

DOI: 10.5846/stxb201809131977

唐守娟, 张力小, 郝岩, 刘仟策, 刘宇鹏, 韩骥. 城市住宅建筑系统流量-存量动态模拟——以北京市为例. 生态学报, 2019, 39(4): - .

Tang S J, Zhang L X, Hao Y, Liu Q C, Liu Y P, Han J. Dynamic modeling of stock and flow in an urban residential building system: A case study of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

城市住宅建筑系统流量-存量动态模拟 ——以北京市为例

唐守娟¹, 张力小^{1,*}, 郝岩¹, 刘仟策², 刘宇鹏³, 韩骥⁴

1 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

2 中国科学院大学中丹学院, 北京 100049

3 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

4 华东师范大学, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241

摘要: 地面建筑物的累积与更新是城市化过程的结果与显性特征之一。城市建筑系统在不同层面上与外部环境系统进行着物质能量交换, 对这种交互产生的资源压力与环境胁迫的关注, 使其成为城市代谢研究领域中的热点问题。系统分析与模拟城市建筑物流量-存量的动态变化过程及其资源环境响应, 对于揭示城市建筑系统代谢机理, 提高城市总体规划精准性、强化资源系统韧性管理、提升废弃物处置效率等宏观战略具有重要意义。以北京市为例, 基于 Stella 建模平台, 构建了城市居民住宅建筑系统流量-存量的动态模拟模型, 定量模拟了不同管理情景下钢材需求量与建筑拆除垃圾产生量的变化区间。结果表明: (1) 基准情景下, 北京住宅建筑新建流量前期增速较快, 2005 年达到峰值 3024.1 万 m², 而拆除流量约于 2057 年达到峰值, 拆除面积为 2073.14 万 m²; 城市住宅建筑存量最高值出现在 2075 年左右, 面积为 7.51 亿 m²; (2) 与基准情景相比, 如果人均住宅建筑面积提高到 45 m², 从现在到模拟期结束 (2019—2100) 将增加钢铁需求量 3251.65 万 t; 而如果延长住宅建筑寿命至设计值, 同期可减少钢铁需求量 3022.9 万 t; (3) 基准情景、大面积情景以及长寿命情景下, 北京市城镇住宅建筑拆除垃圾峰值产生量分别为 0.29 亿 t、0.39 亿 t、0.20 亿 t, 政府管理部门应采取有针对性的应对措施, 提前做出综合利用和处理处置方案。

关键词: 城市代谢; 系统动力学模型; 住宅建筑; 存量-流量; Stella

Dynamic modeling of stock and flow in an urban residential building system: A case study of Beijing

TANG Shoujuan¹, ZHANG Lixiao^{1,*}, HAO Yan¹, LIU Qiance², LIU Yupeng³, HAN Ji⁴

1 State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

4 Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Accumulation and renovation of ground buildings are the typical characteristics and inevitable results of the urbanization process. The resources and environmental pressure associated with energy and material flows between the urban building system and hinterland environment make building system a hot issue in the field of urban metabolism research. Systematic modeling of urban building flow-stock dynamics and related resources and environmental response are of great significance for macro-management such as urban spatial planning, urban resource management, and waste disposal. Using

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505703); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (51661125010); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 (17L02ESPC)

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-12-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

Beijing as the case city, we established a dynamic model for stock and flow of the urban residential building system with the STELLA modeling platform. The dynamic interval between the demand for steel and amount of demolition waste generated under different management scenarios was quantitatively simulated. The simulation results are as follows: (1) In the baseline scenario, the construction flow of residential buildings in Beijing increased rapidly, reaching a peak of 30.24 million m^2 in 2005; the demolition flow will peak in around 2057, with a demolition floor area of 20.73 million m^2 . The highest value of the urban residential building stock will appear around 2075, with an area of 751 million m^2 . (2) If the per capita floor area reaches 45 m^2 , the total steel demand will increase by 32.52 million tons in the next 81 years (2019—2100); if the lifespan of residential buildings is prolonged to the design lifetime, the total steel demand will decrease by 30.23 million tons in the same period. (3) In the baseline scenario, large-area scenario, and long lifespan scenario, the peak value of demolition waste is 0.029 billion tons, 0.039 billion tons, and 0.020 billion tons, respectively. These results shed light for policy makers to take prompt action and improve reuse and treatment levels of building demolition waste in the future.

