基于系统动力学模型的扬州市土地利用结构多情景模拟与实现

胡宗楠[1,2], 李 鑫[1,2], 楼淑瑜[1], 康建荣[2]

(1.江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 2.江苏师范大学 土地资源研究所, 江苏 徐州 221116)

摘 要:[目的] 对江苏省扬州市未来土地利用结构进行多情景预测模拟,并探索不同情景下各目标土地利用结构的实现路径,为土地利用规划方案制定与管理提供科学依据。[方法] 采用系统动力学(SD)模型模拟土地利用系统开展研究。[结果] 在不同情景下几类主要用地差异明显,耕地面积在耕地保护情景下较高,而在生态保护与经济发展情景下耕地缓慢下降;城镇工矿用地与交通水利用地面积在 3 种情景下均获得稳定增长,但经济发展情景下的增长快于其他 2 个情景;林地面积在生态保护情景下出现大幅上升,在另外 2 个情景下则基本保持不变甚至小幅下降。结合各情景指标设定可得出,耕地保护情景下,除控制城镇扩张占用耕地外,还要加强未利用地开发与农村居民点整理以补充耕地;生态保护情景下,则需加强植树造林、保护好具有丰富生态服务价值的水域、滩涂用地。[结论] SD 模型不仅可模拟不同情景下土地利用变化,还可将土地利用与社会经济系统之间的复杂非线性关系显化,有利于土地资源可持续利用调控。

关键词:系统动力学; 土地利用结构; 模拟; 多情景分析; 扬州市

文献标识码:B **文章编号**:1000-288X(2017)04-0211-08 **中图分类号**:K903

文献参数:胡宗楠, 李鑫, 楼淑瑜, 等. 基于系统动力学模型的扬州市土地利用结构多情景模拟与实现[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 211-218. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.036; Hu Zongnan, Li Xin, Lou Shuyu, et al. Multi-scenario simulation of land use structure of Yangzhou City based on systems dynamics model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 211-218. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.036

Multi-scenario Simulation of Land Use Structure of Yangzhou City Based on Systems Dynamics Model

HU Zongnan[1,2], LI Xin[1,2], LOU Shuyu[1], KANG Jianrong[2]

(1. *School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu* 221116, *China*; 2. *Institute of Land Resource, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu* 221116, *China*)

Abstract: [Objective] This manuscript aimed to simulate and forecast the land use structure under multiple development scenarios of Yangzhou City in Jiangsu Province, as well as to explore the paths to realize them, which were expected to provide considerable scientific references for land use planning and formulating. [Methods] The system dynamics(SD) model was used to simulate the land use system. [Results] The main land use types would vary under different scenarios. Under the protection of farmland scenario, the arable land area would increase; while under the ecological protection and economic development scenarios, the arable land would decline slowly. Either urban industrial and mining land, or land for traffic or water conservancy area would achieve stable growth in all three scenarios, but the growth in the economic development scenario would be quicker than that under the other two scenarios. The forest land area increase sharply under the scenario of ecological protection, but remain would not change or even decrease slightly in the other two scenarios. Under the scenario of farmland protection, urban expansion and the occupation of cultivated

收稿日期:2016-11-07 **修回日期**:2016-11-09

资助项目:江苏省自然科学基金项目"不确定条件下区域土地资源优化配置方法研究"(BK20140236); 大学生创新计划项目(XSJCX7013)

第一作者:胡宗楠(1993—),男(汉族),浙江省宁波市人,硕士研究生,研究方向为土地利用规划管理。E-mail:zongnan_hu@163.com。

通讯作者:李鑫(1986—),男(汉族),山东省临沂市人,博士,副教授,主要从事土地利用方面的研究。E-mail:topzcg@126.com。

land should be under control. Besides that, unused land development and rural residential land consolidation should be strengthened to replenish cultivated land. In the ecological protection scenario, the ecological service value of waters, beaches should be protected. This might help to adjust industrial structure, and transform the traditional GDP to green GDP. [Conclusion] SD model can not only simulate the land use change under different scenarios, but also can reveal the complex nonlinear relationship between land use and socio-economic system, which is conducive to the sustainable use of land resources regulation.

Keywords: system dynamics; land use structure; simulation; scenarios analyses; Yangzhou City

