

考虑碳排放的弹性煤炭供应链网络设计模型*

刘仕强¹, 曾蓝雁¹, 李贤功²

(1. 福州大学 经济与管理学院, 福州 350108; 2. 中国矿业大学, 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:【目的】针对煤炭行业所面临的节点中断风险和需求波动风险以及煤炭供应链的碳排放问题,设计一个包括矿山、处理厂、转运中心、港口和客户的5级低碳、弹性煤炭供应链网络,旨在最小化供应链网络碳排放和总成本的同时满足最低客户需求水平。【方法】考虑煤炭行业特性,建立了混合整数线性规划模型来设计一个多层次、多产品的煤炭供应链网络;以在中断节点增加紧急库存和直接到港口交付作为弹性策略,提高煤炭供应链网络在风险环境下的弹性能力;利用碳税政策将碳减排目标转换为目标函数,从而减少碳排放量。【结果】以一个大型煤炭集团为例,验证了所建立的低碳、弹性煤炭供应链网络设计模型的有效性。【结论】实验结果表明,所设计的考虑碳排放的弹性煤炭供应链网络在面临节点中断和需求波动风险时风险应对能力比传统供应链网络更优。

关键词:煤炭供应链网络设计;混合整数线性规划;节点中断;需求波动;碳排放

中图分类号: O221;F406

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2023)01-0034-10

煤炭供应链管理是指煤炭企业为满足客户需求沿着供应链所开展的资源管理活动,包括网络结构设计、煤炭开采、加工、运输、销售等。其中,供应链网络设计是指煤炭企业为提高资源利用率,降低环境污染而进行的一系列网络节点布局、运输路线和流量决策^[1]。虽然关于供应链网络设计的研究较早,但它在煤炭行业的应用相对较晚。2011年汪文生等人^[2]构建了一个煤炭行业的多级物流网络优化模型,旨在有效降低煤炭物流费用。范志强^[3]首次定量研究了多阶段的煤炭供应链网络设计问题,并设计了一种遗传算法来求解所建立的模型。针对客户对煤炭的不同需求,范志强^[1]进一步研究了复杂需求下的煤炭供应链网络优化问题。袁旭梅等人^[4]研究了一个多目标海运煤炭供应链网络优化问题,考虑了港口物流能力,旨在提高系统运作效率并降低成本。Singh等人^[5]建立了一个混合整数线性规划模型来研究猎人谷煤炭供应链的长期产能规划问题,以满足客户需求,提高成本效益,减少基础设施建设成本和滞留成本。Gedik等人^[6]研究了煤炭网络中铁路运输网络中断问题,在重新布线决策、延误成本分析、设施封锁频率等战术和操作层面开展了脆弱性评估分析。

供应链系统容易受到如贸易争端、设备故障、自然灾害等各种人为或自然因素的影响,供应链中任何一个环节发生中断失效都会给整个系统造成严重损失。例如2021年10月,中国最大的产煤省份——山西省遭遇内涝、地质灾害、洪水等灾情,建筑、道路等基础设施损毁严重,多个煤矿因洪水关闭,导致煤炭产能受到严重影响,煤炭外运困难^[7]。又如2020年中国对进口煤炭来源进行部分调整,国内煤炭供应一时紧张,多地电力供应也因此受到影响^[8]。为了减轻中断带来的损失,保证供应链在风险环境下稳定高效的运行,企业越来越注重设计可靠灵活的供应链网络。除了中断风险外,客户需求也是设计灵活、响应性高的供应链网络时需要考虑的一个重要参数。

为降低中断风险所造成的损失,已有不少学者将“弹性”这一概念引入供应链中。供应链弹性是指供应链在中断事件发生后能够保持自身原有状态或转移到更理想状态的能力^[9]。目前提高供应链弹性的常见策略有多源采购、设置紧急库存、提高运输多样性、增强供应链协调性等。关于引入弹性的供应链网络优化设计的相关研究,闫妍等人^[10]探讨了单一节点失效情况下的弹性供应链网络应急调度问题,并提出采用紧急订货量和紧急库存策略来减小供应链发生中断后的缺货损失。孟宏旭^[11]建立了一个考虑供应端与需求端不确定性的混合整数

* 收稿日期:2022-02-06 修回日期:2022-12-16 网络出版时间:2023-02-22 17:35

资助项目:国家自然科学基金(No. 71871064)

第一作者简介:刘仕强,男,教授,博士生导师,研究方向为矿业管理优化,E-mail:samsqliu@fzu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230222.1244.010.html

线性规划模型用以设计一个单产品弹性供应链网络,并将启用柔性运营能力、修复失效节点作为弹性策略来增加网络弹性。在考虑工厂和分销中心可能面临的中断风险时,王长琼等人^[12]在设计供应链网络时融合了转运策略,以便减小这两级节点可能造成的中断损失。Fattahi 等人^[13]使用随机规划来量化供应链弹性,针对中断事件下的供应链网络设计问题,建立了一个两阶段随机规划模型,以优化设施位置、产品配送、库存和订单等决策。Alikhani 等人^[14]研究了在不确定性下设计或重新设计弹性零售供应链网络问题,提出了具有多个弹性策略的两阶段随机优化模型,包括设施设防、库存预置、直接交付、预留容量、库存共享、多套覆盖等策略。

近些年来,世界各国越来越意识到减少温室气体排放的重要性。消费者对公司运营所产生的环境影响也越来越关注,全世界的公司都在致力于实现低碳运营从而保持竞争力^[15]。煤炭行业是一个碳排放量较高且污染严重的行业,是排在水泥和电力行业之后的第三大碳排放行业^[16]。已经有部分研究者探讨了煤炭行业如何低碳发展问题^[17-19]。作为成本效益较高的碳减排策略,碳税政策已在一些国家开始实行,比如在英国,每吨碳排放需要缴纳 6.28 英镑的税款;在日本,则对每吨碳排放征收 655 日元的碳税^[20]。

