

# 地震和灾后重建过程城市物质流分析 ——以四川省广元市为例<sup>\*</sup>

郭欣<sup>1)</sup> 程一涵<sup>1,2)</sup> 张力小<sup>1)</sup> 郝岩<sup>1)†</sup>

(1)北京师范大学环境学院, 100875, 北京; (2)沈阳东大矿冶工程技术有限公司, 110015, 辽宁沈阳)

**摘要** 利用自下而上的物质流分析方法,从建筑、基础设施、交通工具、耐用品、设备5个部门核算广元市2005—2015年钢铁、水泥的存量及流量,评估城市的建设和发展状态。结果显示:2008年广元市钢铁、水泥的存量由于地震因素明显下降,灾后重建主体阶段(2008—2011年)快速上升,2015年人均存量分别达到 $3.2 \times 10^3$ 、 $7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ;2008年后物质使用效率逐渐下降,约为全国平均水平的50%。基于物质存量的核算结果,采用指数分解法分析驱动因素。结果表明经济增长因素是广元市物质存量增长的主要驱动因素,材料的使用效率则对存量的增加产生抑制作用。研究结果可为城市的灾后重建或城镇化发展提供科学依据及政策建议。

**关键词** 物质流分析;存量;流量;钢铁;水泥;地震

**中图分类号** X321

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2020415

## 0 引言

地震具有频发性和强破坏性。2000—2018年我国共发生5级以上地震190次,共造成488 522人死亡,直接经济损失 $1.14 \times 10^8$ 万元<sup>[1]</sup>。为了快速地重建城市,灾后需要大量资金和资源。以汶川地震为例,截至2012年,四川省142个受灾县共花费1.7万亿元完成重建<sup>[2]</sup>。相比于我国长时间的城市化进程(1949—2021年),城市在重建过程中短时间内快速城市化。城市地震前及灾后的数据完备,可再现城市化过程中的物质代谢,有望突破我国长时间尺度下经济环境数据缺失的瓶颈。国内外地震和灾后重建的研究多与城镇化及可持续发展相联系<sup>[3-4]</sup>,但缺少物质代谢的系统性研究。核算和评估社会经济系统中的物质存量及流量是产品和自然资源可持续管理的重要前提<sup>[5]</sup>。工业化和城市化发展对钢铁和水泥的需求巨大<sup>[6-7]</sup>。在重建过程中,钢铁和水泥作为建筑和基础设施建设所需的基本材料<sup>[8-9]</sup>,缺口较大。四川省预估灾后重建初期需要钢材 $3.7 \times 10^{10} \text{ kg}$ 、水泥 $3.7 \times 10^{11} \text{ kg}$ <sup>[10]</sup>。因此需核算地震和灾后重建过程中城市的物质存量和流量并进一步分析物质使用效率。

物质流分析(MFA)是对指定系统中的物质在特定时间和空间内的流动和储存进行的系统性分析<sup>[11]</sup>,通过定量分析确定物质投入和产出之间的数量关系,

进而评估经济与生态环境的关系。物质流分析已在全球、国家、区域、流域、城市、工业园区等不同尺度上进行了研究<sup>[12-15]</sup>。本文所采取的元素流分析(SFA)侧重于系统性分析特定物质(铁、锌等)在特定系统内的流动和蓄积状况<sup>[16-18]</sup>。美国耶鲁大学工业生态学中心基于欧洲铜循环的研究,提出了STAF(stocks and flows)框架<sup>[19]</sup>。Drakonakis等<sup>[14]</sup>从建筑、机电、运输等方面对比分析了纽约和纽黑文的钢材存量。楼俞等<sup>[20]</sup>率先根据STAF构建了中国城市物质存量核算框架,分析了2005年邯郸市钢铁和铝的存量和分布情况。在城市尺度上,物质存量多采用自下而上的方法进行核算<sup>[15, 20]</sup>。Song等<sup>[21]</sup>、李宜博<sup>[22]</sup>、张炫钊<sup>[23]</sup>分别采用自下而上的方法,分析厦门市、北京市及海岛的不同部门的物质存量。由于城市缺乏社会经济系统的输入量和输出量数据,相比于自上而下的方法,自下而上的方法提供了更详细的物质产品信息,为城市物质存量核算提供了解决思路<sup>[24]</sup>。

本文选取广元市为研究对象,采用自下而上的方法,核算2005—2015年地震及灾后重建过程中钢铁、水泥的存量和流量。通过广泛的文献检索、收集,评估5个部门的产品数据和物质使用强度,尽可能提高结果的分辨率和实用性。基于核算结果,分析城市的运行效率,量化并识别广元市物质存量变化的驱动因

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51678056)

<sup>†</sup> 通信作者:郝岩(1978—),男,博士,副教授。研究方向:气候变化与能源转型、城市代谢和环境遥感。E-mail: haoyan@bnu.edu.cn  
收稿日期:2020-12-23

素,为城市的灾后重建或城镇化发展提供科学依据及政策建议。

## 1 研究方法和数据来源

**1.1 研究区域** 广元市位于四川省北部,辖区面积 16 319 km<sup>2</sup>[25]。2005—2015 年年末总人口由 303.4 万人增至 305.3 万人, GDP 由 147.8 亿元增至 605.4 亿元,城镇化率由 27.4% 增至 46.3%。