土地利用结构是区域社会经济活动进行土地利用的结果,体现着区域可持续发展状况。在现代管理社会中,土地利用结构不仅是人类活动的结果,更作为政策工具指导人类社会经济活动,以实现可持续发展目标[1-2]。比如土地利用规划的核心就是土地利用结构优化,通过结构优化使各部门用地处于优化水平,进而促进相应社会经济活动处于优化配置状态[3-4]。因此越来越多的研究关注土地利用结构,研究其变化的复杂过程及优化方法等,目的是为了增加对土地利用系统演化的了解,以更加有效地调整土地利用系统或得到一个优化的土地利用结构方案以作为管理依据来指导人类活动。对土地利用结构的研究总体上分为两部分:一是应用运筹学中的各种优化模型进行土地利用结构优化[5-7];二是对土地利用结构模拟预测。土地利用结构优化的一个相对不足是其仅得到一个优化方案,但并没有告诉人们实现这个优化方案的路径,没有探明如何从现状土地利用结构演化到了优化目标结构,其中应采取什么政策控制哪些指标来实现目标土地利用结构,于是对土地利用管理的实践意义有限,这主要是因为没有揭示土地利用系统内在运行机制。土地利用结构模拟主要是用马尔科夫链、人工神经元网络与系统动力学模型(SD)等方法,马尔科夫链只是按不同用地间的历史转化概率推演未来土地利用结构[8];人工神经元网络虽然考虑了社会经济等驱动因子,但把土地利用与社会经济因素间的关系"黑箱化"[9-10],且没有考虑土地利用对社会经济的反向作用。系统动力学模型可以克服上述不足,可对土地利用系统内复杂的非线性关系进行模拟,不仅考虑了驱动因子对土地利用结构的影响,还考虑土地利用对社会经济的反作用,从系统视角真实反映了区域土地利用系统的变化过程,并且最主要优势是可进行动态模拟,即可清楚体现土地利用结构的动态变化过程及相关变量因子大小,这对于土地利用管理调控具有重要意义[11-16]。

本研究采用 SD 模型对扬州市土地利用结构进行多情景模拟,并据此阐述不同情景下土地利用结构的实现路径,以为扬州未来土地利用战略制定提供切实参考。虽然已有文献用 SD 模型进行土地利用结构模拟,但对这一主题的研究还相对较少,并且模型构建时很少考虑土地利用对社会经济的反馈作用,同时也没有探索不同情景下土地利用结构的实现路径,使得对土地利用管理调控的借鉴作用有限。

本研究首先介绍研究区概况与数据来源,分析土地利用系统的运行过程并构建因果关系图,然后构建土地利用系统的流图与变量方程,并进行模型验证,最后定义扬州市未来发展可能的几种主要情景,用 SD 模型模拟不同情景下的土地利用结构,并根据模拟过程阐述实现这些土地利用结构的路径,为扬州市土地利用管理与调控提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

扬州市位于江苏省中部,长江下游北岸,处于京杭大运河与长江交汇处,是长三角城市群城市。扬州市环境宜人,景色秀美,是全国文明城市、联合国人居奖城市与中国首批历史文化名城,具有明显生态优势。2015 年扬州市实现 GDP 4 016.84 亿元,全市户籍人口 461.12 万人,人均 GDP 为 8.7 万元,处于中等收入水平。该市土地总面积 6.59×10^5 hm^2,其中 2014 年耕地为 2.836×10^5 hm^2,占总面积的 43.02%,城乡建设用地 1.048×10^5 hm^2,占总面积的 15.88%,未利用地(包括水域及其他未利用土地) 1.089×10^5 hm^2,占总面积的 16.52%。近年来在全国经济增长放缓背景下,扬州市却保持着年均 10% 以上增长率,未来 10 a 仍然是扬州市发展的关键时期,经济数量将达到8 000~9 000 亿元,农村人口继续向城镇转移,且随着人口"二胎"政策放开,其人口总量会增加,这些社会经济变化都会对土地利用结构产生深刻影响。扬州市有限的土地资源一方面要支撑城镇化建设,另一方面还要保障上级政府安排的耕地保护任务,同时还要进行生态环境保护,以保持扬州生态环境优势。可见,十分有必要对扬州市土地利用结构的演变进行调控,以促进其社会经济及可持续发展目标实现。本研究用 SD 模型对扬州市 2025 年

土地利用结构进行多情景预测模拟,并探索不同情景下目标土地利用结构的实现路径,以为土地利用规划方案制定与管理提供科学依据。

土地利用结构变化与社会经济等各方面相关,于是本研究需要大量相关数据,主要分为土地数据与社会经济数据两类,土地数据不仅包括历年不同用地类型数量还包括土地整治、退耕还林、土地征用、等数据;社会经济数据主要指人口、经济、固定资产投资以及不同类型用地产出等。土地数据来源于扬州市国土资源局的相关资料,社会经济数据来源于历年《江苏统计年鉴》、《扬州统计年鉴》等。

2　模型构建

SD 模型构建的基本思路是先分析所研究系统的复杂反馈过程,并把这种过程用因果关系图表示出来;其次确定系统的变量及变量之间的方程关系,并把因果关系图转换为流图。该流图可在软件中直接运行。最后多次调试相关变量进行模型验证,直到模型精度达要求方可用于模拟预测[17-18]。

本文正是按照该思路构建的扬州市土地利用结构模拟的 SD 模型。

2.1　土地利用系统运行阐述与因果关系图构建

广义土地利用系统包括土地资源、社会经济与生态等不同方面,系统内的要素互相作用反馈,最终导致了土地利用结构变化。

土地利用系统运行基本框架是社会经济因素首先引起土地利用变化,即不同用地类型间的转换,而同时土地利用又反过来对社会经济产生影响,本文将阐述广义土地利用系统的运行过程,并绘制因果关系图表示之(图 1)。

