



控制与决策

Control and Decision

ISSN 1001-0920, CN 21-1124/TP

《控制与决策》网络首发论文

题目：低碳驱动下考虑废钢质量的钢铁制造供应链稳定性分析
作者：袁静，朱建军
DOI：10.13195/j.kzyjc.2022.1785
收稿日期：2022-10-15
网络首发日期：2023-03-09
引用格式：袁静，朱建军. 低碳驱动下考虑废钢质量的钢铁制造供应链稳定性分析[J/OL]. 控制与决策. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1785>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

低碳驱动下考虑废钢质量的钢铁制造供应链稳定性分析

袁静^{1,2,3}, 朱建军^{1†}

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 211106;

2. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

3. 复杂系统多学科管理与控制安徽省教育厅重点实验室, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 钢铁行业作为最大的碳排放主体, 面对日益增大的环保压力, 亟待改进工艺流程, 提升以废钢为原材料的绿色清洁生产比例。本文运用博弈论和混沌理论研究环保压力和废钢质量水平对供应链各博弈主体的影响。结果表明, 外部环保压力的增大会促使钢铁企业逐步向以废钢为主要原料的清洁炼钢模式过渡, 逐步提高废钢原料的质量才能使得废钢供应商和钢铁企业达到最优利润。然而, 提高废钢原料的质量水平并不利于增强系统的稳定性。当前以铁矿石为主要原材料的钢铁冶炼模式应平稳渐进地向以废钢为原料的清洁生产模式过渡, 并通过大数据等信息化技术加强钢铁市场的价格监管, 引导企业自律, 遵守市场规律调节原材料的价格, 否则, 价格调整参数超出阈值会导致整个钢铁市场动荡, 甚至可能出现经济混沌以及钢铁企业破产。

关键词: 低碳; 废钢质量; 稳定性; 复杂性; 博弈论; 混沌理论

中图分类号: F224; F274

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1785

引用格式: 袁静, 朱建军. 低碳驱动下考虑废钢质量的钢铁制造供应链稳定性分析. 控制与决策.

Stability analysis of steel manufacturing supply chain considering scrap quality under carbon emission reduction

YUAN Jing^{1,2,3}, ZHU Jian-jun^{1†}

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 3.

Key Laboratory of Multidisciplinary Management and Control of Complex Systems of Anhui Higher Education Institute, Maanshan 243032, China)

Abstract: Under the background of carbon neutrality, the steel industry, as the largest carbon emission body, faces the increasing pressure of carbon emission limitation. It is urgent to improve the production process and improve the proportion of clean production taking scrap steel as raw material. In this study, game theory and chaos theory are used to analyze the influence of carbon emission limiting pressure and scrap quality improvement on each game player in supply chain. The results show that carbon emission reduction encourages steel enterprises to develop scrap steelmaking. At the same time, the quality of scrap materials needs to be improved to meet the requirements of scrap suppliers and steel enterprises to achieve optimal profits. However, the improvement in the quality of scrap materials is not conducive to system stability. At present, iron ore is still the main raw material in the steel industry, and the transition to scrap steel should be gradual and smooth. Government department uses big data and other information technologies to strengthen the price supervision of the steel market, and guide firms to consciously comply with the market rules to adjust the price of raw materials, otherwise it may lead to the turmoil of the entire steel market, and even the trend of economic chaos to bankruptcy.

Keywords: Low Carbon; Scrap Quality; Stability; Complexity; Game Theory; Chaos Theory

0 引言

钢铁工业作为经济建设的基础性产业, 关系国计民生, 在我国工业现代化进程中发挥了不可替代

的作用。随着钢铁生产规模和经营体量的迅速扩大, 资源瓶颈和环保压力越来越强烈地对未来钢铁行业

收稿日期: 2022-10-15; 录用日期: 2023-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72071106, 72074001), 复杂系统多学科管理与控制安徽省教育厅重点实验室开放课题 (RZ2200000691).

[†]通讯作者. E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn

的发展构成实质性约束。“十四五”循环经济发展规划提出,在工业领域推进循环经济,提高再生资源对原生资源的替代比例,推进扶持废钢铁产业规范化发展,建立绿色清洁生产流程。这对实现钢铁行业转型升级和高质量发展,推动实现碳达峰、碳中和,促进生态文明建设具有十分重要的意义。

在生态环境质量不断提高的新需求下,废钢作为唯一可以大量替代铁矿石的炼钢原料,是节能载能的再生资源^[1],是实现钢铁工业低碳绿色发展、转型升级的核心和关键。相较于以铁矿石为原料炼钢,以废钢为原料每生产 1 吨钢可以减少约 1.6 吨二氧化碳排放。我国 2020 年废钢利用量约 2.6 亿吨,仅此一项就可以减少二氧化碳排放量约 4.16 亿吨^[2]。然而,废钢质量的高度不确定性是目前制约我国低碳生产(电炉流程)发展的关键因素。废钢原料通常含有铁锈,冶炼过程中会直接增加钢渣量,降低炉渣碱度,加剧电炉内的杂质,特别是泥沙(含二氧化硅)对碱性炉墙的侵蚀,进而减低电炉炉体寿命。冶炼不同钢种对废钢中的化学元素要求不同,低质量的废钢会造成元素浪费、延长冶炼时间、增加钢渣量和原燃料费用^[3]。因此,探讨废钢铁质量对整个钢铁制造供应链的影响尤其重要。

