

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.

基于物质流分析的建筑垃圾产生量预测

张敏¹,董莉²,刘景洋^{2*},毕莹莹²,张建强¹,杜明辉³

1.西南交通大学地球科学与环境工程学院

2.国家环境保护生态工业重点实验室,中国环境科学研究院清洁生产与循环经济研究中心

3.华北理工大学建筑与工程学院

摘要 针对建筑垃圾产生量激增但其统计数据缺失问题,基于1stOpt拟合平台和Visual Basic编程软件,构建城镇住宅和非住宅建筑垃圾产生量动态预测模型,定量模拟不同建筑寿命情景下建筑垃圾产生量及其组成的变化趋势。结果表明:我国城镇住宅建筑和非住宅建筑存量面积分别在2058年和2064年达到峰值(657.35亿和569.41亿m²)。在短、中、长建筑寿命情景下,住宅和非住宅建筑的新建面积均在21世纪20年代达到峰值,拆除面积峰值将在21世纪下半叶实现。在短、中、长寿命3种情景下,我国城镇住宅建筑垃圾总产量分别于2072年、2081年和2100年达到峰值(28.69亿、21.71亿和16.50亿t);非住宅建筑垃圾总产量分别于2077年、2084年和2100年达到峰值(26.25亿、20.29亿、15.48亿t)。2000年之前,建筑垃圾主要成分为施工垃圾,2000年之后,以拆除垃圾为主,至2100年拆除垃圾占比达98%。其中,混凝土、砖块、钢铁分别占44%~71%、22%~51%、0.50%~2.89%,其他成分占2.76%~4.68%。综合考虑建筑流量发展趋势和建筑垃圾产生特征,政府部门应宏观调控减缓人均建筑面积增长速度,延长建筑使用寿命,提高建筑垃圾循环利用率和二次建材原料的市场消纳量,从而减少建筑垃圾产生量,降低建筑垃圾对生态环境的破坏。

关键词 建筑垃圾;物质流分析;存量-流量;产生量预测;组成分析

中图分类号:X24 文章编号:1674-991X(2021)05-0869-10 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210060

Prediction of construction and demolition waste production based on material flow analysis

ZHANG Min¹, DONG Li², LIU Jingyang^{2*}, BI Yingying², ZHANG Jianqiang¹, DU Minghui³

1.Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University

2.State Key Laboratory of Environmental Protection and Ecological Industry, Centre of Cleaner Production and Circular Economy Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3.Faculty of Architecture and Engineering, North China University of Science and Technology

Abstract In response to the rapid increase in the amount of construction and demolition waste (C&DW) and the lack of statistical data on the output of C&DW, based on the 1stOpt fitting platform and Visual Basic programming software, a dynamic prediction model of urban residential and non-residential construction waste was constructed, and the changing trend of C&DW production and its compositions under three scenarios of short lifetime, medium lifetime and long lifetime quantitatively simulated. The results showed that: The stock area of urban residential buildings and non-residential buildings in China would reach their peaks in 2058 and 2064, respectively, with the peaks of 65.74 billion m² and 56.94 billion m². Under the short lifetime, medium lifetime and long lifetime scenarios, the construction area of residential and non-residential buildings would reach their peaks in 2020s, and the demolition area would peak in the second half of this century. The total output of China's urban residential

收稿日期:2021-03-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1903601)

作者简介:张敏(1996—),女,硕士研究生,研究方向为固体废物处理处置,zhmin1192@163.com

* 责任作者:刘景洋(1974—),男,研究员,博士,研究方向为生态工业和循环经济,liujy@craes.org.cn

C&DW would reach its peak in 2072, 2081 and 2100 under the three scenarios of short lifetime, medium lifetime and long lifetime, respectively, with peaks of 2.869 billion tons, 2.171 billion tons and 1.65 billion tons. Under the three scenarios, the total output of non-residential C&DW would reach peaks in 2077, 2084 and 2100, with a total output of 2.625 billion tons, 2.029 billion tons and 1.548 billion tons, respectively. Before 2000, C&DW was mainly composed of construction waste. After 2000, demolition waste was the main composition. By 2100, the proportion of demolition waste would reach 98%. Among them, concrete, bricks, and steel accounted for 44%-71%, 22%-51%, 0.50%-2.89%, and other compositions accounted for about 2.76%-4.68%. Taking into account the development trend of construction flow and the characteristics of C&DW generation, the government departments should slow down the growth rate of per capita building area through macro-control, prolong the service life of buildings, improve the recycling rate of C&DW and the market consumption of secondary buildings materials, so as to cut down the output of C&DW and reduce their damage to the ecological environment.

Key words construction and demolition waste; material flow analysis; stock-flow; production forecast; composition analysis

建筑垃圾是城市化进程必须面对的问题,因而备受关注。研究表明,我国建筑垃圾年均产生量为 15.5 亿~24 亿 t,约占城市垃圾的 30%~40%^[1-2]。由于建筑垃圾资源化水平不高,我国多个城市面临建筑垃圾难以处理的窘境。建筑垃圾产生量的精确预测是有效应对建筑垃圾问题的先决条件^[3],而我国缺少相关统计数据,增加了对建筑垃圾实施综合管理的难度。

建筑垃圾产生量预测方法有多元回归^[4-5]、时间序列^[6]、灰色预测^[7-8]和物质流分析^[9-12]等。左浩坤等^[5]选取 GDP、商品房销售面积和建筑施工面积 3 个主要影响因素建立多元回归分析模型,预测北京市 2011—2015 年的建筑垃圾产生量,修正后的决定系数达到 0.973,拟合程度较好。向维等^[6]利用 SPSS 时间序列预测模型对重庆市未来 10 年的施工垃圾、装修垃圾、拆除垃圾产生量以及建筑垃圾总产生量进行预测,相对误差均在 10%左右,预测精度较高。王秋菲等^[13]通过灰色预测模型预测沈阳市 2005—2014 年建筑垃圾产生量,预测精度为优。由此可见,上述模型的预测结果都具有较高的可信度,能够比较准确地预测建筑垃圾产生量。但上述方法均只能进行 5~10 a 的短期预测,不能从大时间尺度上为管理提供数据支撑。

