有重要意义。

3 复杂性科学在环境科学与工程中的应用

其实在复杂性科学发展的第一个阶段,即系统论、控制论、信息论刚刚兴起时,环境科学就捕捉到了复杂性科学在其学科体系中应用的气息。系统论的一些原则对于环境科学的复杂系统就是十分适用的。信息论已用于环境综合评价等的研究;而控制论的研究方法在环境科学中也得到了广泛的应用,如我国环境保护委员会主任宋健是控制论的专家,他在环境科学领域,把自然科学和社会科学结合起来研究人口问题,成功地解决了环境科学的许多问

题^[10]。

在当今复杂系统的研究中,已经出现了多样化的非线性科学理论和复杂性科学理论^[11-12],如耗散结构理论、协同学理论、突变理论、分形理论、混沌理论、自组织临界性理论、复杂适应系统理论等。这些理论正广泛地深入到环境科学的研究中并成为前沿课题。相信这些新的理论在环境科学研究方面一定会给我们以启示,从而使我们寻求到更广阔的研究方向和方法。下面结合复杂性科学在环境科学与工程研究中的具体应用,从以下几个方面进行分析和评述。

3.1 自组织理论在环境科学研究中的应用

自组织理论是研究由无序向有序、由低级有序向高级有序转换的机制和规律的科学。其创立的理论有普利高津的“耗散结构理论”、哈肯的“协同学”和艾根的“超循环论”等。

普利高津创立了耗散结构理论^[12],享誉国际学术界,被誉为新三论之一。以普利高津为首的布鲁塞尔学派,从探讨化学反应的机制开始,研究的是远离平衡的系统通过非线性的相互作用形成的有序结构。由于这种结构必须与外界交换物质和能量才能维持,因此他们把这种结构称为耗散结构。对于开放系统,以 dS 表示总熵变,熵产为 d_iS ,系统内外熵交换为 d_eS ,则系统总熵便可表示为 $dS=d_iS+d_eS$;根据普利高津的耗散结构理论,系统不仅有熵增效应,而且在它与其它系统交换物质和能量的过程中系统产生负熵过程,如果满足 $|d_eS|$ 大于 d_iS ,系统会走向更为有序。

普利高津从任何系统实际上都和外界环境有一定的相互联系和相互作用的观点出发,找到了从无序到有序的条件。而哈肯的协同学概括了各种有序结构形成的共同特点,即一个由大量子系统所构成的系统,在一定的条件下,由于子系统间的相互作用和协作,便会形成一定功能的自组织结构,在宏观上便形成了时间有序、空间有序和时空有序结构,也就是说达到了新的有序状态^[13]。对于任何一个开放、发展、演化的动态系统,都可以用自组织理论来解释。环境科学研究的是“人类-环境”系统,是一个典型的开放自组织系统。所以应用自组织理论可以更深层次地理解环境问题的主导思想——可持续发展理念。突破我们对全球性问题的传统思考,避免全球问题的加剧,使得社会有序地向前发展。

人类社会的长期发展和进化是向着更有序的方向,可持续发展即是一种关于人

类长期发展的战略和模式。人类发展的过程一直与环境系统相互影响和相互作用。系统内的复杂相互作用可能产生协同效应,形成良性循环,推动社会向更有序化发展;也可能产生消极效应,互相牵制,形成恶性循环,甚至导致原来某些有序结构的消失,使系统后退到混乱的平衡态上^[14]。环境是人类生存发展的基础,一方面人类从环境中获取发展的资源,即维持耗散系统的负熵流;另一方面又把废弃的资源排泄给环境。废弃物作为一种正熵流,在没有有效利用和处理的情况下,就会导致系统更加无序。一旦这些废弃物超过一定数量,就会变成我们所说的环境污染。根据自组织理论,为了维持一种系统的低熵状态,开采自然资源时要做到高效、合理,保持可持续性;资源在使用时要做到节能、降耗、减污。无限消费、无限生产,不考虑下一代人的开采,只能导致地球资源的浪费,使耗散系统结构的熵不可接受地增加。同时,应改变末端治理的思维模式,尽可能在生产过程中控制大部分的污染,减少工业污染的来源。污染物的排放不应超过环境承载力的限度,应尽可能地在环境系统自身得以消除,从而减少系统的正熵流,使得“人类-环境”系统朝着远离平衡的、稳定有序的状态演化和发展^[15-16]。

总之,自组织理论作为研究有序结构形成机理的科学,在环境问题上是有大用武之地的,在环境系统中我们要处理大量的自组织现象。相信自组织理论在环境科学研究中,不管是在理论思维方面还是在实际应用上都一定能发挥出巨大的效益。