我国钢铁工业的传统资源要素投入比例偏高,解学梅^[4]提出实现“双碳”目标要立足本土,绿色转型过程可以划分为传统发展期、绿色转向期和绿色转型期。国内外学者探讨了不同的环境政策对企业经济效益、减排策略^[5]的影响。基于欧盟排放交易计划(UE-ETS)对钢铁行业的影响,Riccardi^[6]建立了一个市场主体内生地决定产量和钢铁价格的数学模型,分析了碳捕获和存储技术的投资问题。在碳限额与交易政策、碳税政策约束下,市场产品竞争^[7]、减排机制选择^[8]以及上下游企业合作策略^[9]都会影响钢铁企业的生产优化^[10]及减排轨迹。现有的文献较少考虑到上游原料的质量在上下游企业应对绿色转型策略的影响,以及对整个供应链系统稳定性的影响。

产品质量对供应链的可靠性、可持续性 & 成本优化^[11]具有重要意义,受分销策略^[12]、上下游参与者合作决策和激励机制^[13]等因素的影响。谢家平^[14]将产品质量水平作为制造商的内生变量,考虑质量水平对返回废旧产品降级率的影响,从而讨论制造商的最优制造策略。Baiman^[15]等发现合同的变化对整个供应链的总质量和成本分配造成影响,制定了供应链中的质量预防策略。结合碳减排政策,

Allah^[16]构建了制造商联合零售商、第三方再制造商进行再制造过程对碳减排、质量改进影响的决策模型。Zhang 等^[17]构建了新品与再制品同质或异质情形下制造商有无碳排放约束的动态定价策略及绿色创新水平决策模型。

企业决策的市场环境多变且信息不完全,供应链中各博弈主体并非完全理性。这使得企业在进行价格决策时,总是基于获取到的有限市场信息反复调整各自的策略,最终制定出最有利于自身利益的生产策略。将非线性动力学理论与寡头博弈理论相结合已成为经济学者研究经济现象的主要方法之一^{[18][19]},研究有限理性寡头博弈中的纳什均衡及动态稳定性,分析动力系统的全局稳定性^[20],市场的信息溢出影响^[21]及企业信贷风险^[22],并提出混沌经济系统的分岔控制思想及实现途径^[23]。Ma 等^[24]分析碳减排背景下新能源企业与燃油汽车的市场博弈行为,并通过非线性动力学理论发现补贴往往会对系统的稳定性产生负面影响。

上述模型研究多是基于低碳约束下的企业生产、定价策略或质量控制策略研究,无法刻画外部环保压力对上游的原料质量的影响,以及原材料质量对整个供应链系统稳定性的影响。实际上,废钢再加工企业与钢厂之间存在复杂的博弈关系,钢铁再制造的供应链系统的稳定性同时受到碳减排压力和上游废钢质量的影响。因此,本文将废钢原料的质量作为内生变量,运用博弈理论分析碳减排压力对废钢原料质量决策的影响。运用混沌理论建立动态博弈模型,分析碳减排和废钢质量对整个供应链稳定性的影响。本文构建了钢铁企业制造优化决策模型,使再制造生产决策研究更接近实际,为钢铁企业稳定、可持续地绿色低碳转型升级实践提供理论参考。

1 问题描述与条件假设

本研究由一个钢铁制造商和两个原料供应商组成的两级供应链,钢铁企业的炼钢原材料一部分来自铁矿石,一部分来自废钢,模型的结构如图 1 所示。

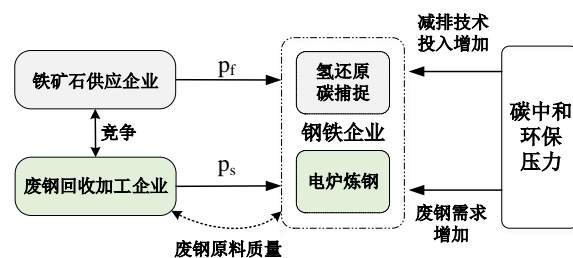


图 1 钢铁生产供应链结构

由于钢铁行业资源依赖程度高, 因此原料供应商占主导地位。钢铁企业在供应商确定了原材料价格之后, 再决策钢铁产品的市场价格。废钢供应企业从不同渠道回收的废旧钢铁, 经过清洁、除杂、分类打包, 提供给钢铁企业作为炼制钢铁产品的原材料, 称之为“废钢原材料”。相关假设和符号说明如下:

假设 1 碳减排压力 c 是由外部环境和政府政策决定, 是外生变量。在碳减排约束下, 钢铁企业一方面在铁矿石炼钢过程中, 需要投入成本实现技术创新, 例如发展氢还原炼铁、脱碳化、碳捕捉。另一方面, 对废钢这种价格相对较高但是碳排放低的原材料需求量增加。

假设 2 本模型默认铁矿石的质量水平为 0, 未加工的废钢质量水平也为 0, 加工后的废钢原材料质量水平为 q , $q \in (0, 1)$ 。废钢加工企业为了提升废钢原料的质量水平, 投入的努力成本是非线性的^[25,26], 本模型假设为 eq^2 。从控制生产成本、炼钢工艺的角度出发^[27], 钢铁企业是倾向于收购质量水平尚佳的废钢原材料。

假设 3 本研究假设以废钢为原料的电炉炼钢过程是清洁生产, 以铁矿石为原料的冶炼过程需要控制碳排放量。钢铁企业为了应对外部的减排压力, 在冶炼过程中积极研发减碳技术, 投入的努力成本是非线性的^[25,26], 本模型假设为 kc^2 。