供应链网络设计是供应链管理的一个关键决策问题,虽然已有部分学者开展煤炭行业的供应链网络优化设计研究,但尚无在节点中断与客户需求波动风险下考虑煤炭供应链网络中碳排放的相关研究^[21]。本文采用紧急库存策略和直接交付策略,建立了一个混合整数线性规划模型来设计中断与需求波动风险下多层次、多产品的低碳弹性煤炭供应链网络,用以确定最优网络结构、库存量以及节点之间流量,在满足最低客户需求水平的同时最小化供应链网络总成本,减少供应链网络过程中的碳排放。然后以一个大型煤炭企业为例,本文分析了节点中断与需求波动风险、满足最低客户需求水平要求等对煤炭供应链网络的结构、总成本以及碳排放的影响,探讨了所采用的两个弹性策略的有效性,相关结果可为煤炭企业风险环境下的决策提供参考。

1 问题描述

本文研究的煤炭供应链网络如图 1 所示,包括矿山、处理厂(比如洗煤厂)、转运中心、港口、客户等 5 级。原煤从矿山开采出来以后,首先将被输送到处理厂洗选加工成满足客户要求的煤炭产品;然后煤炭产品从处理厂通过转运中心被运至港口进行装船;最后通过水运将煤炭产品送达客户。矿山、处理厂、转运中心和港口都面临着中断失效风险,遭受中断事件后可能损失部分产能;客户需求则会随外部环境变化而上下波动。本文定义了一组中断情景和需求情景来表达节点失效和客户需求变化情况。为提高煤炭供应链网络的风险应对能力和客户响应能力,本文采用了紧急库存策略和直接交付策略:前者指根据中断情况在矿山、处理厂、转运中心和港口保留一定的紧急库存量,当节点受中断影响失去部分产能时,启用保留的库存量来满足客户需求。后者指煤炭产品可直接从处理厂运输到港口,以此提高运输灵活性,增加供应链网络弹性。

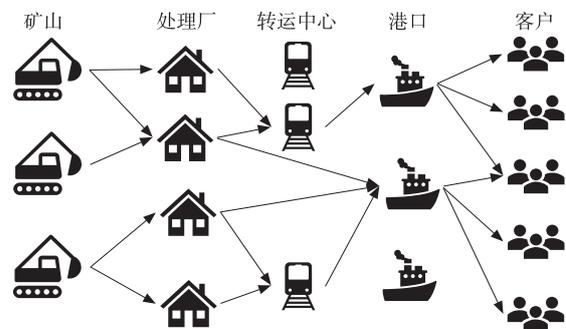


图 1 煤炭供应链网络

Fig. 1 A sample of coal supply chain network

本文建立了一个面向实际的混合整数线性规划模型,模型决策包括煤炭供应链网络中设施节点的位置、产能与数量,各节点保留的原煤紧急库存量或煤炭产品紧急库存量,以及不同级别节点之间的原煤以及煤炭产品流量。除了经济目标即降低供应链网络总成本之外,模型还考虑了满足客户最低的需求水平以及设施和运输渠道运作的环境影响,即降低供应链过程产生的碳排放。

本文模型包含如下特点:1) 客户位置已知,矿山、处理厂、转运中心和港口的的位置从一组候选位置中确定,且每个候选位置节点的固定建设成本和产能已确定;2) 矿山开采不同种类原煤并将原煤运输到处理厂加工成客户所需的煤炭产品;3) 矿山、处理厂、转运中心和港口遭受中断风险后损失一定比例的产能;4) 考虑新建设施、矿山开采原煤、处理厂加工原煤和运输过程中产生的碳排放;5) 利用碳税政策计算每吨碳排放需要缴纳的税款成本,碳减排目标在模型中表示为最小化碳排放成本;6) 一个下级节点可从多个上级节点接收原煤或煤炭产品,这种多条运输路线策略可提高运输灵活性。

2 符号说明

本文中符号的具体说明如下。

1) 下标与集合。 I : 矿山集合, $i \in I$; J : 处理厂集合, $j \in J$; K : 转运中心集合, $k \in K$; L : 港口集合, $l \in L$; M : 客户集合, $m \in M$; R : 矿井所开采的原煤种类集合, $r \in R$; P : 供客户消费的煤炭产品种类集合, $p \in P$; S : 中断情景集合, $s \in S$; N : 需求情景集合, $n \in N$ 。

2) 已知参数。 f_a : 建设设施节点 a 的固定成本, $a \in (I, J, K, L)$; c_{pj}^r : 处理厂 j 加工原煤 r 的单位处理成本; c_{trij}^r : 原煤 r 从矿山 i 到处理厂 j 的单位运输成本; c_{pab}^p : 煤炭产品 p 从节点 a 到节点 b 的单位运输成本, $a \in (J, K, L)$, $b \in (K, L, M)$; c_{sm}^p : 未满足客户 m 对煤炭产品 p 需求的单位缺货惩罚成本; e_{fa} : 建立矿山、处理厂、转运中心和港口产生的碳排放量, $a \in (I, J, K, L)$; e_{mi}^r : 矿山 i 开采单位原煤 r 产生的碳排放量; e_{pj}^r : 处理厂 j 处理单位原煤 r 产生的碳排放量; e_{tab} : 节点 a 到节点 b 运输单位原煤或煤炭产品的碳排放量, $a \in (I, J, K, L)$, $b \in (J, K, L, M)$; c_e : 单位碳税成本; a_{cri}^r : 矿山 i 关于原煤 r 的最大产能; a_{cpa}^p : 设施节点 a 关于产品 p 的最大产能, $a \in (J, K, L)$; r_{cari}^{rs} : 中断情景 s 下, 矿山 i 关于原煤 r 的剩余产能; r_{capa}^{ps} : 中断情景 s 下, 设施节点 a 关于煤炭产品 p 的剩余产能, $a \in (J, K, L)$; c_{eri}^r : 矿山 i 保留原煤 r 的单位紧急库存成本; c_{epa}^p : 设施节点 a 保留煤炭产品 p 的单位紧急库存成本, $a \in (J, K, L)$; u_{rp} : 处理厂中每单位煤炭产品 p 中关于原煤 r 的利用率; d_m^{psn} : 中断情景 s 需求情景 n 下, 客户 m 对煤炭产品 p 的需求量; φ^s : 中断情景 s 发生的可能性; φ^n : 需求情景 n 发生的可能性; L_{CS} : 最低客户服务水平系数。

