

引用格式: 刘妍心, 李华姣, 安海忠, 等. 基于“废钢回收”的中国钢铁产业链资源-经济-环境动态耦合[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 588-600. [Liu Y X, Li H J, An H Z, et al. Dynamic coupling of the resource-economic-environment systems of China's steel industrial chain based on scrap steel recycling[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 588-600.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.15

基于“废钢回收”的中国钢铁产业链 资源-经济-环境动态耦合

刘妍心^{1,2,3}, 李华姣^{2,3}, 安海忠^{2,3}, 管建和⁴, 刘 宁⁵,
韩晓丹^{2,3}, 李 超⁶, 史江兰⁷

(1. 首都经济贸易大学管理工程学院, 北京 100070; 2. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083; 3. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083; 5. 山东工商学院经济学院, 烟台 264005; 6. 河北大学质量技术监督学院, 保定 071002; 7. 河北大学管理学院, 保定 071002)

摘 要: 为推动循环经济加快转型升级, 评估钢铁产业链“资源-经济-环境”耦合对实现可持续发展具有积极意义。本文基于生命周期评估和能值核算构建了耦合系统模型, 从产品、企业、行业层面分析了中国钢铁产业链耦合机制, 结合废钢回收率讨论并识别了影响各层面主体耦合的关键驱动政策, 以为行业管理者提供参考依据。结果表明: ①中国钢铁产业链主体的耦合协调度具有明显差异, 总体呈现下游>中游>上游的分布规律; ②资源-经济-环境系统中影响产业链耦合的主导因素是资源-经济维度; ③随着废钢回收率的显著提高, “去产能”“技术进步”“提高资源利用率”政策可对钢铁产业链不同类别主体的耦合产生积极影响。为提高中国钢铁产业链韧性及抗风险能力, 本研究从多类别主体角度为产业链综合发展提出有针对性的政策建议。

关键词: 钢铁产业链; 资源-经济-环境; 耦合协调度; 政策模拟; 废钢回收

DOI: 10.18402/resci.2021.03.15

1 引言

随着城市化的不断推进, 钢铁工业在快速发展的同时消耗了大量资源, 也对生态环境产生了影响^[1,2]。作为钢铁工业的主要废弃物, 废钢在中国的产量逐年增加^[3]。但由于循环体制尚不成熟^[4], 目前废钢回收率仅为19%^[5]。因此, 为了推动钢铁产业链可持续发展, 有必要对产业链中资源、经济、环境耦合关系及废钢回收率可能造成的潜在影响进行研究。

近年来学者们对钢铁产业链的资源、经济、环境间关系展开了广泛研究, 并取得了丰富成果。如对钢铁产业链相关产品、企业、行业主体进行了界

定^[6-8]; 对钢铁产业的环境-经济^[9-15], 资源-环境^[16-19]和资源-经济^[20-23]间关系进行了研究, 确定了影响因素。为了更进一步研究钢铁产业链的耦合, 有必要从以下几个方面补充研究: ①从研究角度看, 耦合关系大多针对的是两两间关系, 对三者间关系的讨论有助于更全面地分析系统耦合; ②从研究对象看, 以往学者侧重于分析钢铁产品^[24-26]、企业^[27,28]、行业^[29,30]单一主体或维度, 缺乏对多维主体及主体间关系的讨论; ③从研究过程看, 现有文献广泛关注产业链中单一流程^[31-33], 基于生命周期对多流程展开研究有助于从全局角度了解产业链耦合情况; ④从研究内容看, 耦合关系的影响研究大多围绕经济

收稿日期: 2020-09-24 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871202); 国家自然科学基金重大项目(71991481; 71991480)。

作者简介: 刘妍心, 女, 山东临沂人, 博士生, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: lyxinnn@126.com

通讯作者: 李华姣, 女, 山东烟台人, 博士, 副教授, 博导, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: babyproud@126.com

2021年3月

制度^[34,35]、城市化^[36]等因素,忽略了与主体自身活动相关的外部政策。

基于此,为研究产业链系统耦合关系,首先要量化主体活动过程中的环境影响。量化的方法中,能值核算和生命周期评估最有助于解决此类问题。能值核算,通过计算所有直接和间接资源流入来量化生产过程的环境成本^[37,38],研究人员常利用该方法来分析中国相关生态系统资源及环境方面的可持续性^[39,40]。生命周期评估可以分析物质转化过程中的环境影响^[41,42],常被用于量化中国生产系统的经济及环境影响^[43,44]。将两种方法结合使用有助于更全面地分析主体造成的环境影响,对后续构建模型揭示钢铁产业链在资源、经济、环境方面的耦合情况有积极作用。

本文以能值核算和生命周期评估方法为基础,建立耦合系统模型,从产品、企业、行业层面对钢铁产业链生产、利用及回收阶段的资源-经济-环境间耦合进行研究。之后基于相关政策设定了5种情景以模拟废钢回收率对主体耦合关系的动态影响。研究结果可帮助国家及相关企业了解不同情况下

钢铁产业链在资源利用、经济收益、环境影响中的变化,识别关键政策,为可持续发展提供针对性建议。

2 研究方法

2.1 研究框架

研究资源-经济-环境间耦合关系有助于了解产业链系统耦合现状,从外部政策角度模拟废钢回收对主体耦合的影响有助于识别主体耦合变化的关键因素。为了更全面地研究钢铁产业链主体,本文从产品、企业、行业层面出发,基于主体自身特点构建资源-经济-环境耦合评价指标,进而构建耦合系统模型。了解钢铁产业链主体耦合现状,并结合评价指标分析影响耦合的主导因素。之后基于行业背景从5个角度设定政策情景,通过调节废钢回收率来分析情景模拟下各主体的耦合变化,识别关键驱动政策。最后根据研究结果提出政策建议,为行业管理者提供参考依据。具体技术路线见图1。

