

中国钢铁足迹的脱钩趋势与演变特征研究*

田欣^{1,2)†} 罗子凡¹⁾ 王化璇¹⁾ 高寒¹⁾ 熊翌灵¹⁾

(1)北京师范大学环境学院, 100875, 北京; (2)北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 100875, 北京)

摘要 钢铁是维持现代社会经济系统运转不可或缺的原材料, 社会经济发展过程引发了对钢铁资源的大量需求, 与此同时, 钢铁的生产与消费也带来环境污染问题, 威胁人民群众健康. 从消费侧视角出发, 探究钢铁足迹的脱钩趋势和演变特征, 对理解我国的钢铁消费需求、提高消费效率具有重要意义. 基于此, 本文采用多区域投入产出分析方法, 核算并分析了 1995—2016 年中国钢铁足迹与经济脱钩趋势, 并揭示了最终需求结构变化对钢铁足迹变化趋势的影响. 结果表明, 1995—2016 年, 我国钢铁足迹总体保持快速增长态势, 并经历了从强脱钩到扩张性耦合、再到弱脱钩的演变过程, 反映了我国不同经济发展阶段的钢铁需求差异. 从最终消费需求结构看: 2016 年我国 73% 的钢铁足迹由投资拉动, 其中建筑业、其他制造业和交通部门贡献了 98% 的投资相关的钢铁足迹; 家庭消费贡献了 14% 的钢铁足迹, 轻工业、其他制造业、交通部门和生活性服务业贡献了约 82% 的家庭消费引发的钢铁足迹. 基于我国钢铁足迹的演变特征与脱钩趋势引导终端钢铁消费结构调整, 逐步推进重点部门以需定产、合理消费, 有助于实现钢铁资源的可持续利用以及与社会经济的协调发展.

关键词 钢铁足迹; 消费侧核算; 多区域投入产出分析; 脱钩分析; 中国

中图分类号 TF089

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021110

0 引言

钢铁是维系社会经济发展的重要原材料, 从铁矿石开采到钢铁的冶炼压延, 进而作为重要的原材料隐含在基础设施、房屋、交通设备, 以及机械产品、耐用品等人类社会经济运行所需的各类产品中, 满足各项社会经济活动的需要. 因此, 钢铁的消费特征也是衡量一个国家和地区发展阶段的重要指标^[1]. 与此同时, 铁矿石的开采、钢铁冶炼压延与钢铁产品消费涉及产业链长, 在其生产、分配、流通、消费过程中的能源需求与碳排放量、大气污染物排放量十分可观, 对环境产生重要影响^[2]. 当前, 我国不仅是全球最大的钢铁生产国, 钢铁表观消费量也居世界第一; 如果进一步考虑隐含在各类产品中的钢铁原材料当量, 我国的实际钢铁需求量将会更高. 在当前钢材消费持续增长和碳达峰、碳中和目标的双重压力下, 钢铁行业也面临新的挑战 and 转型. 基于消费视角, 深入研究并揭示我国钢铁消费需求的演变特征, 及其与社会经济发展之间的关系, 对理解我国钢铁消费规律、引导合理与高效消费、促进钢铁行业转型和实现碳达峰、

碳中和目标具有重要的意义.

“足迹”是从消费视角全面量化各项人类活动、或某一产品引发的、直接与间接资源消耗与环境影响的重要概念. 20 世纪 90 年代以来, 足迹的概念便被引入环境核算中^[3]. 近年来, 人们从消费视角对生态足迹、水足迹、土地足迹、碳足迹、生物多样性足迹以及物质足迹等开展了广泛的研究^[4]. 其中, 物质足迹被定义为从原材料提取到最终消费的整个供应链中所需的原材料当量总和^[5].

物质足迹可以较好地反映消费活动引发的原材料消耗, 多数研究采用多区域投入产出分析方法^[6]来核算各个国家和地区^[7-8]的物质足迹. 例如: Buhl 等^[9]核算了德国社会经济特征对家庭物质足迹的影响, 以及不同消费种类的物质足迹构成之间的相关性. Jiang 等^[10]核算了我国各省份分行业的物质足迹, 发现我国一些省份的物质足迹相当于中等收入国家, 物质脱钩的证据有限; 物质开采水平高的低收入国家或地区由于物质强度高得多, 其人均物质足迹可能与我国发达省份水平相近. 此外, 也有部分学者聚焦特定的物质种类, 如金属等, 研究金属足迹问题. 其中: Wiedmann

* 基于贸易关联的中国循环经济实施效果综合评价与全球影响研究项目; 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLU RE2020-2-6)

† 通信作者: 田欣, 女, 副教授, 博士生导师. 研究方向: 生态环境管理. E-mail: tianx@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-06