物质流分析模型通过物质守恒原理可以预测未来 20~100 a 内物质存量和流量,近年来,被越来越多的学者应用于房屋建筑及基础设施中的物质存量^[14]和建筑材料需求预测^[15],金属材料在人类社会圈中的流动^[16]和循环经济发展评估^[17]等研究,但关于建筑垃圾产生量的研究却鲜有报道。因此,笔者针对建筑垃圾产生量缺少统计数据问题,利用

材料消耗强度来估算建筑物的长期物质流量,并结合不同建筑结构及其寿命预测未来建筑垃圾产生量及其成分的变化规律。

1 研究方法与数据来源

1.1 模型构建

以全国城镇居民住宅和非住宅建筑为系统边界,基于 1stOpt 拟合平台和 Visual Basic 编程软件,构建城市房屋建筑系统的系统动力学模型(图 1),拟合时段为 1978—2100 年,拟合初始值设定于 1978 年。模型包括 3 个子模块。

模块 I 是住宅和非住宅建筑需求模块。住宅和非住宅建筑流量主要受城市人口以及建筑需求驱动,当年城镇建筑需求存量(S)为城镇常住人口(P)和人均建筑面积(A)的乘积[式(1)]。根据《国家人口发展规划(2016—2030 年)》^[18]、联合国经济和社会事务部(UN DESA)发布的《世界人口展望 2019》^[19]中的中等生育率指标,到 2100 年,我国人口只有 10.65 亿人;参照《世界城市化展望 2018》^[20]中的城市化率,到 2050 年我国城市化率将达到 80%,用 Logistic 增长函数拟合 2051—2100 年的城市化率,我国 2100 年城市化率将达到 86.5% (图 2)。根据人均住宅建筑面积统计数据,假设其变化趋势符合 Logistic 函数,最高可达 61.6 m²。依据 1985 年全国城镇房屋普查^[21]和 2005 年“城市住房统计公报”^[22]公布的城市房屋建筑面积,结合人均建筑面积可计算出当年人均非住宅建筑面积。在欧洲一些发达国家的人均非住宅建筑面积约占人均住宅建筑面积的 80%^[23],假设该比例遵循 Logistic 函数,我国城镇非住宅建筑和住宅建筑的比例在

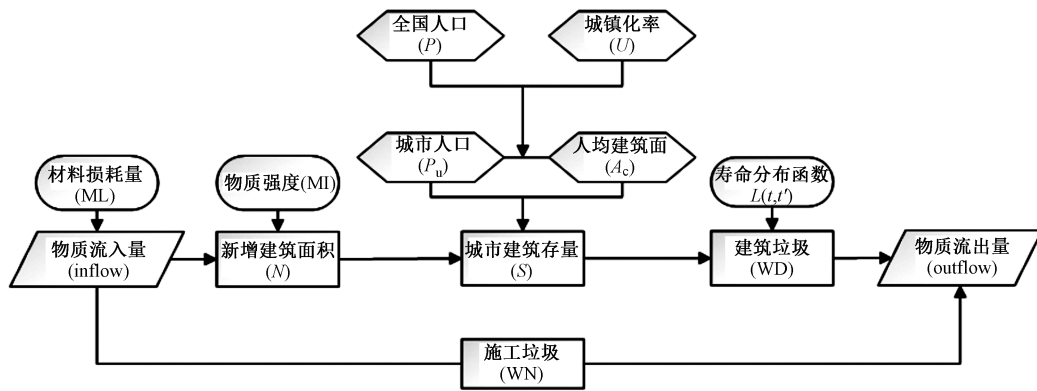


图 1 物质流分析

Fig.1 Material flow analysis diagram

2050 年达到 80%,2100 年达到 90%(图 3)。

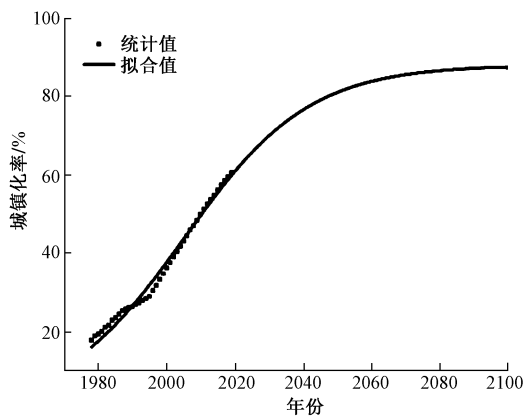


图 2 我国城镇化率

Fig.2 Urbanization rate of China

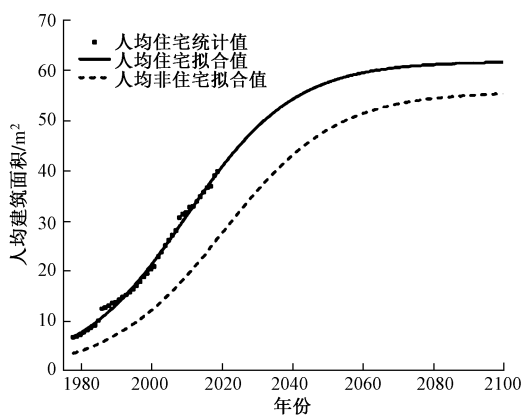


图 3 城镇人均住宅和非住宅建筑面积

Fig.3 Urban per capita residential and non-residential building area

模块 II 为流量-存量模块,用来模拟新建面积、存量面积、拆除面积间的动态变化。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 [式(2)],物质流分析模型中房屋拆除面积的计算

