

doi:10.13582/j.cnki.1672-7835.2015.03.021

钢铁供应链碳排放系统动力学模型与仿真分析^①

邹安全¹, 刘俊红^{1,2}, 罗杏玲¹

(1. 长沙大学 经济与管理系, 湖南 长沙 410022; 2. 湖南工业大学 财经学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:在对钢铁供应链碳排放系统因果关系深入分析的基础上,构建了钢铁供应链碳排放系统动力学模型,模拟了吨钢生产碳排放量、单位采购碳排放量和采购周期三个参数对钢铁供应链碳排放总量的影响。研究发现:吨钢生产碳排放量和单位采购碳排放量增加,供应链总碳排放量明显增加;而采购周期对供应链总碳排放量有一定影响,但效果不明显。最后从三个方面提出了碳排放控制建议:引进相关技术和设备降低吨钢生产碳排放量、优化物流过程减少单位采购碳排放量以及合理安排采购周期优化库存量。

关键词:钢铁供应链;碳排放;控制;系统动力学

中图分类号:F224/F426

文献标志码:A

文章编号:1672-7835(2015)03-0124-07

The System Dynamics Model and Simulation Analysis of Carbon Emissions of Iron and Steel Supply Chain

ZOU An-quan¹, LIU Jun-hong^{1,2} & LUO Xing-ling¹

(1. Department of Business Administration, Changsha University, Changsha 410022, China;

2. School of Finance and Economics, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: This paper builds the iron and steel supply chain system dynamics model of carbon emissions with an in-depth analysis of causality of the iron and steel supply chain system, and simulates the effects of three parameters over the total carbon emissions of the iron and steel supply chain, i. e. the tons of steel production of carbon emissions, the units purchasing carbon emissions, and the procurement cycle. The study shows that with the increase of tons of steel production of carbon emissions and units purchasing carbon emissions, total carbon emissions of supply chain increase correspondingly, and the effects are obvious. While procurement cycle has certain influence on total carbon emissions of supply chain, but the effects are not obvious. Finally, the paper puts forward the suggestions of carbon emission control from three aspects, that is the introduction of relevant technologies and equipment to reduce tons of steel production of carbon emissions, optimization of logistics processes to reduce units purchasing carbon emissions, and reasonable arrangements of the procurement cycle to optimize inventory levels.

Key words: iron and steel supply chain; carbon emissions; control; system dynamics

工业革命以来,二氧化碳等温室气体排放量逐年增加,温室效应随之增强,引起了气候变化等一系列严重问题,碳减排成为了国际共识。作为世界上最大的碳排放国家,中国政府在 2009 年的哥本哈根气候变化会议上郑重承诺,到 2020 年每单位 GDP 的碳排放在 2005 年的水平上减少 40%~45%。国务院印发的《节能减排“十二五”规划》分析了节能减排的现状与形式,提出了节能减排的目标、主要任务

① 收稿日期:2015-01-29

基金项目:国家社科基金项目(12BJY020);湖南科技厅软科学重点项目(2014zk2058)

作者简介:邹安全(1964-),男,湖南长沙人,教授,博士,主要从事物流流程优化理论与方法、工业工程研究。

及重点工程。我国钢铁产业生产方式目前仍是粗放型,经济增长需要通过资源的高消耗来实现,导致环境污染严重^[1]。钢铁行业既是我国国民经济的支柱行业,也是二氧化碳排放的主要源头之一,因此,如何减少钢铁供应链的碳排放量,对实现国家的碳减排目标具有重要意义。