2008 年 5 月 12 日四川省以阿坝州汶川县为震中发生了里氏 8.0 级特大地震,广元市地处高地震烈度区东北端,属严重受灾区。截至 5 月 26 日 13:30,广元市经济损失不完全统计为 1 218.18 亿元(含“5·25”青川 6.4 级余震新增损失),建筑出现不同程度的损毁,公路、桥梁、电力等基础设施严重损坏[26]。灾后广元市以《汶川地震灾后恢复重建总体规划》为指导,以科学重建和低碳发展的理念率先开展了重建工作,着力发展能源、金属、建材等产业。2011 年底,重建工作基本完成,重建项目高达 6 305 个,重建投资已超过 1 000 亿元[27]。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 物质存量核算** 采取自下而上的方法,以广元市行政区为空间边界,核算 2005—2015 年广元市建筑、基础设施、交通工具、耐用品、设备 5 个子系统中的钢铁和水泥的存量。

物质存量核算框架如图 1 所示。住宅建筑、耐用品需分别从城市、农村区域统计,公用耐用品的物质存量核算为家用耐用品物质存量的 2 倍[20, 24]。设备子系统钢铁核算包括特种设备和系统特征设备,由于数据来源的限制,只核算特种设备的钢铁存量。物质存量的核算式为

$$S = \sum_{i=1}^n M_i \times I_i, \quad (1)$$

式中  $S$  代表物质的总存量,  $M_i$  代表第  $i$  种结构单元(产品)的规模,  $I_i$  代表第  $i$  种结构单元(产品)的钢铁或水泥使用强度。

**1.2.2 物质流量核算** 因为开采和生产环节中物质的质量可视为不变,所以利用产品产量和存量的变化量核算流量:

$$F = \Delta S - P, \quad (2)$$

式中  $F$  代表流量,  $P$  代表产品产量,  $\Delta S$  代表存量的变化量。

当  $F < 0$  时,视为调出量,产品满足了城市的需求;当  $F > 0$  时,则相反。

**1.2.3 指数分解分析** 为进一步探讨广元市物质存量变化的原因,先核算出由于地震和重建因素导致的存量变化量,而后利用 LMDI 方法对无地震情景下的存量变化量进行分析,分析式为

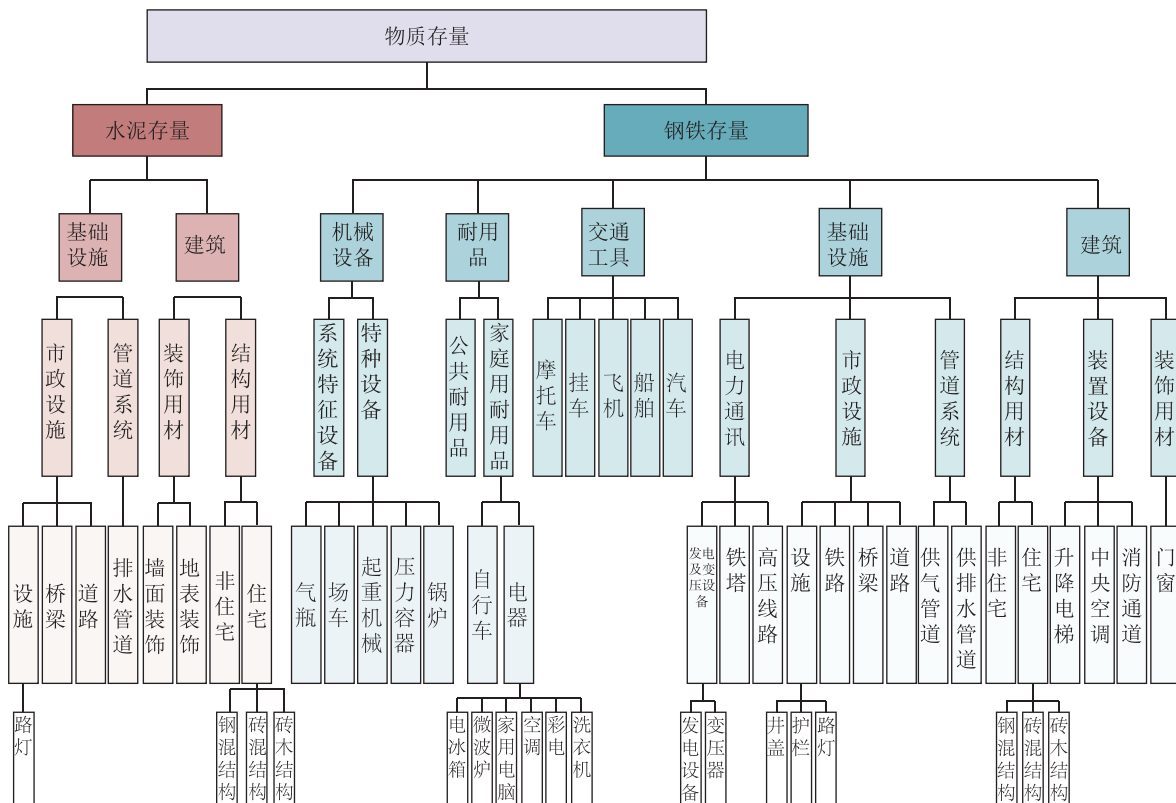


图 1 城市物质存量核算框架

$$M_s = PAT, \quad (3)$$

式中:  $M_s$ 代表存量总量;  $P$ 代表人口, 即人口因素;  $A$ 为 GDP 与  $P$ 的比值, 即经济增长因素;  $T$ 为  $M_s$ 与 GDP 的比值, 代表每万元产值使用的存量强度, 即材料使用效率因素.

