基于系统动力学的电镀行业多层级无废供应链路径

——以广州开发区为例

钟桦琦，卞国建

（生态环境部华南环境科学研究所，广州 510655）

摘要：针对电镀行业含铜废物的环境风险与资源流失问题，构建无废供应链路径推动铜资源循环利用。以广州开发区为实证案例，综合运用实地调研、企业案例分析与系统动力学模型，创新性地提出“企业-园区-区域”三级协同治理框架，对不同情景进行动态仿真。结果表明，单一技术或政策干预效果有限，而整合技术改造、政策激励与平台建设的综合策略能显著提升资源化效率并增强企业盈利能力，验证了多层级协同机制的有效性。

关键词：电镀；铜回收；无废供应链；循环经济；资源化

中图分类号：X781.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)11－0207－09

随着中国电子和半导体产业的迅猛发展，环境问题日益凸显[1]。工业废水中的重金属污染已引发广泛关注。重金属污染具有长期性、累积性和生物富集性，即使微量排放也可能在生态系统中逐渐积累，对水生生物造成毒害，破坏生态平衡，并最终通过食物链威胁人类健康[2-4]。

铜因其优异的导电性和结构柔韧性，在电子制造过程中不可或缺，广泛应用于印刷电路板（PCB）和半导体生产中的电镀、蚀刻及冲洗等环节[5-6]。这些生产过程中所产生的含铜废水，若未经有效处理而直接排放，将导致水质恶化，加剧对水生生物多样性的损害，并可能通过饮用水或食物链途径影响人类健康[7]。随着电子产业规模持续扩张，含铜废物的产生量逐年增加，传统“末端治理”模式已难以满足日益严格的环境标准和资源循环要求。在此背景下，如何实现铜污染的有效防控与资源的高效回收，成为制约行业可持续发展的关键瓶颈。

为系统应对中国电镀行业含铜废物污染管控与资源循环利用的双重挑战，响应“无废城市”建设与产业绿色转型的战略需求，构建铜回收全流程可持续管理体系势在必行。在此背景下，无废供应链作为一种集成化、系统性的管理理念逐渐受到关注。该理念强调在从原料获取到产品报废的全生命周期中，通过重复使用、再生循环等方式，实现物料的最大化利用，避免废弃物进入环境，从而构建资源闭合循环体系[8-12]。

1973年，国际上首次提出了“无废”概念，但当时主要关注各种化学品的有效收集和回收利用。20世纪90年代末开始，“无废”理念开始被纳入城市与国家层面的综合治理框架。日本开始实施并持续推进循环型社会建设，依托废弃物减量化、资源循环使用与废弃物再生利用等措施，逐渐成为世界上资源利用率最高的国家。当前日本每年产生近4 400 t废物，仅有1%进入垃圾填埋场[13-14]。2003年，美国旧金山确定了2020年实现“零垃圾”的愿景，即不向垃圾填埋场、焚烧厂等输送任何废物。目前，旧金山市原本需要进入填埋场的垃圾中有80%得到回收利用。2011年，加拿大温哥华启动最环保城市行动计划，通过减少、再利用、回收、循环等方式加强废弃物综合管理，2016年城市废弃物的焚烧和填埋率仅为38%。2018年，该市发布了《无废2040年》战略计划，提出2040年实现城市“零废物”目标[15]。新加坡将2019年定为“迈向零废弃”年，并提出可持续发展蓝图，旨在建立“零废弃国家”[16]。联合国《2030年可持续发展议程》确认，必须在2030年之前在全球大幅度减少废物。欧盟委员会先后发布了“迈向循环经济：

收稿日期：2026-02-03

基金项目：青年科技创新项目（PM-zx097-202406-216）

作者简介：钟桦琦（1995—），女，浙江杭州人，硕士，工程师，研究方向为固体废弃物处理；通信作者卞国建（1979—），女，江苏盐城人，硕士，高级工程师，研究方向为固体废弃物处理。

“欧洲零废物计划”和“循环经济一揽子计划”，旨在将欧盟打造成可持续、低碳、资源高效的经济体[17]。但目前国际上对于“无废供应链”的直接论述较少，相关研究多集中于闭环供应链、绿色供应链等关联范畴。Song等[18]指出，为了实现“零废弃”目标，重要的战略和方法必须切实可行，从原材料提取到最终处置、清洁生产、生态设计、生态标签和基于闭环的供应链管理。2021年，Awasthi等[19]提出，零废弃概念是解决固体废弃物问题的一个有效而突出的系统，也是推动资源供应链改革的一个系统，它摒弃了陈旧的方式，使整个产品或副产品材料得到回收或再利用。