Key Words: urban metabolism; system dynamics model; residential buildings; stock-flow; STELLA

地面建筑物累积与更新是城市化过程显性特征与结果之一。城市扩张直接导致了建筑面积和密度的增加,而建筑物从其建筑材料的生产到最终建筑物拆除整个周期中都同周围环境进行着物质能量的流动。建筑材料已经成为继水资源之后第二大输入城市系统的物料^[1],对环境有着直接或间接的影响^[2-3]。如,混凝土所用砂、砾石的开采会破坏城市周边的景观和生态系统完整性;水泥、钢铁、平板玻璃等建材的生产部门均是区域污染排放的重点行业;建筑建设和拆除所产生的建筑垃圾量已占到城市垃圾总量的 30%—40%,而绝大部分建筑垃圾又都是以露天堆放或填埋方式处理,占用了大量土地且造成了大量资源的浪费^[4]。因此,研究城市建筑物流量与存量的动态变化,掌握其来源、分布和去向情况,对于揭示城市建筑系统代谢机理,提高城市总体规划精准性、强化资源系统韧性管理、提升废弃物处置效率等宏观战略具有重要意义^[5-8]。国内外研究进展也表明,建筑物代谢已成为城市代谢研究领域中的热点问题。

早期城市代谢研究清单已包含了建材/废物的流动项,如在香港^[9]和维也纳^[10]等案例城市的研究中均考虑了建筑流量部分,但是并没有涉及城市建筑存量(Stock in-use)部分。由于存量与流量之间有着密不可分的耦合关系,特别是建筑物存量很大程度上表征着城市发展的状态和“空间”服务能力,是流量变化的主要驱动力。对城市建筑流量-存量的同步关注,使建筑代谢逐渐作为研究主体从城市代谢分离出来,研究重点包括建筑系统的流量/存量精准核算、动态变化、生命周期环境影响等。目前城市建筑代谢的流量/存量核算方法主要是物质流分析方法(MFA, Material Flow Analysis),基于质量守恒定律,着重关注城市道路、桥梁与管道等基础设施以及住宅等地面建筑所引发的特定材料或元素在社会经济系统中流量和存量的静态结构和动态变化^[11]。相关案例研究主要有曼彻斯特和歌山^[12]、巴黎及其巴黎地区^[13]等城市尺度,当然也有国家尺度全部城市的研究,如美国^[14]、日本^[15]以及中国^[6]等。除了静态截面估算外,城市建筑物流量-存量的趋势分析与动态模拟也逐渐成为研究的重点。例如,Condeixa 等^[3]利用物质流分析方法研究了里约热内卢住宅建筑材料使用效率和废弃物管理的动态变化;Müller^[5]基于需求驱动,构建了城市建筑物动态模拟模型,并对荷兰 1900—2100 年住宅流量与存量进行模拟。该动态物质流分析模型经 Bergsdal 等^[16]修改并应用于挪威住宅存量研究分析;Hu 等^[17]同样应用动态物质流分析方法,模拟了 1900 年至 2100 年中国城乡住宅建筑系统中建筑面积存量的演变,估算了中国对住宅建设的钢铁需求以及房屋拆迁中的废钢供应情况^[18],并开展了北京市 1949—2050 年住宅系统的建设和拆除废弃物管理研究^[19];需要说明的是,Sartori 等^[20]在开展挪威住宅建筑动态存量研究时指出寿命和更新率这两个技术参数对模型具有重要影响。因此,在建模过程中需根据研究目的和数据情况不断提高参数的精确程度,充分考虑建筑物结构、建筑服役时间等,利用新获得数据强化模型验证,并根据城市发展的新态势细化模拟情景。

我国快速城市化过程发轫于改革开放后,加速于上世纪 90 年代中期后。作为我国首都的北京,是这个过程的典型缩影,2016 年北京城镇化率已达到 86.5%。城镇建筑物主要包括住宅、商业、工业、公共和其他目的的用房,其中住宅建筑年竣工面积占 50%以上。在北京市快速城镇化过程中,住宅建筑结构比例发生了显著变化(图 1),砖木、砖混以及钢混等呈现演替变化的特征。本文以北京市居民住宅建筑为例,基于 Stella 建模平台,构建了城市居民住宅建筑系统流量-存量的动态变化模型,并将建筑结构因素嵌入模型之中,精细化考虑不同建筑结构对建筑寿命以及物料强度产生的影响,系统模拟分析城市化过程中居民住宅建筑系统流量-存量的动态变化,综合考虑居住需求、建筑寿命等不同资源管理情景下资源与环境的影响变化规律。

1 研究方法

1.1 模型构建

城市住宅建筑存量的动态变化取决于新建和拆除两个流量过程^[21]。Stella 正是基于存量-流量建模模式的动态模拟软件平台,它通过诸如累积质量、能量、原料等库(Stock)来描述存量,不同的库间用各种流(Flow)进行连接,这些流可以使不同的库之间进行互相转移和变化。这种建模模式,使 Stella 在进行建筑物流量-存量动态模拟方面独具优势,由于不需要编写复杂的程序代码,大大提高了建模的交互性与通用性。本文以北京市城市居民住宅建筑为系统边界,构建城市住宅建筑系统的系统动力学模型(图 2),模拟时段为 1949—2100 年,模型初始值设定于 1949 年。模型包括 4 个子模块:

