

Emergency Response for Sudden
Energy Shortages

突发性能源短缺的 应急响应研究

吕 涛 著



科学出版社

国家自然科学基金项目(71173218)资助成果

突发性能源短缺的 应急响应研究

吕 涛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以应急管理理论、供应链管理理论等为基础,做了能源应急管理研究的新尝试。全书分五篇,共12章,主要内容包括:突发性能源短缺的成因、演变过程及影响因素;能源应急过程中的行为主体及其博弈关系;能源应急中的成品油储备布局及跨区域应急调度;IEA成员国石油应急体系评价;完善中国能源应急体系的对策等。

本书可为政府部门、能源供应链企业建立能源应急体系提供借鉴,也可供从事能源经济管理、能源应急管理研究的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

突发性能源短缺的应急响应研究/吕涛著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-054919-8

I. ①突… II. ①吕… III. ①能源短缺-突发事件-应急对策-研究
IV. ①F407.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第253974号

责任编辑:李 雪 武 洲/责任校对:王萌萌

责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年10月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:220 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

1950 年以来,全球范围内发生 30 余次石油供应短缺突发事件,其成因包括政治军事冲突、自然灾害、石油设施故障等。这些突发事件对石油市场产生了严重冲击,导致石油供应短缺和石油市场的异常波动,进而影响到国民经济和人民生活的正常进行。为了应对这些突发性石油短缺,以国际能源署(International Energy Agency, IEA)成员国为代表的西方国家的能源应急体系,包括完善的应急法规体系、明晰的应急组织体系、有效的协同响应体系、庞大的应急储备体系等不断完善。能源消费特别是油气消费的持续增加,给中国的能源安全带来严峻挑战,2016 年中国石油对外依存度已达 65%,远超 50%的“国际警戒线”,天然气对外依存度也升至 34%,国际油气市场的风吹草动都会影响到国内能源供应安全。因此,中国能源应急体系建设迫在眉睫。

实际上,能源应急体系建设已经引起了我国政府的高度关注。例如,《能源法》征求意见稿指出:“国家建立能源应急制度,应对能源供应严重短缺、供应中断、价格剧烈波动以及其他能源应急事件”;2016 年 12 月国家发改委和能源局发布的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》特别指出:“增强战略储备和应急能力,制订应急预案、完善演练制度和应急调度机制,提高能源应急响应能力,有效减少能源中断带来的损失”。但是,总体上看我国突发性能源短缺的应急体系还不够完善,存在能源应急法律尚未建立、能源应急组织较为分散、能源应急储备体系建设滞后等问题。

基于以上背景,本书应用应急管理理论、供应链管理理论、利益相关者理论、案例分析、博弈分析、Petri 网建模、超网络建模、多目标优化、模糊评价等理论和方法,研究了突发性能源短缺的演化过程、应急主体协同、应急储备与调度、应急能力评价等问题,全书分五篇,共 12 章,主要包括:

(1) 研究现状与案例分析篇。分析了突发性能源短缺应急响应国内外研究现状和存在的问题,提出了本书的写作框架及主要内容;收集已经发生的国内外石油与煤炭短缺案例,分析了突发性能源短缺的成因、发生及响应过程。

(2) 应急主体及协同响应篇。构建了能源供应链企业和政府能源应急博弈模型,分析了两者的博弈行为策略;构建了中国与 IEA 石油应急合作的演化博弈模型,分析了双方石油应急合作的行为策略;分析了能源应急主体及其关联关系,选择具体案例测算了应急主体的协同熵和协同效率。

(3) 应急过程及建模仿真篇。提取了突发性石油短缺演化的动力因素,包括致

灾因子、承灾能力、孕灾环境和应急干预等,分析了突发性石油短缺的发生、发展、演变和终结过程;建立了突发性石油短缺演化过程模型,仿真分析了不同变迁情景下突发性石油短缺演化系统状态变化。

(4)应急储备与应急调度篇。对长三角地区 2020 年成品油需求进行了预测,分四种情境测算了储备规模,建立了长三角地区成品油储备布局优化模型,提出了储备布局方案;建立了成品油跨区域应急调度的超网络模型,仿真分析了应急目标选择、应急通道脆弱性、最大应急能力以及应急主体间的关联度等因素对应急成本、应急模式选择的影响。