方法是利用寿命分布函数建立拆除曲线 [式(3)]。关于寿命分布函数,不同研究提出了不同的观点 [24-31]。但哪类分布函数最符合建筑寿命,目前还没有统一说法。笔者选取正态分布函数拟合建筑寿命曲线 [式(4)],建立房屋建筑的拆除曲线,从而获得拆除面积。为提高模型的精细化程度,考虑全国城镇房屋建筑结构主要分为砖混和钢混 2 种,构建 2 种建筑结构子系统。自 1949 年之后,我国几乎所有的城市房屋建筑都是砖混结构,第一批钢筋混凝土建筑建造于 20 世纪 70 年代中期 [12]。根据全国第五次和第六次人口普查结果 [32-33],我国城市房屋钢混结构比例从 2000 年的 25.78% 快速增至 2010 年的 48.19%,假设建筑结构比例变化符合 Logistic 增长函数,则 2100 年,钢混结构的建筑比例达到 90%(图 4)。

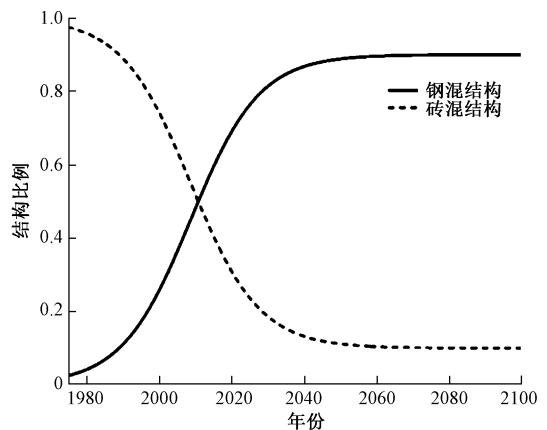


图 4 城镇房屋建筑结构比例

Fig.4 Proportion of urban buildings structure

模块 III 为环境模块,主要考虑住宅和非住宅建筑的施工垃圾产生量 [式(5)] 和拆除垃圾产生量 [式(6)]。

各模块中参数计算公式如下:

$$S_{i,t}^{r,nr} = P_t^{r,nr} \times A_t^{r,nr} \quad (1)$$

$$S_{i,t}^{r,nr} = S_{i,t-1}^{r,nr} + N_{i,t}^{r,nr} - D_{i,t}^{r,nr} \quad (2)$$

式中: $S_{i,t}^{r,nr}$ 为建筑 i 在 t 年的存量, hm^2 ; $P_t^{r,nr}$ 为在 t 年的城镇人口, 万人; $A_t^{r,nr}$ 为在 t 年的人均建筑面积, m^2 ; $N_{i,t}^{r,nr}$ 为建筑 i 在 t 年的新建量, hm^2 ; $D_{i,t}^{r,nr}$ 为建筑 i 在 t 年的拆除量, hm^2 ; r 和 nr 分别代表城镇住宅建筑和而非住宅建筑。

$$D_{i,t}^{r,nr} = \sum_{t'}^{t-1} L_i^{r,nr}(t, t') \times N_{i,t'}^{r,nr} \quad (3)$$

$$L_i^{r,nr}(t, t') = \frac{1}{\sigma_i^{r,nr} \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(t-t'-\tau_i^{r,nr})^2}{2(\sigma_i^{r,nr})^2}} \quad (4)$$

式中: $L_i^{r,nr}(t, t')$ 为建筑 i 在 t 年的寿命分布函数, 代表在 t' 年建成的建筑物在 t 年被拆除的概率, %; $\tau_i^{r,nr}$ 为建筑 i 的平均寿命, a ; $\sigma_i^{r,nr}$ 为正态分布标准差, 取 0.3τ 。

$$\text{WN}_{i,j,t}^{r,nr} = N_{i,t}^{r,nr} \times \text{ML}_{i,j,t}^{r,nr} \quad (5)$$

$$\text{WD}_{i,j,t}^{r,nr} = D_{i,t}^{r,nr} \times \text{MI}_{i,j,t}^{r,nr} \quad (6)$$

式中: $\text{WN}_{i,j,t}^{r,nr}$ 为建筑 i 中的建筑材料 j 在 t 年产生的

施工损耗量, 万 t ; $\text{WD}_{i,j,t}^{r,nr}$ 为建筑 i 中的建筑材料 j 在 t 年产生的拆除量, 万 t ; $\text{ML}_{i,j,t}^{r,nr}$ 为施工过程中单位建筑面积物质的损耗量, kg/m^2 ; $\text{MI}_{i,j,t}^{r,nr}$ 为单位建筑面积物质强度, kg/m^2 。

1.2 数据来源

数据来源主要是《中国统计年鉴》^[34]、《新中国六十年统计资料汇编》^[35]、《改革开放 40 年经济社会发展成就》^[36]、《世界人口展望 2019》^[19]、《世界城市化展望 2018》^[20] 等统计数据以及其他文献调研数据。将 Yang 等^[37] 对全国不同省份和不同建设时期的城市建筑物质强度调研结果作为本研究单位拆除建筑物质强度(表 1)。我国目前未引进房屋建筑改进技术, 假设 2015 年后的物质强度不再产生变化。据 Shi 等^[38] 的调查, 施工过程中物质材料的有效利用率只有 95%~98%, 也就是说施工过程中物质材料损耗率为 2%~5%, 假设满足倒 S 型曲线, 从 5% 逐渐减至 2%。1978—2016 年城市房屋建筑竣工面积即新建量数据统计口径一致且相对准确, 作为本模型前期新建量数据和模型验证。

