



文章栏目：“无废城市”建设专题

DOI 10.12030/j.cjee.202311038

中图分类号 X322

文献标识码 A

杜冰冰, 侯慧敏, 侯琼, 等. 基于演化博弈视角的中国废铅蓄电池回收利用过程主要问题分析和对策研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3832-3842. [DU Bingbing, HOU Huimin, HOU Qiong, et al. Analysis of main problems and countermeasures in waste Lead-acid battery recycling in China based on evolutionary game theory[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(12): 3832-3842.]

基于演化博弈视角的中国废铅蓄电池回收利用过程主要问题分析和对策研究

杜冰冰¹, 侯慧敏¹, 侯琼^{2,✉}, 徐鹤^{1,3}, 张墨¹, 陈瑛²

1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029;
3. 南开大学生态文明研究院, 天津 300350

摘要 我国铅蓄电池每年的报废量十分庞大, 其不正规回收利用给环境带来了严重污染。近年来, 国家为规范废铅蓄电池的回收利用已出台多项政策, 但行业内部仍存在许多问题。基于调研说明了废铅蓄电池回收利用的现状, 阐述了回收利用过程中的电池流向和保障机制。基于废铅蓄电池回收利用过程各利益相关方复杂的博弈关系引入演化博弈模型, 从模型构建、求解和结果可视化几方面说明演化博弈的流程。通过梳理废铅蓄电池回收利用过程中各利益相关方的矛盾冲突, 针对正规回收、生产者延伸责任落实、正规再生利用等方面构建三方演化博弈模型。最后, 结合模型分析提出相应建议, 包括强化物联网技术的应用、出台经济激励政策、建立规范的回收体系、合理规划布局再生铅企业、打击违法行为等。

关键词 废铅蓄电池; 演化博弈; 回收利用; 生产者责任延伸制

铅蓄电池具有原料易得、性价比高、运行安全可靠等优点, 是全球产量最大的二次电池产品^[1], 广泛应用于交通运输、信息通信、能源电力等领域, 每年的报废量也十分可观。据工信部统计数据, 我国 2018 年、2019 年、2020 年的铅蓄电池产量分别为 19 469.8、20 248.6、22 735.6 kVAh; 何艺等^[2]依据国内消费量和平均使用寿命测算得到 2019 年报废量为 360×10^4 t 左右。铅蓄电池的组成成分中, 铅及其化合物占 70% 以上, 硫酸占 20% 左右^[3], 除此之外还有部分塑料制品。若不能得到正规拆解, 电池中的重金属铅和酸液泄露会对环境和人群健康造成严重的影响^[4]。

2016 年以来, 为了规范废铅蓄电池的回收利用, 我国出台了多项政策文件。2016 年出台《再生铅行业规范条件》^[5], 规定对项目建设、企业布局、产业发展进行规范管理; 同年发布《生产者责任延伸制度推行方案》^[6], 确定对铅蓄电池等 4 类产品实施生产者责任延伸制; 2019 年发布《铅蓄电池生产企业集中收集和跨区域转运制度试点工作方案》^[7], 拟探索铅蓄电池收集转运的可行方法; 2020 年出台《铅蓄电池回收利用管理暂行办法(征求意见稿)》^[8], 拟确立回收目标责任制、铅蓄电池统一编码、台账制度等; 2021 年出台《铅蓄电池生产者履责绩效评价技术规范(试行)征求意见稿》^[9], 为生产者延伸责任的落实制定相应的评价标准。然而, 我国废铅蓄电池的正规回收市场建设尚未达到政策预期目标。目前, 其回收环节仍处于无序状态, 正规回收量较少, 导致正规再生企业处于原料不足、产能严重过剩的尴尬境地。有文献显示, 我国废铅蓄电池正规回收的比例与发达国家相差甚远, 仅有 45% (美国 98%, 日本 100%, 其他发达国家均在 85% 以上)^[10]。

关于废铅蓄电池回收利用存在的问题, 已有多篇研究进行阐述。张波等^[11]基于对生产企业的调研阐述

收稿日期: 2023-11-08; 录用日期: 2023-12-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1908500); 天津市自然科学基金资助项目 (19JCYBJC23300)

第一作者: 杜冰冰 (1999—), 女, 硕士研究生, 2120210668@mail.nankai.edu.cn; ✉通信作者: 侯琼 (1987—), 女, 硕士, 助理研究员, houqiong@meescc.cn

了生产者责任延伸制度实施中存在的问题；李雪等^[12]同样梳理了生产者责任延伸制度推行实施的难点并介绍了河南省的试点情况；黄进等^[13]以湖南省为例分析了废铅蓄电池非法回收乱象的成因；李新战^[14]在多年实践经营的基础上梳理了废铅蓄电池回收过程的“两大症结”，即中转暂存环节不规范和税收链条不完整。然而已有的研究多围绕行业问题的某一点或几点展开，或往往从某一利益相关者的立场展开分析，全面性和逻辑性较为欠缺。本研究从行业各利益相关者的角度出发，全面且有条理地分析了其应承担的责任及目前存在的问题。为探索废铅蓄电池正规回收率低的原因并提出可行的解决办法，本研究拟从演化博弈的视角对行业各利益相关者的行为决策开展研究。演化博弈论解释了生物进化过程中相互学习、竞争和适应的现象^[15]，目前已被广泛应用于分析社会规范和制度的成因及影响因素^[16-17]。在固体废物环境管理领域，为探究提升正规回收率的可行措施，演化博弈已成为热门的研究工具，应用于废弃电子电器产品、建筑垃圾、包装废弃物等领域，而有关废铅蓄电池回收的相关研究却较为缺乏。

本研究将首先分析废铅蓄电池回收利用的现状；之后，引入演化博弈模型并说明其流程框架；再次，在利益主体识别与矛盾分析的基础上构建多个三方演化博弈模型并进行对应的定性描述；最终，结合构建的模型，针对行业目前的问题提出对策建议。

1 废铅蓄电池回收利用现状分析

我国废铅蓄电池的来源广泛，其中工业企业和单位产生的废铅蓄电池回收利用已较为规范^[18]，而约占报废量 85% 的社会源^[13]废铅蓄电池的回收利用仍然是一个难点。由于废铅蓄电池回收再生的利润空间较大，生产者、回收者、再生企业均意图占领回收市场以谋求自身利润最大化。卢笛^[10]的研究显示，我国废铅蓄电池回收有三大主体：社会群体回收量占回收总量的 85%；再生铅企业回收量占 8%；蓄电池分销商回收量占 7%。自 2016 年 12 月国务院印发的《生产者责任延伸制度推行方案》^[6]实施 5 年后，经调研显示，某龙头生产企业的回收率仅有 35%，政策实施成效不明显。

