

董 莉,刘景洋,张泽乾,等.基于动态物质流的北京市城乡住房建筑垃圾产生量模拟预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2041-2052.

Dong L, Liu J Y, Zhang Z Q, et al. Simulation and prediction of construction and demolition waste from urban and rural housing in Beijing based on dynamic material flow analysis [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2041-2052.

基于动态物质流的北京市城乡住房建筑垃圾产生量模拟预测

董 莉¹,刘景洋¹,张泽乾^{1*},张 敏²(1.中国环境科学研究院生态环境部生态工业重点实验室,北京 100012; 2.西南交通大学环境科学与工程学院,四川 成都 611756)

摘要: 为促进住房建筑垃圾减量化和资源化利用,以北京市为例,构建住房建筑动态物质流模型,模拟 1949~2100 年北京市城镇和农村地区住房建筑流量-存量动态演变特征,预测城乡住房建筑垃圾产生量.结果表明,1949~2100 年北京市城镇和农村地区住房建筑新建和拆除量均周期性波动趋势,住房建筑存量大体呈现“S”型曲线趋势.城镇和农村的住房新建面积分别于 2012 年和 2015 年达到最大峰值 3145.6 和 788.7 万 m²,住房拆除面积分别于 2094 年和 2016 年达到最大峰值 1500.8 和 453.5 万 m²,住房存量饱和值分别为 8.0 亿 m² 和 124.7 万 m².至 21 世纪中后期,北京市将迎来建筑垃圾产量高峰期,并保持高位波动.建筑垃圾的最大峰值出现在 2094 年,总产量为 2396.4 万 t.城镇和农村地区住房建筑垃圾中,水泥、砖块、沙子和碎石等是建筑垃圾中重量占比最大的成分,分别占住房建筑垃圾总重量的 90.2%~95.5%和 92.2%~94.1%,钢铁的重量占比分别为 0.1%~4.5%和 0.1%~3.0%.建筑长寿命情景可延迟住房建筑拆除高峰的到来,最大减量潜力为 72.0%;将建筑垃圾作为城市矿产回收利用,最高可减少未来 98.5%的原生钢铁需求.

关键词: 动态物质流; 流量-存量; 物质代谢; 建筑垃圾; 城市矿产

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2041-12

Simulation and prediction of construction and demolition waste from urban and rural housing in Beijing based on dynamic material flow analysis. DONG Li¹, LIU Jing-yang¹, ZHANG Ze-qian^{1*}, ZHANG Min² (1.Key Laboratory of Eco-industry of Ministry of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2041~2052

Abstract: To promote the reduction and recycling of construction and demolition (C&D) waste in housing, a dynamic material flow model was established to simulate the evolving characteristics of housing flow-stock in both urban and rural areas of Beijing from 1949 to 2100. The amount of urban and rural housing C&D waste generated was predicted. The results showed that from 1949 to 2100, cyclical fluctuations were observed in the volume of new construction and demolition of housing in Beijing's urban and rural areas, with the housing stock following an S-shaped curve. The area of new housing construction in urban and rural regions peaked at 31.456million m² in 2012 and 7.887 million m² in 2015, while the demolition area reached its maximum of 15.008 million m² in 2094 and 4.535 million m² in 2016. The saturation values of housing stock in urban and rural areas were 800 and 1.247 million m², respectively. By the mid-to-late 21 st century, Beijing was anticipated to experience a surge in C&D waste generation, which will reach its peak and then persist at elevated levels with periodic fluctuations. The apex of C&D waste generation was projected to occur in 2094, with an estimated total output of 23.964 million tons. Cement, brick, sand, and gravel were the predominant components of C&D waste by weight, accounting for 90.2%~95.5% of the total weight of housing C&D waste in urban areas and 92.2%~94.1% of that in rural areas, while the weight proportion of iron and steel ranged from 0.1% to 4.5% and 0.1% to 3.0%, respectively. The long-lifetime scenario could defer the peak of C&D waste, with a maximum reduction potential of 72.0%. Additionally, recycling C&D waste as urban minerals could lead to a dramatic decrease in future demand for primary steel, with a reduction of up to 98.5%.

Key words: dynamic material flow analysis; flow-stock; material metabolism; construction and demolition waste; urban mining

建筑在维持人类社会福祉方面发挥着重要作用.与此同时,建筑的建造、使用、维护、拆除等新陈代谢过程消耗了大量材料和能源,加剧了自然资源枯竭,并导致环境破坏^[1-2].一方面,我国建筑全过程的能耗总量占全国能耗总量的 45.5%,导致的碳排放

量占全国总量的 50.9%^[3];另一方面,建筑建造和拆除过程产生的大量建筑垃圾造成土地退化、资

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2024YSKY-39)

* 责任作者, 助理研究员, zhang.zeqian@caes.org.cn

源浪费和环境污染^[4].据估计,目前我国建筑垃圾产生量约 20 亿 t^[5].然而,我国建筑垃圾的管理仍较为粗放,回收利用率不足 50%,大部分建筑垃圾均以填埋方式处置或被非法倾倒,对自然资源和生态环境构成巨大威胁^[6].面对“双碳”目标和资源环境的多重约束,推进建筑垃圾的规范管理和资源化利用刻不容缓^[7].

由于缺乏建筑垃圾统计数据,精准测算建筑垃圾产量是实现建筑垃圾规范化管理的关键.作为建筑体系中占比最大的建筑类别,住房建筑得到了学术界的大量关注^[8-10].现有研究主要的研究方法包括动态物质流法^[11]、机器学习法^[12]、灰色模型法^[13-14]、空间显式分析^[15]、基于统计或调查数据的产出系数法^[16-17]等.由于方法成熟、简单易行、机理解释性强、可用于长期变化趋势预测等优点,动态物质流法的应用最为广泛^[18-20].在国家尺度,Cao 等^[21]采用动态物质流模型分析了中国城市住房存量的未来演变路径,并研究了物料流量和存量的不确定性.在省域尺度,Tang 等^[22]基于动态物质流预测了江西省未来的城市住房建筑垃圾产生量,并预测了 CO₂ 排放和减排潜力.在城市尺度,Tang 等^[23]采用动态物质流模拟了北京市城市住宅建筑物质流动,并预测了未来钢铁需求和建筑垃圾产生量.综合来看,基于动态物质流方法的研究已在国家、省和城市等不同地理尺度上大量开展.然而,现有研究更多关注城市地区住房建筑垃圾产生量研究,对农村地区住房建筑垃圾研究较少涉及,导致对包括农村地区在内的城乡整体建筑垃圾的认识并不充分.此外,现有研究对建筑垃圾的减量和资源化利用潜力也缺乏足够的定量认识.

为此,本文基于动态物质流方法,以 1949~2100 年为范围,模拟并预测北京市城镇和农村地区住房建筑流量和存量,估算未来住房建筑垃圾产生量和组分的变化规律,以深化对北京市城市和农村地区住房建筑垃圾产量的整体认识,并定量解释北京市住房建筑垃圾的减量潜力和资源化利用潜力.同时,研究结果可为其他城市或地区应对建筑垃圾产生高峰及建筑垃圾减量化和资源化利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 动态物质流模型

以城镇居民和农村居民住房建筑作为系统边界,构建住房建筑动态物质流模型,模拟北京市住房建筑流量和存量动态演变情况.研究时间跨度为 1949~2100 年.