模块 I 是居民住宅建筑需求模块。住宅建筑物存量与流量变化主要受城市人口以及住宅需求驱动,该模块中包括两个重要参数,人均住宅建筑面积以及人口数。当年城市居民居住需求面积(S)由城镇常住人口(P)和人均建筑面积(A)的乘积决定(公式 1)。基于北京市未来 50 年户籍人口变动趋势预测研究^[22]、《北京城市总体规划(2016—2035)》对北京市常住人口的规划以及设立雄安新区集中疏解“非首都功能”的目标,城市人口动态变化可用逻辑斯蒂增长函数来表征(图 3)。

模块 II 为流量-存量模块,用来模拟新建流量面积-存量面积-拆除流量面积的动态变化。模型中每年新建面积等于新增城市住宅需求面积与拆除面积之和(公式 2)。相关研究发现住宅建筑的寿命曲线符合正态分布^[5,23],可据此建立住宅建筑的拆除曲线(公式 3),从而获得拆除流量(公式 4)。为提高模型的精细化程度,考虑北京市城镇住宅的建筑结构主要分为砖混、钢混和砖木三种,模块 II 构建了三种建筑结构的流量-存量子系统。其 1949—2012 年 3 种建筑结构比例参考已有的成果^[24]和实地调研,由于 2012 年以后,砖木结构的住宅占比很小,此后主要考虑砖混和钢混两种建筑结构。

模块 III 为资源模块(公式 5 所示),通过各类建筑材料需求强度,可模拟混凝土、钢铁、水泥、玻璃等建筑材料的需求量。本文以钢铁资源的需求量为例进行模拟分析,其他相关指标可采取类似的建模方式加入到模型中。模块 IV 为环境模块(公式 6 所示),本模型主要考虑住宅建筑拆除垃圾产生量。

$$S(t) = P(t) * A(t) \quad (1)$$

$$f_{in}(t) = S(t) - S(t - 1) + f_{out}(t) \quad (2)$$

$$f_{out}(t) = \sum_{t_0}^{t'} L(t, t') * f_{in}(t') \quad (3)$$

$$L(t, t') = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t')-\tau}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

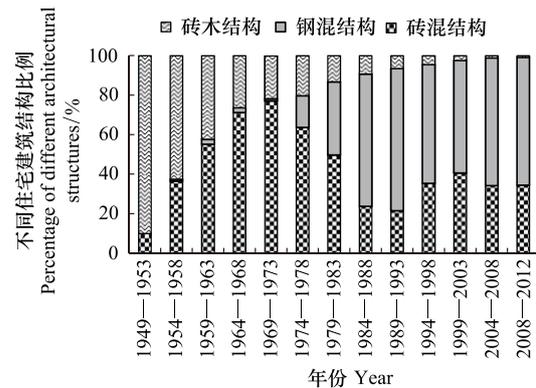


图 1 1949—2012 年北京市城镇居民住宅建筑结构比例变化图

Fig. 1 Percentage of residential buildings with different architectural structures from 1949 to 2100 in Beijing