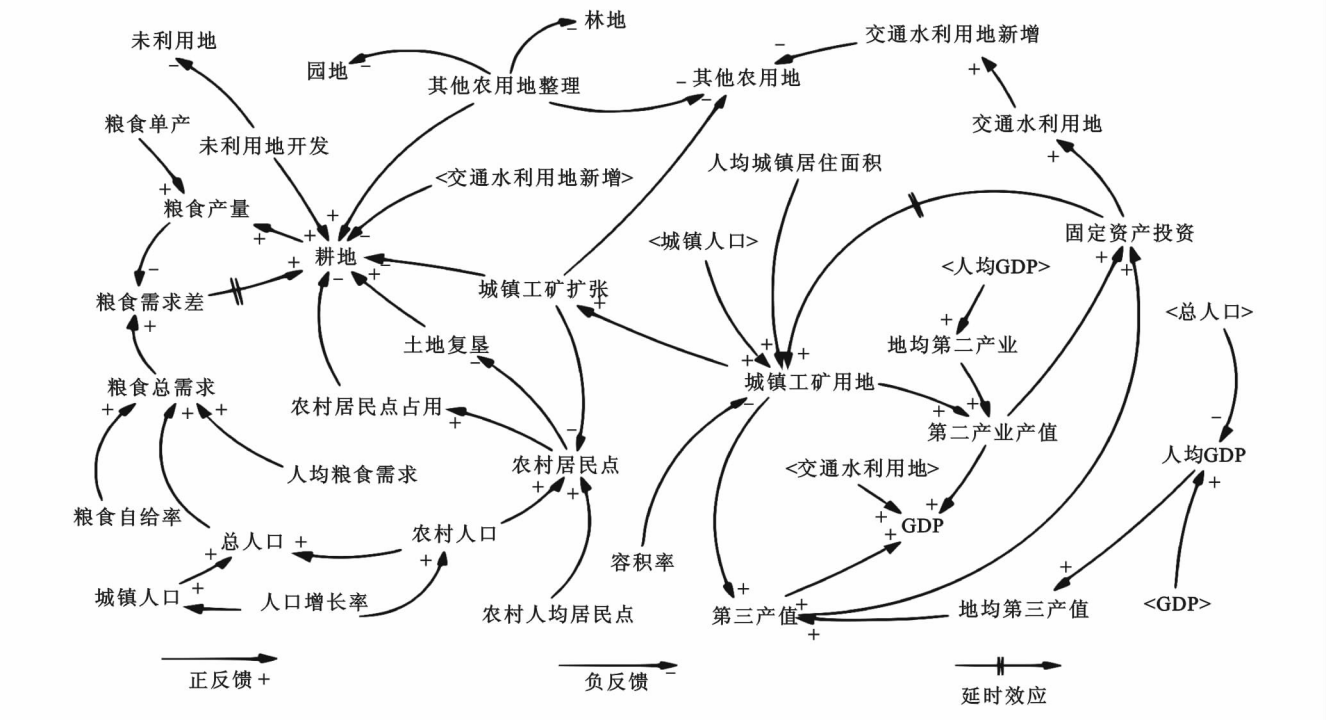


图 1　扬州市土地利用结构变化的因果关系图

本研究将土地利用分为耕地、园地、林地、其他农用地、城镇工矿用地、农村居民点用地、交通水利用地、未利用地 8 类。

对于耕地,其在相关农业要素投入基础上可生产粮食来供养人口,当人口数量增加或人们生活水平提高时,粮食需求量增加,这导致耕地数量增加,而农业要素投入则受经济发展水平影响;当然其中考虑了粮食自给率影响,并把其作为主要调控因子;而新增耕地是通过农村居民点整理、未利用地开发、其他农用地整理及工矿地复垦等方式获得。对于农村居民点用地,主要受农村人口数量及人均居住面积两方面影响,而人均居住面积又受生产生活方式影响,农村居民点扩张会占用耕地及其他农用地。对于城镇工矿用地,其作为投入要素可产生非农产值,非农产值又几经转化为固定资产投资,而固定资产投资又带来城镇工矿用地扩张,同时城镇工矿用地又受城镇人口数量及人均居住面积、容积率影响;其中根据内涵式经济增长理论,经济增长带来研发投入增加,于是导致技术水平进步,因此会影响地均 GDP 产出能力与农业生产效率;城镇土地扩张通常是通过占用耕地、农

村居民点及其他农用地来进行的。对于交通水利用地，固定资产投资导致其数量增加，固定资产投资受非农产值影响，而交通水利用地增加又带来非农产值增加，同样新增交通水利用地主要占用耕地与其他农用地。对于园地与林地变化，主要从农业结构调整的市场驱动方面进行分析，当水果类与林业的单位经济效益大于粮食时，园地与林地就增加。对于其他农用地与未利用地，论文只考虑该两类用地转化为其他用地情况。根据上述分析在软件 Stella 中构建土地利用系统运行的因果关系图，该图是下文建立流图的关键，从中可发现土地利用系统运行的反馈回路及不同要素间的关系，直观体现土地利用系统运行过程。

2.2 土地利用结构变化的 SD 流图

流图是用系统动力学语言把因果关系图表示出来，以便于模拟。流图基本上可分为 2 个层次，外层是用专门变量符号组成可视化流程图，内层是将外层所绘制的不同变量的联系用方程数量化。下面流图中共有 3 类变量，即流变量、栈变量与转换器变量，流变量用于控制要素流动量大小，栈变量则表示要素最终数量，两者具有相同量纲，转换器变量则用来描述相关影响因素，一般与前两类变量的量纲不同，需注意的是转换器只能影响流变量不能直接作用于栈变量。本研究构建的扬州土地利用结构变化 SD 模型共有 45 个变量，其中栈变量 10 个，流变量 12 个，转化器变量 23 个(表 1)。

