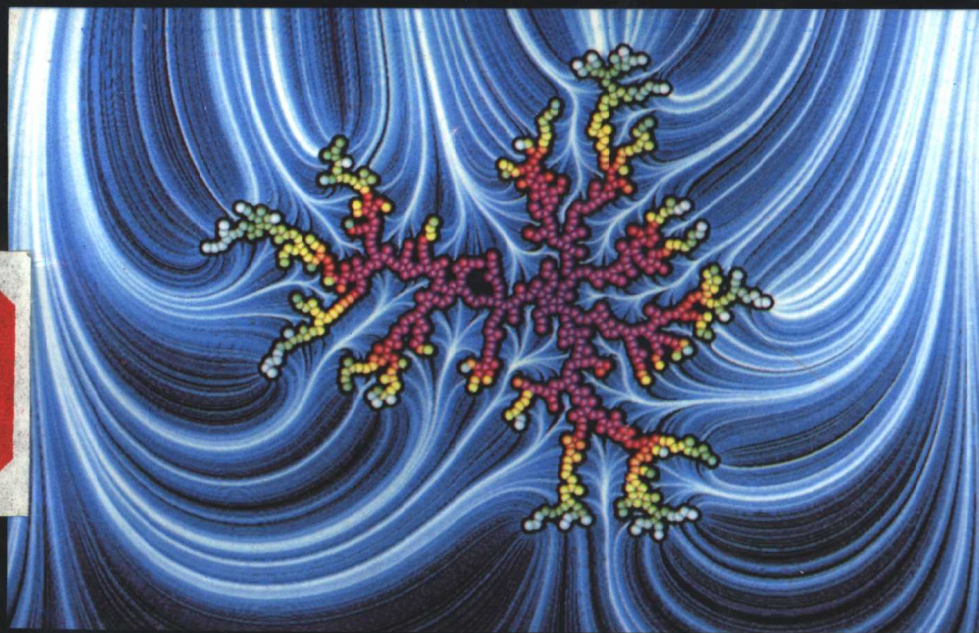


非线性人口学导论

FEI XIAN XING REN KOU XUE DAO LUN

王放 李后强 著



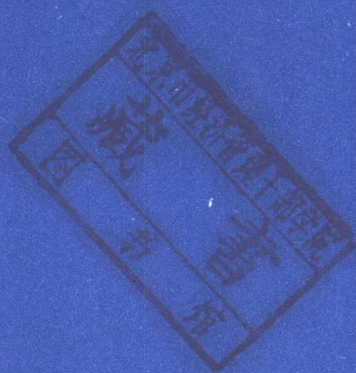
四川大学出版社

本书为 国家社会科学基金 资助项目
国家科委基础性研究基金 C4629

非线性人口学导论

FEI XIAN XING REN KOU XUE DAO LUN

C92
6
王放 李后强 著



四川大学出版社

1995年·成都

(川)新登字014号

责任编辑:李慧宇

封面设计:唐利民

技术设计:罗庆华

非线性人口学导论

王放 李后强 著

四川大学出版社出版 (成都市望江路29号)

四川省新华书店经销 四川郫县犀浦印刷厂印刷

850×1168mm 32开本 10.125印张 2插页 250千字

1995年7月第1版

1995年7月第1次印刷

印数:0001—1000册

ISBN7-5614-1134-0/C·62

定价:15.00元

序

人口是由大量具有不同性别、年龄等自然特征、不同婚姻、教育、文化、行业、职业等社会经济特征的个人在不同自然环境、历史阶段形成的整体。这个整体受着自然、社会、经济、文化以及生态环境等多方面因素的制约和影响,而且这些因素之间存在着交互耦合作用。因此,人口不可避免地呈现为一个复杂的系统。

历史上,人们对人口的认识和研究已有数千年之久;但多限于把人口数量多寡、增殖快慢、地区分布当做一个政治生活的要素来探讨,而对人口系统的内在变化发展机理则未予注意,因而长期未形成一门以人口为研究对象的“人口学”。只是在近三百年,人们才开始探讨“人口”做为一个封闭系统的内在机理以及做为一个子系统而与更大的社会、经济、环境系统的关系,从而形成了当前国际上公认的两种外延不同的“人口学”。前者即所谓的“形式人口学”(Formal Demography),后者即所谓的“人口研究”(Population Studies)。两者的区别只在于所研究系统的范围和侧重点,而以人口现象做为其研究对象则是共同的。

