



中国城镇化2050: SD模型与过程模拟

顾朝林^{1*}, 管卫华², 刘合林³

1. 清华大学建筑学院, 北京 100084;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;

3. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 武汉 430074

* E-mail: gucl@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016-12-14; 接受日期: 2017-02-22; 网络版发表日期: 2017-03-29

国家自然科学基金重大项目(批准号: 41590844)和清华大学自主科研计划项目(编号: 2015THZ01)资助

摘要 中国城镇化过程究竟是一个长期的过程还是政府短期可以实现的目标? 中国趋向稳定状态的城镇化水平是多少? 哪一年将可能基本完成中国城镇化的过程? 本文通过建立中国城镇化系统动力学(SD)模型, 采用1998~2013年数据进行系统存量流量检验和系统灵敏度分析, 结果显示所建中国城镇化SD模型有效且具有实际仿真可操作性. 运用2013年数据和系统参数进行中国城镇化过程多情景模拟(2013~2050)显示, 无论哪种人口政策和GDP增长率, 中国城镇化水平到2035年都将达到70%以上, 中国城镇化过程进入低增长阶段; 到2050年, 中国城镇化水平将达到75%左右, 中国城镇化进入稳定和饱和状态. 据此, 可以认为: 中国城镇化过程是一个长期的社会发展过程, 还需要20年才能基本完成这一过程. 中国城镇化水平最终的饱和状态在75~80%, 在长远的未来仍将有20~25%的人口分布在广大农村地区.

关键词 中国城镇化, 系统动力学(SD)模型, 情景模拟

1 引言

城镇化是现代化的标志之一, 也是变农业国家为工业化、城市型国家的社会转型过程, 将影响一个国家或地区的经济空间结构、社会生活方式和人类居住模式. 中国城镇化, 作为国家非常重要的社会发展、经济增长和环境变化过程, 一方面, 城市化水平已经迅速从1978年的18%上升到2015年的56.1%; 另一方面, 城镇化也导致了一系列诸如农用地和生物多样性减少、城市住房短缺、交通拥堵、区域经济发展不平衡等问题. 根据党的“十八大”和国家“十三五”规划纲

要, 中国城镇化已经列入到2020年国家全面建成小康社会的重要任务. 然而, 中国城镇化过程究竟是一个长期的过程还是政府短期可以实现的目标? 中国趋向稳定状态的城镇化水平是多少? 哪一年将可能基本完成中国城镇化的过程? 这些都是需要进行科学回答的问题.

2 文献综述与相关研究进展

较早的中国城镇化水平研究, 曾经预测2010年城镇化水平达到61%、2030年65%、2040年69%和2050

中文引用格式: 顾朝林, 管卫华, 刘合林. 2017. 中国城镇化2050: SD模型与过程模拟. 中国科学: 地球科学, 47: 818-832, doi: 10.1360/N072016-00277
英文引用格式: Gu C L, Guan W H, Liu H L. 2017. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation. Science China Earth Sciences, 60: 1067-1082, doi: 10.1007/s11430-016-9022-2

年73%(顾朝林, 1992), 这个结果只是基于逻辑斯蒂模型做出的. 2003年陈金永和胡莹的研究是到2050年中国城市化水平将达到60~66%(Chan和Hu, 2003). 陈明和王凯(2013)通过中国与其他国家的人均GDP与城镇化水平之间关系分析, 预测中国城镇化水平, 2020年达到59~60%, 2030年将达到68~70%左右. 中国特色新型城镇化发展战略研究课题组通过对农业劳动力向非农产业转移数量, 以及对全国新出生人口和新进入劳动年龄的农村人口数量分析, 预测2020年中国城镇化水平将达到60%, 2033年达到65%(徐匡迪, 2013). 高春亮和魏后凯(2013)综合曲线拟合、经济模型和城乡人口增长率三种方法, 进行中国城镇化水平预测, 2030年达到68.38%, 2050年为81.63%. 《国家新型城镇化规划(2014~2020年)》将2020年中国城镇化水平发展目标设定为60%左右. 经济学人智库中国研究团队(2014)研究认为: 中国城镇化水平到2020年达到61%, 2030年达到67%. 胡秀莲(2013)综述了国内外研究机构的研究成果, 中国城镇化水平2020年将达到58~63%, 2050年达到60~79%. 国务院发展研究中心和世界银行(2014)的《中国推进高效、包容、可持续的城镇化》研究报告, 预测2030年中国城镇化水平在66%(基准情景)至70%(改革情景). 综上所述, 不难看出, 无论是学者还是研究机构对中国城镇化水平的预测值相差较大, 不足以支撑国家宏观决策.

世界各国的城镇化专家根据相关的城镇化理论构建了预测模型并进行过程模拟. 在20世纪50年代以前, 城镇化研究, 尤其城镇化水平预测, 主要采取时间序列预测法, 依靠历史资料的时间数列进行趋势外推研究, 常用的方法有算术平均法、加权序时平均法、移动平均法、加权移动平均法、趋势预测法和指数平滑法等. 到20世纪60~70年代, 城镇化的研究开始采用静态的人口分析方法, 如人口统计学方法和线性分析技术, 1975年美国城市地理学家诺瑟姆采用逻辑斯蒂方程进行发达国家的城市化水平回归分析, 提出了“诺瑟姆S型曲线”(Northam, 1975). 20世纪80年代, 系统科学、运筹学等被引入到城镇化研究之中, 开始运用自组织与协同理论的系统方法和建模思路, 开展了人口分布、产业演化、设施分布、空间模式交通行为与城市模拟等研究(Zeleny, 1980; Batten, 1982; Allen等, 1984; Pumain等, 1986). 20世纪90年代以来, 城镇化研究数据的获取手段得到极大的改善, 不仅有监测城镇

化区域内自然数据各尺度对地观测系统和网络, 也有采集处理人文经济数据的专门机构和多种类型数据库, 城镇化的研究日趋精准和科学化. Portugali(2000)运用自组织和协同原理, 提出基于元胞空间智能体框架的FACS模型. 巴蒂(Batty, 2005)结合地理信息系统GIS的建模方法, 运用分形城市、元胞自动机(CA)和智能体(Agent)等科学范式, 进行多情景城市空间增长与过程模拟. 美国SANTA FE研究所开发了基于多智能体的模拟软件系统SWARM, 薛领和杨开忠(2002)、夏冰等(2002)、沈体雁和吴波(2006)基于SWARM平台开发了空间经济学和城市交通模型, 李强和顾朝林(2015)提出了一种基于多智能体系统(Multi-agent System, MAS)和地理信息系统(GIS)的城市公共安全应急响应动态地理模拟模型. 本文解构中国城镇化的复杂大系统, 采用系统动力学(SD)方法进行建模和过程模拟, 力求使研究结果更加科学、准确和可靠, 为国家宏观政策制定提供科学依据和参考.

3 中国城镇化SD模型构建

系统动力学(System Dynamics, SD)采用定性和定量相结合的方式来解决实际问题(王其藩, 1994), 变单纯的静态为动态模拟(贾仁安和丁荣华, 2002), 而且模型非固定结构, 方程形式灵活, 能够有效进行系统的动力研究, 有助于进行多方案比较分析(何红波等, 2006). Forrester最早从事自然资源、技术和经济部门的相互作用研究(Meadows等, 1972; Georgiadis和Besiou, 2008), 与罗马俱乐部一起构建了“世界模型”(World Dynamics)(Forrester, 1971), 出版著名的《增长的极限》(The limits to growth)研究报告(Meadows等, 1972). 自此, SD模型研究被广泛应用于地球科学、经济学、资源科学和城市与区域研究, 例如: 城市系统和土地扩张研究(Wolstenholme, 1983; Mohapatra等, 1994; Guo等, 2001; Liu等, 2007; Shen等, 2007; Chang等, 2008; 何春阳等, 2005; 何红波等, 2006), 城市化与生态环境耦合研究(Bockermann等, 2005; Jin等, 2009; Zhou和Mi, 2009; Egilmez和Tatari, 2012), 单要素系统动力学模拟研究(蔡林, 2008; Armah等, 2010; Venkatesan等, 2011; Guan等, 2011; Qiu等, 2015)以及复杂大系统的动力学模型研究(Haghshenas等, 2015; Xu和Coors, 2012; Tong和Dou, 2014; Ying等, 2015). 中国城镇化SD模型就是