表 1 单位拆除建筑物质强度

Table 1 Material intensity of per unit demolished building

kg/m^2

房屋类别	结构	年份	钢铁	木材	水泥	砖块	沙	砾石	石灰	玻璃	油毡	沥青
城镇住宅	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	1960—1979	32.6	20.7	186.0	355.6	534.6	547.2	22.4	3.2	1.2	1.3
		1980—1989	25.9	20.6	166.8	236.5	479.0	496.6	22.4	3.3	1.1	1.7
		1990—1999	19.2	20.4	147.5	117.4	423.4	446.0	22.5	3.4	1.0	2.0
		2000—2015	59.2	17.4	217.3	146.8	364.3	449.3	42.7	7.6	0.9	2.3
城镇非住宅	砖混结构	1960—1979	11.5	10.3	94.8	880.0	439.9	131.0	39.3	2.1	1.8	2.5
		1980—1989	25.1	17.9	156.2	832.0	651.4	495.5	30.2	8.6	2.0	6.7
		1990—1999	25.1	17.9	156.2	832.0	651.4	495.5	30.2	8.6	2.0	6.7
		2000—2015	31.8	33.6	161.7	406.6	851.5	160.9	47.0	7.6	2.0	6.7
	钢混结构	1960—1979	23.5	5.5	110.1	655.9	413.1	131.9	20.4	3.1	4.9	5.4
		1980—1989	53.2	21.6	198.1	462.6	636.7	646.0	18.9	3.4	1.3	3.1
		1990—1999	146.0	30.9	310.5	423.2	670.8	772.5	42.4	4.0	1.0	2.0
		2000—2015	70.3	33.6	278.7	149.4	577.3	341.0	65.9	7.6	0.9	2.3

1.3 情景设置

本研究模型构建的主要参数有人口、城镇化率、人均建筑面积、建筑结构比例、物质强度、建筑平均寿命。通过改变建筑平均寿命参数, 其他参数按照

目前的发展趋势保持不变设置 3 种情景。我国一般建筑的设计使用年限为 50 a^[39], 政府规定建筑使用年限为 70 a^[40], 但调查显示现有城市建筑平均实际寿命仅为 30~40 a^[41]。在此基础上, 设定短、中、长

建筑寿命 3 种情景,设置参数如表 2 所示。

1.4 模型验证

模型运算可得到全国城镇住宅房屋和非住宅房屋建筑垃圾的动态变化结果。但建筑垃圾产生量无统计值,而该模型的建筑垃圾产生量是通过建筑存

量和流量进行计算。因此,利用全国城镇住宅和非住宅竣工面积的历史统计数据验证。采用相对误差作为模型精确度检验指标,根据目前建筑垃圾管控现状,检验指标小于 0.3^[42],即认为该模型的预测结果有效。

表 2 不同情景下的建筑寿命设置

Table 2 Setting of the lifespan of buildings under different scenarios

建筑结构	短寿命		中寿命		长寿命	
	1978—2010 年	2011—2100 年	1978—2010 年	2011—2100 年	1978—2010 年	2011—2100 年
砖混结构	30	30	30	50	30	70
钢混结构	40	40	40	50	40	70

2 结果与讨论

2.1 模型精确度检验

根据我国城镇人口、人均建筑面积和每年新建

房屋建筑面积,利用物质流分析法预测我国城镇房屋存量和流量。将预测数据与每年新建房屋建筑面积的统计值进行对比,得到预测值与统计值之间的相对误差(图 5)。

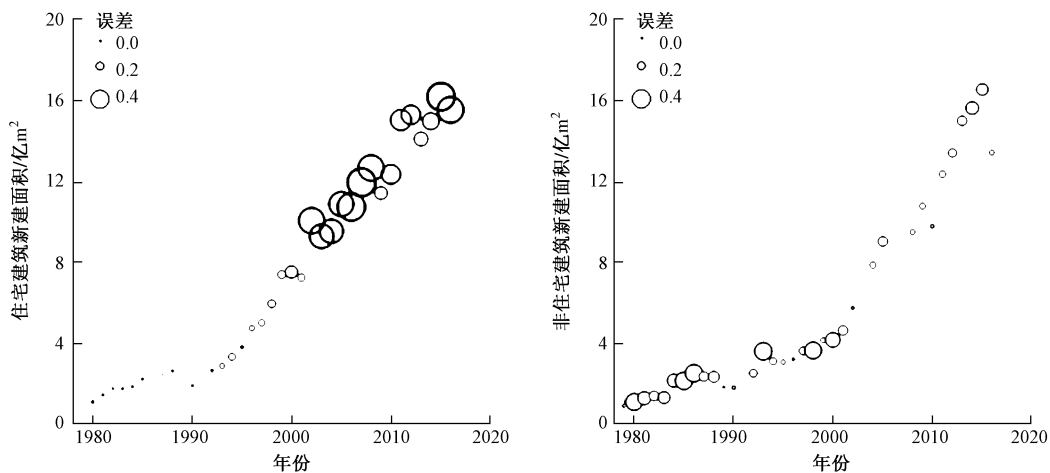


图 5 住宅和非住宅新建面积预测检验

Fig.5 Checking of prediction of residential and non-residential newly built buildings

由图 5 可见,住宅建筑新建面积的预测值与统计值的增长趋势相吻合,2002 年之前的预测值与统计值之间的相对误差比较小,而 2002 年之后的预测值往往高于统计值,这可能是寿命低估的结果,或者是人口、住房存量和建筑活动的官方统计数据中存在统计口径不一致所致。但总体来看,住宅建筑新建面积的预测值与统计值之间的平均误差为 0.24,小于检验指标,预测结果可信。而非住宅建筑新建面积的预测值与统计值之间的相对误差都比较小,平均相对误差为 0.18,小于 0.3,预测结果有效。综上所述,利用动态物质流分析模型和上述数据进行的建筑垃圾产生量预测结果有效。

2.2 房屋建筑存量-流量

由图 6 可知,城镇住宅存量和非住宅存量分别

在 2058 年和 2064 年达到饱和(657.35 亿和 569.41 亿 m²),之后逐渐减小,至 2100 年减至 567.55 亿和 509.63 亿 m²,分别是 1978 年的 49.12 和 82.79 倍。

在短寿命情景下,城镇住宅和非住宅新建面积分别在 2020 年和 2031 年达到峰值(20.74 亿和 17.38 亿 m²),到 2100 年降至 14.50 亿和 12.80 亿 m²。与短寿命情景相比,中、长寿命情景下的新建面积峰值略有减小,住宅建筑新建面积均在 2020 年达到峰值(20.67 亿和 20.64 亿 m²),非住宅建筑新建面积均在 2028 年达到饱和(16.69 亿和 16.57 亿 m²),达到饱和后新建面积下降速度更为显著,在 2060 年左右将出现一段新建面积低谷期。这是因为新建建筑的首次增长由存量需求增长引起,存量出现饱和时,对新建面积的需求将仅由更换原因引