本世纪初以来,对人口现象的研究即开始趋于活跃。随着人口问题日益为世界瞩目,60年代以来人口理论与分析方法也取得了长足进步。各种新模型、新概念、新指标层出不穷,一派欣欣向荣景象。例如,寇尔的婚姻模型、生育指数等从貌似无规律的现象背后揭示出社会行为学的解释;邦戈茨的生育率分解模型、暂时平均预期寿命的提出,大大方便了对现实生育和死亡水平的分析与政策

研究;特拉赛尔模型生育率表和各种模型生命表获得了广泛应用。特别是广义稳定人口理论的提出大大扩展了稳定人口理论。这些新的成果使全世界人口学者有了更有效的分析研究工具,得以更深入地剖析复杂多样的人口现象和人口问题。

工欲善其事,必先利其器。为了准确深入地认识、把握和处理我国突出的、严重的人口问题,我们中国人口学者有必要迅速掌握国际上一切有用的人口学理论知识和方法。总的说来,中国人口学者无论老少,都出自民族责任感,十分认真勤奋地学习国际先进经验,研究中国人口问题,也取得了较快发展。但是,从另一方面来看,也还不能令人完全满意。在数理人口学方面,属于中国人的独创成就还不多。究其原因,大致有两方面:一是中国的老一辈人口学家,大多数人对数学、物理知识及其最新进展不太熟悉,把数理方法引入人口学研究中的就更少了;二是作为一门独立学科分支的非线性科学,近年来才引人注目,并且其本身的理论基础正处于日臻完善之中,在人口学中的应用也才刚刚开始。这在客观上牵制了数理人口学的发展。事实表明,人口学理论及方法的发展,在很大程度上依赖于自然科学,特别是数理科学及计算机科学的发展。当然,与人口学工作者的整体素质也有很大关系。值得欣慰的是,既熟悉现代数理科学、又有雄厚人口学功底的新一代人口学者正在我国崛起。

本书的作者都是30多岁的年轻人。他们对现代非线性科学在人口学中的应用怀有浓厚的兴趣。在国家社会科学青年基金资助下,从1992年开始进行《混沌与人口系统的内禀随机性》课题的研究。经过短短三年时间的艰苦努力,出色地完成了任务,发表了一些有影响的学术论文。在国内外首先提出了“非线性人口学”、“分形人口学”等新概念,全面、系统地探讨了建国以来中国人口发展的非线性特征,用R/S分析、多重分形、耗散结构、自组织理论、混沌学及孤波(子)等新方法研究了人口系统的复杂性,初步证实了

人口现象的复杂性的根源在于人口系统内在的非线性作用机制。这些新思想、新方法及所取得的新结果对数理人口学的发展有重要的启发和推动作用。本书的许多内容具有独创性和开拓性，部分结果已达国际领先水平。

然而，非线性人口学是一门内容丰富、涉及大量高深数理知识的年轻学科，要在短时间内全面推进，企图解决所有的问题是不可能的。作者在本书中提出了不少有价值的问题，并给出了一些解决问题的思路 and 办法，这已是相当有意义的事情了。伟大的科学家爱因斯坦说过，“提出一个问题往往比解决一个问题更重要”。因此，我认为本书是一个良好的起点，继续探索下去，必将取得更大的成果。

值此《非线性人口学导论》出版之际，写下以上文字，既表明我对此书出版的喜悦心情，又希望年轻学者们锲而不舍，不断努力，同时也向广大人口学专家、学者郑重推荐此书。

中国人民大学人口研究所教授、博士生导师
国家计划生育委员会专家委员会委员

查瑞传

1994年11月20日
于北京安贞医院

目 录

第一章 结论.....	(1)
一、线性与非线性	(1)
二、非线性科学	(6)
三、走向非线性的人口学.....	(10)
四、非线性人口学概述.....	(13)
第二章 人口系统的耗散结构	(19)
一、耗散结构理论.....	(19)
二、耗散结构理论在人口学中的应用.....	(24)
三、耗散结构理论应用举例.....	(32)
四、生产系统中的耗散结构.....	(48)
第三章 人口系统的稳定性判据	(55)
一、非线性系统的稳定性判据.....	(55)
二、人口系统的超熵产生判据.....	(63)
三、人口系统的妇女临界生育率.....	(68)
四、人口转变过程中的死亡率临界点.....	(80)
第四章 人口系统的自组织现象	(88)
一、自组织理论.....	(88)
二、人口城乡迁移中的自组织现象.....	(92)
三、城市经济系统的自组织过程	(101)
四、城市化的自组织空间过程	(107)
第五章 混沌与人口系统的内禀随机性.....	(116)