利用系统动力学的原理和方法, 基于城镇化机制的分析, 建立中国快速城镇化阶段的系统动力模型。

3.1 系统边界与结构

SD模型是建立在封闭系统边界基础上的。系统边界内系统相互作用是系统的特征行为(Forrester, 1969)。因此, 确定中国城镇化SD模型的边界至关重要。自改革开放以来到20世纪90年代中期, 中国城镇化动力机制主要为农村剩余劳动力的增长和城市第三产业的快速发展以及城乡教育条件差异等。20世纪90年代中期以后, 中国城镇化动力机制向多元化发展, 流通、外资外贸、城市基础设施等表现出色。实际上, 中国城镇化的动力系统应该较上述两个状态更为复杂, 其中在中国农村存在大量的乡镇企业, 吸引了农村剩余劳动力从事农村第二和第三产业, 因而农村生产不仅仅是第一产业的生产, 而且还有农村的第二、第三产业生产。同时, 由于资源开发要素导致的生态环境问题对城乡人口数量增减、生活方式变化、区内区际迁移等也都产生影响, 这样环境系统也成为中国城镇化动力系统的组成部分之一, 事实上, 环境系统根据污染物的不同分为水环境、大气环境、土壤环境和固体废弃物等。此外, 维持城乡生产、生活系统的有效运行, 离不开能源子系统, 其中煤电等化石燃料的生产过程因为CO₂的排放导致地球增温、全球气候变化和海平面上升等, 又反过来影响沿海地区的城镇化过程。当然, 城乡健康保健、粮食生产、科技水平、投资来源、土地政策、财政政策、农业生产政策和计划生育政策等都直接对中国城镇化动力系统中的人口系统和生产系统产生作用。这些就是最基本的中国城镇化动力系统的内部要素(子系统)和系统边界。本文基于人口、产业、资本、基础设施、社会设施 and 环境影响初步构建了中国城镇化SD模型系统(表1; 图1)。在实际SD模型构建时, 由于SD系统无法描述产业转型升级的过程及其对城镇化的影响, 本文中的中国城镇化SD模型的结构主要通过资本和劳动力等主要生产要素在一、二、三产业间的重新分配来实现生产要素在产业间的转移和配置, 进而导致生产要素在产业间投入的变化, 实现一、二、三产业产值的变化和产业结构的变化, 并最终导致以二、三产业从业人员为主的城镇人口发生变化, 从而影响城镇化过程。

3.2 SD模型变量和参数

依据上述中国城镇化SD模型构建的系统边界和内部结构, 相关的关键变量或参数由存量、流量和参数组成, 其含义和单位如表1所示。

3.3 要素因果关系图

SD模型的系统结构是由因果环图(CLD)表示(Georgiadis等, 2005), 因果环图(CLD)主要反映各变量之间的反馈机制(网络版附录1, <http://earthcn.sci-china.com>, 下同)。图1是中国城镇化SD模型的因果环图。

3.4 系统存量流量图

中国城镇化SD模型因果环图中的存量和流量, 按照可持续发展的理念进行组装, 可以拆解为工业、经济、人口、城镇和教育等子系统(图2)。在DYNAMO, iThink, Vensim®和Powersim®支持的系统环境下能够实现系统模拟。

3.5 中国城镇化SD模型方程

经济增长是经济发展的基础和前提, 而劳动生产率的提高则是经济增长的核心, 二者的变动对劳动力需求产生较大的影响。中国城镇化SD模型主要考虑城市和乡村不同产业部门增长速度、劳动生产率和劳动力需求三者之间相互关系(周天勇, 1994), 特别是随着经济的发展使农业劳动生产率提高, 一部分农业人口逐渐转变为从事工业、交通、商业和科学文教等非农业生产的劳动人口, 其中农业劳动力的净转移速度又取决于农业生产规模和农业劳动生产率的增长速度(袁嘉新等, 1987)。中国城镇化SD模型方程主要基于生产函数模型给出, 具有增强增列结构特征。在此基础上得到如表2经济、人口和社会服务三个子系统动力学方程。虽然在中国城镇化SD模型中有线性方程, 但同时也运用了一些非线性方程, 正是由于采用的这些非线性方程或关系, 使得整个系统呈现出非线性的态势, 使得预测更加具有客观可能性。

这样, 初步构建的中国城镇化SD模型就可以包括经济发展、人口与社会和公共服务等三个面的集成。SD模型系统的构成可以通过不断的参数校准和改进

表1 中国城镇化SD模型的参数

变量符号	变量含义	变量单位	变量符号	变量含义	变量单位
CSRK	城市人口	万人	DYCYCZ	第一产业产值	亿元
NCSRKZC	年城市人口增长	万人/年	DYCYZDCZ	第一产业最大产值	亿元
NCSRKDJ	年城市人口递减	万人/年	DYCYCZZCL	第一产业产值增长率	无量纲
CSJKYXYZ	城市健康影响因子	无量纲	DYCYZCZ	第一产业增长值	亿元
CSRKSWL	城市人口死亡率	无量纲	NCGD	农村耕地	万公顷
CSRKCSL	城市人口出生率	无量纲	DYCYZBCL	第一产业资本存量	亿元
CSJHSYYXYZ	城市计划生育影响因子	无量纲	DYCYZBCLBL	第一产业资本存量比例	无量纲
ZDRKCZL	最大人口承载量	万人	CSSCZZ	城市生产总值	亿元
CSJYYZ	城市教育因子	无量纲	GNSCZZ	国内生产总值	亿元
CSZXXSZZCX	城市中小学师资增长系数	无量纲	DECYCZ	第二产业产值	亿元
CQCSJYSZSP	初期城市教育师资水平	人/万人	DECYZDCL	第二产业最大产量	亿元
CSZXXWMXS- YYJSS	城市中小学万名学生 拥有教师数	人/万人	DECYCZZCL	第二产业产值增长率	无量纲
CSZXXXSS	城市中小学学生数	万人	CSDECYZBCL	城市第二产业资本存量	亿元
CSZXXJSS	城市中小学教师数	万人	DECYZBCLBL	第二产业资本存量比例	无量纲
JYYZ	教育因子	无量纲	NDECYZCZ	年第二产业增长值	亿元/年
CSCYLDLXQZCX	城市产业劳动力需求 增长系数	无量纲	DECYCYRYZCL	第二产业从业人员增长率	无量纲
CSCYLDLXQYZ	城市产业劳动力需求因子	无量纲	DECYLDLZJL	第二产业劳动力增加量	万人/年
CSCYLDLXQ	城市产业劳动力需求	万人	DECYLDL	第二产业劳动力	万人
CQCSCYLDLXQ	初期城市产业劳动力需求	万人	DECYCYXS	第二产业从业系数	无量纲
YLYZ	医疗因子	无量纲	ZZBCL	总资本存量	亿元
CQCSWRYYYYSS	初期城市万人拥有医生数	人/万人	JLL	积累率	无量纲
CSYSS	城市医生人数	万人	ZZBCLNZJL	总资本存量年增加量	亿元/年
CSWRYYYYSS	城市万人拥有医生数	人/万人	SJDECYCZZCL	实际第二产业产值增长率	无量纲
CSWEYYYYSSZCX	城市万人拥有医生数 增长系数	无量纲	DECYLDLZCLZCL	第二产业劳动生产率增长率	无量纲
CSYLSP	城市医疗水平	无量纲	DECYLDLXQ	第二产业劳动力需求	万人
DSCYLLDL	第三产业劳动力	万人	DSCYCZ	第三产业产值	亿元
DSCYCYXS	第三产业从业系数	无量纲	DSCYZDCZ	第三产业最大产值	亿元
DSCYCYRYZCL	第三产业从业人员增长率	无量纲	CSDSCYZBCL	城市第三产业资本存量	亿元
DSCYLDLZJZ	第三产业劳动力增加量	万人/年	DSVCYZBCLBL	第三产业资本存量比例	无量纲
NYLDSCL	农业劳动生产率	元/人	NDSCYZC	年第三产业增长值	亿元/年
NYLDLXQ	农业劳动力需求	万人	SJDSCYCZZCL	实际第三产业产值增长率	无量纲
NYLDSCLZCSD	农业劳动生产率增长速度	无量纲	DSCYLDLXQ	第三产业劳动力需求	万人
NYLDLZCSD	农业劳动力增长速度	无量纲	DSCYCZZCL	第三产业产值增长率	无量纲
NYLDLQYSD	农业劳动力迁移速度	无量纲	DSCYLDLZCLZCL	第三产业劳动生产率增长率	无量纲
NNYLDLZC	年农业劳动力增长	万人	NCRK	农村人口	万人
NYLDLXS	农业劳动力系数	无量纲	NNCRKZC	年农村人口增长	万人/年
NYLDLTR	农业劳动力投入	万人	NNCRKDJ	年农村人口递减	万人/年
CSHLYZ	城市化率因子	无量纲	NCJHSYYXYZ	农村计划生育影响因子	无量纲
NCRKCSL	农村人口出生率	无量纲	NCJKYXYZ	农村健康影响因子	无量纲
ZRK	总人口	万人	NCRKSWL	农村人口死亡率	无量纲
CSHL	城市化率	%			

