

中国产业研究报告·物流与采购

· 中国物流与采购联合会系列报告 ·

中国物流 学术前沿报告

2014
—
2015

中国物流学会

China Society of Logistics

中国物流与采购联合会

China Federation of Logistics & Purchasing

China Logistics Academy Frontier Report (2014-2015)



中国财富出版社
CHINA FORTUNE PRESS

·中国物流与采购联合会系列报告·

中国物流 学术前沿报告

2014
—
2015

中国物流学会

China Society of Logistics

中国物流与采购联合会

China Federation of Logistics & Purchasing

China Logistics Academy Frontier Report (2014-2015)

中国财富出版社

CHINA FORTUNE PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

中国物流学术前沿报告. 2014 - 2015/中国物流学会, 中国物流与采购联合会编. —北京: 中国财富出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5047 - 5416 - 5

I. ①中… II. ①中…②中… III. ①物流—研究报告—中国—2014 ~ 2015
IV. ①F259. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242368 号

策划编辑 葛晓雯
责任编辑 葛晓雯

责任印制 何崇杭
责任校对 杨小静

出版发行 中国财富出版社 (原中国物资出版社)

社 址 北京市丰台区南四环西路 188 号 5 区 20 楼 邮政编码 100070

电 话 010 - 52227568 (发行部) 010 - 52227588 转 307 (总编室)

010 - 68589540 (读者服务部) 010 - 52227588 转 305 (质检部)

网 址 [http: //www. cfpress. com. cn](http://www.cfpress.com.cn)

经 销 新华书店

印 刷 中国农业出版社印刷厂

书 号 ISBN 978 - 7 - 5047 - 5416 - 5/F · 2250

开 本 787mm × 1092mm 1/16

版 次 2014 年 11 月第 1 版

印 张 28

印 次 2014 年 11 月第 1 次印刷

字 数 663 千字

定 价 160.00 元

版权所有 · 侵权必究 · 印装差错 · 负责调换

《中国物流学术前沿报告》(2014—2015)

编委会

- 主任委员：何黎明 中国物流与采购联合会会长
中国物流学会会长
- 委员：戴定一 中国物流学会常务副会长
中国物流与采购联合会专家委员会副主任
- 崔忠付 中国物流与采购联合会副会长兼秘书长
- 周林燕 中国物流与采购联合会副会长
- 任豪祥 中国物流与采购联合会副会长
- 蔡进 中国物流与采购联合会副会长
中国物流信息中心主任
- 贺登才 中国物流与采购联合会副会长
中国物流学会副会长
- 余平 中国物流与采购联合会党委副书记

《中国物流学术前沿报告》(2014—2015)

编辑人员

主 编：贺登才

成 员：黄 萍 周志成 吕 杨 张 彬

联系方式：

中国物流与采购联合会学会工作部

电 话：010-58566588-137、139、133

传 真：010-58566588-128、138

邮 箱：CSL56@vip.163.com

网 址：中国物流学会 (csl.chinawuliu.com.cn)

中国物流与采购网 (www.chinawuliu.com.cn)

前 言

春华秋实，物流业进入新的发展阶段。2009年的春天，国务院出台《物流业调整和振兴规划》，也是我国第一个物流业发展规划。2014年的秋天，国务院发布《物流业发展中长期规划（2014—2020年）》，物流业发展掀开了新的一页。伴随着物流业成长脚步，中国物流学术年会走过了13个年头。

金秋十月，收获的季节。经过又一年辛勤劳作，凝聚着2000余位会员心血的859篇论文，向中国物流学会汇集。这是对一年来我会会员劳动成果的大检阅、大交流，也体现了广大会员对学会工作的参与热情。

沉甸甸的果实，沉甸甸的责任。从8月起，学会就组织100多位评委，开始评审工作。先后经过分类分组、匿名交叉、打分排序等多个环节，历经三轮评审、论证和验收，最终评选出332篇优秀论文。其中一等奖12篇，二等奖23篇，三等奖122篇，优秀奖175篇。

成果丰硕，令人欣喜。从此次论文参评和评审情况来看，总体上好于往年。第一，论文来源更加广泛。尽管今年的参评作者仅限于学会会员，总体数量比去年略有下降，但仍有29个省市和香港、台湾地区送来论文，来自日本和英国等国外论文首次参评。高等、中专、高职等院校投稿热情高涨；科研院所、物流企业、相关政府机构等单位参与度持续提高；英文组、大学生组获奖论文数量再创新高，青年才俊崭露头角。第二，论文的选题范围更加宽泛。铁路货改与铁路物流问题，物流园区健康发展问题，金融物流风险防控问题，区域物流协调发展问题、绿色物流、应急物流、供应链协同发展等问题均有涉及。第三，研究成果更加深入。部分论文的研究获得省部级科研经费支持，某些领域的研究居于国内或国际领先水平，有的已经被国内外高水平期刊收录。这些论文紧扣行业发展需要，注重实用性和创新性相结合，具有一定的前瞻性和广泛的代表性。在看到成绩的同时，今年的参评论文也存在热点问题涉及不够，基础性研究缺乏突破，创新性还有待进一步提高等方面的问题。这也是物流领域产学研各界努力的方向和中国物流学会今后工作的重点。