2.2 资源消耗-经济收益-环境成本耦合系统模型

本文首先构建耦合评价指标来评估中国钢铁产业链产品、企业和行业3个主体在资源消耗-经济

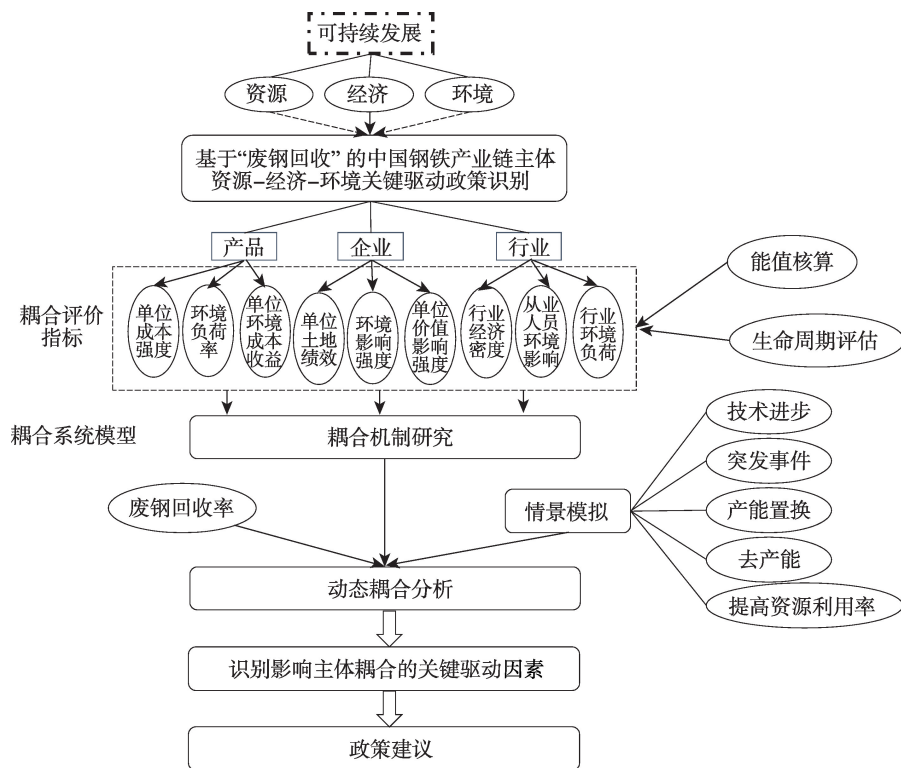


图1 技术路线图

Figure 1 Technology roadmap of the study

收益-环境成本间的耦合关系。指标构建所使用的数据是基于能值核算和生命周期评估两种方法计算得到。

能值核算可用于计算钢铁产业链所有生产过程的直接和间接可用输入能量。换言之,所有产品的能量均通过太阳能能级焦耳(sej)进行测量。单位能值代表产生产品单位所需的太阳能值。它使用“统一标准”来量化不同产品或过程的环境成本^[45]。能值公式如下所示:

$$U_i = f_i UEV_i \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: U_i 代表了产品 i 的太阳能量; f_i 代表了产品的量; UEV_i 代表了产品的单位能值。本文中产品层面和行业层面的耦合评价指标主要利用了这一方法,过程中使用的大多数UEV均来自Brown等的最新数据^[46]。

生命周期评估旨在从大气^[47]、土壤^[48]、水文^[49]等多个角度评估产品在生产过程中对环境造成的总体影响,本文应用该方法来评估钢铁产业链企业主体在生产过程中造成的环境影响。环境影响评估使用与Ecoinvent v3.1数据库集成的OpenLCA 1.10.3完成。

利用这两种方法计算评价指标,有助于全面地分析中国钢铁产业链在资源消耗,经济收益及环境成本间的耦合关系。

2.2.1 资源消耗-经济收益-环境成本耦合评价指标

为确定钢铁产业链中资源、经济、环境间相关关系,本文首先从产品、企业、行业层面构建了耦合评价指标^[50]。为突显产业链各层面耦合特征,分别围绕不可再生性资源、土地资源、人力资源,构建与经济成本 and 环境影响相关的耦合评价指标。

(1) 产品层面

表1首先定义了产品层面的耦合指标。由于产品生产对自然资源的消耗一直是学者们的研究重点^[51,52],因此,该层面指标围绕各阶段钢铁产品在生产过程中对不可再生性资源的消耗而构建,3个指标分别从资源-经济、资源-环境、环境-经济角度讨论了与不可再生性资源消耗相关的经济收益及环境影响。

(2) 企业层面

土地资源是当前学者对企业发展的重点研究内容^[54-56]。基于此,从土地利用的角度定义子系统间耦合评价指标,研究了各企业主体在土地资源消耗-经济收益-环境影响间的关系(表2)。

表1 钢铁产业链产品层面耦合评价指标

Table 1 Coupling evaluation indicators at the product level of the steel industrial chain

评价指标	公式	含义	角度
单位资源成本强度(RCI)	$\frac{S_i}{U_{(R_i+N_i+F_i)}}$	生产过程中经济成本与消耗的资源间关系	资源-经济
环境负荷率(ELR)	$\frac{U_{R_i}}{U_{(N_i+F_i+LS_i)}}$	产品生产过程中可再生性资源和不可再生性资源消耗对环境的影响比值	资源-环境
单位环境成本收益(ECB)	$\frac{E_i - S_i}{U_i}$	产品净利润与生产所需能值间关系	经济-环境

注: i 代表各阶段钢铁产品, $i = 1, 2, \dots, 10$ 。 E_i 为产品主体的市场价格; S_i 为主体生产过程中的经济成本; $U_{(R_i+N_i+F_i)}$ 为主体生产过程中资源消耗对应的能值; U_{R_i} 为消耗可再生资源对应的能值; $U_{(N_i+F_i+LS_i)}$ 为消耗不可再生资源对应的能值; U_i 为主体生产对应的总能值。

表2 钢铁产业链企业层面耦合评价指标

Table 2 Coupling evaluation indicators at the enterprise level of the steel industrial chain

评价指标	公式	含义	角度
单位土地生产效益(LPB)	$\frac{E_{total} - S_n}{Area_n}$	企业在生产过程中单位土地获得的收益	资源-经济
环境影响强度(ED)	$\frac{I_n}{Area_n}$	企业生产活动对单位土地造成的环境影响	资源-环境
单位价值影响强度(UVI)	$\frac{I_n}{E_{total} - S_n}$	企业生产的环境影响与经济收益间关系	经济-环境

注: n 代表各阶段钢铁生产企业, $n = 1, 2, \dots, 7$ 。 E_{total} 为企业主体的经济收益; S_n 为企业主体的经济成本; $Area_n$ 为企业主体的占地面积; I_n 为主体生产过程造成的环境影响。

2021年3月

(3) 行业层面

行业发展离不开从业人员的支持^[57-59],重点关注与人力资源相关的耦合问题,表3中定义的指标分别从子系统间关系角度研究了行业经济密度、从业人员造成的环境影响程度及行业环境负荷率。

为便于比较各指标间影响程度及各层面间的耦合关系,本文使用了归一化的指标相对值进行后续计算及分析。归一化公式如下:

$$X'_m = \frac{X_m - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} + 0.01 \quad (2)$$

式中: X_m 即不同层面的指标值, $0 < X'_m \leq 1$ 。

2.2.2 资源消耗-经济收益-环境成本耦合协调度

为量化各层面间相互作用的程度,本文借鉴了以往研究来构建耦合协调度模型^[50]。首先基于构建的耦合评价指标计算了资源消耗-经济收益-环境成本的耦合度(C)。为保证相关关系是正向且积极的,又计算了资源-经济-环境综合发展指数(T)及耦合协调度(D)。具体公式如下:

$$C = \frac{\sqrt[3]{f(M) \times g(U) \times h(E)}}{f(M) + g(U) + h(E)} \quad (3)$$

$$T = \gamma \times f(M) + \delta \times g(U) + \varepsilon \times h(E) \quad (4)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (5)$$