(5)应急体系及应急能力篇。研究了 IEA 石油应急体系的演变和石油应急体系的层次结构;建立了石油应急能力评价指标体系,并对 IEA 主要成员国应急能力进行了评价;结合前面的研究,简要分析了中国能源(石油)应急体系的演变,提出了完善中国能源应急体系的对策。

能源应急总体上属于能源安全领域的研究,而能源安全领域的成果以能源安全预警与能源储备为主,对“能源不安全(能源短缺)”后的应急保障和应急响应的研究较少,特别是能源应急响应决策机制、能力评价、应对策略等相关理论与方法的研究较为欠缺。本书围绕“突发性能源短缺应急响应”这一主题,从应急主体及协同响应、演化过程及建模仿真、应急储备与应急调度、应急体系及应急能力等多角度加以研究,是能源应急管理研究的新尝试,为建立能源应急管理理论打下了较好的基础,对中国完善能源应急体系具有一定的参考和借鉴意义。但是,由于突发性能源短缺本身的复杂性,加之能源应急管理可参考的基础理论和方法文献、可用的数据和案例资料较为缺乏,本书一定还存在许多不足之处,请各位专家和读者批评指正。

本书得到了国家自然科学基金“突发性能源短缺应急响应的组织体系及‘情景-应对’策略研究”(71173218)和江苏省高校国际能源政策研究中心项目的资助,在此表示感谢。研究生刘晓燕、王政、王春玲、郭庆、富莉、冯磊等参与了本课题研究工作,在此一并感谢。本书写作过程中参阅了大量文献和数据资料,特别向这些文献的作者表示感谢。

吕 涛

2017 年 9 月

目 录

前言

第一篇 研究现状及案例分析

第 1 章 突发性能源短缺应急响应研究现状	3
1.1 国内外研究现状分析	3
1.2 本书主要内容	9
第 2 章 突发性能源短缺应急响应案例分析	10
2.1 石油短缺应急响应案例分析	10
2.2 煤炭短缺应急响应案例分析	15
2.3 本章小结	19

第二篇 应急主体及协同响应

第 3 章 能源应急主体演化博弈分析	23
3.1 模型构建	23
3.2 模型分析	26
3.3 本章小结	30
第 4 章 中国与 IEA 应急合作演化博弈分析	31
4.1 基本假设	31
4.2 演化博弈分析	32
4.3 数值模拟分析	36
4.4 本章小结	39
第 5 章 能源应急协同效率评价——以石油短缺为例	40
5.1 应急主体及其关联关系	40
5.2 应急协同效率计算	43
5.3 实例应用	45
5.4 本章小结	50

第三篇 应急过程及建模仿真

第 6 章 能源短缺应急过程分析——以石油应急为例	53
---------------------------	----

6.1	影响石油短缺应急过程演变因素	53
6.2	突发性石油短缺发生和演变过程	58
6.3	本章小结	61
第 7 章	能源短缺应急过程建模与仿真——以石油应急为例	62
7.1	Petri 网基本概念及建模步骤	62
7.2	基于 Petri 网的突发性石油短缺演化过程模型	63
7.3	突发性石油短缺演化过程模型案例仿真	69
7.4	本章小结	73
第四篇 应急储备与应急调度		
第 8 章	能源应急储备布局及优化——以长江三角洲成品油储备为例	77
8.1	储备基地选址与应急调运网络构建	78
8.2	储备布局优化方法与数据	80
8.3	储备布局优化结果分析	83
8.4	本章小结	87
第 9 章	能源短缺跨区域应急调度建模仿真——以成品油为例	89
9.1	影响因素分析及网络构建	89
9.2	跨区域成品油应急调度超网络模型	102
9.3	超网络模型的平衡状态及其求解过程	108
9.4	模型数值仿真	111
9.5	本章小结	132
第五篇 应急体系与应急能力		
第 10 章	能源应急体系演变——以 IEA 为例	137
10.1	IEA 石油应急体系的发展	137
10.2	石油应急体系的层次结构	140
10.3	本章小结	145
第 11 章	能源应急能力评价——以 IEA 成员国为例	146
11.1	应急能力评价文献回顾	146
11.2	石油应急能力评价指标体系	147
11.3	IEA 成员国石油应急能力评价	152
11.4	本章小结	157
第 12 章	完善中国能源应急体系的对策	158
12.1	加快能源应急立法, 建立能源应急储备	158

