

王德鲁◎著

煤炭城市产业生态系统 响应经济波动的脆弱性与恢复力研究

MEITAN CHENGSHI CHANYE SHENGTAI XITONG
XIANGYING JINGJI BODONG DE CUIRUOXING YU HUIFULI YANJIU

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

项目(71573252)资助

14GXQ4D182)资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013RC21)资助

煤炭城市产业生态系统响应 经济波动的脆弱性与恢复力研究

王德鲁 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

在世界经济深度调整和能源价格剧烈波动的现实背景下,产业生态系统的脆弱性问题已经成为煤炭城市可持续发展的桎梏。本书重点以中国煤化工产业生态系统为对象,基于多学科研究方法、视角的交叉和多源数据、知识的融合,系统探讨了经济波动条件下煤炭城市产业生态系统的脆弱性机理、综合评价模型、恢复力影响因素和提升策略等问题。相关成果将为煤炭城市产业生态系统的适应性管理提供新的理论依据和决策参考。

本书可供可持续发展管理、能源经济与管理、循环经济等相关领域的研究人员,以及政府有关部门的决策人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤炭城市产业生态系统响应经济波动的脆弱性与恢复力研究/王德鲁著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017. 12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3368 - 4

I. ①煤… II. ①王… III. ①煤炭工业—工业城市—工业生态系统—经济波动—研究—中国 IV. ①F299.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 304260 号

书 名 煤炭城市产业生态系统响应经济波动的脆弱性与恢复力研究

著 者 王德鲁

责任编辑 马晓彦

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 17 字数 324 千字

版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价 52.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

传统的煤炭矿区产业系统资源流路径为“煤炭资源—煤炭开采部门—煤炭供应部门—生产部门—运输部门—消费群体—自然环境”。这种单向的线性生产模式导致煤炭矿区生态危机日趋严重,并带来了诸多难以回避的社会问题。在大力推进生态文明建设的背景下,“资源—产品—再生资源”的工业代谢模式已然成为矿区绿色、低碳和集约化发展的基本范式,并受到学者们的广泛关注。目前,欧盟有关产业生态化发展的政策已成为经济与环境政策的重要组成部分。中国政府更是前所未有地高度重视生态现代化、绿色增长和低碳发展,并将发展循环经济提升到国家生态安全战略层面。在各级政府部门的引导、干预甚至主导下,我国众多煤炭城市纷纷采取建设循环经济园区等方式,试图通过外力嵌入形成产业生态系统。然而,煤炭城市产业生态系统(CCIES)独特的产业链接属性和成长环境使其相较于一般的生态工业园区和产业集群而言,在内部结构、技术构成和外部影响因素等方面存在更为苛刻的稳定边界条件,导致 CCIES 的脆弱性问题日益突出,并成为煤炭城市可持续发展的桎梏。当前,神木煤化工、阳泉煤化工、克什克腾煤化工、朔州煤电建、蒙西煤电灰铝建等众多 CCIES 陷入困境甚至部分濒临瓦解的一个重要原因即在于此。因此,亟须开展 CCIES 响应外部扰动的脆弱性机理、评估方法与降低策略研究。

根据脆弱性理论,CCIES 并非对任何一种扰动都是脆弱的,而且面对不同的扰动会表现出不同的脆弱性,因而 CCIES 脆弱性总是与施加在系统上的特定扰动密切相关。构成 CCIES 的煤炭、电力、化工、建材等主要产业均为国民经济的基础性产业。MSCI 指数波动情况表明,相较于一般轻加工产业,这类行业对经济波动更加敏感且受到的影响更为巨大,因此在影响 CCIES 健康发展的众多扰动因素中,宏观经济的波动起伏表现得尤为突出。当前,我国发展面临的机遇前所未有,面临的风险和挑战也前所未有。从国际形势看,金融危机后全球经济增长动力和模式已经发生变化,潜在经济增速放缓而新的经济增长点尚未形成,经济进入寻找“再平衡”阶段;为了适应危机后的新形势,全球价值链已经进入新的深度调整和空间重塑周期。从国内形势看,中国经济增速的逐步放缓将多年来高速增长下掩盖的许多问题,诸如产能过剩、环境超载、产业结构失衡、房地产

泡沫等逐一暴露,随着经济风险的不断积聚,中国经济正面临多重危机。可以预见,在未来一定时期内,中国经济整体上仍将处于较大程度的动荡之中。这种形势下,在一个总体繁荣向上的经济周期大背景下形成的 CCIES 及其治理机制,第一次受到了与过去截然不同的新经济形势的严峻挑战。学术界、企业界和政府相关部门应进一步思考,CCIES 的规划、运行和调控机制如何随着经济环境的演变而不断调整和改进,从而更好地适应新的发展需要。