式中: $f(M)$ 分别是各层面的单位资源成本强度、单位土地生产效益、行业经济密度; $g(U)$ 分别是各层面的环境负荷率、环境影响强度、从业人员环境影响指数; $h(E)$ 分别是各层面的单位环境成本收益、单位价值影响强度、行业环境负荷率。 γ 、 δ 、 ε 分别代表资源、经济、环境两两方面间的发展程度,且

$\gamma + \delta + \varepsilon = 1$ 。在本文中,假设 γ 、 δ 、 ε 对于中国钢铁产业链的可持续发展具有同等重要性 ($\gamma = \delta = \varepsilon = 1/3$)。

为比较钢铁产业链产品、企业和行业层面的耦合发展水平,对耦合协调度也进行了标准化。

2.3 情景模拟

随着2019年中国海关总署等部门将废钢确定为“限制进口类别”,废钢的回收开始受到广泛关注。为定量分析废钢回收对中国钢铁产业链的影响,本文建立了仿真模型^①,并基于国内相关政策设定了5个模拟情景(表4)。

技术进步政策情景主要考察优化生产技术的情况下提高废钢回收率对主体耦合的影响。该情景基于2015年制定的“矿产资源总体规划”^[60],将优化流程选定为原材料开采环节。假设矿石开采效率提高5%,以此模拟技术进步对产业链主体的影响。

突发事件情景模拟了因突发情况引起的外部因素对钢铁产业链主体耦合关系的冲击。考虑到中国钢铁产业链的铁矿石大量依赖进口^[61],该情景模拟了国际突发事件可能对原材料进口造成的影响。本文假设进口的铁精粉总量降低20%,由此模拟突发事件带来的后果。

产能置换政策情景考虑了通过结构调整来优化生产过程。为推动钢铁业的转型升级,产能置换近年来颇受关注。该情景基于2019年地方政府提出的“烧结机限产比例不低于50%”^[62],将优化对象选定为烧结工艺,通过设置烧结铁和球团铁的置换

表3 钢铁产业链行业层面耦合评价指标

Table 3 Coupling evaluation indicators at the industry level of the steel industrial chain

评价指标	公式	含义	角度
行业经济密度(IED)	$\frac{E_j/S_j}{L_j}$	各行业人均经济发展程度	资源-经济
从业人员环境影响指数(EEI)	$\frac{U_i}{U_j}$	各行业从业人员生产活动造成的环境影响占比	资源-环境
行业环境负荷率(IELR)	$\frac{E_j - S_j}{U_{(N+F+LS)}/U_R}$	行业收益与环境压力间关系	经济-环境

注: j 代表钢铁产业链中的上游生产及下游应用行业, $j=1, 2, \dots, 10$ 。 E_j 为行业主体的经济价值; S_j 为行业主体的经济成本; L_j 为各行业从业人数; U_i 为行业从业者活动对应的能值; U_j 为行业主体生产过程的总能值; $U_{(N+F+LS)}$ 为消耗不可再生资源对应的能值; U_R 为消耗可再生资源对应的能值。

① 篇幅限制,模型公式及详细信息未在文中呈现。如有需要,可通过邮件向作者索取。

表4 政策情景设置

Table 4 Policy scenarios

模拟角度	情景设计	变量设计	政策含义
技术进步	提高矿山采选率	矿山开采效率提高 5%	模拟“提高矿山采选率”来增加铁精粉产量
突发事件	降低进口矿配比	铁精粉进口量减少 20%	模拟了“国际突发事件”可能造成进口铁产品供给不足的情况
产能置换	提高球团矿配比	烧结铁产能降低 25%, 球团铁产能增加 25%	模拟“使用球团铁替代部分烧结铁”来优化生产过程环境绩效
去产能	提高转炉废钢比	生铁用量降低 25%, 废钢用量增加 25%	模拟“增加废钢使用”来限制国内生铁生产进而保护环境
提高资源利用率	提高再生钢使用比	电炉炼钢占比增加, 转炉炼钢占比减少	模拟“使用更多废钢冶炼”来降低钢铁行业的环境成本

比例(25%)来达到提高环境绩效的目的。

去产能政策情景模拟了削减生铁产能的政策影响。基于2017年制定的“减少生铁产能19万t”^[63]计划,该情景将优化流程定为粗钢生产,通过模拟降低生铁25%的用量,来定量研究去产能对产业链主体在资源、经济、环境间关系的改变。

提高资源利用率情景从增加再生钢用量的角度考虑了产业优化的政策措施。2019年中华人民共和国工业和信息化部出台了“关于引导短流程炼钢发展的指导意见”^[64],提出要大力推广短流程炼钢。根据这一文件,该情景基于行业现状对粗钢冶炼方式的占比进行了设定。通过增加废钢用量来提高电炉炼钢占比,以达到提高资源利用率的目的。相关变量的设计及含义如表4所示。

2.4 数据来源

2.4.1 产品主体

为研究中国钢铁产业链在生产过程中的资源-

经济-环境耦合关系,首先基于当前文献^[65]确定了主要生产流程及对应的钢铁产品,基于中国产业信息网(<https://www.chyxx.com/data/>)确定了下游行业及其占比(图2)。之后基于生产流程选择了铁矿石(铁精粉)、球团铁、烧结铁、生铁、粗钢、铸铁、宽薄板、热轧钢、线材及废钢作为研究主体。各产品主体的产量数据来自2018年《钢铁年鉴》。有关产品生产流程的数据来自现有文献及相关数据库,矿石开采过程的数据来自Ma等^[65]的研究和Ecoinvent v3.1数据库,球团铁、烧结铁、生铁和粗钢生产过程的数据来自Ma等^[65]的研究。铸铁、宽薄板,线材和热轧钢生产过程的数据均来自Ecoinvent v3.1数据库。废钢回收过程的数据来自Allegrini等^[66]的研究。

