

基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟

曹祺文^{1,2}, 顾朝林², 管卫华^{3,4}

(1. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045; 2. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要:中国正处在快速推进的城镇化进程中,耕地与林地、牧草地和水域等生态用地将如何变化,以及建设用地是否仍将快速增长?这不仅是国家宏观政策制定者关心的问题,也是广大学者和普通民众面临的具体问题。通过构建基于土地利用的中国城镇化系统动力学(System dynamics, SD)模型,尝试对上述问题作出分析。研究结果表明:(1)本文构建的模型是有效的,具备可靠性和稳定性。(2)若要保持国家耕地保有量不少于18.25亿亩,到2050年需补充83.17万~412.67万 hm^2 耕地资源。(3)到2050年,如果中国城镇化水平达到78%左右,建设用地总量将达到4007.29万~4214.25万 hm^2 ,较2020年净增加了155.87万~342.88万 hm^2 。(4)2020—2050年生态用地数量表现为先增加后减少,其中,林地显著增加,牧草地减少,水域略有增加。研究成果可为全国国土空间规划多方案模拟、评估和决策提供科学服务。

关键词:中国城镇化;土地利用;建设用地;非建设用地;系统动力学;多情景模拟

中国近年来快速推进的城镇化过程,除了表现为人口由乡村向城市转移的人口城镇化以外,还体现为土地城镇化。2000—2017年,中国城镇化水平由36.22%提高至58.52%,城市建设用地由206.99万 hm^2 增长为551.55万 hm^2 ,年均增长5.93%;耕地在2009年国土“二调”时为13538.45万 hm^2 ,2017年则降为13488.22万 hm^2 。城市规模和建设用地需求与日俱增,耕地等非建设用地迅速减少,人地矛盾加剧。由于城镇化过程中城市住房供给、工业生产、第三产业发展、交通物流需求等均需以土地要素投入为支撑,因此,土地对城镇化发展具有不容忽视的主控作用。当前,在经济高质量发展以及城镇化仍在继续快速推进的背景下,中国未来非建设用地中耕地以及林地、牧草地和水域等生态用地将如何变化,建设用地总量是否仍将快速增长,亟待得到关注。

土地利用是人地复杂系统关系的重要体现,开展土地利用变化模拟研究需要充分考虑多要素的复杂交互效应,特别是当前快速城镇化过程中社会经济发展的驱动作用^[1,2]。由于基于系统论的SD模型是研究和模拟仿真复杂系统的有效方法^[3,4],故该方法在土地利用趋势研究中具备较好的适用性。当前,关联城镇化与土地利用的SD模型通常以人口增长、经济发展等相关社会经济因素为宏观驱动因子,在模型中整合土地利用与产业增长和投资、单位面积土地经济产出、住房供给、农产品需求等的关系,进而开展多情景模拟^[5-11]。较具代表性的是未来土地利用模拟FLUS模型所内嵌的“自顶向下”的SD模块,

收稿日期:2020-02-25;修订日期:2020-07-01

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41590844)

作者简介:曹祺文(1992-),男,河南洛阳人,博士,工程师,研究方向为国土空间规划、景观生态与土地科学。

E-mail: cqwl7@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:顾朝林(1958-),男,江苏靖江人,博士,教授,博士生导师,研究方向为城市与区域规划、城市地理学、区域经济学。E-mail: gucl@mail.tsinghua.edu.cn

其分为人口、经济、气候和土地利用部分,将人口、GDP、投资和生产技术进步作为主要驱动力,并加入气候因素的影响,实现了对城市用地、耕地、草地、森林、水域和未利用地的情景模拟^[12]。总体而言,多数模型架构的基本逻辑是将城镇化作为影响土地利用的外部系统,注重分析社会经济发展过程对土地利用的需求^[7,13,14],但却往往忽视了土地利用对城镇化的主控和反馈作用^[15]。按照新古典经济理论,具有资产属性的土地与资本、劳动力、技术等均为经济增长所需投入的生产要素^[16]。由此,土地利用与城镇化应当是交互作用和反馈的复杂巨系统。

从模型内容来看,部分研究因侧重城市扩张模拟或城市增长边界划定,模型更为关注城镇化发展对建设用地需求的总量变化。其中,影响建设用地规模的变量主要涉及人口总量、GDP、固定资产投资等总体性指标,弱化了不同类型建设用地与其影响因素的具体联系和关系机制。此类研究思路和方法虽然有利于快速建立模型架构,但极大简化了模型边界,难以模拟不同城镇化发展趋势下的建设用地结构,使得模型成果的科学价值和规划的实践指引作用有所降低。相关研究如Xing等^[17]在其构建的经济—资源—环境SD系统中将土地作为资源的重要构成,其中建设用地规模取决于非农产值增长。苏伟忠等^[18]以总人口规模为模型核心,根据人均建设用地面积估算建设用地需求总量,并以此作为划定城市增长边界的基础。田贺等^[19]及Liu等^[12]则假定建设用地由人口和投资共同驱动,在模型中将建设用地面积具体设定为人口数和固定资产投资额的线性拟合方程。

除此之外,尽管也有部分模型尝试进一步模拟特定类型建设用地需求,但多关注居住用地、工业用地等部分重点类型,由此所构建的模型可能未充分考虑第三产业发展、人口城镇化、生态保护等宏观趋势的作用,且难以全面反映土地利用的整体变化趋势及其与城镇化过程的紧密联系。如熊鹰等^[20]在考虑GDP、人口总量对建设用地需求的基础上,引入集约度作为速率控制指标,模拟了长株潭城市群在不同集约利用模式下建设用地、工业用地和居住用地供需变化。但是,该SD模型弱化了土地利用与产业增长、特别是第三产业发展,以及城镇化水平之间的关系。Lauf等^[21]侧重根据人口及其住房偏好特征估算住房需求,以模拟居住用地供给,非住宅建设用地量则受到由GDP和劳动就业表征的经济要素影响;在Xu等^[22]构建的SD模型中居住用地则取决于非农人口数,工矿用地仅为情景假定值,二者均不同程度弱化了土地利用与城镇化、社会经济过程的关联。

对于非建设用地的模拟,现有研究主要考虑人口增长及其对粮食和各类农产品需求的影响,并综合生产力技术进步因素,将上述因素与耕地、林地、牧草地、水域等用地类型进行关联而开展模拟^[5,23]。但与相关建设用地SD模型的问题类似,没有充分考虑非建设用地对其他系统的反馈作用,特别是农业生产土地对第一产业发展的影响。如Huang等^[24,25]将产品需求和用地需求结合,根据粮食、畜肉和水产品需求模拟耕地、牧草地和水域,其中产品需求主要取决于人口总量。Liang等^[26,27]以粮食自给率表征粮食需求,以单产增长率表征技术进步,通过对二者的不同组合设定SD模型情景对耕地进行模拟,但对林地、草地、水域的模拟则仅利用基于历史数据的转移矩阵系数,未与城镇化社会经济要素耦合。

综上所述,不难看出,关联城镇化与土地利用的SD模型尚需优化和改进。一方面,城镇化与土地利用是交互作用的整体,除了城镇化发展对土地利用的驱动作用外,土地利用对城镇化的主控和反馈作用也应在模型中有所体现。另一方面,不仅要关注未来城镇化中的建设用地总量,还要考虑建设用地结构,以及其与非建设用地所共同构成的土

地利用整体变化趋势，明确城镇化发展关键要素对不同类型土地利用需求的驱动作用。因此，本文将在中国城镇化SD模型^[28,29]基础上，将土地主控因子嵌入其中，整合不同类型土地利用与经济、人口等城镇化要素的关系，建立基于土地利用的中国城镇化SD模型，进而以此开展中国未来城镇化进程中土地利用的多情景模拟，以期为国家中远期发展中的土地利用决策提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 模型结构与因果环图

中国城镇化SD模型建立在新古典经济理论框架下，将社会经济系统解构为产业、资本、劳动力、技术、人口、城镇化、社会服务等关键要素，上述要素之间更为详细的因果关系可参考本团队的研究^[28,29]。然而，城镇空间的扩展和重塑也是城镇化过程的一个重要体现^[30]，土地利用在城镇化过程中也一直发挥着重要的主控效应^[31]。因此，本文将土地要素嵌入中国城镇化SD模型，突显其与城镇化过程的紧密联系，拓展出基于土地利用的中国城镇化SD模型。

模型中土地子系统包括建设用地和非建设用地模块，通过产业增长、住房需求、交通物流、农产品生产等过程而与人口和经济子系统发生直接联系（图1、图2）。首先，在建设用地模块中，城市居住用地主要用于满足城镇人口住房需求。在未来城镇化过程中，乡村人口继续不断向城市迁移而形成住房需求，加之家庭规模小型化以及部分城市居民改善住房条件，人均住房面积将继续增加^[32]，住房需求总量日趋提高，体现为城市居住用地规模不断增加。城市工业用地主要用于满足第二产业特别是工业生产。在城镇