物质流模型的基本原理是质量守恒定律^[24].在存量驱动的动态物质流模型中,住房建筑系统存量主要由人口和居民人均住房建筑面积驱动,流出(拆除)主要受建筑建造时间和使用寿命影响,流入(新建)则主要用于满足不断扩大住房存量需求^[25].基于上述定律,一定时期内住房建筑存量、新建和拆除之间存在数学平衡关系.通过合理预测未来住房建筑存量动态演变过程,即可预测未来的新建量和拆除量.住房存量动态物质流模型如下式所示:

$$S_t = A_t \cdot P_t \quad (1)$$

$$I_t = S_t - S_{t-1} + O_t \quad (2)$$

$$O_t = \sum_{t_0}^{t-1} L_i(t, t') \cdot I_{t'} \quad (3)$$

式中: S_t 为第 t 年的居民住房存量, m^2 ; A_t 为第 t 年的居民人均住房建筑面积,分别考虑城镇和农村居民, m^2 ; P_t 为第 t 年的常住人口,包括城镇和农村人口,万人; I_t 为第 t 年的居民住房新建量, m^2 ; O_t 为第 t 年的居民住房拆除量, m^2 ; $L_i(t, t')$ 为第 i 类建筑的寿命分布概率密度函数,即第 t' 年的新建建筑在第 t 年被拆除的概率,%; t_0 指模型初始年份,本研究中为 1949 年.建筑类型主要考虑砖木结构、砖混结构和钢混结构 3 种类型,不同年份各建筑类型的占比参考已有研究成果^[26],并基于人口和农业普查数据校正,详见图 1.

居民人均住房建筑面积是住房建筑存量的决定因素之一.采用 Logistic 增长函数^[6]拟合 1949~2100 年城镇和农村居民人均住房建筑面积的饱和水平和增长趋势:

$$y = A_{\min} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{1 + (x/x_0)^a} \quad (4)$$

式中: A_{\min} 和 A_{\max} 分别为居民人均住房建筑面积的初始值和饱和值, m^2 ; x_0 为曲线的拐点或中点, a 为曲线的斜率因子.根据历史统计数据,居民人均住房建筑面积的初始值设定为 $4.5 m^2$,得到北京市城乡居民人均住房建筑面积增长趋势(图 2).根据模拟结果,北京市城镇居民和农村居民的人均住房建筑面积的饱和值分别为 38.8 和 $54.2 m^2$.

常住人口也是住房建筑存量的重要影响因素.

根据常住人口的历史统计数据,可以看出总人口和城镇人口呈现非对称“S”型增长趋势.因此,采用包

含非对称因子的五参数 Logistic 增长函数^[27]拟合 1949~2100 年总人口和城镇人口的增长趋势:

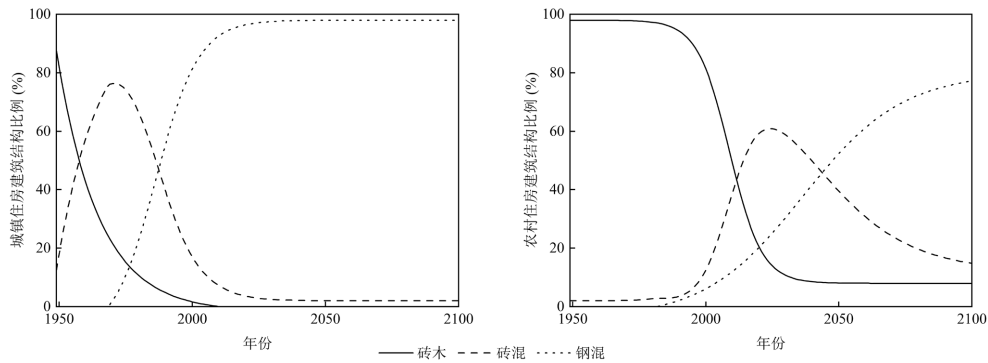


图 1 1949~2100 年北京市不同结构住房建筑比例

Fig.1 The proportion of housing buildings with different structures in Beijing from 1949 to 2100

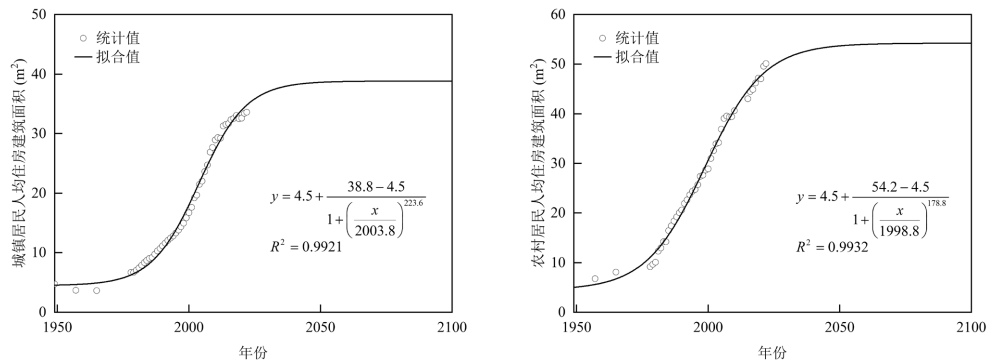


图 2 1949~2100 年北京市城乡居民人均住房建筑面积增长趋势

Fig.2 Growth trend of per capita housing floor area for urban and rural residents in Beijing from 1949 to 2100

$$y = A_{\min} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{1 + \left[\left(\frac{x}{x_0} \right)^a \right]^b} \quad (5)$$

式中: A_{\min} 和 A_{\max} 分别为人口的初始值和饱和值,万人; x_0 为曲线的拐点或中点, a 为曲线的斜率因子, b 为曲线的非对称因子.根据历史统计数据 and 《北京城市总体规划(2016 年—2035 年)》,常住人口和城镇人口的初始值分别设定为 1949 年的 414.0 和 176.0 万人,常住人口的饱和值设定为 2300.0 万人.由图 3 可知,五参数 Logistic 增长曲线较好拟合了北京市常住人口和城镇人口数量增长趋势.

需要注意的是,从历史数据看,农村人口并不服从“S”型增长趋势,无法采用 Logistic 增长曲线拟合预测.为此,采用将拟合得到的各年份常住人口和城镇人口相减的方式,得到历年农村常住人口数量.

住房建筑寿命直接影响建筑拆除面积.研究表明,中国住房建筑寿命普遍短于设计使用寿命,城镇

地区住房的平均使用寿命小于 40 年,农村地区的住房使用寿命则更短,平均寿命小于 15 年^[28-29].现有研究通常采用正态分布^[22]、对数正态分布^[30]和韦伯分布^[21]等概率密度分布函数近似描述建筑寿命.其中,具有右偏特性的对数正态分布最适用于模拟寿命较短建筑的寿命分布^[30-31].因此,本研究假设住房寿命近似服从对数正态分布(图 4),其概率密度函数为:

$$L_i(t, t') = \frac{1}{(t-t')\sigma_i\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{[\ln(t-t')-\mu_i]^2}{2(\sigma_i)^2}} \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{DEV_i}{L_i} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

$$\mu_i = \ln(L_i) - \frac{1}{2}\sigma_i^2 \quad (8)$$

式中: L_i 为第 i 类住房建筑的平均使用寿命; DEV_i 为 L_i 的标准差,取 $DEV_i = 0.3L_i$ ^[6]; μ_i 为第 i 类住房建筑的

对数平均使用寿命; σ_i 为 μ_i 的标准差.考虑到近年来技术进步导致建筑使用寿命有所延长^[23],本研究

针对不同时期、不同结构类型的住房建筑分别采用不同的平均使用寿命(表 1).