表 1 模型参数说明

序号	变量名称
p_f	铁矿石的价格
p_s	废钢原料价格, 由废钢供应商决策
p	钢铁产品的市场价格, 由钢铁企业决策
Q_f	钢铁企业对铁矿石原料的需求
Q_s	钢铁企业对废钢原料的需求
c_f	铁矿石的开采成本
c_0	钢厂将未加工的原料冶炼成钢的固定成本
a	钢铁产品潜在的市场价格
b_1	原料需求对原材料价格的敏感系数
b_2	两种原料之间的竞争系数(可替代系数)
b_3	原料需求对废钢原料质量的敏感系数
e	废钢供应企业提升废钢原料质量的努力系数
q	加工后的废钢原料的质量
k	铁矿石炼钢流程中减碳努力系数
c	外部碳减排压力系数
v_f	铁矿石价格的调整速度
v_s	废钢原材料价格的调整速度
v_q	废钢质量的调整速度

2 模型构建与分析

铁矿石和废钢渠道的需求函数分别表示如下:

$$Q_f = a - p - (b_1 + c)p_f + b_2p_s - b_3q$$

$$Q_s = a - p - (b_1 - c)p_s + b_2p_f + b_3q$$

其中 Q_f 表示钢铁企业对铁矿石原料的需求量, Q_s 表示钢铁企业对废钢原材料的需求量。 b_1 表示钢铁企业的铁矿石(废钢)原料需求对相应原料价格的敏感系数, c ($c < b_1$) 表示外部碳中和政策的压力对原材料需求的影响系数, 钢厂由于受到外部环保压力的影响, 对废钢原材料价格的敏感性减弱, 但是环保政策对需求的影响力小于价格的影响力。铁矿石和废钢作为炼钢的原料, 具有可替代性, b_2 表示两种原料之间的竞争系数(可替代性), b_3 表示废钢质量水平对钢铁企业需求的影响系数, 优质废钢(例如硫含量和磷含量分别不大于 0.07% 和 0.4%)有利于钢厂减少炼钢成本, 提升钢铁产品质量, 从而该渠道的需求量就大。

铁矿企业 π_f 的利润函数是出售铁矿石的收入减去开采成本, 废钢供应企业 π_s 的利润是出售废钢原材料的收入减去回收废钢成本和提升废钢质量而投入的研发成本,

$$\pi_f = (p_f - c_f)Q_f$$

$$\pi_s = (p_s - eq^2 - c_s)Q_s$$

c_f 表示铁矿石的开采运输成本, 由于矿石的开采成本较低, 也为了后续计算简洁, 在本模型中令 $c_f = 0$ 。 c_s 表示废钢的回收成本, 根据假设 2, 提升废钢质量的成本记作非线性函数 eq^2 , 由于废钢的回收成本与废钢质量正相关, 回收的废钢质量越好, 回收价格越高, 因此将废钢回收成本也看做提升废钢质量的成本投入, 废钢企业的利润函数简化为 $\pi_s = (p_s - eq^2)Q_s$, e 表示废钢供应企业提升废钢质量的努力系数。

钢铁企业的利润函数 π_m 由两部分组成: 1) 源自铁矿石炼钢渠道, 铁矿石炼钢优势是成本较低^[28], 但碳排放量大。钢铁企业除了固定的炼钢成本 c_0 外, 在双碳目标约束下, 还需要额外投入成本发展低碳炼钢技术, 如氢基炼钢、碳捕捉等, k 表示钢铁企业降低碳排放的努力系数, 根据假设 3 低碳投入成本记作 kc^2 。2) 源自废钢炼钢渠道, 由于废钢炼钢相对清洁环保, 且废钢质量越好, 炼钢成本越低, 缩减了固定成本, 记作: $c_0(1 - q)^2$ 。从而, 钢铁企业的利润函数写作:

$$\pi_m = (p - p_f - c_0 - kc^2)Q_f + (p - p_s - c_0(1 - q)^2)Q_s$$

2.1 完全信息的静态博弈

第一阶段, 原料供应商首先决策铁矿石和废钢原料的价格及废钢原料的质量水平。第二阶段, 钢

铁企业根据采购的铁矿石和废钢原料的价格决策钢铁产品的市场价格。

根据逆向归纳法,钢铁企业为了实现利润最大化,决策钢铁产品的市场价格。通过对钢铁企业的利润求二阶偏导数 $\frac{\partial^2 \pi_m}{\partial^2 p} = -2$, 即二阶偏导小于零,说明 π_m 关于决策变量 p 是凹函数。通过解 $\frac{\partial \pi_m}{\partial p} = 0$ 可以得到钢铁企业取得最大利润时的最优定价:

$$p^* = \frac{p_s(1+b_2-b_1+c)}{4} + \frac{2a+c_0+c_0(1-q)^2+kc^2}{4} + \frac{p_f(1+b_2-b_1-c)}{4} \quad (1)$$

将 p^* 代入 π_f 和 π_s , 铁矿企业和废钢供应企业根据各自的利润最大化原则分别决策 p_f, p_s 和 q 。根据一阶最优条件, 令 $\frac{\partial \pi_f}{\partial p_f} = 0$, $\frac{\partial \pi_s}{\partial p_s} = 0$, $\frac{\partial \pi_s}{\partial q} = 0$, 可以得到命题 1, 即最优的原料价格和废钢质量水平 (p_f^*, p_s^*, q^*) 。