图 1 绘制了我国当前 EPR 制度下废铅蓄电池的回收利用模式。整个过程涉及到的主体有：公众、零售商（及维修点、个体收集者等一级收集点）、回收商、再生铅企业、生产者、政府。图中的实线和虚线分别表示回收利用过程中废铅蓄电池的流向和保障机制。

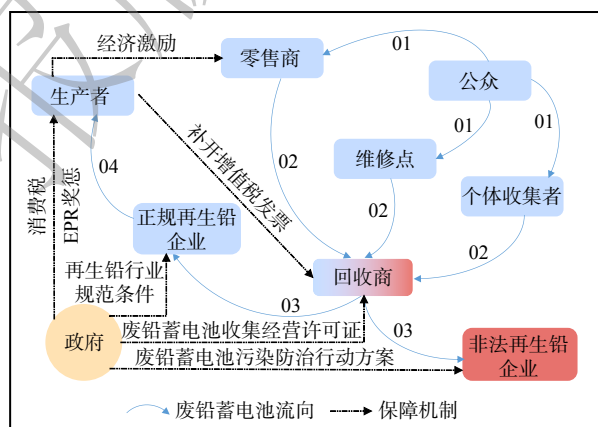


图 1 废铅蓄电池回收利用现状

Fig. 1 Current status of waste lead-acid battery recycling

1.1 回收利用过程电池的流向

回收利用过程中废铅蓄电池的流向大致分 4 步走。1) 公众作为废铅蓄电池回收网络的起点，铅蓄电池报废后，一般有 3 种去向，一是由零售商以旧换新，二是去维修点维修，三是直接卖给个体收集者（例如小商贩）。2) 无论最初以何种形式流动，最终都会流向回收商（分为有资质和无资质 2 种类型）。3) 回收商作为回收利用过程的关键方，其策略的选择对废铅蓄电池的正规处置起到重要的作用。无资质的回收商回收给非法再生铅企业；而有资质的回收商在社会实践中也存在不法行为，即回收商受税收、环保成本等利益驱动回收给出价更高的非法再生铅企业，经调研得知，回收商在生产者为其补开增值税发票的情况下，才将废铅蓄电池送往正规再生铅企业，否则，在利益的驱使下将流入地下产业链。4) 正规再生铅企业通过火法冶炼、湿法冶炼或原子经济法等新型冶炼方法^[1]获得再生铅后，卖给生产者作为新电池的原料。

1.2 回收利用过程的保障机制

为保障废铅蓄电池进入正规途径进行回收利用处置，相关责任方均采取了一些举措。在政府方面，一是对于生产者，通过征收消费税，加速电池行业内部整合，逼迫一些落后企业退出市场，加强产业布局和环境改善，自 2016 年起，对铅蓄电池生产企业每年征收 4% 的消费税；推行生产者责任延伸制，明确生产企业通过落实生产者责任延伸制度实现废铅蓄电池规范收集目标，2020 年新修订的《中华人民共和国固体废物污

染环境防治法》^[19]进一步明确了生产企业自建或者委托等方式建立回收体系的要求,2021年11月出台的《铅蓄电池生产者履责绩效评价技术规范(试行)》^[9]明确了对生产者的EPR落实情况实施奖惩。二是对于再生铅企业,2016年12月出台了《再生铅行业规范条件》^[5],对环保标准、装备技术、生产规模、能源消耗等提出了更高的要求。三是加强环境污染防治,出台《废铅蓄电池污染防治行动方案》^[20],严厉打击非法再生铅企业。四是深入实践,开展回收试点工作。对于正规回收商,为其发放废铅蓄电池收集经营许可证。2019年起,在全国20个省(区、市)开展铅蓄电池生产企业集中收集和跨区域转运制度试点工作,为巩固工作成效,2020年继续开展该项工作,提出到2022年,试点单位在试点地区的废铅蓄电池规范回收率力争达到50%左右。在生产者方面,一是生产者采取给予零售商经济激励的措施,促进废铅蓄电池的正规逆向回收;二是生产商为回收商补开增值税发票,促使废铅蓄电池流向正规途径,以落实生产企业的延伸责任。

2 演化博弈的基本原理和流程框架

上述废铅蓄电池的回收利用现状表明,这一领域的利益相关方存在众多矛盾冲突。尤其是回收环节,利益相关方(如零售商等一级收集点、回收商)追逐利益使得废铅蓄电池流入地下产业链,导致生产者落实延伸责任困难,正规再生铅企业无法获取足够的原料,政府投入的环保成本增加,各方冲突激烈。

基于多方利益主体及其复杂的交互关系,从博弈论的视角探究问题是非常重要且必要的。其中,演化博弈论常用于研究多个利益相关者之间的互动。1973年,SMITH和PRICE^[21]首先提出了演化博弈和演化稳定性策略等概念,这标志着演化博弈论的正式诞生^[22]。随后,1978年,TAYLOR和JONKER^[15]在研究生态进化现象时首次提出了复制动态的概念,这是演化博弈论的又一突破性发展。演化博弈论以有限理性群体的行为为研究对象,在生物物种进化中发挥了很好的作用,群体中个体的进化需要一个漫长的进化过程^[23],博弈参与者可以通过复制动态机制缓慢学习,不断用高回报的策略替代低回报的策略,最终收敛到稳定状态,这在经济管理领域得到了广泛的应用^[24]。相较于传统博弈论,演化博弈强调分析系统达到均衡的动态过程^[25],即强调动态均衡而非静态均衡;演化博弈中参与者被假定为有限理性,通过不断地试错、模仿、学习,最终寻求演化稳定策略^[26],即强调有限理性而非完全理性。然而值得注意的是,演化博弈寻求的不是系统最优的解决方案,而是改善整个系统的解决方案^[27]。

随着固体废物危机的出现,许多学者开始探究固体废物管理问题,演化博弈是备受青睐的研究方法。固体废物的回收利用常常涉及到多个利益主体,比如消费者、回收商、再生利用企业、生产者、政府等。他们在固体废物回收利用问题上相互博弈,寻求自身利益的最大化。LONG等^[28]研究了外卖废弃物回收产业链中政府、消费者、企业三方的行为演化,探讨最终稳定策略和主要参数变化的影响;LIU等^[29]在电子废弃物回收领域构建了国家政府、地方政府、回收商的三方演化博弈模型,从双重治理的角度分析了上级环境法规执行与否的成效和回收者的战略选择;SU等^[30]探究了建筑垃圾回收利用中政府机构、废物产生者和废物回收商三方利益相关者的演化决策过程和稳定策略;此外,报废汽车^[31]、电动汽车电池^[32-33]、快递包装^[34]、废旧共享单车^[35]等的回收利用也常作为主要研究对象。概括而言,当对于固体废物回收利用的责任分担主体缺乏清晰明确的法律法规或标准要求时,行业内各利益相关者将相互博弈,以追求自身利益的最大化。对于回收利用价值低的废物,各主体缺乏参与回收利用的主动性,常常逃避自身的责任,使得固体废物的回收利用链条断裂,难以实现正规处理;对于回收利用价值高的废物,尤其是回收利用工艺简单易行的废物,比如废铅蓄电池的再生铅冶炼、废电子电器的拆解,极易滋生非法产业链,由于环保成本和税收成本的缺失,致使其在市场上相较于合法正规企业有着绝对的竞争优势,最终导致“劣币驱逐良币”的局面。如何构建行之有效的责任分担机制以解决固体废物回收利用存在的问题是值得探究的课题,而面对多方利益主体及其复杂的交互关系,演化博弈以博弈的视角和贴合实际的特征助力研究者开展问题的探究。