一、混沌理论	(116)
二、人口增长过程中的混沌动力学	(132)
三、中国人口时间序列的混沌特征	(136)
四、混沌理论在城市区域研究中的应用	(143)
五、麻疹流行过程中的混沌现象	(148)
第六章 人口经济增长模型的混沌行为	(156)
一、古典人口经济增长模型的混沌行为	(156)
二、超长期人口经济发展模型的混沌行为	(166)
第七章 人口系统的分形特征	(188)
一、分形理论	(189)
二、中国人口发展的R/S分析	(205)
三、人口系统中的负幂律分布	(220)
第八章 人口分布和城市形态的分形研究	(240)
一、人口系统的多重分形研究	(240)
二、城镇人口分布的分形研究	(254)
三、帕雷托分布的起源和应用	(260)
四、扩散增长的城市形态	(267)
第九章 人口系统的孤波行为和熵度量	(283)
一、中国人口年龄结构变动的孤波行为	(283)
二、中国农村移民系统的动力学特征	(292)
三、熵与人口消费行为的关系	(295)
四、极大熵方法在人口迁移模拟中的应用	(299)
五、人口时空演化的准动态模型	(304)
第十章 发展中的非线性人口学	(311)
一、非线性科学与人口学的结合问题	(311)
二、非线性人口学研究的前景	(313)
后记	(316)

第一章 绪 论

当今科学发展有两个显著特征,一是文理大融合,二是向复杂性进军。人口学是涉及多学科的边缘性科学,总是在人文科学与自然科学的交汇点上发展、壮大,并给予相关学科以激励和启示。

人口系统是一个内部存在不确定性因素和非线性相互作用机制的宏观复杂系统。人口系统由于受到自然、社会、经济、政治、文化等多种因素的交互作用的影响,再加上有人的思想意识和心理因素等介入其中,因此其复杂程度远远超过一般的物理系统。但是,这种复杂性的根源仍在于自然界及人类社会本质上的非线性。研究人口系统,应当引入非线性科学。

非线性人口学是现代数理人口学的一个新分支,是伴随非线性科学在人口学研究中的应用而发展起来的。简单地说,非线性人口学是用非线性科学的理论和方法研究人口系统非线性问题的一门新学科。人口系统由于内禀的非线性作用机制而表现出的外在的复杂性、随机性、奇异性及不规则性,都是非线性人口学关心的问题。不过,非线性人口学的侧重点在于非线性问题的共性探索。

一、线性与非线性

“线性”与“非线性”是两个数学名词。所谓线性,是指两个量之间所存在的正比关系,若在直角坐标系上画出来,则是一条直线。

例如函数

$$y = a + bx \quad (1.1)$$

对自变量 x 的依赖关系是一次多项式,在 (x,y) 平面中的图象是一条直线(如图1.1所示)。于是可以说, y 是 x 的线性函数。其它一切高于一次方的多项式函数关系,都是非线性的。

由线性函数关系描述的系统叫线性系统。在线性系统中,部分之和等于整体。描述线性系统的方程遵从叠加原理,即方程的不同解加起来仍然是解。这是线性系统最为本质的特征之一。

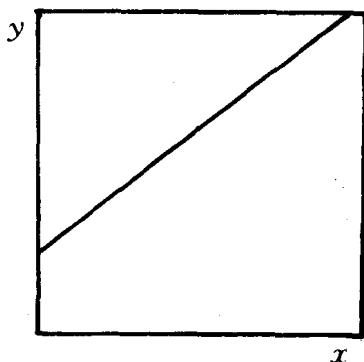


图1.1 线性函数

非线性是指两个量之间的关系不是“直线”关系,在直角坐标系中呈一条曲线。最简单的非线性函数是抛物线方程

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1.2)$$

将函数关系(1.1)和(1.2)相比较,可以看出后者出现了一个 x^2 项,这就是非线性项。对式(1.2)作图,则得一条曲线(如图1.2所示)。在式(1.2)中,只有参数 a 具有实质意义。当 $a > 0$ 时,函数是具有一个最小值、而两端伸到正无穷的抛物线;当 $a < 0$ 时,函数是具有一个最大值、而两端落到负无穷的抛物线;当 $a = 0$ 时,则函数退化为线性关系。无论是什么样的多项式函数关系,变量幂次最高

