

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*

卢浩洁^{1,2)} 刘宇鹏^{1)†} 宋璐璐¹⁾ 陈伟强^{1,2)}

(1)中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室,厦门市城市代谢重点实验室,361021,福建厦门;

2)中国科学院大学,100049,北京)

摘要 建筑在城市中的积累和废弃能够对城市环境产生显著影响.本文以同处于闽三角地区但处于城市化不同阶段的福州市、厦门市和泉州市为例,通过物质流分析预测了3座城市至21世纪末在高速发展、历史轨迹和可持续发展3种情景下住宅新建量、保有量和拆除量的动态变化规律和趋势.研究表明:1)未来福、厦、泉城市群的人均居住条件有望达到甚至超过欧美现有水平.2)相较于沿历史轨迹继续发展,盲目追求过高的居住条件(高速发展情景)将带来严重的资源环境问题;而倡导可持续的发展模式能够在不影响居民居住水平的前提下,大幅节约资源并减少其环境影响.3)对于城镇化率较高的厦门,通过旧楼改造、建筑延寿等手段可显著减少建筑垃圾产生量,而对于处于城市化进程中的福州和泉州,则需通过发展紧凑型城市避免“过量”的建筑垃圾产生.

关键词 住宅建筑;住宅保有量;建筑垃圾产生量;多情景预测

中图分类号 X799.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021260

0 引言

建筑是人类的栖身之所,也是城市功能实现和人类福祉提升的必要基础.我国在快速城市化的过程中,每年约新建20亿m²的建筑用于满足城市居民的生活和工作需求,为此每年需投入超过50亿t的建筑材料^[1],消耗2.5亿万t标准煤的能源^[2].与此同时,因城市更新、老旧建筑拆除而产生的大量建筑垃圾也给城市环境带来了巨大压力.据估计我国每年的建筑垃圾产生量超过20亿t,占城市垃圾产生总量的40%^[3].由于建筑的新建、修缮、拆除等活动不断与周边环境产生物质和能量的交换,因此分析建筑代谢机制,对评估建筑全生命周期的环境影响具有重要的现实意义,对揭示城市代谢和动态演变规律具有较高的科学研究价值^[4].

目前针对建筑代谢机制的研究主要包括:1)通过物质流分析方法研究建筑代谢特征及其动态发展规律^[5-10].如Müller^[6]通过动态物质流分析,模拟了荷兰1900—2100年建筑的存量和流量,并阐述了建筑提供活动空间和社会服务的能力.该方法进一步在中国^[11-12]、挪威^[7]、美国^[13-14]、日本^[15-17]等国家被广泛应用.2)依据面积建筑所含的建筑材料量研究建筑的物质组

成及规模^[4, 17-19].例如,Hu等^[19]模拟了中国1900—2100年城乡建筑对钢铁的需求,Tanikawa等^[15]分析了日本47个县从20世纪40年代到21世纪建筑材料的动态变化.3)通过生命周期评价方法分析建筑活动引起的物耗、能耗和对环境的影响^[2, 20-24].如黄蓓佳等^[20]估计了1950—2050年中国对建筑材料的需求及建筑材料对环境的影响,分析了建筑寿命和建筑材料回收利用率对固废产生和二氧化碳排放的影响.4)通过驱动力分析探究建筑变化的影响因素^[4, 25].如Fishman等^[25]分析了日本不同城市建筑存量的驱动力变化情况.

综上所述,对处于城市群形成关键阶段的多个城市的建筑代谢机制开展研究,可对比处于城市化不同阶段、不同类型城市的发展轨迹,进而根据城市化特征提出针对性的可持续发展建议.为此,本文选择了同处海西城市群,但位于城市化不同阶段的福州市、厦门市和泉州市为研究对象.其中:福州市的周边存在着大量由乡村向城市转型的半城市化地区,是研究中国特大城市中半城市化地区时空演变过程的理想样本^[26];厦门市是我国最早设立的4个经济特区之一,其主城区特别是厦门岛已基本完成城市化过程;

* 国家自然科学基金资助项目(41801222, 52170183, 41801207);福建省科技计划对外合作资助项目(2019I0031)

† 通信作者:刘宇鹏(1986—),男,博士.研究方向:城市代谢与可持续发展. E-mail: ypliu@iue.ac.cn

收稿日期:2021-10-27

泉州市则是经济新常态下制造业促进工业转型升级的典型代表,核心区外围的城乡融合区规模较大且增长显著,城市的空间形态由离散趋向完整、城镇属性逐步提高.福、厦、泉3个城市可分别作为高速发展城市、高质量发展城市和工业转型城市的样本,是中国快速城市化过程的典型缩影.住宅作为城市建筑的主体,其年竣工面积占城市建筑年竣工面积的一半以上^[27],城市规划中对商业建筑和公共基础设施的规划也往往参考住宅规模,因此本研究构建了能够刻画城镇和农村住宅系统存/流量动态变化的模拟模型.该模型综合考虑常住人口、人均住宅面积、建筑寿命等因素,并通过高速发展情景、历史轨迹情景和可持续发展情景,模拟不同情景下福、厦、泉城乡住宅的新建量、保有量和拆除量,并预估建筑垃圾产生量及其处理处置产生的碳排放量.