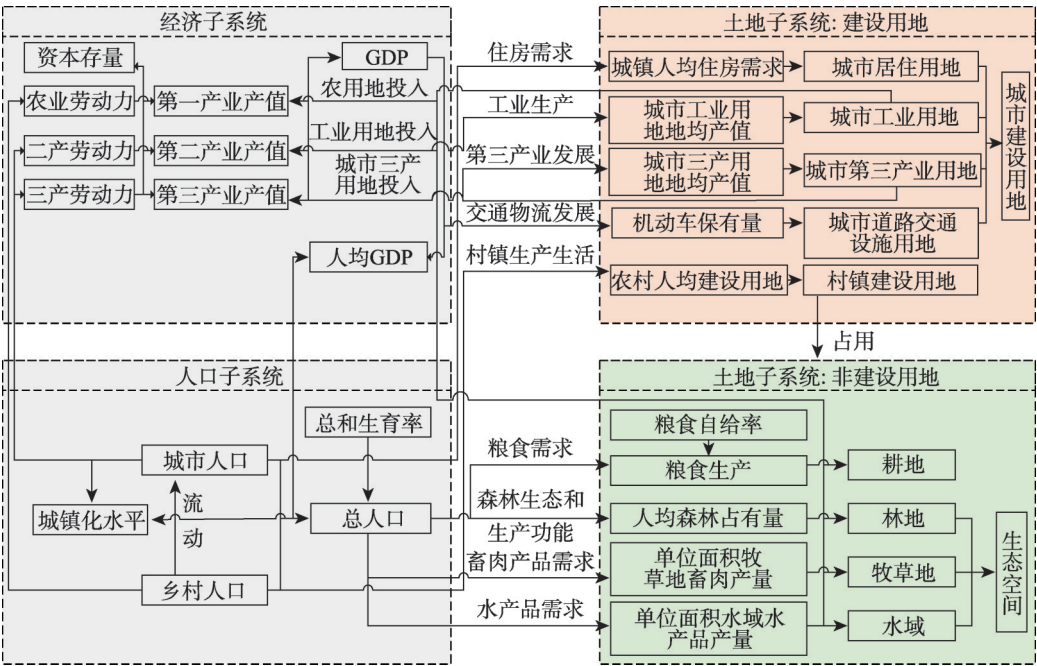


图1 基于土地利用的中国城镇化SD模型结构图

Fig. 1 Structure of China's urbanization SD model based on land use

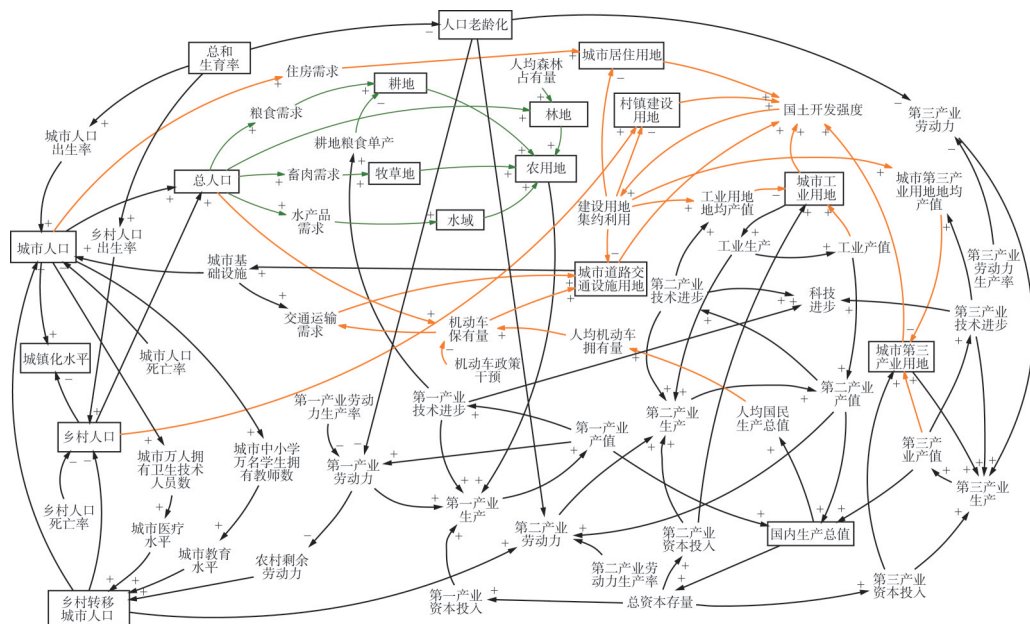


图2 基于土地利用的中国城镇化SD模型因果环图

Fig. 2 Causal loop diagram of the China's urbanization SD model based on land use

化发展过程中,大量农村剩余劳动力从农业生产中脱离,进入包括工业在内的城市非农业,工业化成为推动城镇化发展的一个重要驱动力^[30,33],城市工业用地的增加则为其提供了保障。城市第三产业用地用于满足第三产业发展。流入城市的另一部分农村剩余劳动力从事了第三产业,随着中国经济转向高质量发展,未来产业结构将不断优化,第三产业比例提升^[34],城市第三产业用地也将相应增加。城市道路交通设施用地主要用于满足以机动车保有量为基本表征的交通物流发展。随着经济社会发展,预计机动车保有量将继续攀升^[35],从而增加城市道路交通设施用地需求。村镇建设用地则满足村镇生产生活需求,模型将其与农村人口相关联。由于中国城镇化过程是一个长期的社会发展过程^[29],未来仍将有大量农村人口向城市地区流动,村镇建设用地总量将可能呈现下降趋势。其次,在非建设用地模块中,耕地是国家粮食安全的重要资源保障^[36],必须保有一定规模的耕地资源以满足居民对口粮、畜牧饲料和粮油加工用粮的粮食需求。加强林地保护,提高森林覆盖是充分发挥森林生态和生产功能的前提^[37,38]。牧草地和水域则与畜肉生产和水产品生产相关联,在城镇化带动我国膳食结构整体升级的背景下^[39],分别满足居民日渐提高的肉蛋奶等畜肉产品与水产品需求^[23]。

1.2 基于土地利用的中国城镇化SD模型构建方法

1.2.1 土地子系统构建

(1) 建设用地模块

城市居住用地 (RL) 取决于城市人口 (UP) 及城镇人均住房建筑面积 ($HFAPC$)。城市工业用地 (IL) 基于回归分析由工业增加值 (IIV)、工业用地地均产值 ($OVPII$)、第二产业固定资产投资 ($FAISI$) 确定。城市第三产业用地 ($UTIL$) 基于回归分析由第三产业产值 (TIO)、城市第三产业用地地均产值 ($OVPUTIL$)、第三产业固定资产投资 ($FAITI$) 决定。城市道路交通设施用地 ($RTFL$) 为机动车保有 (MVP) 的函数,后者则

为人均GDP ($PCGDP$) 的指数函数^[40]。村镇建设用地 ($VTCL$) 与乡村人口 (RP)、农村人均建设用 ($RPCCL$) 相关联。建设用地总量 (TCL) 占土地总面积 (TLA) 的比例为国土开发强度 (TDI)。当 TDI 超过约束值时, 建设用地集约利用因子 ($CLIUF$) 会作用于与各类建设用地需求相关的变量, 反映土地集约利用对用地规模的影响, 对过度的国土开发需求进行限制 (表1)。

(2) 非建设用地模块

耕地 (CL) 由粮食需求 (FD)、耕地粮食单产 ($GYPCL$)、复种指数 (MCL) 和粮食占农作物播种比例 ($PFCS$) 决定, 并受粮食自给率的间接影响。林地 (FL) 由总人口 (TP) 和人均森林占有量 ($FOPC$) 控制。牧草地 (GL) 由畜肉需求 (MLD) 和单位面积牧草地畜肉产量 ($LMPPGL$) 确定。水域 (WB) 则基于水产品需求 (APD)、水产品单产 ($APYPWB$) 估算。

1.2.2 经济和人口子系统修正

经济子系统的核心方程是生产函数, 除了资本存量、劳动力以外, 本文还加入了土

表1 主要方程
Table 1 Main equations

子系统	方程	说明
土地	$RL = UP \times HFAPC \times RLCC$	(1) $RLCC$ 为城市居住用地转换系数, 相
	$IL = \alpha_0 + \alpha_1 LN(IAV) + \alpha_2 LN(OVPIL) + \alpha_3 LN(FAISI)$	(2) 当于综合容积率; α_i , β_i ($i=0, 1, 2,$
	$UTIL = \beta_0 + \beta_1 LN(TIO) + \beta_2 LN(OVPUTIL) + \beta_3 LN(FAITI)$	(3) 3) 为待估参数; $CTTDI$ 为国土开发
	$RTFL = f(MVP) \times CLIUF = f(f(PCGDP)) \times CLIUF$	(4) 强度约束目标
	$VTCL = RP \times RPCCL \times CLIUF$	(5)
	$TDI = TCL \div TLA$	(6)
	$CLIUF = \begin{cases} (1 - (TDI - CTTDI)) / CTTDI & \text{if } TDI > CTTDI \\ 1 & \text{if } TDI \leq CTTDI \end{cases}$	(7)
	$CL = \frac{FD}{GYPCL \times MCI \times PFCS}$	(8)
	$FL = TP \times FOPC$	(9)
	$GL = LMD / LMPPGL$	(10)
	$WB = APD / APYPWB$	(11)
经济	$AGPI = GRPIO \times \left(1 - \frac{PIO}{MVPIO}\right) \times T_1 \times PICS^{K_1} \times AL^{N_1} \times PLF^{L_1}$	(12) $AGPI$ 、 $AGSI$ 、 $AGTI$ 为年第一、
	$AGSI = GRSIO \times \left(1 - \frac{SIO}{MVSIO}\right) \times T_2 \times SICS^{K_2} \times IL^{N_2} \times SLF^{L_2}$	(13) 二、三产业增长值 (亿元);
	$AGTI = GRTIO \times \left(1 - \frac{TIO}{MVTIO}\right) \times T_3 \times TICS^{K_3} \times UTIL^{N_3} \times TLF^{L_3}$	(14) $GRPIO$ 、 $GRSIO$ 、 $GRTIO$ 为第一、
人口	$UP = UP_{0-14} + UP_{15-64} + UP_{\geq 65}$	(15) UP_{0-14}/RP_{0-14} 、 UP_{15-64}/RP_{15-64} 、 $UP_{\geq 65}/RP_{\geq 65}$
	$RP = RP_{0-14} + RP_{15-64} + RP_{\geq 65}$	(16) 分别为城市/乡村 0~14 岁、15~64 岁
		和 65 岁及以上人口

地要素。将耕地、林地、牧草地和水域作为农用地（AL），纳入第一产业生产函数；城市工业用地和城市第三产业用地分别纳入第二、三产业生产函数。人口子系统通过总和和生育率来模拟人口变化，并将城乡人口按年龄段分组，以反映未来人口负增长和老龄化的趋势及其对土地利用的影响。

1.3 数据来源

本文从《中国城市建设统计年鉴》和全国土地变更调查数据中采集整理了1998—2017年土地利用数据（表2）。《中国城市建设统计年鉴》涉及城市居住用地、城市工业用地、城市第三产业用地、城市道路交通设施用地、其他城市用地等城市建设用地数据。其中，城市第三产业用地包括商业服务业设施用地和物流仓储用地。因1998—2011年商业服务业设施用地未在《中国城市建设统计年鉴》中单独列出，而是与公共管理与公共服务用地合并为公共设施用地，故本文结合2012—2017年商业服务业设施用地数据按线性趋势估算了1998—2011年数据，进而得到城市第三产业用地。其他城市用地为除居住用地、工业用地、城市第三产业用地、道路交通设施用地以外的城市建设用地。