中国在固体废物管理和资源化利用方面已积累了大量经验，为应对固体废物污染防治的新形势，协同推进经济高质量发展和生态环境高水平保护，提出“无废城市”概念，致力于从城市整体层面深化固体废物综合管理改革，以创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念为指导，通过推动形成绿色发展方式和生活方式，最大限度推进固体废物源头减量和资源化利用，构建固体废物填埋量降至最低的城市发展模式，是对国际“无废”理念和实践经验的丰富和创新发展[20-22]。然而，现有研究与实践多聚焦于宏观城市层面，针对特定行业构建“无废供应链”的研究尚显匮乏。单明威等[23]提出，在“无废城市”建设中开展“无废供应链”管理，从源头实现生态环境保护和废弃物污染防治具有巨大的应用潜力。同时也分析了“无废城市”建设中推广“无废供应链”的阻碍。谭志雄等[24]指出基于绿色供应链管理的“无废城市”建设模式，强调了绿色供应链对于实现资源回收和循环利用的重要性。刘雨青和刘婷[25]也论证了绿色供应链对于推动“无废城市”建设的积极作用。这些研究表明，通过优化供应链管理、加强废物资源化回收利用，可以有效减少环境污染，推动城市实现无废化的发展目标。但整体而言，针对电镀行业等特定领域的无废供应链实践研究仍显匮乏，亟须结合行业特点构建可复制、可推广的路径模型。

基于以上背景，研究聚焦于中国铜资源对外依存度高、供应链风险突出的现实，以及电镀铜在关键产业中不可或缺且污染显著的特点，以提升铜资源循环利用率与供应链韧性为核心目标，通过对广州经济技术开发区电子制造企业的实地调研与案例分析，系统梳理含铜废物的产生特征与现有处理模式，并借助龙头企业的工艺改进实践，验证技术与管理措施对源头减排与资源再生的促进作用。在此基础上，研究旨在构建一套适用于电镀行业的零废弃供应链实施路径模型，为推动行业绿色转型、实现固体废物“减量化、资源化、无害化、低碳化”提供理论依据与实践参考。

1 研究方法

研究采用描述性分析方法以及系统动力学。数据来源于广州经济技术开发区企业的实地调研数据、经核实的环境影响评估(EIA)报告、工业废水平衡表和项目升级报告等二手数据。

1.1 广州开发区电镀企业含铜处理现状调查

广州经济技术开发区是中国领先的电子制造和电镀工业园区，研究采用实证调查与情景建模相结合的设计，基于真实工业数据评估含铜废物流与回收机会，并预测不同发展情景的长期影响。选取区内8家从事表面处理业务的龙头企业，其主要采用阳极氧化和蚀刻技术，电镀工艺产生大量含铜废物，包括高浓度含铜废液、含铜废水和含铜污泥。

1.2 电镀行业无废供应链路径模型的核心框架

研究构建的“无废供应链”模型并非局限于单一理论，而是融合了产业集聚理论、环境规制理论与闭环供应链理论的核心理念，形成了“理论基础-模型构建-实证分析”的完整研究逻辑链。模型在闭环供应链理论的全程物质循环思想指导下，以产业集聚理论解释协同枢纽的形成机制，并以环境规制理论阐明外部制度驱动的作用，最终在“企业-园区-区域”3个层面形成有机联动的系统性路径，为后续实证分析提供理论支撑与结构依据。

(1)在微观基础层面，模型依托闭环供应链理论，聚焦企业内部的物质与能量循环优化。其目标是通过清洁生产技术改造与智能化过程管控，实现生产系统内部的物料循环最大化。具体路径包括革新关键工艺节点，如推广水平连续电镀线和高利用率蚀刻液，从而在源头上将单位产品废水产生量降低30%～40%。在末端，构建“废水分类收集-分质回用-有价金属回收”系统，将深度处理后的中水回用于对水质要求不高的环节，使企业中水回用率提升至65%以上。该层级的输出是企业的铜减排量、节水数据、资源化产品产量及其经济效益，为园区和区域层面的协同提供了物质流与价值流基础。

(2)在中观协同层面，模型以产业集聚理论为依据，构建跨企业的资源协同枢纽。由于单一企业受技术经济性限制难以实现全循环，园区闭环旨在通过建立“废物-原料”的产业共生网络，实现资源优化配置。依托企业绿色采购订单的聚合效应，构建

了一个数字化、市场化的废物资源化交易平台。该平台通过赋予每批次含铜废物可追溯的“数字身份证”,实现供需智能匹配与线上交易,将废蚀刻液等从处置负担转化为按标准铜当量交易的资源。在此模式下,源头企业因废物减量而降低处置成本甚至获得收益,专业处理商获得稳定原料,政府则借助平台数据实现精准监管,最终形成一个基于共同利益、通过演化博弈趋向稳定的产业生态系统,为“无废”目标提供了可落地、可持续的中观实现路径。

(3)在宏观保障层面,模型引入环境规制理论,模拟政策与市场机制对系统演化的驱动作用。区域层面超越了地理集聚,通过制度设计与市场构建,连接上游废物产生者、中游处理者与下游再生材料使用者。模型设置了延伸生产者责任、绿色供应链管理、资源化产品强制使用比例等政策变量,模拟其对下游企业采购再生铜意愿的激励效果。通过政策干预与市场信号的共同作用,在区域层面引导资源流向高附加值、低碳排的循环链条,从而为整个无废供应链提供稳定的制度环境与系统韧性,最终实现从被动治理向主动循环的系统性转型。

