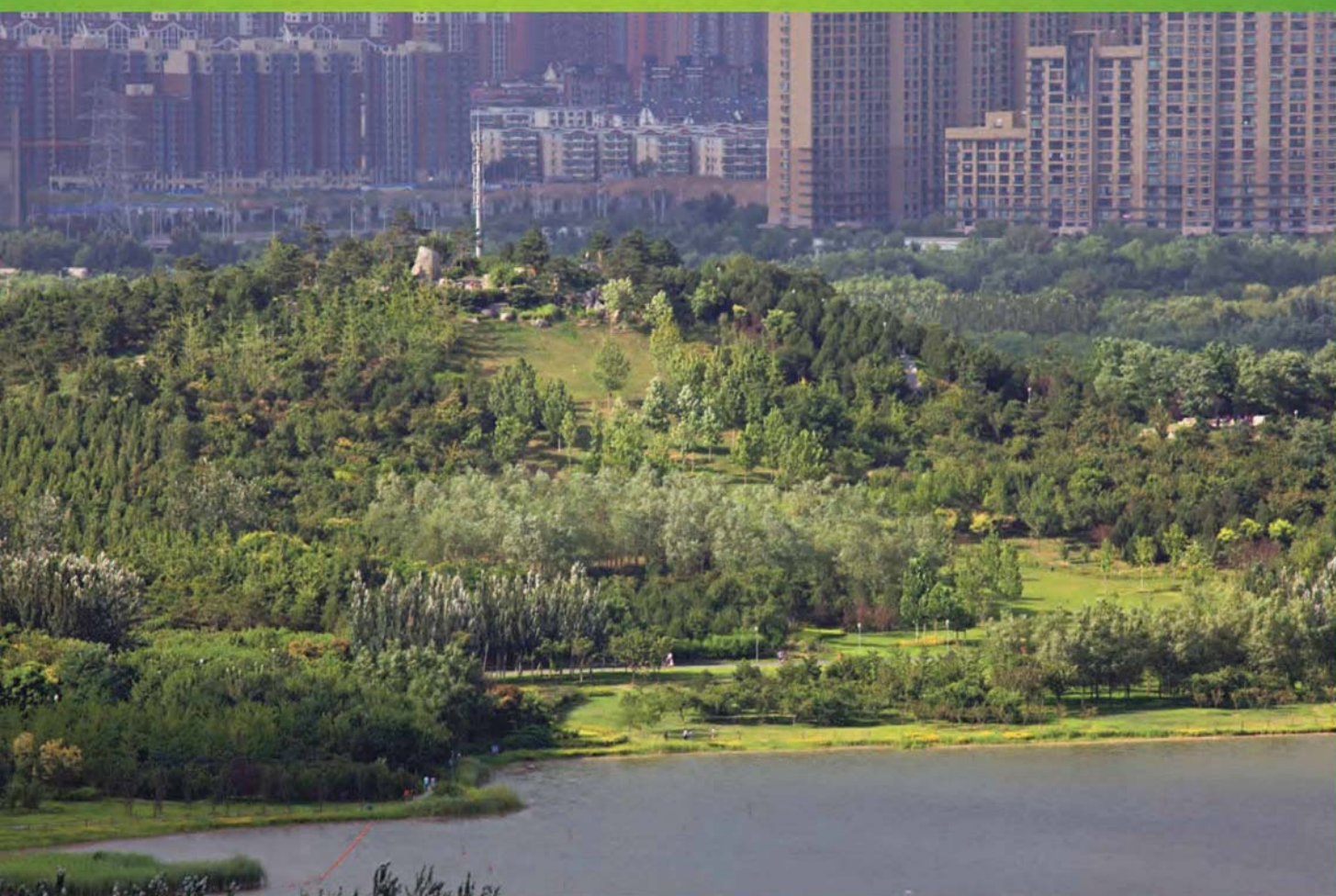


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第1期 Vol.34 No.1 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第34卷第1期 2014年1月 (半月刊)

目次

卷首语: 复杂与永续..... (I)

前沿理论与学科综述

城市复合生态及生态空间管理 王如松, 李 锋, 韩宝龙, 等 (1)

海洋生态系统固碳能力估算方法研究进展 石洪华, 王晓丽, 郑 伟, 等 (12)

城市生态系统灵敏度模型评述 姚 亮, 王如松, 尹 科, 等 (23)

城市生活垃圾代谢的研究进展..... 周传斌, 徐琬莹, 曹爱新 (33)

个体与基础生态

胶州湾生物-物理耦合模型参数灵敏度分析 石洪华, 沈程程, 李 芬, 等 (41)

渤海湾大型底栖动物调查及与环境因子的相关性 周 然, 覃雪波, 彭士涛, 等 (50)

生物扰动对沉积物中污染物环境行为的影响研究进展 覃雪波, 孙红文, 彭士涛, 等 (59)

种群、群落和生态系统

密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系 ... 王大尚, 李屹峰, 郑 华, 等 (70)

长岛自然保护区生态系统维护的条件价值评估 郑 伟, 沈程程, 乔明阳, 等 (82)

海岛陆地生态系统固碳估算方法 王晓丽, 王 媛, 石洪华, 等 (88)

景观、区域和全球生态

区域生态文明建设水平综合评估指标 刘某承, 苏 宁, 伦 飞, 等 (97)

基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等 (105)

1985 年以来黄河三角洲孤东海岸演变与生态损益分析 刘大海, 陈小英, 徐 伟, 等 (115)

基于复合生态系统理论的海洋生态监控区区划指标框架研究 徐惠民, 丁德文, 石洪华, 等 (122)

我国环境功能评价与区划方案 王金南, 许开鹏, 迟妍妍, 等 (129)

资源与产业生态

生态产业园的复合生态效率及评价指标体系 刘晶茹, 吕 彬, 张 娜, 等 (136)

我国农业生态效率的时空差异..... 程翠云, 任景明, 王如松 (142)

内蒙古半干旱生态脆弱矿区生态修复耦合机理与产业模式 陈玉碧, 黄锦楼, 徐华清, 等 (149)

基于物质流分析方法的生态海岛建设研究——以长海县为例 陈东景, 郑 伟, 郭惠丽, 等 (154)

再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用 陈卫平, 吕斯丹, 张炜铃, 等 (163)

基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例..... 麻德明, 石洪华, 丰爱平 (173)

集约用海对海洋生态环境影响的评价方法 罗先香,朱永贵,张龙军,等 (182)

城乡与社会生态

基于生态系统服务的城市生态基础设施:现状、问题与展望..... 李 锋,王如松,赵 丹 (190)

北京城区道路系统路网空间特征及其与 LST 和 NDVI 的相关性 郭 振,胡 聃,李元征,等 (201)