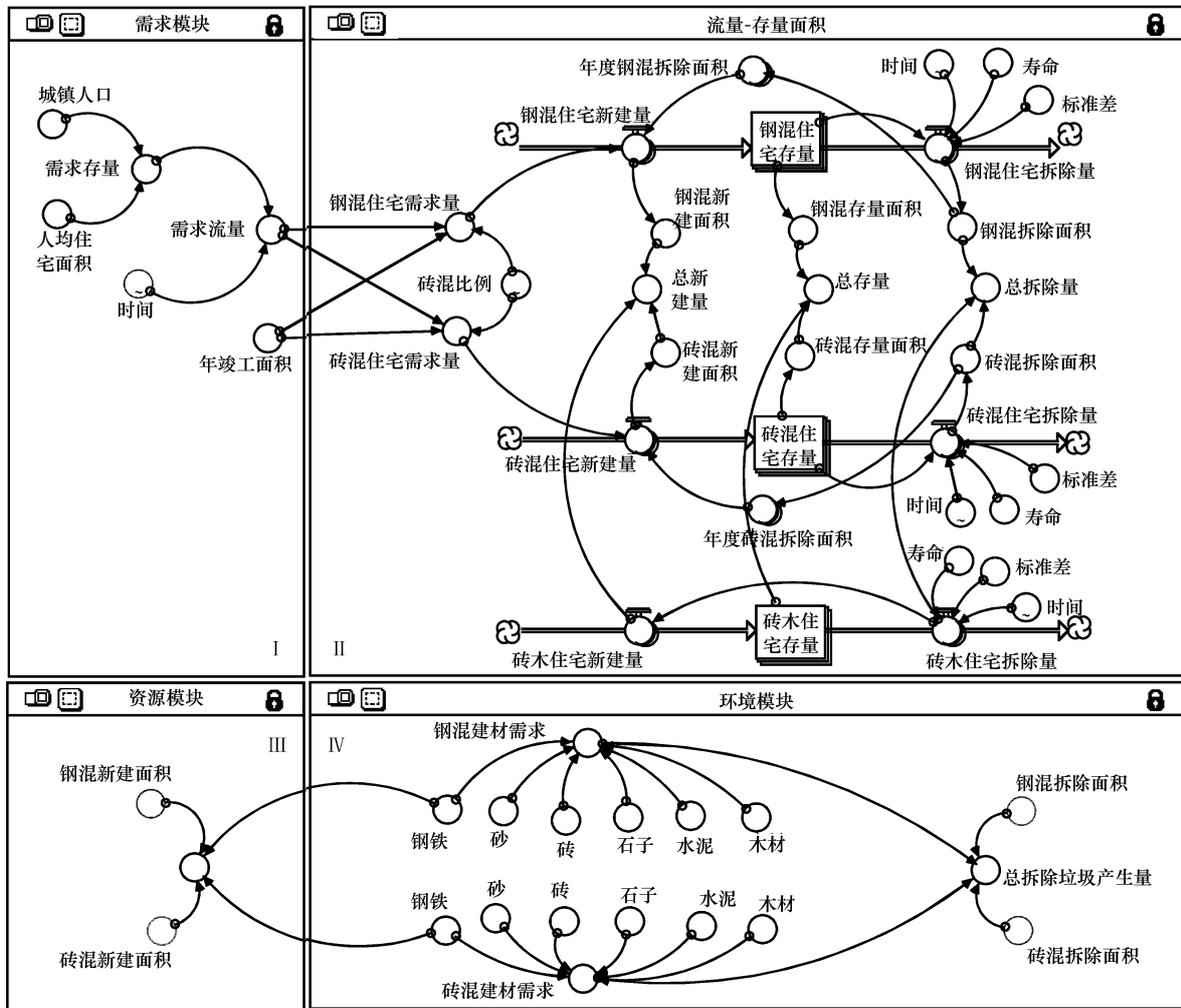


图 2 城市住宅建筑流量-存量 Stella 模型结构图

Fig.2 The stock-flow diagram of Beijing-STELLA Model

$$MS = M_1 S_1 + M_2 S_2 + M_3 S_3 \quad (5)$$

$$WS = W_1 S_1 + W_2 S_2 + W_3 S_3 \quad (6)$$

$S(t)$: 当年城市居民居住需求面积 (m^2); $P(t)$: 当年城镇常住人口 (万人); $A(t)$: 当年城镇居民人均住宅建筑面积 (m^2); f_{in} : 新建面积流量 (m^2); f_{out} : 拆除面积流量 (m^2); $L(t, t')$: 居民住宅建筑寿命分布; t : 时间序列 1949—2100; t' : 新建流量输入系统中的具体年份; τ : 平均住宅建筑寿命; σ : 正态分布标准差, 本文取值 0.2τ ; S_1 : 钢混住宅存量面积 (m^2); S_2 : 砖混住宅存量面积 (m^2); S_3 : 砖木住宅存量面积 (m^2); M_1 : 钢混建筑钢铁使用强度 ($t/100 m^2$); M_2 : 砖混住宅钢铁使用强度 ($t/100 m^2$); M_3 : 砖木住宅钢铁使用强度 ($t/100 m^2$); MS : 钢铁总需求 (t); W_1 : 钢混住宅单位面积拆除垃圾量 ($t/100 m^2$); W_2 : 砖混住宅单位面积拆除垃圾量 ($t/100 m^2$); W_3 : 砖木住宅单位面积拆除垃圾量 ($t/100 m^2$); WS : 垃圾总产生量 (t).

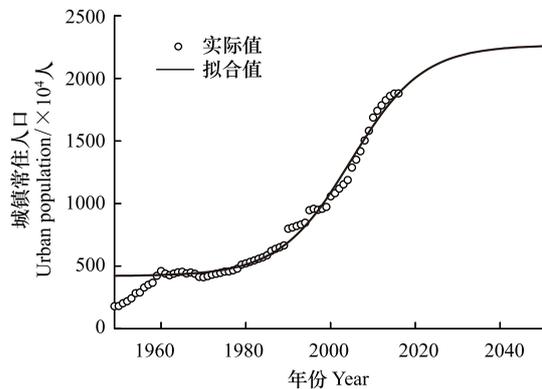


图 3 北京市城镇常住人口历史数据与趋势预测

Fig. 3 Historical figures and projection of urban population in Beijing

1.2 数据支持

本研究数据源主要包括《北京市统计年鉴》、《北京六十年》、《北京志》、《北京市 1% 人口抽样调查资料》等统计数据以及其他文献调研数据。其中,1949—2007 年城市居民住宅竣工面积即新建流量数据统计口径一致且相对较为准确,作为本模型前期新建流量数据;2008 至今的数据,统计口径发生变化,竣工面积包含了农村住宅新竣工面积,无法准确分离。利用统计数据 1949—2016 年人均住宅建筑面积与当年城镇常住人口的乘积可估算城市住宅面积存量,用于模型验证。