基于以上认识,本书旨在针对我国 CCIES 的特殊性和当前宏观经济波动带来的严峻挑战,遵循区域复合系统脆弱性与恢复力研究的发展趋势,以拓扑结构复杂、发展形势严峻且为数众多的煤化工产业生态系统为重点研究对象,着重探讨经济波动情境下的 CCIES 脆弱性机理、综合评价方法与恢复力提升策略。本书主要研究内容包括:第一,运用复杂性理论与方法研究经济波动下 CCIES 脆弱性形成与演化机理,阐明了能源价格冲击和市场需求波动对不同类型 CCIES 脆弱性的驱动机制;第二,针对系统中蕴含的要素耦合关系、不确定因素和信息不完备性,运用集成化的最优数据挖掘方法构建了 CCIES 脆弱性综合评价模型,并对我国 33 个典型 CCIES 进行了实证评价与分级分类;第三,基于理论分析、问卷调查,运用决策实验室法、解释结构建模法等方法,从系统—产业—企业—政府四个层面,研究揭示了 CCIES 恢复力的关键影响因素与跃迁机制;第四,采用系统动力学方法,研究开发了 CCIES 恢复力建设的情景仿真动力学模型,并通过模拟仿真揭示了不同调控政策的有效性以及各政策的最优实施顺序。这些成果不仅对于推动 CCIES 治理理论的完善和发展具有积极意义,而且有助于增强 CCIES 对当前和未来风险的抵御能力,并将为之后的 CCIES 规划和调控指明方向。

本书得到了国家自然科学基金面上项目(71573252)、国家软科学研究计划(2014GXQ4D182)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013RC21)的联合资助。本书引用了许多专家学者的研究成果,书中虽已标注和说明,但难免挂一漏万,敬请谅解!囿于作者水平,书中难免有不足之处,衷心期望得到学界同仁及读者的批评指正!

作者

2017 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展述评	3
1.3 研究意义	8
1.4 概念界定	8
1.5 主要内容	10
1.6 研究方案	12
1.7 特色与创新	15
本章参考文献	16
2 我国典型煤炭城市煤化工产业生态系统案例分析	21
2.1 鄂尔多斯市煤化工产业生态系统分析	21
2.2 六盘水市煤化工产业生态系统分析	40
2.3 榆林市煤化工产业生态系统分析	54
2.4 淮南市煤化工产业生态系统分析	69
本章参考文献	84
3 煤炭城市产业生态系统响应经济波动的脆弱性机理	85
3.1 经济波动与 CCIES 结构特征耦合作用过程与机制	85
3.2 经济波动下 CCIES 网络特征及脆弱性演化	96
3.3 模型构建与仿真结果分析	105
3.4 结论与对策建议	123
本章参考文献	125
4 煤炭城市响应宏观经济波动的脆弱性综合评价	131
4.1 CCIES 响应宏观经济波动的脆弱性评价指标体系构建	131
4.2 基于 RS-TOPSIS-RSR 的 CCIES 脆弱性评估模型	137

4.3 我国典型 CCIES 脆弱性评价	141
4.4 讨论	145
4.5 主要结论	152
4.6 附录	153
本章参考文献	165
5 经济波动下煤炭城市恢复力影响因素及其形成机制	168
5.1 CCIES 恢复力影响因素辨识	168
5.2 CCIES 恢复力影响因素矩阵数值分析	173
5.3 CCIES 恢复力影响因素结构解析	183
5.4 CCIES 恢复力形成机制	186
5.5 案例研究	198
5.6 主要结论	203
5.7 附录	204
本章参考文献	223
6 经济波动下煤炭城市产业生态系统的恢复力建设	227
6.1 宏观经济波动分析	227
6.2 CCIES 应对经济波动冲击的系统动力学模型构建	229
6.3 经济波动与调控政策情景设计	236
6.4 仿真结果与分析	242
6.5 讨论	248
6.6 结论与对策建议	254
6.7 附录	256
本章参考文献	262