图 2 为 SD 模拟的流图，表示各变量间的逻辑关系及社会经济与土地利用变化如何相互驱动，其中左边部分是土地利用变化，右边是社会经济因素。首先社会经济因素变化导致土地利用变化，而土地利用由于受有限性约束又反过来影响社会经济变化，如粮食需求紧缺可能对人口产生影响，城镇土地不足又可能对经济数量与结构有影响，整个系统就是在这种不断相互作用中上升。

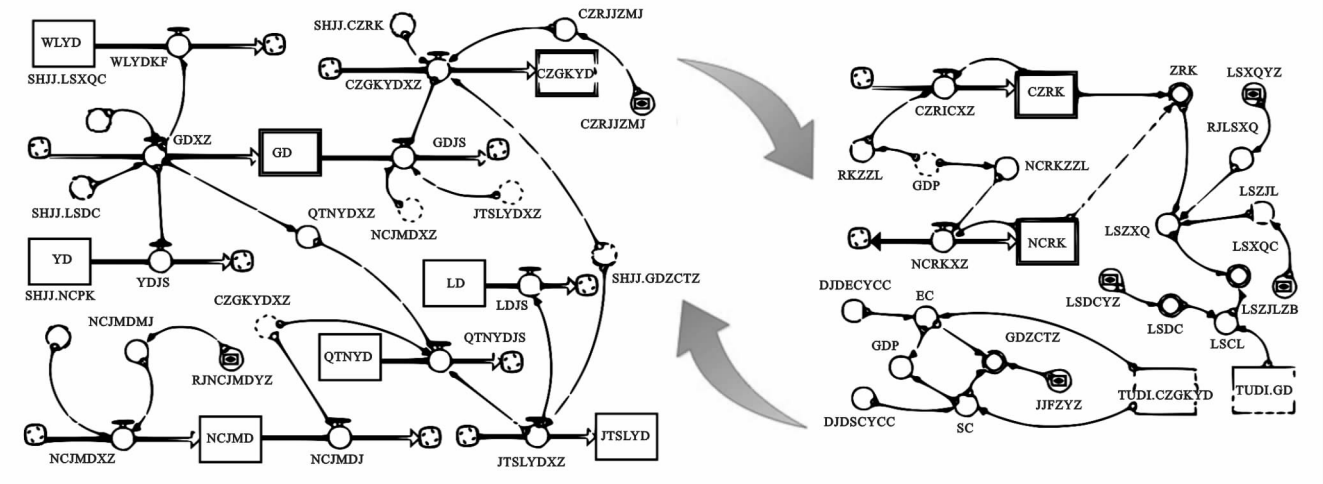
需说明的是为了勾勒系统的总体结构，即把系统分为土地利用与社会经济两部分，图 2 中出现了一些 Ghost 变量，比如栈变量 GD 在左边部分中表示耕地数量，而右边社会经济系统也需要该变量，于是用 Ghost 工具把该变量复制到右边。系统动力学模型的内层是不同变量间的关系方程，采用 2009—2014 年历史数据简单回归得到某些关系方程，当然对于全部调控参数，论文都不断尝试，直到模型验证结果满意为止。

表 1 扬州市土地利用结构变化 SD 模拟的相关变量

	变量符号	变量名称		变量符号	变量名称		变量符号	变量名称
栈变量	WLYD	未利用地	流变量	YDJS	园地减少	转换器变量	EC	第二产值
	CZGKYD	城镇工矿用		LDJS	林地减少		SC	第三产值
	GD	耕地		QTNYDJS	其他农用地减少		GDP	国民生产总值
	YD	园地		NCJMDXZ	农村居民点新增		GDZCTR	固定资产投入
	LD	林地		NCJMDJS	农村居民点减少		JJFZYZ	经济增长率
	QTNYD	其他农用地		JTSLYDXZ	交通水利新增		LSCL	粮食产量
	NCJMD	农村居民点		CZRKXZ	城镇人口新增		LSDC	粮食单产
	JTSLYD	交通水利用地		NCRKXZ	农村人口新增		LSDCYZ	粮食单产增速
	CZRK	城镇人口	转换器变量	CZRJJZMJ	城镇人均居住面积		LSXQC	粮食需求差
	NCRK	农村人口		RJNCJMD	人均农村居民点		LSXQYZ	人均粮食需求增速
流变量	WLYDKF	未利用地开发		QTNYDXZ	其他农用地新增		LSZJL	粮食自给率
	CZGKYDXZ	城镇工矿新增		NCRKZZL	农村人口增长率		LSZJLZB	粮食自给率指标
	GDXZ	耕地新增		CZRKZZL	城镇人口增长率		LSZXQ	粮食总需求
	GDJS	耕地减少		DJDECYCC	地均第二产值		RJLSXQ	人均粮食需求
				DJDSCYCC	地均第三产值		ZRK	总人口
							RJL	城镇容积率