$$\Delta M_s = M_{s_t} - M_{s_0} = \Delta M_{s_p} + \Delta M_{s_A} + \Delta M_{s_T},$$

$$\Delta M_{s_p} = L(M_{s_t}, M_{s_0}) \times \ln \frac{P_t}{P_0} = \frac{M_{s_t} - M_{s_0}}{\ln M_{s_t} - \ln M_{s_0}} \times \ln \frac{P_t}{P_0},$$

$$\Delta M_{s_A} = L(M_{s_t}, M_{s_0}) \times \ln \frac{A_t}{A_0} = \frac{M_{s_t} - M_{s_0}}{\ln M_{s_t} - \ln M_{s_0}} \times \ln \frac{A_t}{A_0},$$

$$\Delta M_{s_T} = L(M_{s_t}, M_{s_0}) \times \ln \frac{T_t}{T_0} = \frac{M_{s_t} - M_{s_0}}{\ln M_{s_t} - \ln M_{s_0}} \times \ln \frac{T_t}{T_0},$$

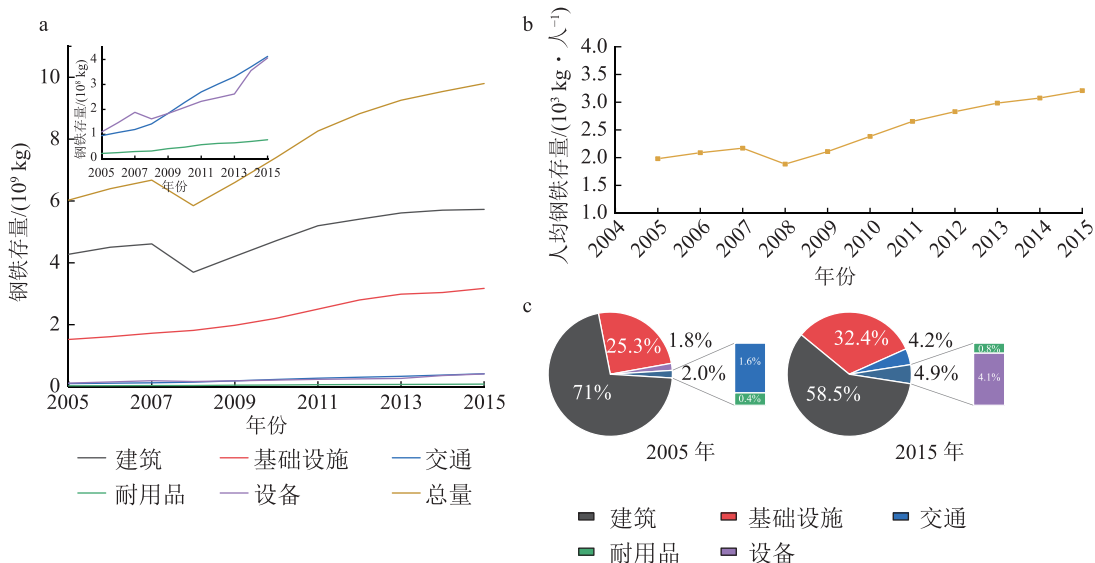
$\Delta M_{s_p}$ 、 $\Delta M_{s_A}$ 、 $\Delta M_{s_T}$ 的值即为目标变量在每种因素影响下的变化量.

**1.3 数据来源** 所采用的人口、GDP、产品数据来源于《四川统计年鉴》(2006—2016年)<sup>[28]</sup>、《广元统计年鉴》(2006—2016年)<sup>[29]</sup>、《广元市国民经济和社会发展规划第十二个五年规划纲要》《汶川地震灾后恢复重建总体规划》等(见表1). 其中GDP为当年价, 研究基于2005年进行平减; 人口数据为公安户籍部门统计的年末户籍总人口. 物质使用强度参考楼俞等的研究成果<sup>[20, 24]</sup>, 其中飞机的钢铁使用强度通过广元机场、空中客车公司等的相关数据进行确定<sup>[30]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 物质存量分析

#### 2.1.1 钢铁物质存量分析 2005—2015年广元市钢



铁总存量由  $6.03 \times 10^9$  kg 增至  $9.80 \times 10^9$  kg, 人均存量由  $2.0 \times 10^3$  kg · 人<sup>-1</sup> 增至  $3.2 \times 10^3$  kg · 人<sup>-1</sup> (图 2-a、b), 但未达到我国 2015 年人均在用钢铁存量 ( $4.73 \times 10^3$  kg · 人<sup>-1</sup>)<sup>[34]</sup>, 更未达到工业化的饱和状态 ( $1.0 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$  kg · 人<sup>-1</sup>)<sup>[12]</sup>. 2008 年, 城市物质存量明显下降, 后期处于持续增长状态. 2008—2011 年上升较快, 平均每年增长  $8.05 \times 10^8$  kg; 2011—2014 年上升较慢, 平均每年增长  $4.26 \times 10^8$  kg; 2015 年增幅接近地震前水平. 物质存量的变化再现了重建过程的主体阶段 (2008—2011 年) 及收尾阶段 (2012—2014 年), 体现了建筑建设项目及道路桥梁建设项目的影

响. 建筑子系统存量占比最大, 2005—2015 年建筑子系统存量由  $4.28 \times 10^9$  增长至  $5.73 \times 10^9$  kg, 存量占比由 70.9% 缩小至 58.5% (图 2-c). 地震前城市发展基本成熟, 建筑系统钢铁存量增长较缓, 2006—2007 年建筑子系统存量仅仅增加  $1.07 \times 10^8$  kg, 2008 年城乡建筑大量损毁, 钢铁存量下降. 重建过程中在重建初期, 政府将修复和重建城乡居民损毁住房作为首要任务, 存量快速增长, 2008—2011 年存量增至  $5.20 \times 10^9$  kg, 2010