1 绪 论

1.1 研究背景

长期以来,煤炭工业在为经济发展作出巨大贡献的同时,其“资源—产品—废弃物排放”的单向线性生产模式也导致矿区生态危机日趋严重,并带来诸多难以回避的社会问题。在大力推进生态文明建设的背景下,“资源—产品—再生资源”的工业代谢模式已然成为矿区绿色、低碳和集约化发展的基本范式,并受到学者们的广泛关注。事实上,工业企业关注的焦点大都集中于核心业务领域,无法保证污染预防、控制等价值链上的次要活动获得充足资源,而通过产业共生网络整合环境治理资源,能够有效缓解企业环境治理能力的有限性和治理资源的稀缺性,这为产业集约化发展提供了最佳途径^[1]。目前,联合国工业发展组织和环境规划署已在全球极力倡导并推广区域生态化发展战略;中国政府更是前所未有地高度重视生态现代化、绿色增长和低碳发展,并将发展循环经济提升到国家生态安全战略层面^[2]。在各级政府部门的引导、干预甚至主导下,众多煤炭城市纷纷采取建设循环经济园区等方式,试图通过外力嵌入形成产业生态系统。

然而,煤炭城市产业生态系统(CCIES)独特的产业链接属性和成长环境使其相较于一般的工业园区和企业集群而言,在内部结构、技术构成和外部影响因素等方面存在更为苛刻的稳定边界条件,导致 CCIES 的脆弱性问题日益突出,并成为地区经济可持续发展的桎梏。在 CCIES 的规划、形成和发展过程中,旨在创造聚集优势的“地理邻近性”和“组织邻近性”往往诱使企业锁定于某一特定资源和某一行动而使 CCIES 成为“封闭系统”,内部废料有偿交换的市场弹性也日益变为一种技术刚性;由于内在结构的固有缺陷和地方政府的过度干预,这类矿区的定位和作用已经被无形地限定在煤炭资源的转换利用等能源产业基地的框架内,严重降低了 CCIES 内生态经济联系的多样性。所有这些无不制约了 CCIES 响应外部冲击的自适应能力,一个看似微弱的外部扰动都可能会触发节点企业经营行为的改变,导致 CCIES 的大范围调整甚至系统崩溃的连锁效应。

当前,兖州煤化工、神木煤化工、阳泉煤化工、克什克腾煤化工、朔州煤电建、蒙西煤电灰铝建等众多 CCIES 趋于衰退甚至部分濒临瓦解的一个重要原因即在于此。因此,亟须开展 CCIES 响应外部扰动的脆弱性机理、评估方法与降低策略研究。

目前,国内外学者围绕 CCIES 的构建、演化机理、资源代谢、效率评价、调控策略等方面进行了诸多探索,并取得一系列重要成果^[3-9],但针对 CCIES 脆弱性与恢复力方面的研究仍十分薄弱。构成 CCIES 的煤炭、电力、化工、建材等主要产业均为国民经济的基础性产业,MSCI 指数波动情况表明,相较于一般轻加工产业,这类行业对经济波动更加敏感且受到的影响更为巨大,因此在影响 CCIES 健康发展的众多扰动因素中,宏观经济的波动起伏表现得尤为突出。当前,我国发展面临的机遇前所未有,面临的风险和挑战也前所未有。从国际形势看,金融危机后全球经济增长动力和模式已经发生变化,潜在经济增速放缓而新的经济增长点尚未形成,经济进入寻找“再平衡”的阶段;为了适应危机后的新形势,全球价值链已经进入新的深度调整和空间重塑周期。从国内形势看,中国经济增速的逐步放缓将多年来高速增长下掩盖的许多问题,诸如产能过剩、环境超载、产业结构失衡、房地产泡沫等问题逐一暴露,随着经济风险的不断积聚,中国经济正面临多重危机(国务院政府工作报告,2015)。可以预见,在未来一定时期内中国经济整体上仍将处于较大程度的动荡之中,能源价格(煤炭、石油价格等)、市场需求(电力、钢铁、水泥、化工等行业)的持续波动以及政府政策(资源税费政策、能源环境政策、产业政策等)、产业技术(绿色开采技术、输变电技术、煤化工技术等)的调整与变革难以避免,这必然会进一步加剧 CCIES 的脆弱性问题。这种形势下,在一个总体繁荣向上的经济周期大背景下形成的 CCIES 及其治理机制,第一次受到了与过去截然不同的新经济形势的严峻挑战。学术界、企业界和政府相关部门应进一步思考,CCIES 的规划、运行和调控机制如何随着经济环境的演变而不断调整和改进,从而更好地适应新的发展需要。

综上所述,我国 CCIES 大都是在地方政府的干预甚至是主导下形成的,其自调节、自增强和自适应能力明显不足,对外部扰动缺乏必要、成熟的应对机制,而这恰恰也是当前 CCIES 研究的薄弱环节。因此,在全球经济深度调整的大背景下,深入开展 CCIES 响应经济波动的脆弱性机理、综合评价与恢复力提升策略研究,具有重要的理论价值和突出的现实意义。