2.3 模型验证

本研究构建了流图，并设置了其中的变量方程与相关参数，下面用该模型以 2009 年为基期模拟 2014 年扬州市土地利用结构，并与真实的 2014 年数据对比验证模型的模拟效果，结果详见表 2。可见相对误差在 1%内，传统认为模拟精度在 5%以内即可，于是可认为构建的 SD 模型具有较高的模拟精度，其结构合理、逻辑可行，是用于目标年不同情景下土地利用结构模拟预测的有效工具，下文用该模型模拟扬州市 2025 年不同情景下土地利用结构。



注:各变量中文名称详见表 1。

图 2　扬州市土地利用结构变化 SD 模拟的流图

表 2　SD 模型模拟的验证结果　　hm^2

项目	耕 地	园 地	林 地	其他农用地	城镇工矿用地	农村居民点	交通水利用地	未利用地
2009 年面积	284 709	13 381	5 179	124 964	36 690	63 392	20 430	110 376
2014 年面积	284 223	12 817	5 092	120 606	41 108	64 486	22 079	108 711
预测数据	283 557	12 859	5 143	121 127	40 870	63 979	22 253	109 333
绝对误差	666	(43)	(50)	(521)	238	507	(174)	(623)
相对误差	0.002 3	−0.003 3	−0.009 9	−0.004 3	0.005 8	0.007 9	−0.007 9	−0.005 7

3　多情景下土地利用结构模拟预测及实现路径分析

3.1　扬州市不同发展情景定义

扬州市未来发展面临着众多不确定性,意味着其有不同发展趋势,提前判定不同趋势下扬州市土地利用结构并分析实现该些土地利用结构的路径对土地利用管理具有重要意义。扬州市土地利用的基本矛盾是“三生”用地需求间的矛盾,即有限土地资源既要用于保护耕地与生态空间,又要支持城镇扩张,扬州是典型粮食主产区,担负着该省粮食供给任务,同时扬州名胜古迹、水域众多,生态环境敏感,有大片地区需要划入生态保护范畴,而最近几年扬州市经济又发展强劲,年均增长率均在 10%以上,对土地资源需求旺盛。从关键矛盾出发把扬州市未来发展情景划分为耕地保护、生态保护与经济发展 3 类。情景模拟最关键的是识别不同情景的主要指标,由各指标值来定义每一情景的内容,本研究认为耕地保护情景的标示指标是粮食自给率,经济发展情景主要是 GDP 增速与二三产值比重,而生态保护情景则主要是未利用地开发量与林地数量,主要因未利用地主要包括了水域、滩涂等具有丰富生态服务价值,具体指标的大小设置详见表 3。

本文指标设置参考了 3 种数据:扬州市发展的历史数据、扬州市“十三五”目标数据以及与扬州市发展轨迹相似的苏南地区数据。对 GDP 指标设置,根据历史数据预测扬州未来 GDP 增速的上限为 10%,而若考虑到扬州市未来经济转型及资源束缚压力,本文选择 7%作为扬州 GDP 增速的下限,因为苏南地区在经济转型压力下 GDP 增长率在长期维持在 7%左右。对于粮食自给率指标,扬州市作为江苏省粮食主产区,历年粮食自给率 1.4 左右,假定未来耕地不再流失,又考虑农业技术进步情况下,则耕地保护情景下粮食自给率设为 1.5,进一步强化其粮食生产功能。但随着经济建设对农用地占用,结合国土“十三五”规划目标,通过预测其粮食自给率最低不小于1.1 于是将经济发展模式下的粮食自给率设为 1.1,粮食安全模式下的粮食自给率设为区间上限 1.5,而生态安全模式下设为 1.3。对于二三产比值,2014 年扬州为 0.93,未来大趋势是三产比重进一步提高,经济发展情景下,参考“十三五”规划指标与苏南地区产业结构,把其定为 0.84,生态保护与耕地保护情景下,二三产比重则是稍有改善为 0.91。对于不同情景下的林地数量与未利用地开发量,主要依据森林覆盖率指标及生态用地保护面积等指标来确定。

表 3 扬州市不同发展情景下关键指标数值确定

项 目	粮食自给率	GDP 增速/%	二三产业比值	未利用地开发量/hm²	林地数量/hm²
耕地保护情景	1.5	7	0.91	8 500	4 500
经济发展情景	1.1	10	0.84	3 000	4 500
生态保护情景	1.3	7	0.91	1 000	6 000