1 数据与方法

1.1 数据及来源 本研究的历史数据(表1)主要源

自《中国住户调查年鉴》《中国农村住户调查年鉴》《福州统计年鉴》《厦门经济特区年鉴》《泉州统计年鉴》及其他文献调研数据^[6, 8, 11, 14, 28].常住人口的预测数据通过GM(1,1)模型和联合国人口署的数据计算获得,人均住宅面积预测数据和建筑寿命预测数据源自《中国住房市场趋势与政策研究2020—2050》和相关研究^[8, 29]中设置的情景参数,面积建筑所含的物质质量来源于相关文献[4, 11, 30–31].建筑拆除废弃阶段的碳排放数据来源于王松庆等^[29]的研究.

1.2 模型构建

1.2.1 GM(1,1)模型预测城镇化率 GM(1,1)模型把分散在时间轴上的离散数据看成一组连续变化的序列,设 $x^{(0)}$ 为原始数据序列:

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad (1)$$

式中 $x^{(0)}(k) \geq 0 (k = 1, 2, \dots, n)$, $x^{(1)}$ 是 $x^{(0)}$ 经1次累加的新数据序列,可以弱化随机序列的波动性和随机性:

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)), \quad (2)$$

表1 常住人口、人均住宅面积的历史数据

年份	福州				厦门				泉州			
	城镇		农村		城镇		农村		城镇		农村	
	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	常住人 口/万人	人均住宅 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)
2000	335.9	12.6	329.0	34.3	177.1	14.6	27.9	35.9	283.2	26.8	444.8	36.0
2001	341.3	14.9	322.3	34.3	189.4	18.5	29.6	40.0	299.3	27.7	439.7	40.0
2002	346.7	23.1	315.7	38.0	201.4	18.3	30.6	39.6	314.6	33.3	432.4	43.0
2003	352.1	24.8	309.1	40.4	213.2	19.6	31.9	43.2	329.3	33.7	422.7	42.3
2004	357.6	25.5	302.4	41.8	225.0	21.5	33.0	44.5	344.7	34.4	411.3	44.6
2005	363.0	25.7	303.0	41.5	238.9	21.4	34.1	46.4	359.9	34.4	402.1	45.1
2006	372.4	25.9	298.6	45.5	252.3	22.9	35.7	48.0	375.8	34.9	393.2	51.2
2007	377.9	26.8	298.1	46.1	267.5	23.9	36.5	52.3	386.0	38.7	388.0	49.6
2008	392.7	28.1	290.3	46.9	287.2	22.2	38.8	54.1	400.1	49.0	378.9	50.6
2009	401.9	30.4	285.1	47.0	291.1	23.1	38.9	55.8	422.6	47.4	363.4	50.9
2010	441.1	31.2	270.4	45.4	314.4	24.2	41.7	52.9	475.4	47.8	337.5	51.0
2011	455.8	33.2	264.2	47.9	319.5	24.4	41.5	58.1	486.9	41.6	334.1	52.6
2012	471.1	32.4	255.9	48.4	325.2	25.2	41.8	60.0	500.7	40.8	328.3	55.2
2013	483.7	37.0	250.3	49.6	330.9	24.6	42.1	59.9	515.0	46.0	321.0	54.5
2014	497.1	41.4	245.9	65.6	338.3	26.8	42.7	62.8	530.9	58.9	313.1	66.2
2015	507.8	42.5	242.3	67.3	343.2	28.4	42.8	63.7	541.2	61.3	309.8	67.9
2016	518.5	41.7	238.5	65.7	348.9	30.8	43.1	62.7	553.4	63.5	304.6	67.9
2017	532.4	42.3	233.6	66.5	357.3	30.9	43.7	67.3	568.3	66.0	296.7	67.9
2018	544.1	51.6	229.9	67.3	366.2	32.0	44.8	76.8	579.4	64.6	290.6	75.0
2019	549.9	51.5	230.1	67.3	382.7	30.3	46.3	77.0	587.3	65.3	286.7	75.0

式中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) (k = 1, 2, \dots, n)$.