1.2 国内外研究进展述评

1935 年植物学家 Tensley 提出的生态系统的概念和 1989 年物理学家 Frosch 提出的产业生态学的概念,为产业生态系统(IES)的管理和发展奠定了理论基础。IES 是指在一定时间和空间范围内由产业群体及其支撑环境构成的一个具有自组织和自调节功能的复合体^[10]。目前 IES 已经引起国内外学者的广泛关注,并成为循环经济和可持续发展领域的前沿问题之一^[11]。通过文献收集、梳理和分析发现,现有论著在国家、区域、城市、工业园、行业和企业等尺度上,运用能值理论与能值分析法、生命周期理论、博弈论、数理统计、系统动力学法、复杂网络理论等理论与方法,围绕 IES 的构建与运行机理^[12,13]、资源代谢机制^[14,15]、生态效率评价^[2,16,17]、稳定性影响因素^[18,19]、优化与调控策略^[20,21]等问题开展了广泛而富有成效的研究,为区域和产业资源的生态化管理提供了重要的理论依据和决策参考。目前,针对经济波动情境下的 IES 尤其是 CCIES 脆弱性与恢复力方面的研究仍十分匮乏,但在人地系统领域面向全球变化的生态系统、社会系统、社会-生态系统的脆弱性与恢复力研究却取得了一定进展,所形成的分析框架和研究方法对本研究开展具有重要的借鉴意义。因此,下面将适当扩大文献检索范围,对类似问题的研究现状和发展趋势进行分析。

1.2.1 脆弱性研究述评

1. 脆弱性研究的演进与基本内涵

“脆弱性”这一概念起源于 20 世纪 60 年代对自然灾害的研究^[22],是指系统对内外扰动的敏感性以及缺乏应对能力从而使系统结构和功能容易退化的一种属性。作为可持续性科学领域的一种新的研究视角和分析工具,脆弱性研究凭借其独特的理论与方法论价值,目前已被应用到区域灾害管理、生态学、土地利用、工程学、经济学、可持续生计等领域。其中,生态环境、气候变化、自然灾害等自然科学领域一直在脆弱性研究中占据主导地位,但随着 IHDP、IGBP、IPCC 等国际性科学计划和研究机构越来越强调人类社会对全球变化的响应与适应问题^[23],人文系统、人-环境系统,尤其是社会-经济-自然复合生态系统脆弱性的研究已经成为新的发展趋势^[24]。近年来,随着全球变化研究领域的国际学术交流日益频繁,脆弱性研究的理论价值及学科意义逐渐被国内学者所关注。但从已发表的研究成果来看,仍主要集中在生态环境脆弱性、灾害脆弱性等方面,并在生态环境脆弱性评估^[25]、脆弱生态环境类型区划^[26]、灾害脆弱性机理^[27]等方面进展较快,也有一些学者开始关注资源枯竭、市场化转型、社会变革、快速城市

化、制度变迁、技术创新等背景下的企业群落脆弱性^[20]、社会脆弱性^[28]、贫困脆弱性^[29,30]和经济脆弱性问题^[31,32]。

从不同领域研究的侧重点来看,自然科学认为施加在系统上的扰动特点与扰动频率、系统对扰动的暴露程度与敏感性等是系统脆弱性的决定因素,研究集中在水资源系统、农业系统、林业系统、渔业系统、海岸带、城市交通系统对气候变化、灾害等外部扰动的不利响应。人文科学认为人类系统的脆弱性是独立于外部扰动而源自内部特征的一种内在属性,关注于识别社会中的最脆弱群体,侧重于探讨导致人类社会容易受到损害的政治、制度、经济和文化因素及其恢复力重建的人文机制。社会-生态系统脆弱性研究则强调综合集成自然科学、社会科学和人文科学的研究方法来解释自然、社会及工程系统之间的相互作用,将暴露、敏感性、恢复力等要素纳入脆弱性分析框架中,并在脆弱系统因果关系过程识别和属性解释、脆弱性空间制图、综合评价等方面开展了诸多探索^[23]。可以预见,随着脆弱性研究越来越关注自然系统与人类系统之间复杂的作用关系,其未来的发展越来越取决于多学科研究方法、研究视角的交叉及多源数据、多学科知识的融合。但目前已有的多数脆弱性研究在理论上仍属于多学科而不是跨学科的工作^[33],未来研究应进一步纳入管理学、经济学等学科,实现学科的实质性交叉与融合,推动人地系统领域内脆弱性研究的完善和发展。