命题 1 钢铁市场中原料供应商占主导, 铁矿企业和废钢供应企业决策的最优原材料价格和废钢原料质量水平如下:

$$p_f^* = \frac{A(16B-28c+16D)+(-16B+16D+20c)b_3q}{16B^2-16D^2-35c^2} + \frac{(8BD-2Bc-12Dc+3c^2)eq^2}{16B^2-16D^2-35c^2} \quad (2)$$

$$p_s^* = \frac{A(16B+28c+16D)+(16B-16D+20c)b_3q}{16B^2-16D^2-35c^2} + \frac{(8B^2-18c^2)eq^2}{16B^2-16D^2-35c^2} \quad (3)$$

$$q^* = \frac{2b_3+c_0}{2eB-3ce+c_0} \quad (4)$$

其中,

$$A = \frac{2a-c_0-kc^2}{4} - \frac{c_0}{4} \left(\frac{2b_3-(1+3b_1+b_2-3c)}{e(1+3b_1+b_2-3c)+c_0} \right)^2$$

$$B = \frac{1+3b_1+b_2}{2}, D = \frac{-1+b_1+3b_2}{2}$$

推论 1 外部环境碳减排的压力系数 c 越大, 废钢原料的最佳质量水平 q^* 越高。

证明 通过对 q^* 的表达式 (4) 关于 c^* 求导, 可以得到

$$\frac{\partial q^*}{\partial c} = \frac{3e(2b_3+2c_0)}{(2eB-3ce+c_0)^2} > 0$$

结果表明, 随着外部碳减排压力的增大, 废钢供应商为获取最大利润, 决策的最优质量水平是逐步递增的。因此, 废钢供应企业必须投入成本提升废钢加工后的质量, 才能够获得更高的利润。证明成立。□

推论 2 钢铁企业获得最大利润时要求的废钢质量水平高于废钢企业获得最大利润时要求的废钢质量水平。

证明 首先通过计算钢铁企业的利润函数 π_m 和废钢供应企业的利润函数 π_s 关于 q 的二阶导数, 可以得到 $\frac{\partial^2 \pi_m}{\partial^2 q} < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_s}{\partial^2 q} < 0$ 。因此, 存在最优的质量水平使得钢铁企业和废钢供应商的利润最大。根

据一阶最优条件, 对钢铁企业和废钢企业的利润函数关于 q 求一阶导数, 并将获取最值点的 q 值做差:

$$\frac{2c_0b_3-c_0(a-p+b_2p_f-(b_1-c)p_s)}{6c_0b_3} - \frac{e(a-p+b_2p_f-(b_1-c)p_s)}{-2eb_3} = \frac{1}{3}(1+(a-p+b_2p_f-(b_1-c)p_s)) > 0$$

证明成立。□

废钢原材料的质量水平不仅影响废钢供应企业的经济效益, 也直接影响下游钢铁企业的利润情况。需要关注的是, 废钢供应企业和钢铁企业的利润函数的最大值点不同步, 钢铁企业的达到利润最大时要求的废钢原材料的质量水平更高。从实际的管理分析, 钢铁企业更需要高质量的废钢作原料, 因此可以给予废钢供应商一定的技术支持, 降低废钢供应企业的生产成本, 进一步提升废钢原材料的质量, 最终实现钢厂和废钢供应企业的利润双赢。以目前的实际情况, 主要制约是废钢原料的质量过低, 所以暂无需考虑废钢质量过高的情况。

推论 3 当钢铁产品价格稳定时, $\frac{\partial p_f}{\partial b_2} > 0$, $\frac{\partial p_s}{\partial b_2} > 0$ 。

推论 3 表明, 两种原料的价格随着竞争系数的增加而提高。在现有装备条件和生产水平下, 常用铁水加废钢冶炼法或转炉中加入废钢的方式用于降低成本, 提高竞争力。随着冶炼技术的提高, 两种原料可替代性增强, 原料价格上调。

推论 4 当钢铁产品价格稳定时, 若 $A1 > 0, A2 > 0$, 则 $\frac{\partial^2 p_f}{\partial c \partial b_2} > 0$, $\frac{\partial^2 p_s}{\partial c \partial b_2} > 0$, 表明外部碳减排压力加剧了原料价格对竞争系数的敏感性。当钢铁产品价格稳定时, 若 $A1 < 0, A2 < 0$, 则 $\frac{\partial^2 p_f}{\partial c \partial b_2} < 0$, $\frac{\partial^2 p_s}{\partial c \partial b_2} < 0$, 表明外部碳减排压力削弱了原料价格对竞争系数的敏感性。

2.2 有限理性的动态博弈

市场主体的理性程度不同, 获取的市场信息不完全, 对市场的反映速度不一等因素会使博弈主体的决策环境非常复杂。有限理性期望下, 各企业为了规避风险或者得到最大利润通常会综合运用当前和最近一期的信息, 基于边际利润变化动态地调整生产策略。这种动态调整方式更有利于钢铁企业面对变动的市场行情及时调整策略, 经过有限次重复博弈后将趋于稳定, 从而达到静态 Nash 均衡。钢铁企业作为供应链的下游企业, 只需要根据供应商的原材料价格和最优反应函数, 决策钢铁产品的市场价格。因此, 本模型只有考虑上游的铁矿企业和废钢供应企业对原材料零售价格及质量水平做出动态调整。基于此, 利用非线性动力学与混沌理论构建离散动力系统方程来描述该模型长期动态调整策略

的过程:

$$\begin{cases} p_f(t+1) = p_f(t) + v_f p_f(t) \frac{\partial \pi_f(t)}{\partial p_f(t)} \\ p_s(t+1) = p_s(t) + v_s p_s(t) \frac{\partial \pi_s(t)}{\partial p_s(t)} \\ q(t+1) = q(t) + v_q q(t) \frac{\partial \pi_s(t)}{\partial q(t)} \end{cases} \quad (5)$$