1.3 处理工艺分类与铜资源回收无废供应链情景模拟

系统动力学(system dynamics)是最早进行建模的方法之一,其非常适用于由多重因果反馈关系构成的动态复杂系统,而且并不像其他数据模型方法那样对数据的精确性要求很高,而且作为一种研究工具,它可以很直观地反映系统的因果关系[26-27]。系统动力学所具有的这些特性能够比较有效地反映铜资源回收在相关因素驱动下,是否能有效实验其无废供应链路径的内容,仿真和控制手段又能为研究者提供有效的分析与决策依据。因此,通过 Vensim 软件模拟 2020—2030 年含铜废物资源化累积量与企业净利润增长率的动态演化规律。

在数据获取方面,由于无废供应链涉及大量前瞻性策略与尚未规模化实施的协同模式,传统历史数据难以充分支撑,因此采用了系统动力学中经典的专家调查法进行关键参数赋值与关系函数界定。组建了一个涵盖电镀工艺、环境工程、循环经济政策、供应链管理及工业园区运营等领域的跨界专家及相关行业资深人士小组,共计 50 人,通过多轮匿名的结构化问卷、面对面研讨和模型假设验证,系统地收集、提炼了相关经验估值,从而将定性知识转化为模型所需的定量参数与表函数,确保了模型结构的现实合理性与仿真情景的科学参考价值。

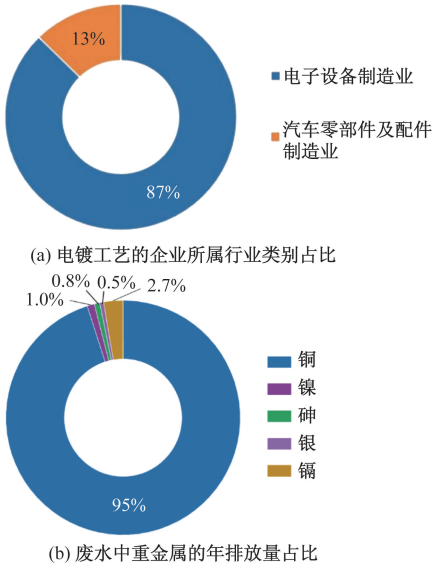
2 结果与讨论

2.1 广州开发区电镀企业含铜处理现状调查结果

通过对 8 家从事表面处理工艺的企业进行深入分析,对电镀工艺企业类别和企业废水中重金属排放进行了详细分类,如图 1 所示。8 家企业共涉及 5 种重金属,分别为铜、镍、砷、银、镉,其中铜排放量最高,占 95%,电镀企业排放量为 33.95 万 t 废水排放,污泥产生总量 56 602 t。

这些企业生产过程中产生的废水和污泥中含有一定量的铜,其废水处理过程的分类是基于铜回收的考量。这些企业主要分为 4 类:废水回收铜的企业、废液回收铜的企业、污泥回收铜的企业以及未回收铜的企业。①从废水中回收铜的企业在废水处理过程中,可采用化学沉淀、离子交换、膜分离等技术手段实现废水中铜的回收;②从废液中回收铜的企业在废水处理过程中,可采用化学沉淀法、电解沉积法、溶剂萃取法、离子交换法等技术手段实现废液中铜的回收;③从污泥回收铜的企业在废水处理后会产生一定量含铜污泥,可采用火法冶金熔炼和湿法冶金熔炼工艺对污泥进行后续处理,以回收其中的铜;④无铜回收企业在废水处理过程中未采取任何措施从废水或污泥中回收铜,造成这一现象的原因有:①企业技术水平有限,无法实现铜的高效回收;②企业认为铜回收成本过高,不值得投资。

此外,基于对广州开发区内重点企业的实地调研,系统梳理了不同来源与工艺环节产生的含铜废水及污泥的关键数据。表 1 汇总了该区域内 8 家典型企业含铜废弃物的排放与回收情况。数据显示,各



(a) 电镀工艺的企业所属行业类别占比

(b) 废水中重金属的年排放量占比

图 1 广州开发区电镀企业分类及重金属排放

表1　8家龙头企业废水、含铜污泥、含铜废液量

序号	生产废水总排放量/(m^3·d^{-1})	生产废水总排放量/(t·年$^{-1}$)	有机废水量/(m^3·d^{-1})	清洗废水量/(m^3·d^{-1})	中水回用量/(m^3·d^{-1})	含铜废液量/(t·年$^{-1}$)	含铜污泥量/(t·年$^{-1}$)
1	12 717.48	4 196 766.75	2 335.74	8 872.14	12 853.58	653.58	2 356.99
2	25 399.27	8 381 759.10	3 486.01	5 576.64	—	692.43	21 863.34
3	2 990.55	986 882.99	2 380.54	1 782.44	2 003.15	439.59	9 761.00
4	758 105.00	250 174 650.00	626.00	3 132.00	—	1 647.83	13.60
5	3 191.46	1 164 882.90	203.20	878.80	—	36.30	25.20
6	8 335.58	2 917 453.00	880.00	7 829.78	5 000.00	23 047.50	246.19
7	11 063.00	4 038 000.00	—	6 895.93	2 869.72	10 927.60	3 011.50
8	23 142.00	7 636 861.50	14 231.10	2 616.00	7 754.70	8 900.50	1 771.00