2. 脆弱性分析框架

伴随着脆弱性应用领域的拓展,涌现出众多探讨脆弱性成因及其影响因素相互作用关系的分析框架,如早期的风险-灾害模型与压力-状态-响应模型^[34]、双重结构的脆弱性分析框架^[35]、SUST 脆弱性分析框架等^[36]。从脆弱性分析框架的发展演变来看,大致经历了从面向单一扰动的脆弱性分析发展到多重相互作用扰动背景下的脆弱性分析,由静态的、单向的脆弱性分析转向动态的、多反馈的脆弱性分析,要素拓展和学科综合化的演化特征明显。由于针对脆弱性评价的整合类研究强调了扰动的多重性与多尺度性,突出了脆弱性产生的内因机制、地方特性及其跨尺度的转移传递过程,对于探讨区域产业生态系统相互作用机理具有重要的借鉴意义,因而逐渐被各国学者重视。本研究将借鉴 Polsky^[37]提出的 VSD 整合模型来组织数据、统一概念和建构 CCIES 脆弱性评价指标体系,原因在于该框架提供了一个系统地进行脆弱性分析和评价的基本思路,囊括了从抽象的定性分析到具体的指标和参数选取的全过程,在数据理想的情况下,作为脆弱性评价的实践指导,其圈层式的数据组织框架具备良好的延展性和重要的应用价值。

3. 脆弱性评价方法

脆弱性评价是预测和评价外部胁迫对某一系统可能造成的影响以及系统对

外部胁迫的抵抗力和从不利影响中恢复的能力,从而为退化系统的综合治理提供决策依据。脆弱性评估主要关注研究对象面临的主要扰动是什么、脆弱性较高或较低的单元具有什么典型特征、决定脆弱性格局的因素以及如何降低评价单元的脆弱性等问题。目前采用的评价方法主要有函数法、综合指数法、图层叠置法、模糊数学法等^[38]。史培军^[39]认为广义的灾害脆弱性应由区域时空脆弱性、承载体脆弱性、孕灾环境脆弱性构成,并给出了相应的评估函数模型。黄弘^[28]、赵昕^[40]结合改进 AHP 法、统计学方法分别构建了社会脆弱性、风暴潮灾害脆弱性评价指标模型。Krishnamurthy^[41]从社会经济和自然环境两个方面构建了国家食品安全响应环境风险的脆弱性评价指标体系及相应的综合指数模型。由于函数法和综合指数法在评价思路与脆弱性内涵之间的对应较强,有利于解释脆弱性成因及特征,评价结果能够反映系统整体脆弱程度及脆弱性构成要素的情况,因而受到越来越多的学者重视。

综上所述,全球变化背景下的脆弱性研究近年来日益受到关注,并取得了一系列重要研究成果,但作为当前可持续性科学领域的一种新的研究视角,还存在一些薄弱环节甚至盲区,这也是未来努力的重要方向:① 目前真正意义上的社会-经济-自然复合系统脆弱性研究仍然较为匮乏^[33],关于经济波动对 CCIES 脆弱性的驱动机制和综合影响效果的研究更是鲜见报道;② 已有的人地系统脆弱性机理研究大都是在某一时间截面展开^[42],在时间维度上对脆弱性动态变化及其驱动因素的耦合作用过程与机制的探讨不够,不利于有针对性地指导恢复力建设实践;③ 由于人地系统的复杂性和不确定性,如何在脆弱性评价中有效处理系统中蕴含的各种要素耦合关系、不确定因素和评价信息不完备等突出问题尚未取得突破性进展,制约了脆弱性研究在实践中的应用。

1.2.2 恢复力研究述评

1. 恢复力研究的演进与基本内涵

作为降低人地系统脆弱性最为重要的途径之一,恢复力已经成为政府、学界和企业界共同关注和高度重视的焦点^[43,44]。恢复力的概念源自于力学,随着人口、资源与环境矛盾的凸显,1973 年 Holling 将其首次引入生态学领域,并逐渐延伸至社会-生态(又称人类生态或人-自然)系统领域。国际恢复力联盟将其定义为系统在保持自身结构不变的情况下通过调整系统行为控制参数及程序后能够吸纳的扰动量。目前恢复力这一概念已被应用在涉及人类和自然相互作用的多学科研究中,如灾害管理、环境演变响应、安全建设、工程技术等^[45]。增强恢复力在经济和组织行为方面的表现是降低环境变化不利影响的重要途径,因此一些学者对经济和组织行为恢复力进行了积极探索。Rose^[44,46,47]对经济恢复

力进行了积极探索,为其理论构建及实践应用作出了重要贡献。她将经济恢复力细分为静态和动态两种,前者主要描述特定时间内可获取资源的有效利用程度,后者指系统在遭受严重打击后恢复到期望状态的速度。Comfort^[48]是最先将恢复力引入组织行为领域的学者之一,她认为恢复力仅限于干扰事件发生后的组织行为和过程;Paton^[49]指出,组织恢复力是当系统遇到重大干扰时所表现出的一种能力,它能够利用实体资源和素质来管理遇到的变化和挑战。