等号左边表示企业在 $(t+1)$ 时期的决策, $v_i (i = f, s, q)$ 表示各参数的调整速度。由于钢铁企业的市场价格是根据原材料价格做出最优反应决策, 所以将 (2) 式代入离散动力系统 (5), 经过反复动态博弈, 系统最终趋于平衡。通过求解 $p_f(t+1) = p_f(t), p_s(t+1) = p_s(t), q(t+1) = q(t)$ 可以得到系统 (5) 的解。从经济学意义的角度看, 无论铁矿石还是废钢原材料, 都不会将售价定为 0。因此我们仅讨论边界点 $E_1 = (p_f^*, p_s^*, 0)$ 和内部均衡解 $E^* = (p_f^*, p_s^*, q^*)$ 附近的稳定性, 以研究外部因素将如何影响企业策略长期动态演化路径。因此, 动态系统 (5) 的雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}.$$

命题 2 系统 (5) 在边界点 $E_1 = (p_f^*, p_s^*, 0)$ 处是不稳定的。

证明 通过特征值的方法判断稳定性, 将边界点 E_1 带入到雅可比矩阵 J 中,

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ 0 & 0 & p_s^* v_q (b_3 + \frac{c_0}{2}) + 1 \end{bmatrix}.$$

可以发现存在特征根 $\lambda = p_s^* v_q (b_3 + \frac{c_0}{2}) + 1$, 由于所有参数大于 0, 故 λ 的模大于 1, 因此系统在边界点 E_1 处是非稳定的。这表明, 如果废钢再加工企业不对回收的废钢不做任何处理, 废钢原料携带各种杂质, 不仅直接影响废钢供应商和钢铁企业的经济效益, 长此以往会减弱整个供应链系统的稳定性。证明成立。□

与定理 1 的证明类似, 由 Jury 判据^[29]可知, 当满足条件:

$$\begin{cases} 1 - \text{Tr}(J) + \text{Det}(J) > 0 \\ 1 + \text{Tr}(J) + \text{Det}(J) > 0 \\ 1 - \text{Det}(J) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\text{Tr}(J)$ 和 $\text{Det}(J)$ 分别表示 $J(E^*)$ 的迹和行列式, 系统 (5) 在 Nash 均衡解 $E^* = (p_f^*, p_s^*, q^*)$ 处是局部渐近稳定的。

3 数值模拟

3.1 关键参数对价格和利润的影响

本研究中假设环保压力为外生变量, 通过 Nash 均衡解的表达式 (1)、(2)、(3)、(4), 可以进一步讨论供应链各博弈主体的价格、利润, 以及废钢加工的质量水平受碳减排的影响情况。

为了直观的表达外部碳减排的影响, 参考文献^[24,30]的数值模拟分析的方法, 参数值的选取首先要符合经济学意义, 保证博弈均衡的存在性, 还要保证主要结果不会受不同参数值的影响, 结果是可靠的。基础参数取值为 $a = 10, b_1 = 1.2, b_2 = 1, b_3 = 0.5, c_0 = 1, e = 0.5, k = 1$ 。由图 2(a) 可见, 随着碳减排压力的增加, 钢铁产品价格升高, 废钢作为钢铁清洁生产的唯一原材料, 原料价格也随着需求增大而逐渐升高, 而铁矿石价格略微降低。利润是供应链各博弈主体最关心的指标, 随着碳减排压力的增加, 图 2(b) 显示铁矿石供应商的利润逐渐降低, 其主要原因是环保压力导致铁矿石需求量减少。废钢供应商的利润大幅度增加, 且钢铁企业的利润有小幅度的增加, 结合图 2(a) 分析, 其主要原因是碳中和趋势直接导致废钢需求增加, 废钢原料的价格上涨。

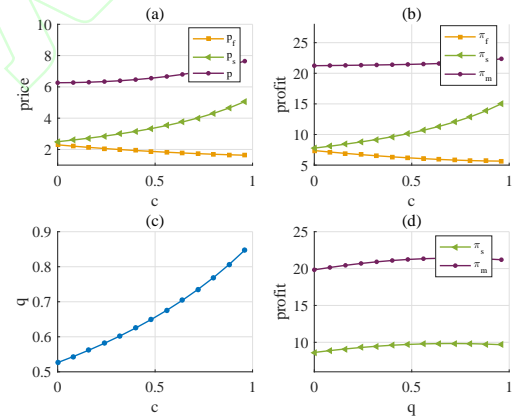


图 2 关键参数的影响趋势

废钢供应企业决策废钢原料的质量水平, 这直接影响到供应链上下游企业的利润情况。图 2(c) 展示碳减排压力增大后, 废钢原料的最佳质量水平变化情况, 也验证了推论 1 的结论。从管理学的角度分析, 废钢供应企业若要获取最优利润, 需要投入成本提升废钢加工质量, 自身才能够获得更高的利润, 进而, 才能让整个供应链高质量地逐步转移到清洁生产模式。

随着废钢原材料质量水平的提升, 废钢供应企业和钢厂的利润变化如图 2(d) 所示。圆圈表示废钢供应企业的利润, 呈倒 U 型, 这是因为废钢供应企业为了提升废钢原料的质量水平, 需要投入低碳创新

生产成本,而且质量水平越高,投入的成本越大,导致总利润下降。钢铁企业的利润情况是,随着废钢原材料质量的增加,钢铁企业的利润由增长变为下降。这是因为高质量的废钢导致高水平的废钢价格,钢铁企业原料成本增加,从而压缩了钢铁企业的利润空间。