对于供应链的碳排放问题,国内外有诸多学者运用不同方法对其进行了相关研究。Harold Krikke^[2]用打印机案例为例子,分析研究了不同情形下的闭环供应链对碳足迹的影响。Sundarakani^[3]运用拉格朗日算法和欧拉运输模型对减少供应链中的碳排放建立了量化模型。Bojarski 等^[4]采用 LCA 生命周期评估法建立了供应链模型,并在模型中考虑环保成本。杨君等^[5]运用系统动力学方法建立了供应链模型,模拟了强制碳排放和碳税两种碳排放政策对供应链碳排放总量的影响。Longbin^[6]¹³⁵也运用系统动力学对中国钢铁企业降低能源消耗进行了不同政策的效果分析,对未来中国钢铁企业能源消耗及二氧化碳排放做出了预测。何琼^[7]基于 VAR 模型,研究了我国碳排放与经济增长、能源消耗、对外贸易之间的关系。庞燕等^[8]构建了钢铁制造业物质反复循环流动的绿色供应链结构模型。洪江涛等^[9]对宝钢进行分析,并对企业低碳供应链创新进行了评析。谢鑫鹏等^[10]运用新古典经济学和博弈论的方法分析了国有大型制造型企业如何与供应链上、下游企业进行生产和减排决策。蓝海燕等^[11]考虑了厂商订货、储存过程中的碳排放,建立考虑碳排放的库存成本模型,研究了碳排放的限额与交易机制对厂商订货策略的影响。分析可知,目前,考虑钢铁供应链物流过程碳排放的研究相对较少,也很少有人系统、全面的对钢铁供应链各成员的碳排放量进行全面分析与控制。基于此,本文运用系统动力学 VENSIM 软件,建立钢铁供应链基本模型,将碳排放与供应链管理控制相结合,对钢铁供应链的采购、生产、销售、物流过程中的碳排放进行系统的控制研究,寻求降低供应链碳排放总量的方法和措施。

1 钢铁供应链碳排放系统分析

1.1 模型假设

本文设计的钢铁供应链模型只考虑一个供应商、一个制造商和一个销售商,供应商负责供应原材料,制造商负责产品的生产加工,销售商负责产品的销售。制造商每隔一个周期从供应商处订购原材料,订购过程会产生碳排放,为了满足生产的连续性,制造商会有原材料的库存,原材料库存过程也会产生碳排放。制造商生产过程是产生碳排放的主要环节,同时生产的产品为满足需求的不确定性,会有成品库存,成品库存过程也会产生一定量的碳排放。销售商每隔一个周期从制造商处订购产成品,订购过程会产生碳排放,为了满足市场需求的波动性,销售商也会有产成品的库存,库存过程也会产生碳排放。模型假设:(1)采购过程碳排放只记为发出采购指令当天的碳排放量,每个采购周期产生一次,采购过程碳排放量与采购数量成正比;(2)库存碳排放包括物料和产品的厂内运输、装卸搬运、流通加工以及仓库日常运营等能源消耗产生的碳排放,其碳排放量与库存量和库存时间成线性关系,库存量越大、库存时间越长,产生的碳排放量越多;(3)供应链上的成员需求稳定,生产商的原材料采购周期与销售商的产成品采购周期相等,且整个供应链不发生缺货现象;(4)供应链总碳排放量等于采购碳排放总量加生产碳排放总量加销售碳排放总量。

1.2 因果关系分析

钢铁供应链采购、生产、销售、物流过程都会产生碳排放,可通过降低供应链各级库存量、吨钢生产碳排放量和采购过程碳排放量进行优化控制。因此,模型设计的钢铁供应链碳排放控制系统主要包括 3 个子系统,主要反馈回路如图 1 所示:

- (1)库存控制子系统:供应链碳排放总量→供应链竞争力→盈利能力→科技创新与管理投入→技术与管理水平→库存量→生产/采购/销售/物流碳排放量→供应链碳排放总量。
- (2)吨钢生产碳排放控制子系统:供应链碳排放总

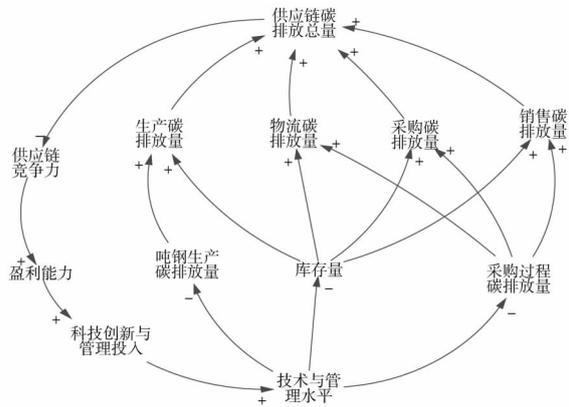


图 1 钢铁供应链碳排放系统因果关系图

量→供应链竞争力→盈利能力→科技创新与管理投入→技术与管理水平→吨钢生产碳排放量→生产碳排放量→供应链碳排放总量。

(3) 采购过程碳排放控制子系统: 供应链碳排放总量→供应链竞争力→盈利能力→科技创新与管理投入→技术与管理水平→采购过程碳排放量→采购/销售/物流碳排放量→供应链碳排放总量。