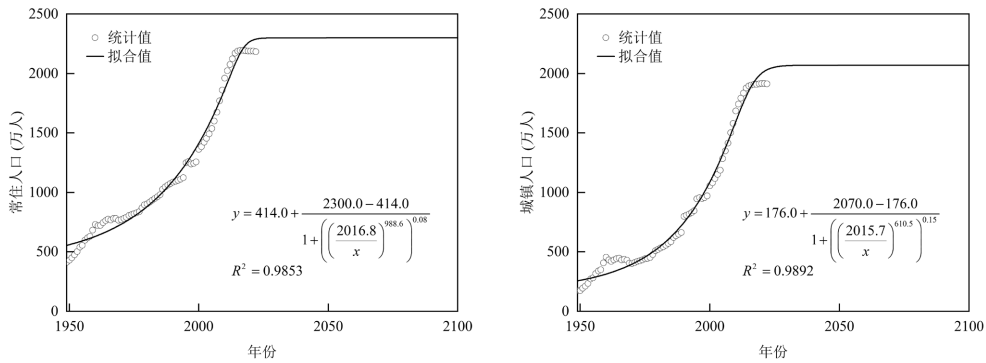


图 3 1949~2100 年北京市常住人口和城乡人口数量增长趋势

Fig.3 Growth trend of the permanent population and the urban population in Beijing from 1949 to 2100

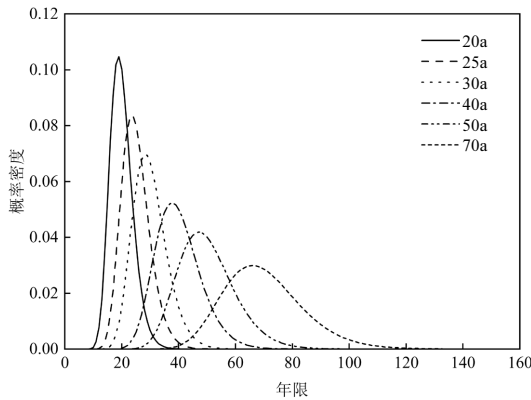


图 4 基于对数正态分布的住房建筑寿命概率密度函数

Fig.4 The probability density function of housing building lifetime based on lognormal distribution

表 1 北京市住房建筑平均使用寿命

Table 1 The average service life of housing buildings in Beijing

结构类型	1978~2010 年间住房平均使用寿命(a)		2011~2100 年间住房平均使用寿命(a)	
	城镇	农村	城镇	农村
砖木结构	25	20	40	30
砖混结构	30	25	50	40
钢混结构	40	30	70	50

1.2 建筑垃圾产量估算

建筑垃圾由住房建造和拆除两个过程产生的建筑垃圾量构成,分别由建造和拆除流量与各自过程的物质强度相乘来估算,具体计算公式为:

$$W_t = \sum I_{i,t} \cdot C_{i,t} + \sum O_{i,t} \cdot D_{i,t} \quad (9)$$

式中: W_t 为第 t 年的建筑垃圾产生量; t ; $I_{i,t}$ 和 $O_{i,t}$ 分别

为第 t 年第 i 类建筑的建造和拆除量, m^2 ; $C_{i,t}$ 和 $D_{i,t}$ 分别为第 t 年第 i 类建筑建造和拆除过程的建筑垃圾物质强度, kg/m^2 .不同年份各类型住房建筑拆除物质强度参考 Yang 等^[32]的研究成果(表 2),并假设 2015 年后的住房建筑拆除物质强度不变.建造过程中的建筑垃圾产生强度取拆除物质强度的 3%^[23,33].

1.3 数据来源

本研究数据来源主要包括《北京统计年鉴》《北京人口统计资料汇编》《北京六十年》等官方统计数据以及文献调研数据.

2 结果与分析

2.1 住房建筑流量和存量动态演变特征

1949~2100 年北京市住房建筑流量和存量动态演变特征见图 5.由于缺乏北京市农村住房建筑新建面积统计数据,研究采用统计口径相对一致的 1949~2007 年间北京市城镇住房建筑新建面积统计数据验证^[34].从模型模拟的 1949~2007 年间北京市城镇住房建筑新建面积与实际历史统计数据对比结果可以看出,模型模拟值与历史统计数据吻合较好.因此,模型可靠性较高,可以用于未来建筑垃圾产量预测.

北京市城镇和农村地区住房建筑新建面积均周期性波动趋势.图 5 中的历史统计数据和模型模拟值共同表明,1949~1978 年城镇新建住房面积增长缓慢;1978 年改革开放以来,随着经济社会的发展和人口的急剧增长,城镇新建住房建筑面积快速

上升,在 2012 年达到最大峰值 3145.6 万 m²,随后转入下降区间,于 2029 年形成第一个谷值 1357.5 万 m².此后,城镇新建住房建筑面积进入新的波动周期,分别于 2039 年和 2094 年达到第二、三个峰值 1578.0 和 1501.3 万 m²,期间于 2060 年形成最小谷值 457.9 万 m².此外,城镇新建住房面积的波动周期逐渐拉长,这主要是新建住房建筑寿命延长导致的一方面,受建筑技术进步的影响,我国新建住房建筑寿命较 20 世纪有明显提高^[29,35];另一方面,钢筋

混凝土结构在住房建筑中的大规模应用部分替代了寿命相对较短的砖木和砖混结构住房,提升了住房建筑的整体平均寿命.对于农村地区,新建住房建筑面积波动周期明显短于城镇地区,共出现了 4 个波峰.首先于 1997 年达到第一个峰值 508.6 万 m²,并于 2015 年达到最大峰值 788.7 万 m²,随后分别于 2026 年和 2054 年达到第三、四个流量峰值 270.2 和 301.5 万 m²,最小谷值形成于 2035 年(189.6 万 m²).

表 2 住房建筑拆除物质强度
Table 2 Material intensity of housing buildings

建筑结构	建造年份	物质强度(kg/m ²)									
		钢铁	木材	水泥	砖块	沙子	碎石	石灰	玻璃	油毡	沥青
砖木结构	1949-2015	1.0	59.6	6.8	577.8	249.8	234.8	13.8	1.5	0.1	-
	1949-1959	3.9	70.0	21.4	912.8	333.5	473.0	41.0	2.1	0.2	2.4
砖混结构	1960-1979	8.0	39.5	72.2	929.7	394.7	285.4	38.4	2.4	1.6	2.4
	1980-1989	23.2	18.8	146.0	832.9	646.2	458.1	33.9	3.3	1.2	1.8
	1990-1999	19.6	17.0	155.1	836.3	663.2	383.5	36.7	3.4	1.0	2.2
	2000-2015	23.5	17.7	151.1	530.7	597.4	331.3	34.3	5.5	4.0	4.4
钢混结构	1949-1979	32.6	20.7	186.0	355.6	534.6	547.2	22.4	3.2	1.3	1.1
	1980-1989	25.9	20.6	166.8	236.5	479.0	496.6	22.4	3.3	1.2	1.3
	1990-1999	19.2	20.4	147.5	117.4	423.4	446.0	22.5	3.4	1.1	1.7
	2000-2015	59.2	17.4	217.3	146.8	364.3	449.3	42.7	7.6	1.0	2.0