2.4.2 企业主体

“企业”部分包括生产各环节产品的企业,考虑到中国钢铁产业链部分环节的企业集中度较低,本

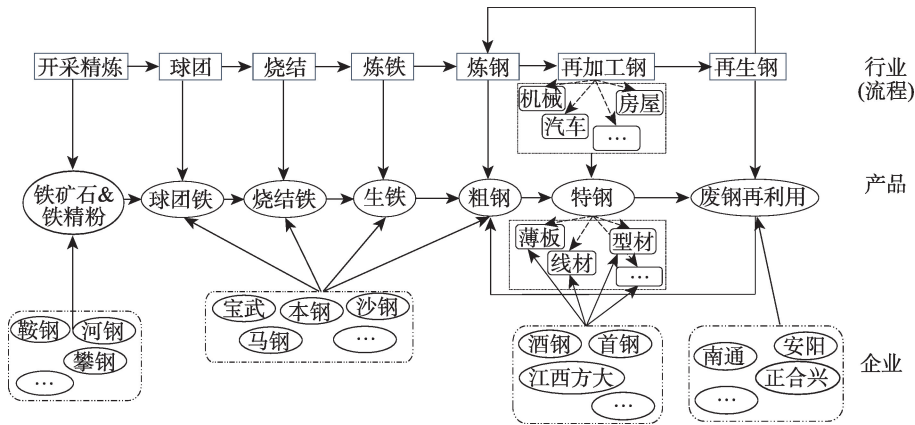


图2 中国钢铁全产业链框架体系图

Figure 2 Framework of China's steel industrial chain system

2021年3月

文根据产量选择了排名前10或整体产量占80%的主要企业作为研究对象(图2)。企业主体的选择基于中国钢铁新闻网(<http://www.csteelnews.com/>)。企业层面的流程数据同样来自现有文献及相关数据库。其中,矿石开采企业的流程数据来自Ferreira等^[67]的研究和Ecoinvent v3.1数据库,粗钢冶炼企业的数据来自文献“World Steel Life Cycle Inventory Methodology Report”,汽车用钢、房屋用钢、机械用钢、家电用钢和船舶用钢企业的流程数据分别来自Ribeiro等^[68]、Tulevech等^[69]、Xiao等^[70]、Ling等^[71]的研究成果和Ecoinvent v3.1数据库。

2.4.3 行业主体

与前两个层面相比,行业主体的确定更加直接。图2展示的产业链“流程”即为本文行业主体。由于产品、企业、行业间呈递进关系,因此行业主体的活动过程基于产品和企业主体整理得到。数据来源包括此前列出的文献^[65-71]和Ecoinvent v3.1数据库。

研究过程所使用的UEV数据主要来自Brown等^[46]构建的UEV数据库和国家环境核算数据库NEAD v2.0(<http://www.emergy-nead.com/home>),还有些UEV数据根据具体情况重新进行了计算^②。

2.5 不确定性分析

考虑到基础数据来自不同文献及数据库,本文利用蒙特卡洛模拟^[72,73]来研究这一因素对结果的不确定性影响。为保证模拟结果的准确性,我们将模拟次数设定为1000次。结果显示,尽管个别类别的标准偏差值较大,但大部分类别的标准偏差值较小,尤其是对环境有显著影响的“全球变暖”和“生态毒性”。这一结果证实了研究结果的可靠性。

3 结果与分析

3.1 中国钢铁产业链主体的资源消耗-经济收益-环境成本耦合机制分析

中国钢铁产业链主体的资源消耗-经济收益-环境成本间耦合现状如图3所示。从产品层面来看,产品主体的耦合协调度大多低于0.5,尤其是产业链上游环节。图4的耦合评价指标结果反映了子

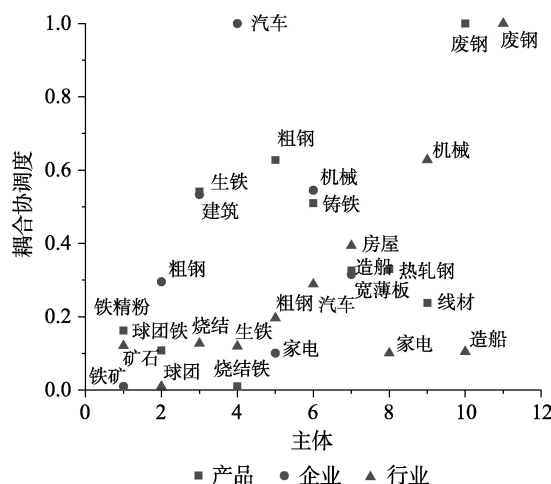


图3 钢铁产业链资源-经济-环境耦合协调度

Figure 3 Resource-economic-environment system coupling coordination degree of the steel industrial chain

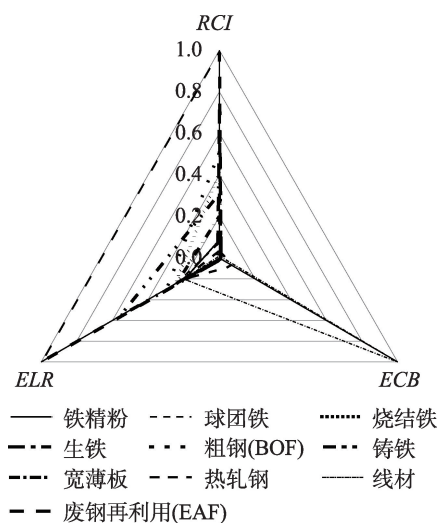


图4 钢铁产品主体的资源-经济-环境间耦合评价指标

Figure 4 Resource-economic-environment system coupling evaluation indicators of steel products

系统间关系对整体耦合的主导作用。与其他指标相比,单位环境成本效益(ECB)的值在产品主体中更加突出,这表明当前经济-环境间关系对钢铁产业链大部分产品的系统耦合起主导作用。由于该层面指标强调了钢铁产品生产时不可再生性资源的消耗,这一结果反映出生产过程的环境成本与经济收益间关系对产品耦合发展最重要。

从企业层面来看,中国铁矿、粗钢和家电制造企业的耦合协调度均在0.5以下(图3),系统耦合较

② 篇幅限制,相关主体生产及回收过程所需的资源数据及具体核算过程未能在文中呈现。如有需要,可通过邮件向作者索取。

弱。造成这一现象的原因主要与生产技术有关。传统企业生产技术中转炉炼钢等工艺能耗巨大,而受经济成本、管理机制等因素影响,有助提高生产效率、降低环境污染的新兴技术尚未完全在中国钢铁产业中普及^[74]。与此同时,中国钢铁企业的集中度较低,也在一定程度上导致了企业规模和收益不成正比。图5的耦合指标雷达图显示,LPB在3个评价指标中影响最显著,表明资源-经济间关系推动了各环节企业的整体耦合,提升了系统的稳健性。

相较于前两个层面,行业主体的系统耦合及耦合主导因素均有较大差异。结合图3及图6可以发现,上游行业(如矿石精炼)主要受资源-经济关系影响,中游的粗钢制造主要受环境-经济关系影响,

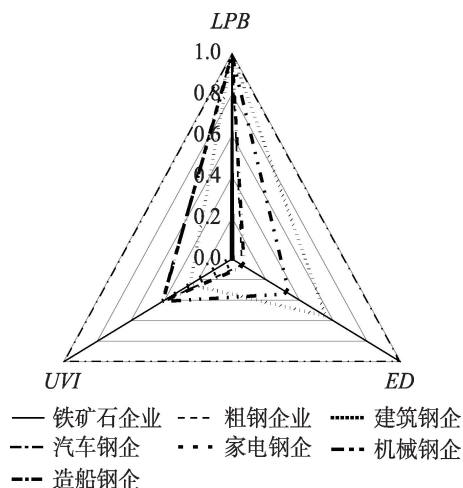


图5 钢铁企业主体的资源-经济-环境间耦合评价指标

Figure 5 Resource-economic-environment system coupling evaluation indicators of steel enterprises