总体而言,虽然不同领域的学者从自身学科角度出发对恢复力的定义进行了改进,加深了对恢复力本质的认识,但恢复力的基本内涵依然没有统一,目前学术界主要存在两种观点:工程恢复力和生态恢复力^[50],二者之间的区别如表1-1所列。就本质上而言,工程恢复力与生态恢复力的差异源自于看待系统稳定性的视角不同。前者注重系统在特定平衡态附近的稳定性,默认系统仅有一个“最优”平衡稳态,这与20世纪的经济理论相吻合;后者则注重系统远离平衡稳态后的适应状况,而这种非稳定态能够促使系统跃迁到另一稳定域,这与如今强调多稳态的经济理论是相吻合的。因此,对于复杂多稳态的矿区产业生态系统,以系统在保持自身功能延续的前提下能吸纳的扰动量为恢复力定义,以系统稳定域的边界特性及其跃迁机制为主要内容的研究框架更具说服力和应用前景。

表 1-1 工程恢复力和生态恢复力的区别^[43,50]

特征	关注焦点	研究内容	测量方式	管理目标
工程恢复力	系统的有效性和回归所需时间	系统在已知或最佳稳定态附近的行为特征	系统回归稳定态的速度	寻求规范或理想化的稳定态
生态恢复力	系统的持续性和维护原有功能的缓冲能力	运用复杂系统理论探讨系统可跃迁的其他稳态及稳定域的边界特性	系统吸收扰动的总量	探索现实复杂系统可解释的稳定态

2. 恢复力机制与管理对策

以 Holling 为首的“恢复力联盟”主张运用适应性循环理论来解释和分析社会-生态领域的恢复力机制^[51-53]。该理论认为,社会-生态系统按照4个特征阶段进行演替,即快速生长阶段、保护阶段、崩溃或释放阶段、更新与重组阶段。恢复力的变化贯穿在整个适应性循环中,并随着各阶段的演替而表现出不同水平。作为适应性循环的基本属性之一,恢复力的内涵在以下方面得以扩展:
① 系统在原稳定域内能承受的扰动量,即系统在维持自身功能和结构不变的

前提下能抵御的外部干扰总量;②系统的自组织能力反映了系统承受干扰时的学习与自适应调节能力。赵庆建^[54]运用复杂性理论探讨了社会生态系统的结构、功能与过程,并综合自然科学与复杂系统基本原理,研究了社会生态系统恢复力变化的状态跃迁机制。Rose^[44,46,47]认为经济恢复力发生于三个尺度,即公司、家庭或相关组织的个体恢复力,经济部门、个别市场或联合团体的市场恢复力,以及所有个体单元和市场组合的区域宏观经济恢复力,并定性分析了它们与恢复力的关系。Simmie^[55]主张采用适应性循环模型研究区域经济恢复力形成机制,并通过两个案例阐述了其有效性。在恢复力提升策略方面,Chopra^[56]采用网络分析法考察了产业共生网络的脆弱性,认为应从多样性、冗余和多功能性等方面增强系统恢复力;Jiao^[57]从动态过程视角研究了政策干预对产业生态系统恢复力实现机制的影响;Stokols^[58]主张从社会生态学视角理解人-自然系统的恢复力,并从物资资源和人力资源两个方面提出了恢复力建设的对策建议。已有研究显示,从复杂系统动力学角度应用适应性循环理论来解释和研究系统恢复力,能够阐明恢复力形成的动力学机制,是近年来恢复力理论研究的主要趋势。

3. 恢复力测量方法

国内外生态学家、灾害学家和经济学家都在尝试将恢复力进行量化研究,目前已经使用的测量方法主要包括阈值方法^[59]、实验方法^[60]和替代指标法^[61]。阈值方法一般是用系统面临压力时维持结构和功能的能力来测量恢复力。该方法一般要借助于计算机模型(如GAP模型)估算出系统某些关键指标从胁迫状态恢复到稳定状态的时间,以及系统能够承受的最大胁迫。实验方法主要通过人为控制系统的外界干扰条件,分析系统的恢复过程从而研究恢复力^[60]。由于恢复力受诸多因素的影响,对其进行直接测量是比较困难的,但可以选取替代指标进行间接推断。替代指标法是指在系统中找出与恢复力相关并且可以测定的属性,从中选取恢复力的替代因子作为替代物^[61]。上述方法均存在着不同程度的限制:阈值方法受限于其前提假设和对计算机模型的依赖;实验方法受实际条件限制很难推广,而且其可重复性不高;替代指标法的关键和难点在于替代指标选取的科学有效性。

