

DOI: 10.5846/stxb201809131969

李佳佳, 刘宇鹏, 韩骥, 张超, 陈伟强, 张力小. 以材料“创造”土地? ——中国城市化进程的一个重要特征. 生态学报, 2019, 39(24): 9246-9256.
Li J J, Liu Y P, Han J, Zhang C, Chen W Q, Zhang L X. Creating land by materials? An important feature of China's urbanization. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9246-9256.

以材料“创造”土地? ——中国城市化进程的一个重要特征

李佳佳^{1,2,3}, 刘宇鹏^{1,3}, 韩骥^{4,5}, 张超^{6,7,8}, 陈伟强^{1,2,3,*}, 张力小⁹

- 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 361021
- 2 中国科学院大学, 北京 100049
- 3 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021
- 4 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241
- 5 崇明生态研究院, 上海 200062
- 6 同济大学经济与管理学院, 上海 200092
- 7 联合国环境署-同济大学环境与可持续发展学院, 上海 200092
- 8 同济大学可持续发展与新型城镇化智库, 上海 200092
- 9 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

摘要:中国快速城市化进程的一个重要特征是以土地为载体,通过大量投入钢铁、水泥等建材大规模修建城市建筑和基础设施,创造出大量的城市生产和生活空间。利用 1985—2010 年中国省级行政单元城市建成区总面积、城市居住用地总面积、城市住宅总面积和城市住宅建筑材料总使用量等数据,识别城市扩张模式,揭示中国城市化进程中土地、建筑面积及其构筑物三者间的关系。研究表明 2000 年是中国城市扩张的重要分界点,2000 年之前中国各省份的城市建成区总面积、城市住宅总面积和城市住宅建筑材料总使用量均较小且省份间差异不大,2000 年之后三者迅速增长且省份间差异逐渐扩大。在地区尺度上,三者均呈现东部地区最高、中部次之、西部最低的特点,地区内部差异则表现为东部地区最大、西部次之、中部最小的特征。大多数省份的城市住宅总面积及其构筑物总量随着城市建成区的扩张而增长,表明城市在发展初期以扩大建成区和水平扩张为主。随着城市化水平的不断提高,城市内部空间重组和用地置换导致高层建筑逐步替代了原有的单层或低矮建筑,城市扩张的方向由依赖土地的水平扩张转向以大量使用建筑材料为基础的垂直扩张,使得许多省份的城市住宅总面积逐渐超过辖区内居住用地总面积。这种以建筑材料“创造”出更多“土地”的城市垂直扩张在满足人们对城市生产和生活空间需求的同时,有利于节约土地资源和保护生态空间,但需要以消耗更多的建筑材料并承担建筑材料在开采、制造、运输、使用和废弃过程中所造成的环境影响为代价。

关键词:城市建成区;建筑材料;土地使用强度;材料使用强度;产业生态学;城市生态学

Creating land by materials? An important feature of China's urbanization

LI Jiajia^{1,2,3}, LIU Yupeng^{1,3}, HAN Ji^{4,5}, ZHANG Chao^{6,7,8}, CHEN Weiqiang^{1,2,3,*}, ZHANG Lixiao⁹

- 1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 3 Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China
- 4 Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505703);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC012);国家自然科学基金项目(41801222)

收稿日期:2018-09-13; **网络出版日期:**2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wqchen@iue.ac.cn

5 Institute of Eco-Chongming (IEC), Shanghai 200062, China

6 School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China

7 UN Environment-Tongji Institute of Environment for Sustainable Development, Shanghai 200092, China

8 Tongji University Sustainable Development and New-Type Urbanization Think-Tank, Shanghai 200092, China

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

Abstract: China's unprecedentedly rapid urbanization has relied on large-scale construction activities enabled by huge amount of materials consumption such as steel and cement. In order to identify China's urban expansion patterns by revealing the relationships among urban land, buildings, and materials, this study collected and analyzed data of total urban built-up area, residential land area, dwelling area, and the amount of construction materials of 30 provinces during 1985—2010. The results show that the year 2000 is an important tipping point in China's urban expansion. Before 2000, total urban built-up area, dwelling area, and the amount of construction material stocks in China were all relatively small and the variances among 30 provinces were insignificant. While after 2000, both the amounts of these three parameters and the variances among the provinces increased rapidly. On regional scale, provinces in eastern China ranked the highest in total urban built-up area, dwelling area, and the amount of construction material stocks, followed by those in central and western China. At the same time, variances among provinces in eastern China were the largest in all three parameters, followed by those in western and central China. In most provinces, the total urban dwelling area and the amount of construction materials increased with the expansion of total urban built-up area. These findings indicate that most cities expanded horizontally in the early stage of urbanization. Because of the spatial reorganization and land-use replacement in the progress of urbanization, many single-floor and low-rise buildings were replaced by high-rise buildings in the cities. It indicates that instead of relying on horizontal expansion of the land, the urbanization in China after 2000 depends more on vertical expansion which consumes high-intensity and low-cost construction materials, leading to more dwelling area than total residential land area in many cities. Urbanization that relies on land “created” by construction materials can fulfill cities' demand for space as well as promote urban ecological space protection and sustainable development. However, the environmental impacts caused by the production, transportation, consumption, and disposal of construction materials are also concerning issues being worth of further research.