这3个系统都构成正反馈回路,有助于加强钢铁供应链成员的信息交流,优化供应链各级库存量,减少库存过程碳排放;可不断优化钢铁企业的生产流程,减少吨钢生产碳排放量;有助于选择合理的运输方式、优化运输线路减少物流过程碳排放。

2 系统动力学模型的建立

2.1 钢铁供应链碳排放控制系统流程图

根据因果关系图利用 VENSIM 软件构建钢铁供应链碳排放控制系统流程图(如图2),模型主要考虑了供应商、制造商和销售商在采购、生产、销售以及物流过程的碳排放量。

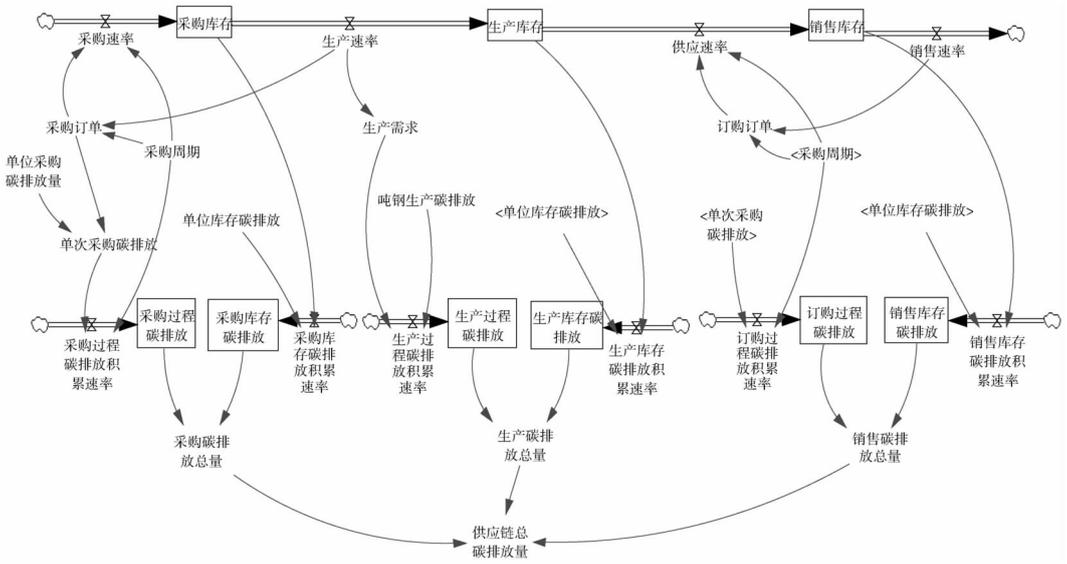


图2 钢铁供应链碳排放系统流程图

2.2 模型主要方程

- (1) 供应速率 = 订购订单 \times PULSE TRAIN(0,1,采购周期,120);
- (2) 总碳排放量 = 生产碳排放总量 + 采购碳排放总量 + 销售碳排放总量;
- (3) 生产库存 = INTEG (生产速率 - 供应速率,2000);
- (4) 生产库存碳排放 = INTEG (生产库存碳排放积累速率,0);
- (5) 生产库存碳排放积累速率 = 单位库存碳排 \times 生产库存;
- (6) 生产碳排放总量 = 生产库存碳排放 + 生产过程碳排放;
- (7) 生产过程碳排放 = INTEG (生产过程碳排放积累速率,0);
- (8) 生产过程碳排放积累速率 = 吨钢生产碳排放 \times 生产需求;
- (9) 生产需求 = 生产速率;
- (10) 订购订单 = 采购周期 \times 销售速率;
- (11) 订购过程碳排放 = INTEG (订购过程碳排放积累速率,0);
- (12) 订购过程碳排放积累速率 = INTEGER(单次采购碳排放 \times PULSE TRAIN(0,1,采购周期,120));
- (13) 采购库存 = INTEG (采购速率 - 生产速率,500);
- (14) 采购库存碳排放 = INTEG (采购库存碳排放积累速率,0);
- (15) 采购库存碳排放积累速率 = 单位库存碳排 \times 采购库存;
- (16) 采购碳排放总量 = 采购库存碳排放 + 采购过程碳排放;