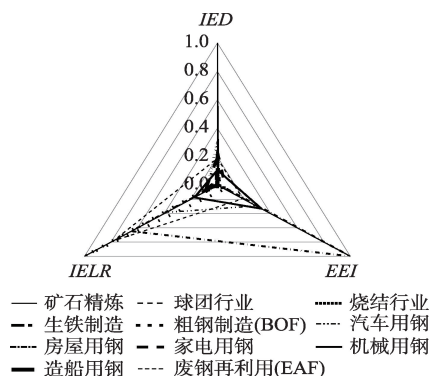


图6 钢铁行业主体的资源-经济-环境间耦合评价指标

Figure 6 Resource-economic-environment system coupling evaluation indicators of the steel industry

下游行业更易受到资源-环境间关系主导。主导因素的不同反映了当前中国钢铁行业中各环节的发展重心有所差异。

3.2 废钢回收下中国钢铁产业链主体动态耦合的关键驱动政策识别

不同政策情景下主体随废钢回收率提高的耦合协调度变化如图7所示。产品主体而言,随废钢回收率的增加,图7d的实线变化最显著。上游产品(如球团铁)的耦合协调度首先从0.13处开始增加,但增长速率逐渐变缓,之后当到达0.41左右时开始小幅下降。下游产品(线材等)则始终保持增长态势,并在90%处陡增。由此可见,“去产能”政策对钢铁产品主体的资源-经济-环境耦合具有显著影响。尤其是当废钢回收率达到70%时,各产品的耦合协调度普遍具有明显提高。因此,对于产品主体而言,“去产能”政策有助于提高资源-经济-环境间耦合。

企业主体而言,图7短虚线表明“技术进步”政策对钢企的耦合协调度影响最显著。图7a中铁矿和钢企的耦合协调度随废钢回收率增加呈下降趋势,下游应用环节的耦合协调度则呈上升趋势。造成这一结果的原因主要与集中度有关。由于下游钢企集中度较低,当一些中小企业合并重组后,有助提高土地资源利用率,进而提升整体耦合协调度。尤其是当废钢回收率为60%时,该政策下企业主体的耦合协调度变化最明显。由此体现出“技术进步”政策对中国钢铁企业主体的显著驱动作用。

行业主体的耦合协调度变化如图7(长虚线)所示。结果表明,“突发事件”“去产能”和“提高资源利用率”对行业主体的耦合影响均在上下游呈现明显差异。其中,“提高资源利用率”政策下各行业主体的耦合变化最为显著,上下游行业的耦合协调度均随废钢回收率增加而增加,且下游的增长速度普遍优于上游(图7e)。当废钢回收率为90%时,行业主体的耦合协调度普遍达到最优,这一结果反映了该政策对行业主体的关键驱动作用,也体现了提高资源利用率对改善钢铁产业链整体耦合的重要性。今后在推动各行业发展时要着重考虑资源的整合利用。

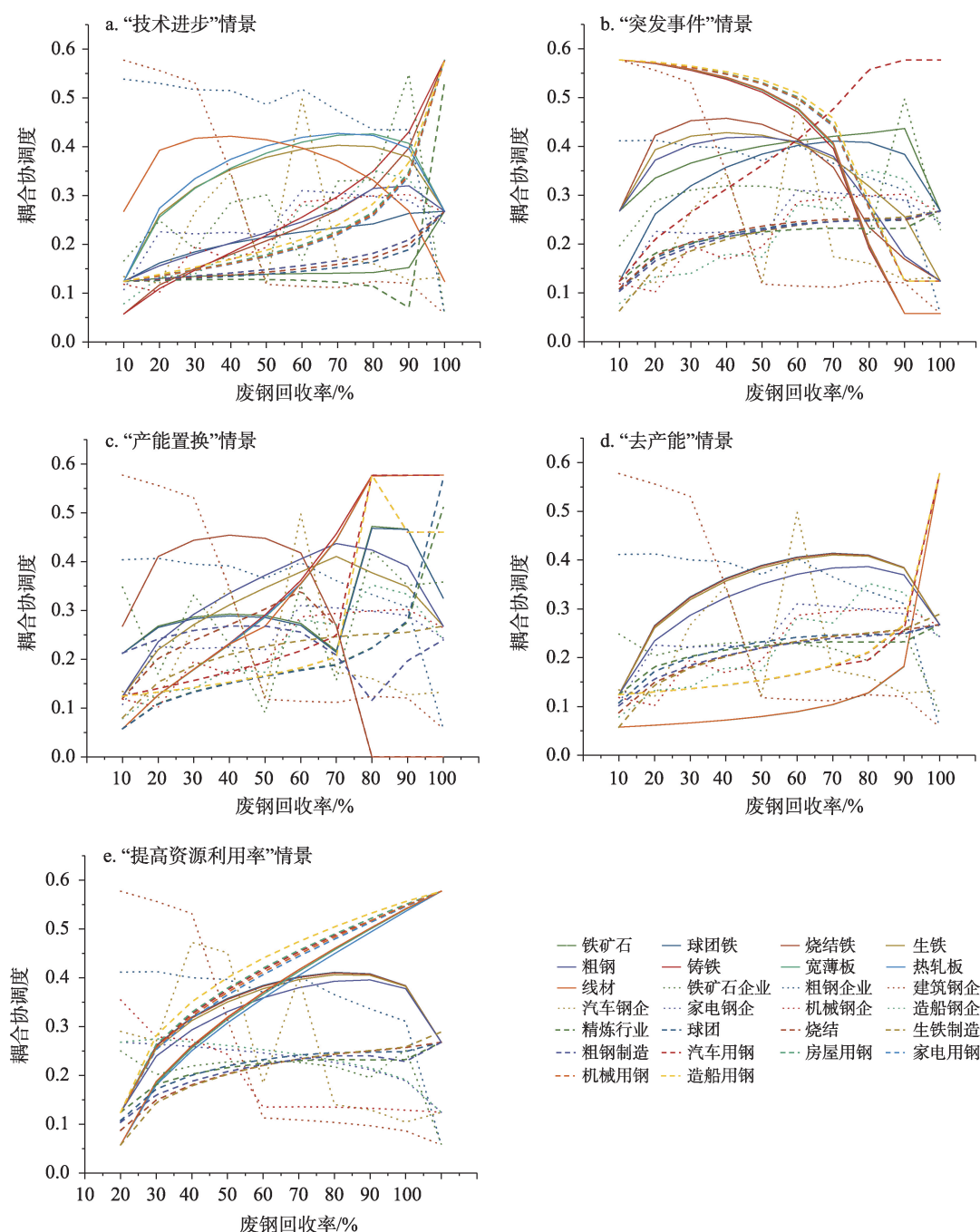


图7 不同政策情景下钢铁产业链主体的耦合协调度变化

Figure 7 Change of coupling coordination degree of the steel industrial chain subjects under different policy scenarios