企业生产废水总排放量差异显著，每天758 105～2 990.55 m^3，反映出不同生产规模与工艺结构对水资源消耗及污染负荷的显著影响。含铜废液与含铜污泥的年产生量也呈现出较大波动，其中含铜废液年总量达46 345.33 t，含铜污泥为39 048.823 t，进一步凸显了在电镀及相关工序中铜资源的流失与二次污染风险。

通过识别具体产生来源与工艺流程，可将含铜废水及污泥主要归因于以下几类生产环节：电路板制造、积层工艺、表面处理、酸蚀废液、电镀添加剂使用、铜膜修复、化学机械抛光(CMP)、引线键合、铜沉积，以及全厂各阶段的混合废水。这些数据不仅明确了含铜废物的产生节点与结构特征，也为后续构建精细化、分级分类的铜资源管理路径提供了关键依据，有助于推动从源头控制到末端回收的全链条铜资源可持续循环体系的建立。

2.2　广州开发区某企业改造案例分析

按照研究提出的无废供应链路径模型，以企业微观闭环、园区中观协同、区域宏观互联的三级架构为主体，并在技术创新、管理革新、政策引导的三重驱动下，将传统线性的、以末端治理为主的排放控制模式，系统性地重构为全流程、多层次的资源循环与零废排放体系，并通过技术与管理创新实现闭环链接。

2.2.1　企业层面

在企业层面，着重分析其中1家龙头企业，该企业通过源头削减、过程循环、末端治理的深度技改，在生产系统内部构建了首道坚固防线。

企业生产过程中涉及含铜原材料主要包括覆铜板、铜箔、铜球、硫酸铜、沉铜液(含硫酸铜)等，在整个生产工艺流程中，金属铜主要进入产品(铜镀层)中，其余主要转移到废水(以Cu^{2+}离子或铜粉形态存在)、废液(以二水合氯化铜、五水硫酸铜、硝酸铜等形态)、固废(以金属铜、硫酸铜等形态)。其中硫酸铜废液、微蚀废液经电解提铜后再进入污水处理系统。蚀刻废液作为危废委外处置。

根据企业实际生产数据，覆铜板、铜箔的平均利用率为75%～80%，报废率为10%～12%；刚性覆铜板单层铜厚度约12 μm，柔性覆铜板单层铜厚度为18 μm，铜箔厚度为12 μm，铜元素的密度为8.9×10^3 kg/m^3；沉铜单面铜层厚度为0.4 μm，电镀铜单面铜层厚度为22 μm。

根据铜元素平衡，线路板中铜层总质量为3 893.47 t/年，约50%铜进入产品，则产品含铜量约1 946.7 t/年，其余在生产过程以开料、蚀刻、减铜、微蚀等工序中损失，最终进入边角料和报废板、废液、废水和废气粉尘中。进入废水系统处理的废液、废水中铜含量共为704.35 t/年，其中硫酸铜、微蚀废液(该部分含铜486.45 t/年)进行提铜后再进入废水系统，约95%铜被电解提取，扣除被提取的铜，其余进入废水处理污泥和外排废水中，外排废水铜含量0.91 t/年，则污泥中铜含量为241.31 t/年。蚀刻废液6 363 t/年不进入废水系统，委外处置，剩余的铜则进入一般固废和粉尘中。

(1)进行工艺优化与清洁生产替代，从源头削减污染物。该公司实现了工艺全过程的精益化与资源化再造。通过全流程进行物料衡算与瓶颈分析，公司精确识别了关键废物产生源。例如，在“微蚀”“活化”“预浸”等大量使用硫酸的工序，通过优化槽液组分、加装自动化给药系统与在线pH监控，显著减少了化学品过量投加和槽液更换频率，从源头降低了含铜废液产生量。技改前后日废水产生量见表2。工艺改造后普通清洗废水从9 495.7 kg/d降至7 829.78 kg/d，有机废水从1043.96 kg/d降至880 kg/d，含镍废水从83.17 kg/d降至47.66 kg/d，含氰废水从103.55 kg/d降至57.85 kg/d。通过优化车间设备布局，并增设自动化硬件、软件设施的方法，提升中水回用率。这些行为不仅提升效率，

表 2　技改前后日废水产生量

废水类型	日废水产生量/kg		日减排量/kg	年减排量/t
	改造前	改造后		
清洗废水	9 495.70	7 829.78	1 665.92	549.753 6
有机废水	1 043.96	880.00	163.96	54.106 8
含镍废水	83.17	47.66	35.51	11.718 3
含氰废水	103.55	57.85	45.70	15.081 0

注:以年工作 330 d 计。

还通过自动化控制实现工艺参数的精确稳定,减少了因操作波动导致的次品和废料。同时,产品结构向“半导体封装基板”等高附加值、更精细产品调整,对生产工艺的洁净度和资源效率提出了内在的更高要求,驱动了全流程的绿色升级。

(2)实现废水废液的分质分类与梯级回用,达到过程循环的目的。该公司将废水严格分为一般清洗废水、有机废水、络合废水、高浓酸废水、含钯废水等 10 余个类别。这种精准分类确保了不同性质、不同价值的污染物能被定向输送至最合适的处理或回收路径,避免了混合后处理难度大增、资源价值归零的困境。并且在现有废水处理基础上增加了硫化钠除重工艺,以确保废水总排口铜稳定达标,将芬顿氧化工艺作为备用,技改后处理工艺由“芬顿氧化+物化沉淀+接触氧化”改为“芬顿氧化(备用)+硫化钠除重物化沉淀+接触氧化”。