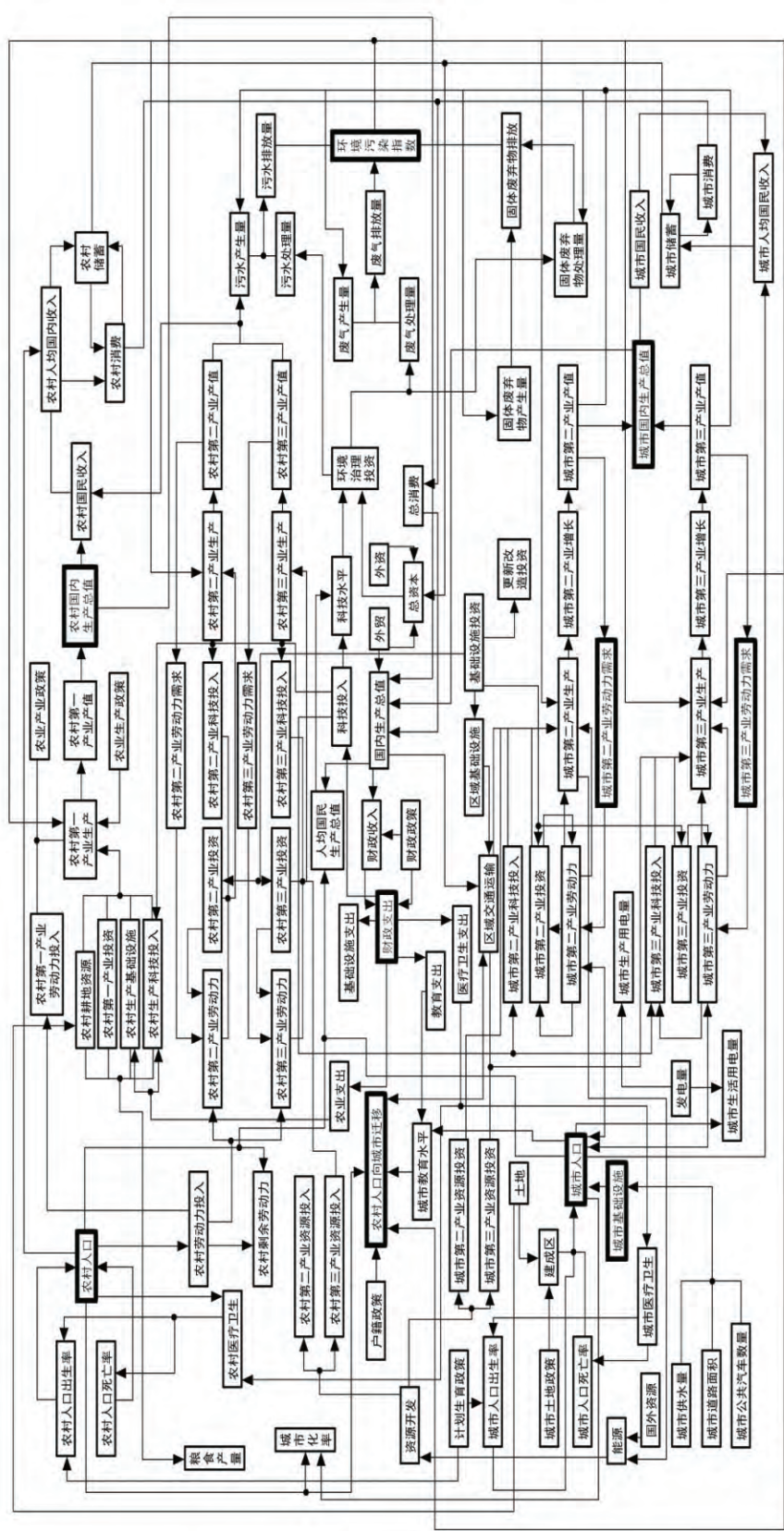


图 1 中国城镇化SD模型因果环图

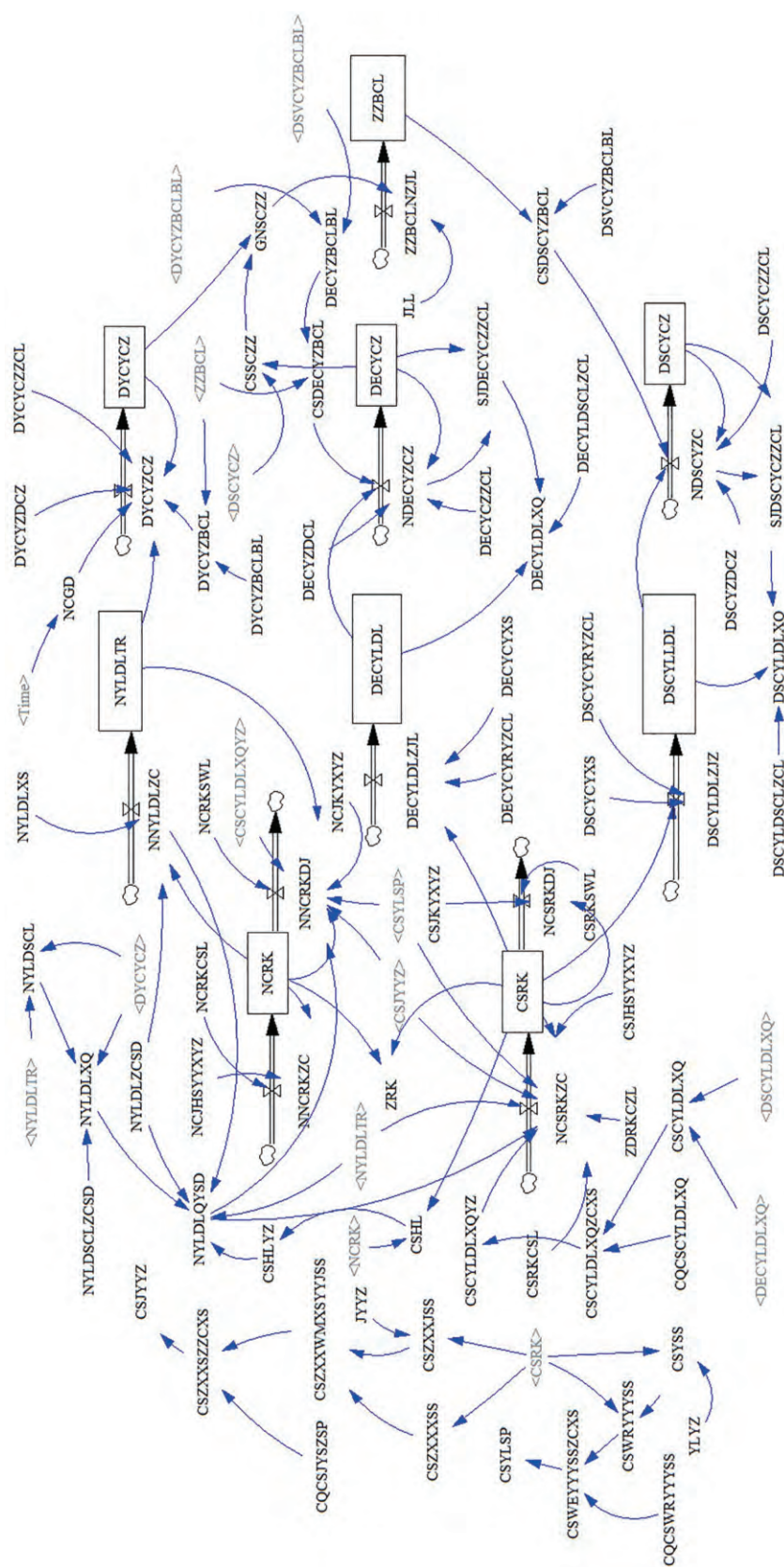


表2 中国城镇化SD模型方程

子系统	主要方程
1、经济系统主要方程	$DYCYZCZ = DYCYCZZCL * (1 - DYCYCZ / DYCYZDCZ) * EXP(10.5) * (NCGD^{(0.4589)}) * (NYLDLTR^{(-0.743)}) * DYCYZBCL^{0.24}$
	$DYCYZBCL = ZZBCL * DYCYZBCLBL$
	$CSDECYBCL = DECYBCLBL * ZZBCL$
	$NDECYCZ = DECYCZZCL * (1 - DECYCZ / DECYZDCL) * EXP(1.003) * (DECYLDL^{(-0.1958)}) * (CSDECYBCL^{0.967})$
	$ZZBCLNZJL = GNSCZZ * JLL$
	$CSDSCYBCL = DSVCYBCLBL * ZZBCL$
	$DECYLDLZJL = CSRK * DECYCYRYZCL * DECYCYXS$
	$DSCYLDLZJZ = CSRK * DSCYCYXS * DSCYCYRYZCL$
	$NDSCYZC = DSCYCZZCL * (1 - DSCYCZ / DSCYZDCZ) * EXP(-8.76) * (DSCYLDDL^{(1.095)}) * (CSDSCYBCL^{0.6766})$
	$DECYLDLXQ = DECYLDL * (1 + SJDECYCZZCL - DECYLDLZJL)$
	$SJDECYCZZCL = NDECYZCZ / (DECYCZ - NDECYZCZ)$
	$DSCYLDLXQ = DSCYLDDL * (1 + SJDSCYCZZCL - DSCYLDLZJL)$
	$SJDSCYCZZCL = NDSCYZC / (DSCYCZ - NDSCYZC)$
	$CSCYLDLXQZCXS = CSCYLDLXQ / CQCSCYLDLXQ$
	$GNSCZZ = DYCYCZ + CSSCZZ$
	$CSSCZZ = DECYCZ + DSCYCZ$
	$NNYLDLZC = NYLDLXS * NCRK * NYLDLZCSD$
	$NNCRKZC = NCRKCSL * NCRK * NCJHSYYXYZ$
	$NNCRKDJ = NCRKSWL * NCJKYXYZ * NCRK + NYLDLTR * NYLDLQYSD * CSJYYZ * CSCYLDLXQYZ * CSYLSP$
2、人口系统主要方程	$NCRK = NNCRKZC - NNCRKDJ$
	$NNYLDLZC = NYLDLXS * NCRK * NYLDLZCSD$
	$NCSRKZC = (1 - CSRK / ZDRKCZL) * (CSRKCSL * CSRK * CSJHSYYXYZ + CSCYLDLXQYZ * NYLDLQYSD * NYLDLTR * CSJYYZ * CSYLSP)$
	$NCSRKDJ = CSRKSWL * CSJKYXYZ * CSRK$
	$CSRK = NCSRKZC - NCSRKDJ$
	$CSHL = CSRK * 100 / (CSRK + NCRK)$