基于复合生态功能的城市土地共轭生态管理 尹 科,王如松,姚 亮,等 (210)

重庆市森林生态系统服务功能价值评估 肖 强,肖 洋,欧阳志云,等 (216)

渤海湾港口生态风险评估 彭士涛,覃雪波,周 然,等 (224)

达标污水离岸排海末端处置技术研究综述 彭士涛,王心海 (231)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 238 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 28 * 2014-01



封面图说: 北京奥林匹克公园——在高楼林立的大城市中,办公楼、居民区、学校、路网系统、公园以及各种水泥、沥青硬路面和树木、绿草地、土面、水面等等组成了复杂多样的城市生态景观,居住着密集的人口并由于人们不断的、强烈的干预,使这个城市生态系统显得尤其复杂而又多变。因此,系统复杂性及灵敏度是困扰城市生态系统研究和管理的重要因素,建立灵敏度模型是致力于解决城市规划管理中的复杂性问题的有效方法,网状思维与生物控制论观是其核心,也是灵敏度模型的思想基础。图为北京中轴线北端被高楼簇拥着的奥林匹克公园的仰山和龙型水系。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201304280846

姚亮,王如松,尹科,韩宝龙.城市生态系统灵敏度模型评述.生态学报,2014,34(1):23-32.

Yao L., Wang R S., Yin K., Han B L. A review of sensitivity model for urban ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 23-32.

城市生态系统灵敏度模型评述

姚 亮,王如松*,尹 科,韩宝龙

(城市与区域生态国家重点实验室,中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要:系统复杂性是困扰城市生态系统研究和管理的因素之一,成熟的系统分析模型可以帮助研究者及管理者应对这种挑战。德国系统思想大师 Vester 教授开发的灵敏度模型就是致力于解决城市规划管理中的复杂性问题,并在一系列的实践中取得了显著成效。网状思维(Networked Thinking)与生物控制论观点是 Vester 教授的核心思想,也是灵敏度模型的思想基础。模型主要分为三大层次:最底层是以数据的收集与筛选过程为代表的信息组织层次;随后是系统解释层次,主要是对系统关系网进行控制论解释;最后是系统综合评价层次,采用生物控制论观点对系统结构、行为等进行检验与评价。为方便用户使用,模型被分解为 9 个标准步骤,每一部分都包含数个实用的数学分析工具。模型还明确提出了 4 个等级的系统控制论指标(或特征)体系,以帮助使用者更好地进行系统思考。灵敏度模型本身具有众多的原创性贡献,但同时也有一定的局限性。这些经验与教训为未来的城市生态系统建模工作提供了宝贵启示。

关键词:城市生态系统;灵敏度模型;网状思维;生物控制论

A review of sensitivity model for urban ecosystems

YAO Liang, WANG Rusong*, YIN Ke, HAN Baolong

Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The system complexity is one of the factors that plagued urban ecosystem (UE) research and management. According to the general system theory, the complexity of UE can be divided into structural complexity, the complexity of the process, the complexity of system behavior, the functional complexity and emergence to the overall complexity. The reliable systematic analysis models and tools can help researchers and managers to deal with this challenge. Sensitivity model developed by Professor Vester, who was known as the great master of system thinking in Germany, was committed to addressing the complex issues in daily urban management practices. Of course, the model had taken remarkable achievements in the range of practical applications. The networked thinking and biological cybernetic (or bio-cybernetic) perspective are Vester's core ideas and the philosophy basis of the sensitivity model. The model framework was divided into three hierarchical levels: the bottom was the level of information organization mainly including data collection and screening process; following was the level of systematic cybernetic interpretation, emphatically mining the knowledge about system structure, interaction between parts, and so on with the aid of the cybernetic criterions; finally, the highest level, system comprehensive evaluation, gave an overall and integrated assessment of the system structure and behaviors via the eight bio-cybernetics principles. For the convenience of model users, the model was broken down into nine standard steps, each of which contained a number of useful mathematical analysis tools. In the model, Professor Vester also explicitly put forward a four-level systematic cybernetic indicators (or characteristics) to help advanced users easily form their system thinking. Sensitivity model itself had made many outstanding contributions. In detail, the model provided an integrated methodological

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(71033005)

收稿日期:2013-04-28; 修订日期:2013-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangrs@rcees.ac.cn

framework for dealing with complex issues for the urban ecosystem research; it, most importantly, also provided a novel system regulation theory with his bio-cybernetic approach; in addition, it also provided a series of easy-to-use systematic analysis tools, which enriched the existing analysis methods. However, it also had some limitations. Specifically, the model itself wasn't perfect and just stated the concepts and framework, still stuck in the stage of paradigm description; the bio-cybernetics view was with a certain degree of naturalistic bias, and may not be entirely suitable for the urban ecosystem; it should be noted that the model have not been widely used in the world in the three decades of the model developed, in despite of its strong academic value and the potential for practical application, because of Professor Vester rarely writing in English and communicating with other scholars in other languages. These experiences and lessons learned provide valuable inspiration for the future modeling work of urban ecosystems. The sensitivity model is equivalent to providing a blueprint to create new models. According to specific targets, researchers can develop many more specific models on the basis of the sensitivity model. It must be point out that the sensitivity model needs to cooperate with other quantitative simulation model to address successfully real-world problems. Ideally, the modelers can start using the sensitivity model for better understanding of the system, and then establish a more accurate simulation model to improve the quality of the modeling work. In any case, the ultimate purpose of modeling work should be to improve people's understanding of urban ecosystems, and ultimately to support the urban management practices.

Key Words: urban ecosystem; sensitivity model; networked thinking; bio-cybernetics

系统建模是城市复合生态系统研究的重要手段,但同时也是目前研究的主要瓶颈之一^[1]。城市生态系统的复杂性是阻碍系统建模工作的主要因素,也是困扰城市规划与管理者的挥之不去的梦魇^[2]。传统单一化、补救式、经验式的城市规划方法已经宣告失效,制定的规划措施往往达不到预期效果,甚至会带来不可预知的灾难性副作用。城市生态系统研究呼唤新一代实用系统工具,以应对日渐复杂的分析、规划与管理工作的。在这个背景下,德国系统思想大师 Vester 教授提出了灵敏度模型,并将其应用到法兰克福等城市规划管理工作中^[3]。本文的主要目的就是対这种灵敏度模型进行评述,包括剖析其思想基础,结构框架及使用流程、模型背后的数学原理、独树一帜的控制论指标体系以及模型的实际应用情况。在对模型具体内容进行全面剖析的基础上,总结灵敏度模型及思想的主要贡献,同时也辨析了模型的局限性,以期爲未来城市生态系统模型提供方向性启示。但在此之前,本文将首先总结城市生态系统的常见复杂性特征,以帮助深入理解灵敏度模型的贡献和价值。