- (17) 采购订单 = 采购周期 × 生产速率;
- (18) 采购过程碳排放 = INTEG (采购过程碳排放积累速率, 0);
- (19) 采购过程碳排放积累速率 = INTEGER(单次采购碳排放 × PULSE TRAIN(0, 1, 采购周期, 120));
- (20) 采购速率 = 采购订单 × PULSE TRAIN(0, 1, 采购周期, 120);
- (21) 销售库存 = INTEG (供应速率 - 销售速率, 500);
- (22) 销售库存碳排放 = INTEG (销售库存碳排放积累速率, 0);
- (23) 销售库存碳排放积累速率 = 单位库存碳排放 × 销售库存;
- (24) 销售碳排放总量 = 订购过程碳排放 + 销售库存碳排放;
- (25) 单次采购碳排放 = 单位采购碳排放 × 采购订单。

2.3 模型相关参数

表 1 模型相关参数

名称	数值	单位	名称	数值	单位
INITIAL TIME	0	天	FINAL TIME	120	天
TIME STEP	1	天	单位库存碳排放	0.001	吨
销售速率	100	吨/天	生产速率	100	吨/天
吨钢生产碳排放	模拟	吨	采购周期	模拟	天
单位采购碳排放量	模拟	吨			

2.4 模型检验

系统动力学模型的检验主要包括稳定性检验、有效性检验和灵敏度检验。如图 3, 通过模拟可知, 系统对时间具有良好的稳定性; 生产过程中的碳排放随着时间的积累呈线性增长, 状态变量的模拟与实际相符; 采购周期取不同的数值, 生产库存发生显著的变化, 表明模型的灵敏度检验通过, 因此模型总体上检验通过。

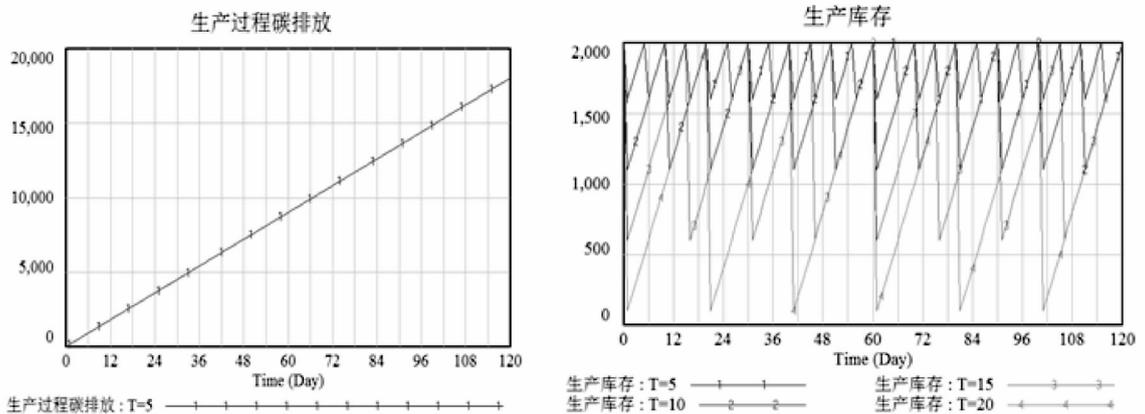


图 3 生产过程碳排放和生产库存模拟

3 钢铁供应链碳排放系统的仿真与分析

模型以一个季度为一个仿真周期, 一天为一个步长, 利用 VENSIM 软件进行仿真, 模拟不同情况下供应链的碳排放总量。本文根据系统动力学模型中相关常量(参数)的设定, 对采购周期、吨钢生产碳排放量、单位采购碳排放量 3 个参数进行调整, 模拟得出不同取值下钢铁供应链总碳排放量, 以实现钢铁供应链碳排放的优化控制。

3.1 模型仿真

3.1.1 不同采购周期下供应链碳排放量仿真

库存量与采购周期有直接联系, 主要是由采购周期决定的。制造商每隔一个固定的周期向供应商采购钢铁生产所需原材料, 销售商每隔一个固定的周期向制造商订购钢铁产成品, 由于模型事先假定了供应链的需求是稳定的, 不存在缺货现象。本文选取采购周期 T 分别为 5、10、15、20 四个值, 模拟对比