优中选优，集结成书。按照历年惯例，征得作者同意后，我们从获奖

论文中遴选出 30 篇文章收录本书。全书分为物流经济类、物流管理类、物流技术与工程类、采购与供应管理类、供应链管理类和大学生组六个部分。在本书附录中,收录了本年度获奖论文名单。本书作为第十三次中国物流学术年会展示和交流的重要成果,意在给企业决策、行业发展和学术研究提供借鉴,也可作为物流类大专院校教学参考用书。

十年辛苦不寻常。今年是《中国物流学术前沿报告》按年度连续出版的第十年。这是各地物流教学、研究、咨询机构及相关企事业单位关注支持的结果,也是广大学会会员朋友不懈努力的结晶。在此,我们向广大学会会员、作者朋友、各位评委以及所有关心、支持和参与本书编辑出版的各方面人士表示衷心的感谢。

我国物流业发展前景光明,任重而道远。当前物流学术理论研究水平与日新月异的行业需求变化仍有较大差距。由于时间和篇幅所限,还有许多优秀成果特别是英文论文未能编入本书,入选论文也有较大改进空间。对于本书的不足与缺憾,恳请读者朋友们多提宝贵意见,以便我们在今后工作中改进。

祝金才

二〇一四年十月

新疆区域物流发展空间聚集效应及分布特征分析 王春豪 张娜 (20)

我国物流服务业集聚对区域经济增长的动态效应检验与分析

农村现代市场体系建设研究 张喜才 (52)

物流节点基础设施对区域经济增长的溢出效应检验

铁路物流与区域经济协同研究 于兆宇 张诚 (90)

台湾地区第三方物流企业物流能力之探讨

一种整合模糊 Kano 模型与 IPA 分析的快递服务质量

考虑混合型号托盘的托盘共用系统调度多情景

动态车辆路径问题的分区灵活分批 TSP 策略 熊浩 鄢慧丽 (148)

碳交易环境下企业再制造集成物流网络优化设计…………… 张琦 李文惠 王洪成 (158)

物流企业低碳化发展关键影响因素：识别与实证 段向云 陈瑞照 (171)

低碳经济下物流能源效率与结构调整研究

——基于技术差异视角 张诚 周安 张志坚 (183)

基于物联网技术的应急物流军民协同保障系统研究 姜玉宏 颜华 (193)

多渠道零售商线上线下物流共生体构建

模型及策略 汪旭晖 李晓宇 张其林 (199)

基于真实数据的中国物流与采购人才需求报告 蒋长兵 刘念 刘尹 (209)

港口物流业创新型研发人才集聚评价模型 瞿群臻 刘珊珊 (221)

物流技术与工程

- 哈佛体系结构下的集装箱码头操作系统计算模型与仿真分析 李斌 杨家其 (230)
- 多周期木材物流网络优化研究 陈诚 邱荣祖 (250)
- 基于云服务的物流园区服务资源共享与
配置模式研究 张浩 洪琮 孙琛琛 凌芝 周凌云 (258)

采购与供应管理

- 应急订单跨供应链配置优化与仿真研究 周兴建 (267)

供应链管理

- 中断风险下供应链网络选址策略改进 李汉卿 姜彩良 华光 汝宜红 (278)
- 供应链应收账款融资的检查率和惩戒机制研究 包兴 郑忠良 (292)
- 供应链环境下的多级库存优化与
控制研究 宋志兰 于皎 刘丽 徐黎明 王华 (303)
- 碳排放限额约束下项目导向型供应链的
集成调度研究 王伟鑫 葛显龙 王旭 (313)

大学生组

- 供应链控制权更多就是更好
——基于四种供应链合作模式的比较 王树青 刘伟华 武润泽 徐海涛 (331)
- 考虑产能约束的供应链节点失效修复期动态库存
优化策略 李俊荣 (362)
- 物流服务供应链能力采购中的回购契约选择: 需求更新与理性预期
行为下的思考 王一家 刘伟华 徐涛 王倩 (379)

附录

- 第十三次中国物流学术年会获奖论文名单 (408)

物流经济

考虑碳排放容忍度的多级供应链

生产—库存碳税策略选择*

戢守峰 蓝海燕 朱宝琳 喻海飞

摘 要：为解决多级供应链不同主体间应对碳限制与碳税机制问题，本文研究了由单制造商、多分销商和多零售商构成的多级供应链生产—库存碳税策略的选择问题。针对政府对于企业超标准排放的容忍程度，设定了级差等级碳税，并据此建立了生产—库存策略集合；对比级差碳税与统一碳税下四种策略的成本及碳排放水平变化。给出了考虑碳排放容忍程度的多级供应链生产—库存碳税策略，并进行了分析。最后给出的算例证明了模型和算法的有效性，为并有效应对碳限制与碳税机制问题提供参考依据。