12.2 完善能源应急预案, 加强能源应急演练	160
12.3 建立能源预警机制, 加强应急信息发布	161
12.4 增强能源应急协同, 开展国际能源合作	161
参考文献	163
附录 1 距离参数	168
附录 2 时间参数	169
附录 3 一般预警情景的总优化结果	171

第一篇 研究现状及案例分析

第1章 突发性能源短缺应急响应研究现状

突发性能源短缺(sudden energy shortage)是一种由自然灾害等突发事件引起的能源(主要指煤炭、石油、天然气等一次能源)供应紧急状态^[1]。突发事件引发的能源生产停滞、能源运输中断、能源消费突增,都会引起突发性的能源短缺,导致能源市场的异常波动。例如,2005年8月的卡特里娜飓风导致墨西哥湾92%的原油和83%的天然气生产停滞;2008年初的中国南方雪灾导致煤炭运输中断,引发大范围煤炭能源短缺和煤炭价格的大幅波动;2008年6月的西澳天然气管道爆炸使得本地区1/3的天然气供应中断;2009年1月的俄乌天然气争端导致部分欧洲国家天然气供应中断;2009年底至2010年初的天气异常引发了中国大范围的天然气荒和煤荒;2010年底至2011年初的澳大利亚洪灾致使当地75%的煤矿停产,导致港口封航和煤炭运输中断,煤炭供应量大幅度减少;2011年的利比亚战争和2015年的也门战争也曾经引起一定程度的石油市场恐慌和供应紧张,等等。突发性能源短缺事件的频发,对国民经济和人民生活产生了严重影响,对国家能源应急体系提出了严峻挑战。

西方发达国家非常重视能源应急体系建设,普遍建立了能源供应应急机制,并收到了良好的效果^[2]。以美国为例,应对能源供应中断和短缺是各级能源主管部门的重要职责,政府赋予各级能源主管部门能源应急权力(energy emergency power),以做好能源应急计划、准备和响应,定期对能源应急体系加以评估和完善,各州针对突发性能源短缺都有较为完善的应急预案和应急组织^[3-5]。与这些国家相比,我国能源应急体系还相当薄弱,与能源消费大国和油气对外依存度不断提高的现实很不相称^[6]。国际能源专家、英国邓迪大学能源、石油与矿产法规研究中心主任安德鲁·斯皮德撰文指出:中国需要像关注气候变化和能源安全一样,关注能源抵御能力,以应对能源供应系统的突发事件^[7]。

1.1 国内外研究现状分析

1.1.1 国外研究现状分析

国外对突发性能源短缺应急问题的研究分为两个阶段:第一个阶段为20世纪70~80年代,关注的是国际石油供应中断及其应急响应问题;第二个阶段是2000年后,关注的是自然灾害等突发事件引起的突发性能源短缺应急问题。

20世纪70年代的石油禁运发生后,相关学者对突发性石油供应中断及其应

急响应进行了大量探讨,有代表性的研究包括:Sorensen 针对能源短缺突发事件,提出了一个能源应急的框架模型,包括评价应急事件的概况、供应/需求短缺情况、社会和经济影响、应急事件的特征和社会响应等^[8]; Lindsay 认为在经历第一次石油危机后,美国的能源应急能力并没有提高,应该通过政府和合作,建立更加广泛的能源应急准备体系,才能从容应对下一次能源供应中断,否则会重蹈 1973 年石油危机的覆辙,给美国经济带来严重损害^[9]; Ginn 分析了各州政府针对能源应急准备的立法情况,分析了州政府在能源应急中的权力,提出了关于能源应急立法的发展方向^[10]; Hubbard 认为石油市场国际化程度较高,石油应急应该加强国际合作,并制定相应的政策^[11]。与此同时,战略石油储备也成为研究热点^[12~14]。