3) 决策变量。 y_a : 如果设施节点 a 被选择建立则为 1, 否则为 0, 且 $a \in (I, J, K, L)$; x_{rij}^{rsn} : 中断情景 s 需求情景 n 下, 原煤 r 从矿山 i 到处理厂 j 的运输量; x_{pab}^{psn} : 中断情景 s 需求情景 n 下, 煤炭产品 p 从节点 a 到节点 b 的运输量, $a \in (J, K, L)$, $b \in (K, L, M)$; v_{ri}^{rs} : 中断情景 s 下, 矿山 i 中原煤 r 的紧急库存量; v_{pa}^{ps} : 中断情景 s 下, 设施节点 a 中产品 p 的紧急库存量, $a \in (J, K, L)$; o_m^{psn} : 中断情景 s 需求情景 n 下, 未满足客户 m 对最终煤炭产品 p 的需求量。

3 数学模型

基于上述问题描述和符号说明, 本文建立的数学模型如下:

$$\min \sum_a f_a y_a + \sum_s \sum_n \varphi^s \varphi^n \left(\sum_i \sum_j \sum_r c_{pj}^r x_{rij}^{rsn} + \sum_i \sum_j \sum_r c_{trij}^r x_{rij}^{rsn} + \sum_a \sum_b \sum_p c_{pab}^p x_{pab}^{psn} + c_e \left(\sum_i \sum_j \sum_r e_{mi}^r x_{rij}^{rsn} + \sum_i \sum_j \sum_r e_{pj}^r x_{rij}^{rsn} + \sum_i \sum_j \sum_r e_{tij} x_{rij}^{rsn} + \sum_a \sum_b \sum_p e_{tab} x_{pab}^{psn} \right) \right) + c_e \sum_a e_{fa} y_a + \sum_i \sum_r \sum_s \varphi^s c_{eri}^r v_{ri}^{rs} + \sum_a \sum_p \sum_s \varphi^s c_{epa}^p v_{pa}^{ps} + \sum_s \sum_n \varphi^s \varphi^n \sum_m \sum_p c_{sm}^p o_m^{psn}, \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_j x_{rij}^{rsn} \leq y_i r_{cari}^{rs} + v_{ri}^{rs}, \forall i, r, s, n, \quad (2)$$

$$\sum_k x_{pjk}^{psn} + \sum_l x_{pjl}^{psn} \leq y_j r_{capj}^{ps} + v_{pj}^{ps}, \forall j, p, s, n, \quad (3)$$

$$\sum_l x_{pkl}^{psn} \leq y_k r_{capk}^{ps} + v_{pk}^{ps}, \forall k, p, s, n, \quad (4)$$

$$\sum_m x_{plm}^{psn} \leq y_l r_{capl}^{ps} + v_{pl}^{ps}, \forall l, p, s, n, \quad (5)$$

$$v_{ri}^{rs} \leq y_i a_{cri}^r, \forall i, r, s, \quad (6)$$

$$v_{pj}^{ps} \leq y_j a_{cpj}^p, \forall j, p, s, \quad (7)$$

$$v_{pk}^{ps} \leq y_k a_{cpk}^p, \forall k, p, s, \quad (8)$$

$$v_{pl}^{ps} \leq y_l a_{cpl}^p, \forall l, p, s, \quad (9)$$

$$v_{ri}^{rs} + r_{cari}^{rs} \leq a_{cri}^r, \forall i, r, s, \quad (10)$$

$$v_{pj}^{ps} + r_{capj}^{ps} \leq a_{cpj}^p, \forall j, p, s, \quad (11)$$

$$v_{pk}^{ps} + r_{capk}^{ps} \leq a_{cpk}^p, \forall k, p, s, \quad (12)$$

$$v_{pl}^{ps} + r_{capl}^{ps} \leq a_{cpl}^p, \forall l, p, s, \quad (13)$$

$$\sum_i x_{rij}^{rsn} = \sum_p u_{rp} \left(\sum_k x_{pjk}^{psn} + \sum_l x_{pl}^{psn} \right), \forall j, r, s, n, \tag{14}$$

$$\sum_j x_{pjk}^{psn} = \sum_l x_{pl}^{psn}, \forall k, p, s, n, \tag{15}$$

$$\sum_k x_{pkl}^{psn} + \sum_j x_{pjl}^{psn} = \sum_m x_{plm}^{psn}, \forall l, p, s, n, \tag{16}$$

$$\sum_l x_{plm}^{psn} + o_m^{psn} = d_m^{psn}, \forall m, p, s, n, \tag{17}$$

$$\frac{\sum_l \sum_m \sum_p x_{plm}^{psn}}{\sum_m \sum_p d_m^{psn}} \geq L_{CS}, \forall s, n, \tag{18}$$

$$y_i, y_j, y_k, y_l \in \{0, 1\}, \tag{19}$$

$$x_{rij}^{rsn}, x_{pjk}^{psn}, x_{pjl}^{psn}, x_{pkl}^{psn}, x_{plm}^{psn}, v_{ri}^{rs}, v_{pj}^{ps}, v_{pk}^{ps}, v_{pl}^{ps}, o_m^{psn} \geq 0. \tag{20}$$

