

区域城市化与生态环境耦合发展模拟 及调控策略——以江苏省为例

刘耀彬¹, 陈 斐¹, 李仁东²

(1. 南昌大学中国中部经济发展研究中心, 南昌 330047; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077)

摘要: 根据城市化与生态环境耦合含义及框架, 利用SD的原理和方法, 以江苏省为例, 建立了区域城市化与生态环境耦合的SD模型, 并选取五种典型发展模式进行策略情景模拟。分析表明: 区域城市化与生态环境交互耦合具有复杂性、非线性及时变性的特点, SD模型分析此类问题具有明显的适用性。模型的历史数据拟合的误差小, 反映它具有一定可靠性, 能在一定程度上解释区域城市化与生态环境交互耦合的复杂行为, 评估城市化对生态环境的潜在效应; 在不同调控策略的发展模式下, 该省城市化与生态环境耦合的情景存在较大差异, 五种模式都有其显著的比较优势, 同时也存在明显的发展缺陷; 根据该省的发展特点和区域发展差异并结合城市化发展一般规律, 分阶段和分地域推进人口城市化发展模式和社会城市化发展模式, 可以实现该省人口、经济、城市化和生态环境协调发展的目的。

关键词: 城市化; 生态环境; SD; 模拟; 江苏

文章编号: 1000-0585(2007)01-0187-10

1 引言

城市化与生态环境一直是学术界关注的课题之一^[1]。早在19世纪末期, 英国学者Howard著述《田园城市》, 试图用理性的规划方法来协调工业化、城市化与城市生态环境之间的发展问题。然而真正以专题形式来研究区域城市化与生态环境关系的是从20世纪中期开始的。20世纪初继芝加哥学派的人类生态学方法在城市健康、土地及社会分层研究中取得明显成效以来, 区域城市化与人类聚居问题一度被列入联合国的MAB计划的子项目当中, 其研究引起了世界性的广泛关注^[2]。围绕此课题, 相关研究进行得相当深入, 已经涉及到二者之间的定量测评问题, 如利用IPAT模型和计量经济学方法, 以B Commoner^[3]和G. Grossman等^[4]为首的环境经济派对部分发达国家的城市发展(如城市经济)与城市环境演变的关系进行了检验, 并提出倒“U”型曲线的假设^[5]; 又如利用系统动力学、灵敏度模型和能量流动模型, 以J. W. Forrester^[6], F. Vester等^[7]和H. T. Odum等^[8]为首的系统动力学派和生态派对世界部分国家的城市和地区进行了分析, 揭示了城市发展与其环境演变的交互作用机理; 还有L. Braat等^[9]和H. Sukopp等^[10]利用系统优化和数理建模的思想来处理此方面问题, 他们的研究也相当成功。在国内, 类似的研究也不少见, 如凌亢等^[11]、吴玉萍等^[12]和刘耀彬等^[13]利用计量经济模型分

收稿日期: 2005-10-14; 修订日期: 2006-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40401021); 中国博士后基金项目(20060400249)

作者简介: 刘耀彬(1970-), 男, 湖北麻城人, 博士, 副教授。主要从事城市与区域经济方面的研究工作。

E-mail: liuyaobin2003@163.com Tel: 0791-3163385

别对南京、北京和武汉的城市经济与环境质量特征进行了研究;借助系统动力学与灵敏度模型,邢嘉明等、王如松等、吴峙山等、杨邦杰等、宋永昌等分别对天津、北京和长兴岛等城市的发展与环境演变进行了模拟^[2];采用数理建模和协同学的方法,黄金川等^[14]、刘耀彬等^[15]分别对三峡库区和整个中国城市化与生态环境耦合度大小进行了测算……。然而城市化一般是对国家或区域而言,很少针对单个城市^[16]。总结上面的研究大多是针对单个城市或国家宏观区域中城市发展的一个侧面,而针对某一中观区域并采用系统分析的方法来专门分析它的城市化与生态环境耦合机理的文献基本缺乏。由此,本文主要以系统动力学模型为支撑,以江苏省为实例来分析它的城市化与生态环境耦合机制,并予以动态的情景模拟,其目的是为该省城市化未来发展和生态环境建设提供政策建议。

2 区域城市化与生态环境交互耦合的含义和 SD 模型的适用性

2.1 区域城市化与生态环境交互耦合的含义

城市化是指人口向城市地区集中和农村地区转变为城市地区的过程^[2]。从定义上看城市化至少包括两个方面:一是人口迁移,这必然导致社会结构的变迁、经济要素的流动和产业的推移;二是景观的改变,这则引起土地利用形态的改变、资源的利用多样化。所以城市化具有多维含义,它主要包括人口迁移、经济发展、空间扩张和生活提高之间互相联系的4个方面。其中,经济发展是基础,人口迁移和地域扩张是表现,生活水平提高是最终结果或目标^[17]。生态环境是我国目前使用频率最高且较有争议的术语之一。基于不同的研究主体,生态环境内涵相差甚远:如果以生物为主体,生态环境则指对生物生长、发育、生殖、行为和分布有影响的生境。如著名生态学家 Whittaker 基于生物物种单元,认为一个物种最基本的进化环境就是它的生态环境(ecotope)^[18];如果以人类为主体,生态环境则是指对人类生存和发展有影响的自然因子的综合,主要包括除人之外的其他环境要素的综合,如水、土、气、资源与能源以及其他生物等。因为大多数生态环境问题都是由人类活动引起的或者与人有关,所以目前环境问题研究中更倾向于后一定义。