在这一时期,许多西方国家制定了能源或石油应急法规,石油供应应急体系不断完善。特别是 1974 年成立的国际能源署的首要任务就是“保持和完善石油供应中断的应急系统”,在建立石油供应应急体系方面做了大量工作,包括:组织专门会议探讨石油应急响应问题,对成员国甚至是非成员国进行石油应急培训;定期从应急机构与政策、应急储备、需求限制、储备动用、能源替代、数据收集等方面对成员国的应急能力加以评估;要求成员国建立能源应急共享组织,促进石油应急的国际合作;提出了一整套石油供应应急响应措施(图 1.1);等等^[15~17]。

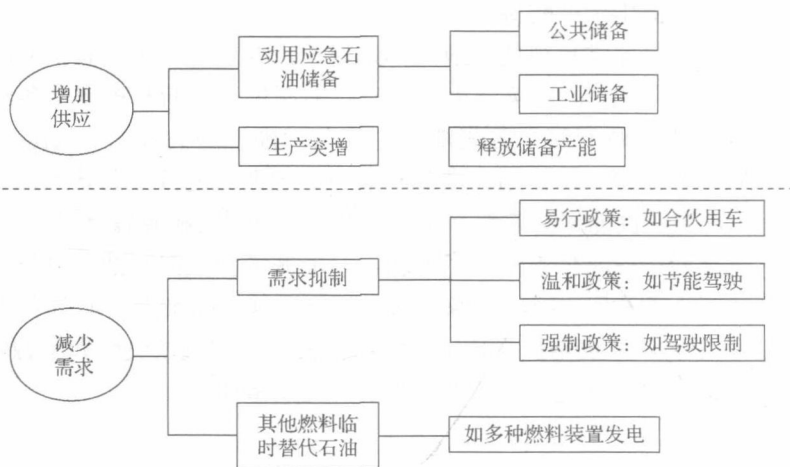


图 1.1 国际能源署提出的石油应急响应措施

在 20 世纪 80 年代末至 90 年代末的十余年中,能源应急问题的研究较少,没有成为能源经济与管理的主题。直到 2000 年后,由于遭遇了美国 2003 年东北地区大停电、2005 年和 2008 年飓风对石油供应的冲击导致南方各州大范围石油供应中断等突发性能源短缺事件,建立能源应急体系又一次引起了西方各国政府和学者的重视。

“*Energy Bulletin*” 分别于 2008 年 1 月、2009 年 1 月、2010 年 11 月和 12 月刊登了 5 篇文献,概述了发达国家应对石油短缺的应急体系研究和实践动态。Rick 等认为,随着能源设施的老化以及威胁能源系统运行的突发事件的频发,关于能源应急问题的研究会越发得到重视;同时指出,能源应急体系涉及的利益主体众多,应急响应需要各级政府的配合,涉及的管理层次多、管理难度大,能源应急管理重点在地方当局,要授予他们作出及时响应的优先权^[18-22]。Lappalainen 从能源安全的角度对欧盟天然气和电力的应急响应措施进行了评价与分析,并建议欧盟采取更多样化的应急供应策略并加强这方面的立法^[1]。Farrell 等从突发事件带来的能源基础设施受损出发,分析了突发事件发生时石油、天然气、电力、煤炭、核电、水电供应系统的抗损能力,提出通过关键能源基础设施保护来保障突发事件下的能源安全^[23]。

近年来,美国政府发布了大量关于能源应急体系建设的政策文件和研究报告,有代表性的包括:①2008 年 1 月,在《国家应急响应框架》下,联邦政府出台了应急响应的《能源支持功能》附件,明确了联邦政府层面的能源应急响应组织体系及责任分担,提出了突发性能源短缺的事前、事中、事后应急策略^[24];②2004 年、2005 年和 2009 年,美国国家州级能源官员协会先后三次发布《州能源保障指南》,指出能源保障的重点在于能源应急体系建设(针对事件的响应)和关键能源基础设施保护(减少事件发生的风险),为州政府建立能源应急组织、开展能源应急响应提供了行动指南^[25];③2010 年 9 月美国能源部和国土安全部共同发布的《能源部门基础设施保护计划》研究报告和 2011 年 1 月能源部发布的《能源传输系统安全路线图》研究报告,重点从能源基础设施保护角度,探讨了如何减少突发性能源短缺事件的发生概率及其加快发生后的恢复重建^[26, 27]。综观美国近几年能源应急体系建设的研究和实践,具有以下突出特点。