对于本研究所关注的废铅蓄电池回收利用行业,回收主体是否正规回收、再生铅企业是否正规运营、生产者是否履行延伸责任、政府是否监管等等,这些问题都是值得关注和探究的博弈点。此外,该行业的发展是一个动态的过程,系统中的每个参与者会因为成本和收益的变化而制定不同的策略,且都是有限理性^[36]。因此演化博弈方法对于探究废铅蓄电池回收利用行业是适用的。

演化博弈的流程框架如图2所示。其中包括模型构建(模型描述与假设、支付矩阵的构建)、模型求解(复制动态方程的构建、均衡点的计算、渐进稳定性分析)和结果可视化(参数模拟、演化图示)。在模型构建

时，首先要进行模型描述与假设，说明参与博弈的相关方及各自的策略选择，描述模型情景并设定相应参数；然后基于设定的参数，计算不同策略组合下博弈各方的相应收益，构建支付矩阵。在模型求解时，首先针对各方计算每种策略下的预期收益，并构建复制动态方程；然后令博弈各方的复制动态方程等于 0，求出均衡点，包括纯策略均衡和混合策略均衡；最后利用雅可比矩阵分析均衡点的渐进稳定性，以得到演化稳定策略 (ESS) 及其对应的稳定条件，需要注意的是，根据 WAINWRIGHT^[37] (1989 年) 和 LYAPUNOV^[38] (1992 年)，只有当均衡点是纯策略纳什均衡时，它才能成为渐近稳定的均衡点 (即 ESS)^[39]，因此，一般只针对纯策略均衡进行稳定性分析。

上述模型求解过程是理论上的计算分析，为了更直观地表述和探究问题，通过参数模拟，以演化图示的方式展示演化过程，实现结果可视化。参数模拟通常包括 2 部分：一是验证演化稳定策略，即为参数赋值，使其满足演化稳定策略要求的稳定条件，在不同初始概率的设置下，最终演化到稳定策略；二是参数敏感性分析，在第一部分的基础上，改变某一参数，保证其余参数不变，分析其对演化过程的影响，并依此提出对策建议。参数模拟是演化博弈中十分重要的部分，许多有价值的发现和推荐都是由这一部分得到的，然而不同研究的参数赋值和研究思路各不相同。WANG 等^[36] 自设参数模拟了电子废弃物回收行业发展初期、中期和成熟阶段博弈参与者的行为演变，并基于发展初期 (1,0,0) 分析了与政府相关的 3 个参数对参与者演变的影响，为推动行业发展到中期 (1,1,1) 提供理论指导。YANG 等^[40] 认为从理论研究和实践经验来看，(0,1,1) 是一个理想且现实的 ESS，故自设参数以满足 (0,1,1) 的稳定条件，设置中、高、低 3 种不同的初始概率分析演化过程，在中等初始概率的情况下，对于参数使用 +50%、+25%、-25%、-50% 的方法赋值进行敏感性分析。SU 等^[39] 应用实际调研数据，同时对模型中规定的尚未应用的情景，采用专家咨询的方式为参数赋值，保证满足理想状态 (1,1,1) 下的稳定条件，进而分析从 (0.1, 0.1, 0.1) 到 (1,1,1) 的演化过程，关注其演化顺序，并基于 (1,1,1) 的理想稳定策略分析参数的敏感性。WANG 等^[41] 依据实际情况和相关文献为参数赋值，认为得到的演化稳定策略 (1,0,0) 符合现状，并在此基础上分析政策支持、补贴、罚款的合适范围，以期演化到理想状态 (1,1,1)。

3 演化博弈模型的构建

3.1 利益主体的识别与矛盾分析

构建演化博弈模型，首先需要识别利益主体，发现问题及矛盾点。依据图 1 (废铅蓄电池回收利用现状图) 识别废铅蓄电池回收利用过程的利益主体，包括公众、零售商 (及维修点、个体收集者等一级收集点)、回收商、再生铅企业、生产者、政府。以下针对各利益主体应承担的责任与目前存在的问题展开分析。

1) 公众。工业源废铅蓄电池的回收利用已较为规范，而来源于公众的社会源废铅蓄电池产生比较分散，正规回收利用受阻^[18]。EPR 制度的推行离不开公众的配合：一方面公众需要提高绿色意识，将废铅蓄电池交