1 城市生态系统的复杂性

复杂性是困扰城市生态系统研究的主要难题之一,也是其系统建模工作面临的主要挑战。作为公

认的复杂系统,城市生态系统具有非线性、结构反馈性、不确定性、不可预测性、自组织性、涌现性以及等级层次性等几乎所有的典型复杂性特征。复杂性已经是城市生态研究不可绕过的障碍,研究者及城市管理者们只能寄希望于良好的系统模型来认识、理解和处理复杂性。与此同时,城市模型的研究也因为这种迫切需要而进入快速发展时期,灵敏度模型也是这一现实背景下的产物。可以说,城市生态研究极大地依赖系统模型的开发,而系统模型的成功与否关键在于其对复杂性的刻画或处理能力。因此,首先必须对城市生态系统的复杂性有充分的认识,才能认识到系统建模工作面临的主要挑战,从而理解灵敏度模型的巨大价值。本小节将从城市生态系统的结构、过程、行为和功能 4 个方面来简要总结其复杂性特征和给系统建模带来的挑战。

1.1 结构复杂性

城市生态系统的结构复杂性来源于组分的多样性和组分间交互作用的丰富性。城市作为最为典型的复合生态系统,除了包含水、土、气、生、矿等自然要素组成的生命支持系统外,还包括城市人类居民复杂的经济生产和社会活动^[4]。相比传统的自然生态系统,城市生态系统包含的组分呈现倍数增长,景观结构的破碎度与异质性程度也较高。这些组分或子系统之间形成海量的相互作用关系,构成了包含

无数正负反馈环的复合生态关系网。而且组分与关系是在时空维度持续演变的。旧组分的消亡与新组分的出现,新的反馈关系的建立等等,都使得系统的结构形态呈现明显的动态复杂性。另外,不同城市之间的差异也是结构复杂性的来源之一。不同的气候环境、民俗习惯、管理方式等因素都会导致城市生态系统结构的差异性。这种差异性影响着城市系统模型的普适性和可比性。

1.2 过程复杂性

城市系统的生态过程除包含传统的物理、化学等自然过程外,还包括生产、消费等人文过程。复合生态系统理论将这些过程归纳为物质流、能量流、信息流、资金流、人才流五大类,统称为复合生态过程^[4]。这五大类过程之间是相互依赖与补充的关系。在实际研究中,具体生态过程至少包含上述五类中的两种,甚至全部。比如城市的地球物理化学循环过程,是以物质流为表现形式、能量流为驱动力量、信息流为调控开关的。实际上,资金流和人才流也对其有很强的塑造作用。同理,常见的城市水文过程、自然子系统演替过程和人类经济生产过程等均是五类基本过程的耦合形式。另外,城市生态过程的复杂性还表现其具有很强的尺度性。比如城市水文过程与流域水循环的耦合问题等。城市内部形态与周围环境之间存在明显差异性,使得城市生态过程跨尺度研究显得尤为困难。

1.3 行为复杂性

从系统行为角度来看,城市生态系统的演化趋势往往带有复杂性色彩^[5]。城市是一类由人类所主导的复合生态系统,人的行为对城市演变有决定影响。尤其是城市管理者,确信城市的发展方向受政策调控所左右。现实中,尽管城市中的人占据绝对主导地位,但是城市的演化趋势往往并不尽如人意,城市行为本身具有复杂性。从根源来讲,结构和过程的复杂性导致了人们并不能完全掌握城市生态系统的行为。而且,城市居民的个体自主行为,使得城市演化更像是一种由微观行为聚集而成的宏观涌现现象。这种情况下,城市的发展方向往往与个人的愿望相背离,微观行为和宏观趋势之间的关系是复杂的。比如,居民都追求个人的利益或福利,就有可能对公共环境进行占用,而导致城市整体生态环境恶化,反过来又影响了追求个人利益的初衷。另一

方面,人们对城市应该具有的合理演化趋势也没有达成共识,使得城市的管理目标本身就比较复杂,由此带来城市调控任务的复杂性。

1.4 功能复杂性

城市生态系统功能的复杂性来源于其结构、过程、行为的复杂性及其人类价值观的多样性。复合生态系统理论将城市功能归纳为五大类:生产、消费、还原、调控、缓冲^[4]。对于组分或子系统来说,其可能是单一功能体,也可能同时兼具多个功能。城市功能的发挥还呈现一定的尺度效应和结构相似特征。每种功能的出现都有最小尺度的要求,只有大于该尺度时才可能形成成熟的城市功能。城市的每一分区本身就具有相对完善的系统功能。城市功能发挥依赖的生态过程也是多样的。每个生态过程可能发挥着多个功能,两种看起来完全不同的生态过程也可能具有同样的系统功能。由于所处环境,发展阶段等不同,各城市的功能发育程度也差异较大。另外,功能概念本身涉及到人类的价值观取向,使得城市功能更为复杂。城市作为人类的主要栖息地,首要功能是为居民提供生产生活的场所。但是,城市还被赋予另外的功能,比如政治中心、生产城市、消费城市、资源城市等等,从而导致城市功能的具体情况也不尽相同。

1.5 复杂性的挑战

在城市生态研究中,要么问题本身涉及大量的相关特征量,不可能收集到理想的完备信息;要么存在一些无法精确观测的特征量,不可能取得完美的精确数据资料;要么特征量之间的关系无法用明确的数学形式表达出来,不可能建立精确的数学模型;多数情况是三者兼而有之。这些现实复杂性使得城市生态建模一味追求信息完备化、精确化、公理化描述的做法不再有效。以精确性为例,随着系统复杂性的增加,人们对系统做出精确而有意义的描述的能力就会降低,复杂性达到一定的阈值,精确性和有意义性将互相矛盾;精确的描述不再是有意义的描述,有意义的描述不再是精确的描述。对于复杂性,真正科学的建模必须抛弃精确性崇拜,而接受近似解的必要性和合理性,承认定性或模糊方法的有效性。同样,过分强调信息完备性也是不可取的。要对城市生态系统进行详细描述势必需要海量的信息,建模人员往往会被过多的细节信息所淹没,而无

法抓住系统的关键因素^[6]。因此,城市生态研究必须寻求新的系统研究方法以应对这些复杂性的挑战,而灵敏度模型就是很好的尝试。

2 灵敏度模型的主要内容

灵敏度模型是由德国系统思想大师 Vester 教授于 1980 年正式提出的,目的在于解决城市或区域规划中面临的系统复杂性问题^[3]。本节将对灵敏度模型的主要内容进行阐述,并分为 5 个部分:首先对灵敏度模型的思想基础进行辨析,包括 Vester 系统思想的形成和其著名的生物控制论思想等;其次将对模型的结构框架和使用流程、模型背后的数学原理进行简要介绍;随后对模型提出的生物控制论特征体系进行深入分析;最后回顾该模型的应用情况,尤其是在德语国家及中国城市生态研究中。