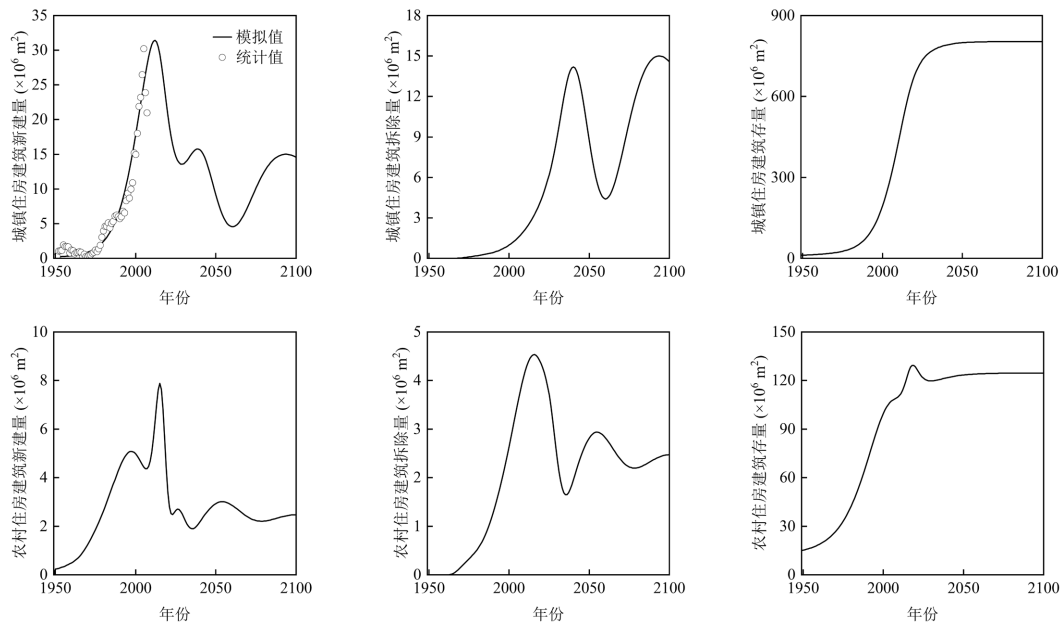


图 5 1949~2100 年北京市住房建筑流量和存量动态演变特征

Fig.5 Dynamic evolution of housing building flow and stock in Beijing from 1949 to 2100

北京市城镇和农村地区住房建筑拆除面积同样呈现周期性波动趋势.北京市城镇地区住房

建筑拆除的首个峰值将出现在 2040 年(1420.0 万 m²).农村地区情况明显不同,早在 2016 年即出现

住房建筑拆除面积最大峰值 453.5 万 m^2 。其后,城镇地区拆除面积将于 2094 年达到最大峰值 1500.8 万 m^2 ,农村地区则在 2055 年出现第二个峰值 293.9 万 m^2 。通过比较可知,城镇地区拆除面积各波峰出现的时间晚于农村地区。这可能是因为城镇地区住房建筑寿命比农村地区更长。此外,与住房建筑新建量相比,拆除面积的首个峰值均明显滞后,城镇和农村的滞后时长分别为 28 年和 19 年,基本相当于一个寿命周期,这与张敏等^[33]的研究结果一致。

北京市城镇和农村地区住房建筑存量均大致呈现“S”型曲线,开始时增长缓慢,随后快速增长,最后增速降低并稳定在饱和值附近。其中,城镇地区住房建筑存量将于 2044 年达到饱和值 8.0 亿 m^2 ,而农村地区住房建筑存量呈现与城镇地区略不同的演变趋势,先在 2018 年达到最大峰值 129.5 万 m^2 后开始逐步下降,最终稳定在 124.7 万 m^2 。在存量驱动的动态物质流模型中,住房存量主要受人口数量和人均住房建筑面积两个因素驱动。北京市人口总量受资源环境承载力的限制,距 2300.0 万人上限的增长空间很小,人均住房建筑面积也不可能无限制增长,最终会达到平衡状态。

2.2 住房建筑垃圾产生量

北京市住房建筑垃圾产生量见图 6。1949~1966 年,建筑施工垃圾产生量高于建筑拆除垃圾;1967 年,

建筑拆除垃圾产量开始超过施工垃圾。此后,二者的差距快速拉开,拆除垃圾成为北京市建筑垃圾的最主要来源,占比由 1967 年的 50.1% 上升至 2100 年的 97.1%。从变化趋势看,住房建筑施工垃圾和拆除垃圾分别与住房新建面积和拆除面积的变化趋势基本相同,表明他们之间高度相关。

施工垃圾来自住房建筑建造施工过程。北京市施工垃圾自 1980 年起快速上升,于 2014 年达到最大峰值 154.7 万 t;此后,施工垃圾分别于 2039 年(71.6 万 t)和 2092 年(69.2 万 t)再次出现峰值(图 6)。在此过程中,北京市住房建筑施工垃圾的快速增长主要受北京市城镇地区新建住房面积的驱动。这可以由图 6 中城镇和农村地区施工垃圾产生量趋势证实。1949 年后,城镇和农村住房建筑施工垃圾产量均呈现增长趋势。城镇地区施工垃圾于 1980 年开始急剧增长,基本与 20 世纪 80 年代初北京市城镇地区大规模新建住房吻合。城镇地区施工垃圾最大峰值出现在 2012 年(125.7 万 t),然后于 2039 年(62.3 万 t)和 2094 年(59.2 万 t)再次出现两个峰值。农村地区施工垃圾在 1999 年出现第一个小波峰后(19.0 万 t),于 2015 年出现最大峰值 34.5 万 t,并于 2026 年(12.4 万 t)和 2053 年(13.0 万 t)再次出现峰值。不难看出,北京市住房建筑施工垃圾始终由城镇地区主导,其占比在 50.0%~87.6% 间波动,且波峰出现的时间也与城镇地区住房新建面积基本同步。

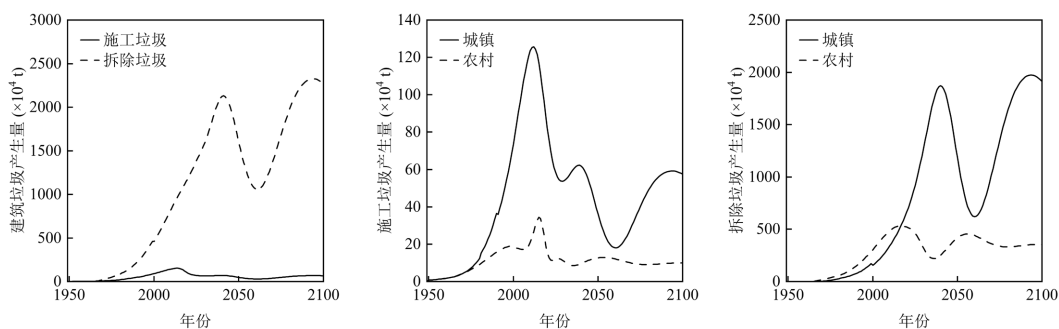


图 6 1949~2100 年北京市住房建筑垃圾产生量

Fig.6 Construction and demolition waste generation of housing building in Beijing from 1949 to 2100

北京市住房建筑拆除垃圾快速增长趋势出现在 20 世纪 60 年代末期(图 6)。在 2041 年达到第一个峰值 2132.24 万 t 后,快速下降至 2061 年的谷值(1058.3 万 t),然后再次转入上升阶段,并于 2094 年达到最大峰值 2327.2 万 t。与施工垃圾主要受城镇地区主导不

同,北京市住房建筑拆除垃圾在 2017 年前主要来自农村地区。这是因为北京市城镇地区大规模新建住房建设始于 20 世纪 80 年代初,在 2020 年之前,城镇地区住房建筑的拆除活动相对较少。从住房建筑拆除垃圾城乡分布来看,城镇地区住房建筑拆除垃圾第一个

峰值出现在 2040 年(1872.1 万 t),然后于 2093 年达到最大峰值 1973.2 万 t.农村地区施工垃圾于 2016 年出现最大峰值 533.0 万 t,并于 2056 年再次出现峰值 455.4 万 t.2017 年后,住房建筑拆除垃圾主要来自城镇地区,占比波动范围为 50.7%~ 89.0%.