(3)该公司对现有中水回用系统新增砂滤器、碳滤器、超滤膜、RO 膜(反渗透膜)等设备,提高回用水产水能力,改造后企业中水回用率由原来 30% 提升至 65%。这标志着该公司实现了从废水处理达标排放到废水处理再生回用的根本性转变。经过深度处理后的高品质回用水,可替代新鲜水用于对水质要求较高的生产环节,形成了“取水-用水-废水再生-回用”的内部水循环,大幅削减了新鲜水消耗和废水外排总量。

(4)在末端治理方面,该公司针对高浓度含铜废液,采用电解回收、选择性离子交换等技术,直接回收高纯度金属铜,作为原料返回电镀槽或外售。

2.2.2　园区/区域层面

在园区/区域层面,该公司并非孤立地实现零废,其实践嵌入了更广阔的无废供应链网络之中,体现了园区与区域层面的协同逻辑。

(1)通过数字化平台实现废物资源化交易。尽管该公司自身对废水进行了深度处理与资源化,但部分低浓度、难处理的含铜废物或富集后的污泥,其最佳出路是进入园区层面的规模化资源化中心。公司可以凭借其精细的分类数据和稳定的废物产出品质,通过园区数字化交易平台,将其作为标准化资源产品出售给专业资源化企业。后者通过规模化、专业化的技术实现更高的金属回收率和更低的成本,创造比企业自行处理更高的经济价值。

(2)响应龙头企业绿色采购与区域政策。该公司产品升级为半导体封装基板,其客户通常有严格的绿色供应链管理要求。公司实施的无废排放体系,是其满足客户环保考核、获取订单的重要竞争力。同时,广州开发区乃至国家层面的循环经济、“无废城市”建设、碳减排等政策,通过财政激励、绿色金融、严格执法等方式,为公司进行大规模技改提供了外部动力与制度保障,推动其将环境成本内化为长期竞争力。

2.3　系统动力学模拟

2.3.1　模型因果关系分析与流程图构建

遵循“理论构建-模型设计-情景模拟-结果分析-策略提出”的技术路线,通过文献研究与实地调研明确研究背景与核心问题,构建无废供应链路径模型与系统动力学反馈回路,采用系统动力学方法构建电镀企业无废供应链路径模型,设计 3 大情景并设定参数,最后结合模拟结果与案例分析,提出针对性的优化策略。

该模型采用典型的环形因果回路图布局(图 2),清晰地展示了系统中各变量之间的动态相互作用与反馈机制。正反馈回路如下。

回路 1:政策-技术-资源化-收益-技术(核心增长回路)链路:税收优惠力度+→绿色金融支持+→技术成熟度+→资源化量+→企业净利润+→技术成熟度+;

回路 2:政策-管理-减排-收益-管理(协同优化回路)链路:绿色金融支持+→管理优化水平+→减排量+→企业净利润+→管理优化水平+;

回路 3:技术-管理-资源化/减排-成本-收益(效率放大回路)链路:技术成熟度+→管理优化水平+→资源化量+→减排量+→市场铜价波动+→原料采购成本→-污染治理成本-→企业净利润+→技术成熟度+→管理优化水平+。

负反馈回路(制约系统过热,平衡风险)如下。

链路:技术成熟度+→技术投入成本+→行业竞争程度+→企业净利润-→技术成熟度+。

无废供应链路径模型流图如图 3 所示。该模型的核心变量是含铜废液、废水、污泥资源化积累量,是衡量供应链从“废物”向“资源”转化效能的关键目标指标。围绕这一核心,模型集成了多个相互关