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文借助能值核算和生命周期评估方法构建了耦合评价模型,基于国内现状模拟了5种政策情景,讨论了废钢回收率下相关政策对中国钢铁产业链3类主体的动态耦合影响,以识别关键驱动政策。得到的结论如下:

(1)整体而言,钢铁产业链的资源-经济-环境耦合较弱,下游环节普遍优于上游环节。为提高主体耦合,应首要改善资源-经济间关系,同时着力提高废钢回收率。

(2)钢铁产品中,烧结铁等上游主体耦合较差,主要原因与系统中经济-环境间发展水平有关。为改善当前现状,推行“去产能”政策并尽量提高废钢

回收率至70%,最有助于强化钢铁产品耦合关系。

(3)企业主体中,铁矿企业和下游家电企业具有较弱的耦合关系,尤其是在资源-经济维度。为优化该层面主体耦合,可考虑推行“技术进步”政策并将废钢回收率提高到60%。

(4)行业主体的上游生产、下游家电和造船用钢行业耦合较差,回收行业的系统耦合最好。从子系统角度来看,资源-经济间关系是影响系统耦合的主导因素。最后,“提高资源利用率”的同时提高废钢回收率至90%,最有利于各行业“资源-经济-环境”间协调发展。

4.2 政策建议

为推动中国钢铁全产业链的可持续发展,基于上述研究结论,本文分别从产品、企业和行业3类主体视角提出政策建议:

(1)对产品主体而言,为提高上游产品耦合,应着重关注对其影响最显著的经济-环境间关系。第一,为提高环境绩效,可考虑更新工艺残留物(覆盖层、尾矿、炉渣和废料)的回收及处置设备。第二,为增加经济收益,可通过推进高性能钢材的生产应用配套核心技术,提升和改进产品质量管控,尤其是矿石开采和精炼。

(2)对企业主体而言,钢企的合并重组,集中使用大型生产设施来替代分散的小型设施,可有助于增加土地资源利用率,进而提高资源-经济-环境间耦合。此外,提高产品收益也可改善资源-经济间关系。企业可考虑通过完善不同品种产品线,扩大国内外贸易等方法来挖掘潜在客户群。最后,基于识别出的关键驱动政策,相关企业可继续提高产品的生产技术,例如,碎石时尽量使用爆破法来替代高耗能的破碎法,推广高级工艺控制和优化系统等数字化工具来提升效率。

(3)对行业主体而言,上游相关行业可从降低从业人数,提高行业收益等角度来推动可持续发展。下游应用行业可考虑通过提高生产效率来降低资源的使用及消耗,进而降低从业人员在生产过程中的环境影响。最后,考虑到各行业耦合度在“提高资源利用率”情景中均有显著提高,中国应尽快调整钢铁产业结构,提高废钢再利用率。例如,通过加大投资来帮助相关行业提高报废家电及报

废轮船的拆解技术,进而提高优质废钢的产量,以实现废钢回收率的提高。

本文还存在着一定的局限性,例如有些生产过程的文献无法做到时间上的一致,这可能会造成部分产品或行业层面的输入数据不够准确。因此在未来的研究中,会考虑采用调研等方式解决这些不足。

参考文献(References):

- [1] Iluțiu-Varvara D A, Tintelecan M, Aciu C, et al. An assessment of the substance losses from charge composition used to the steelmaking: Key factor for sustainable steel manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 32: 15-21.
- [2] 王旭. 钢铁行业环境污染现状及改进措施[J]. 中国环保产业, 2019, (3): 25-26. [Wang X. Environmental pollution status and improvement measures in iron and steel industry[J]. China Environmental Protection Industry, 2019, (3): 25-26.]
- [3] 李新, 任强, 罗胤达, 等. 基于物质流分析的中国机械行业铁资源代谢过程研究[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2329-2340. [Li X, Ren Q, Luo Y D, et al. Metabolic process of mechanical products iron resources based on material flow analysis in China[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2329-2340.]
- [4] 刘亚辉. 废钢加工行业实施三体系认证的目的和意义[J]. 中国废钢铁, 2018, (3): 37-38. [Liu Y H. The purpose and significance of implementing the three-system certification in the scrap steel processing industry[J]. Iron & Steel Scrap of China, 2018, (3): 37-38.]
- [5] 赵才淳, 张栋生. 废钢回收利用及加工生产线建设方案[J]. 酒钢科技, 2019, (2): 68-70. [Zhao C Z, Zhang D S. Construction plan for scrap recycling and processing line[J]. Jiugang Science and Technology, 2019, (2): 68-70.]
- [6] Liu Y X, Li H J, Guan J H, et al. Influence of different factors on prices of upstream, middle and downstream products in China's whole steel industry chain: Based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Resources Policy, 2019, 60: 134-142.
- [7] Valderrama C V, Santibanez-González E, Pimentel B, et al. Designing an environmental supply chain network in the mining industry to reduce carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119688.
- [8] Long W Q, Wang S S, Lu C Y, et al. Quantitative assessment of energy conservation potential and environmental benefits of an iron and steel plant in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123163.
- [9] Jeong K, Ji C, Kim H, et al. An integrated assessment of the environmental, human health, and economic impacts based on life cy-