综合来看,在未来的几十年内,北京市将迎来建筑垃圾总产量的高峰时期.首个高峰将于 2041 年出现(2203.4 万 t),其后虽短暂有所下降,但总体产量仍在高位.随着部分建筑寿命到期后的迭代更新过程,北京市将在 2094 年迎来建筑垃圾总产量的最大峰值 2396.4 万 t,分别约是 2024 年水平的 1.6 倍和 1.7 倍.如此规模的建筑垃圾产生量,如果仅将其作为固体废弃物填埋处置,将给生态环境和土地资源造成巨大压力^[36].

2.3 住房建筑垃圾来源和组分

不同时期住房建筑垃圾来源差异明显(图 7).

1977 年以前,砖木结构是住房建筑的主要结构形式,因此这一时期的建筑垃圾主要由砖木结构住房产生.从 1978 年开始,随着砖混结构的普及,砖混结构住房建筑垃圾产生量逐渐上升.20 世纪 70 年代,我国第一批钢筋混凝土结构住房建成并在后续大规模应用^[37],北京市钢混结构住房的建筑垃圾产生量迎来快速增长,并于 2023 年开始成为建筑垃圾的最大来源.未来,随着砖木结构和砖混结构建筑比例不断下降,钢混结构住房将持续成为住房建筑垃圾产生量的主要贡献者.城镇和农村地区不同类型住房建筑垃圾的来源均呈现类似的趋势,由砖木为主逐步向砖混、钢混为主过渡.不同的是,农村地区砖木和砖混结构住房建筑垃圾产生量所占比例明显高于城市地区,在未来很长一段时间内,农村地区住房建筑垃圾主要来自砖木和砖混结构.这是由于城乡住房建筑结构类型构成比例不同.

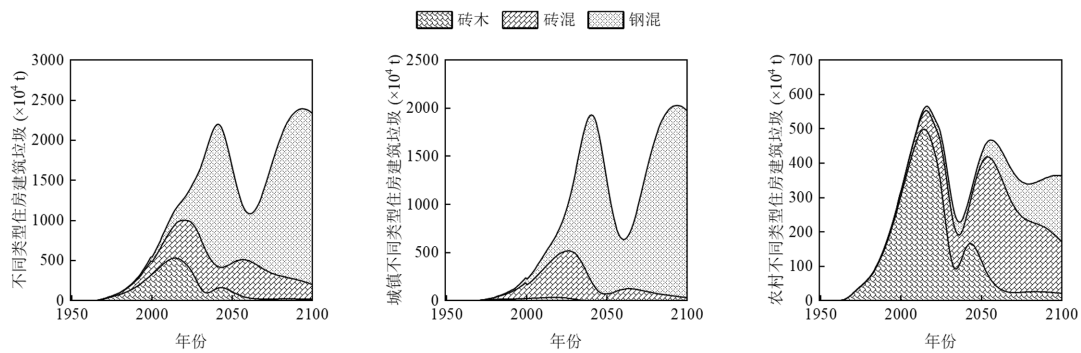


图 7 1949~2100 年北京市不同类型住房建筑垃圾产生量

Fig.7 The amount of construction and demolition waste generated by different categories of housing buildings in Beijing from 1949 to 2100

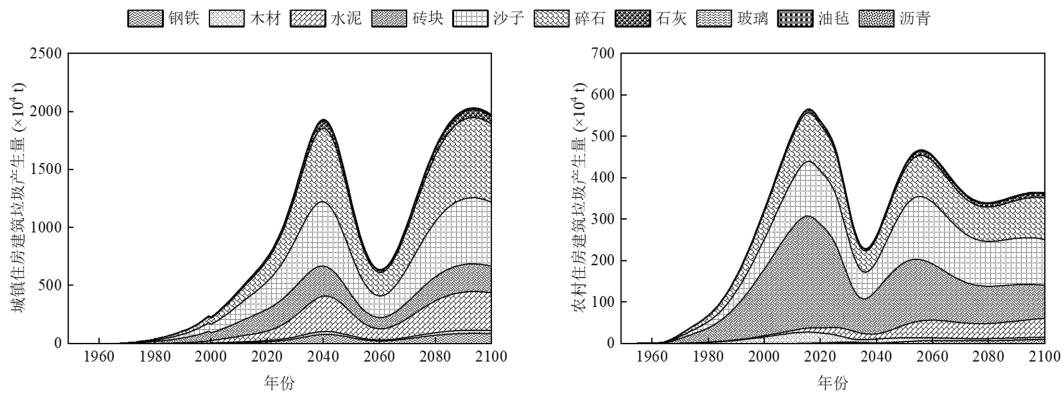


图 8 1949~2100 年北京市住房建筑垃圾组分

Fig.8 Components of housing building construction and demolition waste in Beijing from 1949 to 2100

住房建筑垃圾资源化利用很大程度上依赖于

对建筑垃圾组成的深入了解^[38].为此,对 1949~2100

年北京市住房建筑垃圾的主要组分构成进行研究,详见图 8.水泥、砖块、沙子和碎石等是建筑垃圾中重量占比最大的成分,分别占城镇和农村地区住房建筑垃圾总重量的 90.2%~95.5%和 92.2%~94.1%.此外,城镇和农村地区住房建筑垃圾中,钢铁的重量占比分别为 0.1%~4.5%和 0.1%~3.0%.其余木材、石灰、玻璃、油毡、沥青等占比相对较低,在城镇和农村地区住房建筑垃圾中合计占比分别为 3.5%~6.5%和 4.4%~6.5%.

3 讨论

3.1 与其它研究的比较

由于缺乏北京市农村地区住房建筑动态变化和建筑垃圾的研究成果,选择北京市城镇地区住房建筑研究成果进行对比分析.

本研究中,北京市城镇地区住房建筑新建面积的周期性波动趋势与 Tang 等^[23]的研究结果基本一致.城镇地区住房新建面积模拟结果(2012 年出现最大峰值 3145.6 万 m^2)与 Tang 等^[23]的研究中北京市城市住房新建面积于 2010 年出现最大峰值 2810.0 万 m^2 的结论较为接近.住房建筑存量饱和值方面,本研究结果 8.0 亿 m^2 也与 Tang 等^[23]的研究结果 8.8 亿 m^2 较为一致,侧面印证了本模型的可靠性.