表2 土地利用数据分类及来源
Table 2 Classification and source of land use data

大类	小类	来源与说明
建设用地	城市居住用地	《中国城市建设统计年鉴》（1998—2017年）
	城市工业用地	《中国城市建设统计年鉴》（1998—2017年）
	城市第三产业用地	《中国城市建设统计年鉴》（1998—2017年），包括商业服务业设施用地和物流仓储用地
	城市道路交通设施用地	《中国城市建设统计年鉴》（1998—2017年）
	其他城市用地	《中国城市建设统计年鉴》（1998—2017年），城市建设用地中除上述类型以外的用地
	村镇建设用地	全国土地变更调查（1998—2017年），包括村庄、建制镇、采矿用地和农村道路
非建设用地	耕地	全国土地变更调查（1998—2017年）
	林地	全国土地变更调查（1998—2017年），包括林地和园地
	牧草地	全国土地变更调查（1998—2017年）
	水域	全国土地变更调查（1998—2017年）
	其他土地	全国土地变更调查（1998—2017年）

全国土地变更调查数据涉及村镇建设用地、耕地、林地、牧草地、水域和其他土地，地类按《土地利用现状分类》（GB/T21010-2007）调整归并。其中，村镇建设用地包括村庄、建制镇、采矿用地和农村道路。林地和园地统一并为林地类别。特殊用地和裸地因数据获取受限，且面积相对较小，未包含在内。此外，因调查统计方式、分类标准调整，部分数据在2009年前后出现明显“断层”。虽然本文尝试按统一的分类方式进行数据处理，但不连贯性问题仍难以完全避免，故在模型中将相关变量作为时间表函数，以反映不同阶段趋势。

社会经济和人口数据主要源于1998—2017年《中国统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》（1998—2006年为《中国人口统计年鉴》）、《第五次人口普查数据》《第六次人口普查数据》《新中国六十五年统计资料汇编》《中国教育统计年鉴》。港澳台地区数据未包含其中。

1.4 系统参数设置

根据1998—2017年历史数据,在Vensim PLE中调试和检验模型(图3),多情景模拟时间范围设定为2017—2050年。系统参数设置方法主要为:(1)基于历史数据取算术平均值,如第一产业资本存量比例、农业劳动生产率增长速度、第二和第三产业劳动生产率增长率、城市/乡村14岁人口死亡率等。(2)线性回归,如城市工业用地和城市第三产业用地的估算方程,为用地面积与产业产值、固定资产投资、地均产值等相关变量的线性拟合。(3)曲线估计,主要针对具有非线性特征的变量,如人均机动车拥有量为人均GDP的指数函数。(4)生产函数,用于模拟各产业产值增长。(5)表函数,如各产业产值增长率、工业用地地均产值变化率、第三产业用地地均产值变化率等具有阶段特征的变量,以及国土开发强度约束、粮食自给率、人均森林占有量年变化率、单位面积牧草地畜肉产量年增长率、单位面积水域水产品产量年增长率等情景调控变量。其他参数设置方法同原中国城镇化SD模型^[28,29,41,42]。

2 结果分析

2.1 模型检验

2.1.1 历史数据模拟误差检验

首先,开展历史数据模拟误差检验,分析模型模拟效果的可靠性。选取12个主要变量,计算其1998—2017年模拟值与实际值的平均相对误差(表3)。结果表明,模拟值和实际值拟合程度总体良好,能够较好地反映历史状态变化。虽然部分变量因统计口径和方式差异而出现较大变化,但误差率均值总体控制在±5%以内,满足建模要求。其中,城镇化水平模拟值与实际值平均误差率为负,表明实际城镇化进程仍处在相对快速过程中;城市工业用地、城市居住用地、耕地、牧草地平均误差率为负,这三类用地实际数量总体大于模拟值,说明居住用地和工业用地供应总体较为充分,耕地和牧草地保护良好;国内生产总值模拟值总体略低于实际值,说明经济运行总体相对平稳,但可能存在下行压力;总人口模拟值总体大于实际值,说明人口增长速度放慢;林地、水域、城市道路交通设施用地、村镇建设用地和城市第三产业用地模拟值与实际值平均误差率为正,说明相关用地供给可能不足或需求有所下降。

2.1.2 参数灵敏度分析

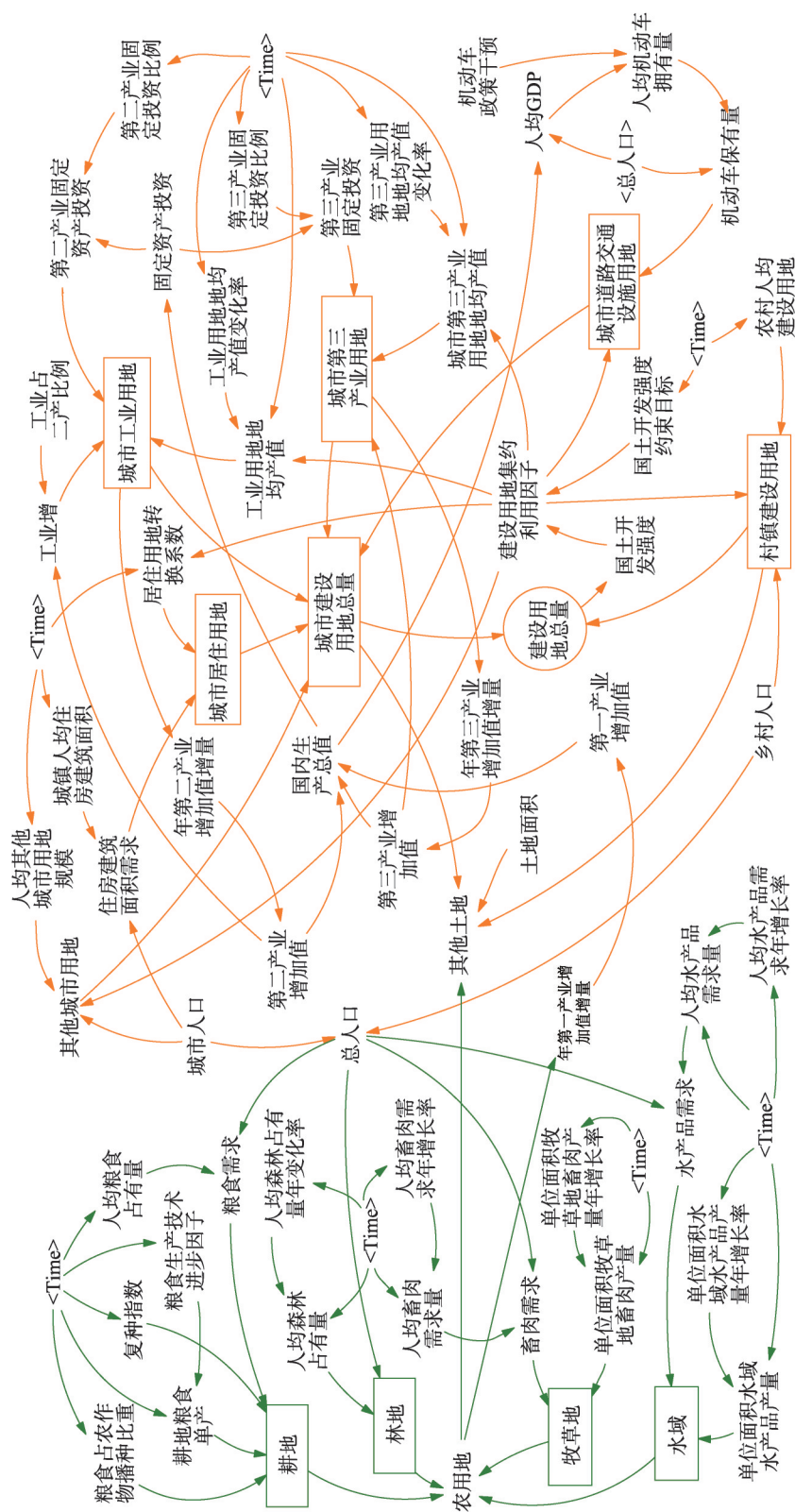
参数灵敏度分析是指更改参数数值并运行模型,检验参数的正负向变化是否显著影响模型输出。参数灵敏度计算方法如下:

$$S_Q = \left| \frac{\Delta Q_t}{Q_t} \times \frac{X_t}{\Delta X_t} \right| \quad (17)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Q_i} \quad (18)$$

式中: S_Q 为变量 Q 对参数 X 的灵敏度; t 为时间; Q_t 和 X_t 为 Q 和 X 在时间 t 的值; ΔQ_t 和 ΔX_t 为时间 t 处 Q 和 X 因参数调整而产生的变化值; n 为关键变量数量(个); S_{Q_i} 为 Q_i 对参数 X 的灵敏度; S 为参数 X 的平均灵敏度水平。

本文从模型中选取19个关键参数(表4)进行灵敏度分析,将每个参数逐年增加或减少10%,测试模型主要变量对参数变化的敏感性。结果显示,仅第二产业产值增长



注：由于篇幅所限，此处仅展示土地子系统，其他子系统详见文献 [28] 和 [29]。

图3 基于土地利用的中国城镇化SD模型(土地子系统)

Fig. 3 China's urbanization SD model based on land use (land subsystem)

率、第三产业产值增长率和教育因子的灵敏度高于15%，其他参数灵敏度均低于10%，即模型对多数参数变化不敏感。

据此，基于土地利用的中国城镇化SD模型模拟效果良好，具有可靠性和稳定性，可用于模拟中国未来城镇化进程中的土地利用。

2.2 多情景模拟

2.2.1 情景设定

结合 Gu 等^[29]对中国城镇化的情景模拟过程，本文设定经济低、中、高速增长情景（表5），从经济、人口、土地利用等层面选取 GDP 年增长率、总和生育率、粮食自给率、人均森林占有量年变化率、单位面积水域水产品产量年增长率、城镇人均住房建筑面积、城市工业用地地均产值年变化率、城市第三产业用地地均产值年变化率等为调控变量，对2017—2050年土地利用进行模拟。

（1）经济发展：党的十九大^①作出明确判断，“我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段”，2017年GDP增速为6.8%，未来潜在经济增长率将可能继续下降。对于这一趋势的认识，国内外不同学者和研究机构已基本取得了共识。Bai 等^[43]预测2016—2050年中国经济增速将从6.28%降至2.98%左右，陆旸等^[44,45]则认为将由6.6%降至2.47%，但通过实施多种改革，也可使经济增长潜力增加1~2个百分点。国家统计局副局长盛来运等基于国际比较测算，认为若2049年之前GDP年均增速保持4.4%以上，有望顺利实现第二个百年奋斗目标^[46]。亚开行和北京大学的研究报告则称2020—2030年经济增速可达6%^[47]。因此，本文设定各情景2017—2050年GDP年增长率由6.8%分别降至3%、4.5%和6%。

① 习近平.《决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告》.北京:人民出版社,2017.