2021年3月

- cle assessment: A case study of the concrete and steel sumps[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118032.
- [10] Liu Y X, Li H J, Huang S P, et al. Environmental and economic-related impact assessment of iron and steel production. A call for shared responsibility in global trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122239.
- [11] 洪水峰, 张亚. 长江经济带钢铁工业-生态环境-区域经济耦合协调发展研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 53(5): 703-714. [Hong S F, Zhang Y. Study on coupling coordinative development of steel industry- ecological environment- regional economy in Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 53(5): 703-714.]
- [12] 翟珮伶. 环境规制对钢铁行业上市公司绿色投资的影响研究: 基于规模与效率的双重考量[D]. 镇江: 江苏大学, 2019. [Zhai P L. Research on the Impact of Environmental Regulations on Green Investment of Listed Companies in the Iron and Steel Industry[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.]
- [13] 黄训宝. 供给侧结构性改革政策前后钢铁行业财务绩效比较研究: 以 AS 钢铁股份有限公司为例[D]. 蚌埠: 安徽财经大学, 2019. [Huang X B. Comparative Study on Financial Performance of Steel Industry Before and After Supply-Side Structural Reform Policy: Taking AS Steel Co., Ltd. As An Example[D]. Bengbu: Anhui University of Finance and Economics, 2019.]
- [14] 韩珊珊. 基于 MFCA 与 JEPIX 的企业生态经济效益评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2019. [Han S S. Study on The Evaluation of Enterprise Ecological Economic Benefits Based on MFCA and JEPIX[D]. Haerbin: Harbin University of Commerce, 2019.]
- [15] 胡雅娴. 低碳经济下宝武集团环境成本管理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019. [Hu Y X. Study on Environmental Cost Management of Baowu Steel Group Under Low Carbon Economy[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.]
- [16] Rosenfeld D C, Böhm H, Lindorfer J, et al. Scenario analysis of implementing a power-to-gas and biomass gasification system in an integrated steel plant: A techno-economic and environmental study[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 1511-1524.
- [17] 王俊岭, 徐丹宁, 刘辰玥. 基于 DEA 方法的中国钢铁工业生态效率分析[J]. *生态经济*, 2020, 36(1): 63-68. [Wang J L, Xu D N, Liu C Y. Analysis of eco-efficiency of China's iron and steel industry based on DEA method[J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(1): 63-68.]
- [18] 王英武. 资源环境约束下的钢铁企业发展研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014. [Wang Y W. Iron and Steel Enterprise Development under the restriction of Resources and Environment Research [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.]
- [19] 王磊, 陈敏. 京津冀协同视角下再生资源产业链构建研究[J]. *再生资源与循环经济*, 2019, 12(11): 8-14. [Wang L, Chen M. Study on the construction of resource recycling industry chain in the perspective of Beijing-Tianjin-Hebei cooperation[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2019, 12(11): 8-14.]
- [20] Kazançoglu Y, Ada E, Ozturkoglu Y, et al. Analysis of the barriers to urban mining for resource melioration in emerging economies [J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020. 101768.
- [21] Ahlström J M, Zetterholm J, Pettersson K, et al. Economic potential for substitution of fossil fuels with liquefied biomethane in Swedish iron and steel industry: Synergy and competition with other sectors[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112641.
- [22] 孙晓华, 郑辉. 资源型地区经济转型模式: 国际比较及借鉴[J]. *经济学家*, 2019, (11): 104-112. [Sun X H, Zheng H. Economic transformation mode in resource-based regions: International comparison and reference[J]. *Economist*, 2019, (11): 104-112.]
- [23] 李强峰. 中国国际贸易中含铁商品的物质流、价值流及隐含碳综合研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019. [Li Q F. Comprehensive Study on Material Flow, Value Flow and Embodied Carbon of Iron-Containing Commodities in China's International Trade[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.]
- [24] Jabbour C J C, Fiorini P D C, Wong C W Y, et al. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies[J]. *Resources Policy*, 2020, 66: 101596.
- [25] Shen J M, Zhang X H, Lv Y F, et al. An improved energy evaluation of the environmental sustainability of China's steel production from 2005 to 2015[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 55-69.
- [26] 王娟. 全球铁矿石成本对比及中国铁矿石竞争力分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2019. [Wang J. Global Iron Ore Cost Comparison and China Iron Ore Competitiveness Analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.]
- [27] Chisalita D A, Petrescu L, Cobden P, et al. Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 1015-1025.
- [28] Li H L, Zhu X H, Chen J Y, et al. Environmental regulations, environmental governance efficiency and the green transformation of China's iron and steel enterprises[J]. *Ecological Economics*, 2019, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106397.
- [29] Vögele S, Grajewski M, Govorukha K, et al. Challenges for the European steel industry: Analysis, possible consequences and impacts on sustainable development[J]. *Applied Energy*, 2020, DOI:

- 10.1016/j.apenergy.2020.114633.
- [30] Tang L, Xue X D, Jia M, et al. Iron and steel industry emissions and contribution to the air quality in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117668.
- [31] Sun W Q, Xu X D, Lv Z Q, et al. Environmental impact assessment of wastewater discharge with multi-pollutants from iron and steel industry[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 210–215.
- [32] 曹悦. 我国报废汽车回收拆解行业盈利水平及其发展趋势预测研究[D]. 烟台: 山东工商学院, 2019. [Cao Y. Research on Profitability and Development Trend Prediction of End-of Life Vehicle Recycling and Dismantling Industry in China[D]. Yantai: Shandong Institute of Business and Technology, 2019.]
- [33] Qi Y J, Li H J, Liu Y X, et al. Granger causality transmission mechanism of steel product prices under multiple scales: The industrial chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101674.
- [34] Li F, Feitelson E, Li Y. Is China at the tipping point? Reconsidering environment–economy nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123156.
- [35] Wang H H, Zhang J R, Zeng W H. Intelligent simulation of aquatic environment economic policy coupled ABM and SD models[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1160–1172.
- [36] Wang Y F, Geng Q J, Si X H, et al. Coupling and coordination analysis of urbanization, economy and environment of Shandong Province, China[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2020, DOI: 10.1007/s10668-020-01062-9.
- [37] Song F, Su F L, Zhu D, et al. Evaluation and driving factors of sustainable development of the wetland ecosystem in Northeast China: An emergy approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119236.
- [38] Chen J H, Mei Y D, Ben Y, et al. Emergy-based sustainability evaluation of two hydropower projects on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105838.
- [39] 陈英超, 冯连勇, 王建良. 基于能值的能源投入回报方法及其应用: 以大庆油田为例[J]. *资源科学*, 2016, 38(12): 2270–2282. [Chen Y C, Feng L Y, Wang J L. Emergy-based energy return on investment method and its application in Daqing Oilfield[J]. *Resources Science*, 2016, 38(12): 2270–2282.]
- [40] Chen W, Geng Y, Tian X, et al. Emergy-based environmental accounting of gold ingot production in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 143: 60–67.
- [41] Xiong F Y, Pan J J, Lu B, et al. Integrated technology assessment based on LCA: A case of fine particulate matter control technology in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122014.
- [42] Liang L, Wang Y C, Ridoutt B G, et al. Agricultural subsidies assessment of cropping system from environmental and economic perspectives in North China based on LCA[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 351–360.
- [43] Ghadimi P, Wang C, Azadnia A H, et al. Life cycle-based environmental performance indicator for the coal-to-energy supply chain: A Chinese case application[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 147: 28–38.
- [44] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000–2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1515–1526. [Hao M, Chen W Q, Ma Z J, et al. Benefits and risks of China's copper waste and scrap trade during 2000–2015[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1515–1526.]
- [45] Brown M, Ulgiati S. Emergy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1): 201–213.
- [46] Brown M, Ulgiati S. Assessing the global environmental sources driving the geobiosphere: A revised emergy baseline[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 339(1): 126–132.
- [47] Ji M, Xu J. Life cycle assessment of ultra-clean micronized coal oil water slurry[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2009, 7(2): 88–90.
- [48] Leao, S, Roux, P, Loiseau E. Prospective water supply mix for life cycle assessment and resource policy support—assessment of forecasting scenarios accounting for future changes in water demand and availability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(3): 1374–1384.
- [49] Perkins J, Suh S. Uncertainty implications of hybrid approach in LCA: Precision versus accuracy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(7): 3681–3688.
- [50] Yang X P, Zhang D C, Jia Q Q, et al. Exploring the dynamic coupling relationship between agricultural economy and agro-ecological environment in semi-arid areas: A case study of Yulin, China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2259–2259.
- [51] Schfer P, Schmidt M. Discrete-point analysis of the energy demand of primary versus secondary metal production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(1): 507–516.
- [52] Carmona L G, Whiting K, Carrasco A, et al. The evolution of resource efficiency in the United Kingdom's steel sector: An exergy approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 891–905.
- [54] Rendel J, Mackay A, Smale P, et al. Optimisation of the resource of land-based livestock systems to advance sustainable agriculture: A farm-level analysis[J]. *Agriculture*, 2020, 10(8): 331–331.
- [55] 陈璐璐. 土地资源配置的企业和地区效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [Chen L L. Enterprise and Regional Effects of Land Re-