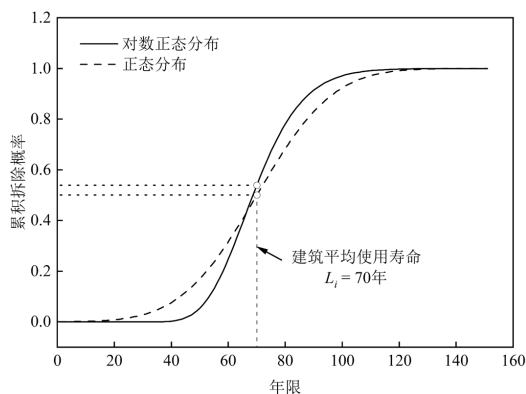


图 9 基于对数正态分布和正态分布的住房建筑累积拆除概率分布函数

Fig.9 Cumulative demolition probability distribution function of housing buildings based on lognormal distribution and normal distribution

与之不同的是,本研究中北京市城镇地区住房建筑新建面积和拆除面积波动周期更为频繁,比 Tang 等^[23]的研究多出现 1~2 个波峰.这可能是因为

研究使用的建筑寿命概率密度分布不同.本研究采用对数正态分布,而其使用了正态分布描述建筑寿命的概率密度分布.与正态分布相比,对数正态分布属于非对称的右偏型概率分布.根据累积分布函数^[39](图 9),以建筑平均使用寿命 70 年为例,采用对数正态分布时建筑平均使用寿命对应的累积拆除概率明显高于正态分布,即大多数样本的建筑寿命聚集在平均寿命以下,这在一定程度上加速了建筑更新,导致了更多新建和拆除波峰的出现.

3.2 建筑垃圾产生量的影响因素

建筑平均使用寿命对住房建筑流量有显著影响^[18,28].为量化探讨延长建筑寿命对建筑垃圾产生量的影响,采用情景分析方法对比分析常规情景(表 1)和长寿命情景(城市和农村砖木/砖混/钢混结构新建住房建筑的寿命分别设定为 50/60/100 年和 40/50/70 年)下北京市住房建筑垃圾产生量的不同,结果见图 10.

长寿命情景下,北京市住房建筑垃圾产生量仅出现 1 个波峰,比常规情景减少 1 个.住房建筑垃圾产生的波峰出现在 2040 年,峰值为 2022.9 万 t,显著低于常规情景下的第一个峰值 2196.5 万 t;波谷出现在 2072 年,谷值为 512.8 万 t,远小于常规情景下的谷值 1088.4 万 t,且谷值出现时间滞后 11 年;此后,长寿命情景下,住房建筑垃圾产生均显著低于常规情景,并且在 2100 年前不会再次出现波峰.总体来看,与常规情景相比,2040~2100 年间长寿命情景下北京市住房建筑垃圾产生量的最大降幅为 72.0%,平均降幅为 46.5%.上述结果表明,延长建筑寿命可以有效延迟北京住房建筑垃圾产生高峰的到来,并明显降低未来每年住房建筑垃圾的产生量,这对于缓解住房建筑垃圾产生高峰导致的环境压力具有重要意义.

此外,建筑结构的变化也对住房建筑垃圾产量有影响.在动态物质流模型中,建筑垃圾的产生量主要由建筑面积和物质强度相乘得出.由表 2 可知,不同结构形式的物质强度并不相同,砖木结构物质强度最低 ($1145.2\text{kg}/\text{m}^2$),钢混结构次之(平均 $1417.1\text{kg}/\text{m}^2$),砖混结构最高(平均 $1923.6\text{kg}/\text{m}^2$).随着住房建筑结构形式由砖木和砖混为主向砖混和钢混为主逐渐演变,总物质强度将有所上升,一定程度上将导致住房建筑垃圾产生量增长.

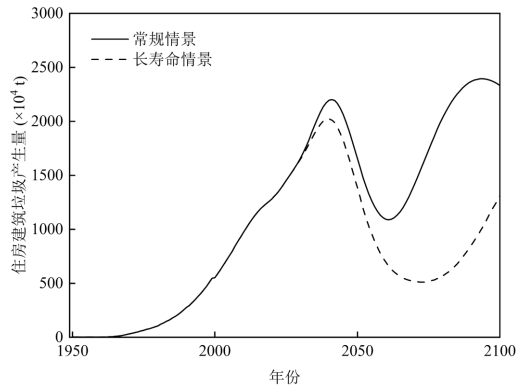


图 10 不同建筑寿命情景下北京市住房建筑垃圾产生量预测

Fig.10 Prediction of construction and demolition waste generation from housing building in Beijing under different building service life scenarios

3.3 建筑垃圾资源化利用潜力

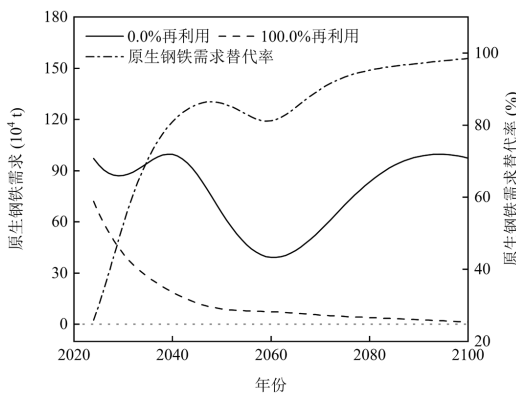


图 11 钢铁不同再利用情景下 2024~2100 年北京市住房建筑原生钢铁需求量

Fig.11 Primary steel demand for housing building in Beijing under different scenarios of steel recycling scenarios from 2024 to 2100

建筑垃圾可以作为稳定的二次资源.水泥、砖块、沙子和碎石等建筑垃圾中重量占比最大的部分可以回收用作生产再生骨料、再生混凝土、再生路基路面材料等新型绿色建材的原料^[40],不仅有利于节约资源,且环境效益显著.有研究表明,再生骨料在避免废弃混凝土填埋、减少运输距离和贮存阶段碳吸收等方面具有显著的碳减排潜力^[41-42],这对建筑领域“双碳目标”的实现具有重要意义.此外,钢铁也是建筑垃圾中可回收利用的重要资源^[43].基于各类结构形式的新建住房建筑面积和物质强度,可估算北京市未来每年新建住房建筑所需的钢铁量.在未来不同钢铁回收循环利用情景下,2024~2100年北

京市新建住房建筑对原生钢铁的需求量明显不同(图 11).在 0%再利用情景下,新建住房建筑所需钢铁全部由原生钢铁满足,对原生钢铁的需求最高为 99.7 万 t,平均值为 77.7 万 t;100%再利用情景下,建筑垃圾中的再生钢铁资源可大幅减少对原生钢铁的需求,新建住房建筑对原生钢铁的需求最低为 1.5 万 t,再生钢铁资源对原生钢铁需求的替代率最高可达 98.5%.考虑到再生钢铁与原生钢铁相比具有的碳减排优势^[44-45],加强建筑垃圾中钢铁二次资源的回收利用将是建筑业绿色高质量发展的关键路径之一.

3.4 建筑垃圾减量化策略

为应对住房建筑垃圾高峰,北京市应提前做好应对措施.在减少施工垃圾方面,混凝土 3D 打印建造等智能建造新技术的应用可减少施工建筑材料的浪费,降低建筑垃圾的产生^[46-47].今后,北京市住房建筑将以钢筋混凝土结构住房建筑为主,智能建造新技术在减废降碳方面的优势更加突出.因此,北京市应在今后注重加强住房建筑新技术的应用.

在拆除垃圾减量化方面,北京市应通过延长建筑使用寿命,延迟住房建筑拆除高峰的到来.研究表明,我国住房建短命现象主要与建筑质量、城市规划、经济、建筑区位等因素相关^[36,40-42].为延长建筑使用寿命,一方面必须注重强化建筑设计和建造管理,提高建筑质量;另一方面,建立和完善建筑拆除决策机制,严格控制尚在使用寿命内的建筑物拆除.目前,北京市已经出台《北京市城市更新条例》、《北京市城市更新行动计划(2021-2025)》等法规、文件^[51],实行“留改拆”并举,严格控制大规模拆除,不搞“大拆大建”,从源头上防止城市更新过程中建筑拆除的盲目性和随意性,这对延长建筑物使用寿命具有重要作用,后续需重点做好落地实施.