的那项的系数总是最重要的。当然,在实际工作中我们所遇到的非线性函数,并不都是像式(1.2)那样地简单,往往要复杂得多,表现形式也千姿百态。对于含有微分、积分等运算的函数式,要用多少个参数才能恰到好处地反映一切性质不同的行为,这并非是一个简单的问题。现代非线性科学也正致力于这方面的研究。

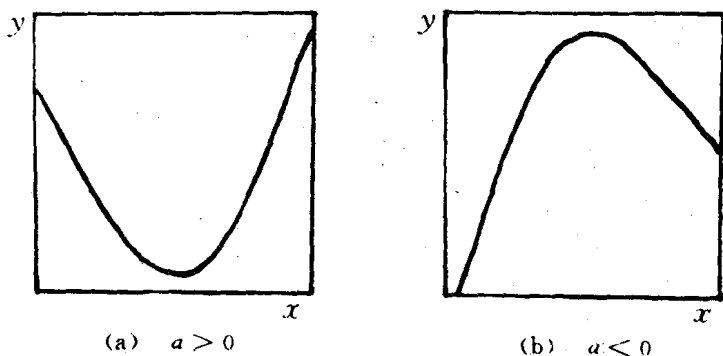


图1.2 抛物线函数

定性地说,线性关系只有一种,而非线性关系则千变万化,不胜枚举。这也同时说明了,在非线性关系中,为什么同一个前提会导致几种不同的后果。凡是非线性图象,总可以找到一条直线与其相交于至少两点(如图1.3

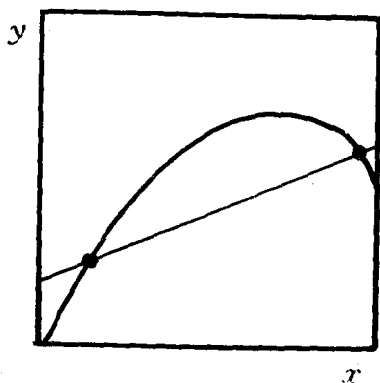


图1.3 非线性函数的多值性

所示),这就引起了非线性函数的多值性。非线性问题中的一切麻

烦事情,都由此而生。

然而,各种非线性关系可能具有某些不同于线性关系的共性。正是这些共性导致了非线性科学的诞生。粗略地说,非线性科学就是研究非线性现象共性的一门学问。根据共性,可分成各种类别,每一种类别就是一大类非线性现象所具有的共性,有着广泛的适用性。在本书中所阐述的混沌、分形等概念,就是不同的普适类。

线性是简单的比例关系,而非线性是对这种简单关系的偏离。传统的数理科学常常把非线性关系化为线性关系来处理,因为对于线性问题,已经有了一套行之有效的解决方法,如傅里叶变换、拉普拉斯变换、求格林函数基本解,等等。对于线性函数的空间和算子,研究得也比较透彻,有较广泛的应用。过去,人们采用多次线性逼近的方法,通过解若干次线性问题得出非线性问题的近似解。在这种处理中,往往要引入一个小参数,对方程作关于小参数展开,从而得到无穷个线性问题,然后对若干线性问题逐次求解,便可得到很好的近似解。这种方法叫微扰(或摄动)方法,运用相当普遍,但并不是经常能奏效,不属于非线性科学的范畴。自然界的发展,既有量的变化,又有质的飞跃。线性逼近的结果适用于近似于线性的现象,但是却不能反映那些在本质上与线性现象有很大差异的问题的实质。非线性科学处理对线性有实质性的大偏离的问题。

线性关系是互不相干的独立贡献,而非线性则是相互作用的,即两种因素之间彼此影响,发生耦合作用。这是产生非线性问题的复杂性和多样性的根本原因所在。正因为如此,非线性系统中各种因素的独立性就丧失了:整体不等于部分之和,叠加原理失效,非线性方程的两个解之和不再是方程的解。因此,对于非线性问题,只能具体问题具体分析,目前尚无统一的方法可循。

由非线性函数关系描述的系统称为非线性系统。人口系统不仅内部存在众多的相互作用因素,而且还要受到外部环境的复杂

影响,因此,是一个典型的非线性系统。马尔萨斯(T. R. Malthus)的人口论就基于简化的线性模型

$$x_{n+1} = (1 + r)x_n \quad (1.3)$$

而经维赫斯特(P. F. Verhulst)修正后的逻辑斯蒂(Logistic)方程

$$x_{n+1} = (1 + r)x_n - bx_n^2 \quad (1.4)$$

就是一个非线性模型。式(1.4)考虑了环境因素的限制,因而比式(1.3)多了一个非线性项 bx_n^2 。在人口较少时,此非线性项的影响较小,可忽略不计,于是,逻辑斯蒂模型便还原为马尔萨斯模型。