	$CSCYLDLXQZCXS = CSCYLDLXQ / CQCSCYLDLXQ$
3、社会服务系统主要方程	$CSZXXJSS = JYYZ * (0.00705 * CSRK + 105.995)$
	$CSZXXWMXSYYJSS = (CSZXXJSS * 10000) / CSZXXXSS$
	$CSZXXSZCXS = CSZXXWMXSYYJSS / CQCSJYSZSP$
	$CSZXXXSS = 0.027943 * CSRK + 1976.11$
	$CSYSS = YLYZ * (0.010885 * CSRK - 257.88)$
	$CSWRYYYSS = CSYSS * 10000 / CSRK$
	$CSWEYSSZCXS = CSWRYYYSS / CQCSWRYYYSS$

从而达到确保模拟精度的要求。

4 中国城镇化SD模型系统验证

中国城镇化SD模型验证采用了两种方法,模型的结构检验主要确定它是否准确地反映了现实状态,敏感性检验则是对模型运行过程中进行模型系统是否稳定的置信度评估。

4.1 模型系统存流量检验

为了检验中国城镇化SD模型系统是否准确地反映了现实状态,采用真实数据和极端域值条件进行模型结构验证(Sterman, 2000)。将参数输入模型进行仿真运行,所得结果(模拟)与实际值进行比较,从而确定模型行为模拟是否具有可靠性和准确性(徐毅和孙才志, 2008)。由于中国城镇化SD模型系统较复杂,变量

较多, 本文主要对1998~2013年中国城镇化水平、总人口、90年价国内生产总值及分产业产值和分产业从业人员的模拟值和实际值进行相对误差检验, 结果如表3所示.

从表3看, 1998~2013年间中国城镇化SD模型模拟得到的城镇化数据与实际数据的平均相对误差仅为0.774%, 而模拟的其他主要指标数值与实际数值的相对平均误差均未超过10%, 模型的模拟值与实际值拟合较好, 因此可以认为中国城镇化SD模型系统具有可靠性、准确性和强壮性. 将中国城镇化实际数据和模型模拟数据画成线状图直观对照(图3), 可见建构的中国城镇化SD模型的模拟结果是有效的, 可以进行实际仿真操作.

4.2 模型系统灵敏度分析

灵敏度分析是指通过改变模型中的参数和结构, 运行模型, 比较模型的输出, 从而确定其影响程度(贾仁安和丁荣华, 2002). 一个稳定性、强壮性良好的模型对大多数参数的变化应是不灵敏的, 进行模型灵敏度分析主要在于检验模型对大多数参数变化的灵敏性, 并为后续优化方案设计奠定基础(张雪花等, 2008). 灵敏度分析模型采用如下:

$$S_{Q_i} = \left| \frac{\Delta Q_{(t)}}{Q_{(t)}} \cdot \frac{X_{(t)}}{\Delta X_{(t)}} \right|, \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Q_i}, \quad (2)$$

式中, t , 时间; $Q_{(t)}$, 状态 Q 在时刻 t 的值; $X_{(t)}$, 参数 X 在 t 时刻的值; S_{Q_i} , 状态变量 Q 对参数 X 的灵敏度; $\Delta Q_{(t)}$ 、 $\Delta X_{(t)}$, 分别为状态变量 Q 和参数 X 在 t 时刻的增长量; n , 状态变量参数; S_{Q_i} , Q_i 的灵敏度; S , 参数 X 的平均灵敏度.

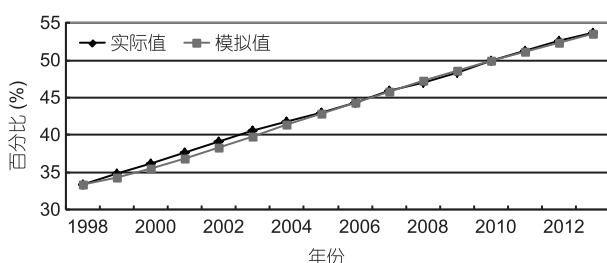


图3 中国城镇化系统动力模型模拟值与实际值比较 (1998-2013)

中国城镇化SD模型的敏感性检验, 分别从人口子系统、产业子系统、劳动力子系统、劳动生产率水平、教育卫生健康子系统、资源环境容量和积累率等选取22个变量, 检验城镇化水平变化对22个参数变化的灵敏度值. 22个变量分别为农村人口出生率、城市人口出生率、农村计划生育影响因子、城市计划生育影响因子、教育因子、医疗因子、农村健康影响因子、城市健康影响因子、第一产业产值增长率、第二产业产值增长率、第三产业产值增长率、第一产业劳动力增长率、第二产业劳动力增长率、第三产业劳动力增长率、农业劳动生产率增长率、第二产业劳动生产率增长率、第三产业劳动生产率增长率、城市人口最大承载量、第一产业最大产值、第二产业最大产值、第三产业最大产值、积累率. 检验方法为: 1998~2050年每个参数逐年增加或减少10%, 考查22个变量对城镇化水平的影响(裴同英等, 2010; 薛冰等, 2011). 依据式(1), 每个状态变量可以得到2个针对城镇化水平变化的灵敏度值, 共44个灵敏度值的均值可代表城镇化水平对某一特定参数的灵敏度; 利用式(2)计算出22个变量对某个特定参数的平均灵敏度, 共可得到44个数值, 结果如表4所示.

由表4可见, 除农村人口出生率、农村计划生育影响因子、教育因子和农业劳动生产率增长率的灵敏度较高外, 其余参数的灵敏度均低于10%, 这说明构建的中国城镇化SD模型系统对于大多数参数的变化是不敏感的. 上述几个灵敏度较高的参数, 既是对系统影响较大的关键因素, 同时也是今后影响中国城镇化的主要动力. 从各要素的灵敏度的大小也可以看出各要素对城镇化进程作用的大小程度依次为农业劳动生产率、教育因子、农村计划生育影响因子和农村人口出生率.

通过以上系统存量检验和灵敏度分析, 可以判定: 中国城镇化SD模型具有良好的稳定性和强壮性, 能够用于对实际系统的模拟预测.

5 中国城镇化SD模型模拟

5.1 数据及其来源

改革开放以来, 中国社会经济得到快速发展, 1978年全国GDP为3645.2亿元, 2015年增长到67.67万亿元, 人均GDP也由1978年的381元增长为2015年的5.2万元.

表3 模型历史性检验结果

年份	城镇化水平(%)			总人口(万人)			国内生产总值(90年价)		
	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率
1998	33.35	33.35	0.001	124761	124761	0.000	42876.6	42877.45	0.002
1999	34.37	34.78	1.191	125692	125786	0.075	46608.1	46144.64	1.004
2000	35.54	36.22	1.881	126590	126743	0.121	50810.3	50035.22	1.549
2001	36.89	37.66	2.033	127446	127627	0.142	55518.5	54188.31	2.455
2002	38.35	39.09	1.884	128267	128453	0.145	60772.9	59109.73	2.814
2003	39.82	40.53	1.744	129065	129227	0.125	66618.6	65035.7	2.434
2004	41.33	41.76	1.035	129834	129988	0.118	73105.8	71594.58	2.111
2005	42.83	42.99	0.370	130579	130756	0.135	80290.3	79691.95	0.751
2006	44.32	44.34	0.041	131302	131448	0.111	88233.5	89794.12	1.738
2007	45.8	45.89	0.205	132004	132129	0.095	97002.8	102511.1	5.373
2008	47.22	46.99	0.489	132692	132802	0.083	106672	112387.7	5.086
2009	48.59	48.34	0.507	133368	133450	0.061	117321	122743.4	4.418
2010	49.90	49.95	0.107	134035	134091	0.042	129038	135566.3	4.816
2011	51.15	51.27	0.230	134694	134735	0.030	141917	148173.9	4.223
2012	52.37	52.57	0.383	135340	135404	0.047	156060	159512.8	2.165
2013	53.55	53.70	0.283	135976	136072	0.071	171577	171749.3	0.100
平均误差率	—	—	0.774	—	—	0.088	—	—	2.565
年份	第一产业产值(亿元)(90年价)			第二产业产值(亿元)(90年价)			第三产业产值(亿元)(90年价)		
	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率
1998	7527	7527.545	0.007	19814.6	19814.63	0.000	15535	15535.27	0.002
1999	7947.74	7600.134	4.574	21377	21114.43	1.244	17283.3	17430.08	0.842
2000	8388.59	7536.823	11.301	23161.9	22974.44	0.816	19259.8	19523.96	1.353
2001	8849.73	7798.631	13.478	25185.5	24467.49	2.935	21483.3	21922.18	2.002
2002	9331.45	8123.301	14.873	27466.2	26475.13	3.743	23975.3	24511.3	2.187
2003	9834.12	8322.848	18.158	30024.2	29896.24	0.428	26760.3	26816.61	0.210
2004	10358.2	9588.764	8.024	32881.8	33094.84	0.644	29865.8	28910.97	3.303
2005	10904.1	9661.073	12.866	36063.6	37747.17	4.460	33322.6	32283.7	3.218
2006	11472.4	9979.227	14.963	39596.4	43054.94	8.033	37164.7	36759.95	1.101
2007	12063.7	11040.15	9.271	43509.7	48527.52	10.340	41429.4	42943.46	3.526
2008	12678.6	12060.97	5.121	47835.2	53324	10.293	46158	47002.76	1.797
2009	13317.8	12683.26	5.003	52607.8	56758.44	7.313	51395.6	53301.66	3.576
2010	13981.9	13685.72	2.164	57864.8	63267.86	8.540	57191.1	58612.76	2.426
2011	14671.6	14872.45	1.350	63647	69032.21	7.801	63598	64269.2	1.044
2012	15387.8	16082.28	4.318	69998	72210.78	3.064	70673.7	71219.71	0.767
2013	16131.3	17196.81	6.196	76965.1	75386.28	2.094	78480.4	79166.2	0.866
平均误差率	—	—	8.229	—	—	4.484	—	—	1.764
年份	农业劳动力投入			第二产业劳动力			第三产业劳动力		
	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率	模拟值	实际值	误差率
1998	35177	35177	0.000	16600	16600	0.000	18860	18860	0.000
1999	34466.4	35768	3.639	16922.8	16421	3.056	19335.1	19205	0.677
2000	33761.4	36043	6.329	17258	16219	6.405	19828.3	19823	0.025
2001	33064.1	36399	9.161	17607	16234	8.459	20342	20165	0.879
2002	32376.8	36640	11.635	17971.9	15682	14.603	20878.9	20958	0.378
2003	31701.1	36204	12.438	18353.6	15927	15.236	21440.6	21605	0.759
2004	31037.4	34830	10.888	18752.4	16709	12.227	22027.4	22725	3.069
2005	30386.4	33442	9.137	19168.7	17766	7.896	22640.1	23439	3.409
2006	29748.5	31941	6.863	19602.6	18894	3.748	23278.7	24143	3.580
2007	29123.8	30731	5.230	20054.2	20186	0.653	23943.2	24404	1.888
2008	28512.3	29923	4.716	20523.2	20553	0.147	24633.5	25087	1.809
2009	27913.8	28890	3.381	21009.4	21080	0.336	25348.9	25857	1.966
2010	27327.8	27931	2.158	21512.1	21842	1.511	26088.8	26332	0.925
2011	26753.9	26594	0.601	22031	22544	2.276	26852.4	27282	1.575
2012	26191.7	25773	1.625	22565.6	23241	2.906	27639.1	27690	0.184
2013	25640.8	24171	6.081	23115.5	23170	0.235	28448.4	29636	4.007
平均误差率	—	—	5.868	—	—	4.981	—	—	1.571

表 4 中国城镇化SD模型灵敏度分析结果

变量	增10%灵敏度 均值	减10%灵敏度 均值	变量	增10%灵敏度 均值	减10%灵敏度 均值
农村人口出生率	11.49	10.98	城市人口出生率	3.78	3.83
农村计划生育影响因子	11.49	10.98	城市计划生育影响因子	3.78	3.83
教育因子	23.68	5.99	医疗因子	6.1	7.93
农村健康影响因子	3.95	4.01	城市健康影响因子	1.94	1.95
第一产业产值增长率	0.004	0.004	第二产业产值增长率	0.86	0.87
第三产业产值增长率	1.36	1.38	第一产业劳动力增长率	8.35	8.07
第二产业劳动力增长率	0.35	0.36	第三产业劳动力增长率	0.59	0.62
农业劳动生产率增长率	25.58	27.37	第二产业劳动生产率增长率	0.66	0.67
第三产业劳动生产率增长率	0.97	0.96	城市人口最大承载量	2.57	3.11
第一产业最大产值	0	0	第二产业最大产值	0.01	0.01
第三产业最大产值	0.01	0.02	积累率	0.34	0.34

于此同时,中国城镇化进程也由改革开放初期1978年的17.92%增加到2015年的近56.10%,尤其是近些年城镇化水平以年均近1.0%的速度增长,中国已经进入快速城镇化发展阶段.本文数据取于《新中国六十年统计资料汇编》、《全国各省、自治区、直辖市历史统计资料汇编》及历年《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国县(市)社会经济统计年鉴》、《中国固定资产投资统计年鉴》等.城镇化水平预测的研究区以中国大陆国土疆域为界,这主要由于港澳台地区数据获取较为困难,故未将其列入进行模拟研究.

5.2 数据特征与类型

在中国社会经济处于转型时期,影响中国城镇化动力机制的因素不仅涉及人口和劳动力,还涉及经济规模、发展水平,以及相关的资本、资源、教育和卫生等,因而选取的数据分为人口数据、经济数据、社会发展数据等.由于社会经济系统具有复杂的非线性特征,社会经济的数据在时间序列上也多是非线性、非平稳的数据,就本文所需要分析的中国城镇化及相关数据属性来看也是属于非线性的数据.

5.3 模型系统参数设置

本次模拟选取1998~2013年数据,采用以下方法确定模型系统参数: (1) 利用历史统计资料作算术平

均的有: 城市人口出生率(0.0111)、农村人口出生率(0.014)、城市人口死亡率(0.0052)、农村人口死亡率(0.006)、农业劳动力系数(0.436)、第二产业从业系数(0.333)、第三产业从业系数(0.4137)、资本积累率(0.49)、第一产业产值增长率(0.0552)、第二产业产值增长率(0.094)、第三产业产值增长率(0.117)、农业劳动力增长速度(-0.0196)、第二产业从业人员增长率(0.0233)、第三产业从业人员增长率等(0.0276)等; (2) 采用发展趋势法进行推算的有: 农村计划生育影响因子(1.15)、城市计划生育影响因子(1.05)、农村健康影响因子(0.95)、城市健康影响因子(0.92)、医疗因子(0.98)等; (3) 采用表函数确定参数的有: 城市产业劳动力需求因子、城市教育水平因子、城市医疗水平因子; (4) 采用回归法确定参数的有: 城市医生人数、城市中小学教师数、城市中小学学生数等; (5) 采用CD函数求得参数有: 第一(二、三)产业资本和劳动力弹性系数; (6) 采用GM(1, 1)模型修正参数有耕地面积,考虑到运用G(1, 1)模型预测耕地变化时可能会导致预测值与实际值之间的误差会逐渐变大,对此设定了一个阈值,即18亿亩耕地,当预测耕地数值达到18亿亩时,耕地数就不再变化.

5.3.1 GDP增长率

诺贝尔经济学奖得主罗伯特·福格尔(Robert William Fogel)2010年在德国《法兰克福评论报》以“亚洲经济中心: 对中国的预测”为题发表文章, 预测

2030年中国人均GDP将达到85000美元,到2040年中国经济总量将达到123万亿美元.中国专家认为这一预测过于乐观,需要几乎每年10%的GDP增长率,还要再加上人民币汇率升值.2015年以来,中国经济进入转型发展的“新常态”,GDP下行趋势也已经出现,预计GDP年增长率今后将不会超过8%,同时考虑到2013年以来中国产业结构已经由“二、三、一”变为“三、二、一”,第三产业将替代第二产业,成为经济增长的主导产业(刘伟和蔡志洲,2015),中国经济正进入结构性减速时期(韩永辉等,2016).此外1996~2013年中国第一产业产值平均增速仅为4%,据此将中国GDP增长率分为高、中、低不同情境方案.在高方案中将第一、二、三产业产值增速分别设为4%、7%和8%,在中方案中将第一、二、三产业产值增速分别设为3.5%、6.5%和7.5%,在低方案中将第一、二、三产业产值增速分别设为3%、6%和7%.

5.3.2 计划生育政策

2007年中国人口发展战略研究课题组《国家人口发展战略研究报告》预测:“总人口将于2020年达

到14.5亿人,2033年前后达到峰值15亿人左右.”但近年来随着原有的独生子女政策所带来的劳动力短缺,人口老龄化等问题也日益突出,因此现有的计划生育政策已经开始调整.本文利用1998年以来历年《中国人口统计年鉴》和《中国人口和就业统计年鉴》中抽样调查数据,以及2000年第五次人口普查数据,得到1998~2013年城市和农村育龄妇女分孩次的出生数,以及一孩、二孩和三孩及以上数据(网络版附录2).考虑到1998年以来中国一直执行的独生子女政策,如果实行2孩和1.5孩政策则将会对城市和农村计划生育影响因子的作用发生变化,得到2孩政策和1.5孩政策对计划生育影响因子的影响作用式(3)和(4).据此,计算出中国计划生育政策对城镇化影响系数如表5.

2孩政策对计划生育影响因子的作用
$$=1+(-\text{孩数}-\text{二孩数})/-\text{孩数}, \tag{3}$$

1.5孩政策计划生育影响因子的作用
$$=1+(-\text{孩数}/2-\text{二孩数})/-\text{孩数}. \tag{4}$$

通过式(3)和(4)得到1998~2013年历年的城市和农村在2孩政策和1.5孩政策下计划生育政策对中国城镇

表5 中国计划生育政策对城镇化影响系数(1998~2013)

年份	城市地区		乡村地区	
	2孩政策	1.5孩政策	2孩政策	1.5孩政策
1998	1.84	1.34	1.54	1.04
1999	1.86	1.36	1.48	0.98
2000	1.84	1.34	1.50	1.00
2001	1.88	1.38	1.47	0.97
2002	1.86	1.36	1.45	0.95
2003	1.87	1.37	1.47	0.97
2004	1.85	1.35	1.46	0.96
2005	1.75	1.25	1.33	0.83
2006	1.80	1.30	1.42	0.92
2007	1.83	1.33	1.41	0.91
2008	1.83	1.33	1.44	0.94
2009	1.82	1.32	1.44	0.94
2010	1.72	1.22	1.36	0.86
2011	1.77	1.27	1.45	0.95
2012	1.75	1.25	1.42	0.92
2013	1.69	1.19	1.42	0.92
平均值	1.81	1.31	1.44	0.94

化的影响作用,可以看出,在城市地区,2孩政策的影响因子平均为1.81,1.5孩政策影响因子平均为1.31;在农村地区,2孩政策影响因子平均为1.44,1.5孩政策影响因子平均为0.94。因此,可以认为:从“一对夫妇生一个孩子”计划生育政策调整为1.5孩,对中国城镇化的影响不大,当上升到2.0孩时将会产生较大的影响。

5.4 情景模拟

中国城镇化SD模型采用Ventana Systems, Inc. (Harvard, MA, USA)功能齐全的系统动力学软件包Vensim1 PLE进行仿真模拟。所选的单位时限是一年,进行为期35年的系统模拟运行,为中期预测,具有较高的准确度。模拟以2013年为起始年份,则相关状态变量的起始值为2013年相应值,运用现有中国城镇化系统动力模型对不同人口政策和GDP增长趋势条件下对2013~2050年中国城镇化进行进行情景模拟,进而分析不同政策条件下2013~2050年间中国城镇化水平的变化趋势,从而找出不同政策对中国城镇化进程的影响程度,为国家宏观决策提供科学支撑。

5.4.1 情景1, GDP高增长率和一孩计划生育政策

假设现有一孩的计划生育政策不变, GDP增长率采用高增长方案,即现有的农村和城市的计划生育影响因子不变,第一、二、三产业产值增速为4%、7%和8%,进行2013~2050年中国城镇化进程的情景预测。从图4和表6可见,在GDP高增长和一孩计划生育政策下,2035年以后中国城镇化率将达到70%以上,到2050

中国城镇化率将达到77.0765%。

5.4.2 情景2, GDP低增长率和二孩计划生育政策

假设实行二孩的计划生育政策, GDP增长率采用低增长方案,则对现有的农村和城市的计划生育影响因子的作用程度分别提升1.44和1.81倍,第一、二、三产业产值增速为3%、6%和7,进行2013~2050年中国城镇化进程的情景预测。从图4可见,在GDP低增长率和二孩计划生育政策下,2035年以后中国城镇化率将达到70%以上,到2050中国城镇化率将达到76.8673%。

5.4.3 情景3, GDP中增长率和1.5孩家庭

假设实行1.5孩的计划生育政策, GDP增长率采用中增长方案,则对现有的农村计划生育影响因子作用程度变为0.94,而对城市的计划生育影响因子的作用程度提升1.31倍,第一、二、三产业产值增速为3.5%、6.5%和7.5%,进行2013~2050年中国城镇化进程的情景预测。从图4可见,在GDP中增长率和1.5孩计划生育政策下,2030年以后中国城镇化率将达到70%以上,到2050中国城镇化率将达到79.8624%。

5.4.4 情景4, GDP低增长率和1.5孩家庭

假设实行1.5孩的计划生育政策, GDP增长率采用低增长方案,则对现有的农村计划生育影响因子作用程度变为0.94,而对城市的计划生育影响因子的作用程度提升1.31倍,第一、二、三产业产值增速为3%、6%和7%,进行2013~2050年中国城镇化进程的情景预测。从图4可见,在GDP低增长率和1.5孩计划生育政策

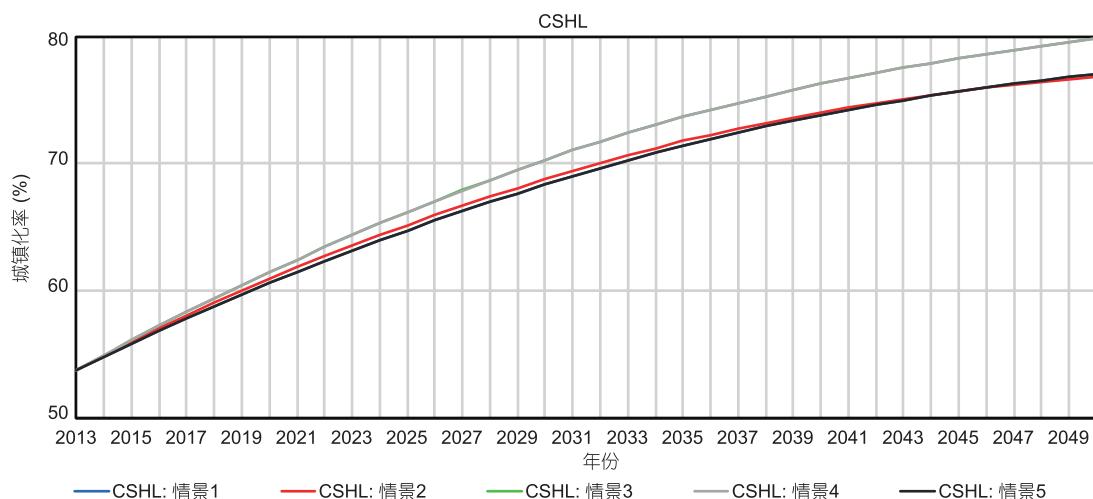


图4 不同情景下的中国城镇化水平(2013~2050年)

表6 中国主要年份不同情景城镇化水平预测值(2015~2050)

方案	情景	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	GDP高增长, 1.0孩政策	55.8625	60.613	64.7493	68.3447	71.4142	73.8208	75.6662	77.0765
2	GDP低增长, 2.0孩政策	55.9801	60.9496	65.1846	68.7679	71.773	74.0341	75.6839	76.8673
3	GDP中增长, 1.5孩政策	56.121	61.4804	66.1899	70.3022	73.6693	76.2679	78.2901	79.8624
4	GDP低增长%, 1.5孩政策	56.1207	61.4799	66.1885	70.3009	73.6681	76.2668	78.289	79.8614
5	GDP低增长%, 1.0孩政策	55.8621	60.6123	64.747	68.3424	71.4119	73.8186	75.6641	77.0745
6	GDP高增长%, 1.5孩政策	56.121	61.4806	66.1908	70.3032	73.6701	76.2687	78.2908	79.8631
7	GDP高增长%, 2.0孩政策	55.9804	60.9503	65.1866	68.7699	71.7749	74.036	75.6857	76.869
8	GDP中增长%, 1.0孩政策	55.8625	60.6128	64.7483	68.3437	71.4132	73.8199	75.6653	77.0756
9	GDP中增长%, 2.0孩政策	55.9804	60.9501	65.1858	68.7691	71.7741	74.0352	75.685	76.8683

下, 2030年以后中国城镇化率将达到70%以上, 到2050中国城镇化率将达到79.8614%.

5.4.5 情景5, GDP低增长率和1.0孩家庭

假设继续实行1孩的计划生育政策, GDP增长率采用低增长方案, 则对现有的农村(城市)计划生育影响因子作用程度不变, 第一、二、三产业产值增速为3%、6%和7%, 进行2013~2050年中国城镇化进程的情景预测. 从图4可见, 在GDP低增长率和1孩计划生育政策下, 2035年以后中国城镇化率将达到70%以上, 到2050中国城镇化率将达到77.0745%.

5.5 模拟结果

除了上述五种情景外, 也对未来不太可能出现的四种情景进行了系统模拟, 中国主要年份不同情景城镇化水平预测值(2015~2050)如表6所示. 从2013~2050年不同计划生育人口政策和GDP增长率的假设条件看, 中国城镇化水平, 到2035年都将达到70%以上, 到2050年都将达到75%甚至以上, 这也与国外发达国家的城镇化历程相一致. 从国外城镇化研究的有关理论和实践也证明, 城镇化发展过程是呈现“S”型曲线, 当城镇化率达到70%以后将会进入城镇化稳定发展阶段, 是城镇化发展的一般趋势和规律, 当前国外发达国家的城镇化发展历程来看当前已经普遍进入到这一阶段. 从计划生育人口政策和GDP增长率对中国城镇化作用程度来看, 显然计划生育人口政策对中国城镇化影响大于GDP的影响. 从不同计划生育人口政策对中国城镇化影响程度看, 1.5孩政策对中国城镇化作用程度更显著, 其次为现有的1孩政策, 反而2孩政策

对中国城镇化影响相对较小.

6 结论

本文通过构建中国城镇化SD模型进行过程模拟, 可以得出如下结论:

(1) 采用1998~2013年数据进行系统存流量检验和系统灵敏度分析, 结果显示中国城镇化SD模型有效且具有实际仿真的可操作性. 按此模型系统仿真显示, 中国城镇化至少还再需要20年以上才能基本完成这一过程. 可以认为: 中国城镇化将是一个比较长期的社会过程, 不是政府短期可以实现的目标.

(2) 运用1998~2013年数据和系统参数进行中国城镇化过程多情景模拟(2013~2050)显示, 中国趋向稳定状态的城镇化水平是2035年左右达到70.0~72.0%.

(3) 从经济增长和社会发展两方面看, 显然计划生育人口政策对中国城镇化影响大于GDP增长的影响. 从计划生育人口的本身政策看, 一个家庭生1.5孩会对中国城镇化影响较大, 2.0孩的影响反而相对较小.

(4) 到2050年, 中国城镇化水平将达到75%左右, 中国也将进入稳定和饱和的城镇化社会状态.

综上所述, 可以认为: 中国城镇化过程是一个长期的社会发展过程, 还需要至少20年以上才能基本完成这一社会转型过程. 中国城镇化水平最终的饱和状态在75~80%, 在长远的未来仍将有20~25%的人口分布在广大农村地区.