Key Words: urban built-up area; construction materials; land use intensity; material use intensity; industrial ecology; urban ecology

经过近三十年的快速城市化,中国城镇人口数量不断增多,建成区不断扩张,投入和使用的建筑材料规模空前。改革开放初期,中国城镇人口仅有 1.72 亿,至 2016 年已增长至 7.93 亿,占总人口的半数以上。为满足城市发展的土地空间需求,城市建成区总面积从 1978 年的约 7400 km²激增至 2016 年的约 54000 km²,年均增长约 1200 km²,相当于每年新建半个深圳市。伴随着人口增长和土地扩张,城市建设投入了大量物质材料以修筑构成城市“骨架”的建筑物(如住宅、商业建筑和公共服务建筑等)和基础设施(如道路、管网等)^[1]。

除了从人口迁移、土地利用变化和经济方式转变等维度解读城市化进程及其相关的社会、经济和环境的影响,城市化过程中的物质积累及其代谢规律研究也极为重要(图 1)。国内外学者针对由城市扩张所引发的物质代谢的格局、过程和特征开展了大量研究。这些研究主要聚焦于:第一,采用传统的统计数据^[2]与新兴的地理空间数据^[3-7]定量评估城市物质材料的空间格局;第二,结合物质流分析^[8-12]等方法探究城市物质代谢的动态过程;第三,基于以上研究开展城市物质代谢过程的环境影响分析^[13-17]。这些研究表明城市资源流动不畅、代谢结构不合理引发了中国在快速城市化过程中面临资源结构性短缺与环境持续恶化等“城市病”。

为了探索近三十年来中国城市化在物质代谢方面的特征,本文利用城市建成区总面积、城市居住用地总面积、城市住宅总面积和城市住宅建筑材料总使用量等数据,分析城市的土地扩张、建筑面积增长及材料积累

的历史演进轨迹。其中城市住宅建筑材料总使用量是指城市范围内修建住宅所使用的、仍保留在住宅建筑中的主要建筑材料总量。本文尝试通过将土地视作城市建筑及其构筑材料的载体,理解土地、建筑及其构筑材料间的相互作用关系,在此基础上进一步解析城市三维扩张过程,阐释中国近三十年来城市化发展的物质依赖程度。

1 研究方法与数据来源

本文通过收集长中国时间序列城市扩张相关数据,识别中国城市的扩张模式,解析城市三维扩张过程;并通过测定城市土地与建筑材料使用强度,解译城市土地、建筑及其构筑材料的相互作用关系。

1.1 研究方法

1.1.1 城市扩张模式识别

本文首先通过测度城市建成区内住宅总面积和住宅建筑材料总使用量的历史演进轨迹,将城市扩张分为线性、对数型和指数型增长三种理论模式(图 2)。线性增长表示城市在“水平”方向扩大城市建成区面积的同时也在“垂直”方向上修筑更高的建筑,且两个方向上的增长较为同步;指数型增长表示初期城市在水平方向的增长速度明显快于垂直方向,后期垂直方向的增长速度快于水平方向;对数型增长与指数型增长相反,表示初期城市垂直方向的增长速度明显快于水平方向,后期水平方向的增长速度快于垂直方向(图 2)。各省级行政区城市扩张模式的识别方法为利用 SPSS 24.0 软件进行曲线拟合^[18],选择各省级行政区决定系数(R^2)最高且通过显著性(P 值)检验的曲线类型作为其城市扩张模式。

1.1.2 城市住宅土地与材料使用强度四象限法

在识别城市扩张模式的基础上,通过进一步测度单位居住用地面积上的住宅面积与住宅建筑材料使用量,表征城市的土地使用强度与材料使用强度。之后依据土地使用强度(X 轴)与材料使用强度(Y 轴)建立直角坐标系,根据单位居住用地上修建单层住宅及其所需建筑材料总使用量设定阈值,划分出四个象限(图 3)。其中,土地使用强度和材料使用强度计算公式如下:



图 1 城市化的主要特征

Fig.1 Dimensions of urbanization studies

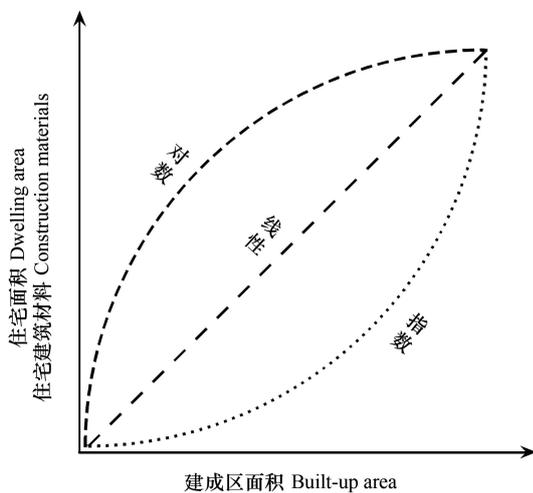


图 2 城市扩张理论模式

Fig.2 Theoretical patterns of urban expansion

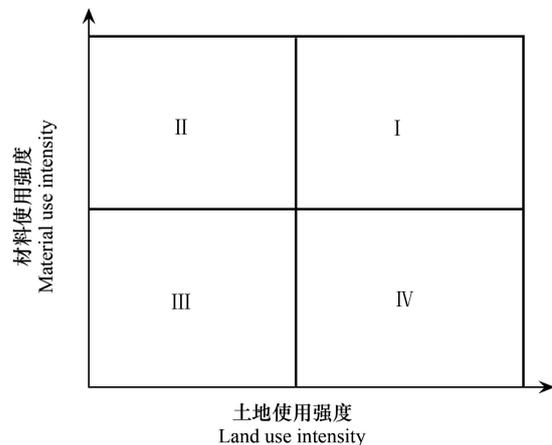


图 3 城市住宅土地和材料使用强度四象限图

Fig.3 Four quadrant map of land use and material use intensities of urban dwellings

$$UD = \frac{D}{L} \quad (1)$$

$$UM = \frac{M}{L} \quad (2)$$

式中, UD 和 UM 分别代表土地使用强度和材料使用强度, D 为城市住宅总面积, M 为城市住宅建筑材料总使用量, L 为城市居住用地总面积。当土地使用强度 UD 超过 1 时(即第一和四象限),表明城市住宅总面积已超过城市内居住用地总面积,在城市居住用地无法扩大的前提下,城市转向垂直方向扩张;同理,据韩骥等人研究测算修建每平方公里住宅面积所需建材总重量约为 $1.3 \text{ Mt}^{[19-21]}$,高于该阈值(即第一和二象限)表明城市通过消耗更多的建筑材料来修建高层住宅以弥补居住用地的不足,即以材料“换取”甚至“创造”土地。