2.1 思想基础

从历史角度,Vester 的思想可以归为系统研究方法的流派之一。系统思想自古有之,但从系统角度来思考人类的发展问题是近半个世纪的事情。其中影响最大和最具标志性是 1972 年罗马俱乐部发表了第一份研究报告《增长的极限》,书中采用系统模型去探讨资源约束下人类的发展命运,引起了强大的反响^[7]。随后在全世界范围掀起了环境保护与系统研究的浪潮,各种系统思想理论层出不穷^[8]。灵敏度模型的开发者 Vester 就是这时期的重要人物之一。

在德语国家 Vester 已经是系统思考的化身。起初 Vester 作为生物化学家参加一个癌症研究项目,负责其中细胞功能研究。他发现每个细胞中都包含很多组件,这些组件之间存在着大量的反馈控制关系,关系网的正常运转维持着细胞的功能发挥,否则就会发生癌变。受此启发,Vester 认识到系统思想的巨大价值,并将目光放在更宏观的问题上,包括环境保护、能源和交通规划、人群健康以及可持续发展等涉及复杂性的焦点问题。在后续的研究中,Vester 提出了一整套系统思考方法和模型,并创造性地将生物控制论准则引入日常管理实践中。

Vester 将其对复杂问题的思考方式命名为网状思维(Networked Thinking)^[6]。从字面上看,其强调事物之间的相互联系,在事物存在的关系网中去思考问题。实际上,网状思维有更多的含义。比如强

调从全局角度去看待事物,注重分析各部分间的耦合方式,侧重理解关系反馈环对系统动态行为的决定作用等等。甚至可以说,这就是系统思维(System Thinking)的另一个称呼。特别需要指出的是,大部分整体论者都认为大量细节信息的获取和累积有利于更好的认识系统。但 Vester 却相反,认为人们容易被过多的细节信息所淹没,而且系统是由少数关键因素主导的。通过一定的筛选程序,可以辨识出这些主导因素,探知系统的整体轮廓,而且主导因素之间的相互影响模式就是系统复杂性的主要来源。这也是灵敏度模型的核心指导思想。

在 Vester 的网状思维理论体系,最独树一帜的地方是他将生物控制论(Bio-cybernetic)观点引入系统研究中^[9]。受到生物圈中众多生物及生态系统演化历史的启发,他认为这些系统背后有普适的控制论准则在起作用。在前人研究的基础上,将其凝练为八大准则,并称其为生物控制论准则,包括:①负反馈超过正反馈;②系统功能不依赖于其数量增长;③着眼于功能而不是产品,产品具有多样性和可替换性;④系统具有柔性,它能充分利用现存的各种力量为系统服务;⑤产品可以有多种用途,并表现为一定的组织,具有一定的功能;⑥废物利用可形成物质再循环过程;⑦系统具有共生性,通过多样性、耦合和交换可以互相利用;⑧和谐的生物工程设计。Vester 坚持认为,生存是系统的终极目标。而这八条准则是通向这个目标的可靠方向或实现路径。在其开发的灵敏度模型中,生物控制论观点也是其核心指导思想之一。

2.2 模型结构与流程

概括来讲,灵敏度模型可以分为 3 个层次(图 1):第 1 层次是数据的收集与筛选过程。数据与变量是任何模型最基本的组成要素。灵敏度模型并不过分追求信息的丰富性和精确性,相反认为系统的主要特征常常是由少数重要变量决定的。因此,这一层次的关键就在于从收集到的系统信息中将这些重要变量筛选出来。筛选过程是借助筛选准则矩阵来完成的。筛选出来的变量集被应用到后续的系统建模中;第 2 层次是系统控制论的解释。在变量集的基础上,通过辨析变量之间的相互影响关系,建立影响因子矩阵。在此基础上计算每个变量的主动性、被动性、关键性和缓冲性指标,解释每个变量在

系统中扮演的角色以及变量对系统的重要性程度。这些解释性信息将被整合进后续的生物控制论评价中;第3层次就是面向系统整体的生物控制论评价。核心在于采用八条生物控制论准则来检验系统,评

估系统的整体状况。具体来说,通过系统的局部和整体模拟,评估系统面临的风险、稳定性、进化的可能性和其它系统生存能力的测度标准。最后将这些评价结果整合进生物控制论评价中。

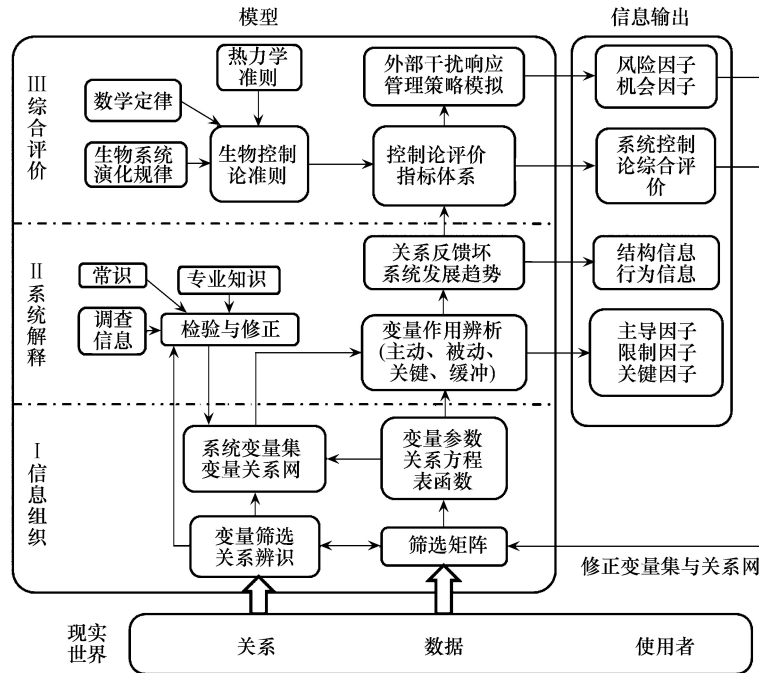


图1 模型结构框架图

Fig.1 The framework of the sensitivity model

对使用者而言,具体的模型使用流程可以划分为9个标准步骤(图2)。第①步对目标系统进行描

述,确定系统边界、结构及备选变量等。在上一步定性辨识的基础上,第②步筛选出建模所需的系统变量集,筛选过程借助③准则矩阵完成。第④步是对变量之间的相互影响关系进行分析,组织成影响矩阵的形式。第⑤步是对影响矩阵进行信息挖掘,辨析各个变量在系统中的控制论角色,包括主动、被动、关键和缓冲等。第⑥步是对变量之间相互作用和系统反馈环进行分析,得到系统的结构信息。第⑦步是定义变量相互作用函数(方程或基于模糊逻辑的表函数等形式),并进行局部情景模拟。第⑧步对整个系统进行 If-then 模拟和政策检验,探索系统的总体行为趋势。第⑨步是将前面得到的所有系统信息进行综合,结合生物控制论准则进行系统综合评价。

