

# 城市固体废弃物资源化共生网络脆弱性研究 ——基于某市无废城市建设的案例分析

王秋菲,曹梦涵

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**城市固体废弃物资源化共生网络是实现无废城市的最佳途径,城市固体废弃物共生网络容易受多种因素的影响,包括再生资源需求萎缩或标准的变更,突破性技术的出现以及由于市场、技术、政策中存在的信息不对称引发的利益冲突等。资源化共生网络系统的动荡或非正常运行,制约了无废城市的建设和发展。基于此,研究梳理了中国无废城市的建设背景及发展过程,以国内某城市为例,介绍了该市无废城市建设的基本情况和成果,构建了固体废弃物资源化共生网络,并运用MATLAB程序进行了仿真实验。研究表明:该市的城市固体废弃物共生网络尚未形成嵌套模式,不同产业链的共生模式存在差异,并从推进信息化建设、关注核心企业运行和开展技术创新3个方面对城市固体废弃物资源化共生网络的脆弱性进行了治理。

**关键词:**固体废物;资源化处理;共生网络;仿真实验

**中图分类号:**X705

**文献标志码:**A

**引用格式:**王秋菲,曹梦涵.城市固体废弃物资源化共生网络脆弱性研究:基于某市无废城市建设的案例分析[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(2):164-171.

城市固体废弃物资源化共生网络指的是将废弃物视为原料直接运用<sup>[1]</sup>。在资源化过程中,通常要进行能量、信息、物质和价值的交换,因此,城市固体废弃物资源化共生网络是一个复杂的嵌套系统。城市废弃物资源化共生网络是实现城市可持续发展的主要途径之一,可以最大限度地实现城市内废弃物的回收利用。

建设无废城市目的是尽可能地减少城市产生的固体废弃物,使资源得到充分利用和处理。城市共生旨在城市内建立废弃物循环回收网络,最大限度地利用资源是目前无废

城市建设的最佳途径<sup>[2]</sup>。近年来,由于不确定性因素的增加,许多领域开始研究脆弱性问题,例如生态工业园发生瘫痪或运行失效的情况,因此,共生网络脆弱性的研究已成为该领域关注的焦点<sup>[3]</sup>。一旦城市固体废弃物资源化共生网络受到外部影响,风险会快速聚集,网络运行效率会表现出一种非正常状态,这种状态严重时 would 波及整个网络。

废弃物共生网络是无废城市建设的重要载体,而共生网络的脆弱性对其运行存在很大的威胁。因此,笔者以某市为例,分析该城市固体废弃物资源化共生网络的模式及其

脆弱性,并从推进信息化建设、关注核心企业运行和开展技术创新 3 个方面给出参考意见。

一、理论基础与文献梳理

1. 共生网络研究文献综述

“共生”这一概念最早出现在生物学领域,随着研究的不断深入,到 20 世纪五六十年代,共生不再是一个生物学范畴的概念,共生网络相关研究可划分为抽象哲学、工业共生、社会科学共生 3 个层面。在哲学领域,“共生”主要被学者理解为互利,主要可分为偏利共生和互惠共生;在工业领域,“共生”的含义是“企业通过共生这种关系,可以促进与其他企业的沟通合作,在保护环境和自然的前提下,提高企业自身的生存和发展能力”<sup>[4]</sup>;在社会科学领域,“共生”是指行业之间建立一种长期且稳定的关系,以此降低运营成本、提高沟通效率。

国内学者对共生网络的相关研究可以概括为理论与应用两方面。国内最初研究聚集在研究共生理论方面。学者更多地偏向探索理论共生的基本概念和内涵<sup>[5]</sup>,在对共生关系的系统阐述分析的基础上,学者们提出了共生界面、共生度的测量模型和共生演化动力模型,并对共生的稳定性进行了评估。对共生的应用研究包括产业共生层面、工业共生层面与区域以及城市群关系层面。