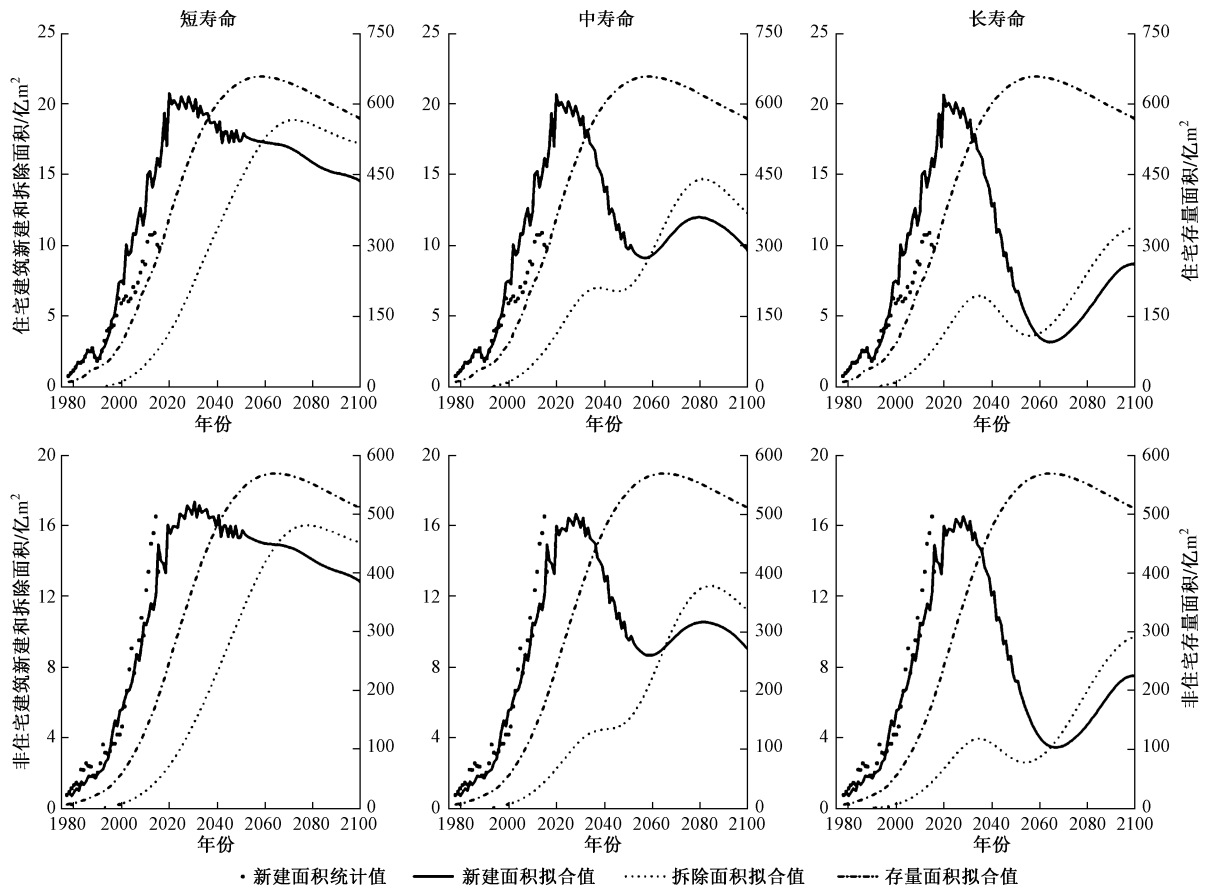


图 6 城镇房屋建筑存量-流量动态变化

Fig.6 Urban residential building and non-residential building stock-flow dynamic change

起^[9]。使用寿命越长,建筑更换需求时间间隔越长,需求量越小。

拆除活动比新建活动晚一个寿命周期,从 2000 年直到 21 世纪末的很长时间内,建筑存量都将对拆除活动产生相当大的影响。在短寿命情景下,城镇住宅和非住宅拆除面积分别于 2072 年和 2065 年达到饱和(18.84 亿和 16.04 亿 m²),到 2100 年降至 17.14 亿和 15.05 亿 m²。在中寿命情景下,住宅建筑拆除面积在 2037 年有一个小高峰(7.01 亿 m²),随后在 2081 年达到一个大高峰(14.68 亿 m²)。非住宅建筑拆除面积在研究范围内只有一个峰值(12.60 亿 m²)。长寿命情景下,拆除面积的峰值出现更晚、波动更大,住宅建筑和非住宅建筑拆除面积小高峰均在 2035 年出现(6.45 亿和 3.94 亿 m²),大高峰在研究范围内尚未出现,拆除面积持续增长至 2100 年,分别为 11.28 亿和 9.73 亿 m²。

2.3 房屋建筑垃圾产生量

图 7 显示了城镇住宅和非住宅建筑在 3 种寿命情景下 1978—2100 年的建筑垃圾总产生量。

由图 7 可见,在短寿命情景下,住宅建筑垃圾产

生量在 2072 年达到峰值(28.69 亿 t),非住宅建筑垃圾产生量在 2077 年达到峰值(26.25 亿 t)。在中寿命情景下,住宅建筑垃圾产生量在 2035 年达到一个小峰值(13.02 亿 t)后略有下降,然后快速增长,至 2081 年达到大峰值(21.71 亿 t);非住宅建筑垃圾产生量与住宅建筑垃圾产生量变化趋势极为相似,在 2036 年达到小峰值(8.99 亿 t)后略有下降,然后迅速增长,至 2084 年达到大峰值(20.29 亿 t)。在长寿命情景下,住宅建筑和非住宅建筑垃圾产生量均在 2033 年达到一个小高峰(12.46 亿和 8.43 亿 t),再逐渐增至 2100 年的 16.50 亿和 15.48 亿 t。这意味着目前我国城市建筑垃圾产生量远未达到峰值,且在未来几十年里,将面临建筑垃圾产生量迅速增长的压力。