线性与非线性现象的区分一般有以下特征:(1)在运动形式上有定性区别,即线性现象一般表现为时空中的平滑运动,并可用性能良好的函数表示,而非线性现象则表现从规则运动向不规则运动的转化和跃变;(2)从系统对外界影响和系统参量微小变动的响应上看,线性系统的响应平缓、光滑,往往表现为与外界影响成比例的变化,而非线性系统中参量的极微小变动,在一些关节点上,可以引起系统运动形式的定性改变。在对外界激励的响应上,非线性系统表现出与外界激励有本质区别的行为,比如周期驱动的非线性振动系统可以出现驱动频率的分频、倍频形式的运动,不仅仅是重复外界频率。总之,在自然界和人类社会中大量存在的相互作用是非线性的,线性作用只不过是非线性作用在一定条件下的近似。

二、非线性科学

前面已指出,非线性现象比线性现象更普遍。尽管非线性现象复杂多变,但总可以根据它们的共性将其划分成各种类别。研究自然界和人类社会中非线性现象共性的基础学科叫非线性科学。它是自本世纪50年代以来,在各门以非线性为特征的分支学科的基础上逐步发展起来的综合性学问,被誉为本世纪自然科学的“第三次大革命”,也有人称之为继日心说、牛顿力学、相对论和量子论之后的第五个科学里程碑。当前,非线性科学几乎波及了自然科学和社会科学的各个领域,并正在改变着人们对现实世界的传统看法。

非线性问题的“个性”很强,处理起来十分棘手。历史上曾有过一些解非线性方程的“精品”,但与大量存在的非线性方程相比,只能算是“凤毛麟角”。因此,长期以来,对非线性问题的研究一直分散在自然科学和技术科学的各个领域。本世纪60年代以来,情况发生了变化。人们几乎同时从非线性系统的两个极端方向取得了突破:一方面从可积系统的一端,即研究无穷多自由度的非线性偏微分方程的一端,在浅水波方程中发现了“孤子”,并发展起一套系统的数学方法,如反散射法、贝克隆(Bäcklund)变换等,对一些类型的非线性方程给出了解法;另一方面从不可积系统的极端,在天文学、生态学等领域对一些看起来相当简单的不可积系统的研究,都发现了确定性系统中存在着对初值极为敏感的复杂运动,即混沌运动。促成这种变化的一个重要原因是计算机的出现和广泛应用。科学家们以计算机为研究手段,勇敢地去探索那些过去不能用解析方法处理的非线性问题,从中发掘出规律性的认识,并打破了原有的学科界限,从共性、普适性方面来探讨各种非线性系统的行为。这样,就形成了贯穿于自然科学、技术科学及人文科学的、以揭

示非线性系统共性为目的的非线性科学。

科学界认为,非线性科学的研究不仅具有重大的科学意义,而且对国计民生的决策和人类生存环境的利用也具有实际意义。非线性社会模型、非线性人口模型、非线性经济模型、非线性生态学等,都属于非线性科学研究的热点问题。有学者指出,非线性科学对整个自然科学和哲学都有重大影响。由非线性科学所引起的对确定论和随机性、有序与无序、简单性与复杂性、量变与质变、整体与局部、偶然性与必然性等范畴和概念的重新认识,形成了一种新的自然观,将深刻地影响人类的思维方法,并涉及现代科学的逻辑体系的根本性问题。

关于非线性科学的研究范围究竟有多大,目前尚无定论。有人主张,非线性科学只应包括那些可以定量分析、精确计算、有数学理论或实验研究的领域。也有人认为,普里高津(I. Prigogine)的耗散结构、哈肯(H. Haken)的协同学、托姆(R. Thom)的突变论等,应划归为非线性科学,因为这“三论”中的许多定量分析,有些概念和方法(如分岔、自组织、图形、分维等)是和非线性科学相同的。但是,值得注意的是,这“三论”中有些内容是带有哲理性或思辩色彩的,目的是想更一般地说明某些涉及自然界和社会现象的普遍规律,因此,对这些部分的运用要特别谨慎。然而,非线性科学的主体是明确的,这就是混沌(Chaos)、分形(Fractal)、孤子(Soliton)。在本书中,我们重点介绍耗散结构、自组织理论、混沌、分形在人口学中的应用。