更重要的是,在过去几十年中,随着建筑材料需求的增加、材料供应的短缺和对生态环境的日益关注,建筑行业循环经济的模式越来越受到重视^[52-53].鉴于再生建筑材料在减废降碳方面的优势,北京市也应加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系,推动建筑业以循环生产模式替代线性增长模式,走“资源-产品-再生资源”的路线,将建筑垃圾作为未来重要的城市矿产加以回收利用.通过以上综合措施,有效应对资源和生态环境方面的挑战.

3.5 研究不足

本研究虽以北京市为例,但采用的动态物质流模型是基于质量守恒定律而构建的,因此,同样适用于其他城市或地区。在借鉴时,需注意应用适合的模型参数趋势预测方法。

此外,研究不可避免地存在局限性。首先,研究应用的动态物质流模型是基于对现实中住房建筑系统复杂代谢过程的必要简化和假设而构建的,没有考虑到城市规划、房地产市场变化、老旧小区改造升级等对住房建筑代谢过程的影响。其次,由于统计数据的不完善,以及模型中建筑寿命等参数的不唯一性,模型结果必然存在相当的不确定性。最后,虽然研究通过城镇新建建筑面积历史统计数据和其它研究进行比较的方式进行了模型验证,但仍存在不足,特别是缺乏对模型预测结果的独立数据验证。未来研究中,可考虑在动态物质流模型中纳入更多影响因素,通过补充调查提高参数时空分辨率,开展不确定性分析,并开发更具说服力的模型结果验证方法,以最大程度约束模型结果的不确定性,改善模型性能。

4 结论

4.1 1949~2100 年,北京市城镇和农村住房建筑新建面积、拆除面积呈现周期性波动,存量大致呈现“S”型曲线趋势。城镇和农村地区住房新建面积分别于2012年和2015年达到最大峰值3145.6和788.7万 m^2 ,拆除面积分别于2094年和2016年的达到最大峰值1500.8和453.5万 m^2 ,住房建筑平均使用寿命和建筑寿命分布函数对住房建筑流量模拟结果具有较大影响。住房建筑存量在经历几十年的增长后,将于21世纪中期达到饱和,城镇和农村地区的住房建筑存量饱和值分别为8.0亿 m^2 和124.7万 m^2 。

4.2 北京市住房建筑施工垃圾和拆除垃圾分别与住房新建面积和拆除面积的变化趋势高度相关。21世纪中后期,北京市将迎来建筑垃圾产量的高峰期。首个峰值将于2041年出现(2203.4万t),其后保持高位波动,并将在2094年迎来建筑垃圾总产量的最大峰值2396.4万t,分别约是2024年水平的1.6倍和1.7倍,拆除垃圾是主要构成成分,需提前做好应对措施。

4.3 不同时期北京市住房建筑垃圾来源差异明显,由砖木结构住房为主逐步向砖混、钢混为主过渡。

城镇和农村地区住房建筑垃圾中,水泥、砖块、沙子和碎石等是建筑垃圾中重量占比最大的成分,分别占住房建筑垃圾总重量的90.2%~95.5%和92.2%~94.1%,钢铁的重量占比分别为0.1%~4.5%和0.1%~3.0%。

4.4 建筑长寿命情景可延迟住房建筑拆除高峰的到来,最大减量潜力为72.0%;将建筑垃圾作为城市矿产回收利用,最高可减少98.5%的原生钢铁需求。为应对未来建筑垃圾峰值带来的挑战,北京市需要通过延长建筑使用寿命以延迟住房建筑拆除高峰的到来,同时加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系,将建筑垃圾作为城市矿产加以回收利用,这对实现住房建筑绿色高质量发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Haberl H, Löw M, Perez-Laborda A, et al. Built structures influence patterns of energy demand and CO₂ emissions across countries [J]. *Nature Communications*, 2023,14(1):3898.
- [2] Huang B J, Zhao F, Fishman T, et al. Building material use and associated environmental impacts in China 2000~2015 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018,52(23):14006-14014.
- [3] Zhang Z, Gao Q F, Shao S, et al. Carbon emission scenarios of China's construction industry using a system dynamics methodology—Based on life cycle thinking [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,435:140457.
- [4] Li J R, Liang J L, Zuo J, et al. Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in Shenzhen, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,263:121371.
- [5] 卢浩洁,刘宇鹏,宋璐璐,等.福、厦、泉城市群住宅保有量与建筑垃圾产生量多情景预测研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022,58(2):253-260.
Lu H J, Liu Y P, Song L L, et al. Multi-scenario forecasting of residential building stock and demolition waste generation in Fuzhou-Xiamen-Quanzhou [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022,58(2):253-260.
- [6] Gao X F, Nakatani J, Zhang Q, et al. Dynamic material flow and stock analysis of residential buildings by integrating rural-urban land transition: A case of Shanghai [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253:119941.
- [7] Wang H Z, Pan X M, Zhang S B, et al. Simulation analysis of implementation effects of construction and demolition waste disposal policies [J]. *Waste Management*, 2021,126:684-693.
- [8] Müller D B. Stock dynamics for forecasting material flows—case study for housing in the Netherlands [J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(1):142-156.
- [9] Kempton L, Boehme T, Amirghasemi M. A material stock and flow analysis for Australian detached residential houses: insights and challenges [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024,200:107289.