关键词：碳排放容忍度 级差碳税 统一碳税 生产—库存碳税策略

一、引言

如今，面对由碳排放增多导致的环境恶化问题，碳排放限制和碳税机制的导入已成为大势所趋，如荷兰、瑞典、芬兰等许多发达国家已开始实施。然而，这必将增加企业运作决策的难度和必须考虑新的影响因素。企业供应链中生产—库存系统是碳排放的主要环节，供应链不同主体间如何根据自身竞争能力调整生产—库存运作策略，应对日益增加的碳排放规制，实现经济效益与环境效率最大化，是当今学术界和企业界高度关注的重要课题。

碳税机制始于国外，庇古（Pigou）认为根据污染所造成的危害程度对排污者征税，用税收来弥补排污者生产的私人成本和社会成本之间的差距，可以有效消除工业化进程中负外部性。迄今为止，国际上关于碳税的研究主要集中于碳税是否对国家经济、能源政策等宏观经济领域产生影响（Barker, 1993; Baranzini, 2000; Floros, 2005; Bordigoni, 2013）^[1-4]上，而随着碳税在欧美国家的推进，学者们开始从更微观的视角关注对企业的限制。Penkuhn 等（1997）以一氨合成企业为例，用非线性规划研究了环

* 基金项目：国家自然科学基金项目（70872019），辽宁省教育厅人文社科基地项目（ZJ2013014）。

作者简介：戢守峰，男，汉族，辽宁沈阳人，东北大学教授，博士生导师，研究方向：物流系统建模与优化、供应链系统优化与运作管理。蓝海燕、朱宝琳、喻海飞，东北大学。

境因素对生产计划的影响^[5]；Letmathe 等（2005）用混合整数规划探讨了不同运作过程中碳排放影响下的产品组合通过简单的模型来研究碳足迹和供应链运作管理间的关系，并证实通过供应链运作决策的优问题^[6]；Nagurney 等（2006）研究了电力供应链分散与集中两种征税方式下的最优碳税问题，认为征收碳税可将排放总量限定在给定范围之内^[7]；Zhao 等（2012）运用博弈方法给出了绿色供应链在应对环境风险和碳减排时的不同策略^[8]；Song 等（2012）分析了经典单周期（报童）碳排放政策下强制性碳排放量、碳排放税和限额与交易机制三种排放政策下的最佳产量和相对应的预期利润，认为对不同利润企业征收差别碳税可有效降低碳排放^[9]；Rosic 等（2013）的研究表明可将碳税作为确定从海外供应商订货或本地供应商订货的评价指标^[10]；Choi（2013）也研究了相似问题，通过碳足迹税决定选择海外分包还是采用本地快速反应系统生产^[11]。

近年来，针对供应链生产—库存系统减排问题的文献日趋显现。例如，Hua 等（2011）通过构建环境库存模型研究库存管理中的碳排放问题，认为其排放主要来自订货与库存持有两个方面^[12]；Song 等（2012）探讨了限额与交易、碳税及强制限额下的生产问题^[9]；Bouchery 等（2012）从经济、环境和社会三个维度研究了碳排放对厂商最优订货策略的影响因素，并建立了可持续订货数量模型^[13]；Du 等（2013）运用博弈方法分析了由一个排放依赖制造商和一个排污许可证的供应商组成的限额与交易系统中生产批量与碳交易价格的确定问题^[14]；Absi 等（2013）将碳排放限制称为新环境的限制，旨在限制每单位产品所提供的不同形式的碳排放，并给出了无能力约束生产批量计划问题的四种类型的碳约束^[15]。

关于多级供应链生产—库存系统问题的研究最早始于 Clark 和 Scarf（1960）^[16]。近年来，主要集中在丰富多级供应链系统协调理论上，如 Yu 等（2008）研究了三级易腐品供应链的订货协调问题，讨论两种战略组合方式对分散决策与集中决策成本结构的影响^[17]；Wang 等（2011）探讨了时间敏感型易腐品的三级最优库存策略，认为集中决策模式下成本更低^[18]；Sana（2011）构建了带有缺陷质量产品的三级供应链生产—库存模型，分析制造商作为领导者与集中决策两种策略下的策略选择^[19]；Seifert（2012）运用报童模型研究了三级供应链的协同问题，认为下游协同优于上游协同^[20]；Roy（2012）等研究了三级供应链集中决策系统的订货协调问题，结果表明期望成本最小情景下的订货数量最优^[21]；He（2012）用博弈理论分析了需求和供给不确定条件下多级供应链的库存、生产与合同决策，建立一个能实现供应链双赢的协调机制^[22]；Jonrinaldi（2013）等用混合整数规划研究带有逆向物流的四级供应链的订货问题，比较分析了分散决策、半集中决策以及集中决策下的成本差异^[23]；Zhang 等（2013）通过构建合作博弈与非合作博弈下四种系统成本模型分别给出了不同情景下收益共享机制，以激励供应链成员合作^[24]。