$z^{(1)}$ 是 $x^{(1)}$ 邻均值生成数列

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)), \quad (3)$$

式中: $z^{(1)}(k) = \frac{(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))}{2}, k = 2, 3, \dots, n$. 因此可以得到 GM(1, 1) 模型为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b. \quad (4)$$

定义参数 a 和 b 分别为发展系数和灰色作用量, 只要求出参数 a 和 b , 就能求出 $x^{(0)}$ 的预测值. 将 a 和 b 代入灰色模型 GM(1, 1) 作累减还原, 得到原始数据的预测模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak}, \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

该方法可以将灰色系统中的未知因素弱化, 强化已知因素的影响程度. 一般用城镇人口占总人口的比例来衡量城镇化率. 城镇化率预测结果的小误差概率 P 检验为 1, 预测等级好, 预测值与真实值的相对误差都控制在 $<5\%$, 预测精度较高. 假设福州、厦门和泉州的总人口变化趋势与联合国人口署的预测数据相同, 通过总人口与城镇化率相乘, 可以预测 2020—2100 年城镇和农村的常住人口.

1.2.2 建筑存量驱动模型模拟建筑存量和流量 该模型以人口及其生活方式作为未来建筑存量预测的主要驱动因素, 基于建筑的服务年限和物质守恒原则模拟建筑及其构筑物物质流量.

城乡地区每年住宅的保有量 A_{MS} 用常住人口 P 与人均住宅面积 A 计算:

$$A_{MS} = P \times A. \quad (6)$$

每年新增的住宅保有量等于住宅的新建量减去住宅的拆除量, 通过住宅保有量、新建量和拆除量的迭代关系可以推算未来数值^[32]:

$$A_{MS(t)} - A_{MS(t-1)} = A_1 - A_0 = A_1 - \sum_{t_0}^t (A_1 \times D), \quad (7)$$

式中: t 为核算的年份, t_0 为住宅的建设年份; A_1 为新建建筑面积; A_0 为建筑拆除面积; D 是住宅寿命的概率密度函数, 表示在 t 年住宅拆除的概率. 假设住宅寿命满足正态分布^[6], 则

$$D = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{t-t'}{2\delta^2}}, \quad (8)$$

式中: t' 是建筑的平均寿命, 通过对中国建筑寿命的研究表明, 中国城市建筑的平均寿命为 30~40 a, 农村住宅为 15~20 a^[6, 8, 11, 28, 33]; δ 设置为 t' 的 30%^[11]. 建筑报废拆除后其构筑物物质形成建筑垃圾为

$$m = A_0 \times \rho_A, \quad (9)$$

式中: m 为建筑拆除垃圾质量, ρ_A 为拆除建筑的面质量.

建筑拆除垃圾处理处置所产生的碳排放量 $m(C)$ 包括建筑在拆除过程中使用机械设备产生的碳排放、建筑垃圾运输过程中交通工具使用产生的碳排放以及建筑垃圾处理过程产生的碳排放^[34], 通过建筑拆除面积与碳排放系数 $I(C)$ 相乘得到, 计算公式为

$$m(C) = A_0 \times I(C). \quad (10)$$

1.3 情景设置 本研究在预测未来建筑存/流量和建筑垃圾产生量的过程中共设置了高速发展、历史轨迹和可持续发展 3 种情景, 不同情景下城市常住人口、人均住宅面积、住宅平均寿命均会产生相应调整 and 变化.

高速发展情景: 1) 常住人口的增长趋势与联合国人口署预测的高增长趋势相同; 2) 居民对住宅面积和舒适度的需求在近期保持较高的增长速度, 直到 2050 年人均住宅面积达到饱和; 3) 建筑平均寿命近期小幅提高, 在远期大幅提高.

历史轨迹情景: 1) 常住人口的增长趋势与联合国人口署预测的中等增长趋势相同; 2) 居民对住宅面积和舒适度的需求维持在稳定水平, 人均住宅面积变化不大; 3) 建筑平均寿命在中远期有所提高.

可持续发展情景: 1) 常住人口的增长趋势与联合国人口署预测的低增长趋势相同; 2) 居民对住宅面积和舒适度的需求适当放缓, 人均住宅面积变化极小; 3) 建筑平均寿命在近期大幅提高, 在远期小幅提高, 最早达到住宅寿命的最大值. 情景设置参数如表 2 所示.

2 结果分析

2.1 城市住宅建筑存量和流量多情景分析 福、厦、泉城市群的住宅保有量在历史轨迹和可持续发展情景下呈先升高后降低的倒“U”形变化, 而在高速发展情景下呈“S”形增长(图 1). 在历史轨迹情景下, 福州、厦门和泉州的常住人口将快速增长至 2035 年左右的 800 万、450 万和 900 万人, 随后逐渐下降; 城镇人均住宅面积将快速增长至 2030 年左右趋于稳定, 饱和值分别约为 55、30 和 70 $m^2 \cdot 人^{-1}$. 福州、厦门和泉州的住宅保有量在人口和人均住宅面积迅速增长的驱动下, 快速增长至 2035 年左右的 4.7 亿、1.6 亿