2.4 房屋建筑垃圾组成

城镇房屋建筑垃圾组分如图 8 所示。由图 8 可见,2000 年之前,建筑垃圾主要由施工垃圾组成,这是由于 20 世纪 70—80 年代建造的建筑还未大面积拆除;2000 年之后,由于城市快速扩张、建筑物更替和不合理规划,大量建筑物被拆除,拆除垃圾成为建

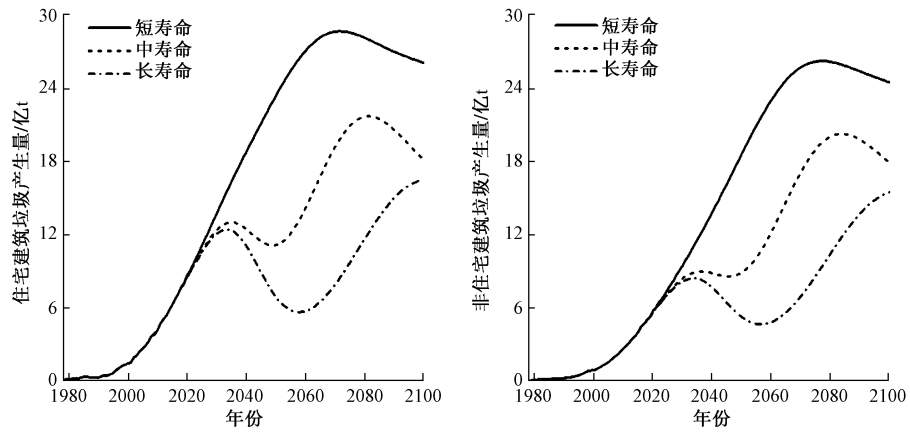


图 7 城镇住宅、非住宅建筑垃圾产生量

Fig.7 Construction and demolition waste of urban residential building and non-residential buildings

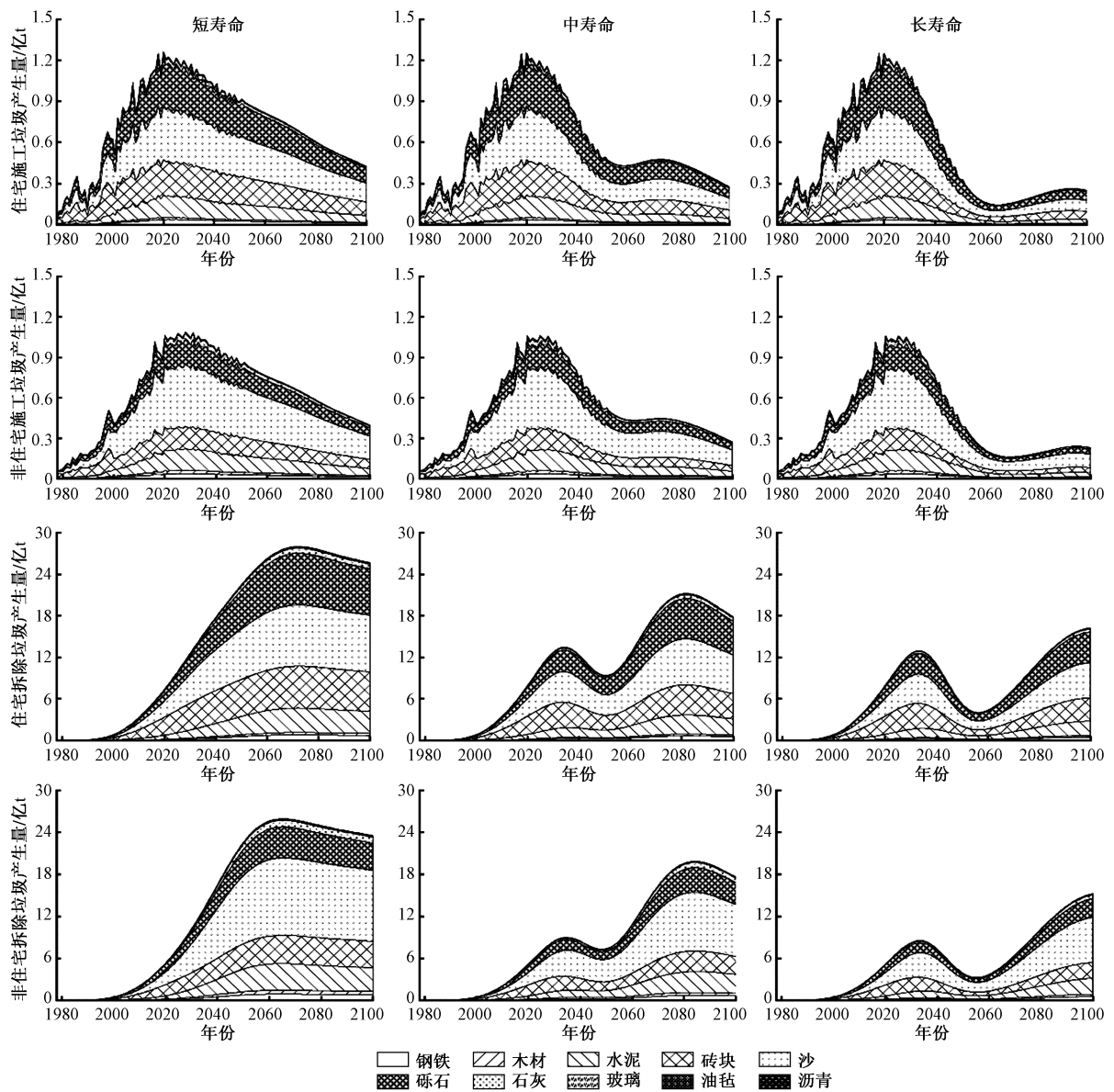


图 8 城镇住宅、非住宅建筑垃圾组分

Fig.8 Compositions of construction and demolition waste of urban residential building and non-residential buildings