其中:(1)式为目标函数,表示最小化煤炭供应链网络总成本。目标函数中第 1 项设施节点的固定建设成本,包括新建矿山、处理厂、转运中心和港口的固定成本;第 2 项是处理厂加工原煤的处理成本;第 3 项到第 4 项是矿山到处理厂、处理厂到转运中心、处理厂到港口、转运中心到港口以及港口到客户的运输成本;第 5 项到第 9 项是煤炭供应链过程中的碳排放成本,包括开采原煤、处理原煤、运输原煤过程中产生的碳排放成本以及新建设施节点产生的碳排放成本(第 9 项对应该项成本)。第 10 项到 11 项分别是矿山、处理厂、转运中心和港口的紧急库存成本。第 12 项是未满足客户需求的缺货成本。(2)~(5)式表示任何节点中断情景与需求波动情景下矿山、处理厂、转运中心、港口的产能约束,即只有被选择建立的设施节点才能有流量流出,且从设施节点流出的总流量不超过该设施节点的剩余产能(即剩余容量)与紧急库存量之和。(6)~(9)式限制了只有已建立的设施节点才能有紧急库存量。(10)~(13)式约束了在任何中断情景下,矿山、处理厂、转运中心以及港口的紧急库存量与剩余容量之和不能超过该节点的最大产能(即最大容量)。(14)~(16)式表示处理厂、转运中心和港口的流平衡约束,即流入该节点的原煤量或煤炭产品量与流出该节点的原煤量或煤炭产品量相等。(17)式表示在任何情景下,客户从港口收到的实际煤炭产品量与缺货量之和与实际客户需求量相等。(18)式表示在不同的节点中断情景与需求波动情景下,港口供应的煤炭产品量与实际客户需求量的比值大于或等于 L_{CS} ,即需要满足客户的最低需求水平。(19)、(20)式为决策变量的 0-1 约束和非负约束。

4 数值算例与分析

4.1 案例介绍与数据

为验证所建立的煤炭供应链网络优化模型的有效性,本文选择某大型煤炭企业的煤炭供应链网络进行应用实例分析。某大型煤炭集团拟在一些备选地点新建若干个矿山、煤炭处理厂、转运中心和港口,该企业需要服务于 6 个海内外客户。煤炭供应链网络各个设施节点的固定建设成本及无中断情况下的产能如表 1 所示。原煤与煤炭产品的转换率见表 2,处理厂对原煤进行加工的单位处理成本见表 3,煤炭产品的单位缺货成本如表 4 所示。根据国内外碳税征收的相关研究,本文假设中国征收碳税成本 $0.01 \text{ 万元} \cdot \text{吨}^{-1}$ [20]。

表 1 煤炭供应链网络各节点的固定成本及产能

Tab. 1 Fixed costs and capacities of the facility nodes in the coal supply chain network

节点	编号	固定成本/万元	产能/万吨	节点	编号	固定成本/万元	产能/万吨
矿山	$i1$	19 800	290	转运中心	$k1$	4 000	540
	$i2$	16 200	235		$k2$	3 800	500
	$i3$	12 600	170		$k3$	3 500	390
处理厂	$j1$	7 200	270		$k4$	3 200	280
	$j2$	6 000	210	港口	$l1$	24 000	800
	$j3$	4 800	160		$l2$	18 000	600
	$j4$	3 600	140		$l3$	13 500	400

表 2 原煤与煤炭产品的转换率

Tab. 2 Conversion rates between raw coal and coal products

产品种类	原煤种类	转换率	产品种类	原煤种类	转换率	产品种类	原煤种类	转换率	产品种类	原煤种类	转换率
p1	r1	0.25	p2	r1	0.3	p3	r1	0.45	p4	r1	0.3
	r2	0.25		r2	0.25		r2	0.3		r2	0.3
	r3	0.5		r3	0.45		r3	0.25		r3	0.4

表 3 处理厂加工原煤的单位处理成本

Tab. 3 Unit raw coal processing costs in plants

万元·吨⁻¹

处理厂	原煤种类	处理成本	处理厂	原煤种类	处理成本	处理厂	原煤种类	处理成本	处理厂	原煤种类	处理成本
j1	r1	0.005	j2	r1	0.006	j3	r1	0.002 1	j4	r1	0.002 8
	r2	0.005		r2	0.005		r2	0.002 9		r2	0.001 8
	r3	0.006		r3	0.004		r3	0.003 5		r3	0.003 4

表 4 单位缺货成本

Tab. 4 Unit shortage cost

万元·吨⁻¹

产品种类	客户	缺货成本									
p1	m1	0.357	p2	m1	0.260	p3	m1	0.238	p4	m1	0.386
	m2	0.393		m2	0.251		m2	0.328		m2	0.365
	m3	0.273		m3	0.403		m3	0.349		m3	0.266
	m4	0.301		m4	0.281		m4	0.216		m4	0.214
	m5	0.212		m5	0.331		m5	0.220		m5	0.374
	m6	0.371		m6	0.387		m6	0.238		m6	0.294

本文假设 3 种不同中断情景来表达不同中断失效事件下煤炭供应链网络的情况:中断情景 s1 为正常情况,即不发生中断事件,煤炭供应链网络状态正常,各节点保持原有产能;s2 为轻微中断情景,发生轻微中断事件后,网络中各个节点受中断影响损失约 20% 的产能;s3 为严重中断情景,在严重中断事件的影响下各节点损失约 60% 的产能。为表达煤炭供应链网络面临的需求波动风险,本文假设 3 种不同需求情景:受经济增长放缓、国家能源结构调整、天气转暖等因素影响,客户对煤炭的需求会减小,需求情景 n1 表示客户需求偏低的情况,这种情况下假定客户需求是正常需求的 80%;受经济贸易、天气变冷等因素影响,客户对煤炭的需求会增加,需求情景 n2 表示客户需求偏高的情况,这种情况下假定客户需求是正常需求的 120%;需求情景 n3 表示常规情况下的客户需求,假定本文中的煤炭企业需要服务的 6 个海内外客户一年的总煤炭需求量约为 500 万吨。

