程 霜,陈优良,杨学习.城市矿产钢铁在用存量估算及空间异质性研究—以湖南省为例 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):7044-7058.
Cheng S, Chen Y L, Yang X X. Estimation and spatial heterogeneity of urban mineral steel in-use stock-A case of Hunan Province [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):7044-7058.

城市矿产钢铁在用存量估算及空间异质性研究—以湖南省为例

程 霜[1],陈优良[1,2*],杨学习[2] (1.江西理工大学土木与测绘工程学院,江西 赣州 341000；2.中南大学地理信息系,湖南 长沙 410083)

摘要：以湖南省为典型案例区,集成钢铁产品数据、社会变量数据等异构数据,采用自下而上方法估算了1990~2021年建筑物、基础设施、交通工具、机械设施和耐用品五大终端部门钢铁在用存量,并创新性融合IPAT模型、LMDI模型与多元线性回归方法解析其驱动机制.结果表明,湖南省钢铁在用存量及人均在用存量在过去32a内分别增长了12倍和10倍,于2021年分别达到2.6亿t和3.6t/人;在钢铁在用存量的行业分布结构上,建筑钢铁在用存量每年的比重均达到56%以上;钢铁在用存量密度呈现出区域不均的特点,空间异质性呈现“核心-边缘”梯度分异,存量密度高值区(>24万t/km²)沿竖轴线扩展;驱动因子探测显示,人口增长、经济发展和建成区面积是城市钢铁在用存量发展变化的最主要驱动因素.建议引导产业向落后地区扩展,给予政策支持,促进产业融合与集群发展;加快产业低碳化转型,鼓励技术研发与应用,推动能源替代;落实环保相关制度与机制,加强环保宣传教育.

关键词：城市矿产；钢铁在用存量；自下而上方法；驱动力；空间异质性
中图分类号：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-7044-15

Estimation and spatial heterogeneity of urban mineral steel in-use stock-A case of Hunan Province. CHENG Shuang[1], CHEN You-liang[1,2*], YANG Xue-xi[2] (1.School of Civil Engineering and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China；2.Department of Geo-informatics, Central South University, Changsha 410083, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：7044~7058

Abstract：Taking Hunan Province as a typical case area, this paper integrates heterogeneous data such as iron and steel product data and social variable data, and adopts a bottom-up approach to estimate the steel in-use stock in the five end-use sectors, namely, buildings, infrastructure, transportation, machinery and durable goods from 1990 to 2021, and analyzes the driving mechanism by innovatively integrating the IPAT model, the LMDI model, and the multivariate linear regression method. The results of the study show that the steel in-use stock and the steel in-use stock per capita in Hunan Province have increased by 12 times and 10times in the past 32 years, and will reach 260 million tons and 3.6 tons per person respectively in 2021. In terms of the sectoral distribution of the steel in-use stock, the share of construction steel in-use stock reaches more than 56% every year. The density of the steel in-use stock shows regional unevenness, and the spatial heterogeneity shows "core-edge" gradient differentiation, with the high value area of stock density (>240000 t/km^2) expanding along the vertical axis. Detection of driving factors shows that population growth, economic development and built-up area are the most important driving factors for the development and change of urban steel in-use stock. It is recommended to guide the industry to expand to the backward areas, give policy support, promote industrial integration and cluster development; accelerate the transformation of low-carbon industry, encourage technology research and development and application, and promote energy substitution; implement environmental protection related systems and mechanisms, and strengthen environmental protection publicity and education.

Key words：urban minerals；steel in-use stock；bottom-up method；driving forces；spatial heterogeneity

钢铁是推动国家城市化和工业化进程中使用量最大的金属原材料之一,广泛应用于建筑、制造、海洋工程和日常生活等多个领域.作为钢铁生产的重要原料,在地球表层约 16km 的厚度范围内,铁元素的含量约占5.6%[1],这是继氧、硅和铝之后第四大元素.铁具有良好的导电性、导热性、延展性和铁磁性,这些特点使其能够在各种工业和生活领域中得到广泛应用.随着中国经济的迅猛发展,中国对钢铁资源的需求也呈现出爆发式增长.从 2000~2015 年,短短 15a 间,中国钢铁进口量从0.7亿t飙升至9.53亿t,增长了近 13 倍;同期,钢铁消耗量也从1.75亿t激增至11.9亿t增长了近7倍[2].快速消耗大量的钢铁资源,给我国的铁资源和环境带来巨大挑战.人类

收稿日期：2025-04-21
基金简介：湖南省高科技成果转化及产业化计划项目(2020SK2007)
* 责任作者, 教授, gis_public@163.com

活动将钢铁转化为建筑、机械设备等形式,融入生产生活,并在社会经济系统中长期存在,形成所谓的“钢铁存量”.这些钢铁存量蕴藏着巨大的潜力,将成为未来钢铁生产的二次资源来源[3].

通过回收和再利用的各类废弃物和副产品是城市化进程形成的城市矿产[4-6].常见的城市矿产包括钢铁、有色金属、塑料以及橡胶等资源,它们通常源自建筑拆除、设备更新、家庭生活和工业生产等,经过回收处理后,能够再次进入生产链,实现资源的循环利用[7].在城市矿产存量方面,有研究发现美国、英国和德国等工业发达的国家,在 2008 年人均在用钢铁存量在 11~16t/人之间[8].而中国在 2009 年工业增长期间,铜和铝的存量分别达到了 8890 万 t 和 5140 万 t[9].同时,还有学者对城市钢铁终端产品的存量展开研究[10],发现重庆市建筑钢铁存量在 2014 年为 0.59 亿 t[11],长沙市民用建筑钢铁存量在 2020 年达到 66 万 t[12].

近年来,不少学者对城市矿产的驱动因素也进行了深入研究.研究结果表明,经济发展是城市矿产存量增长的主要驱动力[13-15],人口密度则属于次要驱动力[15].另有学者运用元素分析流方法,发现中国钢铁需求增长的主要驱动力是在用库存的不断扩张[16].不仅如此,城市资源空间分布研究对探索城市矿产开采和循环利用有着至关重要的作用.在研究方法上,利用地理信息系统分析地区钢铁存量的空间分布变化是较为常见的做法[17-18],此外,也有基于夜间灯光数据[19-20]及其他相关方法[21],绘制并分析分辨率为 1km 的资源存量时空分布情况.

综上所述,现有关于城市矿产在用存量的研究,主要集中在全球和国家层面,而针对中国城市层面的研究案例相对较少,尤其是以中国省级尺度为研究区域的案例更为罕见.此外,关于钢铁在用存量变化驱动因素的研究也较为薄弱,对于钢铁存量的高分辨率分布特征的研究仍显不足.基于此,本文将采用自下而上方法,以湖南省为例,估算该省 1990~2021 年的钢铁在用存量,结合社会经济变量数据,运用 IPAT 和 LMDI 混合模型以及回归模型,对钢铁在用存量的驱动因素进行深入剖析.基于驱动因素构建湖南省钢铁在用存量模型并进行科学修正,制作分辨率为 500m 的空间分布图,揭示钢铁资源的空间异质性,为湖南省及类似的钢铁资源管理和可持续发展提供实际指导.

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

1.1.1　钢铁产品数据　钢铁作为一种重要的再生资源,其回收利用一直备受关注.现有研究往往集中于终端产品钢铁存量的计算与分析,特别是对不同类型的终端产品的钢铁使用量、回收率以及其生命周期的研究.由于文献和统计方法的相似性,不同研究对象间的差异性和创新性有限,数据质量问题随之凸显.为了解决这一问题,提升数据的准确性和可操作性,本文基于近年专业文献和权威统计年鉴[22-29],以湖南省为例,将城市钢铁产品按使用领域分为建筑物、基础设施、交通工具、机械设备和耐用品五大类,考虑产品数据和单位含铁量可获取性,统计了湖南省 81 种钢铁终端产品.

表 1　建筑物钢铁产品分类和单位含铁量(kg/m^2)

Table 1　Classification and unit iron content of steel products in buildings(kg/m^2)

序号	子类	单位含铁量
1	城镇住宅	1990~2005:40 2006~2021:70
2	农村住宅	1990~2005:10 2006~2021:25
3	城镇非住宅	1990~2005:60 2006~2021:75
4	农村非住宅	1990~2005:15 2006~2021:30

为准确计算湖南省建筑物中的钢铁在用存量,将建筑面积划分为城镇住宅建筑、农村住宅建筑、城镇非住宅建筑和农村非住宅建筑四大类.由于建筑钢铁在用存量占比较大,且建筑面积每单位钢铁含量会适应建筑物结构的时代变化,为降低计算结果的误差范围,选择参考韩中奎等[30]的研究结果,将湖南省建筑单位含铁量按照不同年份分为两类,如表 1 所示.

基础设施类产品共涉及 25 类,涵盖了各类大型工程建设所需的关键材料.交通工具类产品则有 16 类,主要包括与运输、物流相关的各种载具.机械设备类产品有 15 类,涉及工业生产中所需的各类设备和工具.此外,耐用品类产品有 14 类,这些产品是具有较长使用寿命的设备或材料,能够满足不同行业的长期需求.相关终端产品的钢铁含量数据来源于

杨沁东等[31]、Song 等[32-33]和 Wang 等[34]的调查结果, 具体信息见表 2.