综上所述，目前供应链运作与优化中的生产—库存碳税问题研究存在以下三方面不足：首先，对于碳税的研究，均是从供应链碳排放通过固定的碳税直接转化为成本增加项这一确定性的；其次，针对供应链生产—库存系统减排问题的文献日趋显现，但主要以单厂商为背景，忽略了现实中较为普遍的多级供应链的情景；最后，迄今为

止多级供应链系统的文献较多,但涉及碳限制与碳税机制的文献却鲜见。基于此,本文以单制造商—多分销商—多零售商组成的三级供应链为对象,依据各成员竞争力强弱建立四种带有碳排放因素的生产—库存策略,基于碳排放容忍度模型,设置级差碳税,并用数值算例进一步分析级差碳税与统一碳税对不同策略的影响,这些都是已有研究未涉及的。

二、问题描述与研究假设

1. 问题描述

本文的三级供应链生产—库存系统由一个制造商、 j 个分销商和 i 个零售商组成,每个零售商由一个分销商供货,一个分销商可为多个零售商提供服务 ($j < i$)。零售商中存在一个具备领导资格的企业,令 $i = z$ 。根据零售商与制造商的竞争力 ϑ 可形成四种能力组合, I 表示零售商和制造商的竞争力都很强,而采用独立决策,即策略 I; II 和 III 分别表示制造商、零售商的竞争力更强,即三阶段 Stackelberg 博弈策略; IV 表示企业竞争力都很弱,供应链垂直整合形成联盟而采用合作博弈的策略 IV。三级生产—库存系统结构见图 1,在有限规划周期上,供应链企业之间按需订产,制造商首先进行生产,产品缺陷率为 v ,缺陷产品作为废物处理,在一个生产周期 t_m 内库存水平 $I_m(t)$ 逐渐增加,生产周期末全部完好产品交付至分销商;分销商 j 联结制造商与零售商,竞争力始终介于二者之间,其收到产品同时向 i 个零售商配送订货量 Q_n ,余下在以后 n 期内完成;零售商 i 需求随着时间变化且与库存水平相关,即 $D_i(t) = f(t) + \kappa_i I_i(t)$,允许缺货部分延迟交付,延迟交付比率 $B_i(\eta)$ 是顾客等待时间 η 的函数。供应链碳排放主要产生于企业生产与存储环节,各成员的持有成本、持有排放与库存水平线性相关。以国家减排目标衡量政府对于企业超标准排放的容忍程度,以此设置级差碳税,建立生产—库存策略集合,比较级差碳税与统一碳税下竞争主体策略选择的变化。

2. 研究假设

(1) 在库存控制模型中,学者们经常假设库存系统需求随着时间变化 (Zhou, 2000; Beraa, 2012)^[25,26],还有人认为需求受库存水平影响 (Ghiami, 2013; Panda, 2013)^[27,28],在复杂的市场环境中,各种因素都能改变需求水平,本文假设零售商 i 需求随着时间减少且与库存水平相关,表示为: $D_i(t) = f(t) + \kappa_i I_i(t)$,其中, κ_i 代表库存影响需求系数,时变需求率 $f(t) = a + bt - ct^2$, ($a \geq 0, b \neq 0, c \neq 0$) 是时间 t 的连续减函数。

(2) 在需求受库存水平影响的研究中,多数人假设不存在缺货 (Zhou, 2003),或者假设缺货可以全部推迟 (Urban, 2005),或部分延迟交付 (Wu, 2006),联系生活中那些品牌忠诚的消费者,他们愿意等待缺货补充,令 η 表示顾客等待时间,随着等待时间增长,会有一部分消费者转向其他替代产品,参考 Sarkar (2012) 的研究,本文假设延迟交付比率 $B_i(\eta) = 1 / (1 + \delta\eta)$ ^[29]。