综上分析,虽然恢复力这一概念在经济政策和环境管理方面具有的价值已为大家所认可和接受,但有关人地系统恢复力的研究大都停留在经验性而非机理性探索上^[43],难以科学回答“什么因素决定恢复力大小、恢复力的生成机制如何”这类对恢复力建设具有重要指导意义的问题,更鲜有尝试从复杂系统动力学的角度开展系统恢复力建设的情景仿真模拟研究,而这将是未来区域产业生态系统恢复力研究的重要方向。

1.3 研究意义

根据脆弱性理论,CCIES 并非对任何一种扰动都是脆弱的,而且面对不同的扰动会表现出不同的脆弱性,因而 CCIES 脆弱性总是与施加在系统上的特定扰动密切相关。本研究旨在针对我国 CCIES 的特殊性和当前宏观经济波动带来的严峻挑战,遵循区域复合系统脆弱性与恢复力研究的发展趋势,以拓扑结构复杂、发展形势严峻且为数众多的煤化工矿区为重点研究对象,着重探讨经济波动情境下的 CCIES 脆弱性机理、评价方法与恢复力提升策略。本书研究意义如下:

理论上,运用复杂网络理论构建经济波动情景下的 CCIES 自组织演化动力学模型,阐明经济波动通过 CCIES 内部结构对系统脆弱性的驱动机制和放大效应;针对系统中要素耦合关系的复杂性、影响因素的不确定性和信息的不完备性等问题,采用集成化的最优数据挖掘方法,建立 CCIES 响应经济波动的脆弱性综合评价模型;采用决策实验室法(DEMATEL)、解释结构建模法(ISM)以及系统动力学法(SD),解析 CCIES 恢复力的关键影响因素与形成机制。这些研究成果对于推动 CCIES 治理理论的完善和发展具有积极意义。

实践上,完成我国重点 CCIES 的脆弱性实证评价与分级分类,揭示脆弱性较高和较低 CCIES 的典型特征及其脆弱性格局的主要决定因素;运用复杂系统动力学方法开发 CCIES 恢复力建设的情景仿真模型,进而针对 CCIES 规划、运行和管理过程中的薄弱环节和制度障碍,通过模拟仿真提出 CCIES 恢复力建设的调控对策,为政府制定政策和企业采取措施提供决策参考。这些研究成果不仅有助于增强 CCIES 对当前和未来风险的抵御能力,也将为之后的 CCIES 规划和调控指明方向。

1.4 概念界定

为明确本研究的尺度和重点,科学构建相关概念模型与数理模型,作者首先对 CCIES 的概念和边界作出如下界定。

产业生态系统指按照物质循环、生物和产业共生原理,通过对产业链横向和纵向系统优化耦合而形成的经济增长与自然生态系统相互协调发展的复合生态系统。CCIES 是以煤炭资源开发利用为主导,以物质循环、能量流动、价值转移和增值、信息传递为特征,实现生产、消费、调控等功能的资源-经济-社会-环境复合生态系统,其中经济子系统的发展速度和环境子系统的承载力要相适应,复合

生态系统要为资源子系统的可持续性和社会子系统的和谐提供支撑力。CCIES的基本组成如图 1-1 所示。

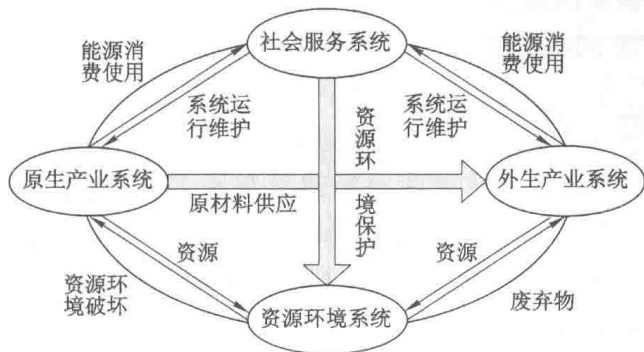


图 1-1 煤炭城市产业生态系统基本构成模型

对煤炭城市而言,作为煤炭城市标志性产业子系统原生产业系统是煤炭开采形成的生产系统;外产业系统是指以煤炭为消费品的各类产业部门的集合,包括电力、煤化工、建材产业等;资源环境系统是煤炭城市产业系统赖以发育的自然物质基础和前提,既包括可耗竭的煤炭资源,也包括不可耗竭的土地、水、生物和大气等要素;社会服务系统是指为资源环境系统、原生产业系统和外产业系统的正常运行和发展提供各种保障的服务子系统,包括土地生态恢复、景观塑造、公共管理、科研院所、金融保险、市场流通服务、中介服务等。其中,原生产业系统和外产业系统构成了煤炭城市产业生态系统的生命系统,而社会服务系统和资源环境系统则构成了煤炭城市产业生态系统的生命支持系统。