表 2 情景设置具体参数

城市年份	高速发展情景					历史轨迹情景					可持续发展情景					
	人口/万人	城镇人均住宅面积 ¹⁾	农村人均住宅面积	城镇住宅寿命 ²⁾	农村住宅寿命	人口/万人	城镇人均住宅面积	农村人均住宅面积	城镇住宅寿命	农村住宅寿命	人口/万人	城镇人均住宅面积	农村人均住宅面积	城镇住宅寿命	农村住宅寿命	
福州	2030	814	58	75	38	34	792	55	76	46	42	769	54	76	55	50
	2040	822	70	83	40	40	779	58	82	50	50	735	56	80	60	60
	2050	822	76	87	46	46	749	59	85	51	51	680	56	82	63	63
	2060	817	80	89	52	52	708	59	86	55	55	610	57	82	65	65
	2070	814	82	90	57	57	664	59	87	59	59	536	57	82	68	68
	2080	820	83	91	63	63	624	59	87	64	64	465	56	82	70	70
	2090	838	84	91	69	69	589	59	87	69	69	399	56	82	73	73
	2100	866	84	91	75	75	561	59	85	75	75	341	56	82	75	75
厦门	2030	448	33	80	38	34	435	32	82	46	42	423	32	82	55	50
	2040	452	39	95	40	40	428	34	90	50	50	404	33	88	60	60
	2050	452	44	108	46	46	412	34	93	51	51	374	33	91	63	63
	2060	449	47	119	52	52	389	34	95	55	55	335	33	93	65	65
	2070	448	49	127	57	57	365	34	96	59	59	295	33	94	68	68
	2080	451	50	133	63	63	343	34	96	64	64	256	33	94	70	70
	2090	461	51	138	69	69	324	34	96	69	69	219	33	94	73	73
	2100	476	51	140	75	75	308	34	97	75	75	188	33	94	75	75
泉州	2030	912	74	83	38	34	887	69	82	46	42	862	68	82	55	50
	2040	921	87	91	40	40	872	73	87	50	50	823	71	87	60	60
	2050	921	95	96	46	46	840	74	89	51	51	762	71	89	63	63
	2060	916	98	103	52	52	793	75	90	55	55	683	72	90	65	65
	2070	912	99	107	57	57	744	75	91	59	59	601	72	91	68	68
	2080	919	99	109	63	63	699	75	91	64	64	521	72	91	70	70
	2090	940	99	110	69	69	660	75	91	69	69	447	72	91	73	73
	2100	970	99	110	75	75	628	75	91	75	75	382	72	91	75	75

1)人均住宅面积单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$; 2)住宅寿命单位为 a 。

和 6.5 亿 m^2 , 之后逐渐降低, 到 2100 年分别降低至 3.3 亿、1.0 亿和 4.7 亿 m^2 (图 1)。在高速发展情景下, 受人均住宅面积增加 (饱和值比历史轨迹情景高 30%) 以及城市人口总数增长的影响, 福州、厦门和泉州的住宅保有量将快速增长至 2040 年左右的 6.0 亿、2.0 亿和 9.0 亿 m^2 (年均增速 4%), 随后缓慢增长至 2100 年的 7.3 亿、2.5 亿和 10.7 亿 m^2 (年均增速 0.4%), 其峰值比历史轨迹情景高 55% (图 1)。在可持续发展情景下, 福州、厦门和泉州的住宅保有量的增长期提前至 2030 年, 峰值分别达到约 4.5 亿、1.5 亿和 6.2 亿 m^2 , 比历史轨迹情景低 5%。随着未来城市人口的减少和居民对居住条件改善需求的满足 (人均住宅面积饱和值比历史轨迹情景低 5%), 3 市的住宅保有量将逐渐下降至 2100 年的 2 亿、0.6 亿、2.7 亿 m^2 , 比历史轨迹情景低 40% (图 1)。进一步对比 3 市的建筑规模表

明, 由于厦门市既有城镇化率较高, 未来将较早进入城市化中后期, 城市建设从总量扩张转向饱和, 建筑保有量率先达峰 (图 1)。

总体上, 受人口增长和居住条件改善等因素驱动, 福、厦、泉城市群在 21 世纪初迎来了建设高潮 (图 1)。之后随着城镇化达到较高水平, 人口增速下降且人均居住面积接近饱和等影响, 致使 3 市的新建建筑逐渐减少 (图 1)。“十二五”时期是福、厦、泉城市群建设的高速期, 其建设峰值分别达到约 1800 万、600 万和 2000 万 $\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (图 1)。之后在高速发展情景下, 福、厦、泉城市群的建设高潮将持续到 2035 年左右, 峰值进一步增长至约 2000 万、600 万和 3000 万 $\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (图 1)。对比不同情景下 3 市的建设规模表明, 高速发展情景下 3 市的新建住宅累积面积比历史轨迹情景高 65%, 而可持续发展情景下新建住宅累积面积比历史轨迹