以人类活动为中心的城市化过程就是人们对自然资源和环境条件利用与改造的过程,在一定技术水平制约下,人们对其生产规模和生活质量过高的追求往往导致人地关系的不协调,我们通常称之为生态环境问题。城市化与生态环境之间的耦合就是城市化的4个方面与生态环境的5个要素之间所具有的各种非线性关系的总和,其耦合作用主要表现在两个方面:一是城市化通过人口增长、经济发展、能源消耗和交通扩张对生态环境产生胁迫,这种驱动下生态环境往往是质量的下降;二是生态环境又通过人口驱逐、资本排斥、资金争夺和政策干预对城市发展产生约束,该反馈制约了城市化进程,其表现往往是环境质量的维持或改善。通过构建区域城市化与生态环境系统交互耦合的PSR模式^[19],可见该模式内诸要素相互作用、相互反馈的过程就是二者交互耦合的过程,其最高形态是城市化与生态环境相互协调、相互融合共同构成一个高效的复合生态系统。

2.2 SD 模型的适用性

系统动力学模型是建立在控制论、系统论和信息论基础上的,以反映反馈系统结构、功能和动态行为特征的一类动力学模型,其突出特点是擅长处理非线性、复杂性、长期性和时变性等系统耦合问题。它通过对系统结构的分析和计算机仿真来反映复杂系统结构、功能和动态行为之间的相互作用关系,从而考察该系统在不同条件下的变化行为和趋势,以达到提供决策的目的^[20]。从PSR框架看,区域城市化与生态环境通过耦合形成了一个

典型的巨复杂系统^[21], 这个耦合系统明显存在着大量的非线性和复杂性: 首先, 城市化本身就是一个社会经济的转换与演进过程, 它不仅体现在人口和非农业活动在规模不同的城市地域集中过程、非城市景观转化为城市景观的地域推进过程, 还表现在城市文化、城市生活方式与价值观向农村地域的扩散过程, 更重要的是城市化的 4 个方面与它的社会化过程是相互影响、共同推进的, 如周一星就提出了国家城市化水平随经济增长的对数发展关系^[16], 白南生在研究中国城市化问题时从相反的角度指出“十五”期间中国城市化率对经济发展的贡献可达 3 个百分点^[22]; 其次, 生态环境也是一个复杂系统, 它不仅包括水、土、气、资源与能源等自然要素, 而且包含有生物以及作用的环境关系, 更重要的是这些因素之间也是相互作用、相互限制的, 生态学家们称之为生态系统的综合原理和最小因子定律, 如王孟本在研究“生态环境”概念的起源与内涵时指出, 生态环境最本质的特性在于它的相互联系、相互依赖和相互作用的整体性^[23]; 最后, 城市化与生态环境交互耦合的复杂性。城市化系统是以“人”为主的系统, 生态环境是以“地”为核心的系统, 它们之间耦合不仅在于系统之间的动力源一汇过程, 还在于要素之间的网络化与复杂化的过程, 所以已故的马世骏先生将城市区域系统称为社会—经济—自然复合系统^[24]。可见, 根据系统动力学方法的突出特性和城市化—生态环境耦合系统的复杂性, 基于 SD 方法来研究区域城市化与生态环境耦合发展问题, 并进行未来情景模拟, 其适用性是明显的。

3 江苏省城市化与生态环境耦合的 SD 模型与策略分析

江苏省是我国东部地区社会经济最发达的省份之一, 2003 年该省人均 GDP 和城市化水平已经达到了 9642 元和 44.8%, 都属于全国领先水平。研究该省城市化与生态环境耦合关系并进行模拟分析, 其意义不仅在于能够为该省的城市化发展与环境建设的可持续发展提供政策建议, 而且还可以为其他类似地区和“后进”地区提供启发与借鉴, 由此我们在 PSR 框架指导下全面调查和搜集江苏省 1990~2003 年的有关资料, 确立该省为例建立 SD 模型。