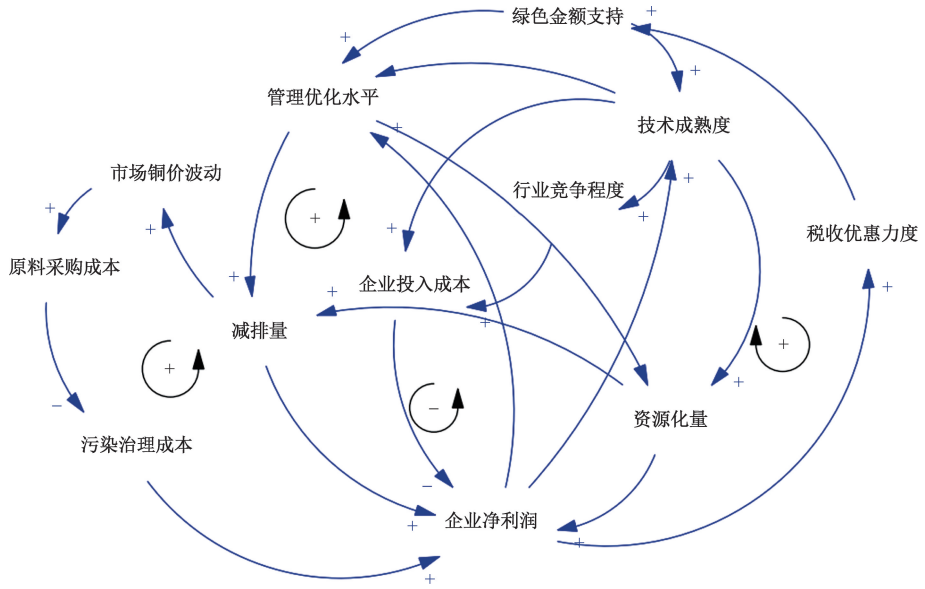


图 2　无废供应链路径模型因果循环图

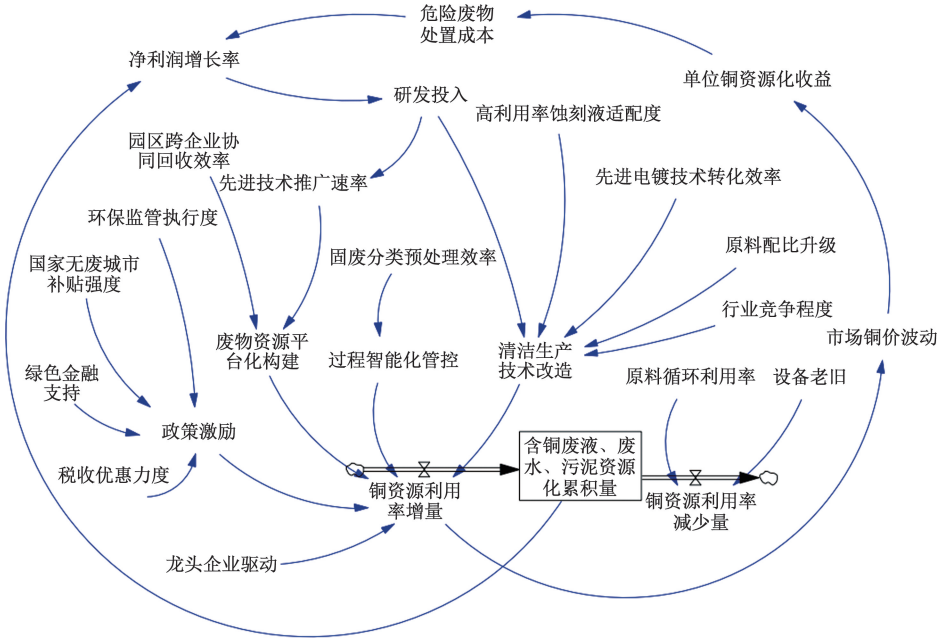


图 3　无废供应链路径模型流图

联的子系统。其中，影响政策子系统的关键变量包括环保监管执行度以及国家“无废城市”补贴强度；影响废物资源化平台构建子系统的关键变量包括园区内企业协同回收效率、先进技术推广速率；影响过程智能化管控子系统的关键变量包括固废分类预处理效率；影响情节生成技术改造子系统的关键变量包括研发投入、高利用率蚀刻液适配度、先进电镀技术转化效率、原料配比升级。与此同时，模型也整合了研发投入、危险废物处置成本和净利润增长率等技术经济变量，它们与核心变量相连，构成了“投资-技术升级-效率提升-收益增加-再投资”的增强回路，完整模拟了在技术创新、管理革新与政策引导三重动力下，无废供应链路径的动态演化过程。

采用系统动力学中定性指标定量化时运用最普遍、最具代表性的专家评议法完成相关指标的估算工作。结合行业的发展特性，经相关专家综合论证后，最终确定龙头企业驱动系数为 0.21，过程智能化管控系数为 0.32，清洁生产技术改造系数为 0.14，政策激励系数为 0.20，废物资源平台化构建系数为 0.12。得到的系统动力学方程为

铜资源利用率增量＝0.21×龙头企业驱动＋

0.32×过程智能化管控+0.14×清洁生产技术改造+0.2×政策激励+0.12×废物资源平台化构建。

2.3.2 多情景仿真模拟

基于构建的系统动力学模型,对电镀行业无废供应链路径进行了多情景仿真模拟,以量化评估不同政策与技术组合的长期效应。模拟设定基准年限为2020—2030年,核心观测变量为“含铜废物资源化累积量”与“净利润增长率”,观察两个核心指标在不同冲击情景下的动态响应。

为保证测算逻辑的一致性与分析结果的可比性,消除非核心变量的干扰因素,假定其他外生经济与社会常量均取固定值10,将含铜废液、废水、污泥资源化累积量的初始基数设定为30万t。设定了如下由简至繁的4个政策干预情景。

基准情景(BAU)代表当前发展趋势的自然延伸;

情景1:在BAU基础上将清洁生产技术改造强度提升50%;

情景2:在情景1基础上叠加50%的政策激励提升(如补贴、税收优惠);