1.3 情景设置

本研究模型构建的 4 个关键参数,分别为城镇人口、人均住宅建筑面积、住宅建筑平均寿命以及建筑物材料强度,通过改变人均住宅建筑面积与住宅建筑平均寿命参数设置了 3 种不同情景。

基准情景设定城镇常住人口人均住宅建筑面积按照目前的发展趋势保持不变,最高可以达到 30 m^2 (如图 4);目前住宅建筑寿命普遍低于设计寿命^[25],调查显示现有城市建筑平均实际寿命仅为 30—40 年^[26-27],因此确定基准情景的住宅建筑寿命分别是砖木为 30 年,砖混为 30 年,钢混为 40 年。

在基准情景的基础上,分别根据 Huang 等^[27]的研究,

在经济发展水平很高的情况下中国城镇人口人均住宅建筑面积最高可达 45 m^2 ,设置了“大面积”情景(图 4)和住宅建筑达到设计寿命(砖木建筑设计寿命 40 年,砖混建筑设计寿命 50 年,钢混建筑设计寿命 70 年)的“长寿命”情景。需要补充说明的是,在长寿命情景中,考虑到技术进步影响,1949—2010 年砖木、砖混和钢混的寿命与基准情景相同,2011—2100 年砖木住宅寿命为 40 年,砖混住宅寿命为 50 年,钢混住宅寿命为 70 年。相关情景设计及参数设定见表 1。

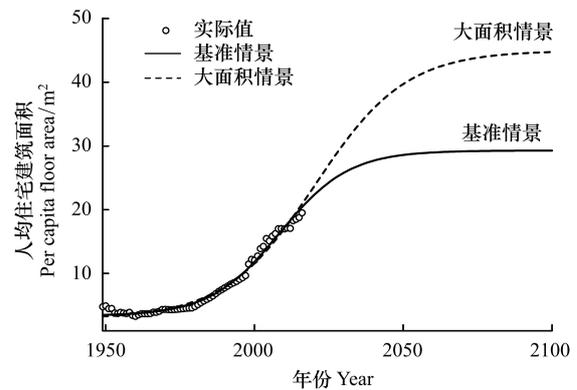


图 4 人均建筑面积的历史数据和预测趋势

Fig.4 Historical figures and projections of per capita floor area

表 1 不同情景设置下的参数

Table 1 Parameters of different scenarios

情景设置 Scenarios designed	基准情景 Baseline	大面积情景 Large area	长寿命情景 Long lifespan
人均住宅建筑面积最大值/ m^2 Maximum of per capita floor area	30	45	30
建筑寿命/a Lifespan	砖木 30; 砖混 30; 钢混 40	砖木 30; 砖混 30; 钢混 40	砖木 40; 砖混 50; 钢混 70

1.4 模型验证

运行模型后,可得到北京市城镇居民住宅建筑存量的动态变化结果,见图 5。将模型模拟值与统计值进行比较,发现模拟值与统计值存在较好的一致性,模型具有较高的可靠性。但模拟值略大于统计值,可能是因为模型输出的存量值只受到每年新建量和拆除量的影响,其中包含预售住宅面积,而统计住宅面积存量并不包含预售住宅面积。

2 结果与讨论

2.1 流量-存量模拟结果

由模拟结果可见,建国后北京城市新建流量总体上增长缓慢,如图 6 所示。改革开放后,特别是 20 世纪 90 年后,随着城市经济的快速发展以及住房制度的改革,北京市城镇住宅建筑面积实现了快速增加,主要因为城镇人口的急剧增加,驱动了住宅建筑需求量的升高。这一轮驱动变化在 2005 年饱和,新建流量面积达到

峰值 3024.1 万 m², 此后便呈现下降趋势。尽管流量呈现下降趋势, 但城市建筑存量将持续增加, 于 2075 年达到饱和, 即 7.51 亿 m², 与 1949 年的 1354 万 m² 相比较, 增加了 55 倍, 存量达到饱和后, 标志着北京市城镇居民住宅建筑进入存量更新维护期。模拟结果也显示, 住宅建筑拆除流量将在 2057 年达到峰值, 当年拆除面积为 2073.14 万 m², 表明本世纪初建设的大规模住宅建筑将在本世纪中叶进入生命周期末端。