图 2 2005—2015 年广元市钢铁存量变化

年城乡居民损毁住房的重建基本完成, 存量恢复至灾前水平, 这为城市的后续发展奠定了基础。

研究期内基础设施子系统钢铁存量占比明显增长, 由 25.26% 增至 32.38%, 2009—2012 年明显上升, 年平均增长 11.4%。2008 年前, 管道、市政设施和电力系统的存量变化相对平稳, 年平均增长量分别为

$2.40 \times 10^6$ 、 $5.20 \times 10^6$ 、 $9.27 \times 10^7$  kg; 2008 年后, 大量基础设施重建项目使钢铁存量快速增长。2008—2012 年管道和电力系统的钢铁存量年平均增速分别提升至 26.4%、11.6%, 相比之下, 市政设施增速仅为 4.2%。2015 年居民对于市政设施的需求加大, 市政设施增速高达 21.5% (图 3-a)。

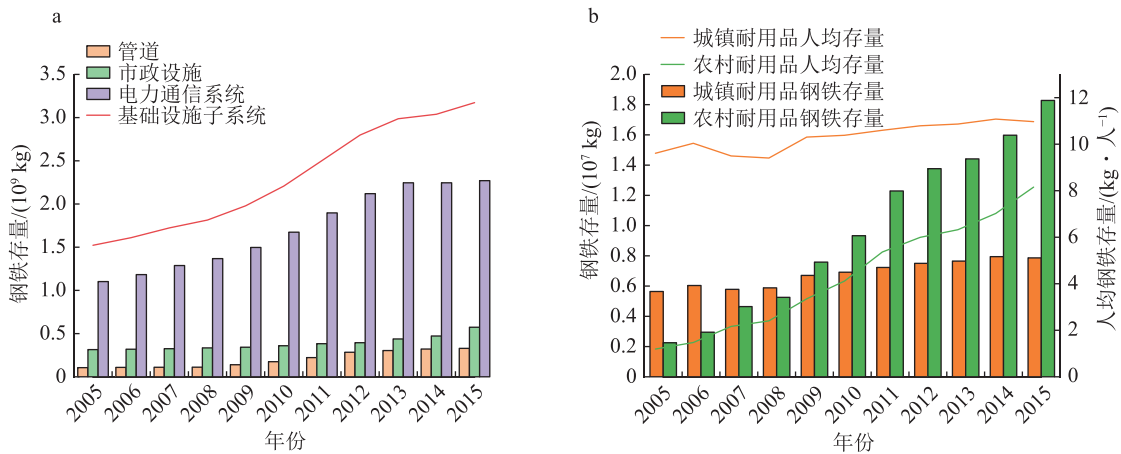


图 3 2005—2015 年广元市基础设施子系统 (a) 与耐用品子系统钢铁存量 (b) 变化

2005—2015 年交通工具子系统的存量由  $9.50 \times 10^7$  kg 攀升至  $4.12 \times 10^8$  kg。2001 年我国加入世界贸易组织, 对外开放程度加大, 国内汽车产业迅速发展, 轿车消费转向以私人消费为主的模式。广元市私人汽车拥有量逐年提升, 2015 年已达到机动车保有量的 90%。2005—2015 年汽车钢铁存量占比由 54% 增至 78%, 大幅提升了交通工具子系统存量的增长量。

耐用品子系统的钢铁存量持续增长, 2008—2011 年平均增长率达 20.7%, 研究期内人均钢铁存量由  $7.8 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$  增至  $25.7 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 。与邯郸市 2005 年耐用品钢铁子系统存量 ( $30.6 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ) 相比<sup>[20]</sup>, 广元市耐用品子系统依然存有发展空间。2008 年前城镇耐用品钢铁存量基本稳定在  $6 \times 10^6$  kg; 2009 年后增速趋于平稳, 年平均增速为 3.4%; 2015 年存量略微下降。相较于城镇耐用品钢铁存量, 农村的增幅较大, 2005—2015 年农村耐用品存量由  $2.6 \times 10^6$  kg 升至  $1.83 \times 10^7$  kg, 年平均增速为 24.3%。农村人均耐用品钢铁存量由  $0.9 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$  升至  $7.9 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ , 逐渐接近城镇同期水平。城镇与农村的耐用品钢铁存量的差距虽然受限于生活方式、经济状况, 但二者之间的差距逐渐减小, 人均存量之比由 10.1 逐渐降至 1.4 (图 3-b)。社会主义新农村建设等政策导致农村生活和消费方式改变, 农村每户耐用品保有量大幅增长, 空调、家用电脑的数量增长了 10 倍以上, 而城市耐用品中电冰箱、洗衣机等数量趋向饱和状态, 这与宋璐璐等<sup>[35]</sup> 的

分析较为一致。发展成熟的城市耐用品存量趋近饱和, 只有在外力刺激下才有明显变化。发展中的农村耐用品存量持续增长, 环比增长率基本大于 10%, 资金投入、扶贫项目等使农村人民的生活水平的提升空间较大。