3.1 江苏省城市化与生态环境耦合的 SD 模型建立

3.1.1 指标体系设计及系统结构分析 确定指标体系, 建立变量集要围绕着系统建模的目的进行, 并且能够表征系统的主要待征。根据区域城市化与生态环境耦合含义及交互耦合的框架, 我们初步确立了 27×24 指标矩阵集来反映江苏省城市化与生态环境耦合的实际, 在相关分析和因子分析完成指标体系主成分性和独立性分析的基础上, 进一步通过灰色关联方法遴选主要特征指标来概括耦合系统作用的最主要作用关系^[19]。灰色关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近, 以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法, 特别适用于多个子系统的优势要素分析。通过灰色关联度和灰色关联矩阵的计算, 在截集 $\Omega = \{y_i \geq 0.65 | i = 1, 2, \dots, 13\}$ (y_i 为关联度) 的水平上选取耦合系统的 16 项指标: 工业占工农业产值比重 (0.741)、非农产业从业人员比重 (0.6985)、第三产业增加值占 GDP 比重 (0.6960)、城镇人均居住面积 (0.6861)、万人拥有医生数 (0.6811)、建成区面积占国土面积比重 (0.6614)、人均 GDP (0.661)、城镇人口比重 (0.6515)、废水排放达标率 (0.7520)、建成区绿地覆盖率 (0.7340)、人均废气排放总量 (0.7171)、固体废物综合利用率 (0.7163)、万元工业产值废水排放量 (0.6991)、森林覆盖率 (0.6924)、人均公共绿地面积 (0.6888)、万元工业产值废气排放量 (0.6605), 它们不仅涉及到城市化的人口、经济、空间和社会的 4 个方面, 而且还反映“三废”排放及治

理、森林和绿化的情况,由此将其作为后文 SD 模型设计的基础。

系统动力学认为系统行为源于系统结构,外部环境对系统行为模式的影响是通过内部结构起作用^[20],因此合理确定系统边界及分析它的结构是系统建模型的关键。根据建模目的并结合变量集分析的结果,可以将耦合系统组合成人口、经济、生态环境和城市化等 4 个大的子系统;为突出流程图的简明性,又进一步将这 4 个子系统细分为:总人口、第一产业产出、第二产业产出、第三产业产出、废气储量、废水储量、固体废物储量、耕地面积、林地面积、人口城市化水平、城镇住房面积、城镇建成区面积、科技水平、教育水平、医疗水平等 15 个模块(图 1):

(1) 人口子系统。把总人口(ZRK)作为水平变量,其存量主要由出生率(CSR)和死亡率(SWR)所决定。由于人口政策对人口增减影响较大,所以充分考虑计划生育政策、污染、粮食、拥挤对人口变动的影响,通过反馈将人口和社会经济、技术和生态环境以及城市化系统建立了联系。作为一个重要状态变量进入整个耦合系统中,总人口深刻地影响着全省的社会经济发展、城市化进程和生态环境质量,同时又受到这三者的制约。在模型中我们还考虑了人口的资源属性和结构特性:通过社会劳动力与三大产业部门连接,使其资源属性参与到经济产出当中;通过农业和非农人口的差别,使城市化系统凸现出来,从而影响到整个大系统。

(2) 经济子系统。主要通过三次产业产出、工业、国内生产总值和社会性生产投资来反映。分别选取第一产业产出(DYCC)、第二产业产出(DECC)和第三产业产出(DSCC)作为水平变量,重点将社会固定资产投资和劳动力作为辅助变量与其他各子模块接口,借助 Cobb-Douglass(CD)生产函数,把资金作为内部循环作用因素,将劳动力作为外部投入要素,用黑箱化方法来表示投入与产出的转换机制。同时考虑到社会技术和环境污染对生产的正负影响,通过模块连接作用于 CD 函数。在三次产业中,第二产业作为最主要的物质生产部门,在这里通过与工业生产总值(GYCZ)相连接,进而影响到环境子系统。经济总量系统由国内生产总值(GDP)与社会性生产投资(SHSCTZ)表现,把其作为辅助变量与控制因子,表现投资与产业结构转变及环境治理等动态制约关系。如果把国内生产总值与总人口相联系,其人口平均化后的结果人均国内生产总值(RJGDP)进一步可以影响到城市化系统。

(3) 生态环境子系统。把耕地面积(GDMJ)、林地面积(LDMJ)、废水储量(FSCL)、废气储量(FQCL)和固体废物储量(GFCL)作为该子系统的水平变量。通过与城镇建成区面积(CZJCMJ)相连接,耕地面积减少率(GDJL)制约了耕地面积的存量,影响到粮食产量(LSCL),进而反映到总人口的变化上;林地面积通过与农业投资相连接,森林覆盖率是该模块的一个重要变量,它直接影响到粮食生产的稳定性,进而影响到人口和其他子系统;“三废”储量通过与工业与生活的废水、废气、固体废物排放,治理以及环保投资(HBTZ)等辅助变量接口,影响到其他三个子系统。

(4) 城市化子系统。城市化过程是经济、人口、空间和社会转化的过程,经济城市化通过人均 GDP 连接而被合并。人口城市化借用城市化率(CSHL)作为水平变量来表示,通过城市化率增量(CSHLZ)与经济子系统发生联系,通过与人口子模块连接进而作用于生态环境子系统。作为城市化的核心指标,在考察人口城市化率变化时,充分考虑到城市化其他模块和污染储量对它影响,通过连接将城市化作为一个整体来考虑。空间城市化以城镇建成区面积作为水平变量来表示,将城镇人口(CZRK)与非农产业产值(FNCC)