3.2 分形理论在环境科学研究中的应用

分形理论研究的是欧式几何所忽视的无定形的东西。曼德勃罗开创的分形几何为科学地阐述这类复杂性提供了全新的概念和方法^[17-18]。分形就是局部和整体有某种方式相似的形体。但是分形不仅仅是自然分形,它还包括时间分形、社会分形与思维分形。分形理论直接从非线性复杂系统的本身入手,从未简化和抽象的研究对象本身去认识事物,使人们对整体与部分的思维方法由线性发展到非线性,解释了貌似混乱、无规则、随机现象的内部规律^[19]。分形理论作为一个新概念和新方法正日益渗透到各个学科当中,同样在处理环境科学领域里各种复杂现象时获得了广泛的应用。

给水的绝大部分处理问题是除掉水中的悬浮固体颗粒,所以研究絮体的结构具有重要的意义。然而在分形几何之前,对于絮体复杂的几何形状难以描述,而分形几何正是探求这样不规则的几何体形成过程的一个得力工具。可以说分形对于改进混凝工艺和研究混凝机理提供了新的方法和工具^[20]。同样利用分形理论可以对水处理的

多孔填料表面粗糙度和微孔结构进行研究,已发展出描述多孔填料微观特征的新方法^[21]。城市污水或污泥处理系统中细菌菌落的生长也可以用分形来描述,并有可能揭示全新的规律^[22]。市政管网在一定标度内具有统计意义上的自相似特性,是一种典型的自组织过程。从管网形态研究入手,利用分形理论对管网进行设计布局、确定网络最佳结构,有可能充实原有的传统设计理念^[23-24]。分形理论在环境科学领域的应用目前还处于解决几何结构的相似问题,但是对更深层次的功能、信息、能量等相似的研究有可能使分形理论更切实广泛地用于环境科学中。对于水质状态而言,虽然其物理化学成分复杂多变,但各种污染因子的变化同一定范围的水质变化应该具有统计意义上的自相似,分形理论可能发挥它的作用。又比如在给水和废水处理的微生物的研究中,微生物种群之间的关系,应该与宏观生态系统物种之间的关系存在不同尺度上的相似,宏观地球圈的生态系统和微观生态系统的研究成果互相借鉴,或许能建立新的活性污泥模型以及更好地将生物化学工程应用于水处理中。

分形理论是近一二十年才发展起来的一门新理论。到目前为止,它主要还是只致力于形态的描述,对于动力学机制的研究很少涉及。我们认为近期提出的“一个远离平衡的开放复杂系统总是寻找一种优化过程使得系统在给定代价下获得的广义流最大”的最大流原理,给出了研究分形结构的新理论。它成功地解释了生物膜结构和功能的形成^[25-26],对我们了解各种结构、形状形成的本质和机理予以新的启示,并有可能发展成处理复杂系统的新方法。随着分形动力学领域的开拓,相信分形理论在环境科学与工程中的应用将会更加广阔。

3.3 混沌理论在环境科学研究中的应用

混沌是指由非线性耗散动力系统所产生的不确定行为的现象。混沌系统是那些不规则、不连续、不稳定、介于有序和无序、复杂的具有不完全确定行为的非线性系统。混沌系统表现为对初始条件极其敏感,初始条件的稍微不同,便可导致种种截然不同的结果。混沌理论把决定论和概率论统一了起来,向我们展示了一个新的认识复杂系统形态和结构的工具。

环境系统内存在大量的复杂不确定子系统,系统内变量的关系错综复杂、互相耦合,不确定性强。环境科学工作者一直孜孜不倦地试图精确描述系统的变化,发掘系统内潜在的信息。环境系统中的不确定问题一直是环境科学研究的难题,然而传统的思维模式不是概率逻辑就是确定论。例如传统的研究水环境中的不确定的数学方法主要是随机数学、模糊数学和灰色系统。

这些方法已经用于水质模拟、规划、评价、预测等方面^[27],可是却未对系统动力学变化的过程进行阐释。对于水环境中大量不确定非线性关系的存在,必然要求我们在非线性领域面对混沌问题。相信利用混沌理论重新思考我们研究的环境系统,一定会拓展我们的视野和思维,打破对其原有的认识,比如在城市生活日用水系统方面的应用。城市生活日用水量是一个与天气、温度、节假日、人口及起居生活习惯等各种因素有关的复杂非线性系统。其用水量变化呈现周期波动性。利用混沌理论,采用相空间重构的办法可以把貌似随机的混乱的用水系统展示为有序有结构的系统^[28]。当然混沌理论在环境科学的其它方面也得到了普遍的应用,比如在河流水质预测、城市规划、生态种群复杂性研究、大气过程的预报、雨水及河流径流等众多领域都有所涉及^[29-33]。