表3 1998—2017年模型历史数据模拟误差
Table 3 Error rate of the simulation value and historical data in 1998-2017 (%)

主要变量	模拟值与实际值平均误差率
城市工业用地	-0.68
耕地	-0.39
城市居住用地	-0.32
国内生产总值	-0.27
城镇化水平	-0.25
牧草地	-0.06
林地	0.06
水域	0.13
总人口	0.25
城市道路交通设施用地	0.37
村镇建设用地	0.81
城市第三产业用地	0.98

表4 模型对参数变化的灵敏度分析
Table 4 Sensitivity analysis of the model to parameter changes (%)

参数	增10%灵敏度	减10%灵敏度
人均森林占有量年变化率	0.40	0.41
第三产业劳动生产率增长率	0.89	0.81
人均畜肉需求年增长率	1.08	1.05
工业用地地均产值变化率	1.45	1.45
第二产业劳动生产率增长率	2.11	2.11
医疗因子	2.29	2.43
机动车政策干预	2.35	2.54
人均水产品需求年增长率	2.60	2.41
第一产业产值增长率	4.22	4.24
总和生育率	5.66	5.75
人均住房建筑面积	5.82	5.81
粮食自给率	5.88	5.88
第一产业劳动生产率增长率	6.25	6.21
农村人均建设用地	7.17	5.56
第三产业用地地均产值变化率	7.17	7.15
资本积累率	9.51	9.64
教育因子	12.50	15.80
第三产业产值增长率	18.47	17.90
第二产业产值增长率	18.90	19.18

表5 情景设定

Table 5 Settings of scenarios

调控变量	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
GDP年增长率/%	由6.8降至3	由6.8降至4.5	由6.8降至6
总和生育率	1.4	1.6	1.8
城镇化水平/%	2050年达77.5左右	2050年达78左右	2050年达78.5左右
耕地保有量目标/10 ⁴ hm ²	≥12166.67	≥12166.67	≥12166.67
粮食自给率/%	100	95	90
人均森林占有量年变化率/%	0.45	0.30	0.15
单位面积水域水产品产量年增长率/%	3.00	3.20	3.40
单位面积牧草地畜肉产量年增长率/%	1.20	1.40	1.60
城镇人均住房建筑面积/m ²	2050年增长至50	2050年增长至60	2050年增长至67
城市工业用地地均产值年变化率/%	1.00	1.10	1.20
城市第三产业用地地均产值年变化率/%	3.10	3.30	3.50

(2) 人口变化：中国虽然已实施全面二孩政策，但人口负增长的趋势难以避免。有学者以“五普”“六普”和2015年小普查数据测算总和生育率分别为1.22、1.18、1.05，但翟振武认为该结果可能由于数据不准确而比实际偏低^[48]。陆旸等^[44]和翟振武^[48]均提出未来总和生育率将大约为1.6。《国家人口发展规划（2016—2030年）》则将总和生育率1.8作为预期发展目标。联合国《世界人口展望2019》^[49]对2020—2050年总和生育率的低、中、高方案预测结果分别为1.4~1.52、1.7~1.75和1.89~2.09。世界银行预计2020—2050年总和生育率约为1.7~1.8^[50]。据此，本文假定总和生育率的低、中、高方案为1.40、1.60和1.80。

(3) 城镇化水平：根据中国城镇化SD模型研究结果，预计2030年以后中国城镇化水平达到70%以上，到2050年基本完成中国城镇化过程，城镇化水平达到78%左右^[29]。

(4) 耕地不减少：2019年，《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》（以下简称《指导意见》）指出，要“强化底线约束”，“确保永久基本农田面积不减”。《全国国土规划纲要（2016—2030年）》也提出要严格控制非农业建设占用耕地，到2030年全国耕地保有量不低于18.25亿亩（12166.67×10⁴ hm²）。此外，采用粮食自给率指标表征粮食安全，确定粮食自给率目标成为评估国家粮食安全状况和调整农业相关政策的基础^[51]。一般认为100%以上为完全自给，95%~100%为基本自给，90%~95%为可接受水平，90%以下则粮食安全面临较大风险^[52]。部分学者认为未来粮食自给率目标设定在90%左右更为合理可行^[53-55]。《国家粮食安全中长期规划纲要（2008—2020年）》则提出要稳定在95%以上。因此，本文设定耕地保有量目标不低于12166.67×10⁴ hm²，粮食自给率为90%、95%和100%。

(5) 生态林地显著增加：《指导意见》指出，“确保生态功能不降低、面积不减少、性质不改变”。预期未来将加强森林资源保护与修复，逐步增加林地面积。根据第六至第九次全国森林资源连续清查数据^②，全国人均林地占有量总体保持增长，1999—2003年约为0.220 hm²/人，2014—2018年约为0.232 hm²/人，大约年均增长0.34%。据此，本文设定各情景人均森林占有量年变化率为0.45%、0.30%和0.15%。

② 数据源自中国林业数据库，<http://www.forestry.gov.cn/data.html>。

(6) 水资源及水域面积不减少: 随着未来农村向城市转移人口增多、城乡居民收入和消费水平日渐提高, 以及居民膳食营养结构不断升级, 水产品消费水平仍将持续提升^[39]。保持相应规模的水域面积总体不减少, 才能满足城乡居民对优质水产品和优美水资源环境的需求。结合历史数据情况, 本文设定各情景单位面积水域水产品产量年增长率为3.0%、3.2%和3.4%。

(7) 建设用地满足城镇化需求: 《指导意见》指出, 需要“防止城镇无序蔓延”, 同时也应“为未来发展留有开发空间”。因此, 随着未来城镇化格局基本形成, 既要合理安排建设用地规模, 保障社会经济发展必需的建设用地, 也要严控新增建设用地。其中, 预计城镇人均住房面积将继续增加。一方面, 未来仍将有大量人口由农村流向城镇地区, 产生住房需求; 另一方面, 在城镇人口增加过程中, 家庭小型化趋势增强^[32], 加之部分居民对住房品质改善提升的需求, 城镇住房需求总体将进一步提升。国务院发展研究中心市场经济研究所预计2020年、2035年和2050年城镇人均住房面积将分别达38.5 m²、42.5 m²和46 m²左右^[32], 但国家统计局数据显示2018年该指标已达39 m²^[56], 因此这一预估结果可能偏低。恒大研究院以韩国、俄罗斯人均住房水平为基准目标, 假设2019—2030年中国城镇人均住房面积将年均增长1.3%~1.5%^[57], 据此可推算2030年城镇人均住房面积约为45.54~46.63 m²。若此后继续保持该增速, 则2050年约为58.96~62.80 m²。若以当前美国水平为基准目标, 则可假定2050年增长至67 m²。此外, 在城市产业用地方面, 假定城市工业用地和城市第三产业用地的单位面积土地产值水平将不断提升, 模拟不同土地节约集约利用水平下的用地规模。结合历史数据情况, 设定未来城市工业用地地均产值年变化率约为1.0%~1.2%, 城市第三产业用地地均产值年变化率约为3.1%~3.5%。

2.2.2 情景模拟

(1) 非建设用地模拟结果

根据表6、表7和图4, 在经济低、中、高增长情景中, 2017—2050年中国潜在经济增长速度均将逐渐放缓, 年均增长3.50%~4.16%, 逐渐向高质量发展转型。总人口预计在2030年前后达到峰值, 并开始负增长, 到2050年分别减少为137965万人、141902万人和145702万人。城镇化水平仍将继续明显提升, 到2050年逐渐进入相对稳定和饱和阶段, 达到78%左右。

在未来城镇化过程中, 各情景耕地将呈现不同程度减少趋势。其中, 在经济低速增长情景中, 耕地减少幅度最小, 始终保持在《全国国土规划纲要(2016—2030年)》中耕地不少于12166.67万hm²的约束目标之上。在经济中、高速增长情景中, 耕地到2050年将低于12166.67万hm²目标, 但前者始终未突破18亿亩耕地红线, 届时应分别从其他土地中补充83.17万hm²和412.67万hm²耕地资源以维持耕地保有量目标。

生态用地总体呈现先增加后减少的变化趋势。其中, 林地各情景中得到严格保护, 基本趋势是持续增长, 因而其对生态用地增长的贡献最大, 特别是在经济低、中速增长情景中。到2050年, 各情景林地约增加至29406.60万~30733.80万hm², 这将有利于充分发挥森林的多种生态系统服务功能, 促进生态环境质量的明显改善。

牧草地表现为先增加后减少的基本趋势, 这是因为随着未来人口增长趋缓乃至负增长, 畜肉产品需求总量增长相应减缓乃至减少, 而单位面积牧草地畜肉产量水平则相对提

表6 城镇化社会经济要素模拟结果

Table 6 Simulation results of socio-economic factors of urbanization

年份		国内生产总值/亿元（1990年价格）			总人口/万人			城镇化水平/%		
		经济低 速增长	经济中 速增长	经济高 速增长	经济低 速增长	经济中 速增长	经济高 速增长	经济低 速增长	经济中 速增长	经济高 速增长
2017	实际值	226782	226782	226782	139008	139008	139008	58.52	58.52	58.52
2020	预测量	270974	271141	271309	141298	141701	142102	61.51	61.56	61.61
	净增量	44192	44359	44527	2290	2693	3094	2.99	3.04	3.09
	净增率/%	19.49	19.56	19.63	1.65	1.94	2.23	5.11	5.19	5.28
2030	预测量	430889	440301	449678	144359	146040	147702	69.45	69.63	69.81
	净增量	159915	169160	178369	3061	4339	5600	7.9381	8.0714	8.2005
	净增率/%	59.01	62.39	65.74	2.17	3.06	3.94	12.91	13.11	13.31
2035	预测量	510459	530916	551341	143525	145805	148048	72.20	72.43	72.66
	净增量	79570	90615	101663	-834	-235	346	2.7501	2.8043	2.8547
	净增率/%	18.47	20.58	22.61	-0.58	-0.16	0.23	3.96	4.03	4.09
2040	预测量	584458	620770	657103	141929	144785	147576	74.36	74.65	74.92
	净增量	73999	89854	105762	-1596	-1020	-472	2.1609	2.2138	2.2617
	净增率/%	14.50	16.92	19.18	-1.11	-0.70	-0.32	2.99	3.06	3.11
2050	预测量	705693	787816	870148	137965	141902	145702	77.53	77.93	78.31
	净增量	121235	167046	213045	-3964	-2883	-1874	3.1675	3.2827	3.3848
	净增率/%	20.74	26.91	32.42	-2.79	-1.99	-1.27	4.26	4.40	4.52