作为系统输入，在考虑到科技贡献的前提下，借用 CD 函数把城镇建成区面积作为黑箱产出，从而将人口、经济子系统相联系。社会城市化以科技水平(KJSP)、教育水平(JYSP)和医疗水平(YLSP)来表示，它们通过系统反馈作用于该子系统和经济、生态环境子系统，文中对此给予了更多的关注。

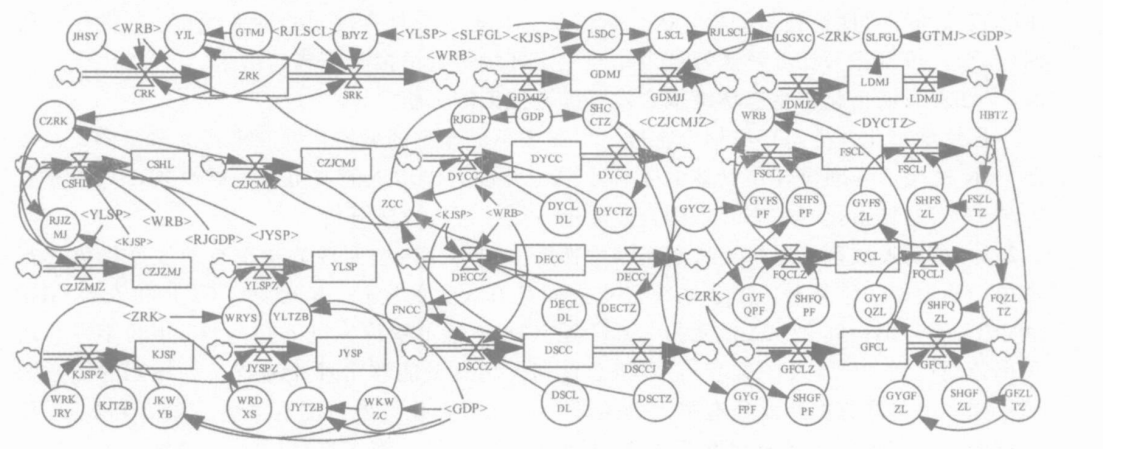


图 1 江苏省城市化与生态环境耦合的系统动力学流程图
Fig 1 The system dynamics flow chart of the urbanization and
eco-environment coupling system between in Jiangsu province

3.1.2 系统参数确定 借鉴相关研究文献^[25,26]，本文采用以下方法确定系统参数：利用系统历史统计资料作算术平均。这类参数主要有：额定出生率(0.00908)、额定死亡率(0.00679)、公共绿地面积占建成区绿化面积比例(0.375)、环保投资系数(0.1)、林地投资转换率系数(0.9072)、第一产业投资系数(0.032)、第二产业投资系数(0.479)、第三产业投资系数(0.489)和非农土地转换系数(0.2149)；采用发展趋势法进行推算。这类参数有：计划生育影响因子(0.79)、第一产业额定增长率系数(0.03266)、第二产业额定增长率系数(0.14786)、第三产业额定增长率系数(0.13108)、人口城市化额定增长率系数(0.04087)、城镇建成区额定增长率系数(0.15233)、城镇住房面积额定增长率系数(0.06085)、科技水平额定增长率系数(0.023)、教育水平额定增长率系数(0.37406)、医疗水平额定增长率系数(0.01)等；采用表函数确定参数。这类参数主要有：污染对出生和死亡的影响、医疗水平对出生和死亡的影响、人均粮食对出生与死亡的影响、拥挤对出生与死亡的影响、科技水平对城市化增长的影响、教育水平对城市化增长的影响、住房对城市化增长的影响、人均绿地对城市化增长的影响、污染对城市化增长的影响、污染对粮食单产的影响、污染对第一产业产出的影响、污染对第二产业产出的影响、污染对第三产业产出的影响等；回归法确定参数。在 SPSS 软件支持下，采用一元回归模型确定社会劳动力、第一产业劳动力、第二产业劳动力、社会生产性投资系数、文卫科财政支出系数、建成区绿地面积占地系数、林地面积比例系数等；采用一元非线性回归确定大学生数、医生数、科技人员数等；采用 CD 函数求算参数。利用 CD 生产函数求算第一、第二、第三产业产出的资金和劳动力弹性系数，建成区面积的资金和劳动力弹性系数；采用 GM(1,1) 模型修正参数。如用此模型分别校正万元工业废水、废气、固体废物排放和“三废”治理率，进而反推系统参数值。

3 1 3 模型检验 首先, 借助 Vensim PLE 软件完成 Reality check 检验; 其次, 选取 1990~ 2003 年共 14 年的数据进行历史性检验。从主要数据的拟合情况看, 相对误差在 - 5 2%~ 9 8% 之间, 可见所建模型具有较好的行为复制能力, 基本上能真实反映江苏省城市化与生态环境交互耦合的实际; 最后对模型进行灵敏度和极端值分析。模型依次通过了真实性和有效性检验与分析, 因此我们认为它是一个具有较低的灵敏度和强壮性较好的 SD 模型, 可以作为江苏省区域城市化与生态环境情景模拟与预测的依据。