1.2 数据来源

本文选取 1985 至 2010 年中国各省级行政区(包括省、自治区和直辖市,不包含港澳台地区)历年的城市建成区总面积、城市居住用地总面积、城市住宅总面积及城市建筑材料总使用量共四个指标测度土地使用强度与材料使用强度,并识别中国城市扩张模式。其中城市建成区总面积数据来自《中国统计年鉴(1986—2011 年)》和《中国城市统计年鉴(1986—2011 年)》;城市居住用地总面积数据来自《中国城市建设统计年鉴(1985—2010 年)》;城市住宅总面积依据《中国统计年鉴(1986—2011 年)》与各省历年统计年鉴中人均住宅面积乘以《中国人口和就业统计年鉴(1986—2011 年)》中当年的城市人口数量得到;城市住宅构筑建筑材料总使用量数据源自韩骥等人的研究^[2,19],指住宅兴建过程中所消耗的主要建筑材料,包含钢铁、木材、砖瓦、砂砾、水泥、玻璃和石灰共七种。

1.3 研究尺度

本文选择中国、东中西地区以及各省级行政区三个典型尺度开展分析,探究城市扩张模式的空间分异规律,其中东中西地区依据全国人大六届四次会议通过的“七五”计划中相关标准予以划分(表 1)。

表 1 中国东中西地区划分

Table 1 The partition of three regions in China

地区 Regions	省级行政区 Provinces
东部 Eastern	北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南
中部 Central	黑龙江、吉林、山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南
西部 Western	内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆

2 研究结果

2.1 中国城市扩张的演变规律与模式识别

2.1.1 国家尺度

总体上 1985—2010 年中国城市建成区总面积不断扩大,同时城市住宅总面积和住宅建筑材料总使用量快速增长(图 4)。全国城市建成区总面积从 1985 年的约 9800 km^2 增加到 2010 年的约 41000 km^2 ,年均增长率约 6%;住宅总面积和住宅建筑材料总使用量也分别从 1985 年的约 2100 km^2 、 2200 Mt 增加到 2010 年的约 19700 km^2 、 14700 Mt ,年均增长率约 9% 和 8%。

中国城市扩张过程具有明显的阶段性特征,且 2000 年是重要的分界点。从总量上,2000 年之前所有省份的城市住宅总面积和住宅建筑材料总使用量相对较小且差异不大;2000 年之后,城市住宅总面积和住宅建筑材料总使用量明显增加且差异增大(图 4)。从增速上,2000 年之前城市建成区面积每增加 1 km^2 ,住宅面积新增约 $0.11—0.17 \text{ km}^2$,住宅建筑材料新增使用量 $0.17—0.27 \text{ Mt}$;2000 年之后建成区面积每增加 1 km^2 ,新增住宅面积大于 0.17 km^2 ,投入建筑材料多于 0.27 Mt (图 4)。同时,单位面积建成区增长所对应的住宅新建面积和建筑材料消耗增长量在 1985—1989 年期间分别是 0.11 km^2 、 0.17 Mt ,2005—2010 年时分别增长至