这里需要强调,模型的任一步骤都是开放设计的,建模者可以根据初步结果和自身经验来对模型进行调整。这种修正甚至不需要遵守严格的先后顺序,具有很强的灵活性。使用者和模型之间不断地进行信息交互作用,模型对复杂性处理效果持续提

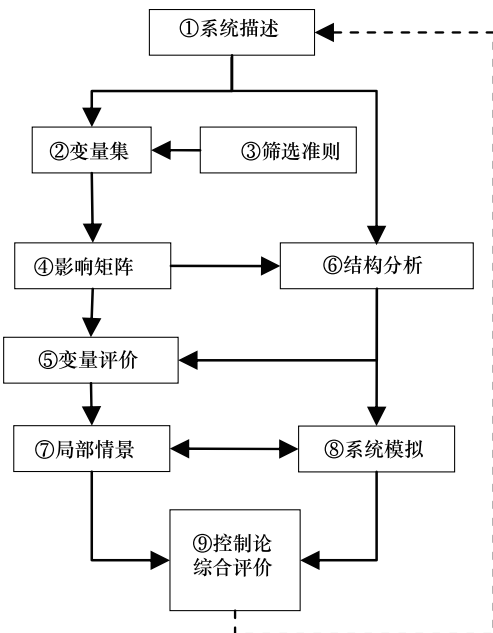


图2 模型使用流程图

Fig.2 The standard flowchart of the sensitivity model

高,使用者对目标系统(或问题)的理解也逐渐深入。总之,受篇幅限制,本部分只能对模型框架和使用流程进行极其简要地介绍,详细信息请参见《用于城市与区域规划的灵敏度模型》和其他相关资料^[3]。

2.3 模型的数学原理

为了应对城市生态系统的复杂性,灵敏度整合了多种数学方法。这些数学方法大部分只具有单一的计算分析功能,但是通过精心设计的模型框架和流程进行系统整合,最终形成具有优越分析功能的灵敏度模型。受篇幅限制,本文不对这些数学方法进行详细罗列,只简述其中几个有代表性的数学原理。

首先介绍影响矩阵及分析方法。在进行定量化的系统模拟(图2中的⑥⑦⑧)之前,灵敏度模型就对变量之间的定性相互作用进行分析,并初步辨识变量在系统中的作用,为使用者提供变量和系统结构的定性信息。这种分析是借助变量之间的影响矩阵来完成的。图3展示了包含7个独立变量的影响矩阵。从行向看,表示某变量对其它变量的影响作用强度,可以理解为变量的主动性。相反地,列项表示某变量受其余变量的影响作用强度,表征变量的被动性。因此,行向之和 AS (Active Sum) 指标就可以用来衡量变量在系统中的主动性程度,比如第6个变量的 AS 值最大,表示其主动性最高,属于系统的能动因子。类似地,列向之和 PS (Passive Sum) 刻画了变量的被动性程度。若一个变量主动性和被动性程度都较高,则其在系统中必然发挥着关键枢纽作用,是系统的关键变量。这里采用 AS 与 PS 的乘积 P 来衡量,如图3中的第4和第6个变量就是系

统的关键变量。主动性 AS 与被动性 PS 之商 Q , 衡量变量在系统中的相对活跃性。 Q 值越小,表示该变量越不活跃,属于系统的缓冲变量,如图3中的第7个变量。总之,灵敏度模型采用这种简单易用的矩阵分析方法,就为使用者提供了许多有价值的系统信息。

模型的系统模拟与情景分析阶段是基于模糊集、模糊逻辑原理,这点不同于系统动力学等常见系统模拟方法。以系统动力学为例,一般是采用精确的方程和函数等来定义变量之间的关系,即便不清楚变量间准确关系也是统计数据的表函数形式来代替。而灵敏度模型并不追求这种精确性,从而避免了对数据的过分需求。基于模糊数学原理,灵敏度模型将变量的取值分解成离散的整数形式,用户根据模型前半部分提供的信息及自己的经验认识来定义变量间的关系。这种变量间关系以带有模糊色彩的表函数形式来表现。详细的数学定义方法这里不再详述。通过对变量取值和关系表函数的集结,形成了系统的模拟模型。用户可以采用该模型进行局部情景分析和系统模拟,比如进行 If-then 分析和政策实验,探知系统在各种条件下的动态表现。

2.4 控制论指标体系

灵敏度模型提出了比较完整的控制论特征 (Cybernetic Characteristics) 体系,包含在模型的各个部分。控制论方法是研究系统在可变环境条件下定向演化途径的通用方法,是人们认识和调控系统的重要手段。Vester 将其引入到城市生态系统研究中,基于大量的观察和思考总结出较为完备的常见系统控制论特征表。在细心梳理了这些控制论特征之间的衍生关系后,他将其划分为4个等级,等级越高代表信息综合程度越高,最终形成了较为清晰的系统控制论特征(或指标)的等级体系(表1)。第1层次 (Level A) 包含16项指标,属于系统最基本、最直接的控制论特征。这些特征都可以直接从原始数据集、变量之间的直接影响关系、变量的动态曲线以及其他原始信息中得到。相比来说,第2层次 (Level B) 包含的16项指标较为综合,是对 Level A 控制论信息和少量其他信息的整合。同时这也标志着对系统的认识更进一步。类似地,第3层次 (Level C) 的指标体系又是在前面两个层次的基础上进行信息整合得到的。最终,这些控制论信息将被进一步整合,

变量	1	2	3	4	5	6	7	AS	P
1	●	0	0	3	1	0	3	7	63
2	1	●	1	1	1	3	3	10	90
3	1	1	●	3	1	1	1	8	72
4	2	3	1	●	1	2	1	10	140
5	2	2	3	3	●	2	2	14	112
6	3	3	3	3	3	●	3	18	144
7	0	0	1	1	1	0	●	3	39
	9	9	9	14	8	8	13	PS	
	0.8	1.1	0.9	0.7	1.7	2.2	0.2	$Q \times 100$	