等^[11]从消费视角,研究了铁矿石和铝土矿的供需模式,分析了这 2 种重要金属矿石的资源生产力变化趋势,并解析了各国单位金属足迹的经济效益;Zheng 等^[12]评估了金属足迹的短期驱动因素,发现了人均国民生产总值(简称 GDP)和人均金属足迹的强耦合关系,并识别了金属足迹对投资的高度敏感性;Zheng 等^[13]还研究了 1995—2013 年金属消费强度效应、生产结构效应、类别效应、消费模式效应和消费总量效应对金属足迹的驱动效果;Vivanco 等^[14]计算了全球主要经济体的稀缺加权的土地足迹和金属足迹,并发现国际贸易是一些发展中国家和地区土地和金属耗竭的主要驱动因素。

以上研究表明,现有研究主要围绕有关物质足迹的核算与驱动因素等方面开展,但很少有从消费需求与结构上对钢铁这一特定金属开展深入研究.本研究在物质足迹概念基础上,进一步引入“钢铁足迹”的概念,用于表征满足国家或地区最终消费需求所引发的铁矿石当量.本文采用多区域投入产出分析方法,核算了 1995—2016 年全球 49 个国家 163 个部门之间的贸易隐含铁矿石流动量,在此基础上核算了我国的钢铁足迹,并进一步分析了我国钢铁足迹与社会经济发展的关系,探究了最终消费需求结构对钢铁足迹的贡献与影响,为经济转型下我国钢铁行业的消费侧结构性改革和未来发展提供决策依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 基于多区域投入产出分析的钢铁足迹核算方法

经济学家 Leontief 提出了投入产出分析方法^[15],该模型系统刻画了经济系统内各部门间的依赖关系,反映了各部门生产活动的直接和间接关联。

环境扩展的多区域投入产出分析基本表达式为

$$f = \widehat{F}(I - A)^{-1}Y, \quad (1)$$

式中: I 是单位矩阵; A 为直接投入系数矩阵; Y 为最终需求矩阵; $(I - A)^{-1}$ 即 Leontief 逆矩阵,通常简称为 L ,表示满足单位最终需求所需的直接消耗与间接消耗之和; F 表示单位产出的铁矿石开采量,用向量表示, \widehat{F} 为 F 向量的对角化方阵。

钢铁足迹从消费的视角核算了为满足最终消费所需的产品与服务所消耗的铁矿石当量,其计算式为

$$IF_j^k = \sum_{i,m} F_i^k L_{ij}^{im} Y_j^{mk} + \sum_{i,m,r \neq k} F_i^r L_{ij}^{im} Y_j^{mk}. \quad (2)$$

钢铁足迹可分为最终消费引发的本地开采量和外地开采量 2 部分.式(2)右侧第 1 部分表示 k 地区最终消费所引发的本地铁矿石开采量,第 2 部分代表

k 地区最终消费引发的外地铁矿石开采量.其中: IF_j^k 为 k 地区消费 j 部门产品引发的钢铁足迹; F^k 和 F^r 代表 k 地区和 r 地区单位总产出的铁矿石开采量; L_{ij}^{km} 和 L_{ij}^{rm} 表示 m 地区 j 部门对 k 地区和 r 地区 i 部门的完全需求系数; Y_j^{mk} 代表 k 地区对 m 地区 j 部门提供的最终产品与服务的最终需求量.值得注意的是,本文中钢铁足迹的计算来源于铁矿石的开采量,代表着满足最终需求所需要的铁矿石量.由于本文采用的数据库缺乏不同铁矿石品位和含铁量的数据,本文计算的钢铁足迹并未考虑铁矿石含铁量不同带来的影响。

1.2 脱钩分析 “脱钩”是指在社会经济发展进程中,物质及能量消耗随着经济发展而减少的情景^[16].这一概念常用于研究资源消耗、环境压力与经济增长之间的耦合关系,能够综合反映环境压力与经济发展之间的敏感程度^[17].根据现有的研究结果,大致存在 2 种形式的脱钩,即相对脱钩(弱脱钩)和绝对脱钩(强脱钩)^[18].就资源而言,相对脱钩指资源消耗随着经济增长而增加,但增速小于经济增长;绝对脱钩指资源消耗伴随经济增长而减少.针对不同的经济发展程度和资源消耗程度,脱钩又可以细分为 8 种类型.本文采用 Tapio 脱钩模型,评估不同时期钢铁足迹与经济增长之间的脱钩关系,具体计算公式^[19]为

$$C_{DE} = \frac{(F_{1,t} - F_{1,t-1})/F_{1,t}}{(G_{DP,t} - G_{DP,t-1})/G_{DP,t}}, \quad (3)$$

式中: C_{DE} 为脱钩弹性系数,代表脱钩程度; F_1 代表人均钢铁足迹(t); G_{DP} 代表人均 GDP(千欧元); t 、 $t-1$ 代表年份.脱钩程度的判断如表 1 所示^[19].