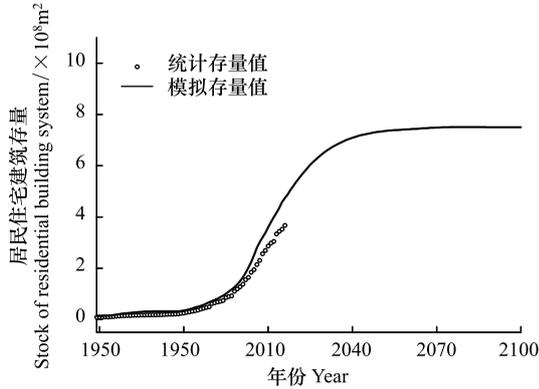


图 5 模型验证分析图

Fig.5 Model validation analysis diagram

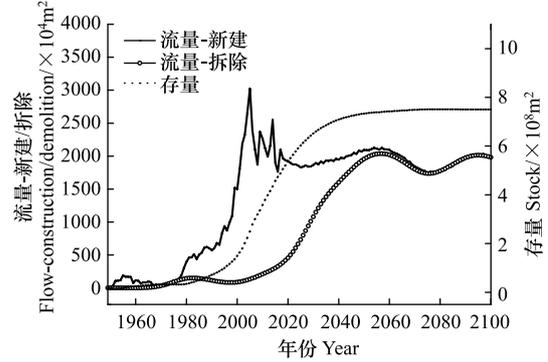


图 6 基准情景下住宅流量-存量子系统动态变化图

Fig.6 Simulation results of residential buildings flow-stock for baseline scenario

需要说明的是, 在大面积情景下, 2005 年也是北京市住宅建筑流量的峰值, 但在 2061 年左右会有第二个小峰值。总体上, 在此情景下新建面积流量维持在较高的水平, 每年的新建面积约在 2500—3000 万 m² 之间。其存量累积将在 2098 年到达饱和, 峰值存量为 10.78 亿 m²; 同时, 拆除流量峰值延后至 2064 年达到一个小高峰, 当年拆除住宅面积 2569.90 万 m², 在 2096 年达到大高峰, 当年拆除面积约为 2803.78 万 m², 如图 7 所示。

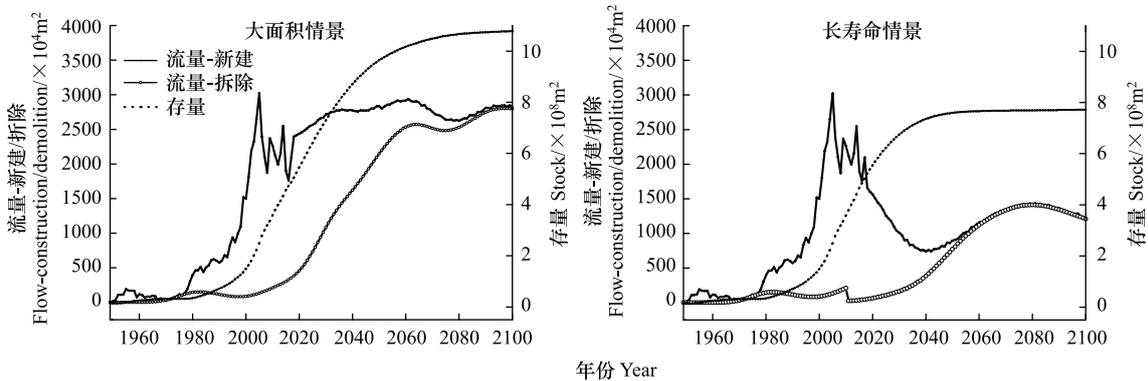


图 7 大面积和长寿命情景住宅流量-存量子系统动态变化图

Fig.7 Simulation results of flow-stock for residential buildings for large area and long lifespan scenarios

延长建筑物寿命后, 新建面积流量呈倒“U”形, 其拆除流量的峰值出现更晚, 约在 2080 年达峰, 拆除面积也减少到 1412.61 万 m²。与基准情景相比, 存量饱和后的新建量总体较小但呈现波动性变化(图 7)。

2.2 钢铁需求量模拟

显然, 不同情景下, 不同城市建筑流量-存量变化驱动下, 对关键建筑材料如钢铁的需求也会有较大的差异。图 8 显示了 3 种情景下 2019—2100 年钢材需求量模拟结果, 区间下限是基于长寿命情景估算得到, 该情景下钢铁年需求量的最大值为 78.09 万 t, 最小值为 30.40 万 t; 区间上限反应了大面积情景钢铁需求, 该情景下的钢铁需求量最大值为 136.27 万 t, 最小值为 114.82 万 t。图中灰色区域 I 为大面积情景钢铁需求量与基准情景的差值, 表示当人均住宅建筑面积达到 45 m² 时对钢铁需求量的增加量, 即 2019—2100 年期间共增加

钢铁需求量 3251.65 万 t;灰色区域 II 是基准情景钢铁需求量与长寿命情景的差值,提供了若 2010 年以后新建住宅建筑平均寿命达到设计寿命时可减少的钢铁需求量,即 2019—2100 年共减少 3022.9 万 t 钢材需求量。可见,延长住宅寿命对于减少建材的消耗具有显著性作用,因此政府管理部门应提高城市总体规划的精准性,优化城市建筑存量使用效率,从而不断延长住宅建筑寿命,降低建材需求量。