0.44 km²、0.28 Mt, 约是 1985—1989 年的 4 倍和 2 倍。

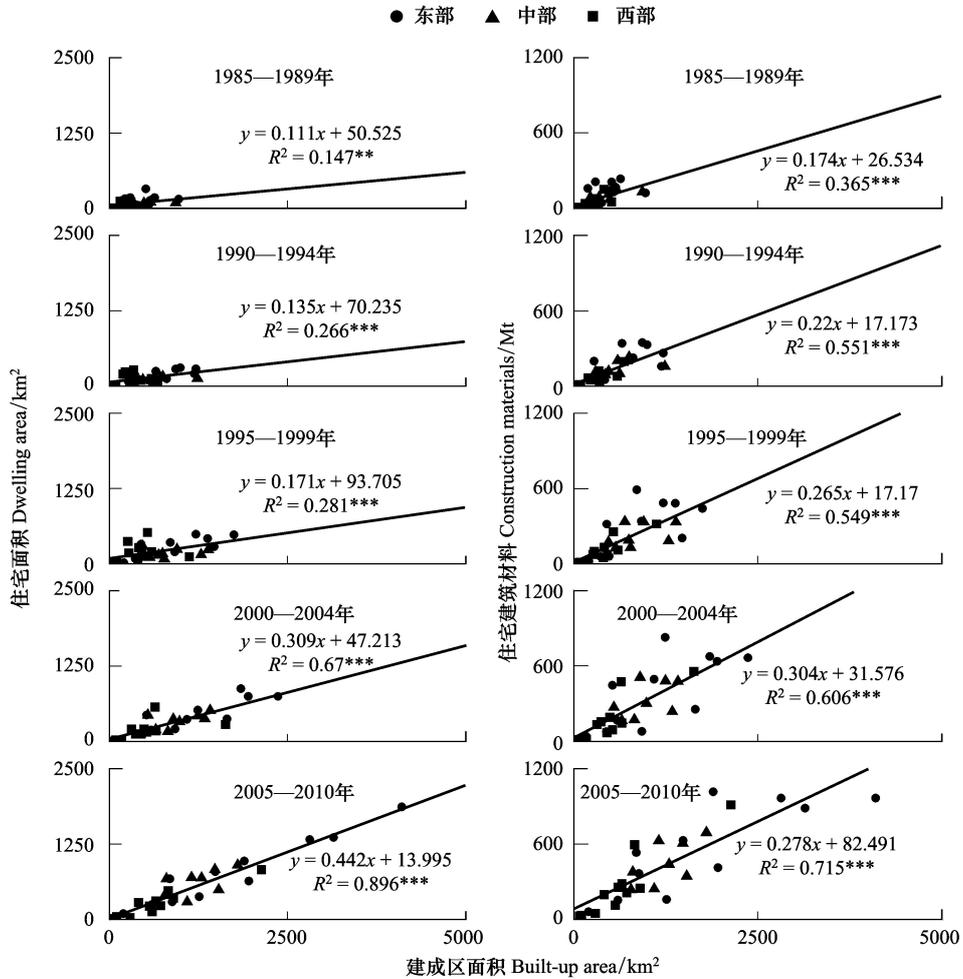


图 4 1985—2010 年中国 30 个省级行政区城市建成区总面积、住宅总面积和住宅建筑材料总用量(5 年平均)关系图

Fig.4 The relationships among total urban built-up area, dwelling area, and construction materials (five years mean) in 30 provinces of China during 1985—2010

2.1.2 地区尺度

在地区尺度上的分析表明中国东、中、西部城市的建成区总面积、住宅总面积、住宅建筑材料总用量均呈现出东部>中部>西部的特点(图 5)。在地区内部差异上,东部地区各省份间差异最大、西部地区次之、中部地区最小。以 2010 年为例,东部地区城市建成区总面积的标准差约为 1300 km²,西部地区和中部地区标准差分别约为 600 km²和 370 km²,东部地区标准差分别是西部地区的 2 倍、中部地区的 4 倍。

2.1.3 省级尺度

在省级尺度上分析表明全国城市扩张可总结为三种主要模式。其中,广东、浙江和河南等 17 个省级行政区在城市发展初期建成区面积的增长速度快于住宅面积的增长速度,后期住宅面积增长迅速并逐渐超过建成区面积的增长速度(图 6);而内蒙古、陕西、新疆和宁夏 4 个省级行政区在城市发展初期住宅面积的增长速度快于建成区面积的增长速度,后期反之;江苏、山东和福建等 9 个省级行政区的城市建成区面积与住宅面积的增长较为协调。

城市住宅建筑材料的增长模式与城市住宅面积的增长模式较为类似。江苏、广东和浙江等 16 个省级行政区的城市建成区面积与住宅建筑材料的增长较为协调(图 7);四川(含重庆)、湖北和安徽等 12 个省级行政区在城市发展初期表现为建成区面积的增长速度快于住宅建筑材料的累积速度,后期住宅建筑材料的累积速

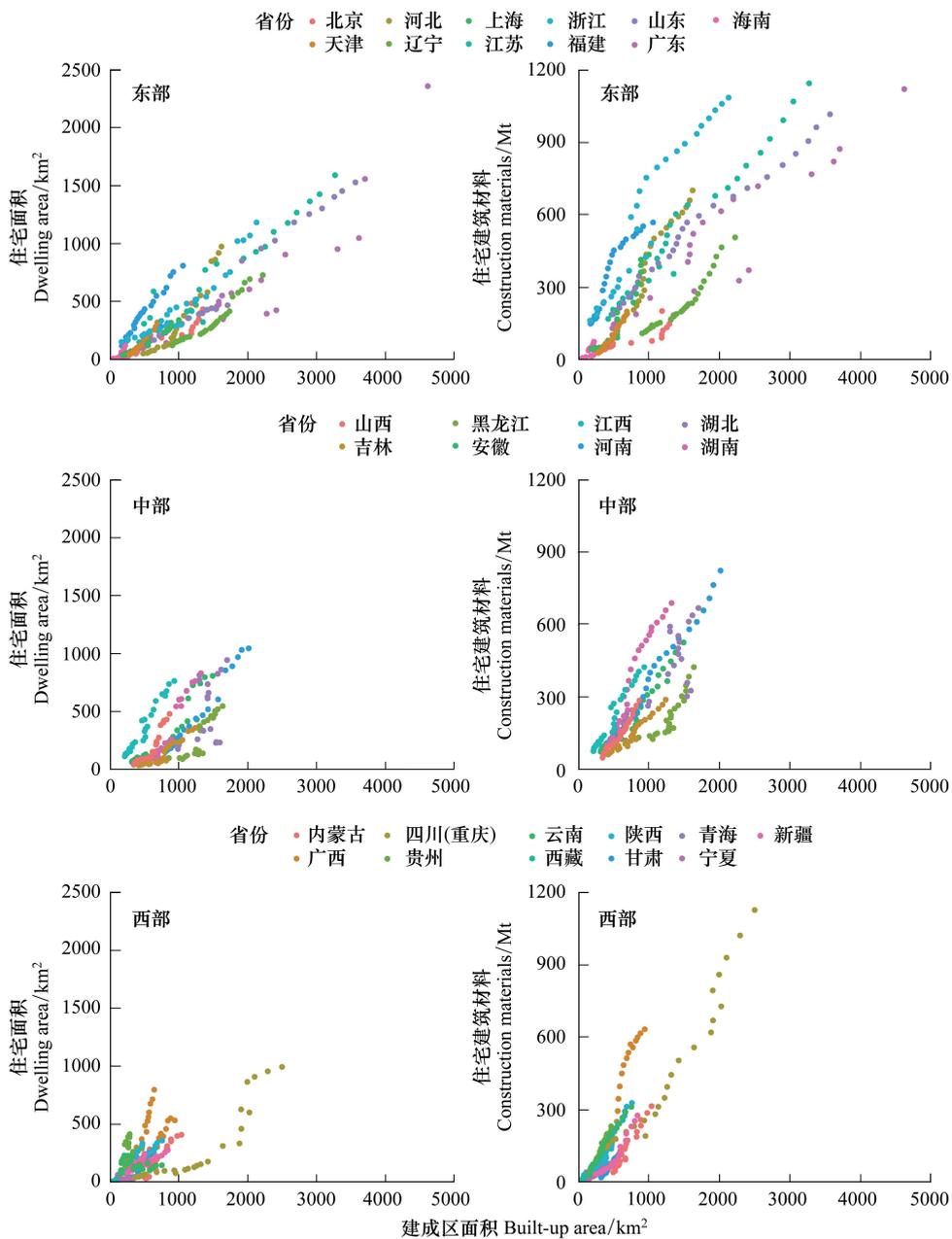


图5 1985—2010年中国东、中、西部地区城市建成区总面积、住宅总面积和住宅建筑材料总使用量关系图

Fig.5 The relationships among total urban built-up area, dwelling area, and construction materials in eastern, central, and western China during 1985—2010