1) 加大能源应急体系建设的投资

2009 年 1 月公布的《2009 美国复苏与再投资法案》中用于“电力输送与能源可靠性”的投资达 45 亿美元,投资的重点方向有能源基础设施安全性和可靠性、电网现代化、能源储备研究与实践、能源基础设施修复等^[28]。2009 年 8 月,能源部从这一投资中拿出 3800 万美元分配给 48 个州的能源办公室,实施一个为期 3 年的计划,用于增强能源应急准备和响应能力。2010 年 2 月,美国能源部长朱棣文宣布为覆盖 25 个州的 43 个地方城市和城镇提供 800 万美元的支持,以帮助这些地区建立有效的应对能源短缺的应急体系^[29]。

2) 建构和完善能源应急组织体系

目前,美国能源部规定能源应急准备和响应是各级政府的共同责任,纵向多级、横向协调的能源应急组织体系已基本建立。例如,联邦政府层面的能源应急

响应以能源部为核心,支持部门包括农业部、交通运输部、商务部、环境保护署、国土安全部、国防部等;州政府层面的能源应急响应(图 1.2)受州长直接领导,以州能源办公室、州应急管理部门为核心,支持部门包括其他相关部门、联邦政府、其他州政府、地方政府等。在《能源支持功能》《州能源保障指南》政策文件中,还详细规定了各应急主体的责任和义务^[24, 25]。

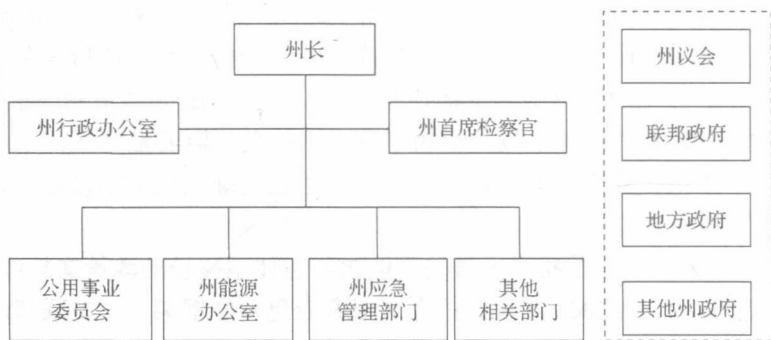


图 1.2 州政府层面的能源应急组织

3) 重视应急响应的基础能力建设

除了完善应急储备体系以外,美国能源部电力传输与能源可靠性办公室还在能源部网站设置了应急准备(emergency preparedness)和应急响应(emergency response)专栏,在提升能源应急响应的基础能力方面做了大量工作,包括:①发布能源保障日报(*Energy Assurance Daily*),为相关企业和公众提供能源系统运行信息;②发布能源应急动态报告(*Emergency Situation Reports*),以便利利益相关者及时作出合理决策;③发布州和地方政府能源应急准备和响应体系建设动态报告,为州和地方政府建设能源应急准备和响应体系提供培训、指导和资金支持;④发布能源应急案例分析报告,为相关政府和企业提供能源应急响应经验^[30, 31]。

与此同时,英国、加拿大等国家也加快了能源应急体系建设。例如,英国 2010 年 4 月公布了新的《国家天然气和电力应急预案》^[32];加拿大 2010 年 12 月出台了新的《能源供应应急法案》,并发布了《加拿大关键能源基础设施保护》报告等^[33, 34]。

1.1.2 国内研究现状分析

世界范围内自然灾害等突发事件的增多趋势,使得应急管理成为一个重要而热门的研究领域。我国在经历了“SARS”、矿难、洪水、雪灾、地震等自然灾害和突发事件后,应急管理研究受到了高度重视。2009 年国家自然科学基金委员会专门设立“非常规突发事件应急管理研究”重大研究计划项目,国家社会科学基金近年来也资助了多项重大招标项目,用于应急管理基础理论和应用对策研究,