升。预计各情景牧草地到2050年约为27809.90万hm²、26799.20万hm²和25784.50万hm²，其中减少的部分在保证防止出现荒漠化、水土流失等问题的前提下，可成为未来建设用地扩充的部分来源。

水域从长远来看整体没有减少，在经济低、中速增长情景中2050年相比2020年甚至略有增加。具体表现为在呈现一定增长趋势后，略有不同幅度缩减，但2050年面积仍高于2020年，大约为4283.89万~4464.90万hm²，这将有利于保证水产品以及相关水环境生态功能的稳定供给。

(2) 建设用地模拟结果

根据表8和图5，随着2020—2050年中国城镇化水平继续大幅提升，经济低、中、高速增长情景的建设用地总量需求均将有不同程度增长，但增长幅度将明显下降。预计到2050年中国城镇化水平达到78%左右时，各情景建设用地总量将分别增长至4007.29万hm²、4119.62万hm²和4214.25万hm²，相比2020年净增量为155.87万hm²、257.55万hm²和342.88万hm²。

具体而言，随着人口继续由乡村向城市转移，并伴随着人口家庭规模小型化以及改善性住房需求，城镇住房需求不断提升，使得各情景城市居住用地均呈现相对较大幅度增长。到2050年，各情景城市居住用地面积达267.74万hm²、332.18万hm²和382.72万hm²，相比2020年增加了77.4万hm²、136.59万hm²和183.21万hm²，其在城市建设用地中所占比例将有较大提升，达到34.76%~41.83%。

城市工业用地的长期趋势表现为总体继续增加，但增长速度不断放缓，规模逐渐达到相对稳定状态。一方面是由于中国步入工业化后期，工业产值增长逐渐稳定；另一方面

表7 非建设用地模拟结果
Table 7 Simulation results of non-construction land

年份		耕地/万 hm ²			林地/万 hm ²		
		经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
2017	实际值	13488.22	13488.22	13488.22	26701.66	26701.66	26701.66
2020	预测量	13254.20	13231.60	13208.50	27509.60	27464.60	27419.00
	净增量	-234.02	-256.62	-279.72	807.94	762.94	717.34
	净增率/%	-1.73	-1.90	-2.07	3.03	2.86	2.69
2030	预测量	13017.90	12910.10	12794.70	29396.20	29166.30	28929.90
	净增量	-236.30	-321.50	-413.80	1886.60	1701.70	1510.90
	净增率/%	-1.78	-2.43	-3.13	6.86	6.20	5.51
2035	预测量	12800.50	12649.20	12483.70	29889.90	29558.90	29215.90
	净增量	-217.40	-260.90	-311.00	493.70	392.60	286.00
	净增率/%	-1.67	-2.02	-2.43	1.68	1.35	0.99
2040	预测量	12596.80	12402.50	12185.10	30228.70	29795.00	29341.80
	净增量	-203.70	-246.70	-298.60	338.80	236.10	125.90
	净增率/%	-1.59	-1.95	-2.39	1.13	0.80	0.43
2050	预测量	12366.60	12083.50	11754.00	30733.80	30089.70	29406.60
	净增量	-230.20	-319.00	-431.10	505.10	294.70	64.80
	净增率/%	-1.83	-2.57	-3.54	1.67	0.99	0.22

年份		牧草地/万 hm ²			水域/万 hm ²		
		经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
2017	实际值	28614.66	28614.66	28614.66	4219.72	4219.72	4219.72
2020	预测量	29030.10	28940.80	28851.80	4314.25	4313.95	4301.12
	净增量	415.44	326.14	237.14	94.53	94.23	81.40
	净增率/%	1.45	1.14	0.83	2.24	2.23	1.93
2030	预测量	29471.50	29059.10	28646.60	4494.04	4489.31	4427.56
	净增量	441.40	118.30	-205.20	179.79	175.36	126.44
	净增率/%	1.52	0.41	-0.71	4.17	4.06	2.94
2035	预测量	29208.30	28636.40	28063.70	4511.62	4503.88	4416.52
	净增量	-263.20	-422.70	-582.90	17.58	14.57	-11.04
	净增率/%	-0.89	-1.45	-2.03	0.39	0.32	-0.25
2040	预测量	28791.90	28067.20	27340.80	4504.95	4494.07	4381.19
	净增量	-416.40	-569.20	-722.90	-6.67	-9.81	-35.33
	净增率/%	-1.43	-1.99	-2.58	-0.15	-0.22	-0.80
2050	预测量	27809.90	26799.20	25784.50	4464.90	4447.44	4283.89
	净增量	-982.00	-1268.00	-1556.30	-40.05	-46.63	-7.30
	净增率/%	-3.41	-4.52	-5.69	-0.89	-1.04	-2.22

则是由于工业用地集约利用和产出水平不断提高。到2050年，各情景城市工业用地增长至139.20万hm²、145.08万hm²和150.29万hm²，相比2020年净增加24.54万hm²、30.49万hm²和35.76万hm²，其在城市建设用地中所占比例有所下降，约为16.43%~18.07%。

城市第三产业用地的变化趋势与城市工业用地类似，即总体保持增长，但增长幅度

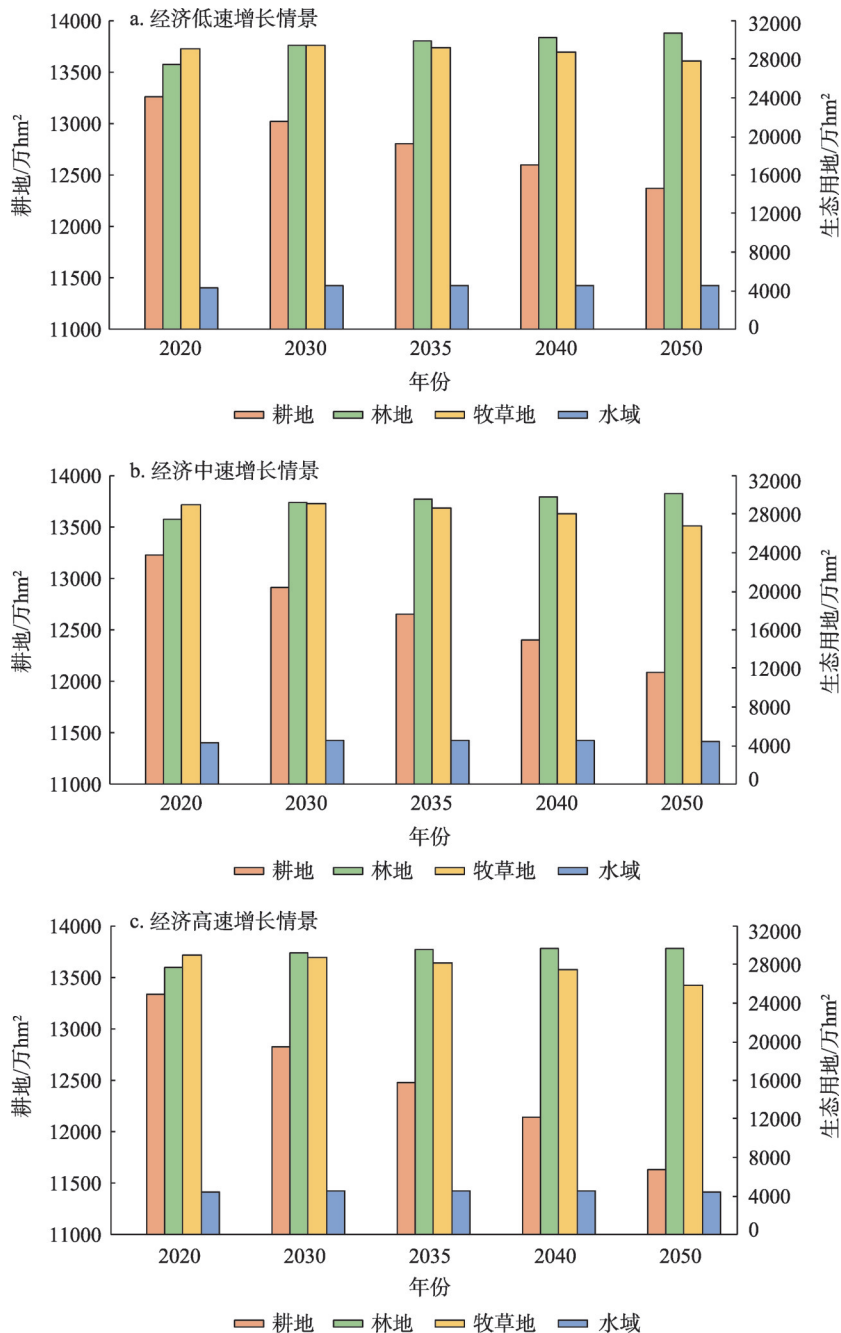


图4 非建设用地变化趋势

Fig. 4 Changing trends in non-construction land

日趋减小，规模达到相对稳定状态。究其原因，主要是第三产业产值增长将随着经济下行压力而有所放缓，而用地效率则不断提升，故其规模在经过一定程度增长后也基本稳定。到2050年，各情景城市第三产业用地增长至73.73万hm²、75.88万hm²和77.67万hm²，相比2020年净增加16.09万hm²、18.37万hm²和20.29万hm²，其在城市建设用地中所占比例略有下降，约为8.49%~9.57%。

表8 建设用地模拟结果

Table 8 Simulation results of construction land

年份		城市居住用地/万 hm ²			城市工业用地/万 hm ²		
		经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
2017	实际值	169.79	169.79	169.79	110.84	110.84	110.84
2020	预测量	190.34	195.59	199.51	114.66	114.59	114.53
	净增量	20.54	25.80	29.71	3.82	3.75	3.69
	净增率/%	12.10	15.19	17.50	3.45	3.39	3.33
2030	预测量	228.89	253.91	272.89	131.12	131.97	132.79
	净增量	38.55	58.32	73.38	16.46	17.38	18.26
	净增率/%	20.25	29.82	36.78	14.36	15.16	15.94
2035	预测量	242.01	277.21	304.14	135.69	137.46	139.14
	净增量	13.12	23.30	31.25	4.57	5.49	6.35
	净增率/%	5.73	9.18	11.45	3.48	4.16	4.78
2040	预测量	252.25	297.44	332.31	138.36	141.29	144.01
	净增量	10.24	20.23	28.17	2.68	3.83	4.88
	净增率/%	4.23	7.30	9.26	1.97	2.79	3.51
2050	预测量	267.74	332.18	382.72	139.20	145.08	150.29
	净增量	15.49	34.74	50.41	0.84	3.79	6.28
	净增率/%	6.14	11.68	15.17	0.61	2.68	4.36