分析不同采购周期下采购碳排放总量、生产碳排放总量、销售碳排放总量以及供应链总碳排放量的变化情况。对比分析情况如表 2 和图 4 所示:

表 2 不同采购周期下供应链碳排放量

	碳排放量(吨)			
	T=5	T=10	T=15	T=20
采购碳排放总量	1 284	1 314	1 344	1 374
生产碳排放总量	24 216	24 186	24 156	24 126
销售碳排放总量	1 284	1 314	1 344	1 374
供应链总碳排放量	26 784	26 814	26 844	26 874

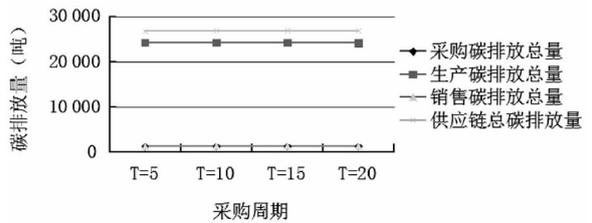


图 4 不同采购周期下供应链碳排放曲线图

由图 4、表 2 可知:(1)当 T=5 时,一个季度内的采购碳排放总量和销售碳排放总量为 1 284 吨,当 T 取值为 10、15、20 时,碳排放较 T=5 有所上升,但四种情况下供应链总碳排放量相差都不大,最优情况是 T=5。(2)生产碳排放总量包括生产过程碳排放和生产库存碳排放,由于每天的生产量是固定的,所以生产过程碳排放量呈线性增长(如图 3 所示),不受采购周期 T 的影响;但是生产库存碳排放受周期 T 的影响,为保障不发生缺货现象,本文设定的原始库存量应满足最大采购周期 T=20,所以当 T 越大,一次采购的钢铁量就越大,一个周期内生产库存总量就越低,进而生产库存碳排放量就越少;(3)综合采购碳排放总量、生产碳排放总量和销售碳排放总量得出供应链总碳排放量,对于本文构建的模型,当 T=5 时,一个季度内模型的供应链总碳排放量最低,为 26 784 吨。以下三种情况在 T=5 的条件下进行模拟仿真。

3.1.2 不同吨钢生产碳排放量下供应链碳排放量仿真

钢铁生产企业是碳排放大户,也是钢铁供应链碳排放的主要成员,吨钢生产碳排放量对供应链总碳排放量具有重大影响。本文选取吨钢生产碳排放量为 2.0 吨、1.9 吨、1.8 吨、1.7 吨、1.6 吨、1.5 吨几种情况,对模型进行仿真,对比分析情况如图 5 和表 3 所示:由图 5、表 3 可知,随着吨钢生产碳排放量由 2.0 吨下降到 1.5 吨,供应链总碳排放量有大幅度的降低,一个仿真周期内减少了 6 000 吨。

3.1.3 不同采购碳排放下供应链碳排放量仿真

对于本文构建的模型,采购碳排放发生在钢铁制造商原材料采购和钢铁销售商产成品订购过程,本文选取单位采购碳排放量依次为 0.2 吨、0.18 吨、0.16 吨、0.14 吨、0.12 吨、0.1 吨,模拟单位采购碳排放对钢铁供应链总碳排放量的影响,模拟仿真结果如表 4 所示。因为只有采购当天会产生碳排放,不采购的时候就不会产生碳排放,其过程具有周期性的特征,该过程的碳排放量呈阶梯状,如图 6 所示。由图 6 和表 4 可知,随着单位采购碳排放量由 0.2 吨下降到 0.1 吨,供应链总碳排放量有明显的降低,一个仿真周期内减少了 2 400 吨。