2005—2015 年设备子系统的钢铁存量由  $1.10 \times 10^8$  kg 增长至  $4.06 \times 10^8$  kg, 锅炉和起重机械钢铁存量的比例达 97%。2005—2007 年, 随着广元市工业的发展, 设备子系统钢铁存量平均增速达 31%; 2008 年, 建筑等的坍塌导致设备钢铁存量下降; 重建初期以恢复和重建损毁建筑和基础设施为主要任务, 2008—2013 年钢铁存量平缓上升; 重建后期大量重建项目和“十二五”规划要求建筑配套设备落实, 设备子系统的产品数量及钢铁存量大幅增长, 2013—2014 年存量增加了  $9.4 \times 10^7$  kg。

**2.1.2 水泥物质存量分析** 2005—2015 年水泥存量的变化趋势与钢铁较为一致。总存量由  $1.68 \times 10^{10}$  kg 增长至  $2.38 \times 10^{10}$  kg, 人均水泥存量由  $5.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$  增长至  $7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$  (图 4), 与 2013 年我国人均水泥存量 (基础设施、建筑)  $1.14 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$  的差距较大<sup>[9]</sup>。

2005—2015 年建筑子系统由  $1.59 \times 10^{10}$  增长至  $2.19 \times 10^{10}$  kg, 约为钢铁存量的 2 倍。2008—2012 年水泥存量快速增长至  $2.00 \times 10^{10}$  kg。2010 年农房重建全部完成, 城镇居民住房重建基本完成<sup>[36]</sup>, 水泥存量恢复至灾前水平。2012 年后水泥存量的增长速度呈放缓趋势, 年平均增长速度约为 3%。

基础设施子系统的水泥存量持续增长,2005—2008年增长较为平稳,平均增速为2.5%;2008年后增长较快,2015年已达 $1.88 \times 10^9$  kg(图4-a)。截至2012年,广元市已新改建国省干线公路802 km、农村公路7884 km<sup>[36]</sup>。“十二五”规划时期广元市综合交通路网规模显著增加,2012—2015年广元市道路面积增加262万m<sup>2</sup>,桥梁增加40座,市政设施存量由 $1.20 \times 10^9$  kg上升至 $1.88 \times 10^9$  kg,存量占比也逐渐增大。

**2.2 物质流量分析** 广元市钢铁产业并不发达,地震前本地的钢铁产量不足以支持城市的建设。灾后钢铁需求量巨大,钢铁行业规模迅速扩大,2009—2015年钢铁产量由 $1.09 \times 10^8$  kg增至 $4.76 \times 10^8$  kg(图5-a)。随着重建工作的进行,钢铁的需求量逐渐减小,钢铁产量逐步增加,调入量减少,甚至从2013年钢铁开始结余并调出至其他地区。在灾后重建的过程中,本地消费促进了本地生产,同时产品的运输距离缩短,降低了产品的成本和能耗。但重建过程中钢铁产品的消耗是阶段性的,重建结束后本地需求迅速下降。结

合广元市钢铁生产和消费的整体环境(攀枝花钢铁产业发达),广元市未来需维持钢铁行业的供需平衡,使其运行质量持续向好。

建材产业是广元市工业发展的5大板块之一,2008年前广元市水泥已经自给,产量基本稳定在 $1.40 \times 10^9$  kg。广元市在重建阶段大力发展建材板块,加快淘汰小水泥落后产能,发展新型干法水泥等产业,引入海螺水泥、卢家坝水泥等重大工业项目。2010年起产量迅速增加,2015年产量已达到2005年的9.3倍。在满足自身需求的同时,广元市水泥以产品形式大量调出。2013年之后,响应广元市“打造绿色水泥行业”的号召,“十二五”期间加大淘汰落后过剩产能的力度,共淘汰水泥产能 $1.57 \times 10^9$  kg<sup>[37]</sup>,水泥产量增速下降。由于水泥产业的区域性和重建后期的供需失衡,广元市需要进一步实现转型升级以避免产能过剩。因此在重建规划阶段,城市需充分考虑本地区的优势与不足,与周边区域错位发展,从而借助重建的有利时机实现产业的升级。