2. 城市废弃物网络研究文献综述

Graedel T E 等<sup>[6]</sup>是最早提出“产业共生不仅仅涉及工业共生”这一观点的,指出产业共生可以扩散到产业的各个领域。Berkel V R 等<sup>[7]</sup>基于工业共生的相关理念,首次将“城市共生”定义为一种现象,并认为城市的各种废弃物可以当作企业生产的原材料或运行的能源。

在国外研究的基础上,国内学者逐渐丰富了城市废弃物网络的内涵。刘光富等<sup>[8]</sup>主张城市共生囊括诸多类型的产业共生,并不是单一、局限于某种类型的。张其春等<sup>[9]</sup>首次将“城市废弃物资源化共生网络”概念

化,并认为该网络与城市共生网络和产业共生网络存在密切关联。

3. 网络脆弱性研究文献综述

有学者在研究网络脆弱性后对其含义进行了概括,认为其是网络中某组件发生故障后对整体功能产生的影响。在逐渐完善脆弱性定义的过程中,有学者认为与供应商进行紧密协作是企业实现目标所必需的手段,学者们还研究了不同风险对网络脆弱性的影响<sup>[10]</sup>。与此同时,对复杂网络的研究为研究系统的脆弱性提供了新的方向。

国内学者逐步完善充实了脆弱性的定义与内涵。学者们总结了脆弱性<sup>[11]</sup>的含义,从最初侧重于对损害或干扰的关注,脆弱性的内涵也在不断深化和延伸,逐渐延伸出一系列相关的词语,比如脆弱、敏感、恢复能力等。

二、研究设计

1. 研究方法

笔者侧重对城市固体废弃物资源化共生网络进行研究,主要采用单案例研究法,一方面,单案例研究有助于对研究对象进行纵向分析,可以描述研究对象的特征并揭示其逻辑规律;另一方面,通过单个案例研究,可以进一步探索废弃物共生网络的运行模式,全面、系统地分析其在实践中的运行规律。

2. 研究对象

该市占地面积约 4 102.9 m<sup>2</sup>,人口约 138.97 万。该市地势平缓,无山多水,交通条件便利,323 个村级公路覆盖沥青路面。截至 2020 年,生活垃圾、市政污泥等 6 类废弃物合计约 69 万 t,对生活产生的废弃物无公害处理率高达 100%。从交通建设、分类设施和城市规模等方面来看,其条件符合开展城乡环卫一体化的需求,在研究方面具有代表性。

该市无废城市建设的总目标可以概括为 3 个体系、4 个预期、5 种颜色。3 个体系是建立技术体系、监管体系和制度体系;4 个预期是打造“辽河油田‘无废矿区’模式”“石化及精细化工产业绿色高质量发展模式”“城乡固废一体化、全过程、精细化的大环卫模式”

和“大洼区整区推进畜禽粪污资源化利用模式”;5种颜色分别是黑色、红色、蓝色、金色和绿色。具体包括:通过石油石化行业废弃物(黑色)的减量化和高价值处理、危险废弃物(红色)的全流程标准化管理和全面安全管控、生活废弃物(蓝色)的全域化和协同化处理、农业废弃物(金色)的源头生产绿色化、回收过程标准化,实现精细化(绿色)管理模式,推进资源枯竭城市转型,推动“无废城市”建设。

三、固体废弃物共生网络脆弱性的案例研究

1. 固体废弃物资源化共生网络拓扑结构

根据无废弃物城市建设规划,该市将在辽东湾新区建设回收循环示范园区,该园区

建成后将成为复杂的城市固体废弃物资源化共生网络。该网络由工业、矿山、城市生活和农业废弃物回收利用4部分组成,其中,工业废弃物回收利用又分为石化、现代制造业和精细化工<sup>[12]</sup>。