2.3 住宅建筑垃圾产生量模拟

建筑拆除垃圾是城市建筑垃圾的主要组成部分。在过去的 50 多年里,北京市城市居民住宅拆除建筑垃圾产生量相对较小,主要是因为 1990—2020 年期间新建住宅建筑尚未达到平均寿命的生命周期结束阶段。但在未来的几十年里,北京市将面临住宅建筑垃圾产量迅速增长的压力。在不同情景下,建筑拆除垃圾产生量的时间和年度产生量会有较大差异(图 9)。基准情景、大面积情景以及长寿命情景的拆除垃圾产量第一个高峰分别在 2057 年、2064 年以及 2080 年达到峰值 2854.33 万 t、3598.94 万 t、1984.56 万 t。对于基准情景与大面积情景而言,由于住宅建筑寿命较短为 30—40 年,住宅建筑更新速率较快,导致拆除垃圾产量会有第二个高峰且维持在较高水平,分别在 2095 年、2097 达到峰值 2820.32 万 t、3928.67 万 t。

模拟结果也说明,人均住宅建筑面积越小,那么建筑垃圾峰值越小,对资源环境的冲击也相对越小;住宅的寿命也是影响城市住宅建筑垃圾变化的重要因素,延长住宅寿命可以推迟住宅建筑垃圾峰值的到来,同时能降低峰值垃圾的产生量。从长远来看,建筑垃圾是一种稳定的二次资源,建筑垃圾再生利用可生产再生骨料、再生活性微粉、混凝土制品、再生混凝土复合料、再生混凝土、垃圾土陶粒等产品。因此政府应努力提高建筑垃圾的循环利用率,不仅可减少从自然界输入的建材流量,节约资源,还能减轻建筑垃圾占地和污染问题。

3 结论

本文基于 Stella 建模平台,构建了北京市城镇居民住宅建筑系统流量-存量模型,动态模拟了其新建量、存量以及拆除量的动态变化趋势,并进一步估算建材钢铁需求区间与建筑垃圾产生量。主要结论如下:

(1) 基准情景下,北京住宅建筑新建流量前期增加较快,在 2005 年达到峰值 3024.1 万 m^2 ,这一快速增长反映了该时期北京快速城镇化和经济发展对于基础设施建设的强力拉动作用,而拆除流量约于 2057 年达到峰值,拆除面积为 2073.14 万 m^2 ,相应地,城市住宅建筑存量最高值出现在 2075 年左右,存量面积为 7.51 亿 m^2 。

(2) 情景模拟结果显示,未来北京市住宅建筑钢铁需求区间上限的年需求量最大值为 136.27 万 t,最小值为 114.82 万 t,区间下限的年钢铁需求量最大值为 78.09 万 t,最小值为 30.40 万 t。与基准情景相比,大面积情景 2019—2100 年期间共增加钢铁需求量 3251.65 万 t,而长寿命情景下延长住宅建筑寿命至设计值,2019—