3.2 局部及全局稳定性分析

本小节应用数值模拟的方式展示非线性动力系统(5)的局部渐近稳定性和全局动态特征,运用分岔和混沌理论分析均衡点的演化特征。本节仍假设参数 $a = 10, b_1 = 1.2, b_2 = 1, b_3 = 0.5, c_0 = 1, k = 1$, 代入后可以得到 Nash 均衡解 $E^*(p_f^*, p_s^*, q^*) = (1.9, 3.4, 0.66)$ 。

基于 Jury 判据分析离散系统的局部稳定性,在给定参数下绘制出动态博弈系统(5)的三维稳定域图。如图3所示, v_f, v_s 和 v_q 分别代表调整参数,系统的稳定区域集中于一块具有特定形状的区域。当上游铁矿石企业和废钢再加工企业的价格决策调整速度超过阈值,系统将失去稳定性进入多周期分岔状态直至进入混沌状态。

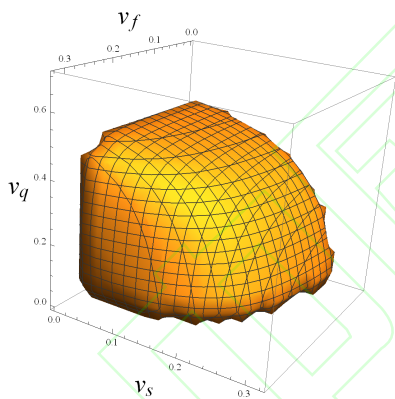


图3 系统在 Nash 均衡解处的局部稳定域的三维图

废钢供应企业作为供应链的上游企业,废钢价格的不稳定会引起整个供应链的动荡。图4(a)展示当废钢企业选择加工质量水平 $q = 0.1$ 时,由废钢价格引发的供应链动态调整系统会在 $v_s = 0.3283$ 时发生分岔。当废钢企业选择加工质量水平为 $q = 0.66$ 时,从前面的讨论可知,这是质量水平是废钢供应企业的最优决策值,系统会在 $v_s = 0.3058$ 时发生分岔,供应链的稳定区间缩小了。当废钢企业选择加工质量水平为 $q = 0.8$ 时,由废钢价格引发的供应链动态调整系统会在 $v_s = 0.2982$ 时发生分岔。随着废钢质量的提升,废钢原料的价格逐步增高,但是系统(5)的分岔点逐渐提前,稳定区间缩小。

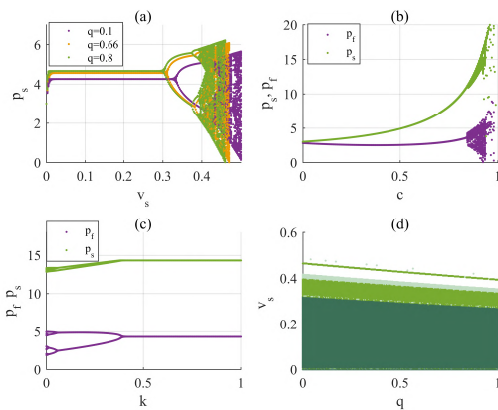


图4 系统的分岔图

图4(b)表示外部的碳减排压力对原料价格的影响。其他参数保持不变,两个原料供应商根据各自的边际利润通过梯度调节的方式动态决策各自的定价策略。随着外部减排压力逐渐增大,原料价格从稳定状态逐步进入分岔、混沌状态。废钢价格整体呈上升趋势,但是铁矿石的价格有少许下滑。然后利用延迟控制的方法,对铁矿石和废钢企业的边际利润增加一个 $\frac{1}{1+k}$ 的参数,从图4(c)可以看出,在 $c = 0.9$ 的状态下,原料价格从混沌状态逐步进入分岔直至稳定状态。

图4(d)展示了废钢价格参数的倍周期分岔图,横坐标 q 表示废钢质量水平,纵坐标表示废钢价格的调整参数 v_s 的稳定区域和倍周期区域。其中,深绿色表示稳定区域,中绿色表示二倍周期分岔区域,淡绿色表示四倍周期分岔区域,白色表示四倍以上及混沌区域。从图4(d)的深绿色部分可以发现,随着 q 的增加,深绿色区域的 v_s 呈下降趋势。即,随着废钢质量的提升,系统的稳定性区间逐渐减少。

局部稳定性只关注平衡点周围的一个小邻域,事实上,系统的初始态并不总是在平衡点的小邻域内。因此,有必要对该系统进行全局动力学分析。奇异吸引子是反映混沌系统运动特征的产物,也是一种混沌系统中无序稳态的运动形态。由混沌理论可得,系统的非线性特征会使得系统在特定情况下出现结果不可预测的情况,但这种不可预测的情况又被约束于某个范围内,而这个确定性范围可以用吸引子表示。当 v_s 取不同的值时,系统(5)的奇异吸引子如图5所示,分别对应于系统的稳定状态,二倍、四倍周期分岔状态,及混沌状态。吸引域表示初始轨迹都最终收敛于吸引子的吸引域。当 $c = 0.1$ 时最终收敛于吸引子的初始值的区域,小于 $c = 0.6$ 时最终收敛于吸引子的初始值的区域。这说明当外部碳减排压力增大,铁矿石的可以决策的初始价格区