废弃物资源化共生网络主要通过能量、产品和废弃物的交换建立产业共生关系,其主要环节包括:①城市生活废弃物→焚烧→发电→各类企业;②城市生活废弃物→焚烧→余热蒸汽→各类企业;③谷物稻壳→燃烧→发电→各类企业;④农作物秸秆→催化水解→燃料→各类企业;⑤植物油副产品→综合处理→化工产品→各类企业;⑥油泥→综合处理→新燃料→各类企业。每个链条互相连接,整个共生网络呈现网状结构,共生网络涉及的核心企业及功能项目如表1所示。

表1 共生网络的分类

共生单元类别	主要项目	主要企业
居民	生活垃圾填埋场	某市京环环保科技有限公司 某市鑫利通再生资源有限公司
	医疗垃圾焚烧	
	污泥干化	
	生活垃圾焚烧发电	
工业	油污泥资源化利用、无害化处置	晟鸿建设工程有限公司
	建筑垃圾综合利用及再生骨料和砌块砖	某市禹王防水建材集团
	废旧轮胎资源再生循环利用	某市鑫安源化学工业有限公司
	化工催化再生回收和利用综合项目	某市辽河油田远达油污泥处理利用有限公司
矿山	钻井环节“泥浆不落地”工艺	中油辽河油田分公司
	落地油泥源头减量	中油辽河油田兴隆台采油厂
	废弃泥浆处理后铺垫井场、道路及其他建筑材料等	中油辽河油田分公司长城钻探公司 某市辽河油田辽河实业集团有限公司
	油污泥资源化利用、无害化处置	某市辽河油田远达油污泥处理利用有限公司
农业		曙光采油厂
	植物油副产品综合利用	华润某市热电厂
	谷物稻壳燃料集中供热、供电	某市金昌畜牧有限公司
	农作物秸秆综合利用	某市北方沥青股份有限公司
	畜禽粪污资源化利用模式	辽东湾鑫海源生物科技有限公司 益海嘉里食品工业有限公司 振兴生态集团发展股份有限公司

研究以某市新区循环化改造示范园区内部及周边地区与废弃物资源化有关的企业为节点,以企业间的物质、能量和信息交换作为边。尽管网络中企业间存在物质、能量和信息流动的方向性问题,但共生关系中最为常见的是互利共生<sup>[13]</sup>。在共生网络稳定性的研究中,有研究者指出当共生网络中一个企业的生产经营情况出现问题,可能会导致整

个共生链条上的企业生产运营陷入瘫痪。下游企业用于生产的原材料主要来自于上游企业生产的废弃物或副产品。因此,下游企业的生产在很大程度上依附于上游企业,这增加了下游企业生产运营的不稳定因素。同样,上游企业的生产运营情况也在很大程度上受到下游企业生产运营情况的影响,进而可能会发生生态工业园产业资源化共生网络

不稳定的现象。可见,工业共生网络运行中企业间是相互影响的。研究从废弃物资源化企业间互利共生和相互作用影响的角度出发,考虑到复杂网络理论在城市固体废弃物资源化的研究中尚处于起步阶段,因而将网

络简化为一个有向加权的网络来研究。通过对该市废弃物资源化企业进行调查发现,共有 42 家企业之间具有紧密联系,得出邻接矩阵,并利用 Ucinet 软件得出了城市固体废弃物资源化共生网络拓扑结构(见图 1)。