(3) 供应链成员的竞争力 $\vartheta = \vartheta(b, l, d, o)$,其中 b 代表讨价还价能力、 l 表示

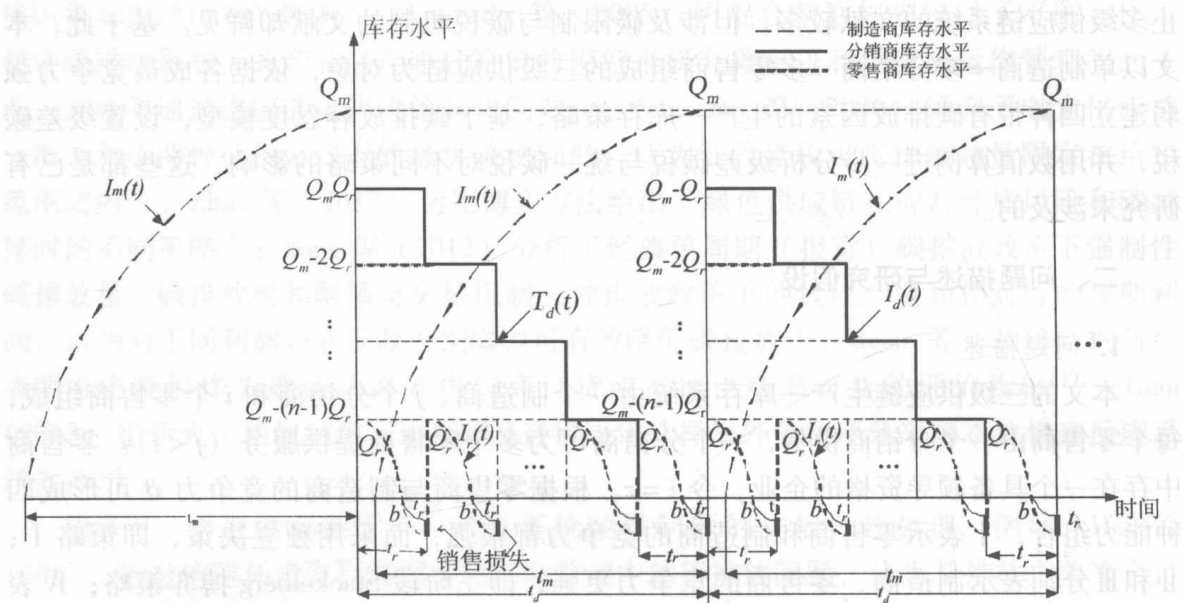


图1 三级供应链生产—库存结构 ($j=1, i=1$)

领导能力、 d 表示支配地位、 o 代表其他因素。 i 个零售商中存在一个足以影响整个供应链运营的零售商（例如 Natura，Wal-Mart），其能够垂直作用至上游成员，不影响横向其他零售商运营。

(4) 二氧化碳强度将经济增长与碳排放问题联系在一起，本文引用碳排放容忍度 λ 表示排放水平高低，容忍度阈值与中国政府承诺减排强度一致，容忍度与碳税反向分级变化。

(5) 通常情况下，碳排放过程与外界环境会发生化学变化，由于二氧化碳分解、沉积等而自然减少，这就是自然衰减率（Keeler, 1972），多数情况下都被忽略，本文令 ψ 表示供应链碳排放的自然衰减率，参考 Chung (2013) 的研究^[30]，设 $\psi = 0.01$ 。

3. 符号说明

(1) 决策变量

Q_m ：制造商生产数量， $Q_m = \sum_{j=1}^w Q_{mj}$ ； t_m ：制造商生产周期时间； n_{ji} ：分销商 j 在周期内向零售商 i 交付次数； t_{dj} ：分销商 j 订货周期时间， $j=1, 2, \dots, w$ ； Q_{ri} ：零售商 i 的订货数量， $i=1, 2, \dots, z$ ； t_{ri} ：零售商 i 的订货周期时间（ $t_{dj} = n_{ji} t_{ri}$ ）； b_{ri} ：零售商 i 库存水平降至 0 的时间。

(2) 参数说明

本文参数说明包括两部分：

成本参数 S ：制造商的启动成本； O_{dj} ：分销商 j 每次订货成本； O_{ri} ：零售商 i 每次订货成本； C_{si} ：零售商 i 单位缺货成本； C_{li} ：零售商 i 单位销售损失的机会成本； $I_m(t)$ ：制造商库存水平； $I_{dj}(t)$ ：分销商 j 库存水平； $I_{ri}(t)$ ：零售商 i 库存水平； H_m ：制造商单位产品持有成本； H_{dj} ：分销商 j 单位产品持有成本； H_{ri} ：零售商 i 单位产品持有成本； P ：制造商的生产率； v ：制造商产品缺陷率； D_i ：零售商 i 的需求率。

碳排放参数 C_m : 分配给制造商的碳排放限额; C_{dj} : 分配给分销商 j 的碳排放限额; C_{ri} : 分配给零售商 i 的碳排放限额; E_{mp} : 制造商生产单位产品碳排放量; E_{mh} : 制造商持有单位产品碳排放量; E_{dj} : 分销商 j 持有单位产品碳排放量; E_{ri} : 零售商 i 持有单位产品碳排放量; ζ : 单位碳税; θ : 污染水平指数; λ : 碳排放容忍度。

三、碳排放容忍度与碳税的刻画

1. 碳排放容忍度的界定

碳排放容忍度是 Zhao 等 (2012) 类比 HSE (1988) 的风险容忍度而建立的思想, 根据欧盟国家总体减排目标核定预期排放绝对量作为容忍范围^[8]。本文依据中国政府承诺的减排目标测算碳排放增长比率, 以此界定碳排放容忍度。