图3 变量间影响矩阵及指标计算示例图

Fig.3 The impact matrix of the system variable set

形成 7 条更高级的控制论特征,组成第 4 层次(Level D)。应该注意到,这种层级划分与人类的认知过程非常契合:首先从最原始、零散的系统信息中获得第 1 层次控制论信息,依循层次之间的内在衍生关系,模型使用者将获得更为综合的控制论信息,逐步加深对系统的认识与理解,最终形成系统的全面认知。

表 1 灵敏度模型中的控制论特征层级体系

Table 1 The four-level hierarchy of cybernetic characteristics in the sensitivity model

编号 Code	控制论特征 Characteristic	编号 Code	控制论特征 Characteristic	编号 Code	控制论特征 Characteristic	编号 Code	控制论特征 Characteristic
A1	影响强度	B1	主动性之和	C1	关键元素	D1	对干扰的响应灵敏性
A2	主动影响	B2	被动性之和	C2	主动元素	D2	系统自我调节趋势
A3	被动影响	B3	正反馈	C3	被动元素	D3	最小多样性、稳定性和自组织
A4	正(反)交互关系	B4	负反馈	C4	惰性元素	D4	演化相关的生存质量
A5	系统输入	B5	外部依赖性	C5	组分的自我调节	D5	总依赖性
A6	系统输出	B6	内部依赖性	C6	反馈环中的关键元素	D6	总生产力
A7	结构量	B7	内部多样性	C7	消除负反馈	D7	总系统负担
A8	流量	B8	外部多样性	C8	引入自我调节		
A9	极限值	B9	指示因子	C9	引入自我发展		
A10	阈值	B10	控制因子	C10	增长逼近极限值		
A11	生长趋势	B11	干扰因子	C11	增长变量的自我调节		
A12	时滞	B12	缓冲作用	C12	复杂不可逆性		
A13	不可调节因子	B13	极限值更新现象	C13	控制环延迟		
A14	简单不可逆性	B14	流量与结构的关系	C14	决定结构的控制元素		
A15	交叉联系程度	B15	结构的分解程度	C15	内外依赖性的关系		
A16	生存质量 I	B16	生存质量 II	C16	生存质量 III		

灵敏度模型的任一部分都有这些控制论特征(或指标)的踪影,甚至可以认为是隐含在模型背后的逻辑主线。从最初的系统描述开始,第一层次的控制论特征就帮助使用者搜集系统信息,制定备选变量集和辨识变量间关系。变量筛选过程中使用的筛选矩阵,其实就是由最基本的变量控制论特征组成的。模型的变量间影响矩阵(图 3),就是控制论指标 A1、A2、A3(表 1)的矩阵形式;随后计算得到的变量主动性 AS 和被动性 PS 指标,对应着控制论指标 B1、B2、C2、C3;更进一步,衡量关键因子的 P 和惰性因子的 Q 两个指标,对应控制论特征 C1、C4;这种依次递推关系恰好体现了表 1 中控制论指标体系的内在衍生关系。模型的系统模拟和政策检验部分也是通过观察系统控制论指标的变化来确定政策效果的,包括系统依赖性、稳定性、自我调节作用以及系统负担等相对高层级指标。模型最后的生物控制论评价更是依据这些系统控制论指标进行的。总之,系统控制论和生物控制论思想是灵敏度模型的灵魂,而控制论特征(或指标)体系是这些思想在灵敏度模型中的具体表现。

2.5 模型应用

从模型开发生命周期来看,灵敏度模型是在与实际应用需求间持续互动中逐步完善起来的。在最初,灵敏度模型就被定位为一种能够有效帮助使用者,而且这些使用者并不需要具备太多系统理论方面的专业知识,灵敏度模型会正确地引导他们完成对系统复杂性的理解任务^[10]。另外,该模型不是面对某一类具体问题或系统,而是致力于提供一套普适性的复杂系统分析方法。也就是说,通俗性和普适性是保障模型本身实用价值的基本要求。从后来实际应用情况来看,灵敏度模型达到了这些预期,已经在德语国家取得了广泛应用。经济管理、环境保护、能源和交通规划、人群健康、可持续发展、核能开发以及反恐事务等众多领域^[6, 11]。可以说,凡是涉及系统复杂性的现实问题,灵敏度模型都有应用潜力。其中影响最大的是在法兰克福城市综合规划中的应用,灵敏度模型为规划团队提供了极为丰富的系统信息。

20 世纪 80 年开始,中国城市生态系统研究开始兴起,并开展了一系列的国际合作项目^[12]。其中中

德合作的天津生态城调控对策研究中,中国科学院生态环境研究中心王如松等研究人员开始尝试将灵敏度模型引入中国城市生态的研究工作中^[5]。在尝试将灵敏度模型应用到天津城市生态研究过程中,王如松先生创造性地融入复合生态学思想,提出更加实际可用的泛目标生态规划方法。这一方法有效汲取了灵敏度模型的思想精华,随后在大丰、扬州等中国生态城市建设规划中发挥了重要的作用。另外,其他研究人员也尝试用灵敏度模型分析系统问题,并对模型做了必要改进^[13]。

3 灵敏度模型的贡献

灵敏度模型为城市生态系统研究提供了一整套处理复杂性问题的方法框架。灵敏度模型在最初就是为法兰克福城市系统规划而开发的,因此该模型与城市系统有着与生俱来的契合性。城市生态系统研究中的许多具体问题都可以直接采用灵敏度模型进行分析。随着计算机辅助平台的出现,这种应用也更加方便和廉价。除了直接应用外,模型中对复杂性问题的分析思路也极具借鉴价值。在学术界都致力于追求信息完备化和模拟精确化时,灵敏度模型则开辟了看似完全相反的思路。通过对重要变量的筛选和变量关系的模糊定量等方法,极大地削减了细节信息的需求量和对精确方法的依赖性。这为目前深受复杂性困扰的城市生态科学提供了一条可行之路。毫无疑问,进一步推广该模型在城市生态研究中的应用,有效汲取其精华思想,将对城市生态学科有重要促进作用。

最重要的是,灵敏度模型提供了一套新颖的系统调控思路^[10]。生物控制论始终作为贯穿整个模型的隐含线索。从数据收集、变量筛选到系统的控制论解释,再到系统整体评估,生物控制论都是作为最高的指标准则来检验每一步的有效性。这样做的目的在于理解现状系统与理想系统之间的差距,探寻向理想状态演进的有效途径。这种理想系统是符合八条生物控制论准则的,作为完美的参照系统而隐含在模型之中。且不论这种一味强调向自然学习(Learning from Nature)观点的合理性,这种明确地目标导向性的调控思路是很有价值的,特别是对现阶段城市生态系统模型的研究。目前,大多数城市生态研究者并不清楚城市生态系统合理的演进方