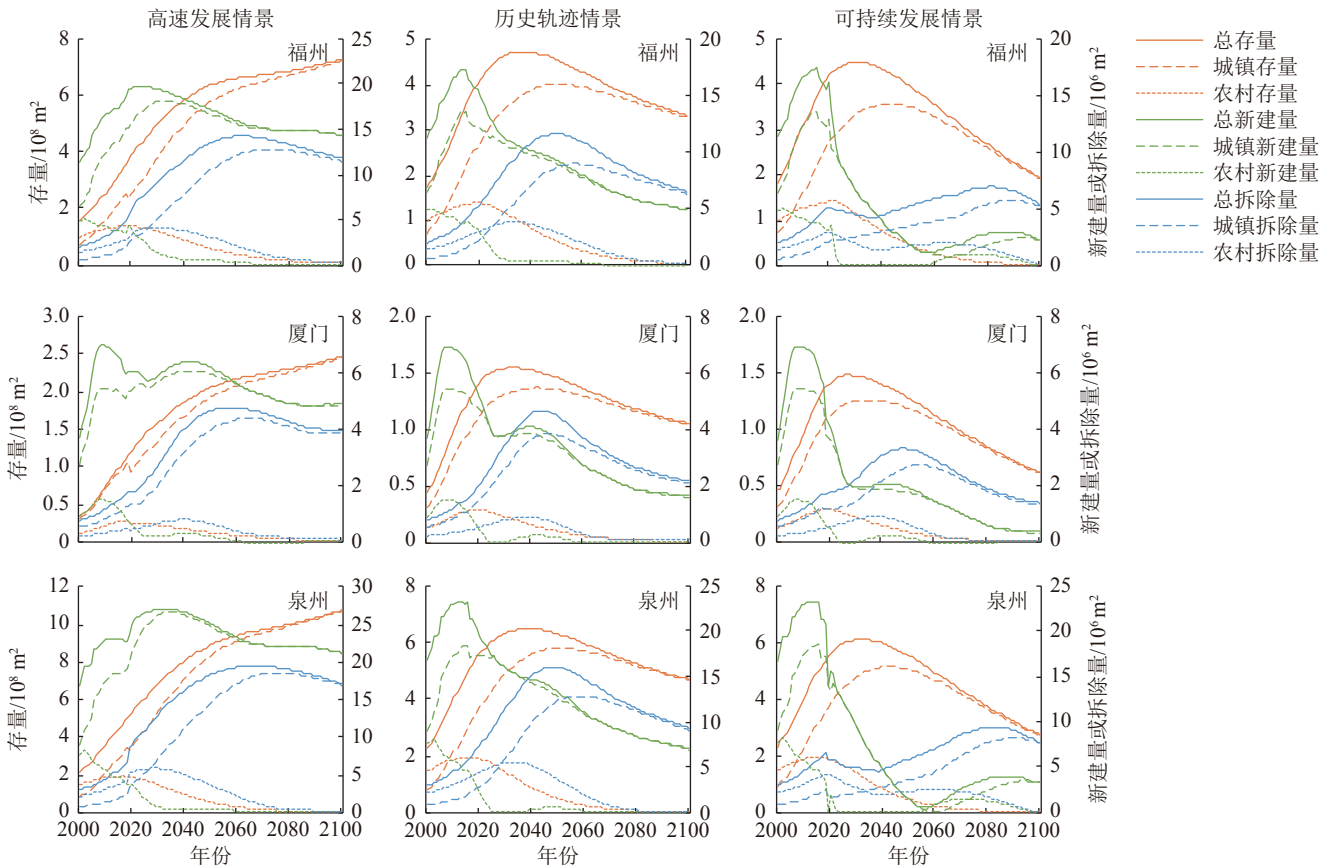


图1 不同情景下城市住宅存量-流量动态变化

情景低45%(图1)。

2.2 建筑拆除垃圾产生量多情景分析 受上述情景中建筑规模、新建和拆除等行为的影响,尽管不同情景下福、厦、泉城市群的建筑拆除垃圾年均产生量存在显著差别,但其变化规律均呈现先增长后降低的单峰型变化(图2)。在历史轨迹情景下,福州、厦门和泉州的建筑拆除垃圾年均产生量在2020—2050年快速增长并于2050年前后分别达峰至1400万、600万、2000万 $t \cdot a^{-1}$,随后下降至2100年的800万、260万、1200万 $t \cdot a^{-1}$ (图2)。在高速发展情景下,由于2020—2040年间仍有大量新建建筑,3市的建筑拆除垃圾产生量达峰时间将推迟至2060年左右,且峰值分别提高至约1700万、600万、2400万 $t \cdot a^{-1}$,比历史轨迹情景约高15%(图2)。在可持续发展情景下,受居民的居住需求转向面积适度、功能合理、生态友好型的高品质住宅、建筑寿命延长、建筑拆除行为放缓等因素影响,3市的建筑拆除垃圾年均产生量的达峰时间推迟至2050年(厦门)和2080年左右(福州和泉州),且峰值比历史轨迹情景低35%(图2)。