清华大学、中国科学院等还专门成立了应急管理研究机构。在这种背景下,我国的应急管理研究发展很快,在应急管理理论、方法与实践、应急选址与调度、应急体系与预案编制等方面,取得了系统性研究成果。与此同时,突发事件等应急状态下的生产和生活物质保障得到重视,粮食、药品等生活必需品的应急体系相继建立。

近年来,我国政府也开始高度关注能源应急问题。例如,2007年12月公布的《能源法》征求意见稿指出:“国家建立能源应急制度,应对能源供应严重短缺、供应中断、价格剧烈波动以及其他能源应急事件”,由此可见,能源短缺或供应中断(会导致能源短缺)是能源应急的首要问题;2007年4月,“建立应急体系,提高安全保障”作为实现能源“十一五”目标的保障措施被列入《能源发展“十一五”规划》;2010年4月召开的国家能源委员会第一次会议、2009年12月和2011年1月召开的全国能源工作会议,都将加强能源预测预警、完善能源安全应急预案、增强能源应急保障能力、加快油气储备体系建设作为能源工作重点等。

与此同时,能源应急问题引起了国内学者的关注。例如,董秀成分析了2010年10月我国“柴油荒”的原因,指出应急储备体系才是治本之策^[35]。廖建凯在分析日本能源储备与应急法律制度基础上,认为能源储备是石油应急的一个组成部分,合理的能源储备和高效的石油应急机制是应对突发性能源短缺的最有效措施,是能源供应的安全阀,中国应该借鉴日本经验,在规范性文件、应急机构和参与主体、应对措施三方面完善石油应急制度^[36,37]。杨敏英概述了IEA各成员国对石油应急重要性的认识,介绍了石油应急对策体系的主要内容及其实施策略^[38,39]。钟宪章回顾了美国在1973年阿拉伯国家石油禁运后采取的石油应急对策,认为其应急对策对于保障能源安全功不可没,对中国具有“非同一般”的借鉴意义^[40]。刘恩东^[41,42]、冯春艳^[2]、罗晓云^[43]、金三林和米建国^[44]、李昕^[45]指出西方国家的石油应急机制已经比较成熟和完善,并日益系统化、规范化、制度化,突出特点包括将石油应急纳入国家安全战略、全面完善的石油供应应急法规体系、高效运转的石油应急组织机构、反应迅速安全有效的应急系统、规模庞大的石油储备体系。吕涛通过介绍西方国家石油应急的经验,分析了我国能源应急体系的不足并从五个方面提出了我国能源应急体系的建设构想^[46]。黄宏纯和陆崇芳指出了当前中国国家石油储备应急动用机制建设现状及存在问题,提出了构建与完善中国国家石油储备应急动用机制的建议^[47]。

在突发性能源短缺应急策略方面,秦新丽和吕涛依据国外应对突发性能源短缺应急事件的经验,提出了构建突发性能源短缺应急能力评价模型^[48]。吴刚和魏一鸣介绍了美国战略石油储备释放和补仓策略,同时基于动态规划模型模拟我国不同突发事件情景战略石油储备应对策略^[49,50]。刘晓燕和吕涛基于广义随机 Petri

网对能源突发事件应急管理流程进行建模,通过案例对能源短缺应急管理流程进行了仿真分析^[51]。朱维娜从协同学角度分析突发性石油短缺应急主体及影响因素之间关系,并对应急响应流程进行建模分析^[52]。刘晓燕和吕涛构建了突发性能源短缺应急主体的博弈模型,研究政府和能源供应链企业两个主体之间的博弈关系^[53]。李银涯通过对我国的石油需求地和需求以及战略石油储备的释放能力进行评估,基于最小费用最大流理论,建立了战略石油储备的调度优化模型^[54]。郭杰等结合 Markov 预测法、三角模糊数和改进型 TOPSIS 法,构建了应对突发性天然气供应中断的动态多目标应急决策模型,并以某区域天然气供应中断为例,对该模型进行了验证^[55]。