情景3:为最全面的干预包,在情景2基础上进一步将废物资源数字化平台构建效率与龙头企业驱动强度各提升50%。

仿真结果如图4所示,4条增长曲线清晰地揭示了“多重驱动、系统推进”策略的显著优越性。基准情景的累积量呈线性平缓增长,反映了在缺乏额外干预下,资源化进程主要依赖技术自然渗透与成本下降的内在规律。情景1(技术改造)的曲线斜率在初期即明显高于基准线,这表明以工艺革新、中水回用为代表的源头减量与过程循环措施,能够快速直接地提升废物资源化效率,是启动无废转型的基础性引擎。然而,技术潜力的充分释放需要外部环境的协同。情景2曲线(技术改造+政策激励)在情景1的基础上实现了进一步的增速提升,尤其是在模拟中后期,增长差距持续扩大。这证明了强有力的政策引导(如资源化产品补贴、绿色采购导向)能够有效克服市场失灵,降低企业转型的初期成本与风险,为技术的大规模应用与扩散创造了关键的市场需求和投资信心,从而将技术潜力转化为切实的系统绩效。

最具启示性的结果是情景3(综合措施)的曲线,其增长最为陡峭,在2030年模拟期末,其资源化累积量远超其他情景。这一结果有力地验证了项目所提出的“无废供应链”核心逻辑:单一的技术或政策工具存在瓶颈,而技术创新、政策引导、管理革新必须三位一体、协同发力。数字化平台构建极大地降低了废物资源供需匹配的信息成本与交易摩擦,而龙头企业的驱动则通过绿色供应链管理将外部压力精准转化为网络内生的协同动力。这两大“管理革新”要素与前端技术、宏观政策相结合,共同激活了“企业-园区-区域”三级闭环网络的整体效能,实现了从“点”的改进到“网”的优化的质变,最终驱动系统走向收益递增的良性发展轨道。

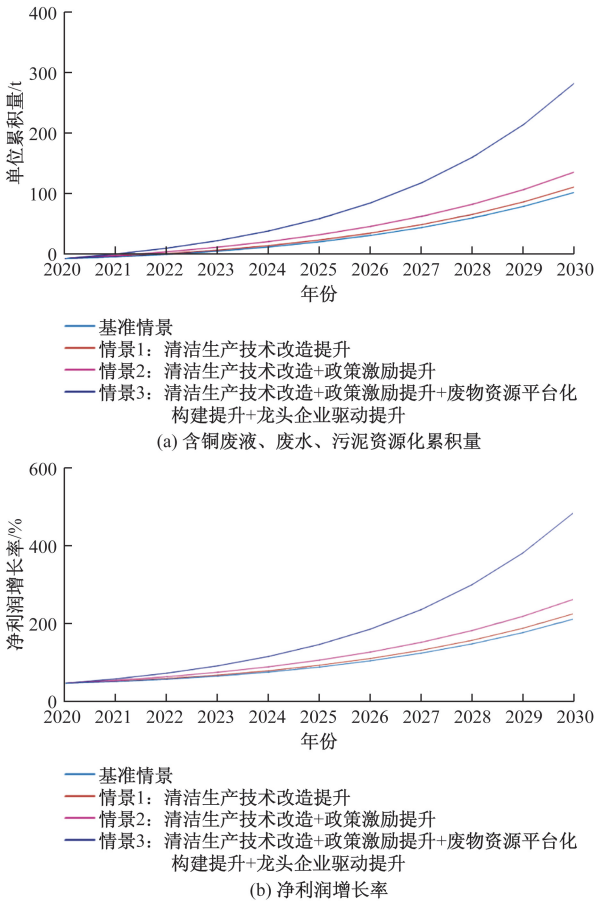


图4 情景1、情景2、情景3模拟结果

最终,经过检验,模型真实且有效。

3 结论

通过构建“企业-园区-区域”三级无废供应链路径模型,并结合广州经济技术开发区的实证分析,系统探讨了电镀行业铜资源回收与污染控制的协同路径。研究结果表明,单一的技术改进或政策约束难以实现铜废物的高效资源化,而需依赖技术创新、管理革新与政策引导的三维协同驱动。在企业层面,通过清洁生产工艺与废水深度回用,可实现源头减排与内部循环;在园区层面,数字化废物资源交易平台通过优化资源配置,显著提升了跨企业

协同效率;在区域层面,延伸生产者责任等制度设计为循环模式提供了长效保障。系统动力学仿真进一步验证,综合推进技术改造、政策激励与平台构建的情景3,其2030年资源化累积量显著优于单一干预情景,说明多层次、多主体的系统整合是提升环境与经济双重绩效的关键。

研究的主要贡献在于提出并验证了一套适用于电镀行业的可操作化无废供应链框架,其科学性体现在基于实地调研的数据支撑、系统动力学的动态仿真以及典型案例的实践佐证。通过量化分析不同驱动因素的耦合效应,明确了各层级策略的优先级与互动机制,为理解复杂系统中"技术-管理-制度"的反馈关系提供了新的视角。然而,研究亦存在一定局限,如模型参数部分依赖于专家研判,其普适性需在不同区域或产业背景下进一步验证;此外,数字化平台的实际运行效率、跨企业协同的长期稳定性等实践问题,仍需持续跟踪研究。

参考文献

[1] VAROL T, GÜLER O, AKCAY S B, et al. Enhancement of electrical and thermal conductivity of low-cost novel Cu-Ag alloys prepared by hot-pressing and electroless plating from recycled electrolytic copper powders[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 281: 125892.