表 1 Tapio 脱钩程度判断

脱钩类型	人均GDP 年增长率	人均钢铁足迹 年增长率	脱钩系数 C_{DE}	脱钩状态
负脱钩	<0	<0	(0, 0.8)	弱负脱钩
	>0	>0	>1.2	增长负脱钩
脱钩	<0	<0	>1.2	衰退性脱钩
	>0	<0	<0	强脱钩
耦合	>0	>0	(0, 0.8)	弱脱钩
	<0	<0	(0.8, 1.2)	衰退性耦合
	>0	>0	(0.8, 1.2)	扩张性耦合

1.3 数据来源 本文采用了全球多区域投入产出数据库 EXIOBASE 3.7 版本^[20].该数据库涵盖了 1995—2016 年包括我国在内的全球 49 个国家和地区 163 个社会经济部门的地区间投入产出数据及资源环境卫星账户数据.此外,本文使用的国家人口数据来自联

联合国人口司经济和社会事务部 2019 年发布的人口数据 (United Nations, 2019)。考虑到钢铁足迹的消费特点, 本文将 163 个部门合并为代表性的, 包括农林牧渔业, 采掘业, 轻工业, 能源加工制造业, 资源相关产业, 其他制造业, 交通运输及制造业, 废弃资源综合利用业, 电力、燃气及水生产和供应业, 建筑业, 生活性服务业, 生产性服务业, 废弃物处理业等共 13 个部门。

2 主要结果

2.1 我国钢铁足迹的脱钩程度分析

根据 1.1 中的定义, 钢铁足迹反映了最终消费需求引发的所有直接和间接的铁矿石当量。与之对应, 钢铁表观消费量反映的是直接的铁矿石消费量, 是本地铁矿石开采量与铁矿石净进口量的加和。图 1 展示了 1995—2016 年我国钢铁足迹与钢铁表观消费量的变化趋势。结果显示: 2002 年以前, 钢铁足迹和钢铁表观消费量的增长趋势较为接近, 且表观消费量始终低于钢铁足迹, 约为钢铁足迹的 1/2; 2003—2009 年, 钢铁足迹与钢铁表观消费量均呈现快速增长, 且二者之间的差异呈扩大趋势; 2010 年之后, 钢铁足迹持续快速增长, 与表观消费量的差异逐渐增大, 二者的差异反映出钢铁表观消费量低估了我国社会经济发展对钢铁资源的实际需求。钢铁足迹体现了全社会消费引发的、基于产业链累积的全部铁矿石当量, 因而更能反映出我国当前社会经济发展阶段对钢铁资源的实际需求情况。

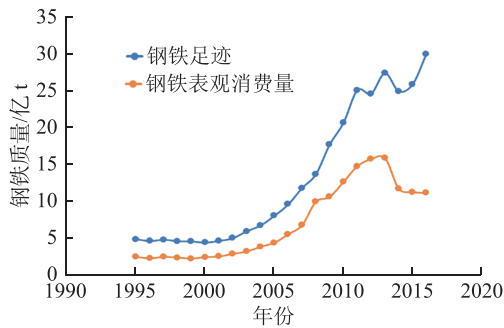


图 1 我国钢铁足迹与钢铁表观消费量的变化趋势

进一步分析我国钢铁足迹与经济发展之间的关系, 如图 2 所示, 伴随着经济的高速发展, 我国人均钢铁足迹也呈现快速增长的趋势, 从 1995 年的 0.39 t 增长到 2016 年的 2.08 t。结合表 1 脱钩分析结果, 我国钢铁足迹的演变过程大致可以划分为 3 个阶段 (见表 2): 第 1 个阶段是 1995—2002 年的保持平稳阶段, 在这一阶段我国的人均 GDP 一直处于较高水平的增长态势, 但人均钢铁足迹增长停滞, 甚至出现了负增长的趋势, 从而使得钢铁足迹与经济发展呈现强脱钩态势; 第 2 个阶段是 2003—2011 年的快速增长阶段,

这一阶段我国钢铁足迹与经济增长的 C_{DE} 达到 1.13, 反映了我国人均钢铁足迹的年增长率远高于人均 GDP, 说明我国的钢铁足迹与经济发展呈现扩张性耦合态势, 显示出我国经济发展对钢铁资源的强劲需求; 第 3 个阶段是 2012—2016 年的波动增长阶段, 这一阶段我国钢铁足迹的 C_{DE} 为 0.616, 属于弱脱钩状态, 说明钢铁足迹伴随经济发展持续增长, 但增速略低于经济增长, 反映了钢铁消费和经济增长之间的关系较上一阶段相对缓和。

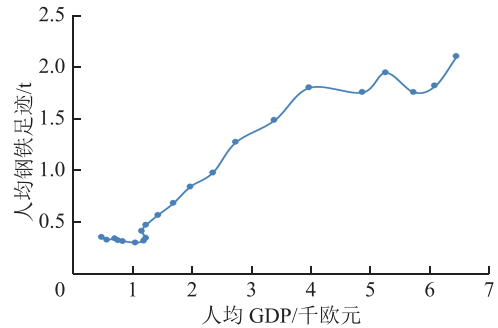


图 2 我国人均钢铁足迹与经济发展之间的关系

表 2 我国钢铁足迹演变阶段与脱钩特点

时间阶段	人均GDP 增长率	人均钢铁足迹 年增长率	脱钩 弹性系数	脱钩程度
保持平稳阶段 (1995—2002年)	0.148	-0.003	-0.022	强脱钩
快速增长阶段 (2003—2011年)	0.169	0.190	1.127	扩张性耦合
波动增长阶段 (2012—2016年)	0.073	0.045	0.616	弱脱钩