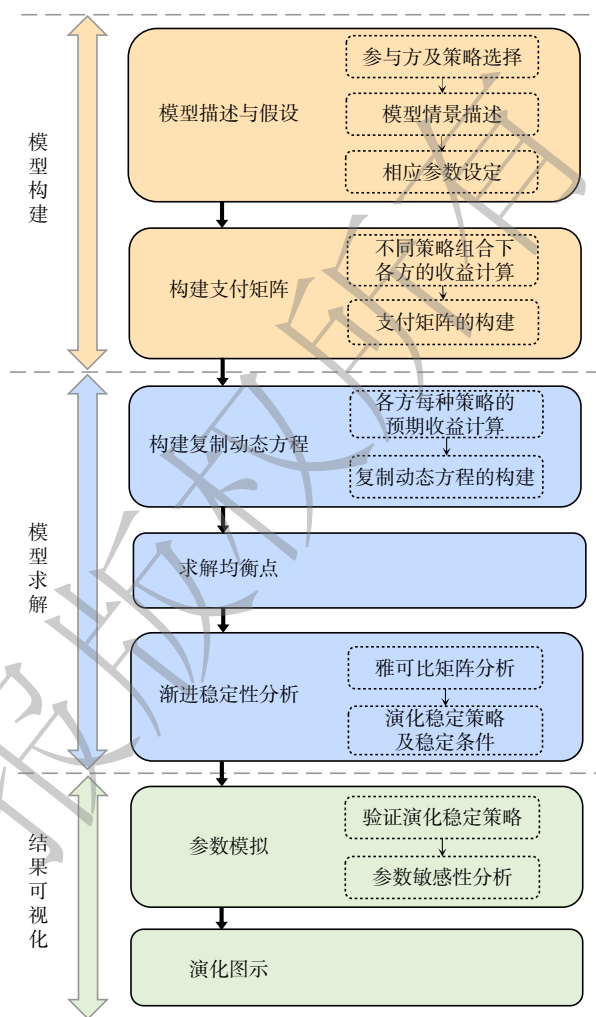


Fig. 2 The framework for the study of evolutionary game theory

给正规的回收商；另一方面，公众也需对EPR系统起到监督作用，例如可以举报违法企业，也可监督地方政府作为。然而，在社会实践中仍存在以下问题。

① 公众缺乏绿色意识。公众具有趋利性，常将废铅蓄电池卖给回收价高的一方。公众对政府公布的有资质的集中转运点及其相应的收集网点关注较少，缺乏绿色回收的意识。

② 公众对EPR系统的监督薄弱。公众缺乏监督政府和企业的渠道，对环境污染给自身带来的健康成本关注较少。

2) 零售商(及维修点、个体收集者等一级收集点)。零售商、维修点、个体收集者等一级收集点直接对接公众产生的废铅蓄电池，理想状态下，经其收集的废铅蓄电池都应交给有资质的正规回收商，切断地下链条的源头。此外，零售商要配合生产者履行延伸责任，促进逆向回收。然而现实情况却与理想状态存在较大差距。

① 零售商、维修点、个体收集者等一级收集点的废铅蓄电池多选择比价出售，存在流向地下产业链的现象。

② 虽然生产者为落实生产者延伸责任，对零售商给予一定的激励，但在成本收益的博弈下，零售商常会售卖给个体收集者，使得废电池的后续去向不明。

③ 调研显示，生产者的年回收率仅为35%，因此逆向回收的成效欠佳。究其原因，一是零售商在价格竞争上处于劣势，受到无税收、环保等成本的非法产业链的恶性价格竞争；二是零售商的宣传力度缺乏，在以旧换新和环保宣传方面仍需加强，鼓励公众正规回收。

3) 回收商。回收商需要取得危险废物经营许可证，合法合规经营。回收商应将回收到的废铅蓄电池交给正规的再生铅企业，同时做好运输、储存等方面的防护措施。然而实际上回收商这一重要节点却充斥着诸多问题，分析如下。

① 回收商无资质经营。在非法产业链中，非法回收商以高价抢购废铅蓄电池，导致回收市场混乱。

② 回收商有资质却不正规经营。有资质的回收商受到税收、环保成本的影响，在利益的驱使下将废电池销售给非法再生铅企业，政府颁发的资质未能起到对回收行为的约束作用。

③ 缺乏行业合作。生产者为落实自身的延伸责任、回收商为追求自身利润、再生铅企业为保证废电池原材料的来源，均参与了回收市场，充当起回收商的角色。然而，行业内缺乏合作^[12]，导致了回收无序的乱象。

④ 再生铅企业。再生利用环节是防止废铅蓄电池危害环境的最后一步，再生铅企业应严格遵循《再生铅行业规范条件》，从生产规模、环保标准、装备技术等方面规范自己。然而，当前再生铅企业面临以下诸多困境，分析如下。

首先，正规再生铅企业产能过剩。经调研了解到，再生铅行业整体产能过剩，全国范围内97%左右的废铅蓄电池处置企业处于亏损状态。卢笛^[10]在2018年的研究显示，我国废铅蓄电池处理产能已达 1.026×10^4 t，而据不完全统计，铅蓄电池年报废量在 500×10^4 t左右。再生利用环节与回收环节是紧密相关的，如果回收规范化，再生铅企业将会有更多的废铅蓄电池原材料供应，实现再生铅的大规模生产。

其次，再生铅厂的布局不平衡。一是我国多个省份尚未建设再生铅厂^[18]，如北京、福建、吉林等，大量废铅蓄电池仍需要跨省转移；二是许多蓄电池企业为谋求利润，在产能过剩的情况下，仍准备新建再生铅厂。例如，河南、安徽等地便存在这种现象^[10]。近年来，随着政府对再生铅行业的不断规范，该现象得以好转。

最后，非法小作坊恶性竞争。非法回收商收集的大部分废铅蓄电池流入非法再生铅企业，形成非法产业链。非法再生铅企业无税费负担、环境保护成本，与合法企业相比具有明显优势，存在劣币驱逐良币的现象。

5) 生产者。铅蓄电池生产者要对所生产产品的全生命周期负责，履行EPR责任。2020年新修订的《固废法》^[19]明确了铅蓄电池生产企业的废铅蓄电池回收义务。国家鼓励生产者依托销售渠道逆向回收，与规范利用企业发展合作关系^[42]。然而，生产者在EPR制度落实上存在着以下问题和难点，分析如下。

① 生产企业积极性不高。一是国家层面EPR制度多为鼓励性制度，而非强制。二是EPR制度要求生产者在设计、生产、回收和处置等多方面承担环境责任，从而增加了生产者的运营成本和难度^[43]。因此，考

虑到实施 EPR 的较高成本和潜在的营业收入波动,生产者倾向于主观意愿上抵制“强加”的环境保护责任^[27]。虽然部分龙头企业积极配合响应国家所推行的 EPR 制度,但广大中小型企业仍持观望态度^[18]。

②“委托回收”形式下回收商配合度低。根据《危险废物经营许可证管理办法》^[44],生产企业依靠销售渠道逆向建立的回收体系难以取得回收资质^[12],因此需要依托回收商进行回收。生产者与回收商以协议的形式达成合作,生产者给予回收商一些便利条件(如激励自身的零售商回收给指定的回收商、沟通再生铅企业为回收商结转实现资金流动),回收商为生产者实现其要求的回收量。然而税收问题却始终是个难题。根据国家资源综合利用行业增值税政策,正规的废铅蓄电池收集网点可以依照 3% 缴纳增值税,但调研得知,实际上税收政策落实的并不好,正规回收企业的成本要远高于非法处理作坊,因此,回收商只有在生产者为其补开增值税发票的情况下才会配合,这给生产者落实 EPR 责任带来了困难。

③“自主回收”形式下,生产者依托销售渠道逆向回收存在困难。一是危险废物经营许可证较难取得,自主逆向回收的积极性受到影响;二是自主建设回收体系投资成本较高,如集中转运点的建设、运营、维护等。三是即便取得了回收资质,也难以保证收集网点的废铅蓄电池的数量和去向,仍需依靠激励策略维持。

④跨省转移周期长。我国多个省份尚未建立合法的再生铅企业,部分废铅蓄电池需要跨省转移进行资源化利用,然而行政审批程序较复杂,周期约为 2~6 个月^[18]。而由于废铅蓄电池残值高、价格波动大,暂存的废铅蓄电池等同于无法流动的资金,生产者往往不愿意承担较大的经济风险。