向,更不用说凝练对应的控制论法则,因此类似的理想性质的参照系统也是不清楚的。在逻辑上,方向和目标不明确又何谈合理的管理调控。这大概也是制约城市生态研究的主要限制因素之一。辨识清楚城市生态系统合理的演进方向,并凝练出指导管理调控工作的生态控制论准则,是城市生态学科的当务之急。幸运的是,城市生态系统建模研究可以从灵敏度模型获得很多宝贵的灵感。

另外,灵敏度模型还提供了一系列简单易用的系统分析小工具。模型本身是由多个标准化子方法按照一定流程搭建起来的,每一步都用具体的分析工具实现特定功能。比如,变量筛选阶段是借助筛选标准矩阵来完成的,因子辨识分析阶段是通过因子交互影响矩阵实现的,还有模型中定性信息转化为模糊定量函数的方法等。这些子方法或工具都可以单独使用,并且具有简洁、易用、高效的优点。也就是说,这一系列的分析方法和工具本身就丰富了现有的系统分析方法。

4 灵敏度模型的局限

客观来讲,目前灵敏度模型本身还基本停留在侧重范式阐述的概念模型阶段。尽管模型本身包含了一些实用性的分析工具,但是每一步流程都缺少清晰化、准确化的阐述。比如,模型的系统描述和变量筛选只是给出了一些普适性的指导条例,其余细节都需要模型使用者去自由发挥,使得模型充满了模糊性和主观性。不同的使用者可能对系统的描述不尽相同,筛选出的系统变量集甚至相差很远,直接影响着后续系统解释与评价的结果。也就是说,模型的效果大大依赖于使用者本身的经验和思考能力,模型本身只是用来辅助思考的工具。但反过来,这种信息模糊化、人机交互式的学习思路也正是Vester思想的闪光点之一,就像一个硬币的两面。针对这种依赖性,可以组织专家对常见的复杂性问题制定更具体化的模型内容,削减模型的主观性和随意性,提升模型使用效果。

生物控制论思想带有一定程度的自然主义倾向。Vester本人坚持认为系统的终极目标是维持生存,调控的目的是激活系统的生命力。这点对于生物圈及其生物子系统来说是无可厚非的,生物界确实秉持适者生存的法则。但是,客观存在的系统千

差万别,形态各异,实际目标也是不尽相同的。如此单一化的将生存作为第一目标有时候显得过于偏执。他提出的生物控制论 8 条准则也是为该目标服务的。这些准则是在基于对生物圈系统大量观察的基础上总结出来的,但是生态学中经验归纳法的结论并不适合作为普适教条来使用。要说其适用于所有系统的管理调控未免牵强,即便是生物圈内的子系统。总之,生物控制论思想带有浓厚的仿生学色彩,应该有其特定的适用范围。对于与生物系统相差的目标系统,应该发展适宜于自身的控制论准则。比如城市生态系统,应该发展自身适用的生态控制论方法,以此来突破生物控制论的局限性。当然,新的控制论方法的提出,都必须在大量的经验观察的基础上进行凝练,并进行一定的实证验证研究。

最后必须指出,灵敏度模型提出 30a 来并没有在世界范围内获得广泛应用,虽然模型本身拥有很强的学术价值和实际应用潜力。这与 Vester 的写作习惯有很大关系,他的大部分著作都是德文语言,当然包括灵敏度模型在内。这对模型的传播设置了一道语言障碍。而且他本人似乎也不热衷与英语学术圈进行交流,并不关注同时代其他学者系统方法的研究进展。在 20 世纪 80 年代开始,涌现了一批杰出的系统论研究者,新颖的理论层出不穷。Vester 并没有借鉴这些进展,也使得灵敏度模型带有一定程度的理论缺陷。比如,模型中并没有关注人类社会系统的独特性(价值观、伦理等因素),而片面强调生物控制论的主导作用。模型的数学基础也是不完善的,尤其在系统控制论解释和综合评价部分,并没有给出清晰的算法。这些都阻碍着模型的实际传播和应用。不过,伴随着英语翻译版本的出现和模型的进一步完善,灵敏度模型很有希望成为处理复杂性问题的首选工具之一。

5 展望

系统性与复杂性是城市生态系统研究绕不开的障碍。城市生态系统模型的核心任务就是刻画这些复杂性,从整体上揭示城市系统的内在规律。毫无疑问,这是一项艰巨的任务。而灵敏度模型就是一次成功的尝试。对于城市生态建模来说,灵敏度模型相当于提供了一个基础蓝本。针对具体建模目标,研究者可以在灵敏度模型的基础上进行修改,就

可以衍生很多具体模型。另外,还可以组织有经验的专家采用灵敏度模型对城市生态常见问题都进行建模分析,并且将这些分析过程记录下来,形成完善的模型库和案例库。若有可能将这些案例库整合进计算机辅助平台,以后的使用者就可以参考这些案例进行系统分析工作,将大大提高研究效率和结果的可信性。

与此同时,必须认识到灵敏度模型及其改进模型只是一类模型,面向解决城市生态研究的某一类问题,并不是万能的。但以灵敏度为代表的这类模型代表了一种建模趋势,其主要特点在于强调充分利用有限的系统信息,发掘系统的关键因子,从而帮助使用者辨识目标系统,完成对系统的整体理解。由于模型并不注重采用精确的定量数据,得到的只是系统结构和趋势等定性或半定量信息,并不很好支持对量化要求较高的管理决策。相比较而言,这时候强调信息完备性和定量精确化的系统模拟仿真模型就凸显出优势了。必须承认,虽然可能导致建模成本高和细节信息繁多的缺点,但在强调精确管理的情况下,其比灵敏度模型更有优势。归纳起来,这其实代表了城市生态系统模型的两种发展方向:一类是强调通过削减信息需求量、注重发掘定性和模糊数据,来达到辨识系统主要结构、重要因子、发展趋势等轮廓信息,目的在于帮助决策者理解问题的复杂性,可以称为辅助学习模型;另一类是采用精确的系统模拟仿真方法,整合大量的定量信息,来模拟系统复杂性,属于系统仿真模型。这两类模型各有其优点和局限性,需要根据建模目标进行选择或整合。理想情况是,可以先借助灵敏度模型帮助建模者更好地理解系统,如有必要再建立更精确的模拟模型,将大大提高建模工作的质量。不管怎样,模型都要最终对人们认识城市系统有帮助,最终服务于城市管理实践。

References:

- [1] Wang R S. Efficiency, Harmony—Urban Ecological Regulation Principles and Methods. Changsha: Hunan Education Press, 1987.
- [2] Lü Y L, Yang B J, Wang R S. An interactive simulation model of urban ecosystem and its implementation. Journal of Environmental Science, 1992, 4(1): 15-22.
- [3] Vester F, Hesler A V. Sensitivity Model. Germany: Regionale