3.2 不同情景下土地利用结构模拟预测

分别把表 3 中不同情景的关键指标值代入所构建的 SD 模型，模拟不同情景下 2025 年扬州市土地利用结构，模拟结果如图 3 所示。由图 3 可以发现，3 种情景下土地利用结构差异明显，2025 年耕地保护情景下耕地数量为 3.0×10^5 hm²，而经济发展情景及生态保护情景下耕地数量分别为 2.61×10^5 hm²，2.67×10^5 hm²，这主要由于粮食自给率及 GDP 增速的差异引起，耕地保护情景下粮食自给率较大且经济增长对耕地占用的压力小，因此使其数量维持在高位。2025 年城镇工矿用地在经济发展情景下是 5.95×10^4 hm²，耕地保护情景下是 5.28×10^4 hm²，两者相差 6 700 hm²，主要由 GDP 差异导致，经济发展情景下 GDP 增速 10%，而其他情景下仅为 7%，经济增加导致了城镇工矿用地增加。但这其中要考虑产业结构变化的影响，经济发展情景下第三产值比例进一步优化至 0.84，由于第三产值单位“耗地”量小于第二产值，一定程度上降低了该情景下城镇工矿用地总量，使得与其他情景下对比，城镇工矿用地差异并非十分明显。2025 年农村居民点在 3 种情景下数量分别为 5.92×10^4 hm²，5.65×10^4 hm² 与 5.84×10^4 hm²，经济发展情景下数量最小，表明经济发展把更多农村人口转移到城镇，同时城镇扩张需要占用更多农村居民点，而另外两种情景下可能由于缺少整治资金与动力，因此居民点数量要高于经济发展情景。交通水利用地在经济发展情景下为 3.48×10^4 hm²，耕地保护情景下仅为 2.87×10^4 hm²，两者相差 6 100 hm²，这主要由 GDP 增速差异引起。总体看，经济发展情景下城镇工矿及交通水利用地扩张明显，而耕地、林地数量则相对较少；耕地保护情景下耕地数量较大，而与此同时城镇工矿及其他农用地相对较少，主要因为耕地保护挤占了城镇空间并且使其他农用地整治力度加大；生态保护情景下，其他农用地、未利用地得到有效保护，其数量相对较大，而耕地、交通水利等则由于生态空间压缩，数量相对较少。可见，不同情景下土地利用结构充分体现了该情景对土地利用的基本要求。

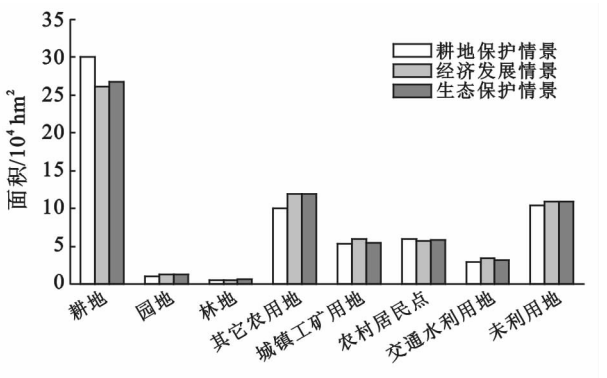


图 3 扬州市不同情景下土地利用结构模拟结果

SD 模型还可体现土地利用结构的变化过程。图 4 为不同情景下主要用地类型数量在 2014—2025 年变化趋势。对于耕地，耕地保护情景下其在 2014—2020 年有明显增加，之后保持稳定甚至小幅下降，一直维持在 3.00×10^5 hm² 左右；而另外两类情景则是逐年减少，但经济发展情景下耕地减少幅度大于生态保护情景。对于林地，生态保护情景下 2014—2025 年其数量一直在稳定增加，另外两类情景则基本不变。对于其他农用地，耕地保护情景下 2014—2020 年有大量其他农用地被整治为耕地或其他用地，其数量逐年下降，其他情景下则没有类似情况发生，即保持基本稳定。对于城镇工矿用地与交通水利用地，两者变化趋势一致，无论是经济发展情景还是其他情景，其数量都在逐年增加，体现了扬州未来土地利用变化的基本方向；对该两类用地增加的幅度，经济发展情景下最大，其次是生态保护与耕地保护情景，这可能因为生态保护的约束程度小于耕地保护约束，于是相同用地经济需求设置下，生态保护情景下城镇工矿及交通水利用地扩张更为轻松，数量也就越大。对于农村居民点，未来基本趋势是不断减少，人口快速城镇化背景下，农村居民点势必减少，但不同情景下减少的幅度不同，经济发展情景下减少幅度最大，其次是生态保护与耕地保护情景，这是因为经济发展需要更多农村居民点置换为城镇用地，同时说明经济发展为农村居民点复垦提供了资金保障。

3.3 不同情景下土地利用结构实现路径分析

SD 模拟的一个优势是可以把土地利用系统变化过程显化，于是借助 SD 模拟可分析不同情景下土地利用结构的实现途径。对于耕地保护情景，耕地数量由 2014 年 2.834×10^5 hm² 增加至 2025 年 3.00×10^5 hm²，平均每年补充耕地 1.50×10^3 hm²，城镇工矿由 4.09×10^4 hm² 增加至 5.28×10^4 hm²，提高了 30%。面对耕地与城镇工矿用地的“双增加”，未来要加强其他农用地与农村居民点整治以补充耕地或用于城镇建设，模型显示至 2025 年扬州需分别投入

9.56亿元与 114.76 亿元用于其他农用地整理与农村居民点复垦,同时发现土地自然供给的增加很少是来自未利用地开发,这是因为扬州市未利用中 90%以上是水体,开发难度大,成本高。按 7%速率计算,该情景下 2025 年扬州 GDP 是 7 788 亿元,地均 GDP 为 1 474 万元/hm^2,而基期年为 905 万元/hm^2,表明未来 10 a 扬州地均 GDP 生产能力须提高 62.9%,集约利用形势严峻。对于经济发展情景下,2025 年耕地数量变为2.714×10^5 hm^2,较基期减少 1.21×10^4 hm^2,主要用于经济增长占用,城镇工矿用地较基期年增加45.47%。该情景下粮食自给率为 1,意味着扬州不再承担额外粮食供给任务,目标年 GDP 总量为10 556亿元,地均 GDP 达 1 776 万元/hm^2,这意味着 2014—2020 年地均 GDP 产出能力须提高 1 倍,主要是通过产业结构调整实现,模型显示 2025 年第三产值将达5 220亿元,占 GDP 的 49.46%,而第三产业由于其产业特征,单位产出用地量小于第二产业,于是起到集约节约用地效果。

