

308-313

5696(14)

第16卷第3期

生态学报

Vol. 16, No. 3

1996年6月

ACTA ECOLOGICA SINICA

Jun. 1996

# 城市生态系统的模拟方法： 灵敏度模型及其改进

吕永龙 王如松

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

X21

A

**摘要** 评估城市生态系统的持续发展能力, 探讨其持续发展对策是一个复杂的动态问题, 需要运用动态的模拟方法进行。由德国著名生态控制论专家 F. Vester 和 A. V. Hesler 教授提出的“灵敏度模型”方法, 将系统科学思想、生态控制论方法及城市规划融为一体, 解释、模拟、评价和规划城市复杂的系统关系, 是模拟城市生态系统很好的方法。本文对该方法进行了改进。改进后的“灵敏度模型”为评价城市持续发展能力、探讨其持续发展对策提供了新的思路。

**关键词:** 灵敏度模型, 城市生态系统, 持续发展, 模拟。

## A SIMULATION METHOD OF URBAN ECOSYSTEMS: SENSITIVITY MODEL AND ITS IMPROVEMENT

Lu Yonglong Wang Rusong

(Research Center for Eco-Environmental Science, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100080)

**Abstract** Due to the complex dynamic processes of estimating the sustainability of urban ecosystems and of exploring strategies for their sustainable development, dynamic simulation methods are needed. The Sensitivity Model developed by German Scientists Prof. F. Vester and Dr. A. v. Hesler on the basis of system science, biocybernetics and urban planning methods, which can be used to illustrate, simulate, evaluate and plan the complex relationships within an urban ecosystem, is a good method for simulating urban ecosystems. The authors improved the Sensitivity Model in their collaboration with prof. F. Vester and Dr. A. v. Hesler. The improved Sensitivity Model provides a new way of thinking for estimating the sustainability and exploring the strategies for sustainable development of urban ecosystems.

**Key words:** sensitivity model, urban ecosystem, sustainable development, simulation.

- 本文是 UNESCO/MAB(联合国教科文组织/人与生物圈计划)资助与协调的“国际生态学合作计划”(CERP)项目的部分成果。

收稿日期: 1995 03 08, 修改稿收到日期: 1995 08 22。

城市可持续发展的最终目标是调节好以人为主的生命系统及其支持环境之间的相互关系,使有限的城市环境在现在和未来都能支撑起城市生命系统的良好运行,保持生态系统结构的多样性,从而保证生态系统的稳定性与持续性<sup>[1]</sup>。评估城市生态系统的持续发展能力,探讨其持续发展对策是一个复杂的动态问题,需要运用动态的模拟方法进行。由德国著名生态控制论专家 F. Vester 和 A. V. Hesler 教授提出的“灵敏度模型”<sup>[2]</sup>方法就是模拟城市生态系统的有效方法。本文对该方法进行了改进,改进后的“灵敏度模型”为评价城市生态系统的持续发展能力,探讨其持续发展对策提供了新的思路。

## 1 灵敏度模型特点

### 1.1 灵敏度模型的基本思想和特点

传统的规划思想存在一个致命的弱点,就是没有考虑到城市(或区域)作为一个生态系统存在的3个基本属性,即生物属性、动态属性和相关属性,所做出的规划往往成为一种人工僵化的模式,很难适应生态系统持续发展的需要。因此,灵敏度模型设计的基本指导思想是:(1)把握系统要素之间的相关关系,着眼于系统的整体行为;(2)在灵敏度分析的基础上,实现系统动态调控;(3)运用生物控制论原理,增强生态系统自我调控机制。城市及区域生态系统与自然生态系统类似,有其内在的生物控制法则。灵敏度模型就是要更加深入地了解 and 运用这些法则,消除人类对系统施加的不良影响,通过自我调节来维持系统的生存和发展。它不仅模拟系统组分间相互关系的格局,而且还给出其控制论的解释和评价。

“灵敏度模型”的特点在于,虽然它模拟的是一个复杂的大系统,但却不要求建模者有高深的数学、工程控制论及大系统理论知识和先进的技术装备。因为其目的并不是作出该复杂系统的一个封闭的模拟模型和确定性的规划设计,得出任一时刻系统各部分的真实情形,而是着眼于系统各组分间相互关系的动态分析,着眼于基本结构和功能变化趋势的定性描述,从理论上和实际上给出其生物控制论的解释和评价。从系统各种关系对外界干扰的反应中可以看出系统结构的稳定性、适应能力、不可逆的变化趋向、系统瓦解的风险或变态的可能性、操纵系统向有利方向变化的主导因素等等。