2021年3月

- source Allocation: From The Perspective of Financing Constraints [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [56] 张莉,程可为,赵敬陶. 土地资源配置和经济发展质量: 工业用地成本与全要素生产率[J]. 财贸经济, 2019, 40(10): 126-141. [Zhang L, Cheng K W, Zhao J T. Land resource allocation and economic development quality: Industrial land price and total factor productivity[J]. Finance and Trade Economics, 2019, 40(10): 126-141.]
- [57] 赵文泽,冯珺. 新冠肺炎疫情背景下的新就业形态研究: 以“共享员工”模式为例[J]. 产业经济评论, 2020, (6): 16-31. [Zhao W Z, Feng J. New forms of employment under the COVID-19 epidemic: Take sharing employee as example[J]. Review of Industrial Economics, 2020, (6): 16-31.]
- [58] Yang X H, Li X Y. Evaluation research on optimization efficiency of human resource allocation in marine insurance industry based on Malmquist index model[J]. Journal of Coastal Research, 2019, 94: 677-677.
- [59] 王平. 人力资源市场化流动配置的创新推动: 基于中国中原人力资源服务产业园区的探索实践[J]. 人才资源开发, 2020, (21): 6-8. [Wang P. Innovation promotion of human resources market flow allocation: Based on the exploration and practice of China's Zhongyuan human resources service industrial park[J]. Human Resources Development, 2020, (21): 6-8.]
- [60] 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省矿产资源总体规划[EB/OL]. (2017-09-13) [2020-09-21]. http://www.gansu.gov.cn/art/2017/9/25/art_4786_322791.html. [General Office of Gansu Provincial People's Government. General Planning of Mineral Resources in Gansu Province[EB/OL].(2017-09-13) [2020-09-21]. http://www.gansu.gov.cn/art/2017/9/25/art_4786_322791.html.]
- [61] Li Q F, Dai T, Wang G S, et al. Iron material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2010 to 2015[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1807-1813.
- [62] 唐山市人民政府办公室. 关于做好全市钢铁企业停限产工作的通知[EB/OL]. (2019-06-23) [2020-09-21]. <https://news.smm.cn/news/100941165>. [Tangshan People's Government Office. Informed about Tangshan Steel Mills Stopped Their Production Work [EB/OL]. (2019-06-23) [2020-09-21]. <https://news.smm.cn/news/100941165>.]
- [63] 安徽省政府办公室. 安徽省2017年度落后产能退出工作方案[EB/OL]. (2017-07-12) [2020-09-21]. http://www.cnr.cn/ah/news/20170712/t20170712_523845534.shtml. [Anhui Provincial Government Office. Anhui Province in 2017 Backward Production Capacity Withdrawal Work Plan[EB/OL]. (2017-07-12) [2020-09-21]. http://www.cnr.cn/ah/news/20170712/t20170712_523845534.shtml.]
- [64] 中央人民政府. 我国将出台指导意见“短流程”炼钢发展[EB/OL]. (2019-07-29) [2020-09-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/29/content_5416475.htm. [The Central People's Government. China Will Issue Guidelines to Guide the Development of “Short Process” Steelmaking[EB/OL]. (2019-07-29) [2020-09-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/29/content_5416475.htm.]
- [65] Ma F, Eneji A E, Wu Y. An evaluation of input-output value for sustainability in a Chinese steel production system based on emergy analysis[J]. Sustainability, 2018, 10(12): 4749-4749.
- [66] Allegrini E, Vadenbo C, Boldrin A, et al. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 132-143.
- [67] Ferreira H, Leite M G P. A life cycle assessment study of iron ore mining[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 1081-1091.
- [68] Ribeiro C, José V, Partidário F P. Life cycle assessment of a multi-material car component[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(5): 336-345.
- [69] Tulevech S M, Hage D J, Jorgensen S K, et al. Life cycle assessment: A multi-scenario case study of a low-energy industrial building in Thailand[J]. Energy and Buildings, 2018, DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.011.
- [70] Xiao R F, Zhang Y, Yuan Z W. Environmental impacts of reclamation and recycling processes of refrigerators using life cycle assessment (LCA) methods[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 52-59.
- [71] Ling-Chin J, Roskilly A P. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective: A life cycle assessment case study[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 305-318.
- [72] Derwent R G. Monte Carlo analyses of the uncertainties in the predictions from global tropospheric ozone models: Tropospheric burdens and seasonal cycles[J]. Atmospheric Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117545.
- [73] Broday E E, Ruivo C R, Silva M C G. The use of Monte Carlo method to assess the uncertainty of thermal comfort indices PMV and PPD: Benefits of using a measuring set with an operative temperature probe- ScienceDirect[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 35: 101961.
- [74] 韩冰. 以网络经济为背景谈优化人力资源管理[J]. 现代商业, 2020, 584(31): 80-81. [Han B. On optimizing human resource management in the background of network economy[J]. Modern Business, 2020, (31): 80-81.]

Dynamic coupling of the resource–economic–environment systems of China’s steel industrial chain based on scrap steel recycling

LIU Yanxin^{1,2,3}, LI Huajiao^{2,3}, AN Haizhong^{2,3}, GUAN Jianhe⁴,
LIU Ning⁵, HAN Xiaodan^{2,3}, LI Chao⁶, SHI Jianglan⁷

(1. School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China; 2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 4. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. School of Economics, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China; 6. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 7. School of Management, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: To accelerate the transformation and upgrading of industries and promote circular economy, evaluating the sustainability of steel industrial chain has a positive significance for the development of the industry. This study constructed a resource-economic-environment system coupling model based on life cycle assessment and energy accounting. It analyzed the coupling mechanism of China’s steel industrial chain at the product, enterprise, and industry levels, and identified the key driving policies affecting the coupling at different levels by considering the scrap steel recycling rate, which could provide a reference for industry managers. The results show that: The coupling coordination degree of China’s steel industrial chain subjects is significantly different, and generally presents the pattern of downstream > midstream > upstream. The resource-economic dimensions are the dominant factors affecting the coupling of industrial chain in the resource-economic-environment systems. With the significant increase of scrap steel recycling rate, the policies of “reducing capacity”, “technological progress”, and “improving resource utilization” can have a positive impact on the coupling of different types of subjects in the steel industrial chain. To improve the resilience and risk-resistance ability of China’s steel industrial chain, this study put forward targeted policy recommendations for the comprehensive development of the industrial chain from the perspective of different types of subjects.

Key words: steel industrial chain; resource-economic-environment systems; coupling coordination degree; policy simulation; scrap steel recycling