- [10] Zhang L, Lu Q Q, Yuan Z W, et al. A bottom-up modeling of metabolism of the residential building system in China toward 2050 [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2023,27(2):587-600.
- [11] 郑兆昱,邓 鹏,黄 靓,等.基于动态物质流的建筑垃圾减量化与资源化分析——以湖南省为例 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(2):702-711.
Zheng Z Y, Deng P, Huang L, et al. Reduction and resource recycle analysis on construction and demolition waste based on dynamic material flow—take Hunan Province as an example [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(2):702-711.
- [12] Gao Y, Wang J Y, Xu X X. Machine learning in construction and demolition waste management: progress, challenges, and future directions [J]. *Automation in Construction*, 2024,162:105380.
- [13] Song Y L, Wang Y, Liu F, et al. Development of a hybrid model to predict construction and demolition waste: China as a case study [J]. *Waste Management*, 2017,59:350-361.
- [14] 袁 剑,曾现来,陈 明.基于灰色系统理论的济南市建筑废物产量预测 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(9):3894-3902.
Yuan J, Zeng X L, Chen M. Estimating the construction waste generation in Jinan using the grey system theory [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(9):3894-3902.
- [15] Miatto A, Schandl H, Forlin L, et al. A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,142:245-256.
- [16] Yu S W, Awasthi A K, Ma W T, et al. In support of circular economy to evaluate the effects of policies of construction and demolition waste management in three key cities in Yangtze River Delta [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022,26:100625.
- [17] Souza F D S, Mendes J C, Morais L J B, et al. Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,176:105896.
- [18] Augiseau V, Barles S. Studying construction materials flows and stock: A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017,123:153-164.
- [19] Göswein V, Silvestre J D, Habert G, et al. Dynamic assessment of construction materials in urban building stocks: A critical review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,53(17):9992-10006.
- [20] 张 宇,段华波,张 宁.深圳市建筑水泥流量-存量分析及环境影响评估 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(1):482-489.
Zhang Y, Duan H L, Zhang N. Analysis of cement flow and stock of urban buildings and its environmental impact assessment in Shenzhen City [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):482-489.
- [21] Cao Z, Shen L, Zhong S, et al. A probabilistic dynamic material flow analysis model for Chinese urban housing stock [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018,22(2):377-391.
- [22] Tang S J, Leng W R, Liu G X, et al. Development of a framework to forecast the urban residential building CO₂ emission trend and reduction potential to 2060: A case study of Jiangxi province, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,351:119399.
- [23] Tang S J, Zhang L X, Hao Y, et al. System dynamics modeling for construction material flows of urban residential building: A case study of Beijing, China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021,168:105298.
- [24] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004,9(5):337-338.
- [25] Pauliuk S, Müller D B. The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation [J]. *Global Environmental Change*, 2014,24:132-142.
- [26] Hu D, You F, Zhao Y H, et al. Input, stocks and output flows of urban residential building system in Beijing city, China from 1949 to 2008 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010,54(12):1177-1188.
- [27] Gottschalk P G, Dunn J R. The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic [J]. *Analytical Biochemistry*, 2005,343(1):54-65.
- [28] Cai W J, Wan L Y, Jiang Y K, et al. Short-Lived buildings in China: impacts on water, energy, and carbon emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,49(24):13921-13928.
- [29] Cao Z, Liu G, Duan H B, et al. Unravelling the mystery of Chinese building lifetime: A calibration and verification based on dynamic material flow analysis [J]. *Applied Energy*, 2019,238:442-452.
- [30] Ren Z J, Jiang M, Chen D J, et al. Stocks and flows of sand, gravel, and crushed stone in China (1978-2018): evidence of the peaking and structural transformation of supply and demand [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,180:106173.
- [31] Miatto A, Schandl H, Tanikawa H. How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts? [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017,122:143-154.
- [32] Yang D, Guo J, Sun L W, et al. Urban buildings material intensity in China from 1949 to 2015 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020,159:104824.
- [33] 张 敏,董 莉,刘景洋,等.基于物质流分析的建筑垃圾产生量预测 [J]. *环境工程技术学报*, 2021,11(5):869-878.
Zhang M, Dong L, Liu J Y, et al. Prediction of construction and demolition waste production based on material flow analysis [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021,11(5):869-878.
- [34] 唐守娟,张力小,郝 岩,等.城市住宅建筑系统流量-存量动态模拟——以北京市为例 [J]. *生态学报*, 2019,39(4):1240-1247.
Tang S J, Zhang L X, Hao Y, et al. Dynamic modeling of stock and flow in an urban residential building system: A case study of Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(4):1240-1247.
- [35] 刘贵文,徐可西,张梦俐,等.被拆除建筑的寿命研究——基于重庆市的实地调查分析 [J]. *城市发展研究*, 2012,19(10):109-112.
Liu G W, Xu K X, Zhang M L, et al. A study on the life-span of demolished buildings: based on the investigation of demolished buildings in Chongqing [J]. *Urban Studies*, 2012,19(10):109-112.
- [36] Duan H B, Miller T R, Liu G, et al. Construction debris becomes growing concern of growing cities [J]. *Waste Management*, 2019,83:1-5.
- [37] Huang T, Shi F, Tanikawa H, et al. Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis [J]. *Resources,*

- Conservation and Recycling, 2013,72:91-101.
- [38] Orenca Panizza R, Nik-Bakht M. Building stock as a future supply of second-use material – a review of urban mining methods [J]. Waste Management Bulletin, 2024,2(2):19-31.
- [39] 赵宜宾,张艳芳,任晴晴.基于对数正态分布的新型冠状病毒肺炎病例统计特征分析 [J]. 工程数学学报, 2022,39(4):589-598.
Zhao Y B, Zhang Y F, Ren Q Q. Statistical analysis of the new coronavirus pneumonia cases based on lognormal distribution [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2022,39(4):589-598.
- [40] 魏英烁,姬国强,胡力群.建筑垃圾回收再利用研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2019,38(9):2842-2846.
Wei Y S, Ji G Q, Hu L Q. Research summary on recycling of construction waste [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019,38(9):2842-2846.
- [41] Zhang M Y, Liu X L, Kong L J. Evaluation of carbon and economic benefits of producing recycled aggregates from construction and demolition waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,425:138946.
- [42] Yuan Q, Zhang J J, Zhang S H, et al. An eco-friendly solution for construction and demolition waste: recycled coarse aggregate with CO₂ utilization [J]. Science of The Total Environment, 2024,950:175163.
- [43] 韩中奎,代涛,李强峰,等.基于动态物质流分析的中国铁二次资源回收潜力研究 [J]. 地球学报, 2023,44(2):315-324.
Han Z K, Dai T, Li Q F, et al. Study on the recycling potential of iron secondary resources in China based on dynamic material flow analysis [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023,44(2):315-324.
- [44] Hu M M, Pauliuk S, Wang T, et al. Iron and steel in Chinese residential buildings: A dynamic analysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010,54(9):591-600.
- [45] Pauliuk S, Wang T, Müller D B. Moving toward the circular economy: the role of stocks in the Chinese steel cycle [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(1):148-154.
- [46] 肖力光,仲小康.3D 打印粗骨料混凝土的研究进展及应用 [J]. 混凝土, 2024,(6):169-172,179.
Xiao L G, Zhong X K. Research progress and application of 3D printed coarse aggregate concrete [J]. Concrete, 2024,(6):169-172, 179.
- [47] 夏错伦,陈宇宁,刘超,等.混凝土 3D 打印建造的低碳性研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2024,45(3):15-33.
Xia K L, Chen Y N, Liu C, et al. Research progress on low carbon characters of 3D concrete printing based construction [J]. Journal of Building Structures, 2024,45(3):15-33.
- [48] 张佳,李赓,王琛.城市建筑寿命的空间规律及其影响因素——以兰州市城关区为例 [J]. 城市问题, 2018,(11):21-27.
Zhang J, Li G, Wang C. Spatial distribution rules and influencing factors of urban building lifespans: taking Chengguan District of Lanzhou City for example [J]. Urban Studies, 2018,(11):21-27.
- [49] 刘贵文,徐可西,张梦俐.建筑寿命的区位影响因素分析——基于重庆市的实证研究 [J]. 城市发展研究, 2014,21(4):119-124.
Liu G W, Xu K X, Zhang M L. Location factors influencing the life-span of building: A case study of Chongqing [J]. Urban Studies, 2014,21(4):119-124.
- [50] 刘贵文,张梦俐,徐可西.城市更新中建筑寿命缩短的影响因素分析——基于重庆市的实证分析 [J]. 城市问题, 2013,(10):2-7.
Liu G W, Zhang M L, Xu K X. Influencing factor of the short-lived buildings during the city renewal: A case study of Chongqing City [J]. Urban Studies, 2013,(10):2-7.
- [51] 马红杰.北京城市更新发展历程和政策演变——全生命周期管理和评估制度探索 [J]. 世界建筑, 2023,(4):4-9.
Ma H J. Development process and policy evolution of urban regeneration in Beijing: exploration of life cycle management and evaluation system [J]. World Architecture, 2023,(4):4-9.
- [52] Hossain Md U, Ng S T, Antwi-Afari P, et al. Circular economy and the construction industry: existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020,130:109948.
- [53] Mohammadizazi R, Bilec M M. Quantifying and spatializing building material stock and renovation flow for circular economy [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,389:135765.

作者简介: 董莉(1988-),女,四川南溪人,高级工程师,硕士,主要从事城市矿产、固体废物资源化利用等研究.发表论文 20 余篇.dongli@craes.org.cn.