据测算,建筑拆除垃圾中废砂石占比最高(61%),其次是废混凝土(18%)、废砖瓦(17%),而废钢铁(2%)、废木材(1%)和废玻璃(0.1%)占比较低(图2)。如果三市能够将建筑垃圾回收利用率由当前的平均

值30%^[35]提高至规划值70%^[36],则上述建筑垃圾的循环利用可以满足未来50%(高速发展情景)至80%(可持续发展情景)的建材需求;若能进一步提高至德国、日本等发达国家的平均值90%^[37],则可以满足未来70%(高速发展情景)至95%(可持续发展情景)的建材需求。进一步对比多个情景下建筑垃圾产生量的变化规律表明,高速发展情景下建筑垃圾产生量将在2050年后与历史轨迹情景产生较大差距(图2),这意味着高速发展模式给福、厦、泉城市群带来“额外”的资源环境压力将在21世纪中叶开始逐渐显现,而可持续发展情景则能够大幅度降低上述压力(图2)。

2.3 建筑拆除垃圾的碳排放效应分析 福、厦、泉城市群住宅建筑拆除垃圾在处理处置过程中产生的碳排放总量,在可持续发展情景下达峰时间最晚、峰值最低(图3)。在历史轨迹情景下,福州、厦门和泉州建筑拆除垃圾在处理处置过程中产生的二氧化碳年均排放量在2020—2050期间快速增长,并于2050年左右分别达峰至160万、60万、220万 $t \cdot a^{-1}$,随后逐渐下降至2100年的90万、30万、130万 $t \cdot a^{-1}$ (图3)。在高速发展情景下,建筑拆除垃圾在处理处置过程中的碳排放量达峰时间将推迟至2060年左右,且峰值分别提高至约200万、65万、270万 $t \cdot a^{-1}$ (图3)。在可持