[2] HU C, LAI C, YU R, et al. Effects of heavy metal pollution on the element distribution in hydrobios[J]. Toxics, 2024, 12(7): 479.

[3] SANTHOSH K, KAMALA K, RAMASAMY P, et al. Unveiling the silent threat: heavy metal toxicity devastating impact on aquatic organisms and DNA damage[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 200: 116139.

[4] ZHANG Z, WU H, ZHANG A, et al. Transfer of heavy metals along the food chain: a review on the pest control performance of insect natural enemies under heavy metal stress[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 478: 135587.

[5] BANIASADI M, GRAVES J E, RAY D A, et al. Closed-loop recycling of copper from waste printed circuit boards using bioleaching and electrowinning processes[J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12(6): 3125-3136.

[6] OZKAN E, ELGINOZ N, BABUNA F G. Life cycle assessment of a printed circuit board manufacturing plant in Turkey[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 25(27): 26801-26808.

[7] BRIGDEN K, LABUNSKI I, SANTILLO D, et al. Cutting edge contamination: a study of environmental pollution during the manufacture of electronic products[J]. Greenpeace Research Laboratories, 2007, 17(8): 52-63.

[8] 张凯, 迟子云, 程春明, 等. "无废供应链"建设的现存问题与优化路径[J]. 环境保护, 2025, 53(S3): 29-32.

[9] KUMAR H, KUMAGAI S, SAITO Y, et al. Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables[J]. Waste Management, 2024, 174: 400-410.

[10] MOUSAVI S R, BAHRPEYMA A, AFSHOON I, et al. Protecting the environment and natural resources using green roller compacted concrete (RCC) containing fine and coarse recycled copper slag aggregates[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186: 664-678.

[11] HARTLEY J M, SCOTT S, RIVERA R M, et al. Tailoring lixiviant properties to optimise selectivity in Ewaste recycling[J]. RSC Sustainability, 2023, 1(1): 107-116.

[12] REIG M, VECINO X, VALDERRAMA C, et al. Waste-to-energy bottom ash management: copper recovery by electrowinning[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 311: 123256.

[13] 胡楠, 柳溪, 赵娜娜, 等. 日本循环型社会建设对中国废物管理的启示[J]. 世界环境, 2018(5): 48-50.

[14] SHENYOPUTRO K, JONES T E. Reflections on a two-decade journey toward zero waste: a case study of kamikatsu town, Japan[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1171379.

[15] AFFOLDERBACH J, SCHULZ C. Positioning vancouver through urban sustainability strategies? the greenest city 2020 action plan[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 676-685.

[16] 韩蕙, 刘艳菊, 余蔚青. 新加坡固体废物收运系统[J]. 世界环境, 2018(5): 51-54.

[17] 诸大建. 最近10年国外循环经济进展及对中国深化发展的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8): 9-16.

[18] SONG Q, LI J, ZENG X. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 199-210.

[19] AWASTHI A K, CHEELA V R S, D'ADAMO I, et al. Zero waste approach towards a sustainable waste management[J]. Resources, Environment and Sustainability 2021, 3: 100014.

[20] 万谍, 关培桦, 冷嫄婷, 等. "无废城市"建设与企业绿色转型[J/OL]. 系统科学与数学, 1-16[2026-01-23]. https://link.cnki.net/urlid/11.2019.o1.20251223.1629.034.

[21] 刘明广, 梁汉朋, 刘滢, 等. "无废城市"试点政策对企业绿色全要素生产率的影响研究[J]. 生态经济, 2026, 42(1): 105-114.

[22] 苏凯琳. "无废城市"目标下的"无废园区"建设路径研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(20): 155-157.

[23] 单明威, 于永淼, 靳敏. 打造"无废供应链", 协同推进

"无废城市"降碳减污[J]. 中华环境, 2023(5): 39-42.
[24] 谭志雄, 邱云淑, 韩经纬, 等. 基于绿色供应链管理的"无废城市"建设模式研究[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(6): 10-14.
[25] 刘雨青, 刘婷. 绿色供应链推动"无废城市"建设[J]. 世界环境, 2019(2): 19-21.
[26] PINHA A C H, SAGAWA J K. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122350.
[27] XIAO S, DONG H, GENG Y, et al. Policy impacts on municipal solid waste management in Shanghai: a system dynamics model analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121366.

A Multi-level Waste-free Supply Chain Path in Electroplating Industry Based on System Dynamics: Guangzhou Development Zone

ZHONG Huaqi, BIAN Guojian

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China)

Abstract: To address the environmental risks and resource loss issues of copper-containing waste in the electroplating industry, a zero-waste supply chain path was established to promote copper resource recycling. Guangzhou Development Zone was taken as an empirical case, and comprehensive use is made of field research, enterprise case analysis, and system dynamics models to innovatively propose a "enterprise-park-region" three-level collaborative governance framework, and dynamic simulations are conducted for different scenarios. It is found that the effect of a single technology or policy intervention is limited, while a comprehensive strategy integrating technological transformation, policy incentives, and platform construction can significantly improve the efficiency of resource utilization and enhance the profitability of enterprises, verifying the effectiveness of the multi-level collaborative mechanism.

Keywords: electroplating; copper recovery; waste-free supply chain; circular economy; resource utilization