为分析不同严重程度的中断事件和不同客户需求对煤炭供应链网络的影响,本文赋予上述不同中断情景与需求情景在 9 个不同场景下发生的可能性,如表 5 所示。在 9 个场景中,严重中断事件发生概率越来越高,正常情况发生概率越来越低,轻微中断事件发生概率先增后减,即:煤炭供应链网络面临的中断风险越来越大,而较低客户需求发生概率从 1 递减至 0,较高客户需求发生概率从 0 递增至 1,正常需求情况发生概率先增后减,即客户需求量越来越大。将不同场景下各个情景概率输入到所建立的模型中,可得到煤炭供应链网络在不同场景下总成本最小的最优网络结构决策、库存量决策以及节点间的流量决策。

4.2 案例结果分析

从上述数学模型可知,本文所研究的问题是混合整数线性规划问题,为了精确求解模型,在 CPU 为 AMD4800+、内存为 512 MB、操作系统为 Windows 10 的运行环境下,运用 CLPEX 商业求解器对模型进行求解。

4.2.1 不同 L_{CS} 与情景概率对煤炭供应链网络结构、总成本及碳排放的影响 为了说明中断事件和需求波动以及 L_{CS} 对所提出的考虑碳排放的弹性煤炭供应链网络的网络结构、总成本和碳排放的影响,本文将表 5 中不同场景下的中断情景概率和需求情景概率按场景序号依次输入到 CPLEX 软件中,并将 L_{CS} 分别设置为 0、0.6、0.8

和 1,进行模型求解。表 6 展示了不同 L_{CS} 下,中断事件严重程度和客户需求上升对煤炭供应链网络选址决策,即网络结构决策的影响。如该表所示,在特定 L_{CS} 下,随着中断严重程度越来越高,客户需求越来越大,煤炭供应链网络中被选择建立的设施越来越多,总设施固定成本也越来越高。例如,在 $L_{CS}=0.6$ 时,在不发生中断、客户需求偏低的场景 1 下,只需建立 2 个矿山、2 个处理厂、1 个转运中心及 1 个港口;在场景 2~6 下,需要建立 3 个矿山、4 个处理厂、1 个转运中心和 2 个港口;在中断事件愈加严重、客户需求愈高的场景 7~9 下,则需要建立 3 个矿山、4 个处理厂、2 个转运中心及 2 个港口。在 $L_{CS}=0.6$ 时,煤炭供应链网络的设施固定建设成本从场景 1 下的 56 300 万元增涨到从场景 7~9 下的 108 400 万元,涨幅近 2 倍。这说明在中断与需求波动风险上升的情况下,供应链网络需要建立更多设施来保证弹性和客户响应性。此外,在同样的中断情景与需求情景下,不同的 L_{CS} 也会产生不同的选址结果。当 L_{CS} 增加时,煤炭供应链网络需要建立更多的设施来满足客户需求,比如同样在场景 1 下, $L_{CS}=1$ 时的固定成本比 $L_{CS}=0.8$ 时的固定成本高。

表 5 不同中断及需求情景出现的概率

Tab. 5 Probabilities of occurrence of different interruption and demand scenarios

情景	概率								
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9
s1	1	0.8	0.7	0.5	0.25	0.2	0.1	0.05	0
s2	0	0.15	0.2	0.3	0.35	0.3	0.2	0.15	0
s3	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1
n1	1	0.5	0.7	0	0.25	0.5	0	0.2	0
n2	0	0	0.2	0	0.25	0.5	0.5	0.7	1
n3	0	0.5	0.1	1	0.5	0	0.5	0.1	0

表 6 L_{CS} 与情景概率变化对选址结果的影响

Tab. 6 Impacts of the L_{CS} and scenario change on sites selection

L_{CS}	场景	矿山			处理厂				转运中心				港口			固定成本/万元
		i1	i2	i3	j1	j2	j3	j4	k1	k2	k3	k4	l1	l2	l3	
0	场景 1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	56 300
	场景 2	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	71 900
	场景 3~9	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	105 200
0.6	场景 1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	56 300
	场景 2~6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	105 200
	场景 7~9	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	108 400
0.8	场景 1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	56 300
	场景 2~4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	115 700
	场景 5~9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	119 700
1	场景 1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	75 500
	场景 2~6	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	129 200
	场景 7~9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	133 200

中断事件与需求波动变化不仅会影响煤炭供应链网络的结构设计,也会影响供应链网络的总成本和碳排放。图 2、图 3 为 9 种不同场景及 4 种 L_{CS} 下的供应链网络总成本与碳排放变化情况,其中显示受节点中断、需求波动风险以及 L_{CS} 变化的影响,煤炭供应链网络的总成本和碳排放呈现较规律的变化。

如图 2 所示,不论 L_{CS} 取值如何,随着中断严重程度与客户需求的上升,供应链网络的总成本都在上升,且上升趋势相似。而在相同的中断严重程度和客户需求场景下,更高的 L_{CS} 会带来更高的网络总成本,比如 $L_{CS}=0.6$ 时的网络总成本总是比 $L_{CS}=0$ 时的网络总成本高, $L_{CS}=0.8$ 时的网络总成本总是比 $L_{CS}=0.6$ 时的网络总