进一步将我国的钢铁足迹、经济发展水平与典型发达国家与发展中国家进行比较 (表 3)。结果表明, 1995 年我国的经济发展水平和人均钢铁足迹均处于较低水平; 与美国相比, 我国人均 GDP 仅为美国的 2.26%, 但人均钢铁足迹却达到美国的 49%。与此同时, 我国人均钢铁足迹与人均 GDP 的比值约为 0.78, 远高于同年美国、澳大利亚和印度的水平。这反映了我国粗放发展模式下较低的资源利用水平, 进而引发对钢铁资源的强劲需求, 拉高了钢铁足迹。2016 年, 我国人均钢铁足迹与人均 GDP 的比值降为 0.33, 尽管距离美国 0.04 的水平仍有较大差距, 但与 1995 年相比已经显著下降。这一年, 我国的人均钢铁足迹已经超过美国, 但人均 GDP 仅为美国的 15% 左右, 进一步反映了我国钢铁足迹增长过快的现状。

2.2 我国钢铁足迹的需求结构演变特点

图 3 展示了 1995—2016 年我国最终消费需求结构对人均钢铁足迹的影响。自 1996 年以来, 我国人均钢铁足迹结构中投资的贡献占据绝对主导地位, 年平均占比约 72.9%,

表 3 典型国家人均 GDP 和钢铁足迹对比

国家	年份	人均GDP/ 千欧元	人均钢铁 足迹/t	人均钢铁足迹与人均GDP 比值/(t·(千欧元) ⁻¹)
中国	1995	0.5	0.39	0.78
	2016	6.3	2.08	0.33
美国	1995	22.1	0.80	0.04
	2016	42.4	1.52	0.04
澳大利亚	1995	16.7	4.55	0.27
	2016	47.9	18.95	0.40
印度	1995	0.3	0.08	0.27
	2016	1.3	0.22	0.17

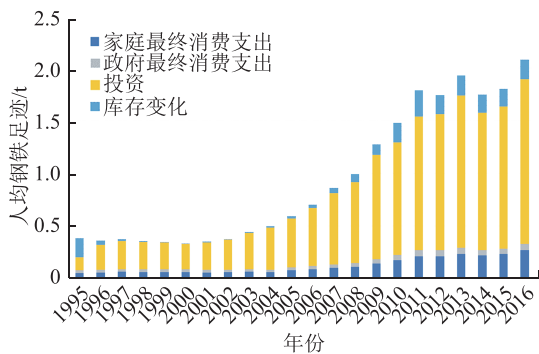


图 3 1995—2016 年我国最终需求种类的钢铁足迹贡献

反映了投资在拉动经济增长的同时,对我国钢铁足迹的拉动作用也十分显著。

结合钢铁足迹的发展阶段特征,在第 1 阶段,即 2002 年以前,我国钢铁足迹变化幅度较小,4 类最终消费需求均呈现小幅波动;1995—1998 年,投资引发的人均钢铁足迹从 0.12 t 上升到 0.26 t,但同期库存波动所引发的钢铁足迹下降,抵消了这一上涨趋势,使得钢铁足迹总体呈现平稳态势。

在第 2 阶段,各类最终消费需求拉动的钢铁足迹均呈现快速增长趋势。其中:投资仍保持最大的贡献占比,约为 75%;其次是家庭消费,占比约为 12%。具体来说,投资引发的钢铁足迹从 2003 年的人均 0.34 t 增长至 2011 年的人均 1.27 t,年平均增长率 18%。同期家庭消费引发的钢铁足迹也呈现较快的增长态势,从 2003 年的人均 0.07 t 增长至 2011 年的人均 0.21 t,年均增速 15%。

进入第 3 阶段,我国人均钢铁足迹呈现波动中上升的态势,从 2012 年的 1.74 t 增长至 2016 年的 2.08 t。其中 2014 年我国人均钢铁足迹出现了明显的回落,4 种最终消费需求均呈现负增长,这一现象可能受我国进入经济发展“新常态”后经济增速放缓、经济结构调整、投资削减等因素影响,钢铁消费需求也有所