域缩小, 因此铁矿石企业应慎重决策, 而废钢供应商可以决策的初始废钢价格区域增大, 主要原因是 c 影响市场需求, 扩大了 p_s 的稳定域。

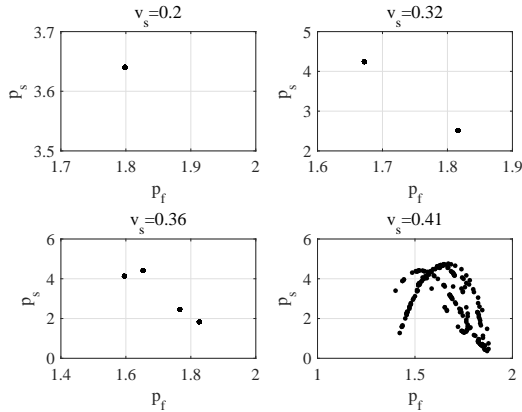


图5 不同 v_s 值下系统 (5) 的吸引子

4 结论与建议

本研究在碳达峰、碳中和目标引领下, 从静态最优和动态博弈的角度分析了钢铁制造各参与主体的低价策略, 探讨了外部环保压力和废钢原材料质量水平对钢铁制造流程中各参与主体的利润和系统稳定性的影响。管理启示如下:

1) 提升废钢质量有利于供应链上下游实现共赢。研究表明, 随着外部政策和环保压力的增大, 钢铁产品和废钢原料价格上涨, 废钢再加工企业只有不断加强废钢清洁和分类, 提升废钢质量, 才能保障废钢再加工企业和下游钢铁制造商在新形势下取得更高的利润。实践过程中, 废钢质量制约废钢-电炉流程炼钢, 而目前废钢供应企业只能做简单的分类打包, 故应努力提升管理者的质量意识, 除了物理角度的防潮、清洁、分类等措施外, 还应该投入技术成本, 努力实现废钢原料的 AI 识别, 例如识别硫、磷、铜等不利元素。

2) 给予废钢供应企业一定的鼓励政策和技术投入。废钢质量的提升需要加工企业投入大量的资金和技术成本, 而废钢供应企业受困于现有传统技术思维惯性, 以及技术创新本身的高风险和低短期收益, 提升加工水平的自主意愿有限。因此建议给予废钢供应企业一定的鼓励和技术投入, 更有利于实现废钢回收再制造供应链上下游主体的利润最大化。

3) 引导市场自律, 注重可持续发展。首先, 通过建立长期博弈的动态博弈模型分析, 废钢质量水平的提升会导致供应链系统的稳定性下降, 上游原材料的定价策略调整超过稳定阈值也会降低系统抗风险的能力。因此上游供给端应该控制废钢原料价格的波动, 稳定废钢质量水平。当前, 各大废钢企业在

扩大企业规模推进废钢平台数智化的过程, 隐含了市场的不稳定因素, 应引导企业自律, 遵守市场规律, 循序渐进的提升, 否则过犹不及, 造成不必要的资源浪费。

4) 维护市场稳定, 加强市场监管。目前我国仍然是以铁矿石为原料的长流程炼钢为主, 应坚持系统谋划, 采取碳达峰的路径, 给钢铁供应链上下游企业一定的缓冲发展空间, 立足中国能源资源禀赋, 有计划分步骤、循序渐进过渡到以废钢为主的短流程炼钢模式。加强政府监管, 通过的大数据等信息化技术监测市场价格和产品质量, 同时国内废钢还没有迎来集中报废期, 可以通过进口优质废钢缓解国内需求, 避免因废钢价格波动过大, 引起钢铁市场动荡甚至出现经济混沌现象。因此, 关注废钢质量, 对优化原料供给, 实现炼钢流程优质、高产、低消耗, 保障钢铁工业绿色高质量发展具有重要价值。

未来的工作可以考虑原料供应商市场地位的差异, 冶炼成本的差异, 以及废钢冶炼过程的减碳成本。

参考文献 (References)

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
(Yin R Y. Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.)
- [2] 工业和信息化部, 发展改革委, 生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见 [EB/OL]. (2022-01-20) [2022-01-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.html.
(Ministry of Industry and Information Technology, Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment. Guidelines on promoting high-quality development of Iron and steel industry[EB/OL]. 2022.1.20. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm)
- [3] 何艳. 废钢加工企业风险探究 [J]. 冶金财会, 2020, 39(12):36-39.
(He Y. Risk study of scrap steel processing enterprises[J]. Metallurgical Financial Accounting, 2020, 39(12):36-39.)
- [4] 解学梅, 韩宇航. 本土制造业企业如何在绿色创新中实现“华丽转型”——基于注意力基础观的多案例研究 [J]. 管理世界, 2022, 38(3): 76-105.
(Xie X M, Han Y H. How can local manufacturing enterprises achieve luxuriant transformation in green innovation? A multi-case study based on attention-based view[J]. Journal of Management World, 2022, 38(3): 76-105.)
- [5] 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低