成本高。虽然维持较高的客户服务水平能够更好地响应客户需求、维护企业形象并降低缺货成本损失,但过高的客户服务水平会损害企业利润。因此,煤炭企业需要权衡客户响应性与供应链网络总成本之间的关系。

从图 3 中描述的煤炭供应链网络总碳排放量与风险场景、 L_{CS} 的关系中可以看出,当 $L_{CS}=0.8$ 以及 $L_{CS}=1$ 时,供应链网络的总碳排放量会随着风险严重程度和客户需求上升而增加;当 $L_{CS}=0.6$ 以及 $L_{CS}=0$ 时,总碳排放量先增加后减少,即当 L_{CS} 较高时,高风险会带来更高的碳排放量,当 L_{CS} 较低时,碳排放量并不总是随着风险上升而增加。此外,在同样的风险场景下,更高的 L_{CS} 往往会导致更高的碳排放量。可知, L_{CS} 不仅会增加煤炭供应链网络的总成本,还会增加其中的碳排放量。

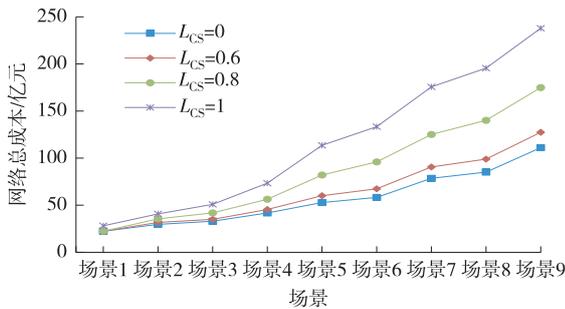


图 2 L_{CS} 与场景变化对网络总成本的影响
Fig. 2 Impacts of the L_{CS} and scenario change on the total network cost

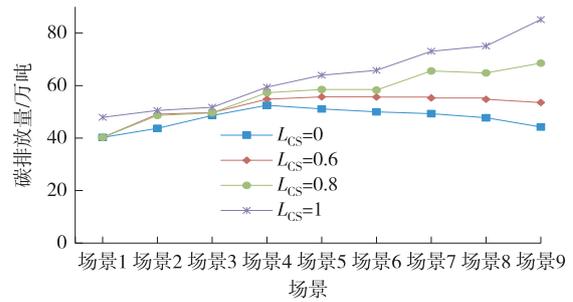


图 3 L_{CS} 与场景变化对碳排放量的影响
Fig. 3 Impacts of the L_{CS} and scenario change on total carbon emissions

4. 2. 2 无 L_{CS} 约束情况下煤炭供应链网络成本占比分析 表 7 描绘了无 L_{CS} 约束($L_{CS}=0$)时的煤炭供应链网络中各个成本占比随风险变化的情况:1) 在客户需求正常、无中断风险情况下煤炭供应链网络的各种成本中以运输成本占比最大,然后依次是固定成本、处理成本、碳排放成本,而缺货成本和库存成本都为 0。2) 在客户需求稍高、轻微中断情况下,煤炭供应链网络的运输成本占比减少,固定成本和缺货成本的占比有较多增加,处理成本与碳排放成本占比变化较小,且存在一定的库存成本,但它的占比较小。3) 当客户需求上升、中断风险上升时,煤炭供应链网络的运输成本和固定成本占比都有较大的减少幅度,而库存成本和缺货成本占比增加。因此,当煤炭供应链网络的中断风险与客户需求上升时,缺货成本与库存成本会增加,供应链结构成本即固定成本增加但占比总体呈现下降趋势,而供应链的过程成本即运输成本和处理成本随着风险上升而减少,占比也减少。

表 7 煤炭供应链网络总成本比例分析
Tab. 7 Proportion analysis of the total network cost

情况	运输成本占比	处理成本占比	缺货成本占比	库存成本占比	固定成本占比	碳排放成本占比
客户需求正常、无中断风险	68.15	6.54	0.00	0.00	23.57	1.74
客户需求稍高、轻微中断	48.44	4.88	13.10	0.29	31.82	1.47
客户需求上升、中断风险上升	32.50	3.22	42.57	0.82	19.92	0.97

4. 2. 3 弹性策略有效性分析 为分析紧急库存策略和直接交付策略的整体有效性以及单个有效性,本文对比了不带有任何弹性策略的低碳煤炭供应链网络(Green coal supply chain network,GCSCN)、同时带有紧急库存策略和直接交付策略的低碳弹性煤炭供应链网络(Green and resilient coal supply chain network,GRCSN)、仅采用紧急库存策略的低碳煤炭供应链网络(Green coal supply chain network with emergency inventory strategy,GCSCN. EI)、与仅采用直接交付策略的低碳煤炭供应链网络(Green coal supply chain network with direct to port delivery strategy,GCSCN. DPD)在 9 个不同中断严重程度与需求量场景下的网络总成本。为了进一步分析紧急库存策略的作用,本文将单位库存成本设置为原库存成本的 50%。图 4 与图 5 中 GCSCN. EI1 表示原单位库存成本下的低碳煤炭供应链网络,GCSCN. EI2 为原库存成本 50%的低碳煤炭供应链网络。图 4 中柱状线部分显示了在没有 L_{CS} 约束情况下,GCSCN、GRCSN、GCSCN. EI1、GCSCN. EI2 和 GCSCN. DPD 的总成本的对比;折线部分展示了 GRCSN、GCSCN. EI1、GCSCN. EI2、GCSCN. DPD 相对于 GCSCN 能够节省的成本的对比。图 5 柱状线部分显示了 GCSCN. EI1 和 GCSCN. EI2 在 9 个不同场景下保留的紧急库存量,折线部分显