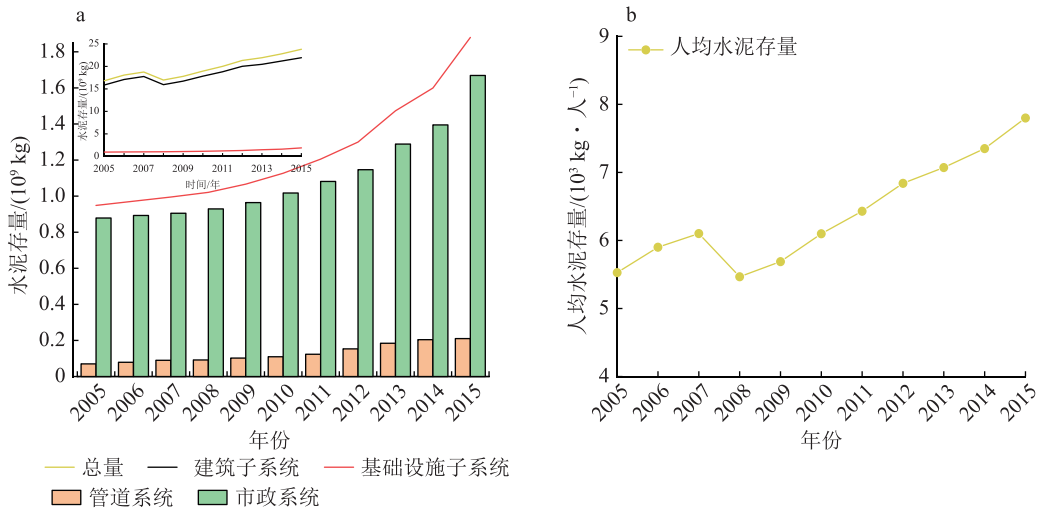


图4 2005—2015年广元市水泥存量变化

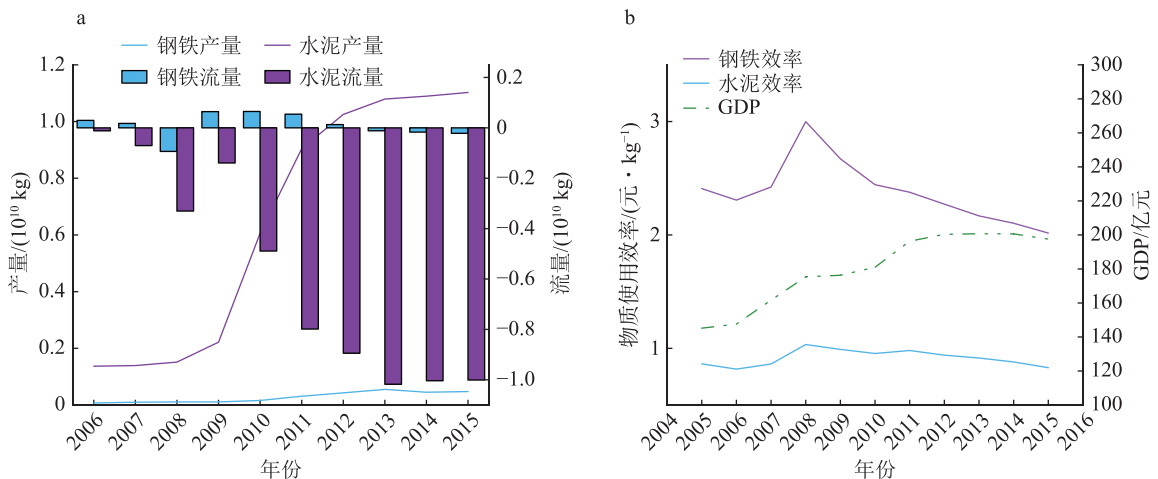


图5 2005—2015 广元市物质产量、流量 (a) 与使用效率 (b)

除了以产品形式流出之外,2008年广元市钢铁、水泥以废弃物的形式分别流出 $9.36 \times 10^8$ 、 $3.30 \times 10^9$  kg。从循环经济和城市矿山的理念来看,城市废弃物含有大量的可回收利用的物质。城市可在救灾过程中对其分类收集处理,从而大幅度提高回收利用效率。

**2.3 驱动因素分析** 城市物质存量反映了城市化过程中物质的累积,代表了城市的规模,城市GDP与物质存量的比值即物质使用效率,可反映城市的运行效率。提高物质的使用效率对于解决资源耗竭问题、促进经济发展与环境压力的“脱钩”至关重要。图5-b表明,广元市城市运行效率在2008年达到峰值,2008—2015年呈现逐年下降的状态。全国水泥、钢铁使用效率分别于2013、2015年达 $1.76$ 和 $4.24$ 元·kg<sup>-1</sup>,约为广元市同期物质使用效率的2倍。因为灾后重建过程属于城市化初期,依赖于基础设施和产品库存的积累,所以城市低效率运行的瓶颈难以避免,并且难以突破<sup>[38]</sup>。

研究期内物质存量变化驱动因素如图6所示。与中国特大城市相一致<sup>[39]</sup>,广元市钢铁存量变化主要的驱动因素为经济增长因素,共导致钢铁存量增加 $6.47 \times 10^9$  kg。地震和重建过程也产生了较大影响,2008—2014年地震和重建因素累计增加钢铁存量 $8.05 \times 10^8$  kg。2008年地震导致广元市钢铁存量减少了 $1.15 \times 10^9$  kg,

2009—2012年由于重建项目较为密集,钢铁存量的增量较大,而后重建因素对存量增量的贡献程度降低。材料使用效率减缓了钢铁存量的增长,研究期内累计减少钢铁存量 $3.47 \times 10^9$  kg。

水泥存量变化的驱动因素与钢铁较为一致,研究期内主要驱动因素为经济增长因素,导致水泥存量增加 $2.25 \times 10^{10}$  kg;地震使广元市水泥存量降低 $7.70 \times 10^9$  kg,但重建过程对于水泥存量的影响较小,2009—2014年共增加水泥存量 $8.43 \times 10^8$  kg;材料使用效率因素对水泥存量增加的抑制作用累计为 $1.29 \times 10^{10}$  kg,说明广元市在低碳重建过程中,经济发展对于钢铁、水泥行业的依赖程度逐渐降低。

### 3 结论

基于元素流分析方法,利用自下而上的手段量化了广元市2005—2015年钢铁及水泥的存量及流量,通过LMDI方法分析存量变化的驱动因素,得出以下结论:

1)城市物质存量的核算结果能够体现地震及灾后重建过程中城市的发展情况。2005—2015年广元市城市钢铁、水泥存量分别从 $6.03 \times 10^9$ 、 $1.68 \times 10^{10}$  kg增至 $9.80 \times 10^9$ 、 $2.38 \times 10^{10}$  kg,灾后重建主体阶段(2008—2011年)聚焦于建筑及基础设施建设,物质存量迅速增加。2015年人均钢铁、水泥存量分别为 $3.2 \times 10^3$ 、