- Planungsgemeinschaft Untermain, 1980.
- [4] Ma S J, Wang R S. The social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1-9.
- [5] Hu D, Wang R S. An eco-cybernetic analysis of urban-rural ecotone—Tianjin case study. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 6(1): 50-57.
- [6] Vester F. *The Art of Interconnected Thinking: Tools and Concepts for A New Approach to Tackling Complexity*. Germany: MBC Verlag GmbH, 2007.
- [7] Meadows H D, Meadows L D, Randers J, Behrens W W III. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972.
- [8] Meadows H D. *Thinking in Systems—A Primer*. London: Earthscan, 2009.
- [9] Vester F. The biocybernetic approach as a basis for planning our environment. *System Practice*, 1988, 1(4): 399-413.
- [10] Ulrich W. Can nature teach us good research practice? A critical look at Frederic Vester's bio-cybernetic systems approach. *Journal of Research Practice*, 2005, 1(1): article R2.
- [11] Zacccheaus O O. *Empirical Study of Sensitivity Model in China's Sustainable Development Related to Global Climate Change [D]*. Tianjin: Tianjin University, 2009.

- [12] Ouyang Z Y, Bao J L, Li W Q, Tang C P. Water system analysis and behaviour simulation in Tianjin urban ecosystem. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1991, 4(3): 25-31.
- [13] Lü Y L, Wang R S. A simulation method of urban ecosystems: sensitivity model and its improvement. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 309-313.

参考文献:

- [1] 王如松. 高效, 和谐——城市生态调控原则与方法. 长沙: 湖南教育出版社, 1987.
- [4] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [5] 胡聃, 王如松. 城乡交错带的生态控制论分析——天津实例研究. *生态学报*, 1996, 6(1): 50-57.
- [11] 石义. 基于全球气候变化的灵敏度模型对中国可持续发展的研究. 天津: 天津大学, 2009.
- [12] 欧阳志云, 包景岭, 李万庆, 汤纯鹏. 天津城市水系统分析及行为模拟. *城市环境与城市生态*, 1991, 4(3): 25-31.
- [13] 吕永龙, 王如松. 城市生态系统的模拟方法: 灵敏度模型及其改进. *生态学报*, 1996, 16(3): 309-313.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.1 Jan., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Foreword: Complexity and Sustainability	(I)
Frontiers and Comprehensive Review	
Urban eco-complex and eco-space management	WANG Rusong, LI Feng, HAN Baolong, et al (1)
Review of carbon sequestration assessment method in the marine ecosystem	SHI Honghua, WANG Xiaoli, ZHENG Wei, et al (12)
A review of sensitivity model for urban ecosystems	YAO Liang, WANG Rusong, YIN Ke, et al (23)
Urban ecological metabolism of municipal solid waste: a review	ZHOU Chuanbin, XU Wanying, CAO Aixin (33)
Autecology & Fundamentals	
Parameter sensitivity analysis of a coupled biological-physical model in Jiaozhou Bay	SHI Honghua, SHEN Chengcheng, LI Fen, et al (41)
Macroinvertebrate investigation and their relation to environmental factors in Bohai Bay	ZHOU Ran, QIN Xuebo, PENG Shitao, et al (50)
Review of the impacts of bioturbation on the environmental behavior of contaminant in sediment	QIN Xuebo, SUN Hongwen, PENG Shitao, et al (59)
Population, Community and Ecosystem	
Ecosystem services' spatial characteristics and their relationships with residents' well-being in Miyun Reservoir watershed	WANG Dashang, LI Yifeng, ZHENG Hua, et al (70)
Contingent valuation of preserving ecosystem of Changdao Island Nature Reserve	ZHENG Wei, SHEN Chengcheng, QIAO Mingyang, et al (82)
Discussion of carbon sequestration estimates in the island terrestrial ecosystems	WANG Xiaoli, WANG Ai, SHI Honghua, et al (88)
Landscape, Regional and Global Ecology	
An integrated indicator on regional ecological civilization construction	LIU Moucheng, SU Ning, LUN Fei, et al (97)
The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay	YANG Jianqiang, ZHU Yonggui, SONG Wenpeng, et al (105)
Analysis of the evolution and value of coastal ecosystem services at Gudong Coast in the Yellow River Delta since 1985	LIU Dahai, CHEN Xiaoying, XU Wei, et al (115)
Research of index system framework in marine ecology monitoring & regulation areas division based on complex ecosystem of nature-human-society	XU Huimin, DING Dewen, SHI Honghua, et al (122)
The environmental function assessment and zoning scheme in China	WANG Jinnan, XU Kaipeng, CHI Yanyan, et al (129)
Resource and Industrial Ecology	
Definition and evaluation indicators of ecological industrial park's complex eco-efficiency	LIU Jingru, LÜ Bin, ZHANG Na, et al (136)
Spatial-temporal distribution of agricultural eco-efficiency in China	CHENG Cuiyun, REN Jingming, WANG Rusong (142)
The coupling mechanism and industrialization mode of ecological restoration in the weak semi arid mining area of Inner Mongolia	CHEN Yubi, HUANG Jinlou, XU Huaqing, et al (149)
Evaluation of ecological marine islands construction based on material flow analysis: a case study of Changhai County	CHEN Dongjing, ZHENG Wei, GUO Huili, et al (154)
Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation	CHEN Weiping, LÜ Sidan, ZHANG Weiling, et al (163)

Estimation of agricultural non-point source pollution based on watershed unit: a case study of Laizhou Bay	
.....	MA Deming, SHI Honghua, FENG Aiping (173)
The evaluation method in the impact of intensive sea use on the marine ecological environment	
.....	LUO Xianxiang, ZHU Yonggui, ZHANG Longjun, et al (182)
Urban, Rural and Social Ecology	
Urban ecological infrastructure based on ecosystem services;status,problems and perspectives	
.....	LI Feng, WANG Rusong, ZHAO Dan (190)
Spatial features of road network in Beijing built up area and its relations with LST and NDVI	
.....	GUO Zhen,HU Dan,LI Yuanzheng,et al (201)
The conjugate ecological management model for urban land administration based on the land complex ecological function	
.....	YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (210)
Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing	
.....	XIAO Qiang, XIAO Yang,OUYANG Zhiyun, et al (216)
Ecological risk evaluation of port in Bohai Bay	PENG Shitao, QIN Xuebo, ZHOU Ran, et al (224)
Research review of the tail disposal technology of the standard sewage offshore outfall	PENG Shitao,WANG Xinhai (231)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 1 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 1 (January, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元