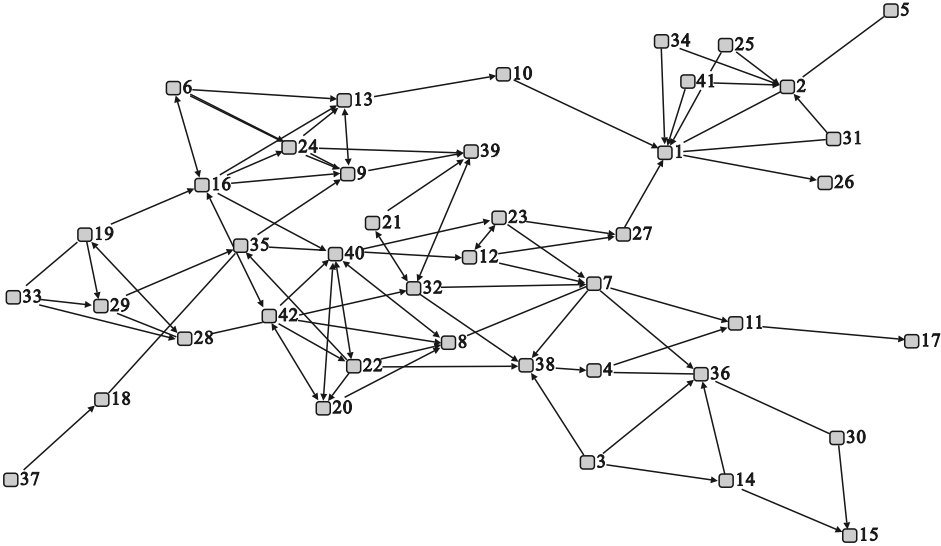


图 1 城市固体废弃物资源化共生网络拓扑结构

相关统计量通过 MATLAB7.0 编程计算得到,结果如表 2 所示。由表 2 可知,该生态工业园企业个数  $N$  为 42,企业间的边数  $M$  为 145,网络的平均度  $K$  为 3.452。此外,可以观

察到,平均路径长度  $L$  为 3.415,网络直径  $D$  为 8。基于以上数据,详细分析其共生网络的基本拓扑性质,可以分为两方面:一是分析无标度性;二是分析小世界性。

表 2 某市城市固体废弃物资源化共生网络统计特征参数

节点数/个	边数/条	网络平均度	平均加权重	网络密度	聚集系数	平均路径长度	网络直径
42	145	3.452	15	0.084	0.404	3.415	8

(1) 无标度性

识别某一网络有无标度性往往根据节点度分布来确定,对于这一关键依据选用分布函数来表示。若网络为无标度网络,则其度分布通常为幂律分布,而小世界网络和随机网络的度分布则遵从指数分布。当横纵坐标值均取对数时,废弃物资源化共生网络的节点度数累积分布近似为一条直线。用最小二乘法得到其拟合曲线,表达式为

$$p(k) = 0.3258k^{-0.9523} \tag{1}$$

式中: $p(k)$ 指一个任意选择的节点恰好有边边的概率,为网络中度数为节点  $k$  的个数占网络节点总数的比值。

共生网络是无标度网络,这说明网络中存在一些节点,它们的数量越少度就越大,这

些节点在网络中占据着主导地位,影响着园区内度数相对较小的节点。同时,由于无标度网络具有“优先连接”的特征,因此,共生网络中新成立的企业更倾向于与网络中度较大的节点相连。

(2) 小世界性

当共生网络具有小世界性时,其通常呈现出聚集系数较高和平均路径长度  $L$  较短的状态。满足式(2)的网络可以被判定为具备小世界性。

$$\frac{C}{C_{rand}} > \frac{L}{L_{rand}} \tag{2}$$

式中: $C_{rand}$ 为聚集系数, $C_{rand} = \frac{k}{N}$ ;  $L_{rand}$ 为平均路径长度, $L_{rand} = \frac{\ln k}{\ln N}$ ;  $N$ 为节点数,取值为



42; $k$  为平均度。

研究结果表明:该城市固废资源化共生网络平均最短路径的长度与随机网络接近,且其聚类系数大于随机网络的聚类系数,满足式(1),由此可以得出该共生网络具有小世界性的特征。同时由表 2 可以看出,该园区共生网络的平均路径长度为 3.415,可以理解为连接两个节点的最短关系链平均通过 3~4 家企业相连。在实证研究中,有的企业可以通过节点相连,有的企业之间没有边连接,但平均路径比较小;聚类系数为 0.404,可以理解为共生网络中两个节点之间有边相连的概率是 40.4%,聚类系数相对较高。网络聚类系数越大,说明网络中企业的交流就越方便,网络集团化的程度也就越高。