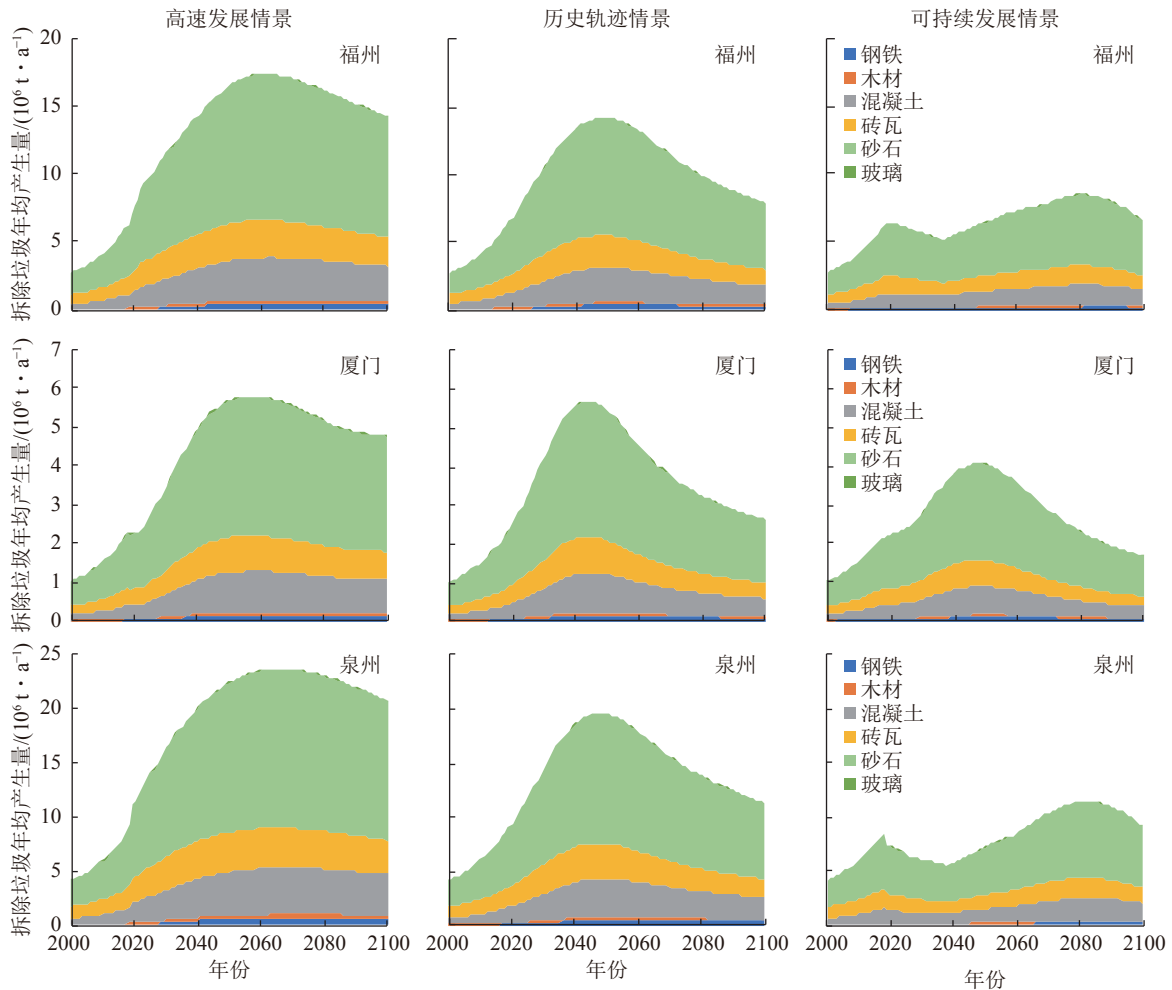


图 2 不同情景下住宅建筑拆除垃圾年均产生量

续发展情景下,由于建筑拆除行为放缓,3市建筑拆除垃圾在处理处置过程中的碳排放量达峰时间推迟至2050年(厦门)和2080年左右(福州和泉州)(图3)。

在所有的发展模式下,住宅建筑拆除及其固废处理处置过程所产生的碳排放都无法在2030年前达到达峰。

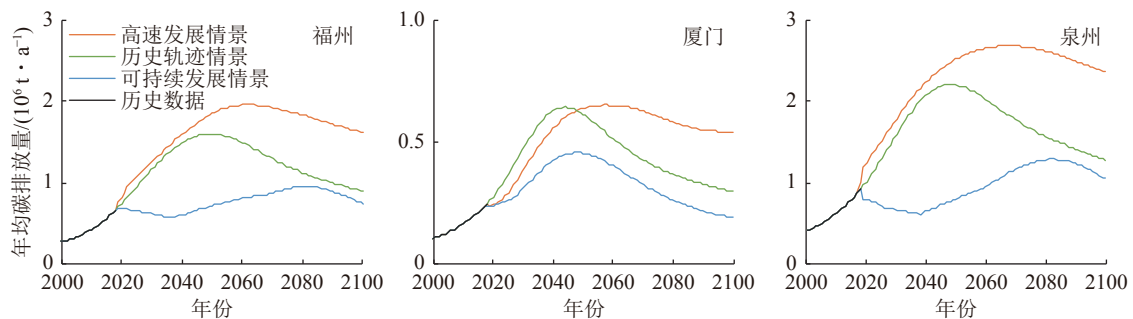


图 3 不同情景下住宅建筑拆除垃圾年均碳排放量

3 结论

住宅保有量在一定程度上反映了城市居民的生活水平. 研究表明,如果福、厦、泉城市群按“历史轨迹”继续发展,未来该地区的人均居住面积有望达到甚至超过欧洲现有水平(约 $45 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$). 在此情景下,未来该区域内的城市居民在基本解决了住房短缺

问题的基础上,将继续寻求居住条件的改善,此时应注重提高住宅的配置效率,构建多主体供给、多渠道保障、租购并举的住房制度。

如按照高速发展情景继续开展大规模的城市建设,福、厦、泉城市群的人均居住面积将有望达到甚至超过美国现有水平(约 $70 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$),但也会带来更高的资源消耗(比历史轨迹情景高 65%),并产生更多

的建筑垃圾(比历史轨迹情景多30%)。这一结果表明,盲目追赶“过高”的居住条件和“蔓延型”的城市形态,将带来巨大的资源和环境压力,不利于城市的可持续发展。

可持续发展模式倡导,通过修建长寿命的高品质建筑、打造紧凑的城市形态,并维持较高的资源循环利用效率,推动城市的可持续发展。在此情景下,人均居住面积仅比历史轨迹情景低5%,但资源消耗量却能够降低45%、建筑垃圾产生量减少43%。这说明可持续发展模式能够在满足绝大部分居民居住需求的基础上,有效降低城市建设所带来的资源消耗和环境压力。

本文结果表明,建筑延寿是未来大幅减少建筑垃圾产生并降低环境压力的重要手段之一。特别是对于已步入城市化中后期的厦门,通过对其老旧小区进行系统化改造、整治、维护和开发,提高住宅品质、延长建筑寿命,进而能够大幅减少建筑垃圾的产生和相应的环境压力。而对于正处于大规模城市建设过程中的福州和泉州,通过发展紧凑型城市、提高其土地承载力和可持续发展水平,将成为未来城市规划的重点。