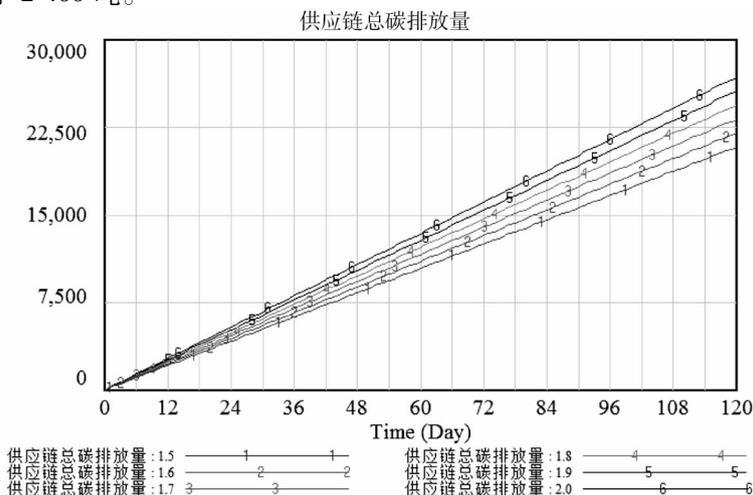


图 5 不同吨钢生产碳排放下供应链总碳排放情况图

表 3 不同吨钢生产碳排放下供应链总碳排放量

吨钢碳排放量(吨)	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5
供应链总碳排放量	26 784	25 584	24 384	23 184	21 984	20 784

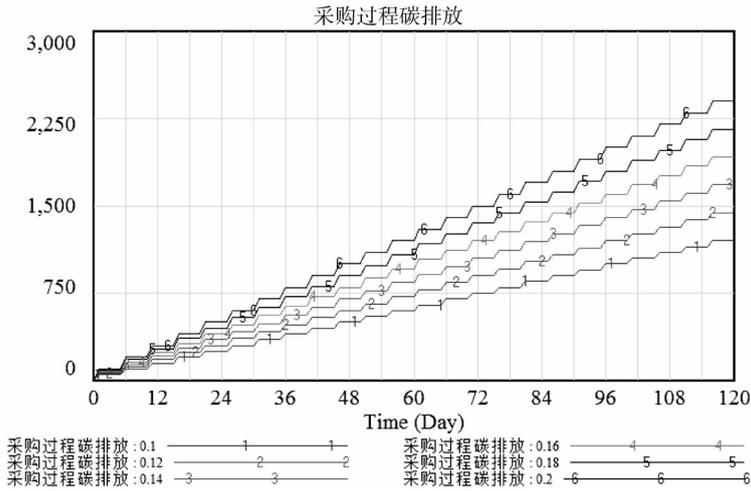


图 6 采购过程碳排放情况

表 4 不同单位采购碳排放下供应链总碳排放量

单位采购碳排放(吨)	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10
供应链总碳排放量	29 184	28 704	28 224	27 744	27 264	26 784

3.2 仿真分析与控制措施

通过对模型的模拟仿真可知,采购周期、吨钢生产碳排放量、单位采购碳排放量都可有效的控制钢铁供应链碳排放总量,其相关参数的优化对钢铁供应链碳排放总量的降低具有重要的意义。

合理的采购周期对钢铁供应链碳排放有一定的影响,但影响效果不是很明显,其主要是通过影响供应链成员的库存量,进而影响碳排放量。库存是万恶之源,每个企业都希望降低库存,这样能减少资金和场地的占用,但是为了保证生产和供应的连续性以及需求的不确定性,又不得不设有一定量的库存。库存过程不但会发生库存费用,而且还会直接或间接的产生库存碳排放,其碳排放量与库存量和库存时间呈正相关。因此,钢铁供应链各级成员因根据下级供应链成员的需求以及本身原始库存量,制定合理的采购周期以优化库存量,实施低碳供应链集成技术,与供应链上下游合作商建立密切伙伴关系,进行有效沟通、信息共享、协同计划和共同处理业务流程,有效降低供应和需求的不确定性,从而降低库存量,进而有效降低钢铁供应链的总碳排放量。

钢铁企业吨钢生产碳排放量对钢铁供应链碳排放总量的降低具有至关重要的影响,钢铁生产过程相关技术创新与设备改善是降低吨钢碳排放的有力措施。近年来,虽然吨钢碳生产排放量有大幅度下降,但是随着钢铁总产量的增加,我国钢铁工业碳排放总量却在一直不断的增长,降低钢铁企业吨钢生产碳排放依然是一项长期而艰巨的任务。钢铁生产企业可从以下 3 个方面进行改进以进一步降低吨钢生产碳排放量:1)技术创新;技术的创新是企业发展的动力,钢铁生产企业应大力引进相关技术,如冶炼新技术、低碳制造协同开发技术、清洁能源技术、二氧化碳回收利用技术等,解决生产过程的高能耗和高污染问题,进而降低生产碳排放。2)产业结构调整;从企业战略管理层的高度调整企业运营模式,淘汰技术落后的设备与工艺,提高信息化管理水平,抛弃原有的急功近利抓产量的模式,突出产品品质、效率和环保,向低能耗、低碳、低污染的目标发展。3)企业整合;目前,大部分小型钢铁制造企业技术薄弱、科研实力差、规模小、市场集中度低,应加大企业整合力度,并购对小型钢铁企业,从而进行战略重