⑤税收负担较重。目前的正规回收产业链中,生产者不仅要承担消费税,还要为回收商补开增值税发票。自 2016 年起,国家对规范的铅蓄电池生产企业征收 4% 的消费税(本可以转移到产品售价中),但大量非法蓄电池企业没有税收成本,生产者为了增强市场竞争力,市场售价往往得不到有效增长^[10]。

6) 政府。政府在废铅蓄电池正规回收利用中扮演着促进、监督和保障的角色。政府通过采用行政手段、法律手段、经济手段等为系统提供保障,如监督利益主体、实施奖惩措施、打击违法行为。需要注意的是,政府不仅包括中央政府还包括地方政府,地方政府应按要求落实中央政府的指示,不可与企业寻租。而现阶段政府在监督管理方面存在着以下问题,分析如下。

①缺乏有效的经济激励政策。一是关于征收增值税的问题,由于现在大多数废铅蓄电池源自于个体回收商贩等一级收集点,其不能开具合规的增值税发票,使得回收企业增值税链条断裂,若在交易时,再生加工企业要求回收企业提供增值税专用发票,回收企业将承担应缴纳的全部增值税,导致正规回收企业税负压力过大,降低了企业的竞争力;就最新现行政策而言,2021 年底,财政部税务总局发布的《关于完善资源综合利用增值税政策的公告》^[45]指明从事再生资源回收的纳税人可选择简易征收增值税(3%)的方式,再生铅企业实施即征即退 50% 的税收扶持政策,而实际实施效果不佳,调研得知,多家企业甚至地方政府部门对如何纳税尚不清楚,有企业反应回收所得利润甚至低于税收,政策难以落实。二是在市场建设初期对回收过程前端利益主体(如公众、一级收集点、回收商等)缺乏经济激励,应促进其正规回收意识的建立和提升。

②缺乏回收环节的规范约束。就现行政策而言,政府对正规的生产企业、再生企业都有严格的规范,而对中间的回收企业监管不严。例如,由于缺乏有效的政府监管和惩处措施,一些有资质的回收商受利益驱使将废铅蓄电池流向非法渠道。

③缺乏对地下产业链的严厉打击和惩处。地下产业链的存在使正规企业竞争力下降,正规回收和利用难度增加,需加强对非法产业链的有效打击取缔。

④缺少部门联动。废铅蓄电池属于危险废物,回收利用环节复杂,需要环保、发改、工信、工商、公安、交通、财政、税务等多个政府部门的联防联控^[12]。

3.2 演化博弈模型的构建

1) 模型构建与模型描述。本节基于上述废铅蓄电池回收利用过程中各利益主体的矛盾冲突,针对正规回收、EPR 责任落实、正规再生利用 3 方面初步构建了三方演化博弈模型,如表 1。基于“回收环节中公众、回收商不正规回收”的问题,构建了政府、回收商、公众三方博弈模型,以探索促进正规回收的可行措施;基于“EPR 制度下生产者以“委托回收”形式落实延伸责任难”的问题,构建了政府、生产者、回收商三方博弈模型,以促进“委托回收”形式下生产者 EPR 责任的落实;基于“EPR 制度下生产者以“自主回收”形式落实延伸责任难”的问题,构建了政府、生产者、零售商三方博弈模型,以促进“生产者激励零售商”形式下的逆向回收;基于“再生环节中正规再生铅企业竞争力差,回收量少”的问题,构建了政府、生产者、正规再生铅企业

表 1 模型构建与模型描述

Table 1 Model building and model description

序号	基于的问题	参与者及策略选择	模型描述	参考文献
1	回收环节中公众、回收商不正规回收。	政府(监管,不监管); 回收商(正规回收,不正规回收); 公众(绿色行为,非绿色行为)	a)政府对有资质的回收商进行监管并实施奖惩,对绿色行为公众给予奖励;政府采取监管策略会提高公信力。b)回收商在模型中指有资质类型,回收给正规再生铅企业的回收商属于正规回收,正规回收与不正规回收的收益不同;正规回收时政府获得环境绩效,不正规回收时政府付出环境治理成本。c)公众绿色行为指回收给有资质的回收商,非绿色行为指回收给无资质的回收商,2种策略收益不同;绿色行为会为公众带来个人满足感;另外当公众行为与回收商类型不匹配时,公众需要付出信息转换成本,以实现自身的策略选择。	[36,46-47]
2	EPR制度下生产者以“委托回收”形式落实延伸责任难。	政府(监管,不监管); 生产者(履行EPR,不履行EPR); 回收商(正规回收,不正规回收)	a)政府对生产者和回收商进行监管并实施奖惩;政府采取监管策略会提高公信力。b)生产者履行EPR责任指给予回收商一些便利条件(如激励自身的零售商回收给指定的回收商、沟通再生铅企业为回收商结转实现资金流动),以委托金的形式应用于模型;若回收商配合完成回收目标,则生产者可获得实施EPR带来的收益;若生产者履行EPR责任时回收商不正规回收,则委托金流向政府。c)回收商正规回收与不正规回收的收益不同;回收商正规回收时政府获得环境绩效,不正规回收时政府付出环境治理成本。	[30,48]
3	EPR制度下生产者以“自主回收”形式落实延伸责任难。	政府(监管,不监管); 生产者(激励,不激励); 零售商(配合,不配合)	a)政府对生产者进行监管并实施奖惩;政府采取监管策略会提高公信力。b)生产者选择激励时,付出激励金;零售商配合时,则为生产者回收并实施“以旧换新”等逆向回收措施,为生产者带来收益;若生产者选择激励而零售商不配合,则激励金流向政府。c)零售商配合时,付出机会成本和“以旧换新”宣传成本,但同时会由于回收量和销量的增加获得额外收益;零售商采取“配合”策略,会为政府带来绩效收益。	[48]
4	再生环节中正规再生企业竞争力差,回收量少。	政府(监管,不监管); 生产者(绿色设计,不绿色设计); 正规再生铅企业(提高竞争力,保持原状态)	a)政府对生产者和再生企业进行监管并实施奖惩;政府采取监管策略会提高公信力。b)生产者绿色设计需要一定成本,而绿色设计可提升企业形象,获得额外收益。c)正规再生铅企业提高竞争力是指提高回收价格以增加竞争力;生产者绿色设计可减少再生利用成本;回收价格提升会带来回收量的增多以带来额外收益,而这一额外收益的大小也受生产者策略选择的影响;选择提高竞争力时政府会获得绩效收益,保持原状态时政府付出环境治理成本。	[49]

三方博弈模型,通过“促进生产者进行绿色设计,以减少再生企业处理成本,提高回收价格,从而提高自身竞争力”的方式,促进正规回收利用的实现。

2) 模型构建实例说明。本节以模型 2 为例展开具体的描述。模型 2 构建了政府、生产者、回收商三方演化博弈模型,描述见表 1;表 2 给出了相应参数假设;基于参数假设;表 3 列出了支付矩阵,为后续博弈的运算和模拟提供基础。