3 2 江苏省城市化与生态环境耦合发展的调控策略分析

根据城市化与生态环境耦合特性, 以参数不作调整的城市化发展模式为参照模式, 按照 PSR 框架, 分别设计了其他的 4 种不同主驱动力作用下的城市化发展模式, 对江苏省未来 15 年的城市化与生态环境耦合发展进行调控策略比较分析。

3 2 1 参照发展型 () 假定模型中初始参数不变, 按照江苏省现有的发展趋势进行模拟。从模拟的结果看, 耦合系统各个方面都有较大的增长(表 1): GDP 和人均 GDP 到 2015 年分别达到 21801 亿元和 28637 元 (1990 年不变价, 下同), 15 年间年平均增长率分别达到 10. 7% 和 10 4%, 经济总量和人均总量能够实现江苏省长远规划的低方案的目标, 但与高方案相比还有很大的距离^[27]; 城市化发展速度也很快。2010 和 2015 年该省的人口城市化水平分别可以达到 61. 8% 和 66 7%, 都提前完成了该省长远规划的目标值要求。与此同时, 伴随着城市人口的较快增长, 在模拟仿真的 15 年间, 城镇建成区面积也表现出快速扩展趋势, 年平均扩展速度达到了 8. 48%, 2015 年它已经占到整个国土面积的 4 57%。与人口和经济发展联系密切的社会城市化水平也表现出稳步的增长态势, 如社会科技水平和医疗水平分别以 1. 67 和 1. 27 个百分点的速度递增。生态环境压力不断显现。在污染排放方面, 废水、废气和固体废物储量到 2015 年分别达到 $142. 5 \times 10^8$ t、

表 1 江苏省 5 种耦合发展模式模拟的结果
Tab 1 Simulated results of the five coupling models in Jiangsu province

变量	2000 年				2005 年				2010 年				2015 年			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
总人口(万人)	7327	7453	7453	7453	7451	7458	7547	7540	7547	7538	7564	7613	7597	7621	7594	7648
GDP(亿元)	4783	9073	10331	9412	9072	8678	15339	18853	16268	15321	14338	21801	27094	23224	21726	20491
人均 GDP(元)	6561	12174	13864	12629	12176	11635	20323	25005	21551	20323	18956	28637	35665	30472	28608	26792
城市化率(%)	41. 52	51. 21	51. 67	53. 18	51. 50	51. 08	61. 80	62. 48	63. 89	62. 04	61. 62	66. 68	67. 07	68. 32	66. 84	66. 62
城镇人均住房(m ²)	12. 15	12. 98	12. 87	12. 57	12. 91	13. 00	14. 20	14. 11	13. 95	14. 18	14. 20	16. 95	16. 97	16. 85	16. 98	16. 88
城镇人均绿地(m ²)	8. 1	10. 15	10. 25	9. 80	10. 87	10. 09	13. 18	13. 40	12. 08	14. 32	13. 01	14. 06	14. 36	12. 65	15. 32	13. 79
建成区绿化率(%)	33. 24	37. 70	37. 81	37. 71	38. 12	37. 66	40. 01	40. 12	39. 78	40. 36	39. 95	40. 60	40. 69	40. 29	40. 91	40. 54
建成区面积(km ²)	1383	2740	2784	2745	2917	2723	4098	4194	3906	4425	4046	4688	4794	4359	5070	4622
建成面积比(%)	1. 35	2. 67	2. 71	2. 68	2. 84	2. 65	3. 99	4. 09	3. 81	4. 31	3. 94	4. 57	4. 67	4. 25	4. 94	4. 50
科技水平	2. 70	2. 76	2. 76	2. 76	2. 76	2. 78	2. 85	2. 86	2. 86	2. 85	2. 89	2. 95	2. 94	2. 95	2. 95	3. 00
医疗水平	1. 2	1. 26	1. 26	1. 26	1. 26	1. 30	1. 33	1. 33	1. 33	1. 33	1. 40	1. 39	1. 39	1. 39	1. 39	1. 50
废水储量(10 ⁸ t)	32. 36	54. 45	55. 63	55. 12	54. 47	54. 06	82. 99	98. 51	96. 54	93. 21	90. 78	142. 5	158. 4	148. 4	142. 8	139. 2
废气储量(10 ¹⁶ m ³)	1. 15	1. 76	1. 79	1. 77	1. 76	1. 74	2. 60	2. 77	2. 66	2. 60	2. 53	3. 70	3. 95	3. 82	3. 70	3. 55
废渣储量(10 ⁷ t)	4. 83	6. 86	6. 95	6. 90	6. 86	6. 79	9. 32	9. 87	9. 50	9. 33	9. 10	12. 74	13. 76	13. 14	12. 74	12. 28
耕地面积(千 ha)	5008	4752	4744	4751	4719	4755	4500	4483	4535	4440	4508	4392	4374	4452	4323	4401
人均耕地面积(a)	6. 84	6. 38	6. 37	6. 38	6. 33	6. 38	5. 96	5. 95	6. 01	5. 89	5. 96	5. 77	5. 76	5. 84	5. 69	5. 75
森林覆盖率(%)	9. 6	9. 90	9. 83	9. 90	9. 90	10. 05	10. 43	10. 30	10. 47	10. 43	10. 83	11. 27	11. 06	11. 35	11. 27	12. 0