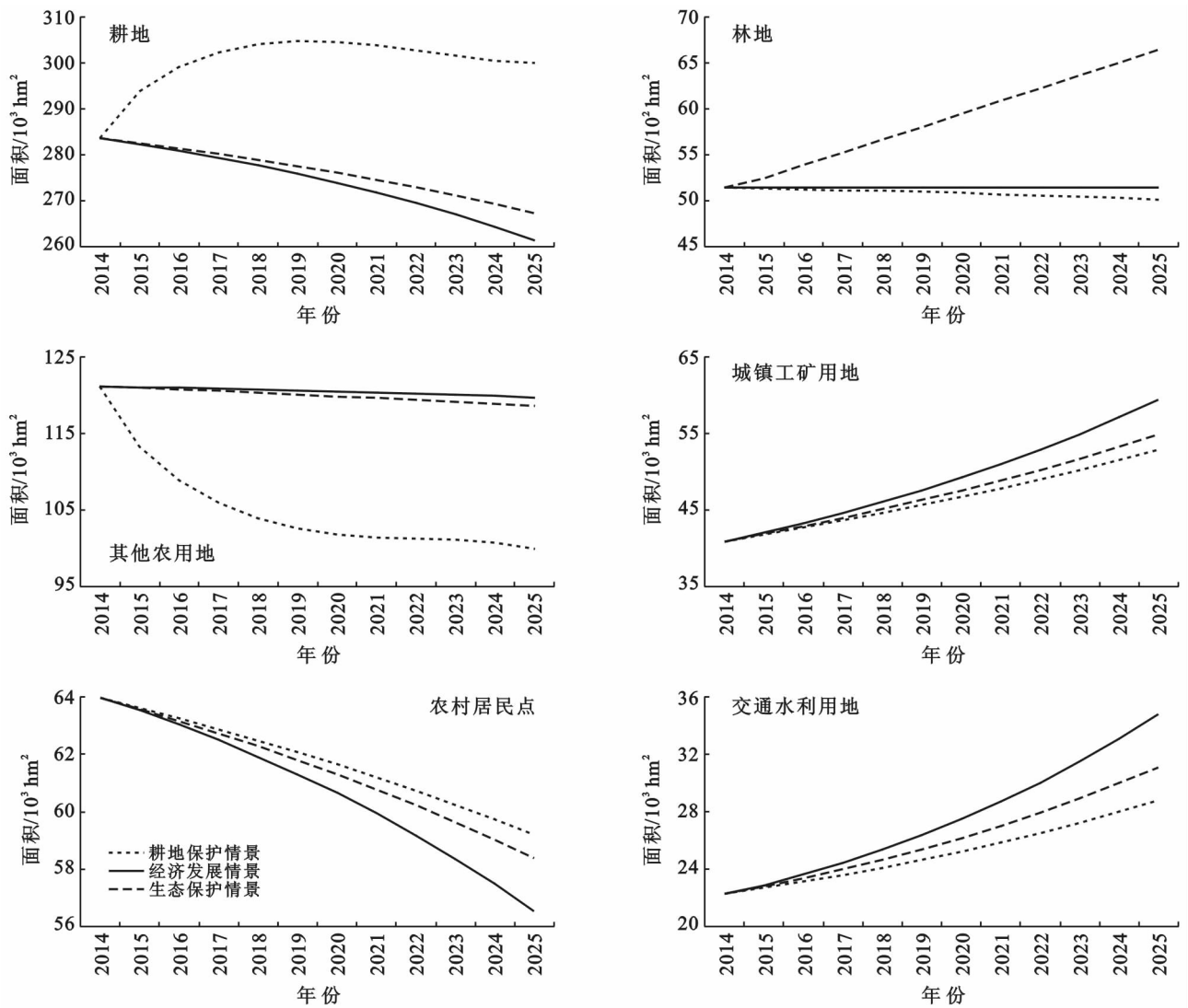


图 4　不同情景下主要用地类型的变化趋势

同时该情景下还应大力推进农村居民点整治以支持城镇扩张与交通水利建设,据测算目标年需累计投入 208 亿元来复垦 7 432 hm^2 农村居民点。生态保护情景下,土地利用变化的基本趋势与经济发展情景相同,即耕地、农村居民点减少,而城镇工矿、交通水利用地增加,只是程度大小有差异,当然不同之处生态保护情景下,林地增了 30%至 6 645 hm^2,因此该情景下扬州市应加强植树造林,提高森林覆盖率,同时注意保护其他农用地及未利用等具有丰富生态服务功能的用地。3 种情景下土地利用结构实现的侧重点不同,依次分别注重耕地保护与补充、城镇用地集约节约利用、生态用地保育。未来扬州土地利用应同时满足生产、生活与生态要求,多情景土地利用结构模拟为其土地利用规划编制提供了重要基础。