5 参考文献

- [1] AUGISEAU V, BARLES S. Studying construction materials flows and stock: a review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123: 153
- [2] HONG L X, ZHOU N, FENG W, et al. Building stock dynamics and its impacts on materials and energy demand in China[J]. *Energy Policy*, 2016, 94: 47
- [3] HUO T F, CAO R J, DU H Y, et al. Nonlinear influence of urbanization on China's urban residential building carbon emissions: new evidence from panel threshold model[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145058
- [4] HUANG C, HAN J, CHEN W Q. Changing patterns and determinants of infrastructures' material stocks in Chinese cities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123: 47
- [5] 石磊, 楼俞. 城市物质流分析框架及测算方法[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 196
- [6] MÜLLER D B. Stock dynamics for forecasting material flows-case study for housing in the Netherlands[J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(1): 142
- [7] BARLES S. Urban metabolism of Paris and its region[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(6): 898
- [8] 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
- [9] HU M M, VAN DER VOET E, HUPPES G. Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(3): 440
- [10] 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
- [11] HAN J, XIANG W N. Analysis of material stock accumulation in China's infrastructure and its regional disparity[J]. *Sustainability Science*, 2013, 8(4): 553
- [12] WANG T, TIAN X, HASHIMOTO S, et al. Concrete transformation of buildings in China and implications for the steel cycle[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2015, 103: 205
- [13] HUO T, CAO R, DU H, et al. Nonlinear influence of urbanization on China's urban residential building carbon emissions: new evidence from panel threshold model[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021: 772
- [14] REYNA J L, CHESTER M V. The growth of urban building stock: unintended lock-in and embedded environmental effects[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(4): 524
- [15] 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
- [16] TANIKAWA H, MANAGI S, LWIN C M. Estimates of lost material stock of buildings and roads due to the great east Japan earthquake and tsunami[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(3): 421
- [17] TANIKAWA H, HASHIMOTO S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS[J]. *Building Research & Information*, 2009, 37(5/6): 483
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 黄蓓佳, 赵凤, 赵娟, 等. 建筑材料隐含环境影响评估[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(6): 929
- [21] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于LCA的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(6): 149
- [22] 李小月, 张慧, 雷国元, 等. 建筑废物填海处置过程重金属浸出特性及环境影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 389
- [23] 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
- [24] SUZUKI M, OKA T, OKADA K. The estimation of energy consumption and CO₂ emission due to housing construction in Japan[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 22(2): 165
- [25] FISHMAN T, SCHANDL H, TANIKAWA H. The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures[J]. *Ecological Economics*, 2015, 113: 76
- [26] 李志鹏, 陈晨. 基于“时空过程”的特大城市市域半城市化地区识别及其类型特征研究: 以福州市为例(2000—2015)[J]. *城乡规划*, 2020(6): 91
- [27] 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
- [28] 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(9): 3
- [29] 王松庆, 王威, 张旭. 基于生命周期理论的严寒地区居住建筑能耗计算和分析[J]. *建筑科学*, 2008(4): 58
- [30] 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
- [31] 邓郁松, 刘卫民, 邵挺. 中国住房市场趋势与政策研究: 2020—2050[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- [32] MÜLLER E, HILTY L M, WIDMER R, et al. Modeling metal stocks and flows: a review of dynamic material flow analysis methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2102
- [33] 黄卫. 推进建筑业结构调整和升级[J]. *求是*, 2006(6): 33
- [34] 曹杰. 住宅建筑全生命周期的碳足迹研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017
- [35] 徐玉波, 李颖, 樊斌. 我国建筑垃圾资源化利用行业现状、问题和建议[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2019(12): 56
- [36] 左亚. 中国建筑垃圾资源化利用的现状研究及建议[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015
- [37] 德国、日本、新加坡三国建筑垃圾处理经验浅析 [J]. *江西建材*, 2018(9): 7

Multi-scenario forecasting of residential building stock and demolition waste generation in Fuzhou-Xiamen-Quanzhou

LU Haojie^{1,2)} LIU Yupeng¹⁾ SONG Lulu¹⁾ CHEN Weiqiang^{1,2)}

(1)Key laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, 361021, Xiamen, Fujian, China; 2)University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

Abstract Construction and demolition of buildings in cities pose considerable risks in the urban environment. Fuzhou, Xiamen, and Quanzhou were selected to analyze and predict changes in building stocks and waste generation under three alternative scenarios until the end of this century. Living standards of residents in Fuzhou-Xiamen-Quanzhou are likely to reach or exceed the current levels in Europe and US in the future. Historically, pursuing a high standard of living would bring serious problems in resources and environment. Sustainable developments would maintain a quality life for urban residents and benefit environment. Extending the service-life of buildings could significantly reduce generation of construction and demolition waste in Xiamen. Developing a compact city is effective for both Fuzhou and Quanzhou.

Keywords residential building; stock; demolition waste; multi-scenario forecasting

【责任编辑: 武 佳】