示了 GCSCN, DPD 在不同场景下的直接到港口交付量。

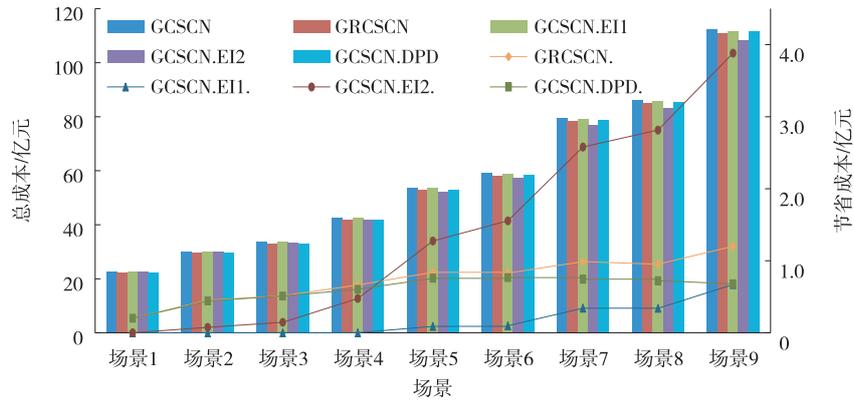


图 4 不同场景下各个煤炭供应链网络的成本对比

Fig. 4 Cost comparison of different CSCNs in different scenarios

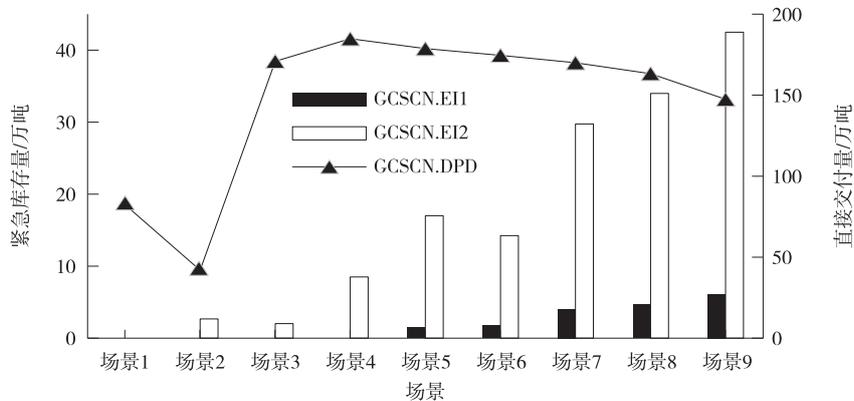


图 5 不同场景下的紧急库存量与直接交付量

Fig. 5 EI quantity and DPD quantity in different scenarios

如图 4 所示,随着中断事件越发严重、客户需求越高,5 个供应链网络的总成本都增加。但相比于不带有任何弹性策略的 GCSCN,GRCSN 能够节省约 0.2~1.2 亿元的总成本;GCSCN. EI1 能够节省约 0~0.7 亿元的总成本;GCSCN. EI2 能够节省约 0~3.9 亿元的总成本;GCSCN. DPD 能够节省约 0.2~0.7 亿元的总成本。这表明随着风险上升,弹性策略发挥着越发重要的作用。在场景 1~3 下,即当中断风险和客户需求较小时,紧急库存策略与直接交付策略能够节省的成本都较少;在场景 4~9 下,当风险上升时,紧急库存策略与直接交付策略节省的成本更多。当单位库存成本较高时,直接交付策略的弹性有效性始终比紧急库存策略更好,当单位库存成本较低时,在场景 5~9 中,紧急库存策略能够比直接交付策略节省更多成本。

由图 4、图 5 可知,对于紧急库存策略,若能获得更加低廉的库存价格,企业偏向于保留更多紧急库存量,紧急库存策略能够带来更好的弹性效果,但不论何种单位库存价格,随着风险上升,所保留的紧急库存量以及能够节省的总成本都增加,并且增加趋势较明显。对于直接交付策略,其能够节省的成本随着风险上升呈现不明显的增加趋势,并且处理厂直接到港口的煤炭产品交付量并不随着中断严重程度和客户需求量增加而增加,而是呈现不规律的变化趋势。

5 结束语

在动荡的国际环境和频繁的自然灾害影响下,中断风险和客户需求波动是供应链网络面临的两个重要的问题。对企业而言,设计一个可靠的供应链网络在保证自身正常运转和节约成本方面有着重要意义。此外,世界各国越来越重视碳排放对环境的影响,世界经济正趋向于“低碳化”发展;煤炭从开采到客户消费过程都会产生大量碳排放,煤炭行业的低碳发展对发展全球低碳经济十分重要。本文研究了同时考虑设施节点中断与客户需求波动风险的多层级、多产品低碳、弹性煤炭供应链网络设计问题,建立了一个混合整数线性规划模型,确定网

络结构决策以及产能、库存量、流量决策,以最小化供应链网络总成本,减少碳排放,满足最低客户服务水平,并通过实际案例分析验证模型的有效性。

实验结果表明:1) 在特定 L_{CS} 下,中断风险和需求波动风险上升会让企业倾向于选择建立更多设施,并导致网络总成本增加。在特定的风险场景下,更高的 L_{CS} 也会要求企业建立更多设施以保证客户响应性,同一场景下更高的 L_{CS} 往往会带来更高的网络总成本及碳排放量,企业需要在客户响应性与成本、碳排放量之间做出权衡。2) 随着风险上升,煤炭供应链网络中各个成本的占比会发生变化,其中缺货成本随着风险上升而增加且增加幅度较大,企业应合理选择弹性策略以减少缺货损失。3) 本文所采用的两个弹性策略即紧急库存策略与直接交付策略可在一定程度上能够减少风险损失,它们的有效性随着风险上升而增加。若能获得更低廉的库存价格,企业倾向于保留更多紧急库存量,从而减少风险损失。