筑垃圾的主要组成部分;至 2100 年,拆除垃圾约占总建筑垃圾的 98%。随着我国城市房屋建筑结构的变化,不同时期的施工垃圾和拆除垃圾成分及其比例也在发生变化。不同情景下,住宅建筑施工垃圾产生量峰值均在 2020 年产生,约为 1.3 亿 t;非住宅施工垃圾和所有建筑拆除垃圾产生量峰值及其发生时间会有较大差异。短、中、长寿命情景下产生的非住宅施工垃圾分别在 2028 年、2025 年和 2020 年达到峰值,约为 1.1 亿 t。短寿命情景下,住宅和非住宅拆除垃圾产生量只有一个峰值,分别在 2072 年和 2065 年出现(27.99 亿、25.96 亿 t);中寿命情景下,住宅和非住宅拆除垃圾的第一个峰值在 2034 年和 2035 年出现(13.45 亿、8.99 亿 t);第二个峰值在 2082 年和 2084 年出现(21.23 亿、19.87 亿 t);长寿命情景下,住宅和非住宅建筑的第一个峰值均在 2033 年出现(12.94 亿、8.54 亿 t),在研究范围内,第二峰值尚未出现,但增长持续至 2100 年,当年拆除垃圾产生量分别为 16.25 亿和 15.25 亿 t。建筑使用寿命对建筑垃圾产生量的波动有极显著的影响,使用寿命越长,波动越强烈。因此,更好地了解建筑物的使用寿命对预测未来的建筑垃圾产生量至关重要。

不同来源的建筑垃圾,水泥、砖块、沙和砾石都是其中占比较大的组分,总占比为 90%~96%。水泥、沙和砾石是混凝土的组成材料,因此也可以认为建筑垃圾中最大组分是混凝土,占比为 44%~71%;其次是砖块,占比为 22%~51%;然后是钢铁,占比为 0.50%~2.89%;最后是石灰和木材,分别占 1.57%~2.62%、0.90%~2.19%;其他占比为 0.30%~0.82%。从长远看,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、再生混凝土复合材料、再生混凝土、垃圾土陶粒等产品^[43]。因此应努力提高建筑垃圾的循环利用率,不仅可以减少自然资源开采量,节约资源,还能减轻建筑垃圾占地和污染造成的压力。

3 结论与展望

(1)我国城镇住宅和非住宅建筑存量分别在 2058 年和 2064 年达到峰值(657.35 亿和 569.41 亿 m²)。在 3 种寿命情景下,住宅建筑新建面积均于 2020 年达到峰值,短、中、长寿命情景下对应的峰值分别为 20.74 亿、20.67 亿和 20.64 亿 m²;非住宅建筑的新建面积在短、中、长寿命情景下分别于 2028

年、2025 年和 2020 年达到峰值(17.38 亿、16.69 亿和 16.57 亿 m²)。住宅建筑的拆除面积分别于 2072 年、2081 年和 2100 年达到峰值(18.84 亿、14.68 亿和 11.28 亿 m²);非住宅建筑的拆除面积分别于 2065 年、2084 年和 2100 年达到峰值(16.04 亿、12.60 亿和 9.73 亿 m²)。

(2)住宅建筑垃圾总产量在短、中、长寿命 3 种情景下分别于 2072 年、2081 年和 2100 年达到峰值(28.69 亿、21.71 亿和 16.50 亿 t);非住宅建筑垃圾总产量在 3 种情景下分别于 2077 年、2084 年和 2100 年达到峰值(26.25 亿、20.29 亿、15.48 亿 t)。

(3)建筑垃圾由施工垃圾和拆除垃圾组成,2000 年之前,建筑垃圾主要由施工垃圾组成;2000 年之后,主要由拆除垃圾组成;至 2100 年,建筑垃圾主要组成部分为拆除垃圾,占比为 98%。其中,混凝土占比为 44%~71%,砖块占比为 22%~51%,钢铁占比为 0.50%~2.89%,其他成分占比为 2.76%~4.68%。在 3 种情景下,住宅施工垃圾产生量均于 2020 年达到峰值(约 1.3 亿 t),拆除垃圾产生量分别于 2072 年、2082 年和 2100 年达到峰值(27.99 亿、21.23 亿、16.25 亿 t);而非住宅建筑的施工垃圾产生量分别于 2028 年、2025 年和 2020 年达到峰值(约为 1.1 亿 t),拆除垃圾产生量分别于 2065 年、2084 年和 2100 年达到峰值(25.96 亿、19.87 亿和 15.25 亿 t)。

(4)建筑寿命对建筑垃圾总产生量的变化趋势影响效果显著。延长建筑使用寿命,可有效减少建筑垃圾产生量,推迟建筑垃圾产生量达到峰值的时间点。因此,相关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,不断延长建筑寿命,从源头上减少建筑垃圾产生量。其次,建筑存量作为新建流量和拆除流量的驱动力,可通过政府宏观调控措施减缓人均建筑面积的增长速度,预计近期峰值会更低,随后建筑需求将进一步下降,给城市建筑管理和垃圾处理处置提供一个缓冲时间。另外,在建筑垃圾产生量峰值到来前,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。

参考文献

- [1] 邵俊.中国城市环境卫生行业年度发展研究报告(2015—2016)[M].上海:上海交通大学出版社,2017.
- [2] 崔德芹,杨中青.回收利用建筑垃圾,发展循环经济[J].工业