灵敏度模型不象传统数学模型或黑箱模型需要模型建造完毕并开始运转后才能提供有用的信息,而是开始就有信息陆续反馈给使用者。因此,它在构模的不同阶段都能对决策者或规划者的问题提供答案。从某种意义上说,决策规划者不是超脱于系统之外,他本身就是系统的组分,并且不断通过模型反馈信息来评价不同决策对整个系统的影响程度。这种设计思路,增强了灵敏度模型的实用价值。

### 1.2 基本工程程序

灵敏度模型的系统分析过程和工作程序如下:

**确定边界和问题** 根据规划人员的要求和具体问题来定义系统的边界,弄清其主要状态、过程、关系和问题。同时搜集各种统计数据和规划资料。

**建立基本变量表** 将所研究系统的一切有关变量整理为基本变量表。包括经济、人口、土地利用、人类生态、自然平衡、基础设施、市政管理及边界条件等方面。

**标准卡片** 利用一种叫做“筛网矩阵”的打洞卡片对变量进行过滤,先用基本部门、控制论特性、物理特性、动态特征、系统关系等5组标准来筛选,旨在把数量庞大的基本变量压缩成具有代表性的能反映系统关系的少数变量。

**临时变量集和影响因子** 用标准卡片筛选出若干变量组成的临时变量集,作为进一步分析的基础。

**变量关系图的构思** 运用生态、地理、系统科学等专业知识、历史动态、传统规划和一般常识,并通过控制论标准的检查,建立起这些临时变量间相互作用的有向图用以模拟系统相互作用的真实关系。

**专家咨询** 利用事先准备好的调查表格及问题,对当地知情人士进行咨询,并将答案编码组成相互作用模型。

**确定变量之间的关系** 调查结果整理出来后,用文字说明和各种定性与定量数据补充和修改变量关系图中的各种关系,使其能反映系统的真实情况。

**相互作用模式的修正** 将各组分间的关系及其正负反馈回路组成一个完整的关系图。对一些重要变量间的相互关系进行重点考察和分析,例如以人口为中心,对它与其它部门之间的一些主要反馈关系作详细分析。

**带函数的直观模拟模型** 用系统动力学(SD)符号去定义相互作用模式的主要函数及其表达式,并将其转换成集结的SD流图。在系统动态的初次模拟试验中,找出相互作用模式中存在的差距。将总模型的重要或敏感因子进行分解,研究子模型、子变量或子函数相互作用格局及其内部替换影响函数表达式。最后定义工作函数(数学函数或表函数),将其结合到模拟模型中去。

**编制模拟程序** 利用数学模型、流图和模拟方法编制与专家咨询过程一致的模拟程序。

**系统动力学模型** 输入城市的实际数据,运行程序,通过人机对话方式修改程序,使模拟的关系与实际行为相一致,并进行所谓“1%摄动”(微小的参数变化)的灵敏度分析,记录下系统最主要的动态特征,将其储存下来留作进一步解释。

**系统行为的控制论解释** 着重解释系统总体9个最主要的特征,即影响指标、反馈回路、自我调节、依赖性、流通量、多样性、交叉联系程度、系统负担和不可逆性等。必要时,在基础数据基础上作进一步调查和补充,以确立控制特性等级和基本解释模型。利用人机对话,重新输入特定数据模拟系统动态,从而得出更复杂的具体的控制论解释。具体的解释由5个独立的子模型构成,即反馈回路、依赖性、生产量、多样性和影响指标模型。

**系统行为的总体生物控制论评价** 综合各种解释模型,可以确定系统的自我调节能力、系统负荷及关键因子,与其他控制论特征结合,构成对复杂系统行为进行生物控制论评价的基础。系统主要的控制论特征由风险、稳定性、不可逆性、负荷量及控制论成熟度等5个子模型来评价,并且借助生物控制论检查表和因子矩阵同系统相联系。