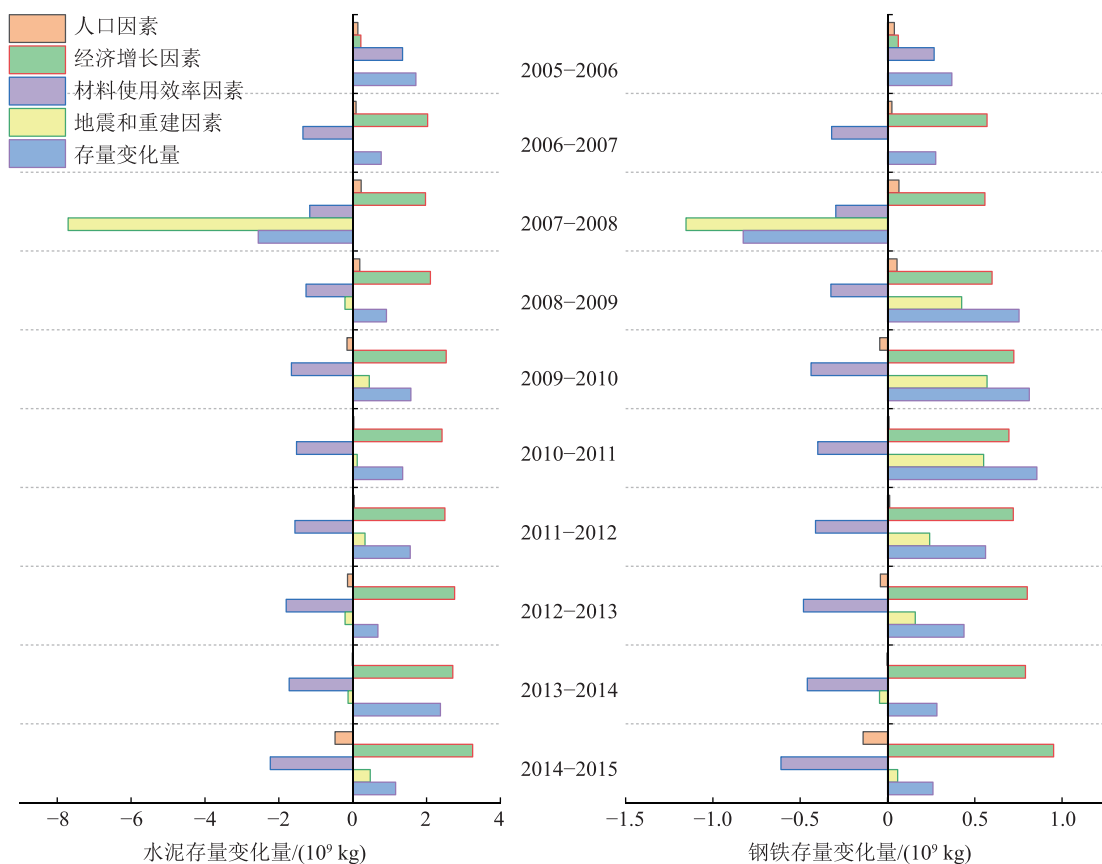


图 6 2005—2015 年广元市物质存量变化的驱动因素

$7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ , 与全国的平均水平相差较大. 物质存量的使用效率较低, 城市重建过程中不可避免处于低效率运行的状态.

2) 灾后重建使广元市钢铁、水泥产业发生了“惯性效应”. 钢铁产业由净流入转为净流出, 2013年后本地产量的扩大导致了产品的外流. 水泥产业作为支柱产业, 流出量大幅增长. 在四川省水泥工业“十二五”发展规划等政策的限制下, 广元市加大淘汰落后产能的力度, 减缓了水泥产量的增速. 但广元市仍需在未来自调整产业结构, 完善工业发展板块, 避免产能过剩.

3) 经济增长因素为物质存量变化的主要驱动因素. 2008—2011年地震与重建成为次要因素, 物质存量在灾后重建阶段持续上升. 材料效率因素减缓了物质存量的增加, 表明经济发展对于钢铁、水泥行业的依赖程度降低.

地震及灾后重建使广元市处于快速的城市化过程, 钢铁、水泥的存量及流量可较好地评估城市的运行状态. 其他类似城市应把握灾后重建这一发展机会, 在救灾过程中建立全面的废弃材料回收体系, 以可持续发展理念完成产业的重建与升级, 并着力提高物质的使用效率, 实现高效的城镇化发展.