值得注意的是,本文只研究了设施节点失效的情况而未考虑供应链网络中的路径中断风险,因此,未来可将后者纳入风险因素中。此外,对于大规模问题的求解,未来可设计智能优化算法来提高求解效率。

参考文献:

- [1] 范志强. 考虑复杂需求特性的多级煤炭供应链网络优化[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(5): 21-28.
FAN Z Q. Optimal design for multi-echelon coal supply chain network with complex demands[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(5): 21-28.
- [2] 汪文生, 曾志猛, 王娟. 多级煤炭物流网络优化选择模型的构建与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 1060-1064.
WANG W S, ZENG Z M, WANG J. Construction and application of multi-level coal logistics network optimization model[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 1060-1064.
- [3] 范志强. 多阶段煤炭供应链网络设计及其遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(24): 206-211.
FAN Z Q. Genetic algorithm for multi-stage coal supply chain network design[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(4): 206-211.
- [4] 袁旭梅, 张旭. 考虑港口物流能力的多目标海运煤炭供应链网络优化模型[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(11): 75-82.
YUAN X M, ZHANG X. Multi-objective seaborne coal supply chain network optimization model under port logistics capability [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(11): 75-82.
- [5] SINGH G, SIER D, ERNST A, et al. A mixed integer programming model for long term capacity expansion planning: a case study from the Hunter Valley coal chain[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220(1): 210-224.
- [6] GEDIK R, MEDAL H, RAINWATER C, et al. Vulnerability assessment and re-routing of freight trains under disruptions: a coal supply chain network application[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 71: 45-57.
- [7] SKIDMORE Z. China coal futures hit high after floods worsen energy crisis[EB/OL]. (2021-10-11)[2022-02-06]. <https://www.mining-technology.com/news/industry-news/chinese-coal-futures/>.
- [8] LIU S Q, HUANG X, LI X G, et al. How is China's energy security affected by exogenous shocks? evidence of China-US trade dispute and COVID-19 pandemic[J/OL]. Discover Energy, 2021, 1(1): 2. [2022-02-06]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-021-00002-6>.
- [9] CHRISTOPHER M, PECK H. Building the resilient supply chain[J]. International Journal of Logistics Management, 2004, 15(2): 1-13.
- [10] 闫妍, 刘晓, 庄新田. 基于节点失效的弹性供应链应急管理策略[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 25-30.
YAN Y, LIU X, ZHUANG X T. Resilient supply chain emergency management strategy based on node fails[J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 25-30.
- [11] 孟宏旭. 基于中断-应急的弹性供应链网络设计[J]. 物流技术, 2018, 37(12): 110-114.
MENG H X. Design of elastic supply chain network based on interruption response[J]. Logistics Technology, 2018, 37(12): 110-114.
- [12] 王长琼, 罗琦. 考虑两级中断的弹性供应链网络优化设计[J]. 物流技术, 2020, 39(4): 60-66.
WANG Z Q, LUO Q. Optimal design of flexible supply chain network considering two-level interruption[J]. Logistics Technology, 2020, 39(4): 60-66.
- [13] FATTAHI M, GOVINDAN K, MAIHAMI R. Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 230: 107755.
- [14] ALIKHANI R, TORABI S A, ALTAY N. Retail supply chain network design with concurrent resilience capabilities[J].

International Journal of Production Economics, 2021, 234:108042.

- [15] 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, 254:119688.
- [16] CANALES-BUSTOS L, SANTIBANEZ-GONZÁLEZ E, CANDIA-VÉJAR A. A multi-objective optimization model for the design of an effective decarbonized supply chain in mining[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 193:449-464.
- [17] JIE D F, XU X Y, GUO F. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies[J]. Energy, 2021, 220:119644.
- [18] CAO Y, ZHAO Y H, WEN L, et al. System dynamics simulation for CO₂ emission mitigation in green electric-coal supply chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232:759-773.
- [19] GUO X P, GUO X D, YUAN J H. Impact analysis of air pollutant emission policies on thermal coal supply chain enterprises in China[J]. Sustainability, 2015, 7(1):75-95.
- [20] 陈红梅, 宋浩贤, 田然. 考虑碳排放的煤炭铁海联运路径优化[J]. 物流技术, 2020, 39(7):77-82.
CHEN H M, SONG H X, TIAN R. Path optimization of coal railway-sea transportation considering the carbon emissions[J]. Logistics Technology, 2020, 39(7):77-82.
- [21] ZENG L Y, LIU S Q, KOZAN E, et al. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management[J]. Resources Policy, 2021, 74:102274.

Operations Research and Cybernetics

A Resilient Coal Supply Chain Network Design Model Considering Carbon Emissions

LIU Shiqiang¹, ZENG Lanyan¹, LI Xiangong²

(1. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: [Purposes] Considering facility disruptions, customer demand fluctuations and carbon emissions reduction in the coal supply chain process, a five-level green and resilient supply chain network consisting of coal mines, plants, distribution centers, ports and customers is designed with the objective of minimizing the total carbon emissions and network cost while meeting the minimum service level. [Methods] By analyzing the characteristics of the coal supply chain, a multi-level, a multi-product mixed integer linear programming model is developed to establish a coal supply chain network. To mitigate disruption losses and satisfy the customer demand, two effective resilient strategies (i. e. , keeping a certain level of emergency inventory in facility nodes and directly delivering to ports from plants) are employed. To calculate the carbon emissions cost in the coal supply chain network, the carbon tax policy is applied in the model. [Findings] Taking a large coal enterprise as an example, the performance of the proposed low-carbon and resilient coal supply chain network model is verified. [Conclusions] Computational results show that the proposed model can provide managerial insights in response to facility disruptions and demand fluctuations in a coal supply chain system.

Keywords: coal supply chain network design; mixed integer linear programming; facility disruptions; demand fluctuations; carbon emissions

(责任编辑 方 兴)