降低。尽管这一阶段人均钢铁足迹有所波动,但仍处于增长态势。

2.3 投资的钢铁足迹演变特征分析 在最终消费需求结构中,投资对钢铁足迹的贡献占据了绝对主导地位,进一步在部门尺度探究投资引发的钢铁足迹结构特点,结果如图 4 所示:2002 年以前投资对钢铁足迹的贡献中约 70% 来自建筑业;2003 年之后,其他制造业(以金属和仪器制造业为主)和交通部门的贡献占比迅速增加,占比从 34% 增长到 2011 年的 47%,与此同时,建筑部门的贡献占比有所下降,但其贡献的人均钢铁足迹仍然保持着年均 14.8% 的稳定上升速度,并从 2003 年的 0.23 t 增长至 2011 年的 0.65 t。这一现象反映了我国产业多元化发展带来新的钢铁需求,逐渐打破了建筑部门独大的局面;2012 年以后,投资结构趋于稳定,贡献最大的建筑业人均钢铁足迹相对平稳并在 0.64 t 左右波动,其他制造业和交通部门钢铁足迹增速减缓,仅呈现小幅增加,2016 年,投资引发的钢铁足迹结构基本稳定,即以建筑业(占比 43%)、其他制造业(占比 35%)和交通部门(占比 19%)为主,并分别贡献了 0.68、0.56 和 0.30 t 的钢铁足迹。

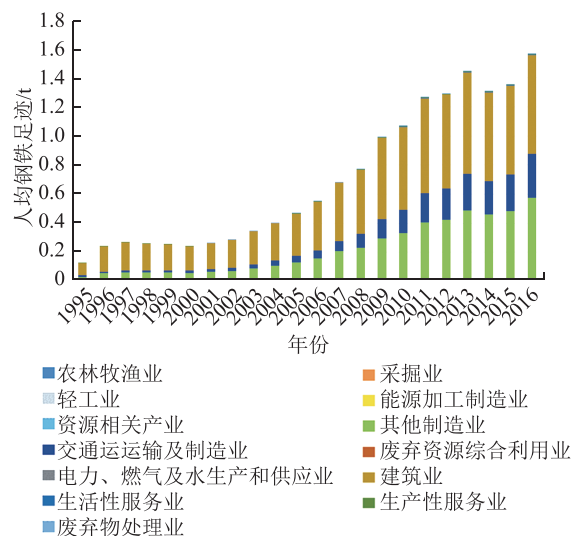


图 4 1995—2016 年投资引发的人均钢铁足迹部门结构变化趋势

2.4 家庭消费的人均钢铁足迹演变特征分析 进一步分析家庭消费对钢铁足迹的影响(见图 5),结果表明:轻工业、生活性服务业、交通运输及制造业和其他制造业对家庭消费的钢铁足迹贡献最大,总占比平均约为 82.4%。具体来说,1996 年之前轻工业的贡献最高,年均贡献约为 0.02 t,平均占比 19.3%,且之后仍维持在相对较高的水平,这一结果反映了我国食品饮料、烟草、纸张、塑料、橡胶等轻工业产品消费中

隐含的铁矿石当量。1996年之后,生活性服务业在家庭消费引发的钢铁足迹中年平均贡献最大,2016年增长至0.07 t。交通运输及制造业对家庭消费钢铁足迹的贡献率保持增长趋势,从2001年的8.5%左右增长至2016年的20.9%左右(约0.06 t)。其他制造业对家庭消费钢铁足迹的贡献自2004年开始大幅增长,年均增速11.6%,并于2016年达到0.05 t。

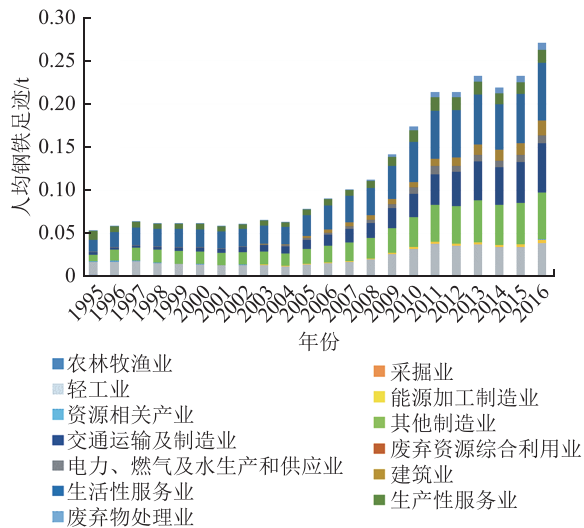


图5 1995—2016年家庭消费引发的人均钢铁足迹部门结构变化趋势

总体来看,2016年各部门对家庭消费钢铁足迹的贡献格局趋于稳定。根据贡献分类,大致可将家庭消费分为4大类:1)轻工业和生活性服务业,贡献了48%的家庭消费钢铁足迹;2)交通运输及制造业和其他制造业,二者贡献了约34%的家庭消费钢铁足迹;3)电力、燃气及水生产和供应业,建筑业,生产性服务业,共贡献了14%的钢铁足迹;4)其他行业,约贡献了4%的钢铁足迹。