年份		城市第三产业用地/万 hm ²			城市道路交通设施用地/万 hm ²		
		经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
2017	实际值	55.08	55.08	55.08	83.65	83.65	83.65
2020	预测量	57.64	57.51	57.38	86.76	86.76	86.75
	净增量	2.56	2.43	2.30	3.12	3.11	3.11
	净增率/%	4.64	4.41	4.18	3.72	3.72	3.71
2030	预测量	68.31	68.42	68.50	103.19	103.86	104.51
	净增量	10.67	10.91	11.12	16.43	17.10	17.76
	净增率/%	18.52	18.97	19.39	18.93	19.71	20.47
2035	预测量	71.36	71.83	72.25	106.47	107.43	108.33
	净增量	3.05	3.42	3.75	3.28	3.57	3.82
	净增率/%	4.47	5.00	5.47	3.18	3.44	3.65
2040	预测量	73.16	74.11	74.94	107.93	109.07	110.10
	净增量	1.80	2.27	2.69	1.46	1.64	1.78
	净增率/%	2.52	3.16	3.72	1.37	1.53	1.64
2050	预测量	73.73	75.88	77.67	108.35	109.71	110.90
	净增量	0.56	1.77	2.74	0.42	0.64	0.79
	净增率/%	0.77	2.39	3.65	0.39	0.59	0.72

续表 8

年份		村镇建设用地/万 hm ²			建设用地总量/万 hm ²		
		经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长	经济低速增长	经济中速增长	经济高速增长
2017	实际值	3205.77	3205.77	3205.77	3757.33	3757.33	3757.33
2020	预测量	3260.24	3265.32	3270.38	3851.42	3862.07	3871.37
	净增量	54.47	59.55	64.61	94.09	104.74	114.04
	净增率/%	1.70	1.86	2.02	2.50	2.79	3.04
2030	预测量	3297.48	3315.91	3333.97	3994.63	4042.08	4083.02
	净增量	37.24	50.59	63.59	143.21	180.01	211.65
	净增率/%	1.14	1.55	1.94	3.72	4.66	5.47
2035	预测量	3278.98	3302.69	3325.67	4006.80	4072.22	4128.40
	净增量	-18.50	-13.22	-8.30	12.17	30.14	45.38
	净增率/%	-0.56	-0.40	-0.25	0.30	0.75	1.11
2040	预测量	3260.14	3288.15	3314.96	4008.43	4090.88	4161.33
	净增量	-18.84	-14.54	-10.71	1.63	18.66	32.93
	净增率/%	-0.57	-0.44	-0.32	0.04	0.46	0.80
2050	预测量	3237.08	3269.43	3299.37	4007.29	4119.62	4214.25
	净增量	-23.06	-18.72	-15.59	-1.14	28.74	52.92
	净增率/%	-0.71	-0.57	-0.47	-0.03	0.70	1.27

城市道路交通设施用地则在2030年之前继续快速增长，此后将随着机动车保有量趋于饱和而逐渐进入平稳阶段，增长速度明显减缓。到2050年，各情景城市道路交通设施用地约增长至108.35万hm²、109.71万hm²和110.90万hm²，相比2020年净增加29.86万hm²、31.22万hm²和32.41万hm²，其在城市建设用地中所占比例较为稳定，约为12.12%~14.07%。

村镇建设用地的总体趋势长远来看，随着农村人口向城镇地区流动以及人口数量下降，其规模将逐渐呈现下降趋势，特别是在2030年城镇化水平达到70%以上之后，逐步进入减量化阶段。到2050年，各情景村镇建设用地面积约为3237.08万hm²、3269.43万hm²和3299.37万hm²。

在城市建设用地与城镇化水平之间的关系（图6）方面，首先，随着未来城镇化进程推进，各情景城市建设用地在不同时期的增量虽然趋向减少，但总量保持增长，说明土地对未来城镇化发展仍具有一定主控作用。2020—2030年，各情景新增城市建设用地约为105.97万~148.07万hm²，2031—2040年减少为44.01万~85.62万hm²，2041—2050年则减少为18.78万~60.71万hm²。根据前述用地变化趋势分析，城市建设用地的增长主要源自城市居住用地，其次为城市工业用地和第三产业用地。这有利于形成生产、生活空间的合理结构。究其原因，乡村向城市转移人口不断增多，未来家庭规模小型化以及部分城市居民改善住房条件，产生了巨大的住房需求，而各产业增长对土地开发的部分需求则被地均产出提升而抵消。其次，就2020—2050年城镇化水平每提高1%所需城市建设用地而言，经济低、中速增长情景中逐渐下降，分别由13.35万hm²、16.03万hm²减

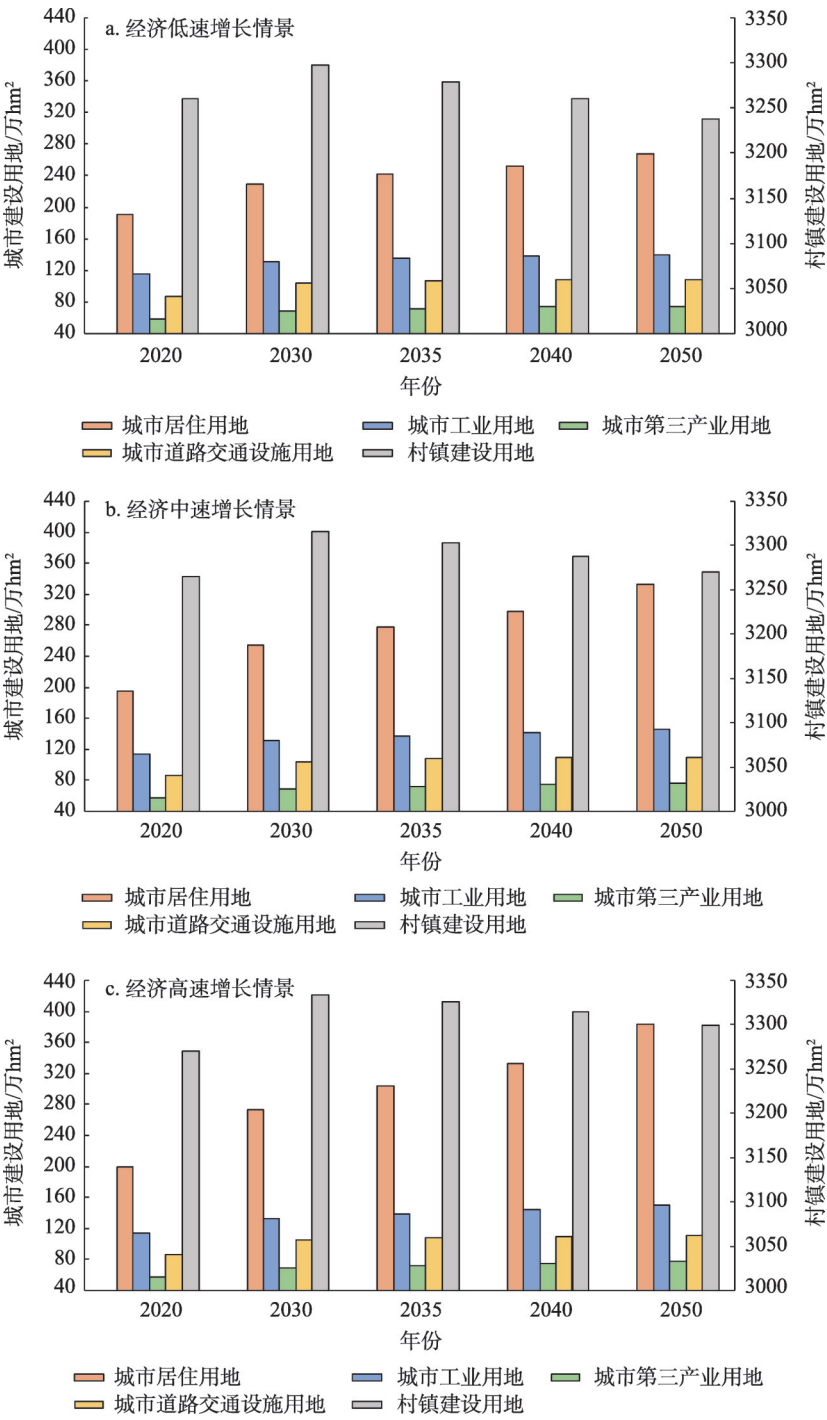


图5 建设用地变化趋势

Fig. 5 Changing trends in construction land

少至6.73万hm²和14.42万hm²；经济高速增长情景中则有所增长，由18.06万hm²提升至20.32万hm²。这表明土地对城镇化的主控和拉动作用将有所减弱，仅靠大规模国土开发和投入难以持续推进城镇化高质量发展。

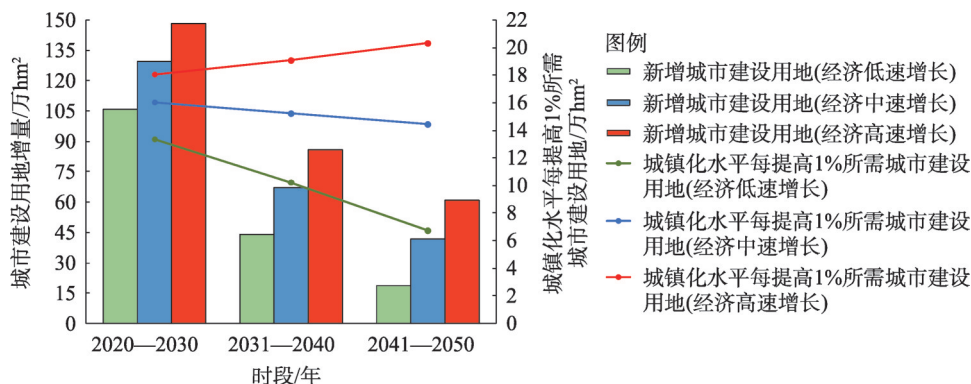


图6 2020—2050年城镇化进程中新增城市建设用地

Fig. 6 Urban construction land increased during the urbanization process in 2020-2050