哥本哈根气候大会上中国政府向国际社会明确承诺: 2020 年单位 GDP CO_2 排放 (即二氧化碳强度) 比 2005 年下降 40% ~ 45%。2005 年, 中国 GDP 总量 18.4 万亿元, 二氧化碳排放总量 55.7 亿吨 (数据来自世界资源研究所 (WRI), 2005 年中国 CO_2 强度为 3.02 吨/万元。参考王金南 (2010) 的研究^[31], 结合简化的 Kaya 等式, 得出第 t 年 CO_2 排放量计算公式:

$$E_t = G_t \times \chi_t \quad (1)$$

其中 E_t 表示第 t 年二氧化碳排放总量, G_t 表示第 t 年 GDP 总量, χ_t 表示第 t 年二氧化碳强度。式 (1) 进一步变形, 得出基于强度控制目标下二氧化碳排放量测算公式, 即:

$$E_t = G_0 \times (1 + \sigma)^t \times \chi_0 \times (1 - \mu) \quad (2)$$

式中 G_0 表示基期 GDP 总量, χ_0 表示基期二氧化碳强度, σ 表示年经济增长率, μ 表示二氧化碳强度控制目标。

近年来, 中国经济始终保持高速增长, 2008—2012 年, GDP 增长率分别为 9.6%、9.2%、10.3%、9.2%、7.8%, 2013—2020 年将 GDP 增速预期为 8%, 假设通胀水平为 3%, 单位 GDP 排放强度下降 40%, 这样根据式 (2) 可计算出 2020 年中国 CO_2 排放总量为 159.9 亿吨, 设 φ 为年排放增长速度, 则有:

$$55.7 \times (1 + \varphi)^{15} = 159.9 \quad (3)$$

由此得出, 在既定的承诺目标下, 中国 CO_2 排放总量年增长率为 7.3%。

文中引入另一个概念, 用污染水平指数 (如 Ferretti, 2007)^[32] 来衡量企业实际排放与政府分配标准之间的差异, 即:

$$\theta = \frac{\text{企业实际排放数量}}{\text{被分配碳限额}} \quad (4)$$

结合 CO_2 排放总量年增长率, 确定本文碳排放容忍度 λ 等级如下:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1 & \text{碳排放可接受} & \theta \leq 1 \\ \lambda_2 & \text{碳排放可容忍} & 1 < \theta \leq 1.073 \\ \lambda_3 & \text{碳排放不可容忍} & \theta > 1.073 \end{cases} \quad (5)$$

以污染水平指数为划分边界, λ_1 表示企业实际排放数量 $\leq$ 分配碳限额数量, 这一

区间内的碳排放数量是可以接受的; λ_2 表示分配碳额度不足, 但企业实际排放数量低于承诺目标允许的增长范围, 是可容忍的; λ_3 表示碳排放增速超过许可比率 7.3%, 企业排放加重社会减排负担, 是不可容忍的。

2. 碳税等级的界定

已有文献研究都将碳税设为定值, 为了考察不同排放水平对生产—库存策略的影响, 本文根据碳排放容忍度设置级差碳税如下:

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_0, & \lambda_1 \\ \zeta_0, \text{限额部分} \\ \alpha\zeta_0, \text{超限部分} \\ \alpha\zeta_0, & \lambda_3 \end{cases} \lambda_2 \quad (6)$$

其中 ζ_0 表示基准碳税, α 表示征税调整系数, $\alpha = [(\theta - 1) \times 100]$, 当 $\alpha = 1$ 时, 即为统一碳税。

在碳排放可接受范围内, 政府对排放企业只征收基准碳税 ζ_0 , 排放超过社会可接受范围时, 碳税按超额排放水平整数倍增长。级差碳税既可以反映排放水平高低, 又带有惩罚机制, 实现价格信号作用。本文要研究两个碳税问题: 第一, 碳税如何影响企业运营策略选择; 第二, 不同碳税形式下供应链决策行为又将如何变化?

四、考虑碳排放容忍度的多级供应链生产—库存碳税策略与求解

供应链成员由于自身竞争能力差异, 其在供应链中所处的位置发生变化。如果几个成员竞争能力均等, 且都从自身利益独立进行决策, 这种供应链就是完全独立运营的供应链, 即策略 I。如果系统存在一个强势成员 (如 Intel 或 Wal-Mart), 成为主导整个供应链的领导者, 在非合作情况下, 供应链就存在主从关系, 即形成策略 II 或策略 III。如果成员竞争能力均相对较弱, 结成联盟是最好的选择, 即策略 IV。