表 2 城市矿产钢铁产品分类和单位含铁量

Table 2 Classification and unit iron content of urban mineral iron and steel products

序号	子类	单位含铁量	序号	子类	单位含铁量
基础设施					
1	高速公路	190t/km	14	地铁轨道	20t/km
2	一级公路	1.5t/km	15	泊位	240t/个
3	二级公路	1.25t/km	16	火电发电设备	18t/MW
4	三级及以下公路	1.05t/km	17	水电发电设备	35t/MW
5	等外公路	0.07t/km	18	500kV 及以上输电线回路	42t/km
6	铁路轨道	68t/km	19	220kV 输电线回路	20t/km
7	供水管	90t/km	20	110kV 输电线回路	12t/km
8	天然气管道	30t/km	21	35kV 输电线回路	5t/km
9	煤气管道	30t/km	22	500kV 及以上变压器容量	4t/MVA
10	排水管道	8t/km	23	220kV 变压器容量	2t/MVA
11	路灯	1t/km	24	110kV 变压器容量	1.4t/MVA
12	公路桥梁	15t/m	25	35kV 变压器容量	0.5t/MVA
13	公路隧道	1.6t/m			
交通工具					
1	大型载客汽车	7.6t/辆	9	摩托车	0.085t/辆
2	中型载客汽车	3.2t/辆	10	挂车	2.5t/辆
3	小型载客汽车	0.94t/辆	11	环卫车	2.5t/辆
4	微型载客汽车	0.59t/辆	12	机动船	0.42t/艘
5	重型载货汽车	9.2t/辆	13	驳船	0.38t/艘
6	中型载货汽车	3.7t/辆	14	内燃机车	100t/辆
7	轻型载货汽车	1.6t/辆	15	电力机车	80t/辆
8	微型载货汽车	0.78t/辆	16	铁路客车	26t/艘
机械设备					
1	大中型拖拉机	3.5t/台	9	农业排灌机械	0.4t/台
2	小型及手扶拖拉机	1.2t/台	10	推土机	12.7t/台
3	耕整机	0.8t/台	11	机耕船	0.6t/艘
4	大中型拖拉机配套农具	2t/台	12	饲料粉碎机	0.85t/台
5	小型拖拉机配套农具	0.8t/台	13	农用载重汽车	2t/台
6	农用水泵	0.05t/台	14	农用运输车	1t/台
7	谷物联合收割机	2t/台	15	工业机械	
8	增氧机	0.05t/台			
耐用品					
1	自行车	0.008t/台	12	钢琴	0.04t/台
2	缝纫机	0.02t/台	13	空调	0.026t/台
3	洗衣机	0.018t/台	14	计算机	0.0015t/台
4	电风扇	0.0008t/台	15	淋浴热水器	0.012t/台
5	电冰箱	0.03t/台	16	脱排油烟机	0.02t/台
6	黑白电视机	0.0008t/台	17	消毒碗柜	0.015t/台
7	彩色电视机	0.0008t/台	18	洗碗机	0.015t/台
8	影碟机	0.003t/台	19	微波炉	0.008t/台
9	家用电脑	0.0015t/台	20	移动电话	0.00005t/台
10	组合音响	0.0035t/台	21	固定电话	0.00005t/台
11	照相机	0.00005t/台			

1.1.2 社会变量数据 湖南省的户籍人口数、地区生产总值、各级各类在校生占全省人口的百分比、卫生机构数量以及三种专利批准数等关键数据均来源于湖南省统计局官方网站发布的《湖南省统计年鉴》[22](https://tjj.hunan.gov.cn/).其中,户籍人口数的变化反映了省内人口流动对居民生活的影响;而地区生产总值则直观地展示了湖南省经济增长的轨迹和发展潜力;在校生占全省人口的百分比数

据,揭示了教育资源的分布情况,反映了该省在教育投资方面的努力与成效;卫生机构的数量是衡量一个地区医疗服务能力的重要指标,湖南省在推动医疗卫生事业发展方面的成就可通过此数据得以体现;三种专利的批准数量则展示了创新能力和知识产权保护的力度,直接影响省内企业的竞争力和经济的可持续发展.此外,建成区面积数据出自《中国城市建设统计年鉴》[23]和《湖南省统计年鉴》[22],由于 1994 和 1995 年数据缺失,且前后数据相差较小,通过递增法补全数据.社会变量统计数据如表 3 所示.

表 3　社会变量统计数据

Table 3　Statistics on social variables

年份	户籍人口(万人)	生产总值(亿元)	各级各类在校生占全省人口(%)	卫生机构数(万个)	三种专利批准数(万项)	建成区面积(km^2)
1990	6110.89	744.44	16.1	1.06	0.1126	528
1991	6166.33	833.3	15.5	1.06	0.1174	546
1992	6207.78	986.98	15.3	1.06	0.1572	583
1993	6245.58	1244.71	16	0.96	0.2766	642
1994	6302.58	1650.02	16.4	0.99	0.162	643
1995	6392	2132.13	16.9	0.91	0.1515	644
1996	6428	2540.13	17.5	0.90	0.13	645.42
1997	6465	2849.27	18.1	0.92	0.13	690.55
1998	6502	3025.53	18.1	0.97	0.16	713.08
1999	6532	3214.54	17.67	0.43	0.25	743.4
2000	6562.05	3551.49	17.24	0.43	0.26	799.27
2001	6595.85	3831.9	16.74	0.42	0.24	854.16
2002	6628.5	4151.54	16.34	0.43	0.23	897.63
2003	6662.8	4659.95	15.97	0.40	0.32	959.38
2004	6697.7	5542.62	15.31	0.40	0.33	1002.7
2005	6732.1	6369.87	14.67	0.41	0.37	1032.93
2006	6768.1	7431.55	11.53	0.41	0.56	1037
2007	6805.7	9285.45	11.03	1.45	0.57	1111.9
2008	6845.2	11307.36	10.87	1.45	0.61	1195.25
2009	6900.2	12772.8	14.09	1.44	0.83	1238.54
2010	7089.53	15574.32	13.8	1.42	1.39	1321.05
2011	7135.6	18914.96	15.05	1.43	1.61	1408
2012	7179.87	21207.23	14.6	1.42	2.32	1465.07
2013	7147.28	23545.24	17.82	1.74	2.44	1504.95
2014	7202.29	25881.28	18.02	1.69	2.66	1540.21
2015	7242.02	28538.6	18.56	1.78	3.41	1572.52
2016	7318.81	30853.45	18.9	1.67	3.41	1625.64
2017	7296.26	33828.11	19.32	1.65	3.79	1709.35
2018	7326.62	36329.68	20	1.63	4.90	1837.14
2019	7319.53	39894.14	20	5.72	5.47	1855.94
2020	7295.58	41542.57	21	5.60	7.87	1959.38
2021	7246.26	46063.09	22	5.57	9.89	2065.56

1.2　研究方法

1.2.1　自下而上方法

城市建筑面积一般不直接出现在统计年鉴中,需要根据收集的城镇人均住宅面积和农村人均住宅面积计算得出住宅建筑面积,公式如下:

$$M_{\mathrm{a}}(t)=N_{\mathrm{z}}(t)\bullet R_{\mathrm{z}}(t)+N_{\mathrm{n}}(t)\bullet R_{\mathrm{n}}(t) \tag{1}$$

式中: $M_{\mathrm{a}}(t)$ 是 t 年的住宅建筑面积,m^2; $N_{\mathrm{z}}(t)$ 是 t 年的城镇人均住宅面积,m^2; $R_{\mathrm{z}}(t)$ 是 t 年的城镇人口数,人; $N_{\mathrm{n}}(t)$ 是 t 年的农村人均住宅面积,m^2/人; $R_{\mathrm{n}}(t)$ 是 t 年的农村人口数,人.

非住宅建筑面积由住宅面积、建筑和住宅竣工面积计算得到.

$$M_{\mathrm{b}}(t)=\frac{M_{\mathrm{a}}(t)\bullet(D_{\mathrm{a}}(t)-D_{\mathrm{b}}(t))}{D_{\mathrm{b}}(t)} \tag{2}$$

$$E_{\mathrm{e}}(t)=m_{\mathrm{a}}(t)/m_{\mathrm{b}}(t) \tag{3}$$

$$m_{\mathrm{c}}(t)=E_{\mathrm{e}}(t)\bullet\frac{M_{\mathrm{b}}(t)}{E_{\mathrm{e}}(t)+1} \tag{4}$$

$$m_{\mathrm{d}}(t)=M_{\mathrm{b}}(t)-m_{\mathrm{c}}(t) \tag{5}$$

式中: $M_{\mathrm{a}}(t)$ 、 $M_{\mathrm{b}}(t)$ 分别是 t 年住宅和非住宅建筑面积,m^2; $D_{\mathrm{a}}(t)$ 、$D_{\mathrm{b}}(t)$ 分别是 t 年建筑和住宅建筑竣工面积,m^2; $E_{\mathrm{e}}(t)$ 是 t 年城镇住宅和农村住宅建筑面积的比值; $m_{\mathrm{a}}(t)$ 、 $m_{\mathrm{b}}(t)$ 分别是 t 年城镇住宅和农村住宅建筑面积,m^2; $m_{\mathrm{c}}(t)$ 、$m_{\mathrm{d}}(t)$ 分别是 t 年城镇非住宅和农村非住宅建筑面积,m^2.

机械设施通常分为工业机械和农业机械,农业机械在促进农业生产效率和提高农作物产量方面具有显著影响,而工业机械则是推动制造业和工业生产的关键.工业机械的具体统计数据在统计年鉴中往往不直接显示,导致其单位含铁量的计算变得困难.为解决这一数据缺失问题,假设两类机械在结构和材料使用上相似,即农业机械的单位含铁量是适用于工业机械[35],工业机械的单位含铁量通过第一产业(农业)和第二产业的 GDP 进行计算.

$$S_{\mathrm{id}}(t)=G_{\mathrm{a}}(t)\bullet\frac{S_{\mathrm{ar}}(t)}{G_{\mathrm{b}}(t)} \tag{6}$$

式中: $S_{\mathrm{id}}(t)$ 、 $S_{\mathrm{ar}}(t)$ 分别是 t 年工业机械和农业机械的钢铁在用存量,kg; $G_{\mathrm{a}}(t)$ 、$G_{\mathrm{b}}(t)$ 分别是 t 年湖南省第二产业和第一产业总产值,元.

为准确计算湖南省 1990~2021 年间的钢铁在用存量,本文采用自下而上方法,该方法强调从具体的产品数量出发,通过将每种钢铁产品的数量与其对应的单位含铁量相乘,进而获得各类钢铁产品的总

在用存量,从而得出在用存量的总和[33].

$$S(t)=\sum_i P_i(t)\bullet w_i(t) \tag{7}$$

式中:$S(t)$是钢铁总在用存量,kg;$P_i(t)$是在时间 t 时使用产品 i 的总数量,个;$w_i(t)$是在时间 t 时使用产品 i 的单位含铁量,kg/个.

1.2.2 驱动力分析方法 IPAT 模型强调人口(Population)、消费水平(Affluence)和技术(Technology)这三大要素如何共同影响环境[36-40].IPAT 模型旨在揭示经济增长与能源消耗之间的关系,并为环境影响评估提供理论框架.采用 IPAT 模型来评估社会驱动因素对钢铁在用存量的影响,其基本形式可以表达为:

$$I=P\bullet A\bullet T \tag{8}$$

式中:P 为湖南省的户籍人口数;A 为经济水平,即人均生产总值;T 为钢铁的服务效率,用单位 GDP 的钢铁在用存量表示.

为了量化这 3 种驱动力对钢铁在用存量的贡献,结合 LMDI(对数平均迪氏指数法)[41-44],将 IPAT 模型分解为计算单位时间内变化率的形式.LMDI 方法的核心思想是通过对总量指标变动的分析,将其分解为各个影响因素变化的贡献,从而更好地理解这些驱动力在钢铁在用存量变化中的作用.进一步将湖南省单位 GDP 钢铁在用存量 T 分解为建筑物、基础设施、交通工具、机械设备和耐用品五个子区,LMDI 方法扩展为:

$$\begin{aligned}&\Delta I=\Delta P+\Delta A+\Delta T\\&=\Delta P+\Delta A+\Delta T1+\Delta T2+\Delta T3+\Delta T4+\Delta T5\\&=\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{P_{t'}}{P_t})+\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{A_{t'}}{A_t})+\\&\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{T1_{t'}}{T1_t})+\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{T2_{t'}}{T2_t})+\\&\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{T3_{t'}}{T3_t})+\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\frac{T4_{t'}}{T4_t})+\\&\frac{I_{t'}-I_t}{\ln(I_{t'})-\ln(I_t)}\bullet\ln(\ln(\frac{T5_{t'}}{T5_t}))\end{aligned} \tag{9}$$

式中:$I_{t'}$ 和 I_t 是在 t' 和 t 年钢铁在用存量,kg;$P_{t'}$ 和 P 是在 t' 和 t 年户籍人口数,人;$A_{t'}$ 和 A_t 是在 t' 和 t 年人均生产总值,元;$T1_{t'}$、$T1_t$、$T2_{t'}$、$T2_t$、$T3_{t'}$、$T3_t$、$T4_{t'}$、$T4_t$、$T5_{t'}$ 和 $T5_t$ 分别是在 t' 和 t 年建筑物、基础设施、交通工具、机械设备和耐用品的单位 GDP 钢铁在用存量,kg/元.

1.2.3 相关性分析方法 为全面分析湖南省钢铁在用存量与各类社会变量之间的关系,选择人口、经济、教育、医疗、科技和城市建设作为相关性研究指标.将人口和经济指标归化为人口密度、人均生产总值.各级各类在校生占全省人口比例从侧面体现了湖南省人民的受教育程度,代表湖南省教育水平.医疗水平的发展变化通过卫生机构数衡量,医疗水平越高则卫生机构数越多.专利是技术证明标志,是衡量科学技术水平的重要指标之一,故使用三种专利批准数表示湖南省科学技术水平.建成区面积为城市建设水平.公式如下:

$$S=a_0+bO_i \tag{10}$$

式中:S 是钢铁在用存量,万 t;a_0 是截距;b 是系数;O_i 是人口密度,人/km^2;或人均生产总值,万元/人;或各级各类在校生占全省人口,%;或卫生机构数,万个;或三种专利批准数,万项;或建成区面积,km^2.

1.2.4 多元线性回归模型 根据实际问题的复杂性,多元线性回归模型用于描述一个因变量与多个自变量之间的线性关系,能够避免重要自变量被遗漏而导致设定误差的情况.使用多元时间序列线性回归能够显示钢铁存量尺度的降低.本文使用基于统计数据的 1990~2021 年湖南省钢铁存量来构建回归模型,并使用 Pearson's r 来验证模型预测值与实际估算值之间的相关关系.

$$S(t)=a+b_1A+b_2B+b_3C \tag{11}$$

式中:a 是拟合截距系数;b_1、b_2 和 b_3 是拟合斜率系数;A、B 和 C 分别是与湖南省钢铁资源存量相关性最强的三个社会变量.

使用 Meng 等[45]推荐的公式来修正模型计算结果,确保网格化的钢铁存量之和与统计估算结果相同.所有负拟合值或非建成区的钢铁存量均设置为零.

$$S'_{\mathrm{r}}=\frac{\hat{S}_{\mathrm{r}}\cdot S}{\hat{S}} \tag{12}$$

式中:S'_{r} 是校正后的网格化钢铁存量,t;$\hat{S}$ 是湖南省内网格化钢铁存量 $\hat{S}_{\mathrm{r}}$ 的总和,t.

2 结果分析

2.1 钢铁在用存量分析

2.1.1 钢铁总在用存量分析 湖南省钢铁在用存量随着时间的推移持续增加,其行业分布结构也随之变

化.由图 1(a)可知,建筑物在钢铁总在用存量中一直占据着较大的比重,在过去的 32a 间比重均超过了 56%,在 2003 年更是达到了 72.42%的占比.其次是基础设施,平均占比约为 18.41%,交通工具和机械设施的占比分别从 1990 年的 3.19%和 6.54%上升到 2021 年的 9.05%和 9.61%.耐用品的钢铁在用存量平均占比 1.58%,呈现先增后减的趋势,虽然在用存量增大但总体占比变化不大,可能与产品的使用寿命有关.

从图 1(b)可以看出,湖南省钢铁在用存量在过去 32a 间实现了爆发式增长,从 1990 年的 0.22 亿 t 增长至 2021 年的 2.63 亿 t,总在用存量增长率约 12 倍.同时,人均钢铁在用存量也从最初的 0.36t/人跃升至 3.6t/人,增长幅度约 10 倍,反映了湖南省钢铁设施建设的快速发展.在 2015 年,湖南省钢铁在用存量和人均钢铁在用存量的增速最大,分别达到 1.85 亿 t 和 2.55t/人.

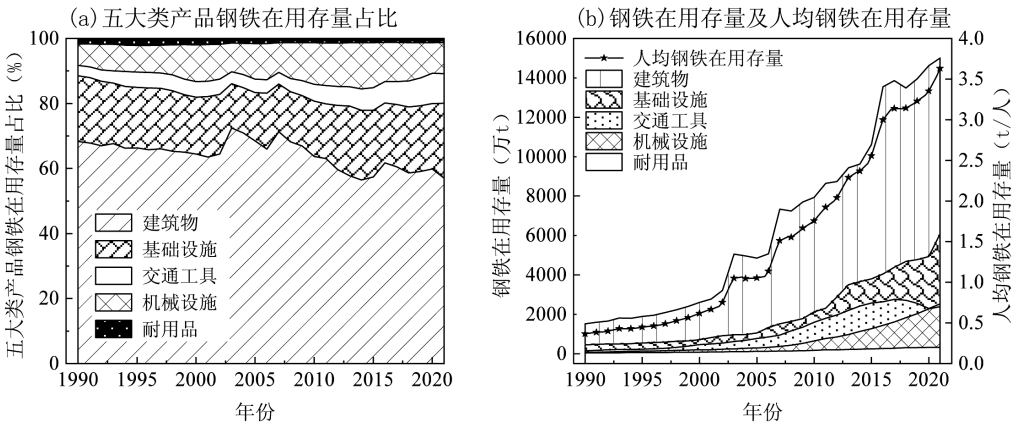


图 1　湖南省 1990~2021 年五大类产品钢铁在用存量及占比

Fig.1　The steel in-use stock and its proportion of five major product categories in Hunan Province from 1990 to 2021

2.1.2　建筑物钢铁在用存量分析　在城镇化进程的推动下,湖南省建筑面积逐年增加,32a 间由 1477.26km^2 攀升至 5370.21km^2,增长了近 4 倍.住宅面积从 1196.17km^2 增长至 4128.16km^2,非住宅面积自 281.09km^2 增长至 1242.05km^2,详细变化如图 2(a)所示.城镇住宅面积从 2003 年迅速增长,至 2015 年湖南省的城镇化率超过 50%.与此同时,农村建筑面积的增速逐渐放缓,工业化进程加快以及各项政策的实施共同刺激了城镇和农村非住宅面积的总体增长趋势.

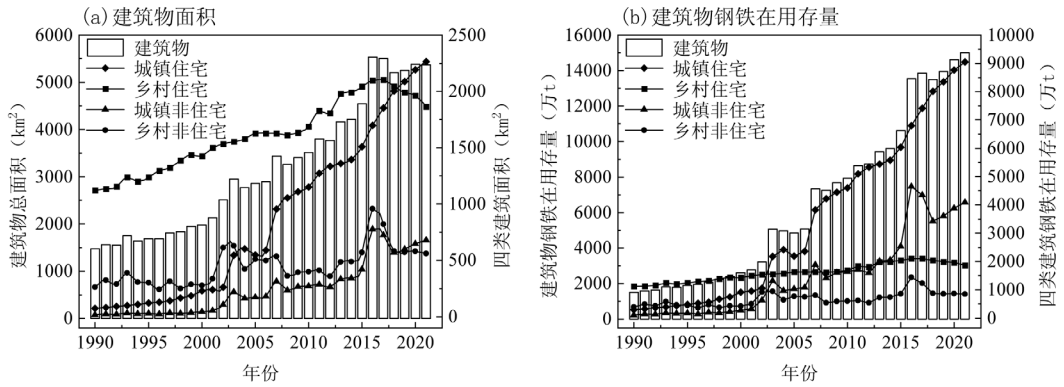


图 2　湖南省 1990~2021 年建筑面积和钢铁在用存量变化

Fig.2　Changes in the building area and steel in-use stock in Hunan Province from 1990 to 2021

建筑面积的增长导致建筑物的钢铁在用存量也随之增加.如图 2(b)所示,城镇住宅钢铁在用存量从 296.42 万 t 增至 0.91 亿 t,年均增长 291.84 万 t.自 2003 年起,房屋建设速度加快和钢混结构成为主流,城镇住宅钢铁在用存量出现明显攀升.与此同时,农村住宅钢铁在用存量也持续增长,从 0.11 亿 t 增至

0.19 亿 t,这主要归因于农村住宅结构改变、层高和面积增加,导致钢铁在用用量上升.值得关注的是,21 世纪以来,高层办公楼、工厂、电视塔等非住宅建筑发展迅速,城镇非住宅钢铁在用存量从 104.49 万 t 增至 0.41 亿 t,农村非住宅钢铁在用存量也从 395.52 万 t 增长至 841.81 万 t.

2.1.3 基础设施钢铁在用存量分析 湖南省高速公路建设起步较晚,但发展迅速.1993 年,第一条高速公路莲易公路的通车标志着湖南省高速公路建设的开端.此后,在省政府的领导下,湖南省的高速公路建设取得了令人瞩目的成就.截至 2021 年,湖南省的高速公路里程高达 7083km.同时,公路桥梁和隧道的里程也大幅增加,这不仅推动了湖南省的交通发展,也带动了钢铁等主要支撑结构原材料的大量积累.

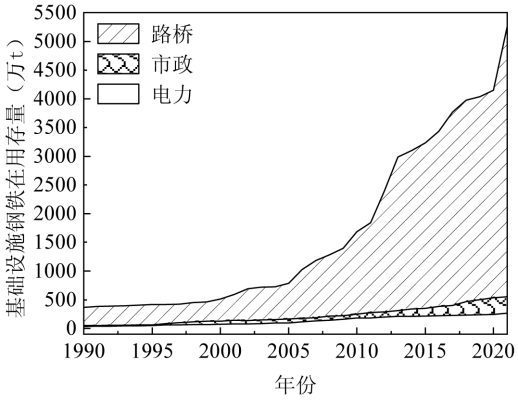


图 3 湖南省 1990~2021 年基础设施钢铁在用存量变化

Fig.3 Changes in the steel in-use stock in infrastructure in Hunan Province from 1990 to 2021

除了路桥基础设施,住宅结构和城市化建设也刺激了市政设施的发展.供水、排水管道长度增长 10 余倍,天然气管道逐渐取代煤气管道,路灯数量大幅增加.如图 3 所示,1990 年,路桥、市政和电力的钢铁在用存量分别为 366.48 万 t、48.7 万 t 和 35.37 万 t,到 2021 年分别增加至 5261.68 万 t、552.54 万 t 和 268.4 万 t.其中,路桥设施、市政设施和电力设施钢铁在用存量分别增长了约 14 倍、11 倍和 7 倍,反映了湖南省对交通基础设施的大力投入和城市化进程的快速发展.

2.1.4 交通工具钢铁在用存量分析 自 1990 年以来,科技的快速发展推动了各类交通工具数量持续增长(图 4),其钢铁在用存量从 71.14 万 t 增至 0.24 亿 t,年均增长率为 11.99%.同期,人均交通工具在用钢铁含量也从 11.64kg/人上升到 0.33t/人,这一增长趋势与湖南省公路基础设施发展的历程相吻合.在 1993 年莲易公路通车后,次年交通工具钢铁在用存量增长率达到22.29%,并在2009年达到峰值23.17%,反映了湖南省公路里程快速增加的影响.

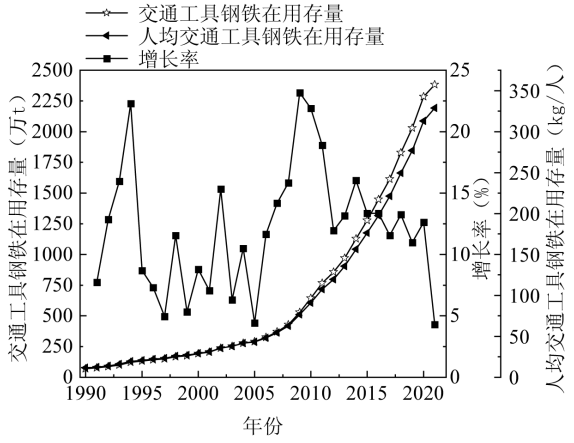


图 4 湖南省 1990~2021 年交通工具钢铁在用存量变化

Fig.4 Changes in the steel in-use stock of transportation vehicles in Hunan Province from 1990 to 2021

2.1.5 机械设备钢铁在用存量分析 改革开放以来,湖南省将工作重心转移到经济建设上来,取得了显著成就.农业结构升级转型,工业企业营收实现了翻倍增长.机械设备钢铁在用存量也随之快速增长,从 1990 年的 145.81 万 t 增长至 2021 年的 0.25 亿 t,如图 5a 所示.从 1999 年开始,工业机械钢铁在用存量逐渐大幅度领先农业机械,钢铁在用存量由 285.72 万 t 增长至 0.21 亿 t,与 1990 年的 68.89 万 t 相比增加了近 30 倍.农业机械钢铁在用存量也保持平稳增长,其中,谷物联合收割机从 98t 猛增至 26.31 万 t,增长了近 2700 倍;大中型拖拉机配套农具由 0.34 万 t 增加至 8.9 万 t,增长约 26 倍;农业排灌机械从 20.61 万 t 增长至 114.09 万 t.

2.1.6 耐用品钢铁在用存量分析 改革开放以来,湖南省经济社会发展取得了长足进步.1990 年,湖南省城镇居民仅 291.62 万户,农村居民高达 0.14 亿户,城镇化率只有 17.55%,城乡差距较大.随着城乡一体化建设的深入推进,城市发展和新农村建设协调推进,到 2021 年,湖南省城镇居民大幅增加至 0.14 亿户,农村居民减少到 970.14 万户,城镇化率显著提高至 59.71%.

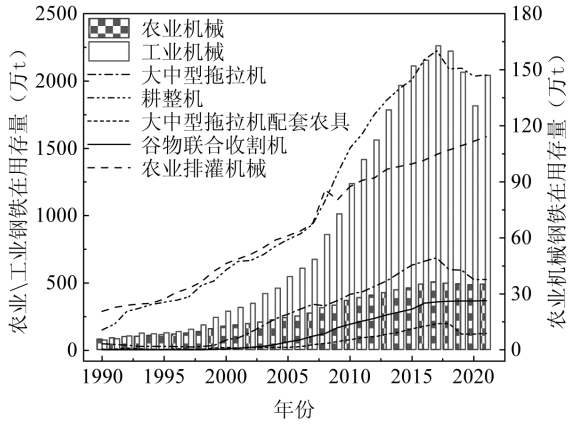


图 5　湖南省 1990~2021 年机械设备钢铁在用存量变化

Fig.5　Changes in the steel in-use stock of mechanical facilities in Hunan Province from 1990 to 2021

伴随着经济社会的快速发展,湖南省城乡居民生活水平不断改善,拥有的耐用品钢铁在用存量也随之大幅增长.如图 6 所示,1990 年,城乡居民耐用品钢铁在用存量总计为 38.17 万 t,虽然当时农村居民人口基数较大,但农村居民耐用品钢铁在用存量只略高于城镇居民,差距不大.随着城镇化进程加快,从 1993 年开始,城乡居民耐用品钢铁在用存量差距逐渐拉大,城镇耐用品钢铁在用存量高于农村耐用品钢铁存量.到 2021 年,城镇居民耐用品钢铁在用存量高达 219.93 万 t,占耐用品钢铁总在用存量的 66.8%.这些变化反映了城乡居民生活水平的明显差异,也侧面反映了湖南城镇化进程的加快步伐.

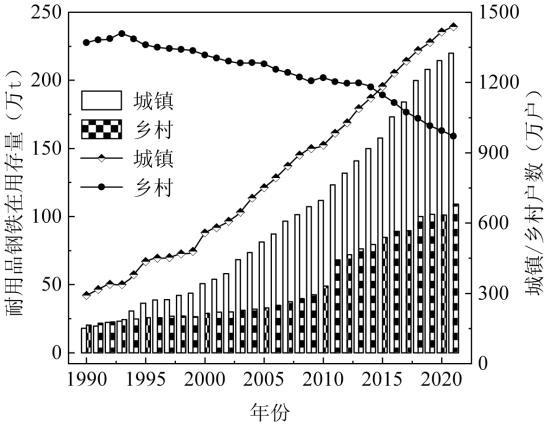


图 6　湖南省 1990~2021 年耐用品钢铁在用存量变化

Fig.6　Changes in the steel in-use stock of durable goods in Hunan Province from 1990 to 2021

2.2　驱动因素分析

本文将研究时间划分为 1990~2000 年、2000~2010 年以及 2010~2020 年这 3 个阶段,分别对湖南省钢铁在用存量增长的驱动力进行了 IPAT 结果分析,如图 7 所示.从图中可以明显看出,在人口、经济和技术的共同影响下,湖南省钢铁在用存量的增长驱动力逐渐增强.具体情况如下:

1990~2000 年阶段(图 7(a)): ΔP 的值较小且变化不大,表明人口对钢铁在用存量的促进作用较小.相比之下, ΔA 的值随时间先增后减再增且远远大于 ΔP ,说明经济发展对钢铁在用存量的促进作用整体上随时间逐渐增强,且经济变化产生的驱动力远大于人口产生的驱动力.

2000~2010 年阶段(图 7(b)): ΔA 的值随时间持续增大,在 2010 年达到峰值 24.56%, $\Delta T1$ 、 $\Delta T2$ 、 $\Delta T3$ 和 $\Delta T4$ 在某些时间对钢铁在用存量起正向驱动作用,而 $\Delta T5$ 一直抑制钢铁在用存量的增长.

2010~2020 年阶段(图 7(c)): ΔP 的值依旧变化不大, ΔA 的值一直高于 10%,在 2020 年达到峰值 27.93%.但在 2015 年, $\Delta T1$ 的正向驱动远远大于 ΔA ,达到峰值 33.55%.

从图 7(d)可以看出,在 3 个研究阶段, ΔT 始终为负值,到 2021 年, ΔT 的数值最低,这表明即使技术在不断发展,但其所产生的抑制作用已达到巅峰.具体来看,这背后存在多方面的原因.一是钢铁回收技术发展良好,废旧钢铁经专业回收变为高质量再生钢铁原材料,重回各行业使用,使新生产钢铁需求减少,遏制了钢铁在用存量的扩张;二是先进的生产工艺不断涌现,钢铁制品质量显著提升,产品更换频率降低,新增钢铁需求随之减少;三是随着科技进步,高性能新材料涌现,在部分领域替代钢铁,减少了钢铁用量,抑制了钢铁在用存量的增长势头.

此外, ΔP 的值始终在 0~1%之间,对钢铁在用存量的正向驱动作用较小. ΔA 在三个阶段中持续增长,每个阶段对钢铁在用存量的正向驱动最大. $\Delta T3$ 在 2000~2010 年阶段的值为正值,说明该时间段交通工具的建设对湖南省钢铁在用存量有正向驱动作用.尽管 ΔT 在整个研究时间内起到明显的负向作用,但湖南省钢铁在用存量仍不断增加.这表明,在人口和经济持续增长的背景下,技术的抑制作用虽然逐渐增强,但仍无法完全抵消人口和经济的驱动力,从而导致湖南省钢铁在用存量持续增长.

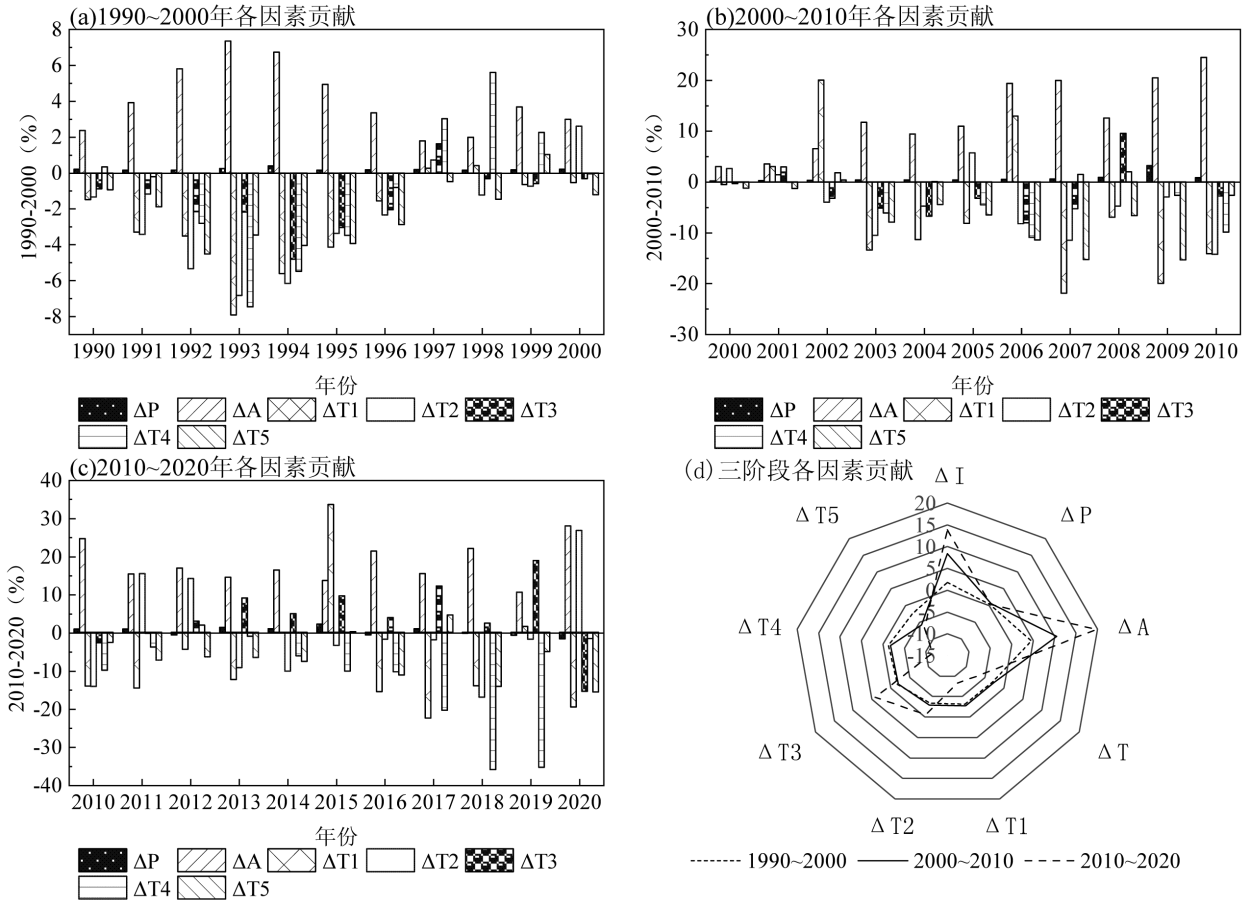
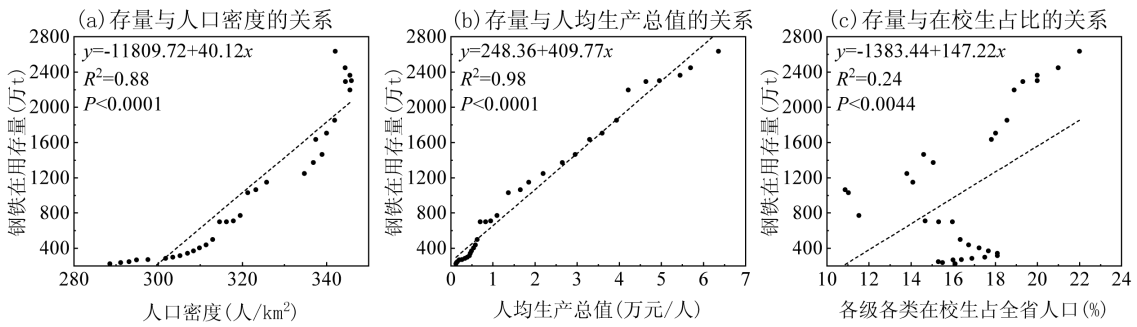


图 7 IPAT 模型三阶段分析结果

Fig.7 Results of the three-stage analysis of the IPAT model

在驱动力分析的基础上,从人口、经济、教育、医疗、科技和城市建设 6 个角度综合出发,分析湖南省 1990~2021 年的钢铁在用存量与人口密度、人均生产总值、各级各类在校生占全省人口、卫生机构数、三种专利批准数和建成区面积的相关性,线性回归结果如图 8 所示.

建成区面积和人均生产总值与钢铁在用存量的相关性最强,R^2 值均为 0.98,P 值均小于 0.0001,其次是人口密度,R^2 值为 0.88,P 值小于 0.0001,这三者线性回归方程拟合优度较高且具有较高的显著水平.三种专利批准数和卫生机构数与钢铁在用存量的相关性较为一般,R^2 值分别为 0.80 和 0.56,P 值均小于 0.0001,模型的拟合度相对较低;教育水平与钢铁在用存量的相关性最弱,R^2 值仅为 0.24,P 值小于 0.0044,模型的拟合优度最低,表明教育水平对钢铁在用存量的影响相对较小.因此,人口、经济和城市建设是湖南省城市钢铁在用存量变化的主要影响因素.



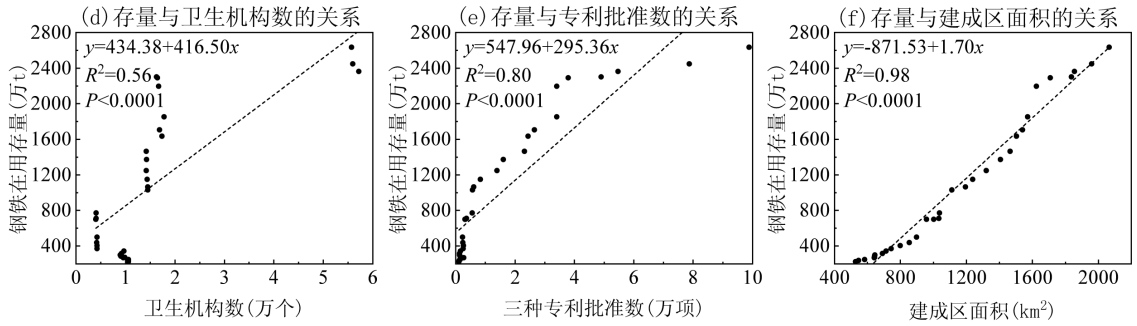


图 8　湖南省钢铁在用存量与社会变量的相关性

Fig.8　Correlation between the steel in-use stock and social variables in Hunan Province

2.3　空间异质性分析

根据驱动因素的研究结果可知,人口、经济和城市建设对钢铁存量的发展影响最大,故选择人均生产总值、人口密度和建成区面积对湖南省 1990~2021 年钢铁在用存量数值进行多元线性回归,构建钢铁在用存量模型.多元线性方程参数计算结果如表 4 所示,模型具有较高拟合度,R^2 等于 0.99 且 P 值 <0.0001.

表 4　多元线性回归方程的参数值

Table 4　Parameter values of multiple linear regression equations

参数	值	R^2	P
a	−7.129	0.99	<0.0001
$b1$(人均生产总值)	1.22×10^{-4}		
$b2$(人口密度)	0.225		
$b3$(建成区面积)	2.19×10^{-3}		

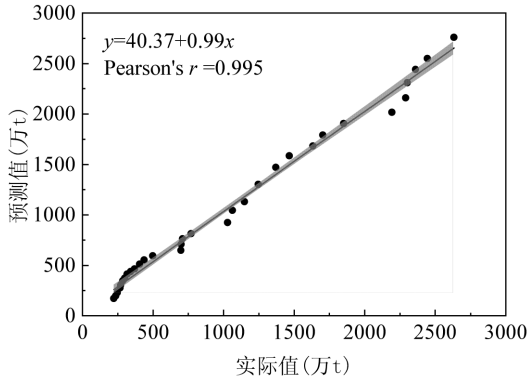


图 9　湖南省钢铁在用存量估算值与预测值的比较

Fig.9　Comparison of estimated and forecasted in-use steel stock in Hunan Province

灰色阴影为 95%置信区间

将 1990~2021 年的湖南省钢铁存量模型预测值与基于统计数据的估算值进行比较分析,结果表明预测值和实际估算值具有很强的线性关系,皮尔逊相关系数达 0.995,大多数散点沿线均匀分布并在 95%的置信区间内(图 9).因此,基于人均生产总值、人口密度和建成区面积构建的湖南省城市钢铁资源存量模型是稳健的,能够用于其他尺度区域的钢铁存量估算,是可视化湖南省不同尺度下钢铁存量的基础(拟合为负值和无建成区的区域,钢铁存量化为 0).

基于构建的湖南省钢铁在用存量模型,结合网格化人口、GDP 和建成区面积数据制作了分辨率为 500m 的 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年湖南省钢铁在用存量空间分布图(图 10).通过对湖南省钢铁在用存量的空间分布变化进行分析,可以发现湖南省钢铁存量的空间分布在不同时间段呈现出显著的异质性.

1990 年(图 10(a)),湖南省钢铁存量密度呈现多元发展.省会长沙市中心城区钢铁存量密度超 10 万 t/km^2,周边地区为 2~10 万 t/km^2,外围区域则小于 2 万 t/km^2,形成了以长沙市中心城区为核心,向外围钢铁存量密度逐渐降低的空间分布格局.同时,怀化市中部小部分区域,常德市、岳阳市、衡阳市和郴州市中部、湘潭市东北部、株洲市西北部、娄底市东部,钢铁在用存量密度在 2~6 万 t/km^2 之间,其余建成区则不到 2 万 t/km^2,且怀化市、湘西土家族苗族自治州和张家界市因自然地理因素发展滞后,总体钢铁存量分布范围较小.在该阶段,湖南省侧重省会长沙发展,凭借优惠政策与资源倾斜引导产业资源汇聚,钢铁产业聚集于此,长沙形成高存量密度且向外递减态势.而怀化等地偏远,缺少政策扶持与产业引导,发展缓慢,钢铁产业难大规模开展,存量范围和密度均低.从地形条件上看,长沙位于湘江下游平原,地势平坦利于厂房、交通建设,推动钢铁产业发展,提升

密度;湘西土家族苗族自治州、张家界市多山地、丘陵,地形复杂,工业与交通建设难度大、成本高,限制钢铁产业布局,使其密度较低.不同地区由于自然地理条件、政策优惠等因素的差异,导致钢铁在用存量密度存在显著的空间异质性.

2000 年(图 10(b)),湖南省钢铁存量增长缓慢,但各地区钢铁存量密度变化存在差异.长沙市中心城区钢铁存量密度增长至 4~12 万 t/km^2,部分区域钢铁存量密度超过 24 万 t/km^2,部分周边地区达 12~24 万 t/km^2 之间,而湘潭市西北部、株洲市东北部、邵阳市东北部和衡阳市中部部分区域钢铁存量密度由 2~6 万 t/km^2 增长至 4~12 万 t/km^2,其余地区虽有增长但低于 4 万 t/km^2.期间整体钢铁在用存量增长缓慢,但长沙市凭借前期产业优势与持续政策支持下,获得更多资源,推动钢铁产业继续发展,中心城区及部分周边区域钢铁存量密度进一步提升.而其他部分地区政策扶持有限,获取产业发展要素有困难,增长速度较慢,区域差距愈发明显.从地理条件上看,交通网络的影响越发突出.长沙市作为省会交通枢纽,公路、铁路干线交错,强化了钢铁产业物流运输优势,利于原材料运入和产品输出,为企业扩大生产、提升存量密度创造了良好条件.反观交通不便地区,运输成本高,限制了钢铁产业拓展,即便有增长,幅度也小,进一步加剧了空间异质性.

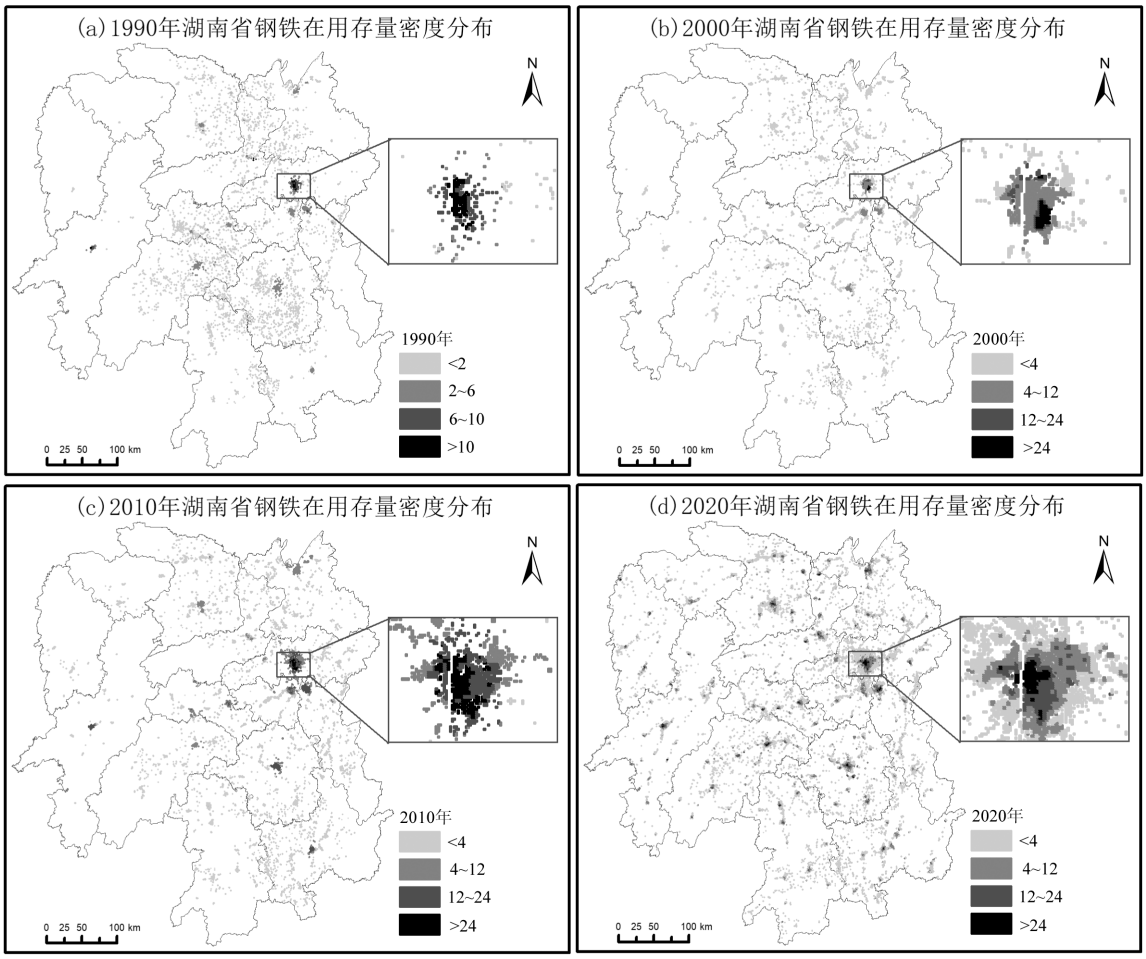


图 10 1990~2020 年湖南省钢铁在用存量(万 t/km^2)空间分布

Fig.10 Spatial distribution of steel in-use stock (ten thousand tons/square kilometers) in Hunan Province from 1990 to 2020

2010 年(图 10(c)),各地区钢铁存量密度进一步发生变化.长沙市中心城区钢铁存量超过 24 万 t/km^2 的区域扩大,周围地区钢铁存量密度在 12~24 万 t/km^2 之间,距离稍远区域及西部部分区域钢铁存量密度在 4~12 万 t/km^2 之间,娄底市西部、湘潭市东北部、株洲市西北部、衡阳市中部、郴州市中部和怀化市中部钢铁存量密度增长至 12~24 万 t/km^2 之间,常德市中部、岳阳市北部、益阳市中部、娄底市中

部和邵阳市东北部区域钢铁存量密度提高至 4~12 万 t/km^2,其余区域钢铁存量密度低于 4 万 t/km^2.期间,湖南省开始重视区域协调发展,出台鼓励钢铁产业向其他城市扩散的政策,引导资源流向周边城市以推动产业梯度转移.使得娄底市等地区钢铁存量密度显著提升,周边城市逐渐崛起,改变了钢铁产业过于集中于核心城市的格局,让其空间分布更趋多样化.地理条件上,交通网络不断完善的城市在这一阶段的钢铁产业发展中获益颇多.郴州市等地区随着交通基础设施逐步完善,物流成本降低,吸引更多相关资源集聚,钢铁存量密度快速增长.而地理条件欠佳、交通改善缓慢的地区,钢铁产业发展仍较滞后,空间异质性差异也变得更复杂.

2020 年(图 10(d)),长沙市中心城区面积扩大明显,近三分之一区域钢铁存量密度超 24 万 t/km^2,呈现以中心为圆心向四周降低趋势,新发展区域钢铁存量密度在 4~12 万 t/km^2,外围区域则低于 4 万 t/km^2,株洲市、衡阳市、郴州市、永州市、邵阳市、怀化市、湘西土家族苗族自治州、常德市、益阳市和岳阳市均出现多个钢铁存量高于 24 万 t/km^2 的区域,高存量区域周边密度则降至 4~24 万 t/km^2,仅张家界市钢铁存量密度最高 12~24 万 t/km^2.党的十八大召开后,随着全省经济高质量发展以及区域协调发展战略深入落实,政策更侧重均衡各城市产业发展,鼓励钢铁产业在多城市形成集聚点,营造良好环境,株洲、衡阳等城市钢铁存量密度显著提升,形成多核心集聚与扩散并存格局.地理条件方面,地形因素仍制约部分地区钢铁产业布局优化,像张家界市受山地地形限制,难以大规模拓展产业布局,其钢铁存量密度在全省处于较低水平.交通网络持续完善的城市间联系更紧密、资源流通更顺畅,进一步促进钢铁产业在不同城市扩散与集聚,使得空间异质性从单一核心城市的集聚向多核心城市的集聚与扩散并存转变,但不同城市之间的钢铁存量密度差异依然显著,同时城市内部也呈现出中心高、外围低的空间分布特征.

3　讨论

不同地区在钢铁总在用存量和人均在用存量的变化,能够精准映射出各地钢铁产业发展水平、资源分布以及经济发展状况的差异.在此背景下,将湖南省与我国整体、福建省、厦门市以及重庆市进行对比(表 5),具有多方面重要意义.

在时间跨度方面,我国钢铁在用存量的时间跨度最长,涵盖了改革开放以来钢铁产业各关键发展节点,为探究宏观因素对钢铁产业影响提供全面视角.福建省时间跨度与我国相近,能对接全国脉络对比分析,清晰展现区域钢铁产业演变历程.重庆市时间跨度约 30a,处于我国经济与产业结构关键变革期,利于挖掘区域经济和钢铁产业内在联系.厦门市的时间跨度为 1980~2015 年,见证了沿海城市经济发展、产业结构优化阶段,有助于剖析其钢铁产业发展模式与地方经济协同关系.

表 5　本文研究结果与其他研究结果对比分析

Table 5　Comparative analysis of the results of this paper with other studies

空间尺度	时间尺度	研究对象	钢铁在用存量(亿 t)	人均钢铁在用存量(t)
全国[33]	1978~2018	建筑、基础设施、交通工具、机械、家用电器共 102 种产品	7~82	0.8~5.9
福建[46]	1978~2016	建筑、基础设施、交通工具、机械设备、耐用品共 78 种产品	0.19~2.9	0.7~7.6
厦门[32]	1980~2015	建筑、基础设施、交通工具、机械设备、家用电器共 55 种产品	0.005~0.1	0.5~4.9
重庆[11]	1985~2014	建筑、基础设施、交通工具、家用电器、农业机械共 51 种产品	0.05~0.59	0.16~1.75
湖南	1990~2021	建筑、基础设施、交通工具、机械设施、耐用品共 74 种产品	0.22~2.63	0.36~3.6

从在用存量来看,我国 1978~2018 年,钢铁在用存量从 7 亿 t 升至 82 亿 t,体现钢铁产业大规模快速发展,反映出我国经济增长对钢铁需求的强劲拉动.福建省 1978~2016 年,从 0.19 亿 t 增长至 2.9 亿 t,增速超全国平均水平,凸显其钢铁产业发展活力与竞争力,体现福建对该产业发展的推动作用.重庆市 1985~2014 年,从 0.05 亿 t 增长到 0.59 亿 t,增长倍数与全国契合,说明其维持着平稳发展节奏,紧跟全国步伐.厦门市 1980~2015 年,从 0.005 亿 t 增长到 0.1 亿 t,城市面积的不足导致钢铁产业规模小,但满足自身的钢铁需求,资源调配较合理.湖南省 1990~2021 年,从 0.22 亿 t 增长到 2.63 亿 t,增长倍数与重庆相近,略低于福建和厦门,反映出湖南省有拓展规模、提升竞争力的发展空间.

从人均在用存量看,1990~2021 年增长约 10 倍,高于全国 7.38 倍和厦门 9.8 倍,显示保障本地需求、提升资源利用效率与扩张产业规模上成效显著.但低于福建 10.86 倍和重庆 10.94 倍,说明在人均资源丰富度和精细化配置方面还有差距,需挖掘潜力,提升竞争力,推动产业高质量发展.

湖南省钢铁存量分布的空间不公平性贯穿始终且不断演变,违背空间正义原则.1990 年长沙中心城区与外围区域钢铁存量密度差异巨大,省会集聚资源致周边发展受限;2000 年核心城市与周边地区钢铁存量增长差异拉大区域差距;2010 年钢铁产业扩散调整下不同地区机会不平等依旧;2020 年多核心格局中不同城市及城市内部钢铁存量密度差异显著,发展不平衡加剧,区域间和城市内部发展失衡问题突出.钢铁产业作为高能耗、高排放行业,其存量变化对区域碳足迹具有显著影响,同时加剧能源结构依赖煤炭、区域环境不平等及政策调控难度等深层次问题.

面对这些情况,提出以下建议:其一,引导钢铁产业向资源相对匮乏且经济发展相对滞后的地区扩展.例如湘西和张家界等地,通过加大对这些区域的政策支持,鼓励钢铁企业投资建设,带动当地经济发展,通过促进钢铁与相关产业的融合,推动产业集群发展,增强区域经济的活力.其二,加快钢铁产业的低碳化转型.政府鼓励钢铁企业投资研发低碳冶金技术,支持碳捕捉与储存技术的应用,同时推动钢铁企业更多地使用可再生能源,如太阳能和风能,替代传统的化石能源,进一步降低碳排放.其三,实施环境影响评估制度,确保钢铁产业项目符合环保要求,加强生态补偿机制,推动受钢铁产业影响地区的生态恢复.此外,加强公众对“双碳”目标和环保的宣传教育,提高全社会的环保意识,促进社会各界支持绿色转型和可持续发展.

4 结论

4.1 湖南省钢铁在用存量在 32a 间迅速增长,从 1990 年的 0.22 亿 t 增长至 2021 年的 2.63 亿 t,总在用存量增长率约 12 倍.其中,建筑行业的贡献度最大,钢铁总在用存量的占比始终在 56%以上,后面依次是:基础设施平均占比 18.41%,机械设施平均占比 10.46%,交通工具平均占比 5.28%,耐用品平均占比 1.58%.人均钢铁存量也从最初的 0.36t/人跃升至 3.6t/人,增长幅度约为 10 倍,反映了湖南省钢铁设施建设的快速发展.

4.2 人口增长、经济发展和建成区面积是湖南省钢铁在用存量持续增长的主要驱动力,其中经济发展的影响力远大于人口增长.技术发展在整个研究期内对钢铁在用存量的增长大部分时间起到负向作用,但其抑制作用在逐渐减小.人口增长和经济发展的正向驱动作用远远大于技术发展的抑制作用,导致湖南省的钢铁总在用存量持续增长.

4.3 湖南省钢铁存量的变化呈现出明显的空间异质性,各个城市的钢铁存量密度与其经济发展水平和城市化进程紧密相关,形成了一个多极化的分布格局.1990~2020 年,湖南省钢铁在用存量的空间分布经历了显著的变化,展现了区域发展的不均衡特征.1990~2000 年,钢铁存量主要集中在长沙市,增长较为缓慢,密度较低,尚未形成大规模的区域集聚效应.2000~2010 年,随着城市化进程的推进,钢铁存量的密度显著增加,湘潭、株洲、衡阳等城市的钢铁存量开始快速增长,形成了除长沙以外的若干重要集聚区域.2010~2020 年,湖南省的钢铁存量范围和数量都有显著提升,多个城市的钢铁存量区域逐步扩大,尤其在长沙市,钢铁密度持续上升.周边城市也出现了不同程度的钢铁存量增长,增长幅度和速度各异,反映出空间资源分配在区域间的差异性和复杂性.

参考文献:

[1] Lingyu Y, Anjian W. Based on material flow analysis: Value chain analysis of China iron resources [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014,91:52-61.

[2] 李强峰,王高尚,成金华,等.1949~2015 年中国铁存量分析 [J]. 中国矿业, 2017,26:111-116,142.
Li Q F, Wang G S, Cheng J H, et al. Analysis of China's iron stocks from 1949 to 2015 [J]. China Mining Magazine, 2017,26(12):111-116, 142.

[3] 王 琳,齐中英,潘 峰.基于动态物质流的钢沉淀运动规律分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014,24(12):164-170.
Wang L, Qi Z Y, Pan F. Pattern analysis of steel anthropogenic precipitation movement based on dynamics flow analysis [J]. China Population, Resources and Environment, 2014,24(12):164-170.

[4] Zhao S, Wang P, Wang L, et al. Quantifying provincial in-use stocks of rare earth to identify urban mining potentials in the Chinese mainland [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,453:142251.

[5] 何朋蔚,彭亚山.城市矿产开发利用:前景、影响因素及管理政策 [J]. 中国矿业, 2023,32(10):1-10.

He P W, Peng Y S. Urban mineral development and utilization: prospects, influencing factors and management policies [J]. China Mining Magazine, 2023,32(10):1-10.

[6] 王　昶,徐　尖,姚海琳.城市矿产理论研究综述 [J]. 资源科学, 2014,36(8):1618-1625.
Wang C, Xu J, Yao H L. A systematic review of urban mining theory [J]. Resources Science, 2014,36(8):1618-1625.

[7] 王　波.湖北省金属矿产资源产业可持续发展研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2003,(4):327-331.
Wang B. Strategies for exploitation of metallic ore resources in Hubei province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003,(4):327-331.

[8] Pauliuk S, Wang T, Müller B D. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2013,71:22-30.

[9] Yue Q, Wang H, LU Z. Quantitative estimation of social stock for metals Al and Cu in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012,22(7):1744-1752.

[10] 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.

[11] 刘仟策,刘立涛,刘　剑,等.重庆市钢铁存量估算及驱动力分析 [J]. 资源科学, 2018,40(12):2341-2350.
Liu Q C, Liu L T, Liu J, et al. In-use iron and steel stock estimation and driving force analysis in Chongqing [J]. Resources Science, 2018,40(12):2341-2350.

[12] Chen Y L, Gong Q U, Shi Y, et al. High-resolution mapping and evolution of steel stocks and waste in civil buildings: a case study of Changsha, China [J]. Environmental science and pollution research international, 2023,30(24):65675-65687.

[13] Liu Q, Cao Z, Liu X, et al. Product and metal stocks accumulation of China's megacities: Patterns, drivers, and implications [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(8):4128-4139.

[14] Chu J, Zhou Y, Cai Y, et al. Flow and stock accumulation of plastics in China: Patterns and drivers [J]. The Science of the Total Environment, 2022,852:158513.

[15] Tan Y, Wang Y, Hu Y, et al. Assessing plastics usage and its drivers from final demand perspectives: A case study from China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,376.

[16] Ggo H, Zhang T. Sinks of steel in China–addition to in-use stock, export and loss [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016,10(1):141-149.

[17] Tanikawa H, Hashimoto S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS [J]. Building Research & Information, 2009,37(5/6):483–502.

[18] Kleemann F, Lederer J, Rechberger H, et al. GIS-based analysis of Vienna's material stock in buildings [J]. Journal of Industrial Ecology, 2017,21(2):368-380.

[19] Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, et al. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO_2 emissions from nighttime satellite imagery [J]. Energies, 2010,12(3):1895-1913.

[20] Yu B, Deng S, Liu G, et al. Nighttime light images reveal spatial-temporal dynamics of global anthropogenic resources accumulation above Ground [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(20):11520-11527.

[21] Song L, Dai S, Cao Z, et al. High spatial resolution mapping of steel resources accumulated above ground in mainland China: Past trends and future prospects [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,297: 126482.

[22] 湖南省统计局.湖南统计年鉴 2023 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:93-435.
Hunan Provincial Bureau of Statistic. Hunan statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023:93-435.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城市建设统计年鉴 2022 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:461-513.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023:461-513.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴 2022 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:45-83.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023:45-83.

[25] 国家统计局人口和就业统计司.中国人口和就业统计年鉴 2023 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:2-12.
Department of Population and Employment Statistics National Bureau of Statistics. China population & employment statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023,2-12.

[26] 国家统计局生态环境部.中国环境统计年鉴(2022) [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:106-108.
National Bureau of Statistics Ministry of Ecology and Environment. China statistical yearbook on environment(2022) [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023:106-108.

[27] 中华人民共和国交通运输部.中国交通运输年鉴(2022) [M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2023:710-12.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The transport yearbook of China(2022) [M]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd, 2023:710-712.

[28] 中国电力年鉴编辑委员会.2023 中国电力年鉴 [M]. 北京:中国电力出版社, 2024:781-816.
Editorial Committee of China Electric Power Yearbook. 2023 China electric power yearbook [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2024:781-816.

[29] 国家统计局.中国统计年鉴 2023 [M].北京:中国统计出版社, 2023:511-540.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistic Press, 2023:511-540.

[30] 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):2351-2359.
Han Z K, Wen B J, Dai T. Temporal and spatial changes of iron stocks in China's housing construction [J]. Resources Science, 2018,40(12): 2351-2359.

[31] 杨沁东,高天明,代　涛.中国公路基础设施钢铁存量差异性分析 [J].

中国矿业, 2020,29(6):34-41.
Yang Q D, Gao T M, Dai T. Analysis of the regional differences of highway steel stocks in China [J]. China mining magazine, 2020,29(6): 34-41.

[32] 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):110-123.

[33] 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.

[34] 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):877-889.

[35] Zhang L, Cai Z, Yang J, et al. Quantification and spatial characterization of in-use copper stocks in Shanghai [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014,93:134-143.

[36] Kissinger M, Karplus Y. IPAT and the analysis of local human–environment impact processes: the case of indigenous Bedouin towns in Israel [J]. Environment, Development and Sustainability, 2015,17(1): 101-121.

[37] Yue T, Long R, Chen H, et al. The optimal CO_2 emissions reduction path in Jiangsu province: An expanded IPAT approach [J]. Applied Energy, 2013,112:1510-1517.

[38] Yu X, Geng Y, Dong H, et al. Sustainability assessment of one industrial region: A combined method of emergy analysis and IPAT (Human Impact Population Affluence Technology) [J]. Energy, 2016, 107:818-830.

[39] 王永刚,王 旭,孙长虹,等.IPAT 及其扩展模型的应用研究进展 [J]. 应用生态学报, 2015,26(3):949-957.
Wang Y G, Wang X, Sun C H, et al. Research progress on the application of IPAT model and its variants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(3):949-957.

[40] 朱宇恩,李丽芬,贺思思,等.基于 IPAT 模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测 [J]. 资源科学, 2016,38(12):2316-2325.
Zhu Y A, Li L F, He S S, et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis [J]. Resources Science, 2016,38(12):2316-2325.

[41] Tian L, Chai J, Zhang X, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration and LMDI decomposition [J]. Energy, 2024, 310:133299.

[42] Li Y, Chen H, Yu P, et al. The Application and Evaluation of the LMDI Method in Building Carbon Emissions Analysis: A Comprehensive Review [J]. Buildings, 2024,14(9):2820.

[43] 杨绍华,张宇泉,耿 涌.基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4817-4826.
Yang S H, Zhang Y Q, Geng Y. An LMDI-based investigation of the changes in carbon emissions of the transportation sector in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Environmental Science, 2022,42(10): 4817-4826.

[44] 李姗姗,费 翔,董洪光,等.基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45:4052-4063.
Li S S, Fei X, Dong H G, et al. Analysis of Carbon Emission Influencing Factors and Forecast in Shanxi Province Based on LMDI and LEAP Model [J]. China Environmental Science, 2025,45:4052-4063.

[45] Meng X, Han J, Huang C. An Improved Vegetation Adjusted Nighttime Light Urban Index and Its Application in Quantifying Spatiotemporal Dynamics of Carbon Emissions in China [J]. Remote Sensing, 2017,9(8):829.

[46] 郝 敏,宋璐璐,代 敏,等.福建省铜、铁、铝城市矿产蓄积量研究 [J]. 资源与产业, 2020,22(6):66-74.
Hao M, Song L L, Dai M et al. Urban mining assessment of copper, iron and aluminum in Fujian province [J]. Resources & Industrues, 2020,22(6):66-74.

作者简介：程 霜(1999-),女,江西上饶人,江西理工大学硕士研究生,主要从事资源与环境等方面的研究.6120230147@mail.jxust.edu.cn.