$3.70 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 和 $12.74 \times 10^7 \text{ t}$, 它们年均排放增长率分别为 10.4%、8.1% 和 6.7%; 在可利用耕地方面, 它以年平均 0.93% 的速度在减少, 到 2015 年全省仅有耕地面积 4391.8 千 ha, 人均耕地面积 5.77a。可见, 在参照发展模式下, 尽管江苏省城市化与经济总量能够得到相当的发展, 但其经济发展与规划优先目标相比还有差距, 并且生态环境压力问题也日渐明显, 该模式适合于经济加快发展的初中时期。

3.2.2 经济城市化发展型 () 确定以较快的经济发展速度来推动城市化进程。1990~2003 年江苏省 GDP 年均增长率为 13.3%, 假定经济依然能够保持较快的增长势头, 年增长速度基本上保持在江苏省长远规划高方案中的 12%。为了达到该经济高速发展目标, 我们对参数作相应的调整: 加大生产性投资比重, 将社会生产性投资比重由 0.35 提高到 0.4; 考虑到以工业为主的产业部门是目前乃至未来一段时期内江苏省经济和城市化发展的主要驱动部门, 所以将第二产业的投资系数由原来的 0.45 提高到 0.60, 其他产业的投资比重作相应调整, 其他初始参数不做大的调整。该模式中经济发展最快, 经济总量和人均量最大, 2015 年 GDP 和人均 GDP 分别实现 27093.7 亿元和 35664.5 元, 处于 5 种模式的首位; 同时该发展模式对城市化的其他方面, 如人口城市化水平、城镇住房和生态水平的推进作用也非常明显, 然而与经济高速发展相伴随的是环境污染最为严重, 如废水、废气和固体废物的累计储量在 2015 年分别高出同期模式 和模式 的 $15.86 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $2.54 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $10.25 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $19.16 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $3.98 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $1.53 \times 10^7 \text{ t}$, 另一方面它对耕地面积的侵占也十分严重, 处于 5 种耦合模式中的第二位。由此可见, 经济城市化发展型虽然能促进经济和城市化的较快发展, 但是也造成了资源的高度开发利用与严重的生态环境压力, 仅适合于城市发展的初期阶段。

3.2.3 人口城市化发展型 () 以城镇人口增长为主要城市化发展目标。1990~2003 年江苏省人口城市化水平平均每年以 1.94 个百分点增长, 高于全国平均的 0.85 个百分点, 已经处于较快增长的时期, 再进一步加速的空间不大, 我们假定该省能继续保持在 1.8 个百分点的增长速度, 同时注重城市化目标的实现, 其他初始参数不作调整。模拟表明该发展模式既能较快地促进经济的增长, 又能使城市化进程加快, 如在模拟的 15 年间, 该发展模式的 GDP 和人均 GDP 分别以 11.1% 和 10.8% 年平均增长速度增长, 都高于模式 的 0.4 个百分点, 仅低于模式 的 1.1 和 1.2 个百分点; 人口城市化水平在 5 种模式中提高最快, 分别比模式 和模式 提前 3 年和 1 年完成江苏省长远目标规划中城市化发展的目标; 由于土地利用的集约化程度提高, 该模式对耕地面积占用并不严重, 相反处于 5 种发展模式中的第三位; 由于农村人口大量集聚到城市, 林地面积增长, 森林覆盖率提高, 处于 5 种模式中的前位; 但是由于城镇人口增多, 由生活导致的环境污染加剧, 到 2015 年“三废”储量模拟值较高, 分别达到 $158.4 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $3.95 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 和 $14.4 \times 10^7 \text{ t}$, 处于 5 种模式中的第二位 (仅次于模式); 并且与人口的较快集聚相联系, 城镇居民住房、城镇绿地建设等城市基础设施显得相当滞后。从该模式的发展特征来看, 它适合于城市化的中期阶段, 即快速增长期。

3.2.4 空间城市化发展型 () 通过扩大城镇空间规模来推进城市化进程。1990~2003 年江苏省城镇建成区面积以 8.6% 的年平均递增速度推进, 高于全国同期 2.3 个百分点, 正是处于城镇空间快速扩展时期, 如果未来的扩展加快, 这必然会加剧人地矛盾, 但随着非农产业更快发展和城市人口总量增加以及城市居民对城市生活空间需求增强, 其发展存在着快速增长的压力。考虑到这些因素, 我们假定未来 15 年该省城镇建成区面积能

够以 9% 的速度递增, 其他参数不作调整。模拟结果表明, 由于城镇空间的快速扩展引起耕地面积大幅度减少, 激发了人地矛盾, 影响到人口变化与经济增长, 与其他 4 种模式相比: 该模式的总人口增长最慢, 2015 年总人口仅有 7594.17 万人, 净低于模式 和模式 的 18.57 和 54.03 万人; 经济发展速度较慢, 到 2015 年 GDP 与人均 GDP 分别为 21725.5 亿元和 28608.2 元, 其增长速度仅高于社会化发展模式; 与城镇空间扩张相联系, 该模式的城镇居民居住面积、绿地建设等城市基础设施比其他 4 种模式都超前, 但是由于对生活空间的超前追求, “三废”污染的储量也较多, 几乎与模式 的环境压力类似。显然, 从可持续发展观点看, 这种发展模式不值得提倡。

3.2.5 社会城市化发展型 () 追求城市建设的社会化过程, 着力于城市化进程中的文化、科技、卫生医疗等软环境构建。世界城市化经验表明, 发达国家的城市化可以划分为前后两个时期, 在前期主要表现为工业化的进展要求并促进人口向城镇的集聚; 在后期主要表现为较高的城市化水平所直接带来的生产集约化、生活集约化、管理科学化和文化科技、卫生保健等一系列的社会化过程^[16]。2003 年江苏省人均 GDP 已经达到 9642 元 (1990 年不变价, 折算为 2017 美元), 人口城市化水平达到 44.8%, 进入社会经济快速发展时期, 所以随着未来人们收入的大幅度提高, 对以科技、文化为主导, 包括医疗保健的需求会进一步加强, 于是我们假定未来 15 年内科技水平、教育水平和医疗水平能够保持较快的速度增长。为了实现这个目标, 必须加大对文卫科财政支出比例, 将其支出系数由 0.02 调整至 0.05; 同时重视第三产业发展, 使之与整个社会发展同步, 将它的投资系数由原来的 0.489 提高到 0.55, 其他产业投资比重作相应调整, 对初始参数还是按照模式 不做调整。模拟结果表明, 该模式无论对经济的发展、人口城市化水平的提高, 以及对环境压力都处于 5 种模式中的末位, 但由于重视城市化软环境的建设, 其科技水平、教育水平和医疗保健水平都取得最快的增长。可见, 这种发展模式适合于经济发展水平和城市化水平都较高的中后期阶段。

4 结论

城市化与生态环境是一类具有多反馈、多界面的非线性复杂系统, 二者集中表现于城市化的 4 个方面与生态环境的 5 个要素之间所具有的各种非线性关系的总和。根据区域城市化与生态环境耦合的含义和 PSR 框架, 基于系统分析的思路, 以江苏省为例建立了该省城市化与生态环境耦合的系统动力学模型, 并对 5 种耦合发展模式进行了情景模拟和策略分析, 可以得到如下结论:

(1) 区域城市化与生态环境通过交互耦合所构成的系统具有复杂性、非线性和时变性的特点, 利用系统动力学的方法来分析系统耦合的复杂机制具有明显的适用性。通过对江苏省建模, 并以 14 年的历史数据检验, 从主要数据的拟合情况看, 相对误差在 -5.2% ~ 9.8% 之间, 这表明该 SD 模型具有一定的可靠性, 能在一定程度上理解区域城市化与生态环境交互耦合的复杂行为, 评估城市化对生态环境的潜在效应。

(2) 通过对 5 种调控策略下的多情景分析, 发现它们都有其显著的比较优势, 同时也存在明显的发展缺陷。经济城市化发展模式经济增长速度最快, 但却加重了生态环境的污染和生存环境压力; 人口城市化发展模式可以尽快实现城市化目标, 也可以促进经济的较快增长, 但其环境污染排放较大, 并且存在着城市基础设施建设滞后等问题; 空间城市化发展模式能够很好满足城镇居民对城市空间发展和城市基础设施建设的需求, 但由于

对耕地资源过度占有,加剧了人地矛盾;社会城市化能够较全面地提高整个社会科技、文化教育和卫生保健等服务功能,同时有助于环境保护,然而其经济增长速度过慢。

(3) 适时适地选取不同的耦合发展模式,可以实现该省城市化与生态环境可持续发展的目的。从时序看,目前该省处于城市化与经济快速发展的快速增长时期,非农人口转移压力大、污染排放强度高,所以参照世界城市化发展规律,适时选取人口城市化发展模式和社会城市化发展模式,既可以保证该省经济较快增长,人口城镇化、社会化较快推进,又可以减轻生态环境的压力;从空间看,该省明显存在着三个典型地域单元,即苏南、苏中和苏北,2003 年人均 GDP 和城市化水平分别为 35278 元、12871 元、8480 元和 64.60%、44.74%、37.98%,分别代表三种不同的城市化与经济发展层次和进程,根据 5 种典型城市化发展模式下的 SD 仿真情景,考虑苏南选取社会城市化发展模式、苏北选取人口城市化发展模式,而苏中则兼顾两种发展模式,这样可以较好实现整个江苏区域社会经济环境的可持续发展。

参考文献:

- [1] 史作民,陈涛. 城市化及其对城市生态环境影响研究进展. 生态学杂志, 1996, 15(1): 35~ 41.
- [2] 杨士弘,等. 城市生态环境学. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] Commoner B, Stamler P J. The causes of pollution. Environment, 1971, 13(3): 2~ 19.
- [4] Grossman G, Krueger A. Environmental impacts of a North American free trade agreement. In: Garber P(ed). The Mexico-US Free Trade Agreement. Cambridge, MA: MIT Press, 1993.
- [5] Grossman G, Krueger A. Economic growth and the environment. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353~ 377.
- [6] Forrester J W. Urban Dynamics. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1971.
- [7] Vester F, Hesler V A. Ecology and Planning in Metropolitan Areas Sensitivity Model. Berlin: Federal Environmental Agency, 1980.
- [8] Odum H T, Elisabeth C. Modeling for All Scales: An Introduction to System Simulation. San Diego: Academic Press, 2000. 772.
- [9] Braat L, Van Lierop W. Economie ecological modeling: an introduction to methods and applications. Ecological Modeling, 1986, 31: 33~ 44.
- [10] Sukopp H, Weiler S. Biotope mapping and nature conservation strategies in urban area of the Federal Republic of Germany. Landscape and Urban Planning, 1988, (15): 39~ 58.
- [11] 凌亢,王浣尘,刘涛. 城市经济发展与环境污染关系的统计研究——以南京市为例. 统计研究, 2001, (10): 46~ 52.
- [12] 吴玉萍,董锁成,宋键峰. 北京市经济增长与环境污染水平计量模型研究. 地理研究, 2002, 21(2): 239~ 246.
- [13] 刘耀彬,李仁东. 武汉市“三废”排放的库兹涅茨特征及原因探析. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 44~ 45.
- [14] 黄金川,方创琳,冯仁国. 三峡库区城市化与生态环境耦合关系定量辨识. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 153~ 158.
- [15] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析. 自然资源学报, 2005, 20(1): 105~ 112.
- [16] 周一星. 城市地理学. 北京: 商务印书馆, 1999.
- [17] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211~ 220.
- [18] Whittaker R H, Levin S A, Root R B. Niche, habitat, and ecotone. American Naturalist, 1973, 107: 321~ 338.
- [19] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报, 2005, 60(2): 237~ 247.
- [20] 王其藩. 系统动力学. 北京: 清华大学出版社, 1994. 17~ 20.
- [21] 周干峙. 城市及其区域——一个典型的开放的复杂巨系统. 城市规划, 2002, 26(2): 7~ 8, 18.
- [22] 白南生. 中国的城市化. 管理世界, 2003, (11): 78~ 86, 97.
- [23] 王孟本. “生态环境”概念的起源与内涵. 生态学报, 2003, 29(3): 1910~ 1914.

- [24] 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
- [25] 方创琳, 余丹林. 区域可持续发展SD规划模型的试验优控—以干旱区柴达木盆地为例. 生态学报, 1999, 19(6): 767~ 774
- [26] 汤万金, 高林, 吴刚, 等. 矿区可持续发展系统动力学模拟与调控. 生态学报, 2000, 20(1): 20~ 27
- [27] 张锋, 袁锋, 陈建清. 1996—2020年江苏跨世纪发展战略. 南京: 江苏人民出版社, 1997

Simulation of regional urbanization and eco-environment coupling and regulation policies: taking Jiangsu Province as a case

LIU Yao-bin¹, CHEN Fei¹, LI Ren-dong²

(1 Center for Research on Economic Development in the Central Part of China,
Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2 Institute of Geodesy and Geophysics Research, CAS, Wuhan 430077, China)

Abstract: According to the rule and framework of urbanization and eco-environment coupling, the system dynamic model of the coupling system between urbanization and eco-environment in Jiangsu province has been designed by means of SD method. Based on Jiangsu's serial statistical data from 1990 to 2003, the five scenarios of the coupling models during 2000-2015 have been simulated. The results show that: Firstly, for there exist complex, nonlinear and changeable characteristics of the coupling system between regional urbanization and eco-environment, in terms of SD merits, it is applicable for the SD to deal with the complexity resulted from regional urbanization and eco-environment coupling. The accuracy assessment with historical data covering 1990 to 2003 indicates the SD model is reliable to a certain extent, which can reveal some complex actions of the coupling system and evaluate the potential effects that urbanization intimidated eco-environment. Secondly, there exist significant differences among the five development models, which show both comparative advantages and drawbacks. Thirdly, according to the characteristics and regional disparities of Jiangsu development and the general rule of world urbanization, it is revealed that only when either population urbanization model or society urbanization model to be adopted correspondingly can the sustainable development among population, economy, urbanization and eco-environment be realized.

Key words: urbanization; eco-environment; system dynamic model; simulation; Jiangsu