1. 策略 I——独立决策建模

(1) 零售商的期望成本

从图 1 可知零售商 i 期初库存水平为 Q_i , 等量分批订货, 在周期时间 t_i 内, 以 $-[f(t) + \kappa I_i(t)]$ 速度满足需求。在第一个零售商周期内, b_i 时刻全部存货消耗完毕, t_i 时刻下一批量到货, 用于满足部分延迟需求及正常消耗, 到 b_2 时库存水平逐渐下降为 0, 如此循环, 直到最后一个周期 n 。在一个零售周期 t_i 内, 零售商 i 的库存水平由以下微分方程给出:

$$\frac{dI_{ri}(t)}{dt} = -D_i(t) = -[f(t) + \kappa I_i(t)], 0 \leq t \leq b_i \quad (7)$$

边界条件: $I_{ri}(0) = Q_i$, $I_{ri}(b_i) = 0$, 得出微分方程 (7) 的解:

$$I_{ri}(t) = \int_t^{b_i} e^{\kappa(u-t)} f(u) du, 0 \leq t \leq b_i \quad (8)$$

因此, 零售商 i 在区间 $[0, b_i]$ 内全部库存量为:

$$I_i = \int_0^{b_i} [\int_t^{b_i} e^{\kappa(u-t)} f(u) du] dt \quad (9)$$

零售商 i 缺货数量表达如下:

$$\frac{dI_{r2}(t)}{dt} = D_i(t)B_i(t) = \frac{D_i(t)}{1 + \delta(t_{ri} - t)}, b_{ri} \leq t \leq t_{ri} \quad (10)$$

在区间 $[b_{ri}, t_{ri}]$ 上, 全部缺货数量为:

$$B_i = \int_{b_{ri}}^{t_{ri}} \int_{b_{ri}}^t \frac{D_i(u)}{1 + \delta(t_{ri} - u)} du dt \quad (11)$$

在区间 $[b_{ri}, t_{ri}]$ 上, 销售损失数量:

$$L_i = \int_{b_{ri}}^{t_{ri}} \int_{b_{ri}}^t [D_i(t) - D_i(t)B_i(t)] du dt = \int_{b_{ri}}^{t_{ri}} \int_{b_{ri}}^t \frac{\delta(t_{ri} - u)D_i(u)}{1 + \delta(t_{ri} - u)} du dt \quad (12)$$

得出零售商 i 的相关成本如下:

$$\text{持有成本: } HC_{ri} = H_{ri} \times \int_0^{b_{ri}} \int_t^{b_{ri}} e^{\kappa(u-t)} f(u) du dt \quad (13)$$

$$\text{缺货成本: } SC_{ri} = C_{si} \times \int_{b_{ri}}^{t_{ri}} \int_{b_{ri}}^t \frac{D_i(u)}{1 + \delta(t_{ri} - u)} du dt \quad (14)$$

$$\text{销售损失的机会成本: } LC_{ri} = C_{li} \times \int_{b_{ri}}^{t_{ri}} \int_{b_{ri}}^t \frac{\delta(t_{ri} - u)D_i(u)}{1 + \delta(t_{ri} - u)} du dt \quad (15)$$

$$\text{库存碳排放成本: } EC_{ri} = \zeta \times (1 - \psi) \times E_{ri} \times \int_0^{b_{ri}} \int_t^{b_{ri}} e^{\kappa(u-t)} f(u) du dt \quad (16)$$

则周期内零售商 i 的单位总成本:

$$TC_{ri}(t_{ri}, b_{ri}) = \frac{1}{t_{ri}} \times (O_{ri} + HC_{ri} + SC_{ri} + LC_{ri} + EC_{ri}) \quad (17)$$

零售商最优决策可令 $\partial TC_{ri}(t_{ri}, b_{ri}) / \partial t_{ri} = 0$ 和 $\partial TC_{ri}(t_{ri}, b_{ri}) / \partial b_{ri} = 0$, 得出使 $TC_{ri}(t_{ri}, b_{ri})$ 最小的 t_{ri}^* 和 b_{ri}^* , 再通过边界条件得出 Q_{ri}^* 。

(2) 分销商的期望成本

分销商 j 的库存系统如图 1 所示, 当第一个批量 Q_{mj} 到货时, 分销商同时向 i 个零售商发出 Q_{ri} 后的初始库存水平为 $Q_{mj} - \sum_{i=1}^z Q_{ri}$, 在周期 t_{dj} 内向零售商 i 配送 n_{ji} 次, 周期内累积库存为:

$$I_{dj}(t) = Q_{mj}t_{dj} - \sum_{i=1}^z Q_{ri}t_{ri}(1 + 2 + \cdots + n_{ji}) = \sum_{i=1}^z Q_{ri}t_{ri} \frac{n_{ji}(n_{ji} - 1)}{2} = \frac{Q_{mj}t_{dj}(n_{ji} - 1)}{2n_{ji}} \quad (18)$$