度快于建成区面积的增长速度;仅有湖南和福建2个省级行政区在城市发展初期住宅建筑材料的累积速度快于建成区面积的增长速度,后期逐渐演变为建成区面积增长迅速并超过住宅建筑材料的累积速度。

综上,在中国30个省级行政区中,约三分之一表现出城市发展初期建成区面积增长速度快于住宅面积和住宅建筑材料的增长速度,表明城市扩张以水平方向为主;后期逐渐转变为住宅面积和住宅建筑材料的增长速度快于城市建成区面积的增长速度,城市扩张转向垂直方向。这些省份包括了四川(含重庆)、湖北、安徽、辽宁、黑龙江、山西、海南、青海和西藏,多分布于中国中西部地区。另外,约五分之一的省级行政区城市建成区面积增长与住宅面积、住宅建筑材料增长较为同步,具体包括了江苏、山东、江西、天津、甘肃和云南,多位于东部地区。无省份表现出从垂直扩张转向水平扩张的特征。

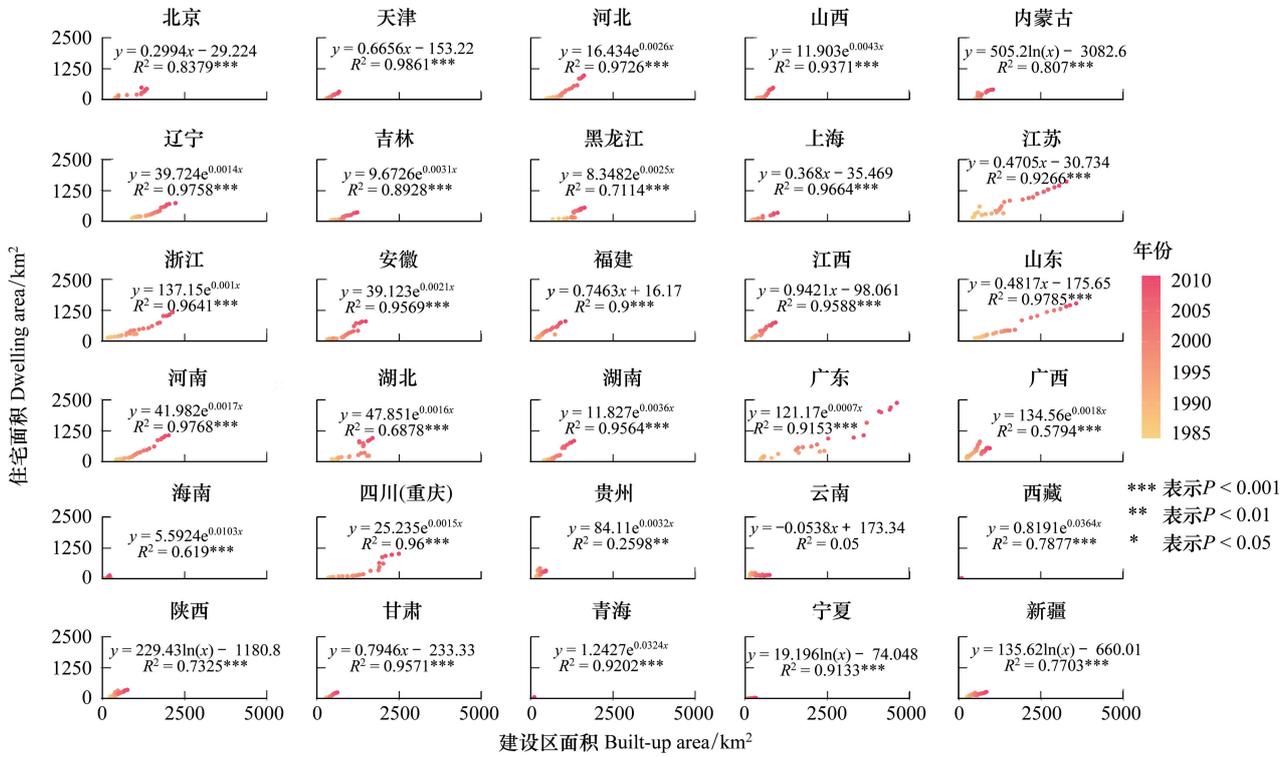


图 6 1985—2010 年中国 30 个省级行政区城市住宅面积动态变化

Fig.6 The dynamics of total urban dwelling area in 30 provinces of China during 1985—2010