3 结论与讨论

3.1 结论

本文通过整合土地利用与经济、人口等城镇化要素的关系，突出了土地在城镇化过程中的主控作用，构建了基于土地利用的中国城镇化SD模型，实现了对中国未来快速城镇化过程中土地利用变化的多情景模拟。主要结论为：

(1) 根据存流量检验和灵敏度分析结果，基于土地利用的中国城镇化SD模拟模型有效且稳定，能够用于模拟未来中国城镇化与土地利用。

(2) 耕地在未来城镇化进程中将呈现出一定程度减少趋势，到2050年其在经济低、中、高速增长情景中将分别减少为12366.60万 hm^2 、12083.50万 hm^2 和11754.00万 hm^2 。按照《全国国土规划纲要（2016—2030年）》耕地保有量维持在18.25亿亩不减少的要求，到2050年需补充83.17万~412.67万 hm^2 耕地资源。

(3) 2020—2050年，生态用地总体表现为先增加后减少，其中：林地在严格保护之下将有明显增加，2050年时约增长为29406.60万~30733.80万 hm^2 ；牧草地表现为先增加后减少的基本趋势，2050年时约为25784.50万~27809.90万 hm^2 ；水域整体没有减少，甚至略有增加，2050年时约为4283.89万~4464.90万 hm^2 。

(4) 到2050年中国城镇化水平达到78%左右时，建设用地总量将增长为4007.29万~4214.25万 hm^2 ，较2020年净增155.87万~342.88万 hm^2 。其中，城市居住用地增长幅度最大；城市工业用地、城市第三产业用地、城市道路交通设施用地增长速度将有不同程度减缓，并逐渐达到相对饱和状态；村镇建设用地则将趋于进入减量化阶段，生产、生活空间比例结构更加合理。

3.2 讨论

(1) 随着未来城镇化和老龄化的并行推进，我国建设用地总量规模将继续增长，但增幅于2035年之后逐渐减小。其中，城市建设用地不断增加，尤以城市居住用地增加最为明显，村镇建设用地则趋向进入减量化阶段。究其原因，一方面，人口城镇化仍将继续推进，同时经济社会发展的合理需求以及产业结构优化，带动了建设用地规模增加、城市用地结构调整等土地城镇化过程；另一方面，随着老龄化加剧，人口总量将有所下降，经济增长可能受到不利影响而逐渐趋缓，减小了国土空间开发利用需求的增长压

力。上述对建设用地趋势的总体预判,与Chen等^[58]最近对城市土地扩张的预测结果基本相同,其指出中国城市土地需求将在2040年前迅速增长。Liu等^[12]基于FLUS模型的研究也提出了到2050年中国建设用地达到4000万 hm^2 左右的情景结果,但Wang等^[59]则提出2033年建设用地将急剧扩张到4948.90万 hm^2 。此外,根据非建设用地模拟结果,林地将明显增加、水域总体保持不减少,这将有利于充分发挥此类国土空间的重要生态功能,提升人类福祉。但耕地和牧草地将出现不同程度缩减,应当尽量避免其对粮食生产、畜牧发展以及生态系统的不利影响。近年来,相关研究^[12,19,60]也多提出了未来我国耕地和部分生态用地可能因城市扩张而继续减少的趋势,但变化幅度和速率不尽相同。

(2) 本模型模拟结果反映的是在特定情景条件假定下未来中国土地利用的长期趋势,而非对逐年土地利用数量的精准预测,故此处仅对土地利用转换关系做出可能性探讨。随着未来城镇化推进,建设用地增长的部分主要是各类型城市建设用地,村镇建设用地则将趋向进入减量化阶段。因此,可以通过加强国土综合整治,对闲置土地进行提效再开发,盘活农村建设用地存量资源,为城市用地扩张提供指标。此外,建设用地的扩张必然与非建设用地产生一定权衡关系。由于耕地、牧草地将出现不同程度缩减,故在保障粮食和生态系统安全的前提下,部分耕地和牧草地经严格评估和审批后,也可适当成为建设用地扩张的补充来源,但应尽量避免占用永久基本农田以及对维系国土空间生态功能和系统完整性至关重要的森林、湿地等资源。

(3) 基于研究结论,提出以下建议:第一,坚守耕地保护的底线思维,树立“数量—质量—生态”三位一体的耕地保护观。随着城镇化推进,耕地保护与城镇空间扩张之间不可避免地存在着权衡关系。尽管未来中国人口将开始负增长,但考虑到庞大的人口基数及其对粮食安全稳定供给的需求、国际粮食贸易不确定性以及耕地轮作休耕和生态恢复等问题,仍需严格控制建设占用耕地,尤其应加强永久性基本农田保护。第二,开展系统性生态空间保护和修复,以推动国土空间的整体保护和优化。在国土空间规划新时代,应树立系统的国土生态安全观,加强对林地、草地、水域等生态空间的严格保护和系统修复,这是维持生态系统完整性、充分发挥国土空间生态服务功能的前提和基础。第三,既要加强建设用地节约集约利用,通过要素市场配置的作用盘活村镇建设用地,严控新增建设用地,也要合理安排建设用地规模,满足城镇化发展对国土空间利用的基本需求,逐步引导形成科学适度有序的国土空间开发格局。

参考文献(References):

- [1] 唐华俊,吴文斌,杨鹏,等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展. 地理学报, 2009, 64(4): 456-468. [TANG H J, WU W B, YANG P, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 456-468.]
- [2] VERBURG P, SCHOT P, DIJST M, et al. Land use change modelling: Current practice and research priorities. GeoJournal, 2004, 61: 309-324.
- [3] 王其藩. 系统动力学. 上海: 上海财经大学出版社, 2009. [WANG Q F. System Dynamic. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2009.]
- [4] 刘耀彬,陈斐,李仁东. 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. 地理研究, 2007, 26(1): 187-196. [LIU Y B, CHEN F, LI R D. Simulation of regional urbanization and eco-environment coupling and regulation policies: Taking Jiangsu province as a case. Geographical Research, 2007, 26(1): 187-196.]
- [5] TAO J, FU M, ZHANG D, et al. System dynamics modeling for the pressure index of cultivated land in China. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(2): 1045-1049.

- [6] HE C, OKADA N, ZHANG Q, et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography*, 2006, 26(3-4): 323-345.
- [7] GENG B, ZHENG X, FU M. Scenario analysis of sustainable intensive land use based on SD model. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 29: 193-202.
- [8] 许月卿, 李艳华, 赵菲菲. 水资源约束下土地利用变化情景模拟研究: 以河北省张北县为例. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 214-223. [XU Y Q, LI Y H, ZHAO F F. Simulation of land use change under the restriction of water resource in ecologically fragile region: A case study of Zhangbei county, Hebei province. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 214-223.]
- [9] 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. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 211-218. [HU Z N, LI X, LOU S Y, et al. Multi-scenario simulation of land use structure of Yangzhou city based on systems dynamics model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 211-218.]
- [10] 李月臣, 何春阳. 中国北方土地利用/覆盖变化的情景模拟与预测. *科学通报*, 2008, 53(6): 713-723. [LI Y C, HE C Y. Scenario simulation and forecast of land use/cover change in northern China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 713-723.]
- [11] 祝秀芝, 李宪文, 贾克敬, 等. 上海市土地综合承载力的系统动力学研究. *中国土地科学*, 2014, 28(2): 90-96. [ZHU X Z, LI X W, JIA K J, et al. A study on system dynamics of land comprehensive carrying capacity in Shanghai city. *China Land Science*, 2014, 28(2): 90-96.]
- [12] LIU X, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [13] WU M, REN X, CHE Y, et al. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: A case study in Baoshan district, Shanghai, China. *Environmental Management*, 2015, 56(2): 402-419.
- [14] 王双, 何春阳, 潘耀忠, 等. 水资源约束下北京地区2004—2020年土地利用变化情景模拟研究. *自然资源学报*, 2006, 21(4): 535-544. [WANG S, HE C Y, PAN Y Z, et al. Research for scenarios simulation of urban land use change in Beijing by system dynamic model under water restriction from 2004 to 2020. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4): 535-544.]
- [15] TIAN L, XU G F, FAN C J, et al. Analyzing mega city-regions through integrating urbanization and eco-environment systems: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(1): 114.
- [16] 魏后凯. 现代区域经济学. 北京: 经济管理出版社, 2006. [WEI H K. *Modern Regional Economics*. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2006.]
- [17] XING L, XUE M, HU M. Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy-resource-environment system: Case of Wuhan city in China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 474-487.
- [18] 苏伟忠, 杨桂山, 陈爽, 等. 城市增长边界分析方法研究: 以长江三角洲常州市为例. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 322-331. [SU W Z, YANG G S, CHEN S, et al. Analysis method of urban growth boundary of the Changzhou city in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 322-331.]
- [19] 田贺, 梁迅, 黎夏, 等. 基于SD模型的中国2010—2050年土地利用变化情景模拟. *热带地理*, 2017, 37(4): 547-561. [TIAN H, LIANG X, LI X, et al. Simulating multiple land use scenarios in China during 2010-2050 based on system dynamic model. *Tropical Geography*, 2017, 37(4): 547-561.]
- [20] 熊鹰, 陈云, 李静芝, 等. 基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟. *地理学报*, 2018, 73(3): 1-16. [XIONG Y, CHEN Y, LI J Z, et al. Analog simulation of urban construction land supply and demand based on land intensive use. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 1-16.]
- [21] LAUF S, HAASE D, HOSTERT P, et al. Uncovering land-use dynamics driven by human decision-making: A combined model approach using cellular automata and system dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 27-28: 71-82.
- [22] XU X, DU Z, ZHANG H. Integrating the system dynamic and cellular automata models to predict land use and land cover change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 52: 568-579.