**系统行为的宏观分析** 这是模拟模型的终端输出,是上述几个阶段的成果总结。

**将对系统的理解作为决策的依据** 定义行为矩阵,确定系统各组分的作用及其相互关系的重要程度,使得在规划开始阶段就避免某些错误决策。

**控制策略的建议** 借助功能矩阵、因子矩阵和生物控制论标准的检查,提出新的控制策略。

**制定具备控制功能的具体措施** 借助措施矩阵形成一个对系统关系的可能变化采取的措施及调控对策表,通过对系统行为施加影响来改善系统存活的机会。

**灵敏度模型的综合政策试验** 某一改善措施的后果可通过灵敏度模型来模拟。通过模拟发现系统对某一发展对策所期望的反应。

提供系统决策帮助和可供选择的措施 模型的输出结果为决策者提供了一系列备选的对策,决策者可结合当地实际情况,利用该模型和传统规划方法,从中选择最适宜的方案。

上述过程也可简化为:界定问题、筛选变量、建立模型、宏观模型、系统行为总体解释与评价、系统决策、政策试验和优化选择等8个基本步骤。

## 2 灵敏度模型的改进

灵敏度模型将生物控制论观点引入城市与区域规划中。它要求人们用生态系统的观点来看待、分析和研究一个城市区域,使生态学的基本原理渗透到决策规划过程之中,确实是城市生态系统研究的创新与突破。但它同许多新生事物一样也有其不尽完善之处。根据国际城市生态系统研究与系统科学等相关领域的最新动态,结合城市生态系统复杂性、时滞性、动态性和空间分异性的特点,从思想方法、工作程序和模拟技术等方面对灵敏度模型作了如下的改进。

### 2.1 对灵敏度模型思想方法的改进

**2.1.1 灵敏度模型试图以一种简化模型来模拟复杂的城市生态关系,从而找到解决城市问题的途径、方法与措施,这是不太现实的。因为,模型构造者对城市生态系统复杂关系的认识总是有限的,加之任何模拟方法都有其适用范围和局限性,并不是解决一切问题的灵丹妙药,难免产生许多“失真”现象,使得系统网络结构不完整或主要关系丢失,模型与现实的差距加大。因此,作者不主张用单一的模式来模拟复杂的全部生态关系,提出了模拟局部生态关系的思想方法,即从问题分析、过程跟踪和政策试验3方面入手来模拟城市生态关系。**

**问题分析:**复杂的城市生态系统面临的问题较多,如住房短缺、景观布局不合理、基础设施不足、环境污染严重等。这些问题中哪些是关键性问题?哪些问题是迫切需要解决的?哪些问题具有正反馈的关联效应?哪些问题具有负反馈效应?……等等。面对这些问题,首先必须分析这些问题是否存在,问题涉及的范围多大,即涉及的系统边界多大,与之关联的因素有多少,哪些因素是关键因素,关键因素的相互关系模式是什么,以及如何从这些关系模式中探讨解决问题的途径与对策等。

**过程跟踪:**城市生态系统的功能是靠其中连续的物流、能流、信息流、货币流、人口流在不同的时空范围内流动与分布来实现的。因此,通过对这些功能流流动过程的模拟分析,可以找出生态流滞竭或耗竭的位置与原因,提供改善其流动过程的对策。

**政策试验:**在城市生态系统的调控过程中,通常要根据情况的变化,采取一些调控政策,这些政策要适合当时当地的情况,能解决系统中存在的问题,政策的实施将会对系统带来一些影响,这些单凭直观理解是不可能解决的。政策试验则是借助计算机模拟和人工智能技术,分析将要采取的政策对系统行为的影响,通过观察系统行为的变化,确定政策有效性程度。首先,根据政策所涉及的问题范围,构造与实际系统相一致的模拟模型,在检验模型的信度与可靠性(进一步确认它能模仿真实系统)后,通过变动模型中的灵敏参数,观察模型输出的变化情况,可判定采取的政策对系统功能的影响程度,因为实际系统中的政策变化总是通过模型中灵敏的参数与结构的变化反映出来。

**2.1.2 灵敏度模型将整个城市当成一个大系统,只有时间而无空间差异,使得其实用性大大降低。为了弥补这方面的不足,作者运用地理信息系统(GIS)技术进行城市生态系统空间差异的分析与动态模拟,为宏观决策与城市规划方案在空间的布置与实施奠定了基**

础。

**2.1.3** 虽然灵敏度模型的目的不是要作出城市复杂系统的一个封闭的模拟模型和确定性的规划设计,而是着眼于系统的各组分间相互关系的动态研究,着眼于基本结构与功能变化趋势的定性描述,但这些相互关系和基本结构和功能是在一定的背景条件下形成和发展的,随着城市生态系统的时空演替,这些背景条件也要不断变化,模拟的结果(组分间相互关系的动态、基本结构和功能的变化趋势)也要随之发生变化。灵敏度模型并未指出如何根据背景条件的变化调节规划与趋势分析的结果。为此,把模型库与数据库、知识库相联接,通过灵活的人机交互界面,变更背景条件,进行在新的背景条件下的关系分析与模拟,比较不同情景下的模拟方案,从而实现随着背景条件的变化调节城市规划方案的目的,使决策者能随时根据条件的变化作出应变对策。