环境系统中存在大量的复杂现象,而且随着各种混沌现象的不断发现,相信混沌理论在环境科学研究中将显示出巨大的潜能和广阔的前景。

3.4 复杂适应性理论

复杂适应系统理论是复杂系统理论的升华和结晶,于1994年由Holland提出^[34],已引起了学术界的广泛关注,在经济系统、生态系统和社会系统等领域都获得了广泛的运用。该理论的核心是适应性造就复杂性,主要描述复杂系统在演化发展的过程中,主体可以通过学习来改变自己的行为,从而达到与环境的相互协调、相互适应。该理论可以概括为如下内容:4个特性,即聚集、非线性、流和多样性;3个机制,即标识、内部模型和积木;回声模型,即模拟自然选择造就复杂性过程的模型^[34]。

复杂适应系统的主体之间的相互作用会使新的组织行为模式涌现出来。在每个层次上都有新的模式出现,低层次上的复杂适应系统通过相互作用产生高层次的现象,高层次现象由低层次上的现象组成。复杂适应系统理论可以分析和描述复杂系统的层次结构和功能,而且复杂适应系统理论在算法和模型方面已取得了巨大的成功,如复杂适应系统理论在计算机上形成了标准的算法,如遗传算法,它具有普适性和可操作性,已经在环境科学的领域里得到了发展,这些应用可以认为是数据的自组织自适应,然而更让我们感兴趣的则是动态系统的自适应和进化。比如在工业废水的生物处理中,为了提高处理效果,往往要求细菌有更高的自适应能力,因而有计划、有目的地控制细菌的生长条件和诱导细菌遗传性以适应处理某种废水就显得特别重要。另外在大尺度范围内,研究生态系统中的动植物在全球问题影响下的自适应机理也是环境科学工作者至

关重要的工作,这也需要我们自觉地应用复杂适应系统理论。

不过,现有复杂适应系统理论存在的问题是:首先,该理论中大部分内容还是描述性的,还不能称为一套理论体系;其次,复杂适应系统理论目前还是正在形成中的理论,需要从具体复杂系统的分析中得到启发;最后,复杂适应系统的数学机理还不清楚,对适应性如何导致稳定的复杂性的机制还在探索当中。总之,利用复杂适应系统理论处理环境科学领域的问题还有一定的困难,但不可否认,它是一个极具发展潜力的研究方向。

4 复杂性科学在环境科学与工程中的研究意义

4.1 学术意义

从学术上来说,复杂性科学在环境科学与工程中的研究,是率先把当前的国际学术热点——非线性科学理论和复杂性科学理论与复杂的环境系统结合起来,试图在国际学术界中开辟环境科学研究的一个崭新的局面,在以下几个方面形成环境科学研究的特色:①发展一套处理环境复杂系统的新的方法和理论体系,由于复杂环境系统是一个多层次、多尺度的问题,用现有的微积分来解决往往会碰到不少困难,而复杂性科学的理论可以或多或少地处理多尺度问题;②现有的热力学还只能处理平衡状态和近平衡状态下的问题,而实际复杂环境系统都是偏离平衡状态比较远的情况,复杂性科学的理论是针对开放复杂系统的热力学方法,它将可以处理远平衡复杂环境系统的问题;③当前环境系统的演化、突变和适应性等都还缺乏科学理论,复杂性科学的理论可以对这些学术难题进行探讨;④复杂系统的普遍理论是国际学术界充满魅力而又极富挑战的问题,环境问题为复杂性科学的研究提供了一个极佳的范例,对环境科学与工程中的环境复杂系统的具体研究可能发展出新的复杂系统普适理论^[35]。

4.2 工程意义

在具体的应用意义上,复杂性科学提供了一般的方法论。在污染控制时,对于不同领域如大气污染、水体污染、土壤污染和生物污染,采用复杂性科学的统一、动态、整体的观点研究问题,不仅可使得不同领域的方法相互交叉、互相联系起来,而且可给予这些污染治理方法以新的启示,同时加强其基础研究的深度和广度。尽管环境科学工作者已经习惯于传统的治理方法,然而任何一门学科要继续发展下去,都需要注入新鲜的血液,况且对于环境科学中的一些复杂现象和问题,传统的线性方法只能停留在技术层次,要想真正地发现其内在的规律,带来广泛的实际效益,还需要

复杂系统科学思维引入环境系统所带来的科学技术革命。相信复杂性科学理论的发展和完善,必然会在环境科学与工程领域中掀起更大的波澜。

5 结论

目前复杂性科学理论还在不断探索之中,新的理论还在不断出现^[36]。现有的复杂性科学理论已经给传统的环境科学与工程中的思维和方法带来了许多重要启示,也获得了很多具体应用。反过来环境系统问题的研究也将为复杂系统理论研究带来强大的动力和挑战。我们预计复杂性科学理论应用于环境科学不仅会在基础理论方面有重大突破,同时也将为人提供发展环境科学的极好机遇,必将给人类展示美好的生活前景。