煤炭城市生态产业链是以煤炭矿区工业生产的产品、副产品及废弃物等资源为纽带,将不同生产过程(环节)连接在一起实现资源在矿区范围内的循环利用,形成具有产业链接关系的一种链状资源利用关系。煤炭城市产业生态系统中存在着纵向生态产业链和横向生态产业链,纵向生态产业链和横向生态产业链结合就构成了完整意义上的纵横交错的煤炭城市生态产业链网,如图1-2所示。纵向生态产业链模式中物质的流向以煤炭资源为基础,如:煤炭—电力—市场,煤炭—气化—市场;横向生态产业链模式中物质的流向则以纵向共生模式中活动排放的副产品、废弃物等为基础,如:煤泥—热电厂—热电,矸石—建材厂—建材产品。

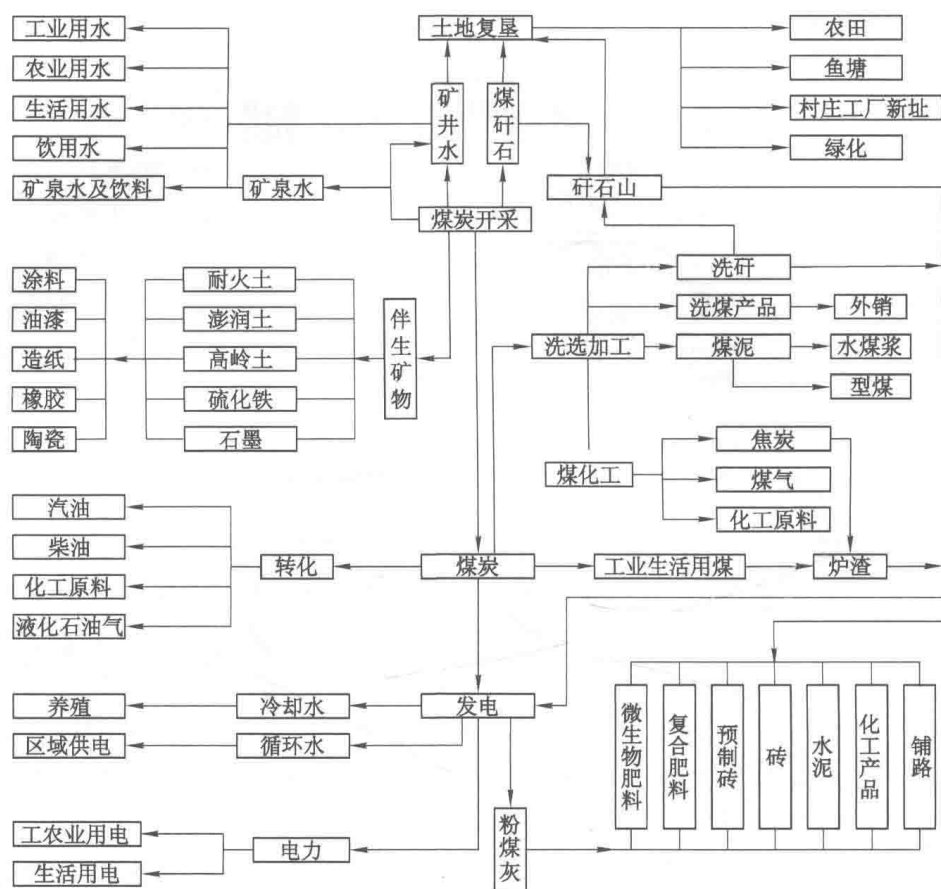


图 1-2 煤炭城市产业生态链网

1.5 主要内容

结构决定功能是系统科学的基本观点,从结构角度分析系统功能则是复杂系统理论研究的基本范式。本研究遵循这一基本范式,着重开展以下四个方面的研究工作。

1. CCIES 响应经济波动的脆弱性机理研究

阐明 CCIES 响应经济波动的脆弱性机理是开展其评价方案与降低策略研究的理论基础。在鄂尔多斯、淮南、榆林、六盘水等六个典型 CCIES 案例分析的基础上,运用复杂性理论阐释经济波动和 CCIES 结构特征的动态耦合作用过程与机制,建立了经济波动条件下 CISN 的脆弱性分析框架,阐释了“经济波动→