## 4 参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
- [2] 中国新闻网. 中国宣布汶川地震灾后重建完成投入1.7万亿元[EB/OL]. (2012-02-24) [2019-11-02]. <http://www.chinanews.com/gn/2012/02-24/3697091.shtml>
- [3] 陈世栋. 废墟上的契机: 汶川地震灾后重建研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
- [4] LIU L X, LIN Y L, WANG S F. Urban design for post-earthquake reconstruction: a case study of Wenchuan County, China[J]. *Habitat International*, 2014, 41: 290
- [5] WANG T, MÜLLER D B, HASHIMOTO S. The ferrous find: counting iron and steel stocks in China's economy[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(5): 877
- [6] SONG L L, WANG P, HAO M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978-2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121393
- [7] WEI J X, CEN K, GENG Y B. China's cement demand and CO<sub>2</sub> emissions toward 2030: from the perspective of socioeconomic, technology and population[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(7): 6409
- [8] MÜLLER D B, LIU G, LØVIK A N, et al. Carbon emissions of infrastructure development[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11739
- [9] CAO Z, SHEN L, LIU L T, et al. Estimating the in-use cement stock in China: 1920-2013[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 21
- [10] 李文东. 四川灾后重建中的产业优化重建[J]. *理论与改革*, 2009(5): 72
- [11] BRUNNER P H, RECHBERGER H. Practical handbook of material flow analysis[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(5): 337
- [12] PAULIUK S, WANG T, MÜLLER D B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 71: 22
- [13] ZHAO F, YUE Q, HE J H, et al. Quantifying China's iron in-use stock and its driving factors analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 274: 111220
- [14] DRAGONAKIS K, ROSTKOWSKI K, RAUCH J, et al. Metal capital sustaining a North American city: iron and copper in New Haven, CT[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 49(4): 406
- [15] YU B Y, AN R Y, ZHAO G P. Spatial and temporal disparity of the in-use steel stock for China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104667
- [16] VAN DER VOET E, KLEIJN R, VAN OERS L, et al. Substance flows through the economy and environment of a region: Part I: Systems definition[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 1995, 2(2): 90
- [17] GORDON R B, GRAEDEL T E, BERTRAM M, et al. The characterization of technological zinc cycles[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, 39(2): 107
- [18] 韩中奎, 文博杰, 代涛, 等. 中国房屋建筑中钢铁存量的时空变化[J]. *资源科学*, 2018, 40(12): 2351
- [19] GRAEDEL T E, BERTRAM M, FUSE K, et al. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42(1/2): 9
- [20] 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[J]. *资源科学*, 2008, 30(1): 147
- [21] SONG L L, ZHANG C, HAN J, et al. In-use product and steel stocks sustaining the urbanization of Xiamen, China[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019, 5(1): 110
- [22] 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
- [23] 张炫钊. 海岛基础设施物质存量及其CO<sub>2</sub>排放量研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018
- [24] 康柳明. 哈尔滨区域工业化进程中钢铁存量变化规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015

- [25] 广元市人民政府. 地理位置自然情况[EB/OL]. (2020-09-04) [2020-10-05]. <http://www.cngy.gov.cn/single/show/20160712145640222.html>
- [26] 市政府举行第九次抗震救灾新闻发布会[EB/OL]. (2008-05-26) [2020-09-25]. <http://www.cngy.gov.cn/gongkai/show/20080526190814-073849-00-000.html>
- [27] 广元胜利完成灾后恢复重建目标任务[EB/OL]. (2011-10-18) [2020-09-25]. <http://scnews.newssc.org/system/2011/10/18/013338984.shtml>
- [28] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴(2005—2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2016
- [29] 广元市统计局. 广元统计年鉴(2005—2015) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2016
- [30] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705
- [31] 四川电力年鉴编纂委员会. 四川电力年鉴(2005—2015) [M]. 北京: 方志出版社, 2006—2016
- [32] 四川年鉴编辑委员会. 四川年鉴(2005—2015) [M]. 成都: 四川年鉴社, 2006—2016
- [33] 四川省特种设备安全管理协会. 四川特种设备年鉴2017 [M]. 成都: 四川省特种设备安全管理协会, 2018
- [34] LI Q F, GAO T M, WANG G S, et al. Dynamic analysis of iron flows and in-use stocks in China: 1949-2015[J]. Resources Policy, 2019, 62: 625
- [35] 宋璐璐, 陈伟强, 代敏. 中国汽车、船舶和家电中钢铁的存量与流量[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 895
- [36] 广元灾后重建综述及2012年工作思路[EB/OL]. (2012-05-09) [2021-01-10]. <http://www.qhnews.com/2012zt/system/2012/05/09/010763497.shtml>
- [37] 广元市人民政府. 广元大力推进工业绿色发展[EB/OL]. (2017-03-10) [2021-01-20]. <http://www.cngy.gov.cn/govop/show/20170310123948-27800-00-000.html>
- [38] LIU Y P, LI J J, DUAN L L, et al. Material dependence of cities and implications for regional sustainability[J]. Regional Sustainability, 2020, 1(1): 31
- [39] LIU Q C, CAO Z, LIU X J, et al. Product and metal stocks accumulation of China's megacities: patterns, drivers, and implications[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(8): 4128

## Urban material flow in earthquake and post-disaster reconstruction

GUO Xin<sup>1)</sup> CHENG Yihan<sup>1,2)</sup> ZHANG Lixiao<sup>1)</sup> HAO Yan<sup>1)†</sup>

(1) School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Shenyang NEU Minerals & Metallurgy Engineering and Technology Co., Ltd, 110015, Shenyang, Liaoning, China)

**Abstract** Earthquake and post-disaster reconstruction can be regarded as rapid urbanization. The systematic study of urban material metabolism could evaluate the state of urban construction and development. Bottom-up material flow analysis was used here to calculate stocks and flows of steel and cement in Guangyuan City from 2005-2015 in five subsystems (buildings, infrastructure, transportation, durable goods and machinery). The driving factors were then analyzed by LMDI method. Due to earthquake, stocks of steel and cement were found to have decreased significantly in 2008, but increased rapidly in post-disaster reconstruction from 2008-2011. In 2015, per capita stocks of steel and cement reached  $3.2 \times 10^3$  and  $7.8 \times 10^3$  kg respectively. However, the efficiency of material stocks gradually decreased after 2008, down to 50% of the national average. LMDI analysis found economic growth to be the main driving factor behind increases in steel and cement stocks, whilst improved efficiency in material-use was inhibitory to the increase. Therefore, in earthquake and post-disaster reconstruction, cities should establish a comprehensive waste-material recycling system, to complete industrial reconstruction and upgrading, and to strive to improve material-use efficiency and to achieve efficient urbanization development.

**Keywords** material flow analysis; stocks; flows; iron and steel; cement; earthquake

【责任编辑: 刘先勤】