- 碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. 控制与决策, 2023, 1-7.
- (Zhang C, MA H M, Guo Z. Carbon emission reduction and financing strategy for a supply chain under cap-and-trade regulation and consumer's low-carbon preference[J]. Control and Decision, 2023, 1-7.)
- [6] Riccardi R, Bonenti F, Allevi E, et al. The steel industry: A mathematical model under environmental regulations[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 242(3): 1017-1027.
- [7] 李倩茹, 陈伟达. 考虑绿色网络效应的再制造产品最优生产决策及产品之间的竞争[J]. 控制与决策, 2021, 36(04):993-1002.
- (Li Q R, Chen W D. Optimal production for remanufacturing products and competition among consumers in the presence of green network effect[J]. Control and Decision, 2021, 36(04):993-1002.)
- [8] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略[J]. 控制与决策, 2021, 36(07):1763-1770.
- (Diao X W, Zeng Z X, Sun C. Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy[J]. Control and Decision, 2021, 36(07):1763-1770.)
- [9] 赵道致, 原白云, 徐春秋. 低碳环境下供应链纵向减排合作的动态协调策略[J]. 管理工程学报, 2016, 30(1): 147-154.
- (Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C Q. Dynamic coordination strategy of vertical cooperative on carbon emission reduction in supply chain under low-carbon era[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2016, 30(1): 147-154.)
- [10] 张燕华, 陈伟达, 杨烨. 低碳环境下废钢铁再加工生产调度优化[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 187-194.
- (Zhang Y H, Chen W D, Yang Y. Production scheduling optimization of scrap steel reprocessing in low carbon environment[J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(2): 187-194.)
- [11] 王欢, 方志耕, 邓飞, 陶良彦. 考虑质量价值水平的复杂产品供应链质量成本优化方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(9):1973-1980.
- (Wang H, Fang Z G, Deng F, Tao L Y. Quality cost optimization method for complex product supply chain considering quality value[J]. Control and Decision, 2019, 34(9):1973-1980.)
- [12] Shi H Y, Liu Y C, Petruzzi N C. Consumer heterogeneity, product quality, and distribution channels[J]. Management Science, 2013, 59(5): 1162-1176.
- [13] 张巧可, 陈洪转. 基于质量意识的复杂产品质量控制激励策略[J]. 中国管理科学, 2021, 29(6): 105-114.
- (Zhang Q K, Chen H Z. Incentive strategy for complex product quality control based on quality awareness[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(6): 105-114.)
- [14] 谢家平, 迟琳娜, 梁玲. 基于产品质量内生的制造/再制造最优生产决策[J]. 管理科学学报, 2012, 15(8):12-23.
- (Xie J P, Chi L N, Liang L. Optimal manufacturing /remanufacturing production decision based on endogenous product quality[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(8): 12-23.)
- [15] Baiman S, Fischer P E, Rajan M V. Information, contracting, and quality costs[J]. Management Science, 2000, 46(6): 776-789.
- [16] Allah T A, Nima A-B, Akhavan N S T. A closed-loop supply chain considering carbon reduction, quality improvement effort, and return policy under two remanufacturing scenarios[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232(20): 1230-1250.
- [17] Zhang Z, Gong B, Tang J, et al. The joint dynamic green innovation and pricing strategies for a hybrid system of manufacturing and remanufacturing with carbon emission constraints[J]. Kybernetes, 2019, 48(8): 1699-1730.
- [18] Elsadany A A. Dynamics of a Cournot duopoly game with bounded rationality based on relative profit maximization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2017, 294: 253-263.
- [19] Yuan J, Zhu J J. Stability and complexity analysis of multichannel supply chain with price competition[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2022, 32: 2250019.
- [20] Bischi G I, Chiarella C, Kopel M, et al. Nonlinear oligopolies stability and bifurcations[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [21] Li H, Zhou W, Elsadany A A. Stability, multi-stability and instability in Cournot duopoly game with knowledge spillover effects and relative profit maximization[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2021, 146: 110936.
- [22] 陈庭强, 沈嘉贤, 杨青浩, et al. 信用多重约束下动态双寡头古诺博弈的非线性演化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(1): 91-109.
- (Chen T Q, Shen J X, Yang Q H, et al. Nonlinear evolution of dynamic duopoly Cournot game under multiple credit constraints[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2023, 43(1): 91-109)
- [23] 李煜, 盛昭瀚, 陈国华. 混沌经济系统的控制优化[J]. 中国管理科学, 2003, 11(3): 66-71.
- (Li Y, Sheng Z H, Chen G H. Improving the performance of a chaotic economic system[J]. Chinese Journal of Management Science, 2003, 11(3): 66-71.)
- [24] Ma J H, Hou Y M, Yang W H, et al. A time-based pricing game in a competitive vehicle market regarding the intervention of carbon emission reduction[J]. Energy Policy, 2020, 142: 111440.
- [25] He Y, Xu Q Y, Xu B, et al. Supply chain coordination in quality improvement with reference effects[J]. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(9): 1158-1168.
- [26] Lee H, Li C. Supplier quality management: Investment,

- inspection, and incentives[J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(2): 304-322.
- [27] 崔海川. 高合金废钢冶炼高品质 H13 钢工艺及其优化条件的研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
(Cui H C. Study on the Process and Optimal Conditions of Smelting High-quality H13 Steel from High-alloy Scrap Steel[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2020)
- [28] 阮清华, 白苗苗. 我国长流程炼钢与短流程炼钢成本比较 [J]. *中国钢铁业*, 2019, (10):58-60.
(Ruan Q H, Bai M M. The cost comparison between long process steel making and short process steel making in China[J]. *China Steel*, 2019, (10):58-60.)
- [29] Puu T. *Attractors, Bifurcation and Chaos: Nonlinear Phenomena in Economics*[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [30] 王凤莲, 赵骅, 龚本刚, et al. 混沌控制视角下考虑政府税收的企业集群市场价格动态复杂性研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2022: 1-17.
(Wang F L, Zhao H, Gong B G, et al. Dynamic complexity of enterprise cluster market price considering government tax from the perspective of chaos control[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2022, 1-17.)

作者简介

袁静 (1986—), 女, 助理研究员, 博士研究生, 从事低碳经济、供应链管理研究, E-mail: yuanjing903@163.com;

朱建军 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事应急管理决策、智能决策与风险分析、物流与供应链管理研究, E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn.