

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.04.008

不同中断程度下新能源汽车动力电池 供应链动态影响研究

李佳佳, 李 芳, 李楠楠

(上海理工大学 管理学院, 上海 200082)

摘 要: 新能源汽车的快速发展导致对锂电池的需求量不断增长, 现有可利用锂资源和开采技术在未来存在供应缺口。为防患于未然, 运用系统动力学对未来存在中断风险的新能源汽车动力电池供应链进行研究, 考虑3种不同程度的中断情景, 以“库存水平”“交付订单量”“利润”为衡量指标, 量化锂矿石供应中断后产生的动态影响。研究结果表明: 距离中断环节最近的节点, 3个指标会最早受到影响; 当中断发生时间过长时, 供应链末端节点的“交付订单量”“利润”水平下降程度最为严重; 中断发生造成供应链下游企业利润水平初期出现上涨现象, 但在中断结束后长时间内无法回到初始水平, 其他指标经过时间调控都可自行恢复。

关键词: 供应链中断; 中断影响; 新能源汽车动力电池; 锂矿石; 系统动力学

中图分类号: F274

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)04-0057-09

引文格式: 李佳佳, 李 芳, 李楠楠. 不同中断程度下新能源汽车动力电池供应链动态影响研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(4): 57-65.

Research on the Dynamic Impact of New Energy Vehicle Power Battery Supply Chain Under Different Degrees of Disruption

LI Jiajia, LI Fang, LI Nannan

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China)

Abstract: Due to the rapid development of new energy vehicles, there is a continuous increase in demand for lithium batteries, resulting in a supply gap in the current available lithium resources and mining technologies in the future. In view of potential disruptions, system dynamics is employed for an investigation of the supply chain of new energy vehicle power batteries with disruption risks in the future, with three different degrees of disruption scenarios taken into consideration, while the dynamic impact of lithium ore supply interruption is quantified by using “inventory level”, “delivery order volume”, and “profit” as measurement indicators. The research results indicate that the node nearest to the disruption link will exert the earliest impact on the three indicators. When the disruption duration is excessively prolonged, there will be the most severe decline in the levels of “delivery order quantity” and “profit” at the end nodes of the supply chain. The disruption initially leads to an increase in the profit levels of downstream enterprises within the supply chain, but they are unable to return to their initial level for a long time when the disruption ends, while other indicators can recover on their own after time regulation.

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72271164); 上海市软科学研究基金资助重点项目 (19692104000)

作者简介: 李佳佳, 女, 上海理工大学硕士生, 主要研究方向为供应链管理, E-mail: 18656486003@163.com

通信作者: 李 芳, 女, 上海理工大学副教授, 博士, 主要研究方向为供应链管理, 生产运作管理,

E-mail: lifang2502@126.com

Keywords: supply chain disruption; disruption effect; new energy vehicle power battery; Lithium ore; system dynamics

1 研究综述

当前,全球二氧化碳排放量不断增加,导致温室效应持续增强,自然灾害频发,因此,减少碳排放量迫在眉睫^[1]。在此背景下,响应我国“双碳”目标的新能源产业快速发展,导致对动力电池的需求量也不断地增长。锂是动力电池的关键组成部分,但是全球的锂资源分布很不均匀,主要集中在智利、中国、阿根廷、澳大利亚等国。大多数的国家面临着供应限制问题,需要依靠国际贸易来确保锂资源^[2]。电动汽车需求的快速增长造成锂被美国、欧盟和中国列为战略性矿产资源^[3]。

中国作为世界上最大的锂资源消费国,锂资源储量丰富,包括固矿锂和液态卤水锂,但总体品位较低,综合查明率不高。其中液态卤水锂主要产于川西、新疆北部、青藏高原等高海拔、自然条件恶劣地区。盐湖卤水方面,青海盐湖已进入产能扩张期,西藏盐湖提锂技术还未得到全面开发,深层卤水和油田卤水当前仍处于勘探试验期,盐湖锂资源综合查明率仅 19%^[4]。此外,这些地区的生态脆弱性使其开采工作复杂化,运输瓶颈和高昂的开采成本限制了国内锂资源供应能力^[5]。因此,中国锂资源高度依赖进口,但国家之间密集的能源贸易往来都伴随着风险,受制于贸易壁垒和政治冲突等不确定因素的影响。当锂矿石进口中断时,国内新能源动力电池产业链上下游将面临生产和流动中断风险,从而产生级联效应^[6]。

20 世纪 90 年代以来,供应链的建模与仿真软件持续发展。本文拟使用 Vensim 仿真软件对新能源汽车动力电池供应链的原材料锂矿石中断进行研究,结合系统动力学(system dynamics, SD)处理供应链复杂系统中的动态问题和反馈循环。

目前,国内外学者们使用 SD 对供应链管理问题展开了广泛的研究。如 E. Katsoras 等^[7]运用系统动力学来模拟由新冠疫情导致的生产中断对闭环供应链的影响,其研究表明,中断影响取决于制造商产量、产品需求和恢复期的持续时间。赖新峰等^[8]针对离岸外包全球生产网的中断风险,运用系统动力学提出了一种动态惩罚机制,并且证明了该动态惩罚机制下的 OEM(original equipment manufacturer)利润高于静态惩罚机制下的 OEM 利润。卢志平等^[9]基

于系统动力学对汽车供应链造成牛鞭效应的变量进行了因果分析,得出安全库存的增加和转运周期的减少可以有效减少由中断引起的库存激增现象,并且能提高供应链绩效。针对生鲜产品供应中断问题,慕静等^[10]提出了优化保鲜投入、安全库存等策略,这些策略有效降低了零售端库存水平振荡,并使其呈现渐稳趋势,实现产品在交付过程中的双重时效性,达到供需匹配。对于中断发生后的应急策略,张以彬等^[11]通过引入系统动力学模型对系统的运营进行仿真分析,得知长期利润损失可以通过调整应急库存水平和缩短应急决策信息延迟等策略来减少。在进口能源领域,王宇奇等^[12]运用 SD 模型和契约理论构建了进口原油供应链网络契约协调策略,以提高进口中断时原油供应链的网络柔性。

国内外研究者们围绕着系统动力学和供应链中断的研究,从不同角度阐述了中断影响以及应对的策略。本研究的意义主要如下:1)基于新能源汽车动力电池供应链,构建了 SD 模型,通过中断情景仿真,系统地展现了原材料锂矿石中断后的动态影响;2)已有关于供应链中断的研究多集中于不同节点的中断,以及对于库存策略的改进,较少考虑不同中断程度对供应链各节点产生的影响;3)将新能源汽车动力电池供应链与系统动力学相结合,有助于行业内企业直观观测到中断产生的具体影响,便于提前规划和管理企业生产,应对潜在的风险,并且采取相应的措施提升供应链韧性。

2 问题描述与基本假设

2.1 问题描述

本文考察的供应链系统是一个由电池关键原材料供应商、电池制造商、新能源汽车制造商组成的二级供应链系统,如图 1 所示。

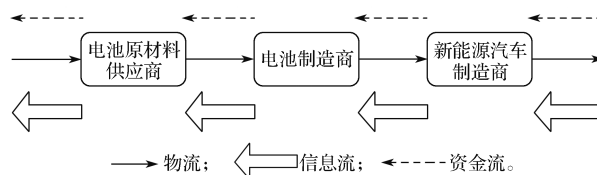


图 1 二级供应链 SD 模型边界图

Fig. 1 SD model boundary diagram of the secondary supply chain

供应中断发生在原材料供应商采购环节,从中断程度的角度分为无中断、轻度中断和重度中断3种情景。轻度中断:由自然灾害、物流延迟等单一因素导致的供应链中断情形,此时国外锂矿石无法采购,中断时间较短;重度中断:由供应商电池关键原材料短缺或地缘政治影响导致的供应链中断情形,中断时间较长。本研究构建的模型中涉及的变量名称与代码如表1所示,其中 $i=1, 2, 3$,分别代表 S (电池原材料供应商)、 M_1 (电池制造商)、 M_2 (新能源汽车制造商);3个主体生产产品分别为电池级碳酸锂(单位为t)、新能源汽车电池(单位为组)、新能源汽车(单位为辆)。

表1 系统变量名称说明表

Table 1 Description table of system variable names

变量名称	二级变量名称	变量代码	单位
在途库存 SIT_i	S 国外在途库存	SIT_{1F}	t
	S 国内在途库存	SIT_{1D}	t
	M_1 在途库存	SIT_2	t
	M_2 在途库存	SIT_3	组
库存 I_i	S 、 M_1 、 M_2 库存	$I_1/I_2/I_3$	t/组/辆
订单 O_i	S 、 M_1 、 M_2 订单	$O_1/O_2/O_3$	t/组/辆
发货量 QS_i	S 、 M_1 、 M_2 发货量	$QS_1/QS_2/QS_3$	t/组/辆
收货量 QR_i	S 国外收货量	QR_{1F}	t
	S 国内收货量	QR_{1D}	t
	M_1 收货量	QR_2	t
	M_2 收货量	QR_3	组
采购量 PV	国外锂矿石采购量	PV_F	t
	国内锂矿石采购量	PV_D	t
期望库存量 I_E	S 、 M_1 、 M_2 期望库存量	$I_{1E}/I_{2E}/I_{3E}$	t/组/辆
需求预测量 DF_i	S 、 M_1 、 M_2 需求预测量	$DF_1/DF_2/DF_3$	t/组/辆
累计订单量 COV_i	S 、 M_1 、 M_2 累计订单量	$COV_1/COV_2/COV_3$	t/组/辆
交付订单量 OQD_i	S 、 M_1 、 M_2 交付订单量	$OQD_1/OQD_2/OQD_3$	t/组/辆
收到订单量 $QOOR_i$	S 、 M_1 、 M_2 收到订单量	$QOOR_1/QOOR_2/QOOR_3$	t/组/辆
采购时间 PT	S 国内、国外采购时间	PT_D/PT_F	d
到货延迟天数 ADD_i	S 国外到货延迟天数	ADD_{1F}	d
	S 国内到货延迟天数	ADD_{1D}	d
	M_1 到货延迟天数	ADD_2	d
	M_2 到货延迟天数	ADD_3	d
采购成本 PC_i	S 国外采购成本	PC_{1F}	元
	S 国内采购成本	PC_{1D}	元
	M_1 采购成本	PC_2	元
	M_2 采购成本	PC_3	元
单位采购成本 PC_{iu}	S 国外单位采购成本	PC_{1FU}	元
	S 国内单位采购成本	PC_{1DU}	元
	M_1 单位采购成本	PC_{2U}	元
	M_2 单位采购成本	PC_{3U}	元

2.2 基本假设

本研究中设置如下假设条件:

- 1) 不考虑供应链各节点货物在运输过程中的损坏^[13];
- 2) 不考虑仓库容量对库存量的限制;
- 3) 供应链各节点的到货时间存在延迟,即下游企业向上游企业发送订单后不能立即收到货物^[13];
- 4) 供应链各成员收到订单后实行“先进先出”原则;
- 5) 中断开始后,上游供应商向下游制造商的供应量将为零;
- 6) 供应链所有参与企业只独立生产一种产品,原材料品种固定,定期订货。

3 模型构建、参数设置与有效性检验

3.1 模型构建

因果回路图是系统动力学建模的基础,本文构建的供应链系统包含3个子系统:电池原材料供应商子系统、电池制造商子系统、新能源汽车制造商子系统;每个子系统包含库存、利润、交付订单量3个模块。电池原材料供应商 S 从国内和国外采购锂矿石,生产电池级碳酸锂,电池制造商 M_1 将电池级碳酸锂加工成新能源汽车动力电池组,新能源汽车制造商 M_2 采购电池组来生产新能源汽车。图2是3个子系统组成的二级供应链存量流量图。

模型建立后,采用Vensim软件编辑各类变量的方程式,软件中的公式是数学公式的转换,逻辑更加清晰,便于调整。

对于模型中各定义变量方程如下:

$$SIT_{1F} = \int_0^t (PV_F - QR_{1F}) dt, \quad (1)$$

$$SIT_{1D} = \int_0^t (PV_D - QR_{1D}) dt, \quad (2)$$

$$SIT_2 = \int_0^t (QS_1 - QR_2) dt, \quad (3)$$

$$SIT_3 = \int_0^t (QS_2 - QR_3) dt. \quad (4)$$

式(1)~(4)表明, S 的在途库存取值为采购量与收货量的差值积分, M_1 和 M_2 的在途库存取值为上一级节点发货量与自身收货量的差值积分。

$$PV_F = DELAY_1(O_1, PT_F), \quad (5)$$

$$PV_D = DELAY_1(O_1, PT_D). \quad (6)$$

式(5)(6)中 $DELAY_1$ 为一阶延迟函数。

式(5)(6)表明, S 采购量由 S 订单延长一段时间得到,故 S 采购时间为延迟时间,采购量由订单数量决定,且分国外、内两种情况。

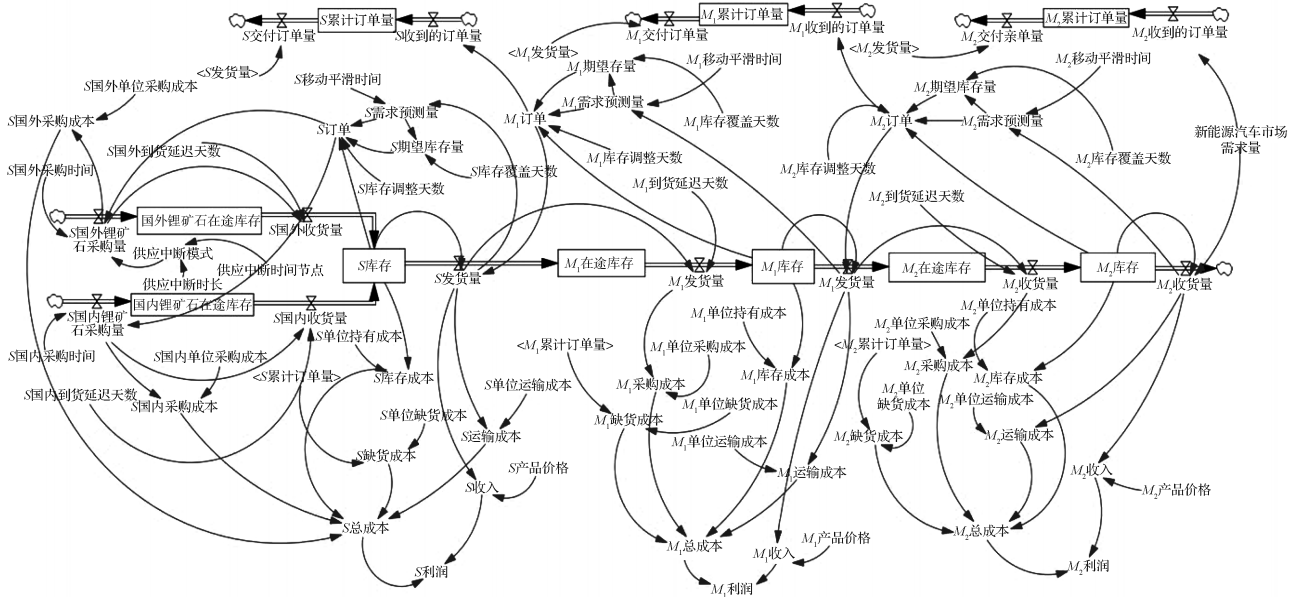


图2 新能源汽车动力电池供应链中断系统动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of the supply chain disruption system of power battery for new energy vehicles

$$QR_{IF} = DELAY_1(PV_F, ADD_{IF}), \quad (7)$$

$$QR_{ID} = DELAY_1(PV_D, ADD_{ID}). \quad (8)$$

式(7)(8)表明, S 收货量由 S 采购量经一段时间延迟得到, S 到货延迟天数为延迟时间, 同样分国外、内两种情况。

$$I_1 = \int_0^t ((QR_{IF} \div 8 + QR_{ID} \div 25) - QS_1) dt, \quad (9)$$

$$I_2 = \int_0^t (QR_2 \div 0.06 - QS_2) dt, \quad (10)$$

$$I_3 = \int_0^t (QR_3 - QS_3) dt. \quad (11)$$

式(9)~(11)表明, 供应链各节点的库存取值为对应收货量与发货量的差值积分, 由于供应链生产过程存在原料损耗与转换, S 收到锂矿石会提炼为锂元素生产为电池级碳酸锂后, 作为发货产品到供应链的下个节点。此外, 由于牛鞭效应, 需求会被逐级放大。

$$QS_i = \begin{cases} \min(I_i, O_i) \times IM, & i=1, 2; \\ \min(I_3, MD), & i=3. \end{cases} \quad (12)$$

式中: IM 为中断模式; MD 为市场需求量。

式(12)表明, 正常情况下, S 、 M_1 的发货量等于对应库存和下一级订单中的最小值, 表示当节点自身库存小于订单时只能以现有库存发货, 而当库存大于订单时以实际订单发货; M_2 的发货量为库存和市场需求量的最小值。

$$O_i = \max(0, DF_i + (I_{IE} - I_i) / IAD_i), \quad i=1, 2, 3. \quad (13)$$

式(13)表明, 为保证订单取值不为负数, 各节点订单为 0 到期望库存量与库存差值除以库存调整天数 IAD_i 加上需求预测量 DF_i 间的最大值。

$$I_{IE} = ICD_i \times DF_i, \quad i=1, 2, 3. \quad (14)$$

上式表明, 供应链各节点的期望库存量取值为对

应库存覆盖天数 ICD_i 与需求预测量的乘积。

$$DF_i = SMOOTH(QS_i, MST_i), \quad i=1, 2, 3. \quad (15)$$

式中 MST_i 为移动平滑时间。

供应链各节点的发货量可能会在一段时间内激增, 但不代表其真实的需求量, 因此本文将需求预测量设置为一段时间内发货量的移动平均值, $SMOOTH$ 函数是系统动力学的一个特色函数, 可以计算出经过平滑处理后的数值。

$$COV_i = \int_0^t (QOOR_i - QOD_i) dt, \quad i=1, 2, 3. \quad (16)$$

上式表明供应链各节点的累计订单量等于收到订单量与交付订单量的差值积分, 其初始值为 0。

$$QOD_i = QS_i, \quad i=1, 2, 3. \quad (17)$$

式(17)表明, 供应链各节点的交付订单量等于对应发货量, 即发货量体现订单交付水平。

$$QOOR_i = \begin{cases} O_{i+1}, & i=1, 2; \\ MD, & i=3. \end{cases} \quad (18)$$

上式表明, 供应链上游收到的订单量等于下游订单量, M_2 收到订单量等于市场需求量 MD , 即上游订单量由下游订单量决定。

$$PC_i = \begin{cases} PC_{IF} + PC_{ID} = \\ PC_{IFU} \times PV_F + PC_{IDU} \times PV_D, & i=1; \\ PC_{IU} \times QR_i, & i=2, 3. \end{cases} \quad (19)$$

上式表明, S 的采购成本为单位采购成本和采购量的乘积, M_1 、 M_2 的采购成本为对应单位采购成本与收货量的乘积。

$$IC_i = I_i \times IC_{IU}, \quad i=1, 2, 3. \quad (20)$$

上式表明, 供应链各节点库存成本 IC_i 为对应库存和单位库存成本 IC_{IU} 的乘积。

$$OOSC_i = COV_i \times OOSC_{iu}, i=1, 2, 3. \quad (21)$$

上式表明,供应链各节点的缺货成本 $OOSC_i$ 为对应累计订单量和单位缺货成本 $OOSC_{iu}$ 的乘积。

$$TC_i = QS_i \times TC_{iu}, i=1, 2, 3. \quad (22)$$

上式表明,供应链各节点的运输成本 TC_i 为发货量与单位运输成本 TC_{iu} 的乘积。

$$OC_i = IC_i + PC_i + TC_i + OOSC_i, i=1, 2, 3. \quad (23)$$

上式表明,供应链各节点总成本 OC_i 为库存成本、采购成本、运输成本、缺货成本之和。

$$R_i = PP_i \times QS_i, i=1, 2, 3. \quad (24)$$

上式表明,供应链各节点收入 R_i 等于对应产品价格 PP_i 与发货量的乘积。

$$COC_i = \int_0^t OC_i dt, i=1, 2, 3. \quad (25)$$

上式表明,供应链各节点累计总成本 COC_i 为对应总成本的积分。

$$CTP_i = \int_0^t P_i dt, i=1, 2, 3. \quad (26)$$

上式表明,供应链各节点累计总利润 CTP_i 为对应利润 P_i 的积分。

3.2 参数设置

仿真开始前,需设置模型的相关参数值。通过查询亚洲金属网对于供应链原材料的锂矿石价格以及电池级碳酸锂价格进行赋值,取2022及2023连续两年的全年均价。通过电话访谈得出亚洲金属网锂矿石国内买家咨询国内外物流时间;其他数值通过大量查询采用SD方法研究供应链中断的参考文献及结合新能源汽车的市场价格进行赋值,本文模型相关参数设置见表2。

表2 模型相关参数设置

Table 2 Related parameter settings

参数名称	取值	单位	参数名称	取值	单位
S库存调整天数	5	d	M_1 单位采购成本	37	万元/t
S库存覆盖天数	21	d	M_1 单位缺货成本	150	元/t
S国外到货延迟天数	5	d	M_1 单位运输成本	70	元/组
S国内到货延迟天数	3	d	M_1 单位库存成本	15	元/组
S移动平滑时间	14	d	M_1 产品价格	6	万元/组
S国外单位采购成本	2.829	万元/t	M_2 库存调整天数	3	d
S国内单位采购成本	0.3	万元/t	M_2 库存覆盖天数	7	d
S单位缺货成本	100	元/t	M_2 到货延迟天数	3	d
S单位运输成本	100	元/t	M_2 移动平滑时间	14	d
S单位库存成本	10	元/t	M_2 单位采购成本	5.8	万元/组
S产品价格	37.02	万元/t	M_2 单位缺货成本	200	元/组
M_1 库存调整天数	3	d	M_2 单位运输成本	1 500	元/辆
M_1 库存覆盖天数	14	d	M_2 单位库存成本	30	元/辆
M_1 到货延迟天数	3	d	M_2 产品价格	20	万元/辆
M_1 移动平滑时间	14	d			

3.3 模型有效性检验

为了保证模型设置的合理性,仿真分析前参考文献[14]进行了有效性检验,改变变量数值以模拟现实中的条件变化。本文使用STEP函数,使市场需求量取值在100 d后从2 000增长到3 000。模型有效性检验结果如图3所示。

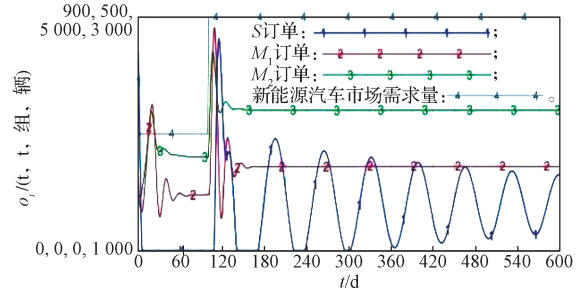


图3 现实条件下各主体订单变化曲线

Fig. 3 Change curves of orders of various entities under realistic conditions

由图3所示曲线可发现,供应链各节点订单量在100 d前逐渐趋于定值,市场需求波动增加到3 000时,订单量开始出现波动,S波动幅度最大, M_2 波动幅度最小,符合牛鞭效应;经过一段时间后各主体订单量波动幅度减小,趋于稳定,符合现实中供应链运作情况,模型通过检验。

4 不同中断程度下的供应链动态仿真分析

4.1 仿真情景设置

在构建的模型中,由于我国锂矿石对外依存度较高,所以考虑国外锂矿石原材料中断的情形。模型的仿真时间设置如下:INITIAL TIME设置为0 d,FINAL TIME设置为600 d,TIME STEP设置为1 d,仿真总时长为600 d。为了有效体现中断的发生过程,引入PULSE脉冲函数。轻度中断情景下设置“中断时间点=150”,“供应中断时长=30”,“供应中断模式=1-PULSE(供应中断时间点,供应中断时长)”,“S国外锂矿石采购量=DELAY1(S订单*0.9,S国外采购时间)*供应中断模式”。重度中断情景下,设置“中断时间点=150”,“供应中断时长=90”。本文重点研究了中断程度对于库存、交付订单量以及利润的影响,并且将新能源汽车的市场需求量设置为2 000辆。

4.2 供应链库存水平动态仿真分析

4.2.1 个体不同中断程度下库存水平变化状况

仿真所得个体不同中断程度情景下的库存水平变化状况如图4所示。

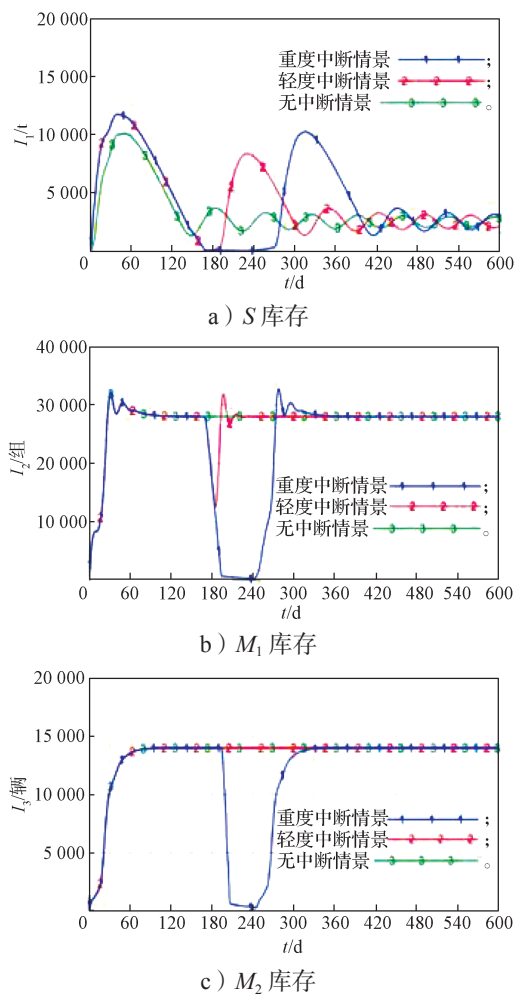


图4 个体库存水平变化图

Fig. 4 Individual inventory level change chart

如图4a所示,电池原材料供应商 S 初期为满足市场需求量,导致采购量大幅度上升,在150 d左右,库存水平进入平稳变化状态。因此,中断模拟从第150 d开始更加客观。图4a中 S 轻度中断情景在第150 d的上升趋势受中断的影响,快速下降至0,直至中断停止,在第180 d供应恢复后开始逐渐上涨。30 d的中断导致 S 需要大量补货以弥补中断造成的库存不足,最终在第310 d左右进入平稳状态。 S 重度中断情景在中断开始后的库存水平快速下降至0,并在第240 d中断结束后的低水平状态仍维持了30 d左右,此时 S 补货库存点达到10 000 t,明显高于轻度中断情景的对应值,同时进入平稳状态推迟至第420 d,体现重度中断的影响深远。

如图4b所示, M_1 库存水平经过前期上涨后平稳保持在28 000组。在轻度中断情境下, M_1 在中断发生后前20 d还能收到 S 之前的货物以及 M_2 的订单,所以库存保持稳定。20 d后中断影响开始体现,库存水平迅速下降至12 519组,在第185 d开始恢复直至平衡状态。重度中断情境下, M_1 库存水平迅速下降

至696组。由于中断时间长,继续保持缓慢下降趋势,第240 d才开始恢复,直至平衡状态。

如图4c所示,在轻度中断情境下, M_2 由于距离中断节点较远,有上游 S 、 M_1 及自身剩余库存水平支持,没有产生明显影响。然而在重度中断情境下,库存水平在中断发生45 d后开始迅速下降至低水平状态,但在第246 d,即中断刚结束5 d后开始恢复,直至平衡,受中断影响时间较短。

4.2.2 多主体不同中断程度下库存水平变化状况

仿真所得多主体不同中断程度情境下的库存水平变化图如图5所示。从图5中可看出,当供应中断发生时, S 最先受到影响,库存下降最快, M_1 、 M_2 库存在几天后依次下降。因此,距离中断发生环节越近的节点,最早受到影响且受影响时间最长。

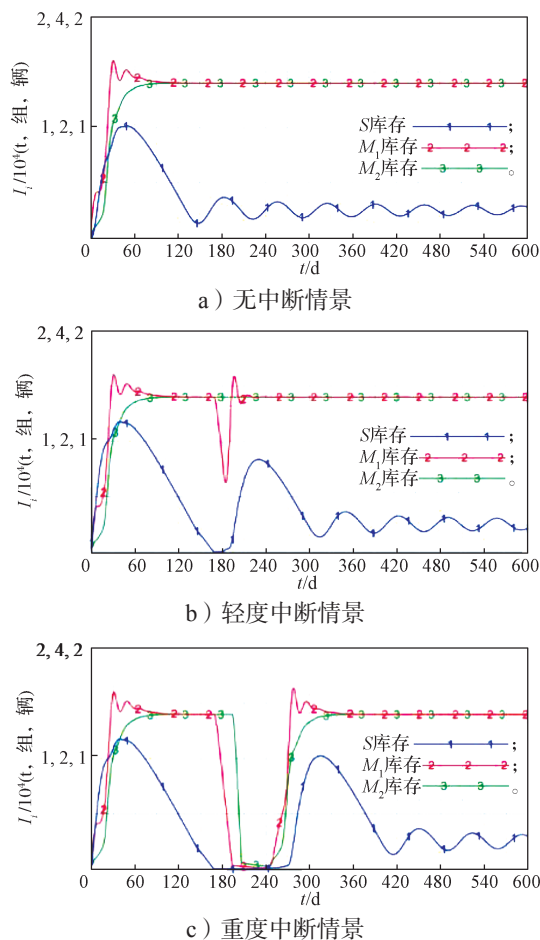


图5 多主体库存水平变化图

Fig. 5 Multi-agent inventory level change chart

4.3 供应链交付订单量动态仿真分析

4.3.1 个体不同中断程度下交付订单量变化状况

仿真所得个体不同中断程度下交付订单量变化状况见图6。如图6a所示, S 交付订单量在无中断情境下经过前60 d的波动后保持定值。中断发生后,轻度中断与重度中断影响都在第168 d开始体现, S

交付订单量迅速下降。重度中断恢复平稳水平的时间比轻度中断要晚 100 d。如图 6b 所示,轻度中断发生后,由于 M_1 本身库存充足以及 S 的剩余库存量,中断时间较短,致使交付订单量没有受到影响。重度中断由于时间过长,第 193 d 开始快速下降,在第 244 d 开始恢复直至平稳状态。如图 6c 所示, M_2 与 M_1 变化状况相同,轻度中断没有受到影响,重度中断影响持续时间最短。

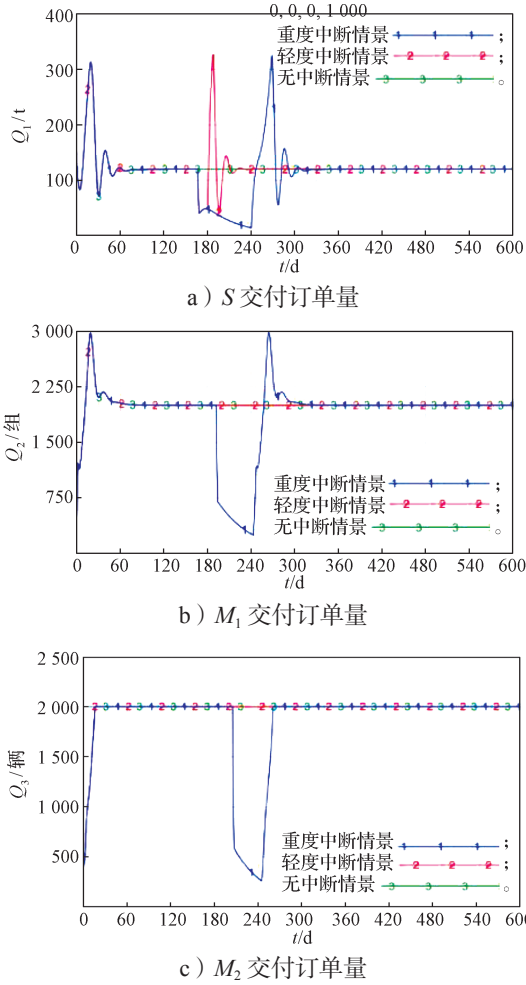


图 6 个体交付订单量变化图

Fig. 6 Individual delivery order quantity change chart

4.3.2 多主体不同中断程度下交付订单量变化状况

仿真所得多主体不同中断程度下交付订单量变化状况见图 7。如图所示, S 距中断环节最近,先受到中断影响,恢复时间比供应链下游长。但在交付订单量下降水平上,供应链下游受中断影响最严重, M_2 交付订单量取决于自身发货量,而 M_2 的发货量与市场需求量相关。市场需求量不会因供应链上游原材料的中断而减少,贴合实际情况。近年来新能源汽车的市场需求量一直上升,库存水平在重度中断下面对不变或上涨的市场需求量,导致交付水平明显降低。

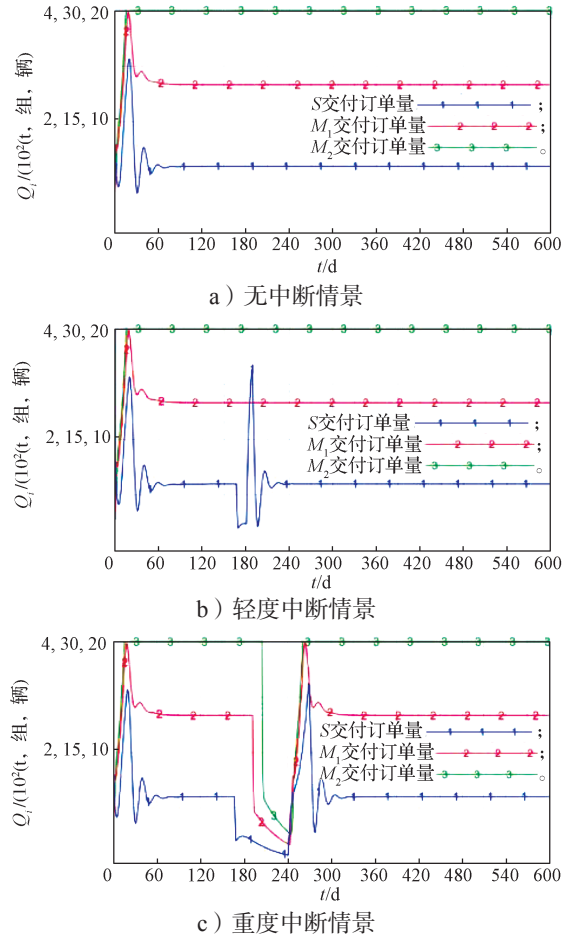


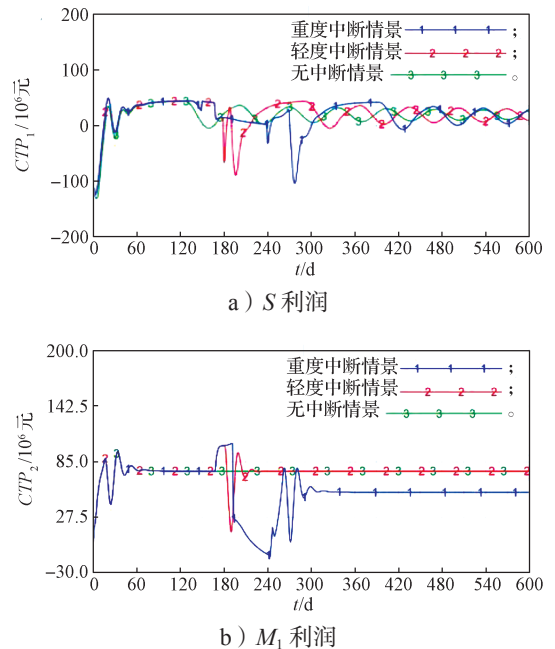
图 7 多主体交付订单量变化图

Fig. 7 Multi-agent delivery order volume change chart

4.4 供应链利润动态仿真分析

4.4.1 个体不同中断程度下利润变化状况

仿真所得个体不同中断程度下利润水平变化如图 8 所示。



b) M_1 利润

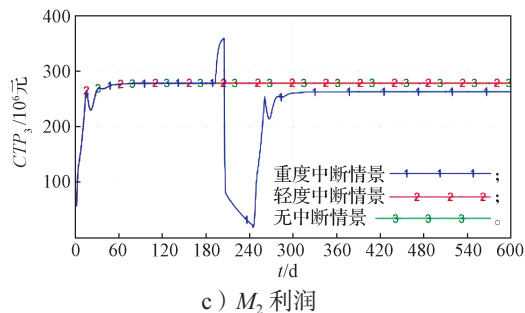


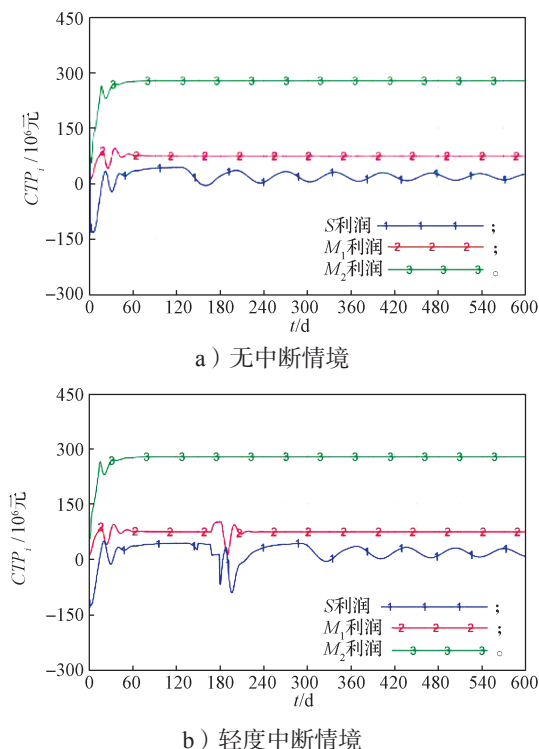
图 8 个体利润水平变化图

Fig. 8 Individual profit level change chart

图 8a 表明, S 轻度中断和重度中断的影响从第 168 d 开始体现, 利润水平迅速下降, 分别在结束后第 17 d 和第 39 d 开始恢复。图 8b 表明, 中断发生后, M_1 利润水平先小幅度上升, 这是由于此时 M_1 还没有出现明显缺货情形, 同时库存水平下降, 库存成本减小, 因而利润上升。利润短暂上升后, 中断影响开始体现, 轻度中断利润在中断后可以快速回弹至原本的水平; 重度中断结束后利润回弹所用时间更久, 并且无法恢复到初始水平。图 8c 表明, M_2 利润水平的变化趋势与 M_1 的相似。轻度中断发生时, M_2 有上游节点剩余库存补给, 发出的订单短时间内都可以得到满足; 但是中断时间较长时, 即重度中断情景下, 利润出现了短暂上升后在第 206 d 开始迅速下降, 且中断结束后也无法恢复至初始水平。

4.4.2 多主体不同中断程度下利润水平变化状况

仿真所得多主体不同中断程度下的利润水平变化见图 9。



b) 轻度中断情境

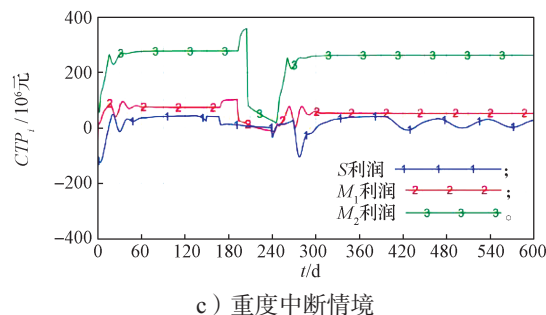


图 9 多主体利润水平变化图

Fig. 9 Multi-agent of profit level change chart

如图 9 所示, 轻度中断情境下, S 利润水平下降最为明显。但当中断时间较长时, 对供应链下游的企业利润水平影响反而更大。 M_2 作为新能源汽车生产商, 自己的产品属于整条供应链的完成品, 产品附加价值高, 带来高水平收入的同时, 对应的产品原材料成本、库存成本、缺货成本、运输成本都是供应链所有企业中最高的, 原材料长期中断, 面对市场需求量, 缺货成本持续上升, 且没有足够的成品汽车销售带来收入, 造成利润的大幅下降。

5 结论

本研究运用系统动力学方法, 将锂矿石原材料中断引入二级 SD 模型中, 根据中断的不同程度设置中断参数, 以供应链“库存”“交付订单量”“利润”为指标, 衡量中断对于新能源汽车动力电池供应链的动态影响, 研究结果表明:

1) 不同程度的中断发生都会对新能源汽车动力电池供应链产生极大的影响。距离中断环节最近的节点, 在“库存”“交付订单量”“利润”均会最先受到影响, 且影响时间更长。因此处于供应链上游、对外依存度较高的原材料头部生产企业需要密切关注海外资源国矿产政策的调整趋势; 面对近期的全球锂资源国有化、开采特权取消等问题, 积极开发其他地区项目, 例如加快马里、阿根廷等地的项目进度, 多元化化解原材料进口风险。

2) 当中断发生时间过长时, 供应链末端节点的“交付订单量”“利润”水平下降程度严重。供应链中断本身是一种低概率现象, 然而矿产资源受地缘政策、突发性自然灾害等影响, 导致中断可能性增加; 因此末端节点企业应合理设置安全库存, 提高供应链韧性。

3) 中断的发生会造成供应链下游企业利润水平初期反而出现上涨现象, 但在中断结束后长时间内都无法回到初始水平, 其他指标经过时间调控都可自行恢复。因此, 仅依靠中断恢复后正常的库存调控对提

高利润水平的作用不明显,此时中游电池生产企业可考虑提高锂矿利用率或技术替代研发,例如加大氢能电池研发以减轻中断影响;同时政府也可对企业的技术创新工作提供相关补贴,激励企业增加创新投入。

参考文献:

- [1] 王东阳,李芳,施可可.碳交易下考虑产品替代性的供应链减排决策研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(5):55-63.
WANG Dongyang, LI Fang, SHI Keke. Influence of Supply Chain Emission Reduction Strategy Considering Product Substitution Under Carbon Cap-and-Trade[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(5): 55-63.
- [2] SHAO L G, HU J Y, ZHANG H. Evolution of Global Lithium Competition Network Pattern and Its Influence Factors[J]. Resources Policy, 2021, 74: 102353.
- [3] AGUSDINATA D B, LIU W J, EAKIN H, et al. Socio-Environmental Impacts of Lithium Mineral Extraction: Towards a Research Agenda[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 123001.
- [4] 唐珏,王俊,储瑶,等.新能源发展战略下锂资源形势与对策[J].矿产综合利用,2023(6):71-76.
TANG Jue, WANG Jun, CHU Yao, et al. Lithium Resource Situation and Countermeasures Under New Energy Development Strategy[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2023(6): 71-76.
- [5] WANG N, GAO Y, HE J T, et al. Robustness Evaluation of the Air Cargo Network Considering Node Importance and Attack Cost[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 217: 108026.
- [6] HU X Q, WANG C, LIM M K, et al. Critical Systemic Risk Sources in Global Lithium-Ion Battery Supply Networks: Static and Dynamic Network Perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173: 113083.
- [7] KATSORAS E, GEORGIADIS P. An Integrated System Dynamics Model for Closed Loop Supply Chains Under Disaster Effects: The Case of COVID-19[J]. International Journal of Production Economics, 2022, 253: 108593.
- [8] 赖新峰,陈志祥,王鑫.全球生产网中断风险与动态惩罚机制分析:基于系统动力学视角[J].软科学,2022,36(7):125-135.
LAI Xinfeng, CHEN Zhixiang, WANG Xin. Disruption Risk Analysis of Global Production Network and Dynamic Penalty Mechanism: A System Dynamics Perspective Study[J]. Soft Science, 2022, 36(7): 125-135.
- [9] 卢志平,薛大卫.产能中断下汽车供应链牛鞭效应的系统动力学仿真[J].物流研究,2024(2):40-45.
LU Zhiping, XUE Dawei. System Dynamics Simulation of Bullwhip Effect in Automotive Supply Chain Under Capacity Disruption[J]. Logistics Research, 2024(2): 40-45.
- [10] 慕静,李婧.考虑疫情风险与双重时效性的生鲜品供应中断库存控制策略研究[J].运筹与管理,2023,32(1):108-115.
MU Jing, LI Jing. Research on Inventory Control Strategy of Fresh Products Supply Interruption Considering Epidemic Risk and Dual Timeliness[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(1): 108-115.
- [11] 张以彬,龙静,陈瑜.市场需求可变的供应链中断应急策略与运作仿真[J].系统管理学报,2019,28(6):1202-1210.
ZHANG Yibin, LONG Jing, CHEN Yu. Contingency Police and Operation Simulation of Supply Chain Disruption with Changing Demand[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(6): 1202-1210.
- [12] 王宇奇,曲云玉.环境扰动下进口原油供应链网络柔性的系统动力学仿真[J].系统管理学报,2019,28(5):983-990.
WANG Yuqi, QU Yunyu. System Dynamics Simulation of Imported Crude Oil Supply Chain Network Flexibility Under Environmental Disturbance[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(5): 983-990.
- [13] 赖新峰,王鑫,陈志祥.多式联运模式下跨国供应链运输中断风险系统动力学仿真与分析:以快消食品供应链为例[J].系统管理学报,2022,31(5):825-839.
LAI Xinfeng, WANG Xin, CHEN Zhixiang. System Dynamic-Based Risk Analysis of Transportation Disruption in Transnational Supply Chain in Different Multimodal Transportation Modes: A Case Study of FMCG Food Supply Chain[J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(5): 825-839.
- [14] 刘开迪,杨多贵,王光辉,等.基于系统动力学的生态文明建设政策模拟与仿真研究[J].中国管理科学,2020,28(8):209-220.
LIU Kaidi, YANG Duogui, WANG Guanghui, et al. Policy Modeling and Simulation on Ecological Civilization Construction in China Based on System Dynamics[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 209-220.

(责任编辑:廖友媛)