致谢 本文得到国家自然科学基金重大项目课题“特大城市群地区城镇化与生态环境交互胁迫的动力学模型与阈

值测算”和清华大学自主科研计划项目“京津冀巨型城市群可持续发展的多学科理论框架与数据模型系统研究”资助,文章2015年10月24~25日渥太华大学主办的“中国-非洲城镇化国际研讨会”(the Symposium on Rethinking Sino-African Urbanization)报告,特此致谢。

参考文献

- 蔡林. 2008. 系统动力学在可持续发展研究中的应用. 北京: 中国环境科学出版社
- 陈明, 王凯. 2013. 我国城镇化速度和趋势分析——基于面板数据的跨国比较研究. 城市规划, 37: 16–21, 60
- 高春亮, 魏后凯. 2013. 中国城镇化趋势预测研究. 当代经济科学, 35: 85–90
- 顾朝林. 1992. 中国城镇体系: 历史、现状和展望. 北京: 商务印书馆. 334–350, 340, 348–350
- 国务院发展研究中心, 世界银行. 2014. 中国推进高效、包容、可持续的城镇化. 北京: 中国发展出版社. 35
- 韩永辉, 黄亮雄, 邹建华. 2016. 中国经济结构性减速时代的来临. 统计研究, 33: 23–33
- 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 李晓兵, 李京, 李月臣, 李景刚. 2005. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 464–473
- 何红波, 潘毅刚, 陈利华. 2006. 关于构建区域能源需求预测模型系统的初步思考. 预测与分析, (23): 3–5
- 胡秀莲. 2013. 城镇化与城市低碳转型实践. 见: 王伟光, 郑国光, 编. 应对气候变化报告(2013): 聚焦低碳城镇化. 北京: 社会科学文献出版社. 101
- 贾仁安, 丁荣华. 2002. 系统动力学——反馈动态性复杂分析. 北京: 高等教育出版社. 22–25, 250–254
- 经济学人智库中国研究团队. 2014. 2030年的中国城镇化. 中国经济报告, (7): 93–98
- 李强, 顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究. 中国科学: 地球科学, 45: 290–304
- 刘伟, 蔡志洲. 2015. 我国工业化进程中产业结构升级与新常态下的经济增长. 北京大学学报(哲学社会科学版), 52: 5–19
- 裴同英, 张宏伟, 张雪花, 雷鸣. 2010. 基于系统动力学和灵敏度模型的生态校园物流分析. 四川环境, 29: 64–67
- 沈体雁, 吴波. 2006. CGE与GIS集成的中国城市增长情景模拟框架研究. 地球科学进展, 21: 1153–1163
- 王其藩. 1994. 系统动力学. 北京: 清华大学出版社. 285
- 夏冰, 胡坚明, 张佐, 姚亚丹. 2002. 基于多智能体的城市交通诱导系统可视化模拟. 系统工程, 20: 72–78
- 徐匡迪. 2013. 中国特色新型城镇化发展战略研究(综合卷). 北京: 中国建筑工业出版社
- 徐毅, 孙才志. 2008. 基于系统动力学模型的大连市水资源承载力研究. 安全与环境学报, 8: 71–74
- 薛冰, 宋新山, 严登华. 2011. 基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测. 南水北调与水利科技, 9: 43–47
- 薛领, 杨开忠. 2002. 复杂性科学理论与区域空间演化模拟研究. 地理研究, 21: 79–88
- 袁嘉新, 王人清, 尹才喜, 袁子法. 1987. 系统论在区域规划中的应用. 北京: 社会科学文献出版社. 179–181
- 张雪花, 张宏伟, 张宝安. 2008. SD法在城市需水量预测和水资源规划中的应用研究. 中国给水排水, 24: 42–46
- 周天勇. 1994. 劳动与经济增长. 上海: 上海三联书店, 上海人民出版社. 61–71
- Allen P M, Boon F, Engelen G, Sanglier M. 1984. Modeling evolving spatial choice patterns. Appl Math Comput, 14: 97–129
- Armah F A, Yawson D O, Pappoe A A N M. 2010. A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. Sustainability, 2: 252–265
- Batten D. 1982. On the dynamics of industrial evolution. Region Sci Urban Econ, 12: 449–462
- Batty M. 2005. Agents, cells, and cities: New representational models for simulating multiscale urban dynamics. Environ Plann A, 37: 1373–1394
- Bockermann A, Meyer B, Omann I, Spangenberg J H. 2005. Modelling sustainability. J Policy Model, 27: 189–210
- Chan K W, Hu Y. 2003. Urbanization in China in the 1990s: New definition, different series, and revised trends. China Rev, 3: 49–71
- Chang Y C, Hong F W, Lee M T. 2008. A system dynamic based DSS for sustainable coral reef management in Kenting coastal zone, Taiwan. Ecol Model, 211: 153–168
- Egilmez G, Tatari O. 2012. A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact. Transport Res A-Pol, 46: 1086–1096
- Forrester J W. 1969. Urban Dynamics. Cambridge: MIT Press
- Forrester J W. 1971. World Dynamics. Lawrence: Wright-Allen Press
- Georgiadis P, Besiou M. 2008. Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A system dynamics approach. J Cleaner Prod, 16: 1665–1678
- Georgiadis P, Vlachos D, Iakovou E. 2005. A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. J Food Eng, 70: 351–364
- Guan D, Gao W, Su W, Li H, Hokao K. 2011. Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics—Geographic information system model. Ecol Indicators, 11: 1333–1344
- Guo H C, Liu L, Huang G H, Fuller G A, Zou R, Yin Y Y. 2001. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. J Environ Manage, 61: 1–11

- 61: 93–111
- Haghshenas H, Vaziri M, Gholamialam A. 2015. Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45: 104–115
- Jin W, Xu L, Yang Z. 2009. Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the Ecological Footprint. *Ecol Econ*, 68: 2938–2949
- Liu Y, Lv X, Qin X, Guo H, Yu Y, Wang J, Mao G. 2007. An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. *Landscape Urban Plan*, 82: 233–246
- Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens W. 1972. *The Limits to Growth: A Report to the Club of Rome (1972)*. New York: Universe Books
- Mohapatra P, Mandal P, Bora M. 1994. *Introduction to System Dynamics Modeling*. Hyderabad: Orient Longman Ltd.
- Northam R M. 1975. *Urban Geography*. New York: John Wiley & Sons
- Portugali J. 2000. *Self-Organization and the City*. Berlin: Springer-Verlag
- Pumain D, Saint-Julien T, Sanders L. 1986. Urban dynamics of some French cities. *Eur J Oper Res*, 25: 3–10
- Qiu Y, Shi X L, Shi C H. 2015. A system dynamics model for simulating the logistics demand dynamics of metropolitans: A case study of Beijing, China. *J Ind Eng Manage*, 8: 783–803
- Shen T Y, Wang W D, Hou M, Guo Z C, Xue L, Yang K Z. 2007. Study on spatio-temporal system dynamic models of urban growth. *Syst Eng-Theor Practice*, 27: 10–17
- Sterman J. 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill. 982
- Tong L, Dou Y. 2014. Simulation study of coal mine safety investment based on system dynamics. *Int J Mining Sci Tech*, 24: 201–205
- Venkatesan A K, Ahmad S, Johnson W, Batista J R. 2011. Systems dynamic model to forecast salinity load to the Colorado River due to urbanization within the Las Vegas Valley. *Sci Total Environ*, 409: 2616–2625
- Wolstenholme E F. 1983. Modeling national development program—An exercise in system description and qualitative analysis using system dynamics. *J Oper Res Soc*, 34: 1133–1148
- Xu Z, Coors V. 2012. Combining system dynamics model, GIS and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development. *Build Environ*, 47: 272–287
- Ying Q, Shi X L, Shi C H. 2015. A system dynamics model for simulating the logistics demand dynamics of metropolitans: A case study of Beijing, China. *J Ind Eng Manage*, 8: 783–803
- Zeleny M. 1980. *Autopoiesis, Dissipative Structures and Spontaneous Social Orders*. Boulder: Westview Press
- Zhou W, Mi H. 2009. Systems dynamics of future urbanization and energy-related CO₂ emissions in China. *Wseas Transactions on Systems*, 8: 1145–1154