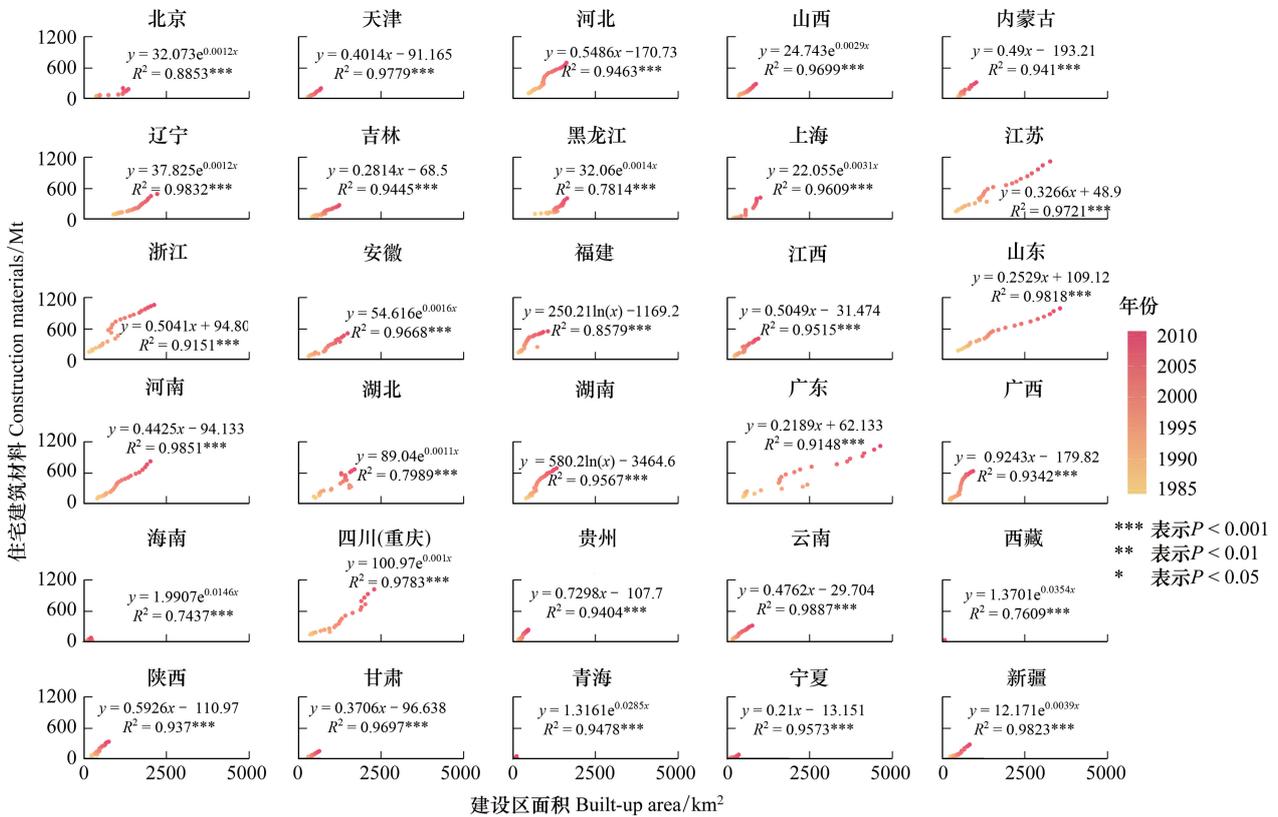


图 7 1985—2010 年中国 30 个省级行政区城市住宅建筑材料动态变化

Fig.7 The dynamics of construction materials in urban dwellings in 30 provinces of China during 1985—2010

2.2 中国城市住宅土地使用强度与材料使用强度分析

城市住宅土地和材料使用强度变化表明,城市扩张主要方向转变分为四个阶段:(1)1985—1989年22个省级行政区的城市住宅总面积小于居住用地总面积,城市住宅建筑材料总使用量低于在所有城市居住用地上修建单层住宅所需的建筑材料;(2)1990—1999年北京、内蒙古、广东和新疆的城市住宅总面积超过了其居住用地总面积,但建筑材料总使用量仍低于在所有居住用地上修建单层住宅所需的建筑材料;(3)2000—2004年江西和贵州的城市住宅建筑材料总使用量超过了单层住宅所需建筑材料;(4)2005—2010年全国已有23个省份的城市住宅总面积超过居住用地总面积,仅宁夏、云南、新疆、西藏、黑龙江和吉林6个省份的城市住宅总面积和住宅建筑材料总使用量仍低于居住用地总面积以及在其上修建单层住宅所需的建筑材料总量(图8)。

3 讨论

3.1 城市扩张转向及其驱动因素

本研究表明随着中国城市化的发展,城市扩张主要方向由水平转向垂直。在以水平扩张为主的第一阶段(1985—2000年),城市住宅面积主要随城市土地的扩张而增长,以修建中低层住宅为主^[22]。在以垂直扩张为主的第二阶段(2000—2010年),城市住宅面积增速远高于城市土地扩张速度。这一阶段主要特征为城市在新建中高层住宅的同时对旧有住宅进行更新^[23-24],即拆除原有的低容积率住宅而转向修建高容积率住宅。

上述城市扩张转向受到了政策、经济和技术等多重因素的影响^[25]。政策上,城市土地和住房制度的改革推动了房地产业迅速发展,使得住宅大规模扩张并蔓延至城市外围区域,导致城市在水平方向上扩张;之后耕地保护、生态红线和限制城市无序扩张等系列相关政策的出台,倒逼了城市内部空间重组和用地置换。从经济学角度来看,随着用地成本的增加(如较高的交易价格等),修建高容积率住宅的土地效益超过“水平蔓延式”开发的土地效益和再开发成本时,城市倾向于转向垂直扩张。同时随着建筑技术的进步,修建高层和超高层住宅在技术上日益可行且成本不断下降。

3.2 城市扩张转向的物质材料依赖性及其环境影响和政策启示

城市扩张的垂直转向是以大规模消耗建筑材料为支撑的。城市为满足居民不断提高的生产生活需求而修建规模日益庞大的建筑和基础设施,由于受到土地资源的限制而转向“垂直”生长,客观上加剧了对高强度建筑材料的依赖。这种物质依赖对城市环境具有两面性:

一方面,由高强度建筑材料支撑的城市扩张转向有利于节约土地资源和保护生态空间。由于过去几十年中国城市的水平扩张基本以占用周边耕地为主,转向“垂直”生长在客观上避免了人造建筑过分挤占城市周边的农田及绿地、水体等自然生态用地。在横向对比上,中国香港和新加坡的高密度住宅建设均使其在有限的土地面积上保留了较多的生态空间^[26-27]。在微观的居住小区尺度上,能容纳相同人口数量的高层住宅往往较中低层住宅节约了较多土地以提供绿地等公共设施^[28-29]。此外,城市扩张转向符合中国新型城镇化的发展要求。2013年12月中央城镇化工作会议上提出了将“提高城镇建设用地利用效率”作为新型城镇化推进的主要内容。2014年出台的《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》进一步指出了需“优化土地利用结构,提高土地利用效率,合理满足城镇化用地需求”^[30]。本研究表明城市扩张主要方向由水平转向垂直,通过提高单位土地上住宅总量的方式提升了土地利用效率,推动了城市空间由外延式扩张转向内涵式发展,避免了粗放低效的土地利用方式与城市空间的无序蔓延。

另一方面,城市扩张转向过程中不断增强的物质依赖会消耗大量资源并加重环境负担。建筑材料作为一种高能耗、高污染产品^[31],其开采、制造、运输、使用和废弃过程中所导致的环境影响不容忽视。建筑原材料在开采过程中造成的重金属污染易危害人体健康;在制造阶段需要消耗煤炭、石油、电力和天然气等能源,并排放大量的二氧化碳加剧全球变暖^[32];与此同时,城市建筑在更新和废弃的过程中会产生大量的建筑垃圾。合理化利用和回收建筑材料以减少其资源消耗和环境影响是城市环境保护的重要议题。总之,未来政府需通

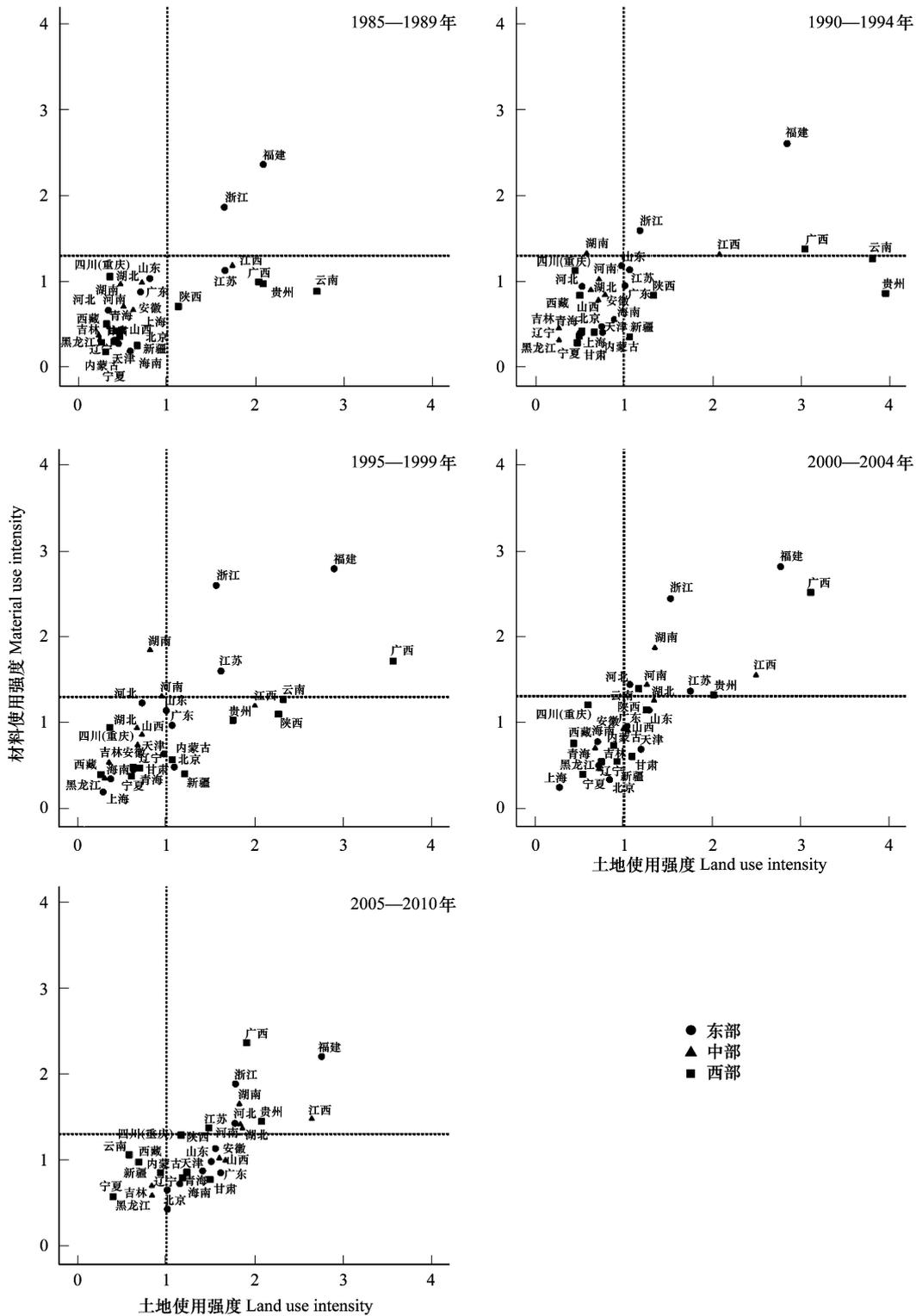


图 8 1985—2010 年中国 30 个省级行政区城市住宅土地和材料使用强度(5 年平均)分布

Fig.8 Land use and material use intensities (five years mean) of urban dwellings in 30 provinces of China during 1985—2010