**2.1.4** 灵敏度模型的思想方法是值得借鉴的,但该模型基本上是一个定性的描述性模型,直观与定量的分析与模拟尚显不足。作者采用了定性与定量相结合的方法,试图将灵敏度模型的定性描述过程通过计算机技术直观而灵活地反映出来,为灵敏度模型的计算机化作了有益的尝试。

## **2.2 对灵敏度模型工作程序和模拟技术的改进**

(1) 确定边界与问题:有关城市自然、社会、经济与环境方面的数据与图形已输入数据库与图形库,有关操作人员可借助专家知识与自身经验,通过调用有关数据与图形的分析,确定系统的边界与构成要素,弄清其主要状态、过程、关系和问题。

(2) 建立基本变量表:灵敏度模型建立的是整个城市系统的基本变量表,经过改进后,操作人员可根据其问题分析、过程跟踪或政策试验的要求,在知识系统引导下,通过人机交互方式,建立确定边界系统的基本变量表。

(3) 变量筛选:灵敏度模型用标准卡片筛选变量的理论及依据尚显不足,筛选出的变量不能令人满意。因此,将传统的变量筛选方法——德尔菲分析法加以改进,请有关专家对选取界定系统定量的原则、变量选取范围及变量的特征(反映系统特性)加以描述,将描述的内容作为知识内容存入知识库。然后从知识库调出有关知识,对其归纳、综合、整理,并结合交互式的人机对话,初步筛选出反映系统关系特性的变量。通过调用数据库中有关变量的动态数据和模型库中一些定量分析方法,对一些变量对界定系统目标的敏感性进行验证分析,确认这些变量是否是影响系统目标的主要变量,进行进一步筛选。

(4) 变量关系图的构思:此步与灵敏度模型相同。

(5) 确定变量之间的关系:变量之间的定性关系网络形成之后,则分别调用数据库与模型库中的有关数据与模型,定量分析一个变量对另一个变量变化的敏感性,从而考察两变量是否存在直接的量化关系,以修改与补充变量关系图中的各种关系。

(6) 相互作用模式的修正:根据已形成的关系网络,对界定的系统进行定量模拟分析,将模拟结果与实际状况比较,若吻合程度较大,则说明该相互作用模式是能反映系统真实情况的。否则,要对一些重要变量间的相互关系进行重点考察与模拟。

(7) 根据变量的特性与变量之间的相互作用模式,建立反映变量之间定性定量关系的流图。

(8) 模拟方法:灵敏度模型采用的主要模拟方法是系统动力学(SD)方法。在SD中,流率(决策)变量被认为是相互独立的,即任何流率变量都不能直接通过其它流率变量来决

定。这使得它仅适用于一维决策过程,对处理复杂城市生态系统的  $n$  维空间的决策问题是不太合适的,因为这些决策变量是紧密相关的。鉴于此,不把 SD 方法作为主要的模拟方法,而是界定系统与问题的特点,通过交互式的人机对话,选择适宜的模拟方法<sup>[3]</sup>。

接下去进行的系统行为总体生态控制论解释与评价、系统决策、政策试验和优化选择等步骤,正是探讨城市生态系统持续发展对策、评估城市生态系统持续发展能力所要重点攻关的内容。

### 3 结语

持续发展已成为研究的热点,但目前的研究多数处于表层。要对持续发展问题进行深入的探讨,就必须寻求适宜的系统分析与模拟方法,改进型的“灵敏度模型”方法不失为一种好方法。它的思想方法不仅适用于城市生态系统,而且也适用于受人类活动胁迫强度较大的其它复杂系统,其具体的模拟方法与技术对其它生态系统的模拟也有较大的借鉴和适用价值。

### 参 考 文 献

- 1 吕永龙. 持续发展的理论思考. 持续发展与生态学(陈昌笃主编). 北京:中国科技出版社, 1993, 183~199
- 2 Vester F and Hesler v. A. *The Sensitivity Model*. Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt, Germany, 1980
- 3 Lu Yonglong *et al.* An Interactive Simulation Model of Urban Ecosystem and Its Implementation. *Journal of Environmental Sciences*, 1992, 4(1): 15~22