- [23] 许联芳, 张建新, 陈坤, 等. 基于SD模型的湖南省土地利用变化情景模拟. 热带地理, 2014, 34(6): 859-867. [XU L F, ZHANG J X, CHEN K, et al. Land use change scenarios simulation in Hunan province based on the SD model. Tropical Geography, 2014, 34(6): 859-867.]
- [24] HUANG Q, HE C, LIU Z, et al. Modeling the impacts of drying trend scenarios on land systems in northern China using an integrated SD and CA model. Science China-Earth Sciences, 2014, 57(4): 839-854.
- [25] 黄庆旭, 史培军, 何春阳, 等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟. 地理学报, 2006, 61(12): 1299-1310. [HUANG Q X, SHI P J, HE C Y, et al. Modelling land use change dynamics under different aridification scenarios in Northern China. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(12): 1299-1310.]
- [26] LIANG Y, XU Z. An integrated analysis approach to LUCC at regional scale: A case study in the Ganzhou district of Zhangye city, China. Sciences in Cold and Arid Regions, 2012, 4(4): 320-329.
- [27] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析. 地理研究, 2011, 30(3): 564-576. [LIANG Y J, XU Z M, ZHONG F L. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou district of Zhangye city. Geographical Research, 2011, 30(3): 564-576.]
- [28] 顾朝林, 管卫华, 刘合林. 中国城镇化2050: SD模型与过程模拟. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 818-832. [GU C L, GUAN W H, LIU H L. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation. Scientia Sinica Terrae, 2017, 47(7): 818-832.]
- [29] GU C L, GUAN W H, LIU H L. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation. Science China-Earth Sciences, 2017, 60(6): 1067-1082.
- [30] GU C. Urbanization: Processes and driving forces. Science China-Earth Sciences, 2019, 62: 1351-1360.
- [31] FANG C, ZHOU C, GU C, et al. A proposal for the theoretical analysis of the interactive coupled effects between urbanization and the eco-environment in mega-urban agglomerations. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(12): 1431-1449.
- [32] 邓郁松, 邵挺. 2020—2050: 中国城镇住房市场发展趋势与目标. 重庆理工大学学报: 社会科学, 2018, 32(8): 1-6. [DENG Y S, SHAO T. 2020-2050: The development trend and target of China's urban housing market. Journal of Chongqing University of Technology: Social Science, 2018, 32(8): 1-6.]
- [33] GU C, KESTELOOT C, COOK I G. Theorising Chinese urbanisation: A multi-layered perspective. Urban Studies, 2015, 52: 2564-2580.
- [34] 李稻葵, 袁钢明, 厉克奥博, 等. 十九大后的中国经济2018、2035、2050. 北京: 清华大学中国与世界经济研究中心, 2017. [LI D K, YUAN G M, LI K A B, et al. The Chinese economy after the 19th National Congress. Beijing: Center for China in the World Economy, 2017.]
- [35] 李瑞敏, 何群, 李帅. 中国机动车保有量发展趋势分析. 城市交通, 2013, 11(5): 69-75. [LI R M, HE Q, LI S. Analyses of automobile ownership development trend in China. Urban Transport of China, 2013, 11(5): 69-75.]
- [36] 孔祥斌. 粮食安全: 不能忽视耕地的作用: 对茅于軾先生的“18亿亩红线与粮食安全无关”的回应. 中国土地, 2011, (6): 57-60. [KONG X B. Food security: The role of cultivated land cannot be ignored: Response to Mr. Mao Yushi's "1.8 billion mu red line has nothing to do with food security". China Land, 2011, (6): 57-60.]
- [37] Millennium Ecosystem Assessment (MA). Ecosystems and Human Well-being. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [38] 燕守广, 李辉, 李海东, 等. 基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法: 以南京市为例. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1109-1118. [YAN S G, LI H, LI H D, et al. Ecosystem health assessment method of eco-redline based on land use and landscape pattern in Nanjing. Journal of Natural Resources, 2020, 35(5): 1109-1118.]
- [39] 周琳, 程广燕. 中国粮食总量需求2030年将达峰值. 中国经济时报, 2016-12-01(005). [ZHOU L, CHENG G Y. China's total grain demand will peak in 2030. China economic times, 2016-12-01(005).]
- [40] DARGAY J, GATELY D. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 1999, 33(2): 101-138.
- [41] 曹祺文, 鲍超, 顾朝林, 等. 基于水资源约束的中国城镇化SD模型与模拟. 地理研究, 2019, 38(1): 167-180. [CAO Q W, BAO C, GU C L, et al. China's urbanization SD modelling and simulation based on water resource constraints. Geographical Research, 2019, 38(1): 167-180.]

- [42] GU C, YE X, CAO Q, et al. System dynamics modelling of urbanization under energy constraints in China. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9956.
- [43] BAI C, ZHANG Q. *Research on China's Economic Growth Potential*. Oxford: Routledge, 2017: 4-29.
- [44] 陆旸, 蔡昉. 从人口红利到改革红利: 基于中国潜在增长率的模拟. *世界经济*, 2016, 39(1): 3-23. [LU Y, CAI F. From demographic dividend to reform dividend: A simulation based on China's potential growth rate. *World Economy*, 2016, 39(1): 3-23.]
- [45] CAI F, LU Y. Take-off, persistence and sustainability: The demographic factor in Chinese growth. *Asia & the Pacific Policy Studies*, 2016, 3(2): 203-225.
- [46] 盛来运, 郑鑫. 实现第二个“一百年”目标需要多高增速?. *管理世界*, 2017, (10): 1-7. [SHENG L Y, ZHENG X. What is the rate of economic growth needed to achieve the second "hundred-year" goal?. *Management World*, 2017, (10): 1-7.]
- [47] ZHUANG J, VANDENBERG P, HUANG Y. *Growing beyond the low-cost advantage: How the People's Republic of China can avoid the middle-income trap?*. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2012.
- [48] 翟振武. 科学研判人口形势积极应对人口挑战. *人口与社会*, 2019, 35(1): 13-17. [ZHAI Z W. Scientifically judging the population situation and actively addressing population challenges. *Population and Society*, 2019, 35(1): 13-17.]
- [49] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2019*. New York: United Nations, 2019.
- [50] World Bank. Population estimates and projections. <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections>, 2019-01-05.
- [51] 辛翔飞, 王济民. 我国粮食自给水平目标设定: 研究综述与政策启示. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2257-2269. [XIN X F, WANG J M. Target setting of food self-sufficiency level in China: Literature review and policy enlightenment. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2257-2269.]
- [52] 唐华俊. 新形势下中国粮食自给战略. *农业经济问题*, 2014, 35(2): 4-10. [TANG H J. China's grain self-sufficiency strategy in the new situation. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(2): 4-10.]
- [53] 陈百明, 周小萍. 中国粮食自给率与耕地资源安全底线的探讨. *经济地理*, 2005, 25(2): 145-148. [CHEN B M, ZHOU X P. Analysis on the grain self-sufficient ratio and the safe baseline of cultivated land in China. *Economic Geography*, 2005, 25(2): 145-148.]
- [54] 唐华俊, 李哲敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究. *中国农业科学*, 2012, 45(11): 2315-2327. [TANG H J, LI Z M. Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2315-2327.]
- [55] 黄季焜. 四十年中国农业发展改革和未来政策选择. *农业技术经济*, 2018, (3): 4-15. [HUANG J K. Forty years of China's agricultural development and reform and the way forward in the future. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018, (3): 4-15.]
- [56] 国家统计局. 建筑业持续快速发展 城乡面貌显著改善: 新中国成立70周年经济社会发展成就系列报告之十. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/31/content_5417485.htm, 2019-07-31. [National bureau of statistics. The construction industry continues to develop rapidly and the appearance of urban and rural areas has improved significantly: The tenth report on the achievements of economic and social development of the 70th anniversary of the founding of new China. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/31/content_5417485.htm, 2019-07-31.]
- [57] 任泽平, 熊柴, 白学松. 中国住房存量报告: 2019. https://mp.weixin.qq.com/s/8eF_ysYdiqXpMAIuC2rIqw, 2019-08-16. [REN Z P, XIONG C, BAI X S. China's housing stock report: 2019. https://mp.weixin.qq.com/s/8eF_ysYdiqXpMAIuC2rIqw, 2019-08-16.]
- [58] CHEN G, LI X, LIU X, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nature Communications*, 2020, 11: 537.
- [59] WANG J, CHEN Y, SHAO X, et al. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future. *Land Use Policy*, 2012, 29(4): 737-749.
- [60] 张克锋, 彭晋福, 张定祥, 等. 基于城镇化水平和GDP情景下中国未来30年土地利用变化模拟. *中国土地科学*, 2007, 21(2): 58-64. [ZHANG K F, PENG J F, ZHANG D X, et al. Simulation of land use change based on urbanization rate and GDP of China in next 30 years. *China Land Science*, 2007, 21(2): 58-64.]

China's urbanization SD modelling and simulation based on land use

CAO Qi-wen^{1,2}, GU Chao-lin², GUAN Wei-hua^{3,4}

(1. Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100045, China; 2. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: China is still experiencing the process of rapid urbanization. How will cultivated land and ecological land, such as woodland, grassland, and water body change? Will construction land continue to grow rapidly? These are not only the concerns of national macro-policy makers, but also the specific problems faced by scholars and ordinary people. This paper attempts to make a multi-scenario analysis of the above issues by constructing a system dynamics (SD) model of China's urbanization based on land use. This SD model integrates the relationship between land use and multi-factors in the urbanization process, including economy and population, and highlights the dominant role of land resources in the urbanization process. The conclusions can be drawn as follows: First, according to the results of stock-flow validation and sensitivity analysis, the China's urbanization SD model based on land use is effective with great reliability and stability. Therefore, the model can be used to predict and simulate the future trend of urbanization process and land resource use in China. Second, in order to meet the requirement of the "National Land Planning Outline (2016-2030)" that the amount of cultivated land should be maintained at $12166.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$, there will be a need to supplement 83.17×10^4 - $412.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ of cultivated land from other types of land by 2050. This is because the cultivated land will show a decreasing trend in the China's urbanization in the future. In the low scenario, medium and high-speed economic growth, the amount of cultivated land by 2050 will be reduced to 12366.60×10^4 , 12083.50×10^4 , and $11754.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$, respectively. Third, with the improvement of urbanization levels, the total amount of construction land will increase accordingly. Specifically, if China's urbanization level reaches 78% by 2050, the total construction land will increase to 4283.89×10^4 - $4464.90 \times 10^4 \text{ hm}^2$, with a net increase of 155.87×10^4 - $342.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$ compared with 2020. Fourth, the overall trend of ecological land in 2020-2050 is to increase first and then decrease. By 2050, the woodland will significantly increase to 29406.60×10^4 - $30733.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$, the grassland will decrease to 25784.50×10^4 - $27809.90 \times 10^4 \text{ hm}^2$, and the water body will not decrease and even increase slightly, the area of which would be 4283.89×10^4 - $4464.90 \times 10^4 \text{ hm}^2$. The research results can provide scientific supports for the multi-scenario simulation, evaluation, and decision-making of territorial spatial planning.

Keywords: China's urbanization; land use; construction land; non-construction land; system dynamics; multi-scenario simulation