孤子也称为孤波,为一种特殊的相干结构,是由于系统中的色散与非线性两种作用相互平衡的结果。孤子的特点是,有出奇的稳定性,两个以不同速度运动的孤波相互碰撞后,其波形仍然保持不变,如同刚性粒子一样,在空间上局域,在时间上长寿。除孤波(子)外,自然界还存在大量的其它相干结构。它们与孤波的不同之处在于,它们在相互作用时并不严格保持形状不变,而是可以汇

合、分裂。最引人注目的是各种尺度的涡旋。几个流体旋涡可集合成一个大涡,一个大涡也可以被强大的外力作用打碎。对这些结构形成机理的认识和它们之间的相互作用的研究,仍是非线性科学的前沿。

相干结构和孤子现象在人口系统的演化中已被观察到。出现这种情况的根本原因,在于人口系统是一个复杂的非线性系统,内部可能存在着相当多的、甚至是无穷多的自由度和守恒律,因此可以形成结构规整、相当稳定的孤子和相干结构,这也显示了非线性作用的不同寻常之处。

在无穷多自由度的复杂系统中,由于非线性作用,可以形成规整性的孤子。与此发现相呼应,非线性科学近二十年来又从另一个极端向人们展示了,在微观和宏观两个层次上,由确定性方程描述的简单系统可以出现极为复杂的、貌似无规的运动——混沌,发现了牛顿力学的内禀随机性,找到了湍流发生的可能机制,从而进一步动摇了科学界占主导地位的“机械决定论”。当然,混沌并不是无序和紊乱,更像是没有周期性的秩序。在理想模型中,它可能包含着无穷的内在层次,层次之间存在着“自相似性”或“不尽相似”。

非线性科学的另一个重要方面是关于“反常的”、非规则的几何物体的研究。孤波不是周期性振荡的规则传播,混沌打破了确定性方程由初始条件严格确定系统未来运动的常规,而分形则是不能用通常的长度、面积、体积表示的几何形体,其内部存在着无穷多层次,具有自相似结构。适当放大或缩小几何尺寸,分形的整个结构并不改变。许多复杂现象,都要采用分形方法来描述。分形人口学正在成为具有充实内容的研究领域。

70年代以来,普里高津和哈肯分别提出的耗散结构理论和协同学,中心问题是自组织现象的探索,取得了不同程度的成功。自组织现象的共同规律是:(1)通常只有当某个系统参量达到一定的临界值后,新状态才会突然出现;(2)新状态具有更丰富的时间和

空间结构；(3)只有不断地从外界吸收能量，这些结构才能继续维持下去；(4)新结构一旦出现，就不容易因为外界条件的微小改变而消失。普里高津和哈肯等人是采用序参量、稳定性分析、分岔理论、协同作用、自发形成等概念和方法来进行研究的，这些内容也是当前非线性科学中的“图形生成”、“图形动力学”的研究对象，而其中的“元胞自动机”、“自组织临界现象”更是热点问题。把这些理论引入人口学的研究中，是非线性人口学肩负的重任之一。

总之，近二十年来，非线性科学取得了长足的进步，为人们认识自然和社会打开了新的窗口。相干结构和孤子揭示了非线性作用引起的惊人的有序性；确定性系统中的混沌使人们看到了普遍存在于自然界、而人们多年来视而不见的一种运动形式；分形的研究把人们从线、面、体的常规几何观念中解放出来，而面对更为多样且更真实的大自然；自组织现象和图形生成反映了非线性耦合到一起的大量单元和子系统中，由于有序和混沌的竞争而形成的时空组织或时空过程。在这些非常不同的学科领域内所发现的非线性现象的共同特征，使一个学科内的进展能迅速向其它领域转换，从而证实了非线性科学促进学科间相互渗透的跨学科特性。

非线性科学的这些成就无疑在人类探索自然现象和社会现象的实践中起着开阔眼界、解放思想的作用。从哲学上说，混沌研究很可能有助于消除对于统一的自然界的确定性和概率论两套对立描述体系之间的鸿沟，深化对于偶然性和必然性这些哲学范畴的认识；而相干结构、自组织现象和图形生成的研究则为量变引起质变、有序和无序的相互转换，提供了活生生的丰富事例。非线性科学的巨大进展，为人口学理论的完善提供了机遇和条件，也为人口学摆脱传统束缚，从线性进入非线性领域，指明了方向。