2. 脆弱性仿真实验及数据分析

共生网络存在多种失效模式,关键失效模式可以概括为边失效、单节点失效和多节点失效。结合已有研究结果发现,多家企业

在同一时间出现问题的可能性不大。因而,仿真单节点以及边失效模式就只在连锁故障失效效应下开展。

(1) 单节点失效模式

在研究中,依次去掉城市废弃物共生网络中的节点企业和与节点直连的所有边,利用 MATLAB 程序计算网络效率的前后变化,得到各节点失效后共生网络的脆弱性值。此外,还计算了工业共生网络中每个节点的介数(见表 3)。由表 3 可知,不同节点的脆弱性值差异较大,移除失效的节点 7 得到的脆弱性值最大,对应的脆弱性值为 34.06%;移除失效的节点 9 得到的脆弱性值最小,排名第十,相应的脆弱性值为 9.21%;节点 1、7、9、11、12、32、35 和 38 均出现在脆弱性和节点介数前十中,并且节点 7 在脆弱性和节点介数排名中均位列第一,这说明移除节点介数高的节点所得到的脆弱性值也就越大。

表 3 单节点失效模式下的脆弱性及节点介数(前十名)

序列	以脆弱性值降序排列			以节点介数降序排列		
	节点	$V(S,T)/\%$	节点介数	节点	$V(S,T)/\%$	节点介数
1	7	34.06	0.595 7	7	34.06	0.595 7
2	32	22.75	0.247 6	1	19.33	0.336 6
3	1	19.33	0.336 6	35	11.97	0.305 5
4	11	15.10	0.226 8	12	12.31	0.305 5
5	12	12.31	0.305 5	32	22.75	0.247 6
6	35	11.97	0.305 5	11	15.10	0.226 8
7	38	11.84	0.144 5	9	9.21	0.219 5
8	21	10.43	0.047 6	36	7.54	0.188 4
9	39	10.34	0.063 4	4	8.13	0.168 3
10	9	9.21	0.219 5	38	11.84	0.144 5

注: $V(S,T)$  为不同模式下的脆弱性值,取值范围为[0,1]。

在拓扑网络结构的构建中,节点 1、7、9、11、12、32、35 和 38 对应不同产业链的核心企业。节点与核心企业的对应关系如表 4 所示,这些企业都是相关领域的龙头企业。节点 7 京环环保科技有限公司(以下简称“京环集团”)负责对该市生活废弃物进行分类、收集、运输和后续处理,处理过程中产生的热量可供循环改造示范园区内的其他企业使用。在实地调研过程中发现,居民固体废弃物回收和运输并不能给京环集团带来丰厚的利润,近年来该公司在政府财政资金扶持下得以继续经营。如果京环集团在运营中出现

问题,居民废弃物回收链条将出现震荡,将直接影响共生网络的运行。节点 32 晟鸿建设工程有限公司主要从事建筑废弃物综合利用,脆弱性值也达到了 22%,与之发生共生关系的企业脆弱性值均小于 5%,说明晟鸿建设工程有限公司在建筑废弃物资源化产业中属于附属企业。化工和农业领域企业之间的关系要复杂一些,其节点企业脆弱性值比居民和建筑垃圾资源化的脆弱性值要低。综合来说,该市城市废弃物资源化共生网络模式仍处于平等与嵌套之间。建筑、化工、农业和居民 4 个领域之间没有形成嵌套关系,它们

是独立运作的。而居民与建筑废弃物资源化共生网络呈单中心依托模式,其脆弱性最强。

表 4 节点企业归属领域

节点	企业名称	归属领域	废弃物处理
7	某市京环环保科技有限公司	居民废弃物	城市垃圾收集、运输
32	晟鸿建设工程有限公司	建筑废弃物	建筑垃圾综合利用生产骨料和砌块砖
1	益海嘉里食品工业有限公司	农业废弃物	谷物稻壳加工为燃料
11	某市生活垃圾焚烧发电厂	废弃物	垃圾、污泥发电
12	某市有机垃圾生化处理厂	废弃物	综合处理发电
35	曙光采油厂	农业废弃物	综合利用秸秆
38	某市北方沥青股份有限公司	农业废弃物	综合利用秸秆
21	辽宁亿方石油化工有限公司	化工废弃物	对废硫酸进行回收和再生
39	辽东湾鑫海源生物科技有限公司	农业废弃物	处理植物油副产品
9	某市鑫安源化学工业有限公司	化工废弃物	化工催化利用综合项目

节点失效脆弱性值与节点介数( $B_v$ )的关系如图 2 所示。由图 2 可知,在该网络中,脆弱性值与节点介数大致呈现正相关,但在某些位置会出现震荡的情况,这与网络冗余有关。节点数量越多,通过该节点的最短路径所占的比例就越大。由于网络中存在的冗余性,一些功能损坏的节点会被其他节点替换。

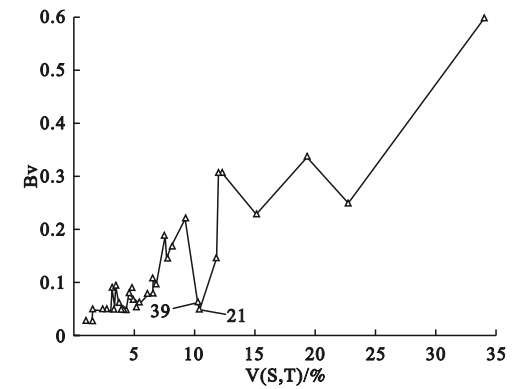


图 2 单节点失效下节点介数与节点脆弱性关系

图 2 中出现了 2 个异常点,分别是节点 21 和 39,节点 21 为辽宁亿方石油化工有限公司,脆弱性值为 10.43%,节点介数为 0.047 6,远低于同行业核心企业。辽宁亿方石油化工有限公司从事废酸回收利用,网络中类似的企业很少,其硫酸年回收量较大。如果企业不能回收大量的废酸,整个网络的效率就会受到影响,因此脆弱性就更大。节点 39 为辽东湾鑫海源生物科技有限公司,该公司主要经营植物油副产品,由于该市农业废弃物的回收利用主要集中在秸秆和稻壳,植物油副产品资源型企业较少。该公司可处

理 10 万 t 的植物油废弃物,对废弃物资源化产业的重要性不言而喻。

(2) 单边失效模式

单边失效模型主要是模拟某一物质/能量供应不足或者产品不合格,会导致工业链关系的中断。研究采取将工业共生网络中的企业节点之间的连接边依次去除的方法,计算了工业共生网络中每条边的介数(见表 5)。由表 5 可知,边都出现在脆弱性和边介数前十的序列中。与节点失效模式的结论类似,去除边介数较大的边对网络的影响更大。此外,相较于去除节点对网络的影响,去除边对网络的影响比较小。删除边导致的脆弱性值最高为 8.82%,但删除单个节点导致的脆弱性的最大值为 34.06%,这是因为当一个节点被移除时,连接到该节点的所有边都被移除了,因此对系统的影响更大。

由表 5 可知,10 条失效边中有 7 条涉及节点 7、11 和 1,而这 3 个节点在点失效中脆弱性也是最大的。边  $e_{11,7}$ 、 $e_{1,7}$  的脆弱性最大,这两条边分别代表居民废弃物到发电厂、居民废弃物到食品发电厂。该市京环集团负责市区居民垃圾的回收,同时也负责乡村地区的废弃物回收,乡村废弃物回收包含了稻壳的回收。在脆弱性值前十名的失效表中,有 3 条边涉及节点 7,说明节点 7 的点失效脆弱性也是最高。有 2 条失效边涉及节点 11、节点 1,这两个节点都是利用废弃物发电的企业。

表5 单边失效模式下的脆弱性及边介数(前十名)

序列	以脆弱性降序排列			以边介数降序排列		
	边	$V(S,T)/\%$	边介数	边	$V(S,T)/\%$	边介数
1	$e_{11,7}$	8.82	0.152 4	$e_{1,7}$	6.17	0.166 5
2	$e_{1,7}$	6.17	0.166 5	$e_{11,7}$	8.82	0.152 4
3	$e_{2,1}$	4.03	0.041 5	$e_{7,1}$	2.80	0.136 0
4	$e_{4,11}$	3.64	0.123 2	$e_{12,7}$	1.47	0.134 1
5	$e_{36,4}$	3.28	0.092 7	$e_{4,11}$	3.64	0.123 2
6	$e_{26,1}$	3.18	0.023 8	$e_{36,4}$	3.28	0.092 7
7	$e_{35,9}$	2.92	0.092 7	$e_{35,9}$	2.92	0.092 7
8	$e_{17,1}$	2.80	0.136 0	$e_{32,7}$	0.59	0.082 9
9	$e_{5,2}$	1.52	0.023 2	$e_{7,11}$	0.59	0.056 1
10	$e_{12,7}$	1.47	0.134 1	$e_{16,9}$	1.07	0.051 8

边失效脆弱性值与边介数的关系如图3所示。由图3可以看出,在该网络中,脆弱性与边介数大致呈现正相关,但相较于单节点失效模式下的结果,单边失效模式下震荡的情况更严重,这种情况主要发生在介数值较大时。而当介数值较小时,去除对应的边对网络的影响较小,点失效比边失效对网络的影响更大。

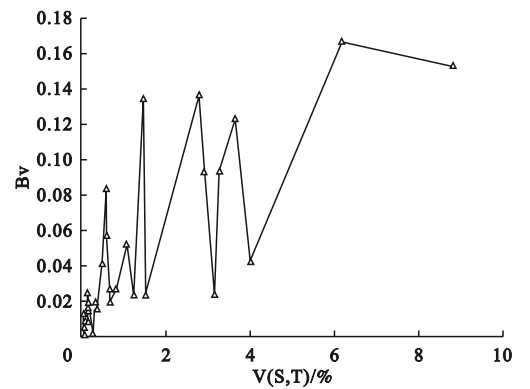


图3 单边失效下边介数与边脆弱性关系

四、结论与建议

1. 结 论

通过对某市城市生活废弃物资源化共生网络脆弱性的仿真分析,可以得出以下结论:

(1) 该市城市生活固体废弃物资源化共生网络尚未形成嵌套模式,不同产业链的共生模式存在不同。居民废弃物资源化和建筑固体废弃物资源化共生模式是单点依托,化学和农业固体废弃物资源化呈现平等性。

(2) 该市城市生活废弃物共生模式的点

失效对网络的影响更大。其中,城市居民垃圾收集和运输的核心企业对网络影响最大,其次是建筑固体废弃物资源化的核心企业。

(3) 该市城市生活废弃物网络中不同产业链的脆弱性也不同,其中,居民废弃物资源化产业链的脆弱性最大。

2. 建 议

(1) 推进城市固体废弃物信息化建设,实现废弃物收集信息和资源化信息监控和管理。城市固体废弃物回收共生网络的信息化建设应重点抓好以下两个方面:一是拓展废弃物“互联网+”体系,与省网对接。生活废弃物、餐厨废弃物等固体废物全部纳入“互联网+”系统,并接入辽宁省“互联网+”监管系统;二是建立废弃物资源管理云平台,将与废旧资源相关的企业纳入管理云平台。

(2) 关注核心企业的运行,发现异常及时调整。共生网络中的核心企业是废弃物回收利用的关键环节,及时发现核心企业存在的问题非常重要。政府应鼓励大型企业开发并应用物流监测网络布局技术体系,将企业信息接入政府监测平台。同时,完善利益共享机制,防止核心企业垄断。

(3) 开展技术创新示范,构建技术创新网络。该市城市废弃物回收共生网络已初步形成,但还需加大研发投入。可针对城市固体废弃物回收共生网络的特点进行技术研发,建立有效的技术交流共享机制,比如建立企业技术协会、组织志愿学习团队、提高企业动态学习能力和市场快速反应能力等。

参考文献:

[1] 金友良,沈玖柒. 废弃物资源化理论研究综述:价值流转视角[J]. 资源开发与市场, 2018,34(3):322-329.

[2] 张其春. 产业共生网络脆弱性研究述评与展望[J]. 太原理工大学学报(社会科学版), 2018,36(2):37-44.

[3] 戚杨健,孔维泽,王晓燕. 基于城市固体废弃物资源化共生网络的无废城市建设研究:以绍兴市为例[J]. 环境污染与防治, 2020,42(12):1549-1552.

[4] ENGBER H. Industrial symbiosis in Denmark [M]. New York: New York stern school of business press, 1993.

[5] 李焕荣. 基于共生观的战略网络关系进化动因研究[J]. 科技进步与对策, 2007(6):31-33.

[6] GRAEDEL T E, ALLENBY B R. 产业生态学 [M]. 施涵,译. 北京:清华大学出版社, 2004.

[7] BERKEL V R, FUJITA T, HASHIMOTO S, et al. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the eco - town program 1997—2006 [J]. Journal of environmental management, 2009,90(3):1554-1556.

[8] 刘光富,鲁圣鹏,李雪芹. 产业共生研究综述:废弃物资源化协同处理视角[J]. 管理评论, 2014,26(5):149-160.

[9] 张其春,郝永勤. 城市废弃物资源化共生网络:概念、特征及体系解析[J]. 生态学报, 2017,37(11):3607-3618.

[10] THUN J H, HOENIG D. An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry[J]. International journal of production economics. 2011,131(1):242-249.

[11] 王岩,方创琳,张蔷. 城市脆弱性研究评述与展望[J]. 地理科学进展, 2013,32(5):755-768.

[12] 李干杰. 开展“无废城市”建设试点 提高固体废物资源化利用水平[J]. 环境保护, 2019,47(2):8-9.

[13] 汝军红,张文玉. 三山岛传统村落整体空间环境共生性保护更新策略[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2022,24(4):325-331.

Vulnerability Study of Municipal Solid Waste Resource Symbiosis Network: Based on a Case Study of Zero-Waste City Construction in a City

WANG Qiufei, CAO Menghan

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Municipal Solid Waste Resource Symbiosis Network (MSWRSN) is the best way to achieve zero-waste cities. However, MSWRSN is vulnerable to a wide range of factors. Examples include shrinking demand for recycled resources or changes in standards, the emergence of breakthrough technological innovations, and conflicts of interest arising from serious information asymmetries in markets, technologies and policies. The system often falters or operates abnormally, constraining the construction and development of waste-free cities. On this basis, this study combs the construction background and development process of zero-waste cities in China. The study specifically takes a city in China as an example and introduces the basic situation and results of a zero-waste city construction in that city. After study in that city, a symbiotic network for solid waste resource utilization is constructed and simulation experiments using the MATLAB program is conducted. The results indicate that the city's MSWRSN has not yet developed a nested pattern, and that there are differences in the symbiosis patterns of different industrial chains. Based on the conclusions of the study, it is proposed to manage the vulnerability of MSWRSN management from three aspects, which include promoting informationization, focusing on core business operations and developing technological innovation.

**Key words:** solid waste; recycling treatment; symbiotic network; simulation experiment

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)