4 基于模型构建的定性分析

本研究从演化博弈的视角,通过以上构建博弈模型的过程,定性地为政府提出宏观的政策措施。至于对各个演化博弈模型的后续求解分析,则是为了在相应的宏观政策措施下,提出更为具体的对策建议,包括“参数应满足何种条件以使行业发展正规化”“如何改变某一参数以使行业更快更好地发展”等具体问题,而这并非本研究所探讨的重点。关于以上模型构建过程的定性分析如下。

1) 模型 1。政府-回收商-公众:依据三方的博弈关系,若使回收商正规回收,则需要政府对回收商进行监管并实施奖惩措施;若使公众选择绿色行为,考虑到政府监管到个人需要很大的成本,不具备现实应用意义,可以考虑政府对绿色行为公众给予补贴;从行业长远发展来看,持续对公众给予补贴会导致财政亏空问题,因此建立全国范围的信息监测系统从而对铅蓄电池实行全生命周期追踪溯源仍是十分必要的。

2) 模型 2。政府-生产者-回收商:依据三方的博弈关系,若使生产者履行 EPR 责任,则需要政府监管并

表 2 模型 2 参数假设

Table 2 Model 2 parameter assumptions

博弈方	参数符号	参数含义
政府	C_g	监管成本
	S_1	对履行EPR责任的生产者的奖励
	T_1	对不履行EPR责任的生产者的惩罚
	S_2	对正规回收商的奖励
	T_2	对不正规回收商的惩罚
	G	回收商正规回收时获得的环境绩效
	E	回收商不正规回收时付出的环境治理成本
生产者	K	政府采取监管策略时公信力的提升
	C_p	不履行EPR时的成本
	R_p	不履行EPR时的收益
	ΔC_1	履行EPR的成本(委托金)
	ΔR_1	购买再生铅原材料获得的优惠
回收商	ΔR_2	企业形象提升带来的收益
	C_r	回收商完成回收目标的成本
	P_1	回收商正规回收时的收益
	P_2	回收商不正规回收时的收益

表 3 模型 2 支付矩阵

Table 3 Model 2 payout matrix

三方主体的策略选择		回收商正规回收 (z)	回收商不正规回收 (1-z)
政府 监管 (x)	生产者履行 EPR (y)	$-C_g - S_1 - S_2 + G + K$ $R_p - C_p - \Delta C_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + S_1$	$-C_g - S_1 + T_2 + \Delta C_1 - E + K$ $R_p - C_p - \Delta C_1 + S_1$
	生产者不履行 EPR (1-y)	$-C_g - S_2 + T_1 + G + K$ $R_p - C_p - T_1$	$-C_g + T_1 + T_2 - E + K$ $R_p - C_p - T_1$
	政府 不监管 (1-x)	$-C_r + \Delta C_1 + P_1 + S_2$	$-C_r + P_2 - T_2$
	生产者履行 EPR (y)	$-S_1 - S_2 + G$ $R_p - C_p - \Delta C_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + S_1$	$-S_1 + \Delta C_1 - E$ $R_p - C_p - \Delta C_1 + S_1$
生产者不履行 EPR (1-y)	$-C_r + P_1 + S_2$	$-C_r + P_2$	

实施奖惩措施；若使回收商正规回收，则一方面需要政府的监管措施，另一方面需要生产者与其建立委托关系，而这首先需要全行业的回收体系规范化。

3) 模型 3。政府-生产者-零售商：依据三方的博弈关系，若使生产者履行 EPR 责任，则需要政府监管并实施奖惩措施；若使零售商配合，则需要给予其激励补贴。

4) 模型 4。政府-生产者-正规再生铅企业：依据三方的博弈关系，若使生产者进行绿色设计，则需要政府的监管与奖惩；若使再生铅企业提高竞争力，则一方面需要政府的监管，另一方面则首先需要合理布局再生铅企业，使其在全国范围内发挥最大效率。

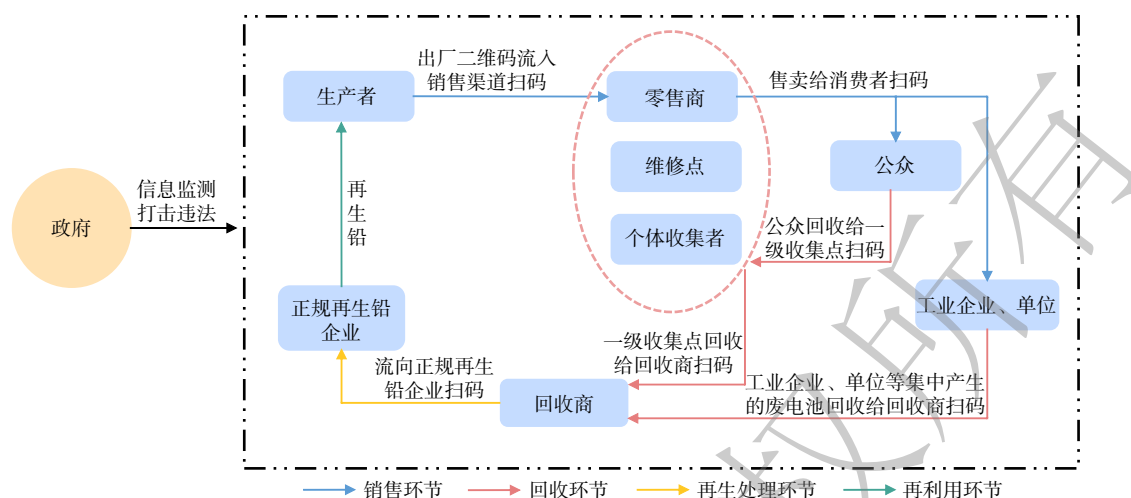
5 对策建议

我国废铅蓄电池回收利用市场尚不完善，参与回收利用过程的各主体之间存在多重矛盾冲突和利益博弈，现阶段仍需要以政府引导为主，建立完善、有序的回收利用市场，促使各方参与到正规回收利用中来。因此，本研究基于问题导向型的演化博弈模型分析提出以下建议供从业者参考。

1) 强化物联网技术的应用。社会源废铅蓄电池分布广泛、产生量巨大，对环保部门的监管造成了很大的困扰，物联网技术在这一领域的应用可以解决这个问题。山东省在铅蓄电池生产企业集中收集和跨区域转运试点工作中，在回收利用环节应用的物联网技术取得了很好的成效^[50]：将维修厂等地产生的废电池运往暂存点，贴码入库（二维码包含废电池来源、数量、重量、去向等信息）；将暂存点的废电池和工业企业等集中产生的废电池运往收集站，同样扫码入库；最后由收集站运往利用处置企业，再次扫码入库。山东省以此种方式实现了数据的动态监管，全省废铅蓄电池正规回收处置数量大幅增加。

为了达到更优的效果，除回收利用环节外，应考虑对铅蓄电池实行全生命周期追踪溯源，即每只铅蓄电池出厂时应有唯一的“二维码”身份标识，并建立起全国范围的信息监测系统^[51]。通过此种方式实现铅蓄电池来源可查、去向可追，及时发现违规环节，进行精准打击，以保证废铅蓄电池的正规回收利用。物联网技术应用下的电池流向如图 3。

2) 完善落实经济激励政策。一是完善税收政策。由于税收政策难以有效落实，生产者缴纳的消费税和回收利用环节缴纳的增值税使正规企业竞争力下降，需进一步完善落实税收返还、补贴等政策以减小正规企业税收负担。《铅蓄电池回收利用管理暂行办法（征求意见稿）》^[8]规定了编码制度下生产企业回收量的统计方



注：生产者在每只铅蓄电池出厂时要配置唯一的二维码标识，电池之后的流转都要进行扫码登记。消费者不论以何种方式都会将废电池回收给回收商手中（工业企业等集中产废单位直接回收给回收商；公众通过零售商、维修点、个体收集者回收至回收商），回收商将废电池交给正规再生铅企业，再生铅产出后实现再利用。政府对整个系统起到监管作用，在信息平台实时监测数据，精准打击违法行为。

图3 物联网技术应用下铅蓄电池的全生命周期流向

Fig. 3 The whole life cycle flow of lead-acid batteries under internet of things technology

法，后续可借鉴此办法出台正式文件，做好生产企业回收量的统计工作，依据回收量研究制定税收返还政策或发放补贴。二是激励回收环节前端主体正规回收。可以考虑在市场建设初期对公众或一级收集点进行补贴，对正规回收商予以政策支持，提高全社会的绿色回收意识，鼓励公众监督举报。

3) 建立规范的回收体系。一是加强回收环节的管理。由于生产与再生环节已有准入和规范，当前问题基本集中在回收环节，因此需要加强回收环节的监督管理，建立有序的回收市场。例如，对已颁发回收资质的企业实施高效监管，实时监测其废电池流向，避免回收企业有资质而非非法回收利用的现象发生。二是由行业协会促成多方合作，建立起区域性、全国性的回收网络^[52]。目前生产者通过零售商逆向回收，回收商和再生铅企业也均自行布设回收网络点，缺乏行业层面的统一协调。为解决回收乱象，建议可以依据当地情况，由生产者、回收商或再生企业牵头，组建回收网络，通过签订合同等方式使其他回收渠道加入回收网络，形成有序的回收局面。

4) 合理规划布局再生铅企业。国外经验显示，即使实现了高度市场化的经济，再生铅厂仍然由国家层面规划布局，不准随意建设^[10]。目前，我国正规的再生铅企业已产能过剩，但仍有企业计划新建再生铅厂，因此需从顶层对再生铅产业进行合理布局规划。

5) 加大违法行为打击力度。加强建立部门间联防联控机制，利用卫星遥感、地理信息等技术，对地下非法产业链开展综合整治，在持续打击违法违规行为的同时，探索废铅蓄电池多渠道回收途径，建立健全废铅蓄电池回收体系，保障废铅蓄电池的正规回收利用。

参考文献

- [1] 刘盛终, 丁一, 曹晓庆, 等. 废旧铅酸蓄电池的回收和再生研究进展[J]. 电源技术, 2020, 44(11): 1701-1704.
- [2] 何艺, 郑洋, 何叶, 等. 中国废铅蓄电池产生及利用处置现状分析[J]. 电池工业, 2020, 24(4): 216-224.
- [3] ALTINER M, TOP S, KURSUNOGLU S. Waste Lead-Acid Battery Recycling Technologies, Recycling Technologies for Secondary Zn-Pb Resources[M]. Springer, 2023: 235-289.
- [4] 何艺, 靳晓勤, 金晶, 等. 废铅蓄电池收集利用污染防治主要问题分析和对策[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 75-79.
- [5] 工业和信息化部. 再生铅行业规范条件[EB/OL]. [2023-10-05]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art_3aaa90bcd1144eeaacb324d73fe847fa.html.
- [6] 国务院办公厅. 生产者责任延伸制度推行方案[EB/OL]. [2023-10-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm.
- [7] 生态环境部办公厅, 交通运输部办公厅. 铅蓄电池生产企业集中收集和跨区域转运制度试点工作方案[EB/OL]. [2019-01-24]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/11/content_5438534.htm.
- [8] 国家发改委. 铅蓄电池回收利用管理暂行办法(征求意见稿)[EB/OL]. [2023-10-05]. <https://www.ndrc.gov.cn/yjzxDownload/FJ1qcdchsluylbfx.pdf>.
- [9] 中国循环经济协会. 铅蓄电池生产者履责绩效评价技术规范(试行)征求意见稿[EB/OL]. [2023-10-05]. <http://www.ttbz.org.cn/upload/file/20211122/>

- [6377316314882813511774211.pdf](#).
- [10] 卢笛. 建设有中国特色的废旧铅酸蓄电池回收体系[J]. 中国有色金属, 2018(1): 44-50.
- [11] 张波, 杨一鹏. 生产者责任延伸制度推进绿色发展的思考——以铅蓄电池产业为例[J]. 环境保护, 2019, 47(7): 38-41.
- [12] 李雪, 郭春霞, 陈耀宏, 等. 铅酸蓄电池行业生产者责任延伸制在我国实施的难点和解决方案[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 3-8.
- [13] 黄进, 曾恬静, 董敏慧, 等. 废铅蓄电池管理现状、问题与完善回收体系的建议——以湖南省为例[J]. 环境保护, 2021, 49(6): 48-51.
- [14] 李新战. 政策助推 开启废铅酸蓄电池回收新纪元[J]. 中国有色金属, 2018(8): 46-47.
- [15] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1/2): 145-156.
- [16] BABU S, MOHAN U. An integrated approach to evaluating sustainability in supply chains using evolutionary game theory[J]. Computers & Operations Research, 2018, 89: 269-283.
- [17] CHEN W T, HU Z H. Using evolutionary game theory to study governments and manufacturers' behavioral strategies under various carbon taxes and subsidies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 123-141.
- [18] 何艺, 王维, 丁鹤, 等. 铅蓄电池落实生产者责任延伸制度成效与展望[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2218-2222.
- [19] 生态环境部办公厅. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[EB/OL]. [2023-10-05]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fqzb/fl/202004/t20200430_777580.shtml.
- [20] 生态环境部办公厅, 国家发展和改革委员会办公厅, 工业和信息化部办公厅, 公安部办公厅, 司法部办公厅, 财政部办公厅, 交通运输部办公厅, 国家税务总局办公厅, 国家市场监督管理总局办公厅. 关于印发《废铅蓄电池污染防治行动方案》的通知[EB/OL]. [2023-10-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/201901/t20190124_690792.html.
- [21] SMITH J, PRICE G R. The logic of animal conflict[J]. Nature, 1973, 246(5427): 15-18.
- [22] SMITH J M. The theory of games and the evolution of animal conflicts[J]. Journal of Theoretical Biology, 1974, 47(1): 209-221.
- [23] FRIEDMAN D. On economic applications of evolutionary game theory[J]. Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1): 15-43.
- [24] TOMASSINI M, PESTELACCI E, LUTHI L. Mutual trust and cooperation in the evolutionary hawks-doves game[J]. Biosystems, 2010, 99(1): 50-59.
- [25] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1991: 637-666.
- [26] WEIBULL J W. Evolutionary game theory[M]. MIT press, 1997.
- [27] TU Y, PENG B H, WEI G, et al. EPR system participants' behavior: Evolutionary game and strategy simulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122659.
- [28] LONG R Y, YANG J H, CHEN H, et al. Co-evolutionary simulation study of multiple stakeholders in the take-out waste recycling industry chain[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 701-713.
- [29] LIU X M, LIN K K, WANG L. Stochastic evolutionary game analysis of e-waste recycling in environmental regulation from the perspective of dual governance system[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128685.
- [30] SU Y B. Multi-agent evolutionary game in the recycling utilization of construction waste[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738.
- [31] KEIVANPOUR S, AIT-KADI D, MASCLE C. Automobile manufacturers' strategic choice in applying green practices: joint application of evolutionary game theory and fuzzy rule-based approach[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(5): 1312-1335.
- [32] LI X, MU D, DU J B. Multi-channel recycling decisions of electric vehicle battery based on SD-dynamic game model[C]: 1-6.
- [33] LI X, DU J B, CHENG Y W, et al. ELECTRIC VEHICLE BATTERY RECYCLING: SYSTEM DYNAMICS GAME BASED ANALYSIS FOR THE INFLUENCING FACTORS[J]. Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 2019, 18(5): 1123-1136.
- [34] YANG J H, LONG R Y, CHEN H. Decision-making dynamic evolution among groups regarding express packaging waste recycling under different reference dependence and information policy[J]. Waste Management, 2022, 138: 262-273.
- [35] SUN Q Q, CHEN H, LONG R Y, et al. Who will pay for the "bicycle cemetery"? Evolutionary game analysis of recycling abandoned shared bicycles under dynamic reward and punishment[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 305(2): 917-929.
- [36] WANG Z, WANG Q X, CHEN B X, et al. Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry[J]. Resources Conservation and Recycling, 2020, 155: 104618.
- [37] WAINWRIGHT J. A dynamical systems approach to Bianchi cosmologies: orthogonal models of class A[J]. Classical and Quantum Gravity, 1989, 6(10): 1409.
- [38] LYAPUNOV A M. The general problem of the stability of motion[J]. International Journal of Control, 1992, 55(3): 531-534.
- [39] SU Y Y, SI H Y, CHEN J G, et al. Promoting the sustainable development of the recycling market of construction and demolition waste: A stakeholder game perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 122281.
- [40] YANG J H, LONG R Y, CHEN H, et al. Willingness to participate in take-out packaging waste recycling: Relationship among effort level, advertising effect, subsidy and penalty[J]. Waste Management, 2021, 121: 141-152.
- [41] WANG Z, HUO J Z, DUAN Y R. The impact of government incentives and penalties on willingness to recycle plastic waste: An evolutionary game theory perspective[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020, 14(2): 1-12.
- [42] 许辉. 废铅酸蓄电池规范回收出路: 生产者责任延伸制度[J]. 资源再生, 2017(8): 38-43.
- [43] BANGUERA L A, SEPÚLVEDA J M, TERNERO R, et al. Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 205: 193-200.
- [44] 国务院. 危险废物经营许可证管理办法[EB/OL]. [2023-10-05]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5139407.htm.
- [45] 财政部, 税务总局. 关于完善资源综合利用增值税政策的公告[EB/OL]. [2023-10-05]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/28/content_5676109.htm.
- [46] WANG Z, DUAN Y R, HUO J Z. The impact of government intervention measures on recycling of waste electrical and electronic equipment in China

- considering consumer decision[J]. *Energy Policy*, 2022, 160: 112697.
- [47] 李晓华, 邵举平, 孙延安. 绿色低碳产品消费市场活力激发研究——基于绿色家电产品的演化博弈[J]. *生态经济*, 2021, 37(1): 27-34.
- [48] SHAN H Y, YANG J L. Promoting the implementation of extended producer responsibility systems in China: A behavioral game perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119446.
- [49] ZHAO X M, BAI X L. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? - An analysis based on evolutionary game theory[J]. *Waste Management*, 2021, 122: 26-35.
- [50] 刘士文, 李忠河, 张海东. 山东省废铅蓄电池收集和转运体系建设的实践探索[J]. *山东化工*, 2020, 49(3): 215-216+219.
- [51] 席暄, 阿克杰, 陈志雪. 基于物联网的废铅蓄电池逆向物流回收体系的建立[J]. *蓄电池*, 2017, 54(2): 55-59+64.
- [52] 余辉, 周杰, 王玲玲, 等. 江苏省废铅酸蓄电池环境管理现状及对策研究[J]. *科学技术创新*, 2017(21): 17-18.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis of main problems and countermeasures in waste Lead-acid battery recycling in China based on evolutionary game theory

DU Bingbing¹, HOU Huimin¹, HOU Qiong^{2,*}, XU He^{1,3}, ZHANG Mo¹, CHEN Ying²

1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 3. Research Institute of Ecological Civilization, Nankai University, Tianjin 300350, China

*Corresponding author, E-mail: houbqiong@meescc.cn

Abstract The amount of waste lead-acid batteries is very large every year in China, and the irregular recycling has brought severe pollution to the environment. In recent years, China has issued a number of policies to regulate the recycling of waste lead-acid batteries, but there are still many problems within the industry. Based on the investigation, the current situation of waste lead-acid batteries' recycling was explored, that was, the battery flows and guarantee mechanism in the process of recycling were expounded. Based on the complex game relationship among stakeholders in the recycling process of waste lead-acid batteries, an evolutionary game model was introduced with being illustrated the process of the evolutionary game from the aspects of model construction, solution and result visualization. By clarifying the contradictions and conflicts of various stakeholders in the recycling process, tripartite evolutionary game models were constructed for regular collecting, the implementation of extended producer responsibility and regular recycling. Finally, combined with qualitative analysis, this paper putted forward corresponding suggestions, including strengthening the application of Internet of things technology, issuing economic incentive policies, establishing a standardized recycling system, reasonably planning and distributing renewable lead enterprises, cracking down on illegal acts, and so on.

Keywords waste lead-acid battery; evolutionary game model; recycling; extended producer responsibility