(致谢:本研究同时获天津大学杰出人才引进基金(W20201)资助,谨表示感谢。)

参考文献(References)

- [1] 王俊博,柴立和,郎铁柱,姚颖悟. 复杂性科学思维中的环境科学研究[J]. 环境保护科学, 2004, 30(125): 65–68.
- [2] WALDROP M M. Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos [M]. New York: Simon & Schuster, 1992.
- [3] DAVIES K G. Creative tension—what links Aristotle, William Blake, Darwin and GM corps [J]. Nature, 2000, 407 (6 807): 135.
- [4] 苗东升. 复杂性研究的现状与展望[J]. 系统辩证学学报, 2001, 9(4): 3–9.
- [5] 赵光武. 深入探索复杂性[J]. 系统辩证学学报, 2001, 9(4): 1–2.
- [6] 张嗣瀛. 复杂系统与复杂性科学简介[J]. 青岛大学学报, 2001, 16(4): 25–28.
- [7] 成思危主编. 复杂性科学探索[M]. 北京: 民主与建设出版社, 2000.
- [8] 方锦清. 令人关注的复杂性科学与复杂性研究[J]. 自然杂志, 2002, 24(1): 7–15.
- [9] 柴立和, 杨战. 复杂性科学的几大学派及其研究特点[J]. 现代物理知识, 2004, 6: 26–30.
- [10] 李焰. 环境科学导论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [11] PRIGOGINE I. From being to becoming [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1980.
- [12] NICOLIS G, PRIGOGINE I. Self-organization in non-equilibrium Systems [M]. New York, 1977.
- [13] HAKEN H. Advanced Synergetics [M]. Berlin: Springer, 1983.
- [14] 沈小峰, 胡岗, 姜璐. 耗散结构论[M]. 上海: 上海人民出版社, 1987.
- [15] 马一太, 吕灿仁. 能源利用可持续发展的热力学分析 [J]. 热科学与技术, 2004, 3(1): 86–90.
- [16] 刘立新, 赵荣善, 杜晓颖. 对化学污染防治

的理论探讨[J]. 理论观察, 2000, 5: 56–57.

- [17] MANDELBROT B B. Fractal: Form, Chance and Dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [18] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. Francisco: Freeman, 1982.
- [19] 魏诺. 非线性科学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 王东升, 汤鸿霄. 分形理论在混凝研究中的应用与展望 [M]. 工业水处理, 2001, 21(7): 16–19.
- [21] 龙腾锐, 方芳, 郭劲松, 成一知. 水处理的多孔填料的分形特征和分维数 [J]. 中国给水排水, 1999, 5(12): 10–13.
- [22] 英荣, 王靖, 孙传香. 不同浓度营养物质对细菌菌落分形生长的影响 [J]. 安徽大学学报, 1998, 22(1): 101–104.
- [23] 吕鑑, 杨向平, 束庆年, 刘京. 分形理论研究雨水管网分布 [J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(4): 447–450.
- [24] 柴立和, 马德刚. 分形生长的新模型 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(4): 326–330.
- [25] CHAI L H, SHOJI M. Self-organization and self-similarity in boiling systems [J]. ASME J. Heat Transfer, 2002, 124 (3): 505–517.
- [26] 陈黎明, 柴立和. 发展非平衡统计力学的新方法及其应用 [C]//中国工程热物理学会. 2005.
- [27] 刘国东, 丁晶. 水环境中不确定性方法的研究和展望 [M]. 环境科学进展, 1996, 4 (4): 46–53.
- [28] OSHIMA N, KOSUDA T. Distribution Reservoir Control With Demand Prediction Using Deterministic-Chaos Method [J]. Wat. Sci. Tech, 1998, 37 (12): 389–395.
- [29] 徐敏, 曾光明, 苏小康. 混沌理论在水质预测中的应用初探 [J]. 环境科学与技术, 2004, 27(1): 51–54.
- [30] 董颖. 混沌带给城市规划的启示[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(1): 4–7.
- [31] 张知彬, 王祖望, 李典谟. 生态复杂性研究——综述与展望 [J]. 生态学报, 1998, 18(4): 433–441.
- [32] 柴立和, 郎铁柱. 生态系统复杂性研究的几个基本理论及其局限性 [J]. 2004, 26(2): 98–102.
- [33] SIVAKUMAR B. Chaos theory in geophysics: past, present and future [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 19: 441–462.
- [34] HOLLAND J H. Hidden order [M]. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [35] 柴立和, 彭晓峰. 来自化学前沿的挑战: 动态自组装[J]. 化学进展, 2004, 16(2): 170–173.
- [36] GALLAGHER R, APPENZELLER T. Beyond reductionism [J]. Science, 1999, 284 (5 411): 87–109.

(责任编辑 黄永明)