3 讨论与建议

本研究结果表明,1995—2016年我国的钢铁足迹从强脱钩逐渐转变成扩张性耦合和弱脱钩。从发达国家的经验来看,“足迹”与经济发展之间的脱钩关系通常会经历耦合(负脱钩)—弱脱钩—强脱钩的变化过程^[21]。我国钢铁足迹的脱钩趋势与此规律不同,反映了我国钢铁足迹发展的特点,这与我国特定的社会经济发展阶段及其钢铁需求密切相关。1995—2002年,尽管我国已经处于经济高速增长阶段,但经济和消费结构特征使得钢铁资源消费水平并未呈现同步增长。其中,投资引发的钢铁足迹相对平稳是造成这一现象的主要原因。具体到投资结构,这一时期的投资重点领域主要是建筑业和其他制造业,住房和基础

设施建设仍处于起步阶段,工业化进程也尚处在工业化中期阶段^[22],因此这一时期的钢铁资源需求增幅有限,从而实现了钢铁足迹与经济发展维持在强脱钩水平。2003—2011年,我国的经济发展与钢铁足迹均进入高速增长阶段,先前的强脱钩的态势很快便向扩张性耦合转变。这一阶段的钢铁足迹增长的主要驱动仍然来自投资,但投资结构和强度有了较大变化。其中:建筑业、交通运输及制造业以及其他制造业仍然是投资的重点;“十五”时期提出的“促进固定资产投资、加强基础设施建设、健全综合交通体系、大力振兴装备制造业”等政策^[23],使得这些部门对钢铁资源的需求快速增长。进一步从细分领域看:住宅的商品化改革、商业建筑的快速发展、高铁等交通基础设施建设的钢铁资源消费强度有所提高^[24-25],引发了更大的钢铁资源需求;工业化进入后工业化阶段,装备制造业和电子、信息产品制造业的发展产生了对钢铁的大量需求^[26]。因此,在这一阶段,我国钢铁足迹与经济发展很快转变为扩张性耦合关系,2011—2016年,随着我国经济发展进入新常态,钢铁足迹与经济发展的关系也由上一阶段的扩张性耦合转变为弱脱钩。尽管这一时期钢铁足迹的主要驱动力仍然是投资,但是投资规模和强度已经出现了增速放缓趋势^[27-28]。在这一时期,我国正处于“三期叠加”的状态,面临着经济增速下滑的压力,房地产、汽车、机械制造等领域对钢铁的需求增速也在大幅下降^[29]。虽然投资的重点仍然是建筑业和其他制造业,但“十二五”期间提出的“改造提升制造业,优化结构、改善品种质量、增强产业配套能力、淘汰落后产能”^[30]等一系列的政策有效平衡了钢铁行业的供需关系,钢铁需求也逐渐趋于平稳。

未来,在经济发展以实现结构调整、转变发展方式为目标的情况下,钢铁需求的总量预计会达到峰值并趋于稳定^[31];投资放缓趋势将会使其对钢铁足迹的拉动效应逐渐弱化,这也会在一定程度上抑制钢铁的消费需求,但是钢铁足迹仍然面临着上升压力。一方面,我国的建筑行业,包括基础设施建设(铁路建设、公路建设、交通建设以及能源建设)等将持续推进较大规模的在建项目^[32];另一方面,制造业,包括机械、船舶、汽车以及轻工家电等也将对钢铁消费起到拉动作用^[33]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》(简称“十四五”规划)中提出在生产侧“推动钢铁的布局优化与结构调整”“推进钢铁行业绿色化改造”,同时提出在消费侧“优化投资结构,提高投资效率,保持投资合理增长”^[32]。综上,预计优化生产和消费结构、提高

资源利用效率、节约原材料使用等手段将对推动实现钢铁资源的节约,减少铁矿石使用量,促进钢铁消费结构转变,从粗放型发展模式迈向实现循环经济、高效率的发展模式发挥积极作用,遏制我国钢铁足迹的快速增长。在“碳达峰”“碳中和”的目标之下,同样需要加强钢铁行业监管力度,达到“低碳减量”,实现“高效率、低足迹”的产业生态,迈向“强脱钩”的目标。

4 结论

本文采用多区域投入产出分析方法核算了我国 1995—2016 年的钢铁足迹,在此基础上剖析了我国钢铁足迹的演变规律以及与经济发展的脱钩关系,并通过对钢铁足迹最终消费结构的分解,揭示了我国钢铁消费需求的结构特征,为从维系社会经济系统所需的铁矿石当量角度全面理解我国社会经济发展的钢铁资源需求特点、推动我国需求侧改革和钢铁行业转型提供了实证基础。

1)我国人均钢铁足迹整体上呈现出快速增长的趋势,其演变过程经历了强脱钩—扩张性耦合—弱脱钩 3 个阶段。与发达国家相比,我国的钢铁消费效率仍处于较低水平,但差距随着我国社会经济的高速发展而缩小。

2)我国最终消费需求对钢铁足迹的拉动效应在第 1 阶段(1995—2002 年)呈现平稳的态势,在第 2 阶段(2003—2011 年)快速增强,并在第 3 阶段(2012—2016 年)呈现出波动上升的趋势。