1.1.3 简要的评述及研究趋势

从上面的分析可以看出:

(1) 自然灾害等突发事件引发的突发性能源短缺引起了世界各国的普遍关注,美国还将能源应急纳入国家安全战略,在能源应急立法、能源应急投资、能源应急储备、能源应急组织、能源应急基础能力等方面做了大量工作。而国内关于能源应急问题的研究和实践明显滞后。

(2) 从国内相关研究来看,突发性能源短缺作为一类能源供应突发事件,在应急管理领域没有得到重视,能源安全领域重点研究保障能源安全的评价、预警及其战略、政策、措施,对“能源不安全(能源短缺)”后的应急保障和应急响应关注较少,部分相关研究以介绍国外经验为主,结合中国能源发展现状、能源管理体制和应急管理体制,研究能源应急主体及其相互关系、能源应急策略与应急调度的较少。

(3) Jacob 和 Hellström 的研究表明,对突发事件发生和演化机理的认知会极大地影响其处理和效率^[56],但是当前国内外关于突发性能源短缺发生发展过程和演变规律的研究较少,不利于形成科学高效的突发性能源短缺应急管理模式。在能源应急过程中,“响应不足”与“响应过度”并存,影响了应急响应效率,增加了应急响应成本。

为此,下一步需要深入探讨的问题包括:①探索突发性能源短缺的形成与演化机理,分析其发生、发展过程和演变规律,为构建科学高效的突发性能源短缺应急管理模式打下基础。②界定突发性能源短缺应急响应的相关主体,分析各应急主体的角色及其相互链接关系,为构建科学的应急响应组织体系提供依据。③根据能源应急活动的基本内容,建立能源应急能力评价模型,找出能源应急体系建设中的薄弱环节,为完善能源应急体系提供依据。④鉴于应急调运在应对能源短缺、促进能源市场恢复中的核心地位,根据能源供应链特点建立能源应急调度优化模型,尤其突出跨区域联动在能源应急调度中的作用。

1.2 本书主要内容

本书分五篇，共12章，具体研究内容和方法为：

1. 研究现状及案例分析篇

分析了突发性能源短缺应急响应国内外研究现状和存在的问题，介绍了本书的写作框架及主要内容；收集已经发生的国内外石油与煤炭短缺案例，分析了突发性能源短缺的成因、发生及响应过程。

2. 应急主体及协同响应篇

首先利用演化博弈理论，对能源供应链企业和政府两个应急主体在突发性能源短缺应急过程中的博弈行为策略进行了研究，构建了中国与IEA石油应急合作的演化博弈模型，分析双方石油应急合作的行为策略；应用社会网络分析方法，分析了应急主体及其关联关系，测算了应急主体的协同熵和协同效率。

3. 应急过程及建模仿真篇

首先结合案例，提取了突发性石油短缺演化的动力因素，包括致灾因子、承载体、孕灾环境和应急干预等，分析了突发性石油短缺的发生、发展、演变和终结过程；利用Petri网建模方法，建立了突发性石油短缺演化过程模型，结合案例，仿真分析了不同变迁情景下突发性石油短缺演化系统状态变化。

4. 应急储备与应急调度篇

首先利用灰色预测方法，对长三角地区2020年成品油需求进行了预测，分一般预警、较重预警、严重预警、特别严重预警四种情境测算了储备规模，利用多目标优化模型建立了长三角地区成品油储备布局优化模型，提出了储备布局方案；利用超网络模型，建立了成品油跨区域应急调度模型，仿真分析了应急目标选择、应急通道脆弱性、最大应急能力，以及应急主体间的关联度等因素对应急成本、应急模式选择的影响。

5. 应急体系与应急能力篇

利用案例分析方法和解释结构建模方法，研究了IEA石油应急体系的演变和石油应急体系的层次结构；利用基于熵权法的模糊综合评价方法，建立了石油应急能力评价指标体系，并对IEA主要成员国应急能力进行了评价；结合前面的研究，分析了中国能源应急体系的演变，提出了完善中国能源应急体系的对策。