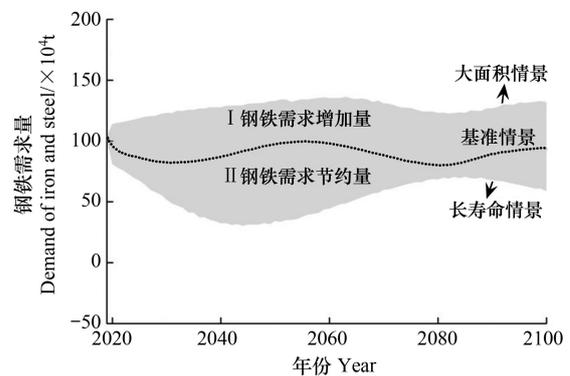


图 8 钢铁需求量模拟结果

Fig.8 Simulation results of steel demand

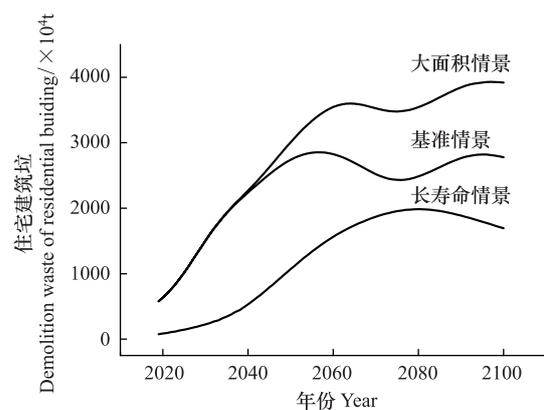


图 9 北京市居民住宅建筑拆除垃圾模拟结果

Fig.9 Prediction results of demolition waste in residential buildings in Beijing

2100 年共可节约 3022.9 万 t 钢铁。

(3)住宅寿命和人均住宅建筑面积是影响城市住宅建筑垃圾变化的重要因素,在过去的 60 多年里,北京市住宅建筑拆除垃圾产生量相对较小,因为大量新建的住宅建筑未达到退役阶段。在未来的几十年里,北京市将面临住宅建筑拆除垃圾达峰的压力,基准情景、大面积情景以及长寿命情景下拆除垃圾峰值产生量分别为 2854.33 万 t、3928.67 万 t、1984.56 万 t。在拆除垃圾峰值到来前,应该做好预警措施,进一步提高建筑垃圾循环利用的比例,提高二次建材原料的市场消纳量,从而减轻建筑垃圾处理的压力。同时通过提高住宅建筑的质量延长住宅寿命,优化城市建筑存量使用效率,减少物质资源的消耗,实现住宅建筑系统的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Augiseau V, Barles S. Studying construction materials flows and stock: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 123: 153-164.
- [2] 崔胜辉, 张雅京, 周健, 等. 城市建筑代谢研究方法及其展望. *生态科学*, 2011, 30(3): 359-367.
- [3] Condeixa K, Haddad A, Boer D. Material flow analysis of the residential building stock at the city of Rio de Janeiro. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 1249-1267.
- [4] 赵军, 刘秋霞, 林立清, 钱光人, 肖建庄. 大城市建筑垃圾产生特征演变及比较. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(3): 1297-1304.
- [5] Müller D B. Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics*, 2006, 59(1): 142-156.
- [6] Huang C, Han J, Chen W Q. Changing patterns and determinants of infrastructures' material stocks in Chinese cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123: 47-53, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.06.014.
- [7] Huang W, Huang Y F, Lin S Z, Chen Z H, Gao B, Cui S H. Changing urban cement metabolism under rapid urbanization—A flow and stock perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 173: 197-206.
- [8] 楼俞, 石磊. 城市尺度的金属存量分析——以邯郸市 2005 年钢铁和铝存量为例. *资源科学*, 2008, 30(1): 147-152.
- [9] Newcombe K, Kalma J D, Aston A R. The metabolism of a city: The case of Hong Kong. *Ambio*, 1978, 7(1): 3-15.
- [10] Hendriks C, Obernosterer R, Müller D, Kytzia S, Baccini P, Brunner P H. Material Flow Analysis: a tool to support environmental policy decision making. Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. *Local Environment*, 2000, 5(3): 311-328.
- [11] Müller E, Hilty L M, Widmer R, Schluep M, Faulstich M. Modeling metal stocks and flows: a review of dynamic material flow analysis methods. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2102-2113.
- [12] Tanikawa H, Hashimoto S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4D-GIS. *Building Research & Information*, 2009, 37(5/6): 483-502.
- [13] Barles S. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 13(6): 898-913.
- [14] Kapur A, Keoleian G, Kendall A, Kesler S E. Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 12(4): 539-556.
- [15] Tanikawa H, Fishman T, Okuoka K, Sugimoto K. The weight of society over time and space: a comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945-2010. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(5): 778-791.
- [16] Bergsdal H, Brattebø H, Bohne R A, Müller D B. Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock. *Building Research & Information*, 2007, 35(5): 557-570.
- [17] Hu M M, Bergsdal H, Van Der Voet E, Müller D B. Dynamics of urban and rural housing stocks in China. *Building Research & Information*, 2010, 38(3): 301-317.
- [18] Hu M M, Pauliuk S, Wang T, Huppel G, Van Der Voet E, Müller D B. Iron and steel in Chinese residential buildings: A dynamic analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(9): 591-600.
- [19] Hu M M, Van Der Voet E, Huppel G. Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(3): 440-456.
- [20] Sartori I, Sandberg N H, Brattebø H. Dynamic Building Stock Modelling: General Algorithm and exemplification for Norway. *Energy and Buildings*, 2016, 132: 13-25.
- [21] 杨巍, 杨向群. 建筑存量系统分析与模拟方法. *河北工业大学学报*, 2009, 38(3): 90-94.
- [22] 马小红. 北京市未来 50 年户籍人口变动趋势预测. *北京社会科学*, 2003(4): 84-90.
- [23] Miatto A, Schandl H, Tanikawa H. How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts?. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 122: 143-154.
- [24] Hu D, You F, Zhao Y H, Yuan Y, Liu T X, Cao A X, Wang Z M, Zhang J L. Input, stocks and output flows of urban residential building system in Beijing city, China from 1949 to 2008. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(12): 1177-1188.
- [25] Cai W J, Wan L Y, Jiang Y K, Wang C, Lin L S. Short-lived buildings in China: impacts on water, energy, and carbon emissions. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24): 13921-13928.
- [26] 宋春华. 全寿命 高品质——坚持以人为本, 实行住宅性能认定. *住宅科技*, 2004(9): 3-7.
- [27] Huang T, Shi F, Tanikawa H, Fei J L, Han J. Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 72: 91-101.