2005—2010 年上海市居住用地数据缺失

过设置合理的城市建筑密度和高度以避免过度生产、使用和回收建筑材料而额外加重环境负担,引导中国城市化的可持续发展。

4 结论

城市扩张在土地维度上表现为建成区面积的扩大,在经济维度上表现为生产总值的增长,在居住空间维度上则表现为住宅面积的增长,这些均依赖于大量建筑材料的投入和使用。城市不仅是人口聚集的空间,也是大量物质材料以建筑和基础设施形态构建的空间。未来城市研究除了从土地、人口和经济的维度,还应当从物质材料特别是建筑材料的维度去理解城市的运营和更新。本文通过识别多尺度下的城市扩张模式,明晰了中国城市扩张方向及其转变过程,解析了中国城市化进程中土地、建筑及其构筑物质间的耦合关系。主要研究结论如下:

(1) 在 1985—2010 年期间,城市扩张主要方向由水平转向垂直,城市扩张转向受到政策、经济和技术等多重因素的影响。这种城市扩张转向在保障城市空间发展需求的同时也避免了人造建筑过分挤占城市周边的农田及绿地、水体等自然生态用地,一定程度上有利于节约土地资源与保护生态空间。

(2) 中国城市扩张转向在时间上以 2000 年为节点,在空间上表现出东部省份土地、住宅面积及其构筑材料的总量与内部差异大、中部省份总量居中且内部差异小、西部省份总量小但内部差异居中的特征,与以人口、经济等因素所评价的中国城市化水平的空间格局相一致。

(3) 城市扩张转向以大量建筑材料的投入与使用为基础来满足城市空间的发展需求。随着城市化速度的加快和城市化水平的提高,城市空间发展的物质依赖特征愈发明显。未来在关注中国城市化进程中的土地利用、环境保护、经济发展和居民健康等问题的同时,更需加强关于城市物质代谢的研究,使其成为解析城市发展过程及其驱动机制的关键和重点。

致谢:感谢同济大学诸大建教授对本研究提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Chen W Q, Graedel T E. In-use product stocks link manufactured capital to natural capital. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6265-6270.
- [2] Han J, Xiang W N. Analysis of material stock accumulation in China's infrastructure and its regional disparity. *Sustainability Science*, 2013, 8(4): 553-564.
- [3] Kleemann F, Lederer J, Rechberger H, Fellner J. GIS-based analysis of Vienna's material stock in buildings. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(2): 368-380.
- [4] 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.
- [5] Tanikawa H, Hashimoto S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information*, 2009, 37(5/6): 483-502.
- [6] Cheng K L, Hsu S C, Li W M, Ma H W. Quantifying potential anthropogenic resources of buildings through hot spot analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 10-20.
- [7] 王雪, 施晓清. 基于 GIS 的产业生态学研究述评. *生态学报*, 2017, 37(4): 1346-1357.
- [8] Kohler N, Yang W. Long-term management of building stocks. *Building Research & Information*, 2007, 35(4): 351-362.
- [9] 杨崑. 可持续性建筑存量演进模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [10] 杨崑. 建筑存量模型建构——未来 50 年中国城乡建筑发展策略. 南京: 东南大学出版社, 2010: 79-81.
- [11] Cao Z, Shen L, Zhong S, Liu L T, Kong H X, Sun Y Z. A probabilistic dynamic material flow analysis model for Chinese urban housing stock. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(2): 377-391.
- [12] Hu M M, Bergsdal H, van der Voet E, Huppes G, Müller D B. Dynamics of urban and rural housing stocks in China. *Building Research & Information*, 2010, 38(3): 301-317.
- [13] Breunig H M, Huntington T, Jin L, Robinson A, Scown C D. Dynamic geospatial modeling of the building stock to project urban energy demand. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(14): 7604-7613.
- [14] Reyna J L, Chester M V. The growth of urban building stock: unintended lock-in and embedded environmental effects. *Journal of Industrial*

- Ecology, 2015, 19(4): 524-537.
- [15] 董磊. 基于资源节约的城市住宅建筑存量更新策略——以天津市鞍山道、鞍山西道地块为例[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] 韩骥, 周燕. 物质代谢及其资源环境效应研究进展. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1049-1060.
- [17] 沈丽娜, 马俊杰. 国内外城市物质代谢研究进展. 资源科学, 2015, 37(10): 1941-1952.
- [18] 丁成日. 城市空间规划理论与方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 161-162.
- [19] Han J, Chen W Q, Zhang L X, Liu G. Uncovering the spatiotemporal dynamics of urban infrastructure development: A high spatial resolution material stock and flow analysis. Environmental Science & Technology, 2018, 52(21): 12122-12132.
- [20] Hu D, You F, Zhao Y H, Yuan Y, Liu T X, Cao A X, Wang Z, 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.
- [21] Hu M M, van der Voet E, Hupperts G. Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing. Journal of Industrial Ecology, 2010, 14(3): 440-456.
- [22] 刘佳. 中国城市住宅高度的合理选择研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [23] 伍俊辉. 1949年以来兰州市居住区变迁与发展趋势研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [24] 杨晓娟. 1949-2005年中国大城市空间扩张与用地结构转化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [25] 刘红萍, 杨钢桥. 城市住宅用地空间扩张机制与调控对策. 经济地理, 2005, 25(1): 109-112, 116-116.
- [26] 韩业. 城市土地问题研究与低密度住宅分析[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [27] 施梁. 城市居住用地发展研究[D]. 南京: 东南大学, 2000.
- [28] 邹卓君. 大城市居住空间扩展研究. 规划师, 2003, 19(11): 108-110.
- [29] 邹卓君. 大城市居住空间扩展研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [30] 新华社. 国家新型城镇化规划(2014—2020年). (2014-03-16) [2019-03-10]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm.
- [31] 黄蓓佳, 赵凤, 赵娟, 印月, 许照莹, 谷超群, 陈娴. 建筑材料隐含环境影响评估. 环境科学研究, 2017, 30(6): 929-936.
- [32] Huang B J, Zhao F, Fishman T, Chen W Q, Heeren N, Hertwich E G. Building material use and associated environmental impacts in China 2000—2015. Environmental Science & Technology, 2018, 52(23): 14006-14014.