上述3种情景未必是扬州市未来最可能的情景，但3种“极端”情景的模拟可让决策者了解不同情景下的土地利用情况，对未来可能的土地利用有全面认识，有助于决策产生理想情景与相应土地利用结构方案，可以肯定的是，未来理想土地利用结构是上述3种情景的组合，但具体偏重哪种情景又取决于利益相关者的博弈结果。

4 结论

(1) 耕地保护情景下，扬州需保持耕地 3.00×10^5 hm^2，城镇工矿用地 5.28×10^4 hm^2，农村居民点减少至 5.92×10^4 hm^2；经济发展情景下，GDP增长率10%，且二三产值比率0.84时，城镇工矿用地数量是 5.95×10^4 hm^2，交通水利用地 3.48×10^4 hm^2，耕地减少至 2.714×10^5 hm^2；生态保护情景下，林地数量为6 645 hm^2，耕地与城镇工矿用地分别为 2.708×10^5 hm^2 和 5.25×10^4 hm^2。

(2) 各情景下不同用地数量变化差异明显，耕地数量在耕地保护情景下不断提高，而在生态保护与经济发展情景下则缓慢下降；城镇工矿用地与交通水利用地面积在三种情景下均获得了稳定增长，但经济发展情景下的增长要快过其他两个模式；林地面积在生态保护情景下出现了大幅上升，在另外2个情景下则基本保持不变甚至小幅的下降。

(3) 耕地保护情景下要注重耕地保护及土地整治以补充耕地，目标年分别累计投入9.56亿元、114.76亿元进行其他农用地与农村居民点整治；经济发展情景下注重土地集约节约利用，单位城镇用地GDP产出能力须提高1倍，以其促进产业转型升级；生态保护情景下要加强植树造林，且应保护好具有丰富生态服务价值的水域、滩涂等。

(4) 本文的SD模型从土地利用系统运行的内在机制出发，不仅考虑了社会经济对土地利用的影响，还考虑土地利用对社会经济的反馈作用，从而更真实模拟了土地利用系统运行过程，显化了土地利用是如何在各种因素作用下发生变化，为土地利用系统调控提供有力依据，可促进土地资源持续利用。

[参 考 文 献]

[1] Chang Yangchi, Ko Tsungting. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning[J]. Land Use Policy, 2014, 36(1): 13-22.

[2] Sadeghi S H R, Jalili, K, Nikkami D. Land use optimization in watershed scale[J]. Land Use Policy, 2009, 26(2): 186-193.

[3] 李鑫，欧名豪，刘建生，等. 基于不确定性理论的区域土地利用结构优化[J]. 农业工程学报，2014，30(4)：176-184.

[4] 严金明. 简论土地利用结构优化与模型设计[J]. 中国土地科学，2002，16(4)：20-25.

[5] 刘荣霞，薛安，韩鹏，等. 土地利用结构优化方法述评[J]. 北京大学学报：自然科学版，2005，41(4)：655-662.

[6] 刘艳芳，李兴林，龚红波. 基于遗传算法的土地利用结构优化研究[J]. 武汉大学学报：信息科学版，2005，30(4)：288-292.

[7] 刘海猛，石培基，王录仓，等. 低碳目标导向的兰州市土地利用结构优化研究[J]. 中国土地科学，2012，26(6)：55-61.

[8] 刘琼，欧名豪，彭晓英. 基于马尔柯夫过程的区域土地利用结构预测研究：以江苏省昆山市为例[J]. 南京农业大学学报，2005，28(3)：107-112.

[9] 吴金华，戴淼，尹剑. 基于遗传神经网络的陕西省土地利用结构模型研究[J]. 安徽农业科学，2008，36(36)：16071-16073.

[10] 郭杰，欧名豪，刘琼，等. 基于BP神经网络的南通市建设用地需求预测[J]. 资源科学，2009，31(8)：1355-1361.

[11] 汤发树，陈曦，罗格平，等. 新疆三工河绿洲土地利用变化系统动力学仿真[J]. 中国沙漠，2007，27(4)：593-599.

[12] 李秀霞，徐龙，江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化[J]. 农业工程学报，2013，29(16)：247-254，294.

[13] 赵小敏，王人潮，吴次芳. 土地利用规划的系统动力学仿真：以杭州城市土地利用总体规划为例[J]. 浙江农业大学学报，1996，22(2)：143-148.

[14] 邓祥征，刘纪远，战金艳，等. 区域土地利用变化的多情景分析：以内蒙古自治区太仆寺旗为例[J]. 地球信息科学，2004，6(1)：81-88.

[15] Jin Xiaobin, Xu Xiaoxiao, Xiang Xiaomin, et al. System-dynamic analysis on socio-economic impacts of land consolidation in China[J]. Habitat International, 2016, 56: 166-175.

[16] Xu Duanyang, Song Alin, Tong Hefeng, et al. A spatial system dynamic model for regional desertification simulation: A case study of Ordos, China[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83(83): 179-192.

[17] 钟永光，贾晓菁，钱颖. 系统动力学[M]. 北京：科学出版社，2009.

[18] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海：上海财经大学出版社，2009.