组,构建大型企业集团,提高竞争力,发挥地方的集群优势,实现规模经济。

当采购周期合理、库存量最优、钢铁企业吨钢生产碳排放量改进空间极小的情况下,采购过程碳排放量对降低钢铁供应链碳排放总量扮演着重要的角色。这个过程主要是物流,包括供应商的选择、运输方式与工具选择、运输路线选择、装卸搬运方式与工具的选择等等。钢铁供应链上各成员可通过以下方式,高效、低碳、合理的安排物流过程,将单位采购碳排放量降至最低:1)遵循就近采购原则,减少运输距离;2)尽量选择水路与铁路运输方式(如钢铁物流园区可考虑建在有铁路或大型水路运输线的周边),使用清洁能源,减少采购过程中化石能源的消耗;3)根据采购量合理选择运输工具,保障运输工具的满载率;4)合理优化运输路线,有效缩短运输距离;5)采用高效的装卸搬运方式,提高装卸搬运效率。目前,要想降低单位钢铁生产碳排放量,需要极大的技术、资金和时间投入,相比之下,采购过程碳排放量具有很大的优化空间。

4 结论

本文通过建立钢铁供应链碳排放系统动力学模型,模拟了采购周期、吨钢生产碳排放量和采购过程碳排放量3参数对钢铁供应链碳排放总量的影响。通过对不同参数取值的仿真,发现:(1)合理的采购周期可降低供应链碳排放量,但效果不明显;(2)吨钢生产碳排放对钢铁供应链碳排放总量具有重要影响,可通过技术创新、产业结构调整和企业整合降低吨钢生产碳排放量,进而降低钢铁生产碳排放;(3)采购过程碳排放具有很大的优化空间,合理安排采购物流过程可有效降低单位采购碳排放量。钢铁供应链碳排放总量的降低需要供应链各级成员共同努力,实施低碳采购、低碳制造、低碳销售、低碳物流,最大限度降低钢铁供应链碳排放总量,进而提升供应链的竞争力,促进可持续发展。

参考文献:

- [1] 邹安全,罗杏玲,全春光.基于EIO—LCA的钢铁产品生命周期碳排放研究[J].管理世界,2013(12):178-179.
- [2] Krikke,H. Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers[J]. Resources Conservation and Recycling,2010(55):1196-1205.
- [3] Sundarakani B,De Souza R,Goh M,et al. Modeling carbon footprints across the supply chain[J]. International Journal of Production Economics,2010,128(1):43-50.
- [4] Bojarski A D,Láinez J M,Camarasa A E,et al. Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009,33(10):1747-1759.
- [5] 杨璐,李金宝,卢巍.系统动力学的碳排放政策对供应链影响[J].工业工程与管理,2012,17(4):21-30.
- [6] Longbin,Zheng. A System Dynamic Based Study of Policies on Reducing Energy Use and Energy Expense for Chinese iron and steel Industry[D]. Bergen: Department of Geography University of Bergen,2007.
- [7] 何琼.中国碳排放、贸易、能源与经济增长的实证研究——基于VAR模型的脉冲响应分析[J].湖南科技大学学报(社会科学版),2013,16(6):76-79.
- [8] 庞燕,王忠伟,汪洪波.低碳经济环境下钢铁制造业绿色供应链管理模型研究[J].企业经济,2011,366(2):66-68.
- [9] 洪江涛,王明月,黄沛.钢铁企业低碳供应链的创新[J].研究与发展管理,2012,24(003):93-99.
- [10] 谢鑫鹏,赵道致.低碳供应链企业减排合作策略研究[J].管理科学,2013,26(3):108-119.
- [11] 蓝海燕,戴守峰.限额与交易机制下厂商订货策略[J].系统工程,2013,31(12):81-86.

(责任编辑 朱正余)