3)从最终需求结构看,投资始终占据绝对主导地位,年平均占比达到 72.9%,其中超过 95% 的贡献来源于建筑业、其他制造业和交通运输及制造业。家庭消费贡献了约 20% 的钢铁足迹,其结构更为多元,轻工业、交通运输及制造业、其他制造业和生活性服务业占主导地位,平均总占比达到 82.4%。

4)未来我国仍将面临钢铁足迹上升的压力。有必要加强对我国钢铁资源消费需求的引导,进一步强化需求侧改革,尤其是投资引发的钢铁消费需求。同时,需要通过加强政策监管、大力推行循环经济等方式改变粗放的消费模式,实现钢铁资源的可持续利用以及与社会经济的协调发展,迈向“强脱钩”。

综上,本文对钢铁足迹演变规律及特征的探讨可对中国钢铁行业的消费侧改革提供参考,本文的研究方法也可应用于我国的其他行业以及其他国家。在未来的研究中,更小尺度上的分解与更大尺度上的物质贸易流动将成为深入探究钢铁资源需求驱动因素和时空格局分布的重要方向。

5 参考文献

- [1] XU B, LIN B Q. Assessing CO₂ emissions in China's iron and steel industry: a dynamic vector autoregression model[J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 375
- [2] LUO Z H, TANG L X. Low carbon iron-making supply chain planning in steel industry[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(47): 18326
- [3] GENG Y, ZHANG L M, CHEN X D, et al. Urban ecological footprint analysis: a comparative study between Shenyang in China and Kawasaki in Japan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 75: 130
- [4] HOEKSTRA A Y, WIEDMANN T O. Humanity's unsustainable environmental footprint[J]. *Science*, 2014, 344(6188): 1114
- [5] ČUČEK L, KLEMEŠ J J, KRAVANJA Z. Overview of environmental footprints[M]/KLEMEŠ J J. *Assessing and measuring environmental impact and sustainability*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 131-193
- [6] LUTTER S, GILJUM S, BRUCKNER M. A review and comparative assessment of existing approaches to calculate material footprints[J]. *Ecological Economics*, 2016, 127: 1
- [7] GILJUM S, BRUCKNER M, MARTINEZ A. Material footprint assessment in a global input-output framework[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(5): 792
- [8] SCHOER K, WEINZETTEL J, KOVANDA J, et al. Raw material consumption of the European union-concept, calculation method, and results[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8903
- [9] BUHL J, LIEDTKE C, TEUBLER J, et al. The material footprint of private households in Germany: linking the natural resource use and socioeconomic characteristics of users from an online footprint calculator in Germany[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, 20: 74
- [10] JIANG M, BEHRENS P, WANG T, et al. Provincial and sector-level material footprints in China[J]. *Proceedings of the National Academy Sciences*, 2019, 116(52): 26484
- [11] WIEDMANN T O, SCHANDL H, MORAN D. The footprint of using metals: new metrics of consumption and productivity[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2015, 17(3): 369
- [12] ZHENG X Z, WANG R R, WOOD R, et al. High sensitivity of metal footprint to national GDP in part explained by capital formation[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4): 269

- [13] LIU B Y, ZHENG X Z, ZHANG Q, et al. Drivers of global metal footprint during 1995-2013[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120467
- [14] FONT VIVANCO D, SPRECHER B, HERTWICH E. Scarcity-weighted global land and metal footprints[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 323
- [15] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1936, 18(3): 105
- [16] RUEFING K. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[J]. *Sustainability Indicators*, 2007: 211
- [17] VEHMAS J, KAIVO-OJA J, LUUKKANEN J. Global trends of linking environmental stress and economic growth: total primary energy supply and CO₂ emissions in the European Union, Japan, USA, China, India and Brazil[M]. Turku: Turku School of Economics and Business Administration, 2003
- [18] VADÉN T, LÄHDE V, MAJAVA A, et al. Raising the bar: on the type, size and timeline of a ‘successful’ decoupling[J]. *Environmental Politics*, 2021, 30(3): 462
- [19] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137
- [20] STADLER K, WOOD R, BULAVSKAYA T, et al. EXIOBASE 3: developing a time series of detailed environmentally extended multi-regional input-output tables[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(3): 502
- [21] ZHANG M, LI H, SU B, et al. Using a new two-dimensional decoupling model to evaluate the decoupling state of global energy footprint[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102461
- [22] 张训毅. 新中国钢铁工业崛起历程回顾[J]. *中国钢铁业*, 2021(4): 20
- [23] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十个五年计划纲要[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2001(3): 182
- [24] 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
- [25] WANG T, ZHOU J, YUE Y, et al. Weight under steel wheels: material stock and flow analysis of high-speed rail in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(6): 1349
- [26] 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
- [27] 李拥军. 2015年钢铁工业固定资产投资情况分析[J]. *中国钢铁业*, 2016(5): 13
- [28] 李拥军. 2016年钢铁工业固定资产投资情况分析[J]. *中国钢铁业*, 2017(5): 13
- [29] 陈玉千. 2015年钢铁行业运行状况分析[J]. *冶金财会*, 2016, 35(2): 4
- [30] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要: 2011年3月14日第十一届全国人民代表大会第四次会议批准[N]. *人民日报*, 2011-03-17(1)
- [31] 达春娟, 王建平. 浅谈钢铁工业发展趋势[J]. *浙江冶金*, 2020(1): 12
- [32] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[N]. *人民日报*, 2021-03-13(1)
- [33] 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

Decoupling trends and patterns in China’s steel footprint

TIAN Xin^{1,2)†} LUO Zifan¹⁾ WANG Huaxuan¹⁾ GAO Han¹⁾ XIONG Yiling¹⁾

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

2) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Steel is an essential element in modern socio-economic systems. Socio-economic development leads to great demands for steel resources, while production and consumption of steel has brought about environmental pollutions and threatened human health. Therefore, it is important to explore evolutionary characteristics of steel demand from a consumption-based perspective to understand steel consumption patterns in China. In this study multi-regional input-output model was used to estimate China’s steel footprint from 1995-2016, to analyze its evolution

pattern and decoupling relationship with economic development, and impact of changing final demand structure on trends of steel footprint. From 1995-2016, China's steel footprint was found to maintain a rapid growth trend and experience an evolutionary process from strong decoupling to expansive coupling to weak decoupling. Considering the structure of final consumption demand in 2016, investment was found to contribute 73% of the steel footprint. Household consumption was the second largest with a share of 14%. In terms of consumption categories, construction, other manufacturing, and transportation sectors triggered 98% of the steel footprint related to investment. Light industry, other manufacturing, transportation and living services dominated the steel footprint triggered about 82% by household consumption. Decoupling trends and patterns of steel footprint in China could be used to optimize steel consumption structure and promote demand-driven production in key sectors, to achieve sustainable consumption of steel for "strong decoupling".

Keywords steel footprint; consumption based accounting; multi-regional input-output analysis; decoupling analysis; China

【责任编辑:武佳】

切莫混淆“—”和“~”的使用场合

在科技书刊和论文写作指导书甚至有些国家标准中,表示数值或量值时,混淆一字线“—”和浪纹线“~”的错误比比皆是;而且科技书刊中的误用,根源往往在于某些标准和写作指导书的误导.笔者认为很有必要对此进行正本清源.

某指导科技论文规范写作与编辑的图书说:“表达量值范围用浪纹线连接号‘~’或一字线连接号‘—’.例如:1.2~2.4 kg·m/s(或1.2 kg·m/s~2.4 kg·m/s),1.2—2.4 kg·m/s(或1.2 kg·m/s—2.4 kg·m/s)均是正确的表示.”“‘~’和‘—’的选用也无硬性规定,但在英文表达中通常不用‘~’.”意思是说因为没有相关标准对连接号“~”和“—”的使用作出“硬性规定”,所以可以任意选用.很遗憾,这一“指导”是错误的.(顺便提示:英文标点符号中连接号没有“~”,因此说“通常不用‘~’”(即也可以用)是不准确的,正确的表述应为“在英文表达中不应使用‘~’”.)

上述指导书的错误很明显源于GB/T 15835—2011《出版物中数字用法》:“在表示数值的范围时,可采用浪纹线连接号‘~’或一字线连接号‘—’.”例如“-36~-8℃”“100—150kg”.

再进一步溯源,GB/T 15835—2011的这一条款可能源于对GB/T 15834—2011《标点符号用法》中条款“4.13.3.2 标示下列各种情况,一般用一字线,有时

也可用浪纹线.”的错误引申.确实这一条款对“—”和“~”使用场合分工的表述比较含糊,“有时也可”容易让人误解成这2个连接号可以任意选用;但如果结合其细列出的条款及示例,则可以清晰地作出正确的判断:“标示相关项目(如时间、地域等)的起止”,用“—”,如“沈括(1031—1095)”“北京—上海特别旅客快车”;“标示数值范围(由阿拉伯数字或汉字数字构成)的起止”,用“~”,如“25~30g”“第五~八课”.

关于“~”的使用,GB/T 15834—2011的条款完全符合GB/T 3102.11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》的规定:“~”为数字范围符号,如“ $a \sim b$ ”,“这里的 a 和 b 为不同的实数,例如5~10表示由5至10”.GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》中,所有的量值(数值)范围号全部采用了“~”.

综上所述,可以清晰得出如下结论:在出版物特别是科技书刊中,凡标示数值(量值)范围的起止,应采用“~”;标示时间(非物理量)、地域、方位(如北东—南西走向)等相关项目的起止,应采用“—”.在编校实践中,《北京师范大学学报(自然科学版)》始终遵守这一规则,严格区分“—”和“~”的使用场合.

此外,建议尽快修订存在此类错误或其表述可能造成歧义的相关标准. (陈浩元)