- 技术经济,2006,25(10):35-36.
- [3] PARISI K A, FERREIRA D M, PIVA K M, et al. Waste generated in high-rise buildings construction: a quantification model based on statistical multiple regression [J]. *Waste Management*, 2015, 39:35-44.
- [4] 张红玉, 杨飞华, 李国学, 等. 基于 ARIMA 模型的北京市朝阳区建筑垃圾产量分析与预测 [J]. *环境工程*, 2014, 32(增刊1):696-699.
- ZHANG H Y, YANG F H, LI G X, et al. Analysis and forecast of construction waste production based on the ARIMA model in Chaoyang District [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(Suppl 1):696-699.
- [5] 左浩坤, 付双立. 北京市建筑垃圾产生量预测及处置设施建设分布研究 [J]. *环境卫生工程*, 2011, 19(2):63-64.
- ZUO H K, FU S L. Output forecast of construction waste in Beijing and constructing and distributing of its disposal facilities [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2011, 19(2):63-64.
- [6] 向维, 杨延梅, 刘俊. 重庆市建筑垃圾现状及产生量预测研究 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(4):105-109.
- XIANG W, YANG Y M, LIU J. Research on present situation and production predict of construction and demolition debris in Chongqing [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(4):105-109.
- [7] 王桂琴, 张红玉, 李国学, 等. 灰色模型在北京市建筑垃圾产生量预测中的应用 [J]. *环境工程*, 2009, 27(增刊1):508-511.
- WANG G Q, ZHANG H Y, LI G X, et al. The prediction by gray model on the production of construction and demolition waste of Beijing [J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(Suppl 1):508-511.
- [8] 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.
- [9] HU M M, BERGSDAL H, van der VOET E, et al. Dynamics of urban and rural housing stocks in China [J]. *Building Research & Information*, 2010, 38(3):301-317.
- [10] BERGSDAL H, BOHNE R A, BRATTEBØ H. Projection of construction and demolition waste in Norway [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 11(3):27-39.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王秋菲, 王盛楠, 石丹. 基于灰色理论的建筑垃圾产生量的预测研究 [J]. *沈阳建筑大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(5):518-523.
- WANG Q F, WANG S N, SHI D. Forecast of construction waste output generated based on gray theory [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Science)*, 2015, 17(5):518-523.
- [14] 李宜博. 北京市建筑存量演化及驱动因素分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [15] MÜLLER B D. Stock dynamics for forecasting material flows; case study for housing in the Netherlands [J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(1):142-156.
- [16] 党春阁, 周长波, 吴昊, 等. 重金属元素物质流分析方法及案例分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2014, 4(4):341-345.
- DANG C G, ZHOU C B, WU H, et al. Methods of substance flow analysis of heavy metal elements and case study [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, 4(4):341-345.
- [17] 解蕾, 姚扬, 但智钢, 等. 基于物质流和能量流分析的典型工业园区循环经济发展评价 [J/OL]. *环境工程技术学报*. [2021-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20201124.1510.002.html>.
- [18] 国务院. 国务院关于印发国家人口发展规划(2016—2030年)的通知 [J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2017(6):24-35.
- [19] United Nations Population Division. *World population prospects 2019* [R]. New York: United Nations, 2019.
- [20] United Nations Population Division. *World urbanization prospects: the 2018 revision* [R]. New York: United Nations, 2018.
- [21] 李晓超. *中国统计年鉴(2001)* [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [22] 建设部发布 2005 年城镇房屋概况统计公报 [J]. *城市规划通讯*, 2006(13):10.
- [23] 杨崑. 可持续性建筑存量演进模型研究: 以中国建筑存量为例 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [24] FISHMAN T, SCHANDL H, TANIKAWA H, et al. Accounting for the material stock of nations [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(3):407-420.
- [25] VÁSQUEZ F, LØVIK A N, SANDBERG N H, et al. Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 111:37-55.
- [26] ERIK BRADLEY P, KOHLER N. Methodology for the survival analysis of urban building stocks [J]. *Building Research & Information*, 2007, 35(5):529-542.
- [27] 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.
- [28] HASHIMOTO S, TANIKAWA H, MORIGUCHI Y. Where will large amounts of materials accumulated within the economy go: a material flow analysis of construction minerals for Japan [J]. *Waste Management*, 2007, 27(12):1725-1738.
- [29] TANIKAWA H, FISHMAN T, OKUOKA K, et al. The weight of society over time and space: a comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945-2010 [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(5):778-791.
- [30] KAPUR A, KEOLEIAN G, KENDALL A, et al. Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(4):539-556.
- [31] SARKAR S, CHAMBERLAIN J F, MILLER S A. A comparison of two methods to conduct material flow analysis on waste tires in a

- small island developing state [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(2): 300-314.
- [32] 国家统计局. 中国 2000 年人口普查数据 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [33] 国家统计局. 中国 2010 年人口普查资料 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [34] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [35] 李晓超. 新中国六十年统计资料汇编 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [36] 国家统计局. 改革开放 40 年经济社会发展成就 [R]. 北京: 国家统计局, 2018.
- [37] 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.
- [38] SHI J G, XU Y Z. Estimation and forecasting of concrete debris amount in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 49(2): 147-158.
- [39] 住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [40] 中华人民共和国城镇国有土地使用权出让和转让暂行条例 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 1990(10): 355-361.
- [41] 宋春华. 全寿命 高品质: 坚持以人为本, 实行住宅性能认定 [J]. *住宅科技*, 2004, 24(9): 3-7.
- SONG C H. Whole life and high grade quality: stick to the idea of giving first consideration for the people and implement housing performance certification [J]. *Housing Science*, 2004, 24(9): 3-7.
- [42] 胡鸣明, 彭峰, 向鹏成. 建筑废弃物产量预测及资源化处理厂选址布局优化: 以重庆市主城为例 [J]. *环境工程*, 2020, 38(1): 122-127.
- HU M M, PENG F, XIANG P C. Estimation of construction and demolition waste generation and site optimization of recycling plants: a case study of Chongqing metropolis, China [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(1): 122-127.
- [43] 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. ⊗

声 明

本刊已被美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsweb)、英国《农业与生物科学研究中心文摘》(CAB Abstracts)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)收录,被《中国核心期刊数据库》《万方数据-数字化期刊群》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库、《中文科技期刊数据库》(维普)、《超星期刊域出版平台》全文收录,作者的网络及电子版著作权使用费已与本刊稿酬一次性给付,特此声明。如作者不同意将文稿编入以上数据库,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理,否则视作同意。

《环境工程技术学报》编辑部