

城市废弃物资源化利用网络的脆弱性及影响机理^{*}

张其春^{*1,2}, 郝永勤¹

(1. 福州大学经济与管理学院, 福建 福州 350116;

2. 福建工程学院交通运输学院, 福建 福州 350118)

内容提要:脆弱性理论的不断深化和实践发展为城市废弃物资源化利用研究提供了新的视角和方向。本文通过梳理国内外文献,从城市废弃物资源化利用网络的供应、回收、资源化和市场化四个环节提取24个脆弱性影响因素,并将其映射到敏感性、适应性和恢复力三个维度。建立DEMATEL-ISM-ANP集成方法,采取专家问卷调查获取数据开展实证研究,解析各影响因素组和因素间的相互作用关系,并计算各脆弱性因素的影响强度,进而采用综合指数法开展脆弱性评价,识别出关键影响因素并探讨其影响机理。研究表明:(1)城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素具有明显的层次化网络结构特征,24个影响因素可以划分为驱动、互动、随动和独立四种类型;(2)我国城市废弃物资源化利用网络脆弱性指数为3.351,敏感性指数、适应性指数和恢复力指数分别为3.688、3.042和3.362,都处于中高水平,亟需加强调控治理;(3)废弃物供需不匹配是影响系统敏感性的关键因素,资源化效益不佳和回收行为不规范降低了系统适应能力,而消费者的回收知识有限、政府回收政策失效和投融资规模小是系统恢复力缺失的主要原因;(4)废弃物供需不匹配和消费者的回收知识有限属于随动因素,需要从其引致因素入手,采取有针对性的治理策略。因此,本文从这六个关键影响因素入手,提出削减系统脆弱性的政策建议,为促进城市废弃物资源化利用网络稳固升级提供决策依据。

关键词:城市废弃物;资源化利用;脆弱性;DEMATEL-ISM-ANP集成法;影响机理

中图分类号:F062.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2016)10—0168—16

一、引言

目前,脆弱性已成为学术界的高频词汇,成为全球气候变化和可持续发展科学领域的重要研究视角和分析工具(Smit & Wandel, 2006),逐步发展为一个基础性的科学知识体系,形成独特的理论与方法论,具有广阔的实践应用前景。城市废弃物资源化利用属于可持续性科学的重要分支,近年来受到学术界的高度关注,研究内容涉及城市废弃物资源化利用的价值分析、潜力估算、技术创新、管理体

系、政策保障及国外经验借鉴等众多方面(王昶等, 2014; Wen等, 2015),已经成为推动城市绿色发展和生态文明建设的重要战略途径。脆弱性理论的不不断深化和实践发展,为城市废弃物资源化利用研究提供了新的视角和方向,体现了多学科交叉融合的研究范式,有助于该领域研究的不断深化。随着我国循环经济“十百千”示范行动的稳步推进,尤其是再生资源回收体系的不断完善和“城市矿产”示范基地的快速发展,城市废弃物资源化利用已逐步向规模化、集聚化和产业化方向发展,天津子牙、湖

收稿日期:2016-04-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目“博弈视角下的我国省域循环经济生态效益综合评价及发展对策研究”(71573114);福建省软科学项目“福建省城市废弃物资源化利用绩效评价及其提升研究”(2016R0002);福建省社会科学规划项目“协同创新驱动福建省城市矿产产业集群升级的路径研究”(FJ2015C123)。

作者简介:张其春^{*}(1981-),男,福建永春人,博士研究生,副教授,研究领域是资源环境管理,E-mail:47810989@qq.com;郝永勤(1954-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,研究领域是循环经济理论与实践,E-mail:xyq9105@163.com。^{*}为通讯作者。

南汨罗等一批“城市矿产”示范基地的集聚效应凸现,已初步形成了特色鲜明、具有一定规模效应和技术水平的产业网络。然而,城市废弃物资源化利用网络内各类主体间不仅存在着复杂的物质、能量、信息和价值交换,多方利益博弈与冲突,还受到技术、市场、环境和制度等不确定性因素的影响,这些干扰容易造成网络动荡、萎缩乃至崩溃、瓦解。近年来,广东贵屿、清远华清、福建华闽等再生资源产业园在不同程度上陷入萧条窘境,暴露出很强的脆弱性。目前,还很少有学者将脆弱性及其评估框架引入该领域,更鲜有以城市废弃物资源化利用网络为具体研究对象,开展针对性调查与实证研究。因此,本文借鉴脆弱性理论研究框架,充分考虑城市废弃物资源化利用网络的独特性,在对城市废弃物资源化利用网络脆弱性进行内涵界定的基础上,构建脆弱性评价指标体系;然后,引入 DEMATEL-ISM-ANP 集成方法,识别出关键脆弱性因素,解析脆弱性影响机理,并提出相关政策建议,以期为脆弱性治理提供决策参考。

二、城市废弃物资源化利用网络脆弱性的内涵及评价指标体系

1. 内涵界定

脆弱性概念最初起源于自然灾害领域的研究, Timmerman(1981)首先从地理学角度提出了脆弱性的概念,强调系统对外界干扰的结果,侧重于自然生态系统研究。随后,脆弱性研究不断向生态学、可持续发展、贫困治理、公共健康、城市系统、产业经济及供应链管理等领域拓展,研究对象更为具体、理论触角更加细微、研究内容日益丰富、研究方法更趋多样,呈现出综合化和体系化的趋势。然而,由于研究领域、视角和对象不同,学者们对脆弱性内涵的理解也各有侧重,存在较大差异。Cutter等(2003)和王岩等(2013)对脆弱性概念的总结,表明其内涵已逐渐从最初关注对破坏或干扰的敏感性,衍化延伸到包含暴露性、易损性、敏感性、适应性、弹性、风险、应对能力、恢复力、变革力等一系列相关概念在内的集合,从一维拓展到多维,从静态分析转向动态演化,从被动面对转向主动应对。

城市废弃物资源化利用网络脆弱性是复杂系统脆弱性理论在产业生态学领域的拓展应用。借鉴已有的脆弱性概念,本文将其定义为:在城市废

弃物资源化利用网络的供应、回收、资源化和市场化等运作过程中,由于受到系统内外多重因素的干扰和冲击,带来网络结构、功能受损,致使网络陷入低效运行的一种系统属性。有别于传统脆弱性研究主要关注自然因素的扰动,城市废弃物资源化利用网络脆弱性研究更加强调经济、社会、技术、政策及文化等非自然因素影响以及系统自身的适应能力和应对能力。由于脆弱性维度众多,学者们都是根据特定研究对象选择合适的维度。本文认为,城市废弃物资源化利用网络脆弱性包含了敏感性、适应性和恢复力三个维度,是敏感性、适应性和恢复力相互作用的函数。其中,敏感性反映系统对外界干扰的敏感程度;适应性强调系统具有的抵御、代谢机能,反映系统对干扰的免疫力和承受力;恢复力则强调系统的自我修复和应对调控能力,体现系统的还原力和发展力。内外因素干扰是城市废弃物资源化利用网络脆弱性产生的原因,但在同样的扰动下,不同网络的脆弱性水平各异,这取决于其敏感性、适应性和恢复力。如果系统对各种干扰不甚敏感,并能够快速适应扰动环境,或做出积极应对,使之尽快恢复平衡状态,就能降低脆弱性水平。城市废弃物资源化利用网络在运作过程中受到的扰动因素具有类型多样化、数量庞大性、发生频率高、扰动强度大及持续时间长等特点,导致其脆弱性具有长期性、连锁性、时空分异性及难以修复性等多元特征,亟需识别出关键影响因素,进而采取有针对性的干预调控策略。

2. 评价指标体系

城市废弃物资源化利用网络是一个具有开放性、动态性、自适应性和主体建构性等多元特征的复杂产业系统,这些系统属性决定了其影响因素遍及供应、回收、资源化和市场化各个环节。目前,国内外学者针对各个环节开展了广泛探讨,取得了不少研究成果,但仍存在一些不足:(1)不同学者研究的侧重点不同,因素提炼还不够全面、准确,忽略了政策、制度、社会认知等非自然因素的重要影响,且没有考虑因素间的内在关联机制;(2)侧重于定性规范的探索性研究,较少采取定量实证研究,削弱了对实践的指导价值;(3)尚未将这些影响因素与脆弱性紧密联系起来,难以解析其对脆弱性的作用机理及扰动效果。因此,本文采取两步走策略构建评价指标体系:首先,对国内外相关文献进行梳

理,从供应、回收、资源化和市场化四个环节系统地总结和筛选,提炼出24个脆弱性影响因素;然后,对这些影响因素进行分类整理,分别将它们归集到敏感性、适应性和恢复力三个维度,由此建立评价指标体系如表1所示。将脆弱性影响因素记为 F_i

($i=1, 2, \dots, 24$),其中 $F_1 \sim F_8$ 表示敏感性因素, $F_9 \sim F_{16}$ 表示适应性因素, $F_{17} \sim F_{24}$ 表示恢复力因素。由于脆弱性是一个反向指标,为保持与脆弱性的同向性,本文对适应性因素和恢复力因素都采取反向表达,如表1所示。

表1 城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素

模块	影响因素	来源	重新归集	符号
供应子系统	回收价格低	钟永光等 2010	敏感性	F_1
	废旧产品进口量大	He等 2008	敏感性	F_2
	废旧产品销售渠道不畅	Qu等 2013	敏感性	F_3
	消费者的回收意识低	Zaman & Lehmann 2013	敏感性	F_4
	消费者的回收知识有限	王琪等 2014	恢复力	F_{17}
回收子系统	回收成本高	Corvellec & Bramryd 2012	敏感性	F_5
	废弃物供需不匹配	Wen等 2015	敏感性	F_6
	回收行为不规范	Nnoroma & Osibanjo 2008	适应性	F_9
	回收网点布局不合理	Fleischmanna等 2000	适应性	F_{10}
	政府回收政策失效	Cao等 2016	恢复力	F_{18}
	回收市场信息匮乏	Corvellec & Bramryd 2012	适应性	F_{11}
	“互联网+回收”推广进程缓慢	许开华等 2015	恢复力	F_{19}
资源化子系统	废弃物成分复杂	Mesjasz - Lech 2014	敏感性	F_7
	资源化经济效益不佳	Passel等 2013	适应性	F_{12}
	产业集聚程度低	李健等 2012	适应性	F_{13}
	废弃物资源化技术水平不高	刘光富等 2014	恢复力	F_{20}
	投融资规模小	Li等 2015	恢复力	F_{21}
	专业化人才匮乏	Qu等 2013	恢复力	F_{22}
市场化子系统	公众的绿色消费认知不足	Zaman & Lehmann 2013	敏感性	F_8
	再生产品价格优势不明显	Wen等 2015	适应性	F_{14}
	再生产品价值低	Ackerman & Gallagher 2002	适应性	F_{15}
	再生产品价格波动异常	Cossa & Williams 2015	适应性	F_{16}
	政府对再生产品的扶持力度有限	Mitra & Webster 2008	恢复力	F_{23}
	再生产品市场营销能力差	刘光富等 2015	恢复力	F_{24}

资料来源: 本文整理

三、城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素强度识别

上述24个影响因素在脆弱性形成与演化过程中发挥的作用和影响强度不尽相同,必须根据每个因素的重要性程度赋予不同的权重。目前,确定指标权重的方法很多,大致可划分为主观赋值法和客观赋值法两类。这两种方法各有优缺点,主观赋值法客观性较差,但解释性强;客观赋值法精确程度

高,但需要充足的现实数据。城市废弃物资源化利用网络脆弱性的24个影响因素都没有现成的统计数据,需要采用主观赋值法确定权重。

1. 强度识别模型构建

城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素具有多样性、层级性、交互性和社会性等特点,需要通过系统结构模型化技术对复杂系统进行深层次解析。ISM、DEMATEL和ANP具有一定的共性,都

考虑因素间的相互关联性,都能够从众多因素中识别出关键因素,已得到广泛应用,但三种方法各有其优势和不足。ISM 技术的应用需要进行大量的矩阵运算,而且将要素间的二元关系视为同等重要,在邻接矩阵中只要存在某种二元关系就记为 1,否则记为 0(汪应洛,2008);而 DEMATEL 模型很好地克服了该缺点,通过系统中因素之间的逻辑关系构建直接影响矩阵,大大减少矩阵运算强度,且根据影响因素间的关系强度进行差别化赋值,使结果更加客观(Shieh 等,2010)。将 DEMATEL 和 ISM 融合起来使用,可以增强研究的科学性,周德群、章玲(2008)提出了集成 DEMATEL-ISM 方法进行系统层次结构划分的理论依据、思路和具体算法。随后,学术界不少学者将该方法应用到不同领域开展实证研究,如吴彪等(2010)将其应用于高速公路作业区交通安全影响因素辨识。然而,DEMATEL-ISM 集成方法虽能挖掘因素间的逻辑关系、层次结

构及其作用强度,却将各类因素间的相互影响强度赋予相同权重,忽略了这些彼此关联、相互影响及相互制约的因素存在重要性差异。ANP 方法强调网络中各因素间存在着相互影响、制约或反馈关系,通过两两比较判断矩阵,计算极限超矩阵,从而获得 ANP 网络中各指标所占的权重及其重要性相对排序(Saaty,2001;孙宏才等,2011)。但是,ANP 方法并没有提供构建网络结构关系的方法和流程,难以厘清指标间的内在逻辑关系和层次结构,DEMATEL-ISM 集成方法恰好弥补了这一不足。此外,也有学者建立 DEMATEL-ANP 和 ISM-ANP 开展实证分析,却鲜有将三种方法融合起来使用。基于此,本文借鉴 DEMATEL-ISM,DEMATEL-ANP 和 ISM-ANP 等已有研究成果,构建基于 DEMATEL-ISM-ANP 的系统脆弱性影响因素强度识别模型如图 1 所示,弥补三种方法单独使用及两两组合使用过程中存在的不足,提高结论的准确性。

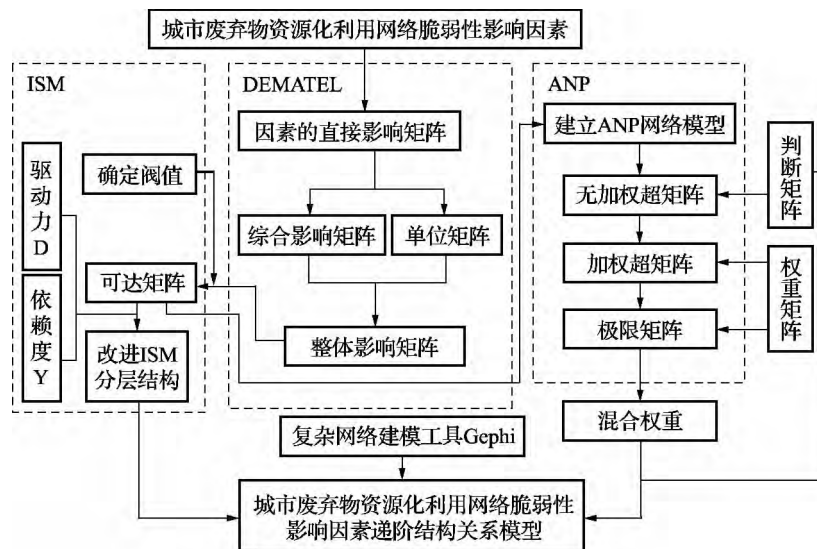


图 1 城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素强度识别模型

资料来源: 本文绘制

2. 识别模型应用

(1) 利用 DEMATEL 确定因素间的相互影响关系。采用问卷调查法确定表 1 中各脆弱性影响因素之间的关系并构造有向图。借助参加“2015 中国循环经济发展论坛”和承办“第十届全国循环经济与生态工业学术研讨会”的机会开展问卷调查,并

获取专家联系方式。调查对象由从事“城市矿产”开发及管理工作的政府职能管理人员、教授、企业中高层管理人员及博士生等各类专家组成。专家根据自身经验确定每两个脆弱性因素之间有无直接关系(有记为 1,无记为 0)。共发放问卷 120 份,回收 92 份,有效问卷 87 份,问卷有效率 72.5%。

考虑到专家的观点差异,遵循多数同意规则,按照公式(1)对问卷进行汇总整理,得到有向图,并将其转换为直接影响矩阵A。

$$u_{ij} = \begin{cases} 4 & 90\% \text{ 以上专家认为 } F_i \text{ 对 } F_j \text{ 有直接影响} \\ 3 & 65\% \sim 90\% \text{ 以上专家认为 } F_i \text{ 对 } F_j \text{ 有直接影响} \\ 2 & 40\% \sim 65\% \text{ 以上专家认为 } F_i \text{ 对 } F_j \text{ 有直接影响} \\ 1 & 15\% \sim 40\% \text{ 以上专家认为 } F_i \text{ 对 } F_j \text{ 有直接影响} \\ 0 & 15\% \text{ 以下专家认为 } F_i \text{ 对 } F_j \text{ 有直接影响} \end{cases} \quad (1)$$

然后,将直接影响矩阵A标准化,并在标准化后的直接影响矩阵B的基础上,利用云算子矩阵计算器计算得出综合影响矩阵C,表示因素间直接作用和间接作用之和,即:

$$B = \frac{1}{24} A \quad (2)$$

$$\max_{1 \leq i \leq 24, j = 1} u_{ij}$$

$$C = \lim_{k \rightarrow \infty} (B + B^2 + \dots + B^k) = \lim_{k \rightarrow \infty} B \frac{1 - B^{k+1}}{1 - B}$$

$$= B(I - B)^{-1} = [c_{ij}]_{24 \times 24} \quad (3)$$

在城市废弃物资源化利用网络中,除了因素间具有交互关系,因素自身还具有自我抵消或自我强化功能。因此,整体影响矩阵D为:

$$D = C + I = [d_{ij}]_{24 \times 24} \quad (4)$$

(2) 利用ISM确定网络层次结构。给定阈值λ,实现对整体影响矩阵D的简化,由此获得可达矩阵E。根据产业实际情况,取λ=0.12,得到城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素的可达矩阵E。然后,依据因素间的交互作用关系,将可达矩阵的行和列元素分别进行加总,行元素之和表示某个因素指标对其他因素指标的影响强度,定义为该因素指标的驱动力D_i;列元素之和表示某个因素受其他因素的影响强度,定义为该因素指标的依赖度R_j。然后,分别以驱动力和依赖度作为直角坐标系的横坐标和纵坐标,并以各自中点为界将空间划分为四个象限。依据可达矩阵E,分别以D=7.5和R=10为分割轴,将24个影响因素划分为四种类型,分别命名为驱动因素、互动因素、随动因素和独立因素(如图2所示)。很显然,驱动因素具有高驱动、低依赖特征,互动因素具有高驱动、高依赖特

征,随动因素具有低驱动、高依赖特征,独立因素具有低驱动、低依赖特征。

$$E = [e_{ij}]_{24 \times 24} \quad e_{ij} = \begin{cases} 1 & d_{ij} \geq \lambda \\ 0 & d_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

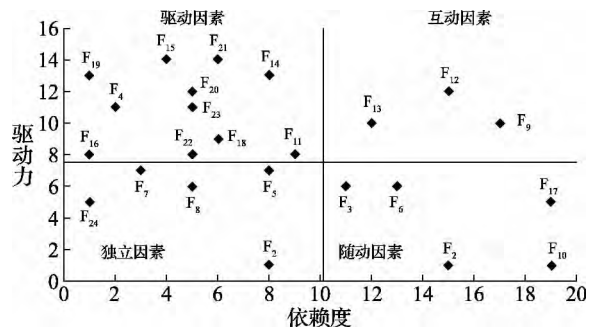


图2 依据驱动力与依赖度的脆弱性影响因素分类
资料来源: 本文绘制

(3) 利用ANP计算各因素相关权重。首先,依据可达矩阵E(对角线元素先取0)绘制ANP网络结构,并在Super Decision中建模,得到ANP模型如图3所示。ANP模型的典型结构由控制层和网络层两部分组成,控制层主要反映目标实现的评判准则,网络层则反映网络化结构的具体评价指标。由表1的评价指标体系可知,城市废弃物资源化利用网络脆弱性问题的控制层由问题目标支配,其目标是从脆弱性角度反映网络能力,为网络持续升级提供决策支持;网络层由三个脆弱性维度构成,即包含敏感性、适应性和恢复力三个因素组,每个因素组都各有八个影响因素,这24个影响因素构成了网络层。模型中,组间和组内都存在彼此关联的相互影响和相互依存关系,因素组之间的联系通过组内因素决定,两组之间只要存在一对关联因素,就有联系,关联的因素越多,因素组间的关联度越高。

然后,构造判断矩阵——无加权超级矩阵W_s。由于本问题中控制层不存在决策准则,仅接受问题目标的支配,网络层有敏感性、适应性和恢复力三个一级指标,每个一级指标都有八个二级指标,即网络层由24个指标构成。Super Decision提供了五种因素比较方法,本文采用Saaty(2004)提出的1~9标度问卷法进行因素组间和因素间的重要性程度比较。本文共设计含有47个比较矩阵的问卷,采

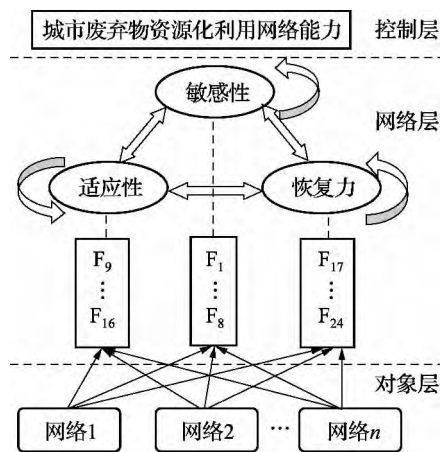


图3 城市废弃物资源化利用网络脆弱性评价 ANP 结构模型
资料来源: 本文绘制

用回访式调查,交由上述 87 名专家填写,由于问卷作答烦琐,仅回收了 36 份有效问卷。为确保结果的准确性,又开展了补充调查,使回收有效问卷达到 68 份,其中,政府工作人员 5 名、高校 10 名、企业 46 名、行业协会 7 名。然后,对 68 份问卷得到的两两比较结果进行几何平均(Excel 中的 GEOMEAN 函数)和四舍五入,由此确定录入 Super Decision 软件中的比较矩阵元素值,并对每个判断矩阵进行一致性检验,所有矩阵的 Inconsistency 值都小于 0.10,可以被接受,由此计算获得无加权超矩阵 W_s 。

在构造无加权超矩阵 W_s 的基础上,按照 ANP 应用程序(孙宏才等,2011),确定加权超矩阵 W_s^w ,计算极限超矩阵 W_s^l ,并获得脆弱性因素权重向量 W 。

其中,加权超矩阵 W_s^w 是对 W_s 中的每列因素进行归一化处理得到的,即 $W_s^w = A_s W_s$, A_s 中的元素 α_{ij} 为加权因子。通过归一化处理,使矩阵中的每个子块不但考虑因素组内部各因素对目标的影响,还考虑因素组之间反馈机制。为了反映元素之间的依存关系,还需要对加权超矩阵 W_s^w 进行稳定化处理,利用公式(6)计算每个加权超矩阵的极限相对排序向量,如果极限值存在且唯一,则原矩阵对应的行值便是各评价指标的稳定权重。实际上,只需将因素组间和各个因素间两两比较结果的几何平均值输入 Super Decision 软件,依靠软件计算便可自动生成上述结果。由此可得到城市废弃物资源化利用网络脆弱性因素的局部权重、全局权重及其排序如表 2 所示。

$$W_s^l = \lim_{N \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{k=1}^N (W_s^w)^k \quad (6)$$

(4) 计算混合权重。由于 ANP 方法不考虑因素的自身效应,为加入自身影响,按照 Tamura & Akazawa(2005)提出的混合重要程度 DEMATEL 方法进行权重修正,具体公式为 $Z = W + DW$,其中, W 为脆弱性因素全局权重; D 为整体影响矩阵; Z 中元素 z_{ij} 为各因素的混合重要性程度。然后,对 z_{ij} 进行标准化处理,得到标准化后的混合权重及其重要性排序,如表 2 所示,权重的修正使得因素的重要性排序更加客观。脆弱性因素的全局权重和混合权重排序有差异,说明因素自演化效应对城市废弃物资源化利用网络脆弱性具有一定影响,有些因素具有自强化功能而有些因素却产生了自抵消效应。

表 2 城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素指标权重及排序

模块	影响因素	局部权重	全局权重	排序	混合权重	排序
敏感性 30.9%	回收价格低 F_1	0.2312	0.0547	6	0.0315	14
	废旧产品进口量大 F_2	0.1844	0.0436	11	0.0311	16
	废旧产品销售渠道不畅 F_3	0.0933	0.0221	13	0.0332	13
	消费者的回收意识低 F_4	0.0000	0.0000	21	0.0313	15
	回收成本高 F_5	0.1908	0.0451	10	0.0407	11
	废弃物供需不匹配 F_6	0.3460	0.1863	1	0.0872	1
	废弃物成分复杂 F_7	0.0298	0.0070	20	0.0263	23
	公众的绿色消费认知不足 F_8	0.0462	0.0109	19	0.0282	21

模块	影响因素	局部权重	全局权重	排序	混合权重	排序
适应性 35.2%	回收行为不规范 F ₉	0.2244	0.0531	7	0.0425	9
	回收网点布局不合理 F ₁₀	0.0649	0.0146	17	0.0298	19
	回收市场信息匮乏 F ₁₁	0.0365	0.0197	14	0.0302	18
	资源化经济效益不佳 F ₁₂	0.2072	0.1116	2	0.0755	2
	产业集聚程度低 F ₁₃	0.1112	0.0599	5	0.0546	6
	再生产品价格优势不明显 F ₁₄	0.0812	0.0467	9	0.0486	7
	再生产品价值低 F ₁₅	0.0347	0.0187	15	0.0438	8
再生产品价格波动异常 F ₁₆	0.0000	0.0000	23	0.0267	22	
恢复力 33.9%	消费者的回收知识有限 F ₁₇	0.1832	0.0987	4	0.0631	4
	政府回收政策失效 F ₁₈	0.4619	0.1038	3	0.0634	3
	“互联网+回收”推广进程缓慢 F ₁₉	0.0000	0.0000	22	0.0304	17
	废弃物资源化技术水平不高 F ₂₀	0.1105	0.0248	12	0.0412	10
	投融资规模小 F ₂₁	0.2299	0.0517	8	0.0559	5
	专业化人才匮乏 F ₂₂	0.0564	0.0127	18	0.0289	20
	政府对再生产品的扶持力度有限 F ₂₃	0.0765	0.0172	16	0.0359	12
	再生产品市场营销能力差 F ₂₄	0.0000	0.0000	24	0.0205	24

注: 因为保留4位小数, 排在第21~24位影响因素的局部权重和混合权重都为0.0000, 其真实数据存在差别
资料来源: 本文整理

3. 绘制因果关系网络模型

在明确了ISM层次结构、因素间的相互作用强度和因素的混合重要性程度后, 利用复杂网络分析软件Gephi绘制层次化网络图, 数据的图形化展现如图4所示, 更直观地反映因素重要性及其交互作用强度。将24个城市废弃物资源化利用网络脆弱

性影响因素分为驱动、互动、随动和独立四个层次, 层内和层间因素都存在关联关系, 形成了复杂的交互网络。圆圈的大小表示因素的重要性程度, 链接线条指向表示某一因素对另一因素有影响, 双向箭头则表示因素间具有交互作用, 线条粗细代表影响强度, 线条越粗则影响愈强, 反之亦然。

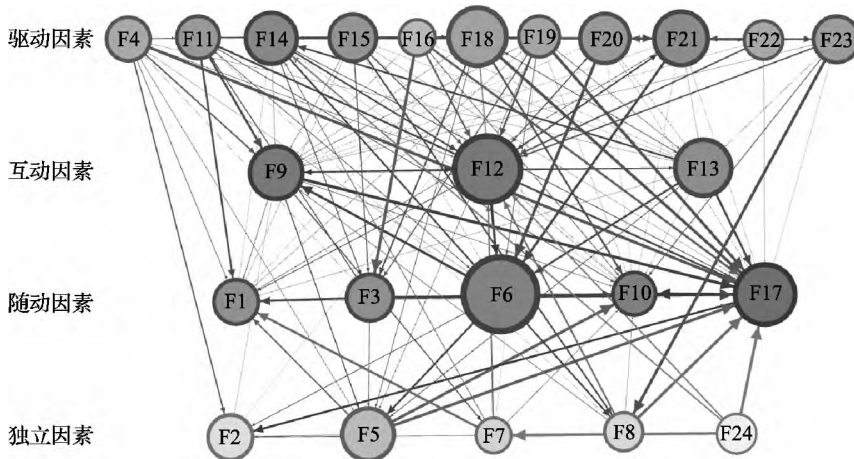


图4 城市废弃物资源化利用网络脆弱性因素层次化网络结构模型
资料来源: 本文绘制

4. 应用结果分析

(1) 层次性分析。由图 4 可知, 城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素具有明显的层次化网络结构特征, 24 个脆弱性影响因素划分为驱动、互动、随动和独立四个彼此关联的层次。其中, 第一层为驱动因素, 包括消费者的回收意识不高、回收市场信息匮乏、再生产品价格优势不明显、再生产品价值低、再生产品价格波动异常、政府回收政策失效、“互联网+回收”推广进程缓慢、废弃物资源化技术水平不高、投融资规模小、专业化人才匮乏和政府再生产品的扶持力度有限等 11 个因素, 数量占 45.8%, 权重占 43.6%, 主要为适应性和恢复力因素, 这些因素对其他因素具有驱动作用, 成为网络脆弱性的重要推动力。第二层为互动因素, 资源化经济效益不佳、产业集聚程度不高和回收行为不规范三个因素, 全部为适应性因素, 其混合权重分别排在第二、第六和第九位, 数量占 12.5%, 权重占 17.2%, 重要性程度都比较高, 这类因素与众多因素间存在强联动关系, 不仅容易影响其他因素, 也对其他因素的变动敏感, 是网络运行发生波动的重要原因, 应当成为重点治理对象。第三层为随动因素, 包括废弃物供需不匹配、消费者的回收知识有限、废旧产品销售渠道不畅、回收价格低和回收网点布局不合理五个因素, 其混合权重分别排在第一、第四、第 13、第 14 和第 19 位, 数量占 20.8%, 权重占 24.5%, 这类因素容易受其他因素变动影响, 但对其他因素影响有限, 应进一步寻找其成因, 以便采取有针对性应对策略。第四层为独立因素, 包括回收成本高、废旧产品进口量大、公众的绿色消费认知不足、废弃物成分复杂和再生产品市场营销能力差五个因素, 大多为敏感性因素, 其混合权重分别排在第 11、第 16、第 21、第 23 和第 24 位, 数量占 20.8%, 权重占 14.7%, 在总排序中处于相对靠后位置, 这些因素与其他因素之间的交互关系不明显, 对网络脆弱性的影响有限。

(2) 重要性分析。由表 2 可知, 各个脆弱性因素组及各个因素的重要性程度不同。在因素组方面, 敏感性、适应性和恢复力的影响因素所占混合权重之和分别为 30.9%、35.2% 和 33.9%, 因素组

重要性程度差异不大。从城市废弃物资源化利用全过程来看, 供应、回收、资源化和市场化四个环节对网络脆弱性影响因素的混合权重之和分别为 19.0%、32.4%、28.2% 和 20.4%, 回收环节影响因素的混合权重最大, 资源化环节次之, 两个环节占六成, 而供应环节和市场化环节占四成, 说明中间两个环节在城市废弃物资源化利用网络运行过程中起到更为重要作用。在具体影响因素方面, 混合权重排在前十的影响因素分别为废弃物供需不匹配、资源化经济效益不佳、政府回收政策失效、消费者的回收知识有限、投融资规模小、产业集聚程度低、再生产品价格优势不明显、再生产品价值低、回收行为不规范和废弃物资源化技术水平不高。这十个影响因素的混合权重之和为 57.6%, 其中, 前五个因素占 34.5%, 成为亟待解决的重点问题。

四、城市废弃物资源化利用网络脆弱性评价

随着国内外脆弱性研究的不断深入, 脆弱性评价方法也日益丰富, 但综合指数法仍是最常见的方法。该方法的使用过程是先建立脆弱性评价指标体系, 应用数理统计方法确定指标权重, 然后依据指标数值计算脆弱性指数, 并以脆弱性指数的大小作为脆弱性程度的衡量依据, 具有思路清晰、计算简便的优点。本文也采用该方法进行评价, 其计算公式如下:

$$VI = \sum_{i=1}^{24} w_i x_i, SI = \sum_{i=1}^8 w_i x_i / \sum_{i=1}^8 w_i, \\ AI = \sum_{i=9}^{16} w_i x_i / \sum_{i=9}^{16} w_i, RI = \sum_{i=17}^{24} w_i x_i / \sum_{i=17}^{24} w_i \quad (7)$$

其中, VI 表示脆弱性指数; SI 表示敏感性指数; AI 表示适应性指数; RI 表示恢复力指数; w_i 表示各影响因素 F_i 的混合权重; x_i 表示影响因素 F_i 的平均得分。

城市废弃物资源化利用网络脆弱性的 24 个影响因素都属于定性指标, 需要采用专家打分法获取指标数据。分值设为 0~5 六级。其中 0 表示影响因素表达的观点错误, 1~5 表示程度高低, 程度越高, 分值越大。通过实地调查、深度访谈和问卷调

查相结合的方式,获取第一手数据资料。首先,向原先收集的专家邮箱发送 Email,并向福建省再生资源行业协会的微信群发送问卷调查表,两个渠道共回收有效问卷 52 份;然后,对福建省内的海西、绿洲、华闽、全通等再生资源产业园进行实地调查,并对企业主管人员开展深度访谈,回收有效问卷 46 份,使有效问卷总数达到 98 份。其中,政府工作人员 6 名,高校和科研院所 12 名,企业 72 名,行业协会 8 名,不同主体均有参与,并以企业为主,具有较强的代表性。

对问卷调查结果进行汇总整理,计算出每项指标的平均得分和加权分如表 3 所示,并按照公式(7)计算出城市废弃物资源化利用网络的敏感性、适应性、恢复力和脆弱性指数,如表 4 所示。由于适应性指标和恢复力指标已经按负向指标处理,因而指数越大,适应性和恢复力越弱,脆弱性越强。如果将指数按高低分为低 [0, 1)、中低 [1, 2)、中 [2, 3)、中高 [3, 4) 和高 [4, 5) 五个等级,城市废弃物资源化利用网络的敏感性、适应性、恢复力和脆弱性程度都处于中高水平,凸显了脆弱性治理的紧迫性。三个脆弱性维度中,敏感性最高,恢复力次之,适应性最低。为了揭示城市废弃物资源化利用网络脆弱性的关键因素,本文引入障碍度概念(彭飞等,2015),其计算公式如下:

$$A_i = w_i x_i / \sum_{i=1}^{24} w_i x_i \times 100\% \quad (8)$$

式中,脆弱性障碍度 A_i 为第 i 项指标对网络脆弱性的影响程度; w_i 表示各影响因素 F_i 的混合权

重; x_i 表示影响因素 F_i 的专家平均得分。根据公式(8)计算出各影响因素障碍度及其排序,如表 3 所示,并筛选出前十位的障碍性因素,分别为废弃物供需不匹配、资源化经济效益不佳、消费者的回收知识有限、政府回收政策失效、投融资规模小、回收行为不规范、废弃物资源化技术水平不高、废旧产品销售渠道不畅、消费者的回收意识淡薄和再生产品价格优势不明显,这十个关键因素的障碍度之和为 65.0%,其中,前五个因素的总障碍度高达 43.3%,是需要重点干预并改进的指标。从脆弱性维度来看,敏感性因素的障碍度之和为 33.99%,适应性因素的障碍度之和为 31.96%,恢复力因素的障碍度之和为 34.05%,三个维度对城市废弃物资源化利用网络脆弱性的影响差别不大。从城市废弃物资源化过程来看,供应、回收、资源化和市场化影响因素的障碍度之和分别为 21.5%、34.0%、27.4% 和 17.1%,回收和资源化子系统表现出比供应和市场化子系统更高的脆弱性。实际上,城市废弃物供应是消费者回收行为的具体表现,消费者销售废旧商品很大程度上取决于回收体系的完善程度和再生资源产品的市场化程度,消费者出售各类废弃物具有一定的被动性,依赖于回收体系的改善;而再生资源产品的市场化好坏又直接受废弃物资源化水平高低的影响,如再生资源产品价值和价格优势主要取决于企业资源化能力的高低,如果再生产品的性能好,能够满足顾客需求,且价格合理,就更容易得到市场青睐。

表 3 城市废弃物资源化利用网络脆弱性评价指标得分

模块	影响因素	混合权重	评分(平均)	加权分	障碍度%	排序
敏感性 34.0%	回收价格低 F_1	0.0315	4.276	0.135	4.029	11
	废旧产品进口量大 F_2	0.0311	1.619	0.050	1.492	22
	废旧产品销售渠道不畅 F_3	0.0332	4.314	0.143	4.267	8
	消费者的回收意识薄弱 F_4	0.0313	4.543	0.142	4.238	9
	回收成本高 F_5	0.0407	3.283	0.134	3.999	12
	废弃物供需不匹配 F_6	0.0872	4.271	0.372	11.101	1
	废弃物成分复杂 F_7	0.0263	2.048	0.054	1.611	20
	公众的绿色消费认知不足 F_8	0.0282	3.871	0.109	3.253	15

模块	影响因素	混合权重	评分(平均)	加权分	障碍度%	排序
适应性 31.96%	回收行为不规范 F ₉	0.0425	3.605	0.153	4.566	6
	回收网点布局不合理 F ₁₀	0.0298	2.571	0.077	2.298	18
	回收市场信息匮乏 F ₁₁	0.0302	3.846	0.116	3.462	14
	资源化经济效益不佳 F ₁₂	0.0755	4.619	0.349	10.415	2
	产业集聚程度低 F ₁₃	0.0546	1.505	0.082	2.447	17
	再生产品价格优势不明显 F ₁₄	0.0486	2.832	0.138	4.118	10
	再生产品价值低 F ₁₅	0.0438	1.352	0.059	1.761	19
	再生产品价格波动异常 F ₁₆	0.0267	3.632	0.097	2.895	16
恢复力 34.04%	消费者的回收知识有限 F ₁₇	0.0631	3.956	0.250	7.460	3
	政府回收政策失效 F ₁₈	0.0634	3.824	0.242	7.222	4
	“互联网+回收”推广进程缓慢 F ₁₉	0.0304	1.524	0.046	1.373	23
	废弃物资源化技术水平不高 F ₂₀	0.0412	3.629	0.150	4.476	7
	投融资规模小 F ₂₁	0.0559	4.268	0.239	7.132	5
	专业化人才匮乏 F ₂₂	0.0289	1.476	0.043	1.283	24
	政府对再生产品的扶持力度有限 F ₂₃	0.0359	3.286	0.118	3.521	13
	再生产品市场营销能力差 F ₂₄	0.0205	2.571	0.053	1.582	21

资料来源: 本文整理

表 4 城市废弃物资源化利用网络脆弱性指数

维度	敏感性(SI)	适应性(AI)	恢复力(RI)	脆弱性(VI)
脆弱性指数	3.688	3.042	3.362	3.351

注: 由于适应性指标和恢复力指标已经按负向指标处理, 因而指数越高, 适应性和恢复力越弱

资料来源: 本文整理

五、城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响机理分析

1. 废弃物供需不匹配是影响系统敏感性的关键因素

城市废弃物资源化利用网络的八个敏感性影响因素中, 废弃物供需不匹配的障碍度最高, 达到 11.101%。在总排序中位居第一位, 占到敏感性因素总障碍度的三分之一。该因素的混合权重为 8.72%, 不匹配程度得分 4.271, 属于重要性程度和缺乏程度双高因素。2014 年, 笔者在参与福建省“十二五”循环经济示范试点企业验收时, 曾就“为什么需要大量进口废弃物”这一问题做过专门调查。绝大多数被调查企业都认为, 国内回收的报废

产品的可再生性和再制造性差, 无法满足企业资源化需求, 而报废程度过高和缺乏有效分类管理是重要原因, 提高了废弃物资源化的难度和成本, 在资源化技术未能取得质的突破的背景下, 废弃物的潜在资源价值难以得到有效开发, 成为最关键的脆弱性影响因素。美、德、日等发达国家都已建立起较为完善的生产者责任延伸制度(EPR), 原产品制造商对废旧产品回收负有直接责任。例如, 2006 年的美国法案中规定制造商必须负责对售出使用五年或运行一万小时的工程机械进行全部回收和再制造。由此, 确保了废弃物的来源可靠、渠道合法, 保证了报废产品的质量。采取强制报废制度不仅可以减少产品老化引起的安全事故, 而且可以保证报

废产品的再生价值。然而,我国除了对机动车采取强制报废制度,家用电器、电子产品、工程机械等都尚未建立强制报废标准,导致产品的过度使用,降低了废弃物的开发价值。从其所属层次类型来看,废弃物供需不匹配属于随动因素,即该因素的变化很大程度上受其他因素驱动,要根本上解决这一问题必须从其引致因素入手。根据可达矩阵 E ,提高消费者的回收意识、强化回收规范化管理、调整回收政策等是降低产品报废程度和实现废弃物有效分类管理的直接途径。此外,废旧产品销售渠道不畅和消费者的回收意识薄弱的障碍度都超过了平均水平,在总排序中位居第八和第九位,属于重要的敏感性因素。虽然这两项指标的重要性混合权重不高,但其平均得分处于较高水平,充分暴露出问题的严重性。

2. 资源化效益不佳和回收行为不规范是导致系统适应性不足的直接推动力

城市废弃物资源化利用网络的八个适应性影响因素中,资源化经济效益不佳和回收行为不规范的障碍度最高,分别为10.415%和4.566%,在总排序中分别位居第二和第六位,占到适应性总障碍度的近一半。其中,资源化经济效益不佳的程度得分在总排序中位居第一位,达到4.619,因素重要性混合权重位居第二位,成为网络适应能力不佳的最主要原因。从所属层次类型来看,这两个因素都属于互动因素,不仅容易影响其他因素,也对其他因素变动敏感,必须优先加以监测、调控和治理,防止带来连锁反应。以提高资源化企业效益和规范回收行为为突破口,采取有效的应对措施,能够提高系统对内外环境变化的适应能力,削减脆弱性影响。

(1) 资源化效益不佳。城市废弃物资源化共生网络演化升级受到资源化后端应用环节的强约束,即产业链后端对前端具有决定性影响,城市废弃物资源化产业链在很大程度上是一种引致型产业链。近年来,由于全球经济持续低迷,制造业陷入持续不景气状态,“城市矿产”产业链下游需求萎缩,这是引发再生资源价格持续下跌的主要原因。同时,全球经济持续低迷,铜、铝、铅、锌等原生资源价格

急剧下降,对再生资源需求产生巨大的挤出效应,也导致再生资源价格持续走低。在这种动荡的经济环境下,不少再生资源企业处于低利润甚至亏损状态。经济效益不佳影响了企业技术创新投入、产能扩张、资源整合和专业化人才培养,也难以获得投资机构的青睐,导致系统适应力提升的基础丧失,由此陷入恶性循环,当市场环境转好后,也将难以获得新的发展空间。此外,全球经济动荡导致资源化企业效益下降后,政府并未实施有效的财政补贴、税收减免、再生产品采购等扶持措施,导致不少再生资源企业采取放弃主业的转型战略,降低了全社会对城市废弃物的消化能力,也加剧了“垃圾围城”危机和人地系统脆弱性风险,这是亟待破解的重大难题。

(2) 回收行为不规范。回收行为不规范的程度得分为3.605,处于中高水平,直接推高了其障碍度,降低了系统整体的适应能力。EPR通过将生产者责任延伸拓展到产品的生命周期,特别是产品消费后的回收处理和再生阶段,成为美国、欧盟、新加坡等发达国家开展废弃物回收的主要模式,大大提升了回收规范化水平。在我国,许多原产品制造商存在经济、技术实力不足问题,无力承担逆向物流网络建设,专业从事废弃物回收的第三方物流提供商也寥寥无几,导致城市废弃物主要依靠无证经营的非正规回收商进行回收。非正规回收商在回收过程中未能严格实施废弃物分类管理标准,随意堆放现象严重。而且,由于缺乏高端的环保分拣设施与技术,他们基本上采取焚烧、破碎、浓酸提取、废液直排等方法进行粗放式处理,导致严重的“二次污染”,并对作业人员的健康造成严重危害。经过分拣、分类后,他们又往往将废弃物销售给无证加工利用企业,进一步加剧了环境危机。非正规回收商以其低回收成本优势,对正规回收商产生挤出效应,极大地压缩了正规渠道的回收空间,也沉重打击了业外企业进军再生资源领域的积极性,削弱了系统对环境变化的适应力。

3. 消费者的回收知识有限、政府回收政策失效和投融资规模小是系统恢复力不足的主要原因

恢复力反映系统在遭受扰动后重新恢复到原

有平衡状态的能力,反映系统的干预调控能力,恢复力缺失将导致系统脆弱性的长期存在。在城市废弃物资源化利用网络的八个影响因素中,消费者的回收知识有限、政府回收政策失效和投融资规模小的障碍度较高,分别为 7.460%、7.222% 和 7.132%。在总排序中位居第三、第四和第五位,占到恢复力总障碍度的三分之二。这三项指标的重要性程度较高,其缺失程度也都处于中高水平以上,是导致系统整体恢复力不足的主要原因。

(1) 消费者的回收知识有限。消费者是城市废弃物的最大供给源,不少消费者对废弃物是否具有可回收性、如何开展分类回收、如何获取销售渠道、随意丢弃废弃物的危害、政府对废弃物回收的扶持政策等方面都存在严重的认知不足。缺乏相关回收知识与信息将导致产品的过度使用和对废弃物的随意丢弃,带来废弃物供给源不足和供给质量欠佳(王琪等,2014)。从逻辑上讲,不断加强消费者回收知识传播是开展产业供给侧结构性改革的着力点。然而,调查结果表明,消费者的回收知识有限属于随动因素,很大程度上由其他因素引致。2013年,广州云龙苑小区通过地毯式宣传,挨家挨户上门派发宣传资料开展回收知识普及的做法并未取得预期的效果,无疑验证了这一观点。根据可达矩阵 E ,消费者回收意识薄弱、绿色消费认知不足、资源化经济效益不佳、再生产品价格优势不明显和再生产品价值低都是导致消费者学习回收知识动力不足的根源。因此,仅仅加强回收知识宣传,而不解决产业发展的深层次问题,难以激发消费者学习回收知识的热情,将收到事倍功半的效果。

(2) 政府回收政策失效。大量案例和实证结果表明,政府工具能够促进城市废弃物资源化利用,许多国家和地区都制定了与城市废弃物资源化利用相关的政策法规。对于发展不成熟且带有公共产品属性的再生资源行业,政府亟待通过财政补贴、税收减免、准入规制、再生产品采购等方式发挥激励、宣传、引导或制约等职能,推动产业健康快速发展。近年来,我国颁布实施了包括核定产品回收资质、发放回收补贴、以旧换新、减免增值税、垃圾

收费等各种政策,但调查表明,这些政策的实施效果有限,对城市废弃物资源化利用的促进作用有限(Cao等,2016)。尤其是国家推进“营改增”试点工作以来,由于再生资源多数品类不能取得进项发票,无法抵扣进项税额,导致正规渠道回收利用企业税负加重。2015年7月财政部和国家税务总局联合下发《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》,对资源综合利用产品和劳务增值税优惠政策进行整合和调整,采取即征即退的方式享受优惠政策,但大多退税比例为30%和50%,退税效果还有待实践检验。此外,政府推行的“以旧换新、以旧换再”政策直接瞄准消费领域,短期内取得了显著成效,但该政策实施程序烦琐,属于“运动式”政策,实施时间短暂,难以常态化执行;而政府回收补贴发放又存在补贴对象不明确、补贴标准难确定、补贴发放成本高等现实难题,限制了该政策大范围、长时间推行,这些都暴露出我国政府回收政策短板和执行漏洞,亟待调整政策方向和政策工具。

(3) 投融资规模小。在城市废弃物回收、拆解、资源化等过程中都需要大量的资金,再生资源企业对资金具有强烈的渴求。然而,由于受评级授信、抵押担保等信贷准入条件的限制和行业利润率偏低的影响,银行等金融机构“惜贷”现象明显;上市融资、债券融资等具有门槛高、审核严格、时间长等特点,属于少数实力雄厚企业的专利;而民间金融机构的融资成本高,对于平均利润偏低的废弃物资源化企业大多无力承受;政府财政专项资金补助有限,只能化解“燃眉之急”,难以发挥“造血”功能,无法成为资源化企业的主要资金来源。由于自有资金不足和融资渠道不畅,再生资源企业的技术创新、规模扩张、设备更新、网络布局都受到极大限制,在市场低迷环境下,不少企业因为资金链断裂导致停产、倒闭。2015年底,国家发改委发布了《绿色债券发行指引》,业内人士普遍认为,绿色债券将成为行业融资的新途径,但发行绿色债券在成本上与其他债券并无太大区别,这种融资渠道是否可以再生资源行业发展提供充足的资金供应,还需要相关配套,亟待政府通过税收、贴息、担

保、注资等激励措施进一步降低绿色债券的融资成本。缺乏有效的融资平台和融资渠道,使再生资源企业普遍面临资金短缺问题,投资主体少、融资难是阻碍我国“城市矿产”开发的重要瓶颈,也是导致城市废弃物资源化利用网络恢复力缺失的重要根源。

六、研究结论与政策建议

1. 主要结论

城市废弃物资源化利用网络具有开放性、动态性、融合性和复杂性等特征,是一个多主体构建、多阶段协同、多要素耦合的复杂产业系统。脆弱性是复杂产业系统的固有属性,探寻城市废弃物资源化利用网络脆弱性影响因素,进而提出有针对性的脆弱性治理策略,可以为提升“城市矿产”开发效率提供决策依据。因此,本文通过构建脆弱性评价指标体系,引入 DEMATEL-ISM-ANP 集成方法,利用专家调查法获取相关数据开展实证研究,确定各影响因素的混合权重,进而利用综合指数法开展脆弱性评价,解析脆弱性影响机理。主要研究结论如下:

(1) 城市废弃物资源化利用网络脆弱性包含了敏感性、适应性和恢复力三个构成维度,是敏感性、适应性和恢复力相互作用的函数。(2) 各脆弱性维度的引致因素异质且众多,可以将 24 个脆弱性影响因素划分为驱动、互动、随动和独立四个彼此关联的层次,废弃物供需不匹配、资源化经济效益不佳、政府回收政策失效、消费者的回收知识有限、投融资规模小和产业集聚程度低等影响因素的混合权重较大,重要性程度较高。(3) 我国城市废弃物资源化利用网络脆弱性指数为 3.351,敏感性指数、适应性指数和恢复力指数分别为 3.688、3.042 和 3.362,都处于中高水平,各因素的交叉影响形成了当前系统较高的脆弱性态势,凸显了治理的紧迫性和艰巨性。(4) 系统脆弱性主要由关键变量驱动,废弃物供需不匹配是影响系统敏感性的关键因素,资源化效益不佳和回收行为不规范是导致系统适应性不足的重要推动力,消费者的回收知识有限、政府回收政策失效和投融资规模小是系统恢复力缺失的主要原因。其中,废弃物供需不匹配和消费

者的回收知识有限属于随动因素,要根本上解决这些问题必须从其引致因素入手,采取有针对性治理策略。

2. 政策建议

基于上述研究结论,针对六个脆弱性关键影响因素,提出以下政策建议:

(1) 以供给侧结构性改革为突破口。解决废弃物供需不匹配难题,其关键在于降低产品的报废程度,提升报废产品的可再生性和再制造性。一方面,政府应尽快出台针对家用电器、电子产品、工程机械等各类产品的强制报废制度,确保产品安全使用,有效防止废弃资源再生价值丧失;另一方面,通过加强消费者的宣传和引导,促使消费者规范化使用家电、汽车等各类商品,形成按时自觉报废、更新的消费习惯。

(2) 在全球经济持续低迷,再生产品价格低位徘徊的经济环境下,绩效提升的根本出路在于降低企业经营成本。一方面,供应、回收、资源化和市场化各个环节的经济主体间应树立合作共生理念,重视不同主体在脆弱性治理中的角色定位和功能发挥,有效整合优势资源,保证城市废弃物资源化各个环节的有序衔接和协同发展,在合作过程中实施全价值链成本控制,形成上、中、下游协同降本增效的长效机制;另一方面,针对整体利润偏低的再生资源行业,政府应加大税收优惠力度,各地应以《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》为基础,出台更为具体的地方扶持政策,政府应设立专项资金支持再生资源企业进行技术改造和技术创新,依靠技术进步提高资源化效率。此外,应提高政府采购中再生产品和再制造产品的比重,拓展产品销路,直接为企业创造效益。

(3) 加强回收市场的整顿。从源头上进行控制,彻底改变以非正规回收商贩为主体的废弃物回收模式。一方面,加大城市废弃物资源化利用领域的环境执法力度,严格管制无证经营的回收拆解行为;另一方面,鉴于收费管制政策实施难度较大,应调整调控思路,从管制为主向激励为主转变,通过向消费者进行补贴,使消费者主动将各类报废产品交给正规回收商进行处理,挤压非正规渠道的生存

空间。此外, 加速推进互联网+分类回收, 实现对非正规回收渠道的整合与收编, 逐步建立废旧产品回收市场的新秩序。

(4) 不断提高消费者回收知识水平。改变仅仅加强回收知识宣传的传统做法, 而是从其引致因素入手, 解决消费者学习回收知识动力不足问题。通过消费者的环保责任意识培育、报废产品回收价格补贴、再生产品价值提升等方面入手, 激发消费者学习回收知识的热情, 使各类废弃物尽快流入正规回收渠道。同时, 加大再生产品的推广力度, 不断提升公众对再生产品的认知水平, 激活消费潜力, 提升企业经济效益。

(5) 调整政府回收政策方向和工具。无论是“以旧换新”还是“废弃电器电子产品处理基金”, 其实质都是财政补贴政策, 这种方法治标不治本。为促进废弃物回收行业健康发展, 关键在于严格落实EPR制度, 鼓励有条件的生产商通过处理基金付费

以外的方式承担生产者责任, 对于自行回收、委托第三方回收以及与专业处理企业联合处理的生产商, 给予减免处理基金收费和税收优惠, 使生产者成为回收的责任主体。此外, 加大回收基础设施建设投入, 提高消费者销售报废产品的便捷性和经济性。

(6) 拓展融资渠道。除了政府财政专项资金扶持外, 应鼓励金融机构、民间资本投入到再生资源领域, 促进投资主体与融资渠道的多元化。有条件的企业应抓住绿色债券支持“城市矿产”资源回收、分拣、拆解体系设施建设运营的契机, 申请发行绿色债券。此外, 应积极探索供应链金融的拓展应用, 形成“互联网+再生资源+供应链金融”的创新发展模式。依托供应链核心企业, 发挥全产业链合力“造血”功能, 解决中小企业融资难和供应链失衡问题, 促进网络演化升级。

参考文献:

- [1] Ackerman F, Gallagher K. Mixed Signals: Market Incentives, Recycling, and the Price Spike of 1995 [J]. *Resources, Conservation and Recycling* 2002, 35 (4): 275 - 295.
- [2] Cao J, Lu B, Chen Y Y, Zhang X M, Zhai G S, Zhou G G, Jiang B X, Schnoor J L. Extended Producer Responsibility System in China Improves E-waste Recycling: Government Policies, Enterprise, and Public Awareness [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 (62): 882 - 894.
- [3] Corvellec H, Bramryd T. The Multiple Market-Exposure of Waste Management Companies: A Case Study of Two Swedish Municipally Owned Companies [J]. *Waste Management* 2012, 32 (9): 1722 - 1727.
- [4] Cossa R, Williams L D. Urban Mining: Concepts, Terminology, Challenges [J]. *Waste Management*, 2015 (45): 1 - 3.
- [5] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social Vulnerability to Environmental Hazards [J]. *Social Science Quarterly* 2003, 84 (2): 242 - 261.
- [6] Fleischmann M, Krikke H R, Dekker R, Flapper S D P. A Characterization of Logistics Networks for Product Recovery [J]. *Omega* 2000, 28 (6): 653 - 666.
- [7] He K T, Li L, Ding W Y. Research on Recovery Logistics Network of Waste Electronic and Electrical Equipment in China [C]. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* 2008 (3): 1797 - 1802.
- [8] Li J, Pan SY, Kim H, Linn J H, Chiang PC. Building Green Supply Chains in Eco-industrial Parks towards a Green Economy: Barriers and Strategies [J]. *Journal of Environment Management* 2015 (162): 158-170.
- [9] Mesjasz-Lech A. Municipal Waste Management in Context of Sustainable Urban Development [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2014 (151): 244 - 256.
- [10] Mitra S, Webster S. Competition in Remanufacturing and the Effects of Government Subsidies [J]. *International Journal of Production Economics* 2008, 111 (2): 287 - 298.

- [11] Nnoroma I C ,Osibanjo O. Overview of Electronic Waste(e-waste) Management Practices and Legislations ,and Their Poor Applications in the Developing Countries [J]. Resources ,Conservation and Recycling 2008 ,52 (6) : 843 – 858.
- [12] Passel S V ,Dubois M ,Eyckmans J ,Gheldere S D ,Ang F ,Jones P T ,Acker K V. The Economics of Enhanced Landfill Mining: Private and Societal Performance Drivers [J]. Journal of Cleaner Production 2013 (55) : 92 – 102.
- [13] Qu Y ,Zhu Q H ,Sarkis J ,Geng Y ,Zhong Y G. A Review of Developing an E-wastes Collection System in Dalian ,China [J]. Journal of Cleaner Production 2013 (52) : 176 – 184.
- [14] Saaty T L. The Analytic Network Process: Decision Making with Dependence and Feedback [M]. RWS Publications 2001.
- [15] Saaty T L. Fundamentals of the Analytic Network Process—Dependence and Feedback in Decision-Making with A Single Network [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering 2004 ,13 (2) : 129 – 157.
- [16] Shieh J I ,Wu H H ,Huang K K. A DEMATEL Method in Identifying Key Success Factors of Hospital Service Quality [J]. Knowledge Based Systems 2010 ,23 (3) : 277 – 282.
- [17] Smit B ,Wandel J. Adaptation ,Adaptive Capacity and Vulnerability [J]. Global Environmental Change 2006 ,16 (3) : 282 – 292.
- [18] Tamura H ,Akazawa K. Structural Modeling and Systems Analysis of Uneasy Factors for Realizing Safe ,Secure and Reliable Society [J]. Journal of Telecommunications and Information Technology 2005 (3) : 64 – 72.
- [19] Timmerman P. Vulnerability ,Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climate Applications [R]. Institute for Environmental Studies. University of Toronto ,1981.
- [20] Wen Z G ,Zhang C K ,Xue Y Y. Urban Mining’s Potential to Relieve China’s Coming Resource Crisis [J]. Journal of Industrial Ecology 2015 (4) : 1 – 12.
- [21] Zaman AU ,Lehmann S. The Zero Waste Index: A Performance Measurement Tool for Waste Management Systems in A “Zero Waste City” [J]. Journal of Cleaner Production 2013 (50) : 123 – 132.
- [22] 李健 唐燕 张吉辉. 中国再生资源产业聚集度变动趋势及影响因素研究 [J]. 济南: 中国人口·资源与环境 2012 , (5) .
- [23] 刘光富 张士彬 鲁圣鹏. 中国再生资源产业知识产权运用机制顶层设计 [J]. 北京: 科学学与科学技术管理 2014 , (10) .
- [24] 刘光富 张士彬 门成昊. 再生资源产品消费者购买意向与市场营销策略研究 [J]. 合肥: 预测 2015 (4) .
- [25] 彭飞 韩增林 杨俊 钟敬秋. 基于 BP 神经网络的中国沿海地区海洋经济系统脆弱性时空分异研究 [J]. 北京: 资源科学 2015 (12) .
- [26] 孙宏才 田平 王莲芬. 网络层次分析法与决策科学 [M]. 北京: 国防工业出版社 2011.
- [27] 王琪 杨旻 马红焯. 废弃电子产品资源化潜力预测模型研究 [J]. 济南: 中国人口·资源与环境 2014 (11) .
- [28] 王昶 徐尖 姚海琳. 城市矿产理论研究综述 [J]. 北京: 资源科学 2014 (8) .
- [29] 王岩 方创琳 张蕾. 城市脆弱性研究评述与展望 . 北京: 地理科学进展 2013 (5) .
- [30] 汪应洛. 系统工程 [M]. 北京: 机械工业出版社 2008.
- [31] 吴彪 许洪国 戴彤焱. 基于 DEMATEL-ISM 的高速公路作业区交通安全影响因素辨识 [J]. 北京: 交通运输系统工程与信息 2010 (5) .
- [32] 许开华 张宇平 赵小婷 程青民 欧阳铭志. 回收哥 O2O 平台开启“互联网 + 分类回收”新模式 [J]. 北京: 再生资源与循环经济 2015 (10) .
- [33] 钟永光 钱颖 尹凤福 周晓东. 激励居民参与环保化回收废弃家电及电子产品的系统动力学模型 [J]. 北京: 系统工程理论与实践 2010 (4) .
- [34] 周德群 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究 [J]. 北京: 管理科学学报 2008 (2) .

A Study on Vulnerability and Influence Mechanism of Network for Municipal Waste Resource Utilization

ZHANG Qi-chun^{1,2}, XI Yong-qin¹

(1. School of Economics & Management, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian, 350116, China;

2. School of Transport & Communications, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian, 350118, China)

Abstract: In recent years, with the acceleration development of “urban mines”, the resource utilization of municipal waste has been gradually to large-scale, agglomeration and networking development. There has formed a number of industrial networks with a certain scale and technology based on the national urban mining pilot bases in China. However, the normal production and business activities of network subjects are suffering interference by the uncertain environment and immature internal condition in recent years, resulting in many cooperative relationship rupture, which makes strong blows on the upstream, mid-stream and downstream industrial chain. As a result, the network performance decreases drastically. The networks for municipal waste resource utilization are all facing risk of collapse, which reveal considerable vulnerability. Therefore, it is very important to explore vulnerability influencing factors and seek targeted governance strategies.

Along with the continuous development of vulnerability theory and its practice, it's a new research perspective and direction for municipal waste resource utilization. Based on the complex system and its vulnerability theory, this paper carries out vulnerability measurement and its influence mechanism research on the network for municipal waste resource utilization. Combing through the relevant literature, this paper extracts 24 vulnerability factors from the links of supply, recycling, resource utilization and marketization, and attributed them to sensitivity, adaptability and resilience respectively, which reflect the connotation of vulnerability. In order to full consider the interrelation, influence direction and force between the vulnerability influence factors set and the factors, this paper integrates DEMATEL, ISM and ANP together to build a integration method, which makes up for their respective shortcomings. It provides an integrated framework and practical tool for identification and evaluation of the vulnerability influence factors. Then, through questionnaire survey to the experts in this field, this paper uses the experts' data to carry out empirical research. The factors' interactive relationship and their effect intensity to vulnerability are parsed out by applying DEMATEL-ISM-ANP integrated method. After that, this paper uses the synthetic index method to carry out vulnerability assessment, identify the key factors and analyze their influence mechanism.

According to theoretical and empirical research above, this paper draws some conclusions. Firstly, the vulnerability factors have an obvious hierarchical and network structure, which can be divided into four types: driving factors, interactive factors, random factors and independent factors. The hybrid weights rank in the top six are mismatch between waste supply and demand, poor resourcing efficiency, ineffective recycling policies, limited recycling knowledge of consumers, small scale of investment and financing and low level of industrial agglomeration. Secondly, the vulnerability index of network for municipal wastes resource utilization is 3.351, which is in medium to high level. The sensitivity, inadequate adaptability and insufficient resilience are all in medium and high level too. Thirdly, Mismatch of waste supply and demand is the key factor to affect the system's sensitivity, poor resourcing efficiency and non-standard recycling behavior reduces the system's adaptive capacity, limited recycling knowledge of consumers, ineffective recycling policies and small scale of investment and financing are the main reasons for weak resilience. Among them, mismatch of waste supply and demand, limited recycling knowledge of consumers are random factors, so it is necessary to further explore the causes of their changes. Lastly, in order to weaken vulnerability impact, this paper put forward some countermeasures to solve the six key problems above.

Key Words: municipal waste; resource utilization; vulnerability; DEMATEL-ISM-ANP integrated method; influence mechanism

(责任编辑: 舟 山)