分销商 j 的相关成本:

$$\text{库存持有成本: } HC_{dj} = H_{dj} \sum_{i=1}^z Q_{ri} \frac{t_{dj}(n_{ji} - 1)}{2} \quad (19)$$

$$\text{碳排放成本: } EC_{dj} = E_{dj} \times \zeta \times (1 - \psi) \times \sum_{i=1}^z Q_{ri} \frac{t_{dj}(n_{ji} - 1)}{2} \quad (20)$$

分销商 j 单位总成本:

$$TC_{dj}(t_{dj}, n_{ji}, Q_{ri}) = \frac{1}{t_{dj}} \times (O_{dj} + HC_{dj} + EC_{dj}) \quad (21)$$

分销商在制造商与零售商之间, 其决策结果受二者影响。所以先将式 (21) 中的 Q_{ri} 视为常数, 求出 $\frac{\partial TC_{dj}(t_{dj}, n_{ji}, Q_{ri})}{\partial t_{dj}} = 0$ 和 $\frac{\partial TC_{dj}(t_{dj}, n_{ji}, Q_{ri})}{\partial n_{ji}} = 0$, 得出 t_{dj}^* 和 n_{ji}^* , 再将上面计算得出的 Q_{ri}^* 代入 t_{dj}^* 和 n_{ji}^* 中即得。

(3) 制造商的期望成本

制造商先于分销商生产,完工产品中缺陷产品比率为 v ,在周期 t_m 末将完好产品 Q_m 同时配送至 j 个分销商,则制造商库存水平 $I_m(t)$ 可通过微分方程计算:

$$\frac{dI_m(t)}{dt} = P - vI_m(t), 0 \leq t \leq t_m \quad (22)$$

边界条件: $I_m(0) = 0, I_m(t_m) = Q_m$ 。得出:

$$I_m(t) = \left(\int_0^t P e^{vt} dt \right) e^{-vt}, 0 \leq t \leq t_m \quad (23)$$

$$\text{使用泰勒级数化简得出: } I_m(t_m) = Q_m = P \left(t + \frac{v}{2} t^2 \right) (1 - vt) \quad (24)$$

相关成本如下:

$$\text{库存持有成本: } HC_m = H_m \times \int_0^{t_m} I_m(t) dt = H_m \times \int_0^{t_m} P \left(t + \frac{v}{2} t^2 \right) (1 - vt) dt \quad (25)$$

$$\text{库存持有排放成本: } EC_{mh} = \zeta \times (1 - \psi) \times E_{mh} \times \int_0^{t_m} P \left(t + \frac{v}{2} t^2 \right) (1 - vt) dt \quad (26)$$

$$\text{生产排放成本: } EC_{mp} = \zeta \times (1 - \psi) \times E_{mp} \times Q_m (1 + v) \quad (27)$$

$$\text{制造商单位总成本如下: } TC_m(t_m, Q_m) = \frac{1}{t_m} \times (S + HC_m + EC_{mh} + EC_{mp}) \quad (28)$$

令 $\partial TC_m(t_m, Q_m) / \partial t_m = 0$ 和 $\partial TC_m(t_m, Q_m) / \partial Q_m = 0$, 得到使 $TC_m(t_m, Q_m)$ 最优的 (t_m^*, Q_m^*) 。

2. 策略 II——制造商主导下的非合作博弈建模

制造商竞争力更强而成为供应链的领导者,具有先动决策优势,与其他成员形成非合作三级 Stackelberg 博弈策略,模型如下:

$$\begin{aligned} & \min TC_m(t_m, Q_m) \\ & \text{s. t. } \min \sum_{j=1}^w TC_{dj}(t_{dj}, n_{ji}) \\ & \min \sum_{i=1}^z TC_{ri}(t_{ri}, b_{ri}) \end{aligned} \quad (29)$$

博弈顺序如下:制造商决策以后,分销商按制造商决策结果调整策略,零售商最后做出决策,形成三阶段领导者—追随者博弈模型,从零售商开始采用逆向归纳法进行求解,步骤如下:

第1步:同策略 I 零售商求解方法,得出使 TC_{ri} 最小的 t_{ri}^*, b_{ri}^* 以及 Q_{ri}^* 。

第2步:将 Q_{ri}^* 代入式 (21), 得出使 TC_{dj} 最小的 n_{ji}^*, t_{dj}^* , 式 (21) 能转换成 Q_{mj} 的表达式, 再将 $Q_{ri}^*, n_{ji}^*, t_{dj}^*$ 代入式 (21), 得出 Q_{mj}^* 。

第3步:将 $Q_m^* = \sum_{j=1}^w Q_{mj}^*$ 代入式 (28), 此时式 (28) 只含有一个未知变量, 通过 $dTC_m(t_m) / dt_m = 0$ 即得到 t_m^* 。

3. 策略 III——零售商主导下的非合作博弈建模

零售商 z 作为供应链领导者,由研究假设知零售商 z 不影响同级零售商决策,全部零售商可视为一个整体,与策略 II 相似,三级领导者—追随者博弈模型如下: