

引用格式:顾一帆,吴玉锋,周广礼,等.跨维度资源循环制度设计理论及实证模拟[J].资源科学,2018,40(3):600-610. [Gu Y F, Wu Y F, Zhou G L, et al. Theoretical framework and empirical simulation of policy design on trans-dimensional resource recycling[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 600-610.] DOI :10.18402/resci.2018.03.14

跨维度资源循环制度设计理论及实证模拟

顾一帆,吴玉锋,周广礼,左铁镛

(北京工业大学循环经济研究院,北京 100124)

摘 要:资源循环过程蕴含了原生与再生原料的耦合配置、正向与逆向供应链中利益相关者的责任协调、区域间隐含环境责任的跨境转移三个维度相互联系的子系统。在各维度管理的交叉处易于出现责任重叠或责任真空现象,亟需对资源循环制度体系进行统筹设计。本文从理论角度分析了各维度存在的独特资源环境外部性差异,探索了跨维度政策效果间存在强烈相关性的原因。以中国电子废弃物中的铜资源为例,构建了资源循环的减量效果核算模型,通过设置原再生资源税及环境税改革、生产者责任延伸制度应用、清洁发展机制推广、洋垃圾严格入境约束四种跨维度制度情景,模拟了资源循环过程对资源减量和废水及CO₂减排的影响效果,并集成优势策略,构建了跨维度政策组合情景。结果表明:各维度间政策工具的联合应用均能实现激励相容,且跨维度政策组合情景达到更优效果。相较基准情景,在2010—2030年间,该组合情景将增加91.06%的铜资源减量化效果,提升近8倍的废水及CO₂减排量。本文进一步分析了各维度政策工具的拓展方向,在原料维度可促进强制手段、市场手段与认证手段的联合应用以提高再生原料使用比例,在链条维度可充分挖掘废弃产品中蕴含的资源价值、残余功能价值与潜在信息价值以构建循环型商业模式,在区域维度可利用制造业大国的比较优势以提升中国在资源循环领域的话语权。

关键词:资源循环;跨维度;制度设计;激励相容;生命周期

DOI :10.18402/resci.2018.03.14

1 引言

按照物质流向,资源循环涵盖了原生料生产、产品加工、使用报废、产品回收和再生料生产等多个过程,涉及到多级生产者、消费者、回收者、再生利用者等多个相互影响的利益相关者,进一步需要发改委、商务部、工信部、环保部等多个部门的联合管理^[1]。如电子产品及汽车的资源循环过程均涉及到近十个部门的配合,易于在部门管理的交叉处出现责任重叠或责任真空现象,降低管理的整体效率,亟需对资源循环制度体系进行统筹设计^[2,3]。2015年,中国颁布的《生态文明体制改革总体方案》中提出要增强生态文明体制改革的系统性、整体性、协同性^[4];2017年颁布的《循环发展引领行动》中进一步提出了建立全生命周期管理制度体系的设

想^[5]。然而,如何有效划分资源循环过程,并通过理论框架设计引导政府各部门形成合力共促资源循环,仍处于探索之中。

经过“生产—消费—废弃”的长期线性经济发展过程,废弃产品的数量不断增加且集聚在城市等人口密集区域,由其造成的环境污染已成为制约经济发展的重要因素。与此同时,按照物质守恒定律,产品报废后其中蕴含的资源并未消灭,废弃产品的集聚为其中资源的开发利用提供了可能。由此,资源循环的深入推进引起了多个维度的变革:首先,再生原料的规模日益扩大,已成为资源供给的重要来源,如中国再生铜产量已超过精炼铜总产量的1/3^[6,7]。其次,废弃产品的处理量不断增加,逆向供应链自组织形成了正规与非正规回收处理企

收稿日期:2017-08-30;修订日期:2018-01-30

基金项目:北京市社会科学基金重点项目(17YJA001);国家自然科学基金项目(L1422034;7167030506);北京市重点学科项目(033000541214001)。

作者简介:顾一帆,男,山东青岛人,博士生,主要从事资源循环综合评价与政策设计研究。E-mail:jingji_xue@163.com

通讯作者:吴玉锋,E-mail:wuyufeng3r@126.com

2018年3月

业共存的产业结构,各国已开始从全生命周期视角探索废弃产品减量化与正规高效处理的途径^[8,9]。第三,国际间资源大循环的格局逐渐形成,欠发达地区不仅是高污染、低附加值的初级产品生产地,为全球提供该类产品输出,也日益成为全球废弃产品跨境转移的集结地,为全球解决废弃产品的处理问题^[10]。资源循环过程可形象地视为由原生与再生原料组成了产品这个“点”,经过正向与逆向供应链中各类利益相关者间物质传递这条“线”,最终在区域这个“面”中形成了生产、消费与回收利用的分工格局。由此,原料、链条与区域间相互影响构成了跨维度资源循环过程。本文将分别探索各维度资源循环制度设计的理论基础,并实证分析跨维度制度联合应用的耦合作用效果,为中国资源循环制度体系建设提供参考。

2 跨维度资源循环制度设计理论

资源循环的制度设计旨在解决资源环境外部性等市场失灵问题,从而使市场在资源配置中起决定性作用。跨维度资源循环过程及其中涉及到的市场失灵问题如图1所示。

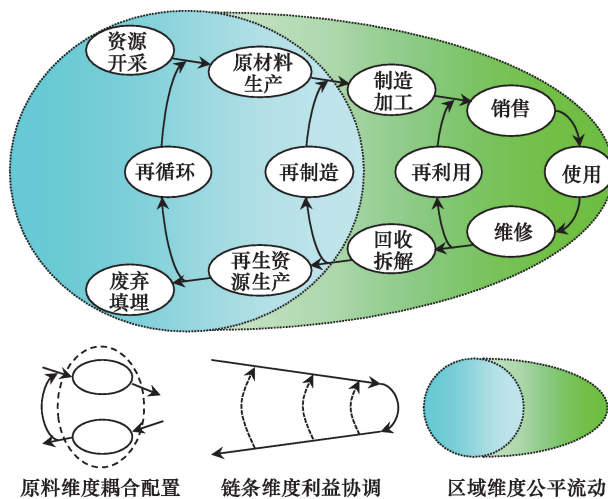


图1 跨维度资源循环过程及需要解决的外部性问题

Figure 1 Trans-dimensional resource recycling process and the external problems need to be solved

在原料维度,再生原料生产加工过程的外部性与原生原料具有较大差别:首先在资源方面,原生原料开发是逐渐消耗矿产资源的过程,具有代际资源负外部性效果^[11],而再生过程则是利用废弃产品逐渐填补资源稀缺的过程,其开发利用的过程缓解

了资源耗竭,具有强烈正外部性。其次在环境方面,再生原料开发利用避免了高耗能和高污染的采矿和选矿过程,取而代之的是更为清洁的回收和拆解,这使得资源循环过程的减排效果明显^[12,13];且废弃产品本身已是各种资源的集聚物,随着产品的升级,其纯度仍在逐渐提高,而原生矿产则随着开发数量提升而纯度降低,加剧了原生与再生原料开发利用的环境外部性差异。第三在机会成本方面,再生原料开发是逐渐消解废弃产品的过程,避免了废弃产品长期堆存的环境污染,而原生原料开发则会造成地表植被破坏、尾矿废石污染等环境影响^[6]。由此,原生与再生原料的生产均是为了满足市场需求,但外部性的差异会使市场自发形成的原料产量偏高,而再生料则偏低。原料维度的制度设计应面向如何有效解决二者的外部性差异,确保原生原料间可通过市场机制达到有效耦合配置的新格局。

在链条维度,资源循环过程中各利益相关者均在分享着产品生产消费过程的收益与效用,然而,生产消费过程同时也是废弃产品逐渐产生的过程,而废弃产品作为无主物的代表,其产权界定并不明晰^[14]。这意味着产品生产势必会出现一种新的外部性,即产品废弃后对生态环境造成的影响。为了解决该类新生外部性,需对废弃产品进行有效回收处理,这就要求在资源循环链条中界定五类责任的归属,分别为环境责任、经济责任、物质责任、所有权责任、信息披露责任,即废弃产品的环境污染由谁负责、由谁为其回收利用出资、由谁实际进行回收利用、回收利用物归谁所有、废弃产品回收利用信息由谁统筹发布五个相互链接的责任^[15]。根据“谁受益谁补偿”的原则,生产者、消费者及各级经销商均是受益者,理应为产品回收利用过程负责^[16]。链条维度的资源循环制度设计就是为了理清上述责任在各利益相关者间的协调机制,并通过制度予以约束,确保废弃产品得到有效回收利用^[17]。

在区域维度,经济全球化带来了产品和废弃物的跨境流动,产品收益由参与贸易的国家所分享,但直接或间接的资源环境外部性却主要留在了初级产品生产地^[18,19];与此同时,该类地区多位于发展中国家,劳动力成本较低,产业结构较为低端,多以矿产资源为直接原料,且对于环保的政策约束往往

不足,使得近年来各区域的废弃产品加速向其跨境转移,进一步加剧了国家间外部性的不公平分配现象^[20, 21]。除了国家层面外,同一国家内部的不同省市之间也存在相似的情况。区域维度的资源循环制度设计应面向解决区域间固有的外部性不公平分配现象。一方面,应合理控制废弃产品跨境转移,尤其是对于蕴含资源价值较低,但拆解处理却带来大量环境污染的废弃产品类型应坚决杜绝转移。另一方面,可通过先进技术的转移缓解外部性差异,谋求区域间的共赢发展,如利用清洁发展机制,通过发达区域对初级产品生产地的技术升级使两地均能享受污染物减排的效果^[22]。

与此同时,原料维度耦合配置、链条维度责任协调、区域维度公平流动的政策法规虽独立制定,但政策效果之间具有强烈相关性。如原料维度对再生资源需求量的增加,会促进链条维度中废弃产品的回收利用,甚至会增加区域维度废弃产品跨境转移的风险;链条维度中废弃产品的回收率提升会增加废弃产品拆解利用的规模经济性,从而提高再生原料使用比例;区域维度的废弃产品跨境转移会增加政府管控难度,但若在链条维度予以合理约束,使其能够进入正规回收利用渠道,相当于增加了再生原料的货源,从而也可充分发挥资源循环对缓解中国资源环境约束的作用。由此,跨维度资源循环制度设计应充分分析原料、链条与区域三个相互影响子系统间的制度效果关联,探索找寻制度应用中激励相容的最佳契合点,有效缓解中国资源环境约束。

3 研究方法与数据说明

3.1 指标与案例选取

为了评测跨维度资源循环制度联合应用对中国资源环境约束的作用效果,本文选取了资源减量和废水废气减排两类指标,即由于资源循环而减少的同类型原生原料开发利用量以及减少的废水废气排放量,其中废气以CO₂为例研究。此外,由于资源以及产品种类众多,本文选取了具有代表性的电子废弃物中铜资源循环作为案例进行分析:在原料维度,电子产品中的铜资源主要应用是线圈及导线,需要达到99.9%的纯度,而电子废弃物拆解利用环节存在正规企业与非正规作坊相互交织的产业

结构,其中的非正规作坊技术装备落后,铜资源仅能实现次级利用,造成高纯铜资源浪费^[23];且相较原生铜开发利用,正规拆解利用企业有较强的节能减排效果^[24],而非正规作坊则会造成更大环境污染^[25]。在链条维度,生产者责任延伸制度已于2012年率先应用于电子废弃物回收利用领域,要求生产者交付处理基金,并由政府将其应用于链条末端的正规拆解企业^[3]。在区域维度,电子废弃物存在严重的跨境转移现象,至今仍有部分电子废弃物以旧货或走私等形式进入中国^[26]。

3.2 研究方法

3.2.1 资源循环量核算的Stockbased模型

资源减量和废水废气减排效果核算需要以电子废弃物中铜资源循环利用的数量作为支撑。然而,现阶段中国乃至全球的统计工作均未涵盖上述领域。资源循环量核算已引起了学术界的广泛关注。如Yu等预测了全球废弃电脑的长期报废数量^[27];Dwivedy等、Kim等、Wang等与梁晓辉等分别研究了印度、韩国、荷兰及中国的电子废弃物产生量^[28-32];王琪等及李博等比对了现有电子废弃物产生量估算模型的优势和不足^[33, 34]。这些研究成果均为本文构建资源循环量核算模型提供了重要借鉴。

按照质量守恒定律,物质的流量和存量是相互影响的,存量增加则意味着系统中的流入超过流出,反之亦然^[27, 35]。基于上述原理,本文构建了Stockbased模型,预测不同时空范围内电子废弃物中的资源循环量。如公式(1)所示, P 为电子产品的社会保有量即存量; S 为其销售量即进入该区域系统的流入量; O 为产品报废量即流出量,流入与流出量的差额与存量变动值相等。公式(2)中,第 t 年电子产品的报废量应等于第 $t-i$ 年的产品销售量与其使用 i 年报废比例(即产品寿命分布 $g(i)$)的乘积之和($i=1, 2, \dots, t$)。其中,电子产品的寿命分布 $g(i)$ 服从Weibull分布,其概率密度函数如公式(3)所示, t_0 代表初始年份; u 和 v 分别为维度和形状参数,可利用MATLAB中的Wblfit函数进行计算。

$$S_t - O_t = P_t - P_{t-1} \quad (1)$$

$$O_t = \sum_{i=1}^t S_i \times g(i) \quad (2)$$

$$f(t; u, v) = \begin{cases} \frac{u}{v} \left(\frac{t-t_0}{v} \right)^{v-1} \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{v} \right)^v \right] & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (3)$$

3.2.2 Logistic分布对Stockbased模型的修正

制度实施效果往往存在时滞,需要较长时间段的电子产品报废量予以支撑。按照电子产品的发展趋势,其人均保有量保持“S”形的增长趋势并于长期无限接近一个固定的最大值(K 值),服从于Logistic分布^[36, 37]。因此,本文将该模型引入至Stock-based模型,估算电子产品长期人均保有量数据。其微分方程为:

$$dp/dt = r \times p(1 - p/K) \quad (4)$$

式中 p 为电子产品人均社会保有量; r 为内在增长率; K 为人均保有量的最大值。

3.2.3 资源循环的减量效果核算模型

根据如上关系即可利用电子产品社会保有量及使用寿命分布推导出电子产品的远景报废量。进而,如公式(5)所示,根据报废产品中的资源含量及正规利用的比例即可预测资源减量效果 R 。其中, η_{t-i} 为第 $t-i$ 年产生的报废量中在第 t 年正规拆解利用的数量, C 为单位电子废弃物中铜资源含量。如公式(6)所示,废水废气减量效果 F 为正规企业循环利用电子废弃物中铜资源的减排效果与非正规作坊增排效果的差额。其中, α 、 β 分别为正规企业中单位铜资源循环的减排系数和非正规作坊对应的增排系数。

$$R_t = \sum_{i=1}^t O_{t-i} \times \eta_{t-i} \times C_{t-i} \quad (5)$$

$$F_t = \sum_{i=1}^t O_{t-i} \times \eta_{t-i} \times C_{t-i} \times \alpha - \sum_{i=1}^t O_{t-i} \times (1 - \eta_{t-i}) \times C_{t-i} \times \beta \quad (6)$$

3.3 数据来源与基本假设

中国每百户居民年末电子产品的保有量,以及人口数量和家庭户规模均来自《中国统计年鉴》^[38]。电子废弃物的正规拆解比例来自于中国商务部流通业发展司发布的《中国再生资源回收行业发展报告》^[39]与中国物资协会发布的《中国再生资源行业发展报告》^[24]。电子废弃物中铜资源含量来自于文献^[40, 41];单位铜资源循环的废水及废气减排效果来自于《中国再生资源行业发展报告》^[24]。

本文的基本假设如下:由于中国电子废弃物拆解利用行业仍处于起步阶段,有较大发展空间,假设其正规拆解比例将以每年2%的速度增长,且最大值设定为95%。考虑到电子废弃物的跨境转移现象以及其拆解利用存在损耗,设定初始年份中跨境转移的比例为中国报废量的5%,正规企业技术上允许的铜资源原级利用比例为60%。

4 跨维度资源循环制度模拟与设计

4.1 跨维度资源循环制度情景设定

为了分析各维度资源循环制度的影响,本文根据中国现有管控电子废弃物的制度构建方向,设置了如下四种制度情景,如表1所示。

表1 各类制度情景的基本假设及其参数设置

Table 1 Basic assumptions and parameter settings of various policy scenarios

制度情景	基本假设与参数设置的变更
再生资源资源税及环境税改革情景	再生铜资源原级利用率以2%/年的速度增长
生产者责任延伸制度推广情景	电子废弃物规范回收率的年均增长率由2%/年提升至4%/年
清洁发展机制推广情景	资源循环的减排效果以2%/年的速度增长
洋垃圾严格入境约束情景	电子废弃物跨境转移量以2%/年的速度减少

原料维度:2016年中国对资源税和环境税均进行了大规模的调整,提出要逐步对水、森林、草场等自然资源开征资源税,对大气污染物、水污染物、固体废物、噪声开征环境税。原生资源开发利用伴随着自然资源破坏以及较高的环境污染排放,这将增加其税费水平。与此同时,2015年由财政部牵头颁布的《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》^[42],对于从电子废弃物中回收的原料将退税30%;同年,中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》^[4],明确提出建立再生原料推广使用制度,要求原料消耗企业使用一定比例的再生原料,上述措施将加快再生原料对原生原料的替代,本文由此设定了原再生资源税及环境税改革情景。

链条维度:2009年国务院颁布了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》^[43],对电子废弃物实行生产者责任延伸制度,开始探索通过处理基金制度将生产者的责任由产品生产延伸至拆解利用,并于2012年正式确定了将电视、空调、洗衣机、电冰箱、

电脑五大家电作为试点率先纳入该责任延伸体系。2016年国务院办公厅发布了《生产者责任延伸制度推行方案》^[44],提出支持生产企业建立电子废弃物新型回收体系,运用“互联网+”提升规范回收率,旨在进一步延伸生产者责任至电子产品生命周期全链条管理。这将有望大幅提升电子废弃物的规范回收率,本文由此设定了生产者责任延伸制度推广情景。

区域维度:除产品自由贸易外,在资源循环领域国际间的跨境转移主要包括两种类型。其一是运用清洁发展机制,由发达国家通过技术和资金支持发展中国家以获得相应温室气体减排量。截至2017年7月中国已获得了1557个清洁发展机制项目,其中关于废弃产品再生利用相关的项目有近60项,较好促进了资源循环过程中节能减排效果的提升。其二是废弃产品非法跨境转移,如在2000年之前全球70%以上的电子废弃物跨境转移至中国进行处理,中国的贵屿、台州等地均成为其主要转移地,造成了严重的环境污染^[45]。为此,中国加入了控制其跨境转移的巴塞尔公约组织,并通过实施《关于坚决控制境外废物向我国转移的紧急通知》^[46]、《关于禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》^[47],加大对违法现象的惩罚力度,较好限制了电子废弃物入境。本文由此设置了清洁发展机制加速推广以及洋垃圾严格入境约束两种制度情景。

4.2 资源循环制度对资源减量与污染减排的影响

由于电子废弃物正规拆解利用比例的提升,在基准情景中资源循环过程的资源减量与废水及CO₂减排效果均呈现了不断增长的发展趋势。如图2a所示,资源减量效果由2012年的1.02万t增长至2030年的13.9万t,且2010—2030年间的资源总减排量为153.9万t。废水及CO₂减排效果已于2015年起发生逆转,由原先的增排转变为减排,且减排量将随时间呈现加速增长的趋势,年均增长率高达24.0%,在2030年该产业对于废水及CO₂的减排效果将分别达到374.3万t及126.4万t。

原料维度的资源税及环境税改革情景与链条维度的生产者责任延伸制度情景作用效果相似,如图2b及图2c所示,均可快速提升再生比例,进而增

加废水及CO₂的减排量。相较基准情景,在2010—2030年间,这两种情景的资源减量分别提升了43.2%及38.1%,废水及CO₂减排分别提升了2.9倍及2.8倍。然而,在资源循环中,两种制度的作用环节却有较大不同,其中后者影响的是产品正规回收率,而前者则是针对已回收产品的资源利用率。正规回收率与资源利用率的乘积即为废弃产品中资源的循环利用率,这意味着原料与链条维度的制度方案可有效衔接达到激励相容的效果,如图2f所示,这两种维度的组合可使资源减量效果较基准情景提升100.2%,几乎达到了无损叠加的水平,废水及CO₂减排效果的模拟也呈现了相似结果。

区域维度中清洁发展机制加速推广情景可快速提升废水及CO₂的减排能力,如图2d所示,在2010—2030年间该产业的减排量相当于基准情景的3.2倍。然而,该种情景无法增加再生铜利用量,这使得其减排效果难以得到充分发挥。洋垃圾严格入境约束情景可有效降低电子废弃物非正规拆解量,由此减少了该类主体产生的污染。如图2e所示,2010—2030年间较基准情景减少了1.6亿台电子废弃物进入非正规渠道,由此降低的废水量达214.7万t;然而,该项措施同样缩减了正规拆解企业的货源,如相同期间内的正规拆解量将减少1.1亿台,废水及CO₂减排量也将随之降低。政策的双向作用相互抵消,使得该项政策的废水及CO₂总减排量将与基准情景基本持平。

将区域维度与原料或链条维度的制度相组合可得到相似的变化趋势如图2g及图2h所示,两者均达到了激励相容的效果,既增加了再生资源的利用量,同时也提升了单位资源循环的减排效果。本文将上述三个维度的制度相组合构建了跨维度制度组合情景,如图2i所示,该情景实现了更优的效果。一方面,虽然区域维度限制电子废弃物跨境转移降低了该产业的资源减量效果,但链条维度的生产者责任延伸制度将有效弥补正规拆解企业货源不足的困境。如相较基准情景,2010—2030年间该组合情景将额外增加7.6亿台的正规拆解量,并减少10.2亿台的非正规拆解量,由此将铜资源减量效果提升了91.1%。另一方面,原料与链条维度联合增加了铜资源循环量,将有助于充分发挥区域维度

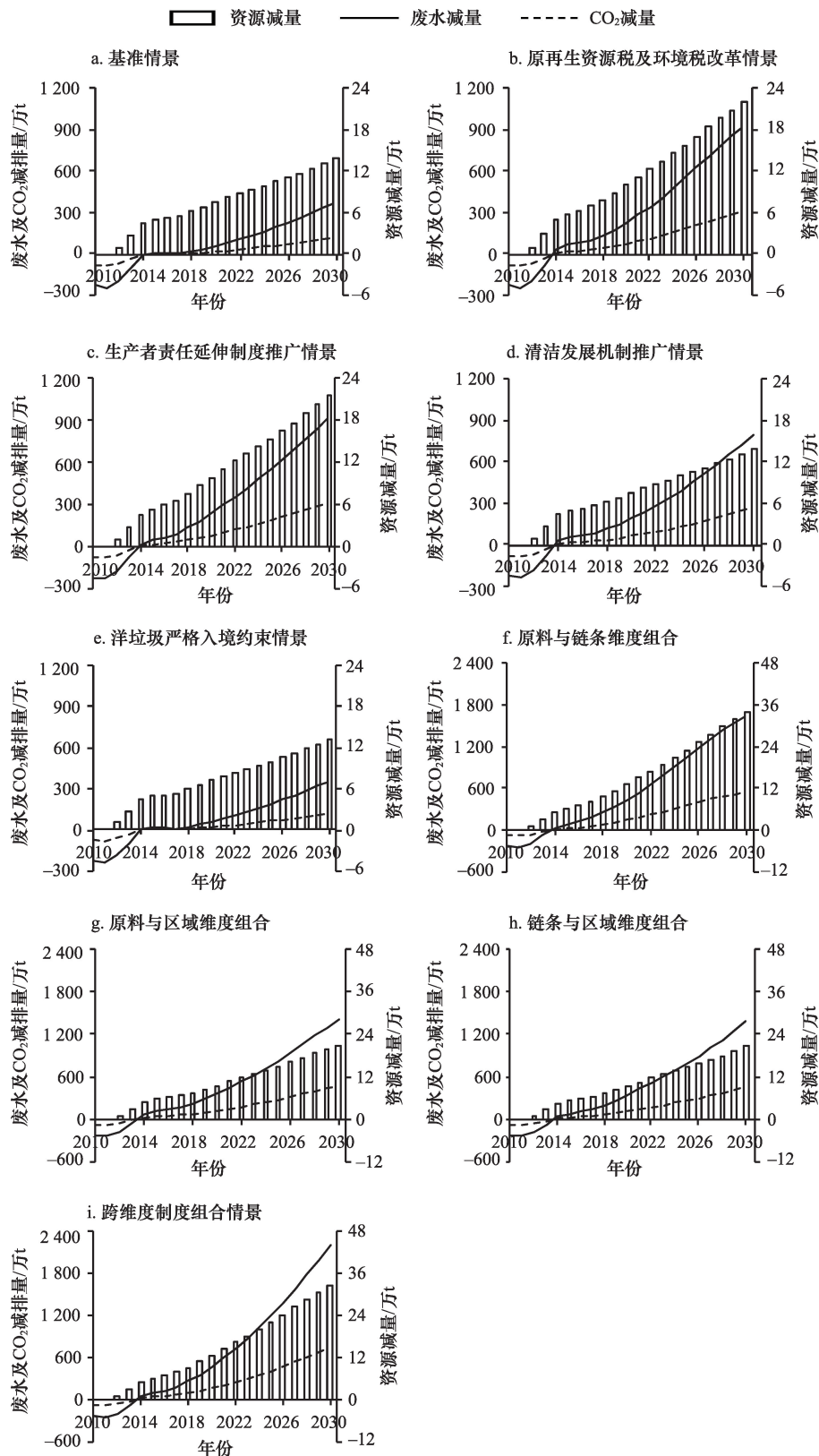


图2 跨维度资源循环制度对资源环境效应的影响效果

Figure 2 The effects of trans-dimensional resource recycling policies on resource conservation and environmental protection

清洁发展机制的作用,2010—2030年间废水及CO₂减排量将较单独实施清洁发展机制提升1.8倍。

4.3 跨维度资源循环制度组合方案设计

与传统针对单一环节、单一主体的制度设计方案不同,资源循环制度设计需要从原料、链条和区域三个维度入手,对全生命周期各利益相关者进行协调。为了达到并更好发挥本文构建的跨维度制度组合情景中的激励相容效果,一方面可考虑构建横跨多部门的资源循环顶层管理机构,从全生命周期甚至多个生命周期过程的资源减量与污染减排这个根本出发点来统筹设计制度方案。另一方面,中国目前的政策体系尚未达到有效解决三个维度外部性的水平,需积极拓展现有政策工具^[48]。

在原料维度,涵盖了强制手段、市场手段和认证手段三类政策工具引导外部性内部化,应加强联合应用以提升再生原料的使用比例。其中,强制手段即运用政府强制力保障实施,除了资源税与环境税改革外,也可积极推进再生原料强制使用制度,如德国政府已要求PET原料生产企业必须采用25%的再生料,否则需缴纳两倍税款等。市场手段是要挖掘并构筑新型市场空间,引导企业自发调整产量,如可尽早将原生与再生原料的生产企业纳入排污权交易市场,也可在政府采购项目中通过提升再生原料比例等方式确保其占有市场优势。认证手段需要将再生原料的使用比例纳入现有认证体系中,如在生态设计试点企业、绿色供应链管理示范企业、国家绿色技术银行等认证中将其作为必选指标,从而使申请企业自发提升再生原料使用比例。

在链条维度,为了有效提升废弃产品的正规回收利用水平,需引导市场力量充分挖掘其中蕴含的潜在价值:一是资源价值,即上文中已论述的从废弃产品中提取蕴含的资源^[23]。二是残余的功能价值,即废弃产品再利用及其中零部件再制造的潜力^[49, 50]。三是潜在信息价值,产品报废同样预示着新产品的需求,废弃产品的价位、品牌、机型、使用状况、甚至是报废家庭所在小区的档次等均关系着消费者对新产品需求的偏好,这对于生产者的精准营销策略具有重要推动作用;此外,消费者对于产品全生命周期的用户体验评价可直击品牌的优劣

势,为生产者改进后续生产提供依据。

由此,在链条维度,除了继续完善现有的生产者责任延伸制度,促进废弃产品回收利用外,一方面,政策应更加关注如何激发产品再使用、零部件再制造,以期形成废弃产品梯级利用的循环体系。这就需要构建成套的旧货检测及交易标准体系,并逐渐引导公众改变对于二手产品的意识偏见,增加产品再利用的机会^[51]。另一方面,中国目前已在积极探索的“互联网+”再生资源回收模式,为生产企业及销售平台获取废弃产品中的关键信息提供了可能,也为新型商业模式的构建提供了契机^[52, 53],这将有可能逐渐引导生产者自愿履行回收责任。在这种趋势下,政策思路应更加开阔,如针对废弃产品回收利用可积极拓展政府和社会资本合作的PPP模式,引导企业构建循环型商业模式,既解决了废弃产品带来的环境问题,也利用了其中的潜在价值。

在区域维度,中国应逐渐提升在资源循环领域的话语权。作为全球最大的制造业国家,中国众多产品远销海外,如2015年中国所生产56.1%的计算机、44.1%的冰箱、39.7%的电视、29.7%的洗衣机、26.5%的空调出口国外。这些产品虽在中国生产,但却最终在其他国家消费和报废,因此中国产品生态设计对于全球的资源循环具有重要作用,是从全生命周期视角实现全球资源减量与污染减排的有效手段,甚至可以作为大国间环保博弈与区域间气候变化谈判的筹码。此外,中国承接全球供应链的中低端环节,原料消费仍将长期维持在较高水平。废弃产品会对环境造成影响,但同样蕴含着可用资源,如日本已针对富含金、银、铅、钢等本国短缺原料的废弃产品进行了战略储备^[6]。因此,对于废弃产品的跨境转移,应根据中国资源禀赋条件以及废弃产品拆解利用的污染情况,合理择选产品类型,并提前布局正规的回收利用渠道。

5 结论与政策启示

(1)资源循环过程蕴含了原再生原料的耦合配置、正逆向供应链中利益相关者的责任协调、区域间隐含环境责任的跨境转移三个维度相互影响的子系统。从理论角度分析,各维度存在的独特资源环境外部性差异如下:在原料维度,相较原生料,再生料的正规开发利用在资源、环境与机会成本三个

2018年3月

方面均存在正外部性效果;在链条维度,各利益相关者均在分享着产品生产消费过程的收益,但产品生产必然会伴随一种新的外部性出现,即产品废弃后对生态环境造成的长期影响;在区域维度,经济全球化带来了产品和废弃物的跨境流动,产品收益为参与贸易的各国所分享,但生产与废弃环节的资源环境外部性却主要留在了初级产品生产地,造成区域间不公平现象。资源循环制度设计应主要应用于解决上述三个维度的外部性差异。

(2)各维度的政策工具虽独立制定,但政策效果间具有强烈相关性。本文以中国电子废弃物中的铜资源为例,构建了资源循环的减量效果核算模型,通过设置原再生资源税及环境税改革、生产者责任延伸制度应用、清洁发展机制推广、洋垃圾严格入境约束四种跨维度制度情景,模拟了各情景中资源循环过程对资源减量和废水及CO₂减排的影响效果,并集成各优势策略,构建了跨维度政策组合情景。结果表明:各维度间政策工具的联合应用均能分别实现激励相容,且跨维度政策组合情景达到了更优的效果。相较基准情景,在2010—2030年间,该种组合情景将增加7.6亿台的正规拆解量,并减少10.2亿台的非正规拆解量,由此将增加91.06%的铜资源减量化效果,提升近8倍的废水及CO₂减排量。

(3)为了达到并更好发挥本文构建的跨维度制度组合情景中激励相容的效果,一方面可考虑构建一个横跨多部门的资源循环顶层管理机构,另一方面也需把握时代发展趋势,积极拓展现有政策工具:在原料维度可提升强制手段、市场手段与认证手段的联合应用以提高再生原料比例,在链条维度可充分挖掘废弃产品中蕴含的资源价值、残余功能价值与潜在信息价值以构建循环型商业模式,在区域维度应利用制造业大国的比较优势以提升中国在资源循环领域的话语权。

参考文献(References):

- [1] 沈镛. 资源的循环特征与循环经济政策[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 32-38. [Shen L. On circulation characteristics of natural resources and policies of circulation economy[J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 32-38.]
- [2] Hu S H, Wen Z G. Why does the informal sector of end-of-life vehicle treatment thrive? A case study of China and lessons for developing countries in motorization process[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 95: 91-99.
- [3] Gu Y F, Wu Y F, Xu M, et al. To realize better extended producer responsibility: redesign of WEEE fund mode in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 347-356.
- [4] 中共中央, 国务院. 生态文明体制改革总体方案[EB/OL]. (2015-09-21)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm. [The Central Committee of the Communist Party of China, the State Council. Overall Plan for the Reform of the Ecological Civilization System[EB/OL]. (2015-09-21)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm.]
- [5] 国家发展改革委, 科技部, 工业和信息化部, 等. 循环发展引领行动[EB/OL]. (2017-04-21)[2017-08-30]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201705/t20170508_846797.html. [National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Industry and Information, et al. Circular Development Leading Action[EB/OL]. (2017-04-21)[2017-08-30]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201705/t20170508_846797.html.]
- [6] 顾一帆, 吴玉锋, 穆献中, 等. 原生资源与再生资源的耦合配置[J]. 中国工业经济, 2016, (5): 22-39. [Gu Y F, Wu Y F, Mu X Z, et al. Coupling allocation of primary and secondary resources[J]. *China Industrial Economics*, 2016, (5): 22-39.]
- [7] 王昶, 徐尖, 姚海琳. 城市矿产理论研究综述[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1618-1625. [Wang C, Xu J, Yao H L. A systematic review of urban mining theory[J]. *Resources Science*, 2014, 36(8): 1618-1625.]
- [8] 顾一帆, 王怀栋, 吴玉锋, 等. 再生资源供应链的结构、行为和绩效分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(7): 46-52. [Gu Y F, Wang H D, Wu Y F, et al. Structure, behavior and performance of secondary resource supply chain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(7): 46-52.]
- [9] Genovese A, Acquaye A A, Figueroa A, et al. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: evidence and some applications[J]. *Omega-International Journal of Management Science*, 2017, 66: 344-357.
- [10] Wang Z H, Zhang B, Guan D B. Take responsibility for electronic-waste disposal[J]. *Nature*, 2016, 536(7614): 23-25.
- [11] 王育宝, 胡芳肖. 非再生资源开发中价值补偿的途径[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 1-11. [Wang Y B, Hu F X. Routes of the value loss compensation of the non-renewable resources in the development[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(3): 1-11.]
- [12] 韩珺. 循环经济与节能减排解析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 173-176. [Han J. Circular economy and energy-saving and emission reduction[J]. *China Population, Resources and*

- Environment*, 2008, 18(3): 173–176.]
- [13] 邵留国, 何莹莹, 张仕璟, 等. 基于网络 DEA 的中国火电行业循环经济效率及影响因素研究[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1975–1987. [Shao L G, He Y Y, Zhang S J, et al. Circulation economic efficiency and its influence factors of China's thermal power industry based on network DEA model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(10): 1975–1987.]
- [14] 田亦尧, 陈德敏. 无主物的意涵类型化界分及其面向再生资源利用的制度选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 170–176. [Tian Y Y, Chen D M. Distinction about the res nullius connotations type and system selection about the renewable resources[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(1): 170–176.]
- [15] Lindqvist T. Extended Producer Responsibility in Cleaner Production[D]. Sweden: Lunds universitet, 2000.
- [16] 唐绍均. 论废弃产品问题的界定、成因与制度因应[J]. 资源科学, 2008, 30(4): 546–553. [Tang S J. A discussion on the definition, cause and regimental antidote of waste product problems[J]. *Resources Science*, 2008, 30(4): 546–553.]
- [17] 童昕, 颜琳. 可持续转型与延伸生产者责任制度[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(8): 48–54. [Tong X, Yan L. Sustainable transition and extended producer responsibility[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(8): 48–54.]
- [18] 闫云凤, 赵忠秀, 王苒. 基于 MRIO 模型的中国对外贸易隐含碳及排放责任研究[J]. 世界经济研究, 2013, (6): 54–58. [Yan Y F, Zhao Z X, Wang R. China's emission responsibility and trade-embodied emissions: a MRIO approach[J]. *World Economy Study*, 2013, (6): 54–58.]
- [19] 王文举, 李峰. 国际碳排放核算标准选择的公平性研究[J]. 中国工业经济, 2013, (3): 59–71. [Wang W J, Li F. Fairness in the selection of international carbon emissions accounting standards[J]. *China Industrial Economics*, 2013, (3): 59–71.]
- [20] Breivik K, Armitage J M, Wania F, et al. Tracking the global generation and exports of e-waste. Do existing estimates add up?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8735–8743.
- [21] Breivik K, Armitage J M, Wania F, et al. Tracking the global distribution of persistent organic pollutants accounting for e-waste exports to developing regions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 50(2): 798–805.
- [22] 李崇, 任国玉, 高庆先, 等. 固体废物焚烧处置及其清洁发展机制[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 819–827. [Li C, Ren G Y, Gao Q X, et al. Solid waste incineration disposal and associated CDM in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(7): 819–827.]
- [23] Gu Y F, Wu Y F, Xu M, et al. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 331–338.
- [24] 中国物资再生协会. 中国再生资源行业发展报告(2015–2016)[M]. 北京: 中国财富出版社, 2016. [China National Resources Recycling Association. Industry Development Report of Recycled Resources of China (2015–2016)[M]. Beijing: China Fortune Press, 2016.]
- [25] Chi X W, Streicher P M, Wang M Y L, et al. Informal electronic waste recycling: a sector review with special focus on China[J]. *Waste Management*, 2011, 31(4): 731–742.
- [26] Li J H, Lopez N B N, Liu L L, et al. Regional or global WEEE recycling. Where to go?[J]. *Waste Management*, 2013, 33(4): 923–934.
- [27] Yu J, Williams E, Ju M, et al. Forecasting global generation of obsolete personal computers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9): 3232–3237.
- [28] Dwivedy M, Mittal R K. Future trends in computer waste generation in India[J]. *Waste Management*, 2010, 30(11): 2265–2277.
- [29] Dwivedy M, Mittal R K. Estimation of future outflows of e-waste in India[J]. *Waste Management*, 2010, 30(3): 483–491.
- [30] Kim S, Oguchi M, Yoshida A, et al. Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model[J]. *Waste Management*, 2013, 33(2): 474–483.
- [31] Wang F, Huisman J, Stevels A, et al. Enhancing e-waste estimates: improving data quality by multivariate input-output analysis[J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2397–2407.
- [32] 梁晓辉, 李光明, 贺文智, 等. 中国电子产品废弃量预测[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 82–84. [Liang X H, Li G M, He W Z, et al. Forecast the amount of the e-waste in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(7): 82–84.]
- [33] 王琪, 杨旸, 马红焯. 废弃电子产品资源化潜力预测模型研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 147–153. [Wang Q, Yang Y, Ma H Y. Research on prediction models of electronic waste recycling potential[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11): 147–153.]
- [34] 李博, 杨建新, 吕彬, 等. 废弃电器电子产品产生量估算: 方法综述与选择策略[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 7965–7973. [Li B, Yang J X, Lv B, et al. Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: methods review and selection strategy [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 7965–7973.]
- [35] Zhang L, Yuan Z W, Bi J. Predicting future quantities of obsolete household appliances in Nanjing by a stock-based model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(11): 1087–1094.
- [36] Yang Y, Williams E. Logistic model-based forecast of sales and generation of obsolete computers in the U. S. [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2009, 76(8): 1105–1114.
- [37] Yan Y, Williams E. Forecasting Sales and Generation of Obsolete Computers in the U. S. [C]. San Francisco: IEEE, 2008.
- [38] 国家统计局. 中国统计年鉴 2016[EB/OL]. (2016–10–12)[2017–08–30]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2016/indexch.htm>. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2016[EB/OL]. (2016–10–12)[2017–08–30]. <http://www.stats.gov>.

2018年3月

- cn/tjsj/ndsj/2016/indexch.htm.]
- [39] 商务部流通业发展司, 中国物资再生协会. 中国再生资源回收行业发展报告2016[EB/OL]. (2016-05-25)[2017-08-30]. <http://ltfzs.mofcom.gov.cn/article/ztzzn/an/201605/20160501325666.shtm>. [Department of Circulation Industry Development of the Ministry of Commerce, China National Resources Recycling Association. Report on the Development of Secondary Resources Recycling Industry in China 2016[EB/OL]. (2016-05-25)[2017-08-30]. <http://ltfzs.mofcom.gov.cn/article/ztzzn/an/201605/20160501325666.shtml>.]
- [40] Morf L S, Tremp J, Gloor R, *et al.* Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste—actual levels in Switzerland[J]. *Waste Management*, 2007, 27(10): 1306–1316.
- [41] Oguchi M, Sakanakura H, Terazono A, *et al.* Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process[J]. *Waste Management*, 2012, 32(1): 96–103.
- [42] 财政部, 国家税务总局. 资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录[EB/OL]. (2015-06-12)[2017-08-30]. http://szs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201506/t20150616_1256758.html. [Ministry of Finance of China, State Administration of Taxation. Value Added Tax Preferential List for Products and Services in Comprehensive Utilization of Resources Industry[EB/OL]. (2015-06-12)[2017-08-30]. http://szs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201506/t20150616_1256758.html.]
- [43] 国务院. 废弃电器电子产品回收处理管理条例[EB/OL]. (2009-02-25)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1257453.htm. [The State Council of China. Waste Electrical and Electronic Products Recycling Management Regulation [EB/OL]. (2009-02-25)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1257453.htm.]
- [44] 国务院办公厅. 生产者责任延伸制度推行方案[EB/OL]. (2017-01-03)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm. [General Office of the State Council of China. Implementation Scheme of Extended Producer Responsibility System[EB/OL]. (2017-01-03)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm.]
- [45] Hicks C, Dietmar R, Eugster M. The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China—legislative and market responses [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2005, 25(5): 459–471.
- [46] 国务院办公厅. 关于坚决控制境外废物向我国转移的紧急通知[EB/OL]. (1995-11-07)[2017-08-30]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/bf/200207/20020700031331.shtml>. [General Office of the State Council of China. Urgent Notice on the Resolute Control of the Transfer of Overseas Wastes into China[EB/OL]. (1995-11-07)[2017-08-30]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/bf/200207/20020700031331.shtml>.]
- [47] 国务院办公厅. 关于禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案[EB/OL]. (2017-07-27)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/27/content_5213738.htm. [General Office of the State Council of China. Implementation Scheme on Prohibition of Overseas Wastes into China and Promoting the Reform of the Management System for Import of Solid Waste[EB/OL]. (2017-07-27)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/27/content_5213738.htm.]
- [48] 张越, 谭灵芝, 鲁明中. 发达国家再生资源产业激励政策类型及作用机制[J]. 现代经济探讨, 2015, (2): 88–92. [Zhang Y, Tan L Z, Lu M Z. Type and mechanism of incentive policies in the resources recycling industry in developed countries[J]. *Modern Economic Research*, 2015, (2): 88–92.]
- [49] Toktay L B, Wei D. Cost allocation in manufacturing—remanufacturing operations[J]. *Production & Operations Management*, 2011, 20(6): 841–847.
- [50] Stahel W R. Circular economy[J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 435–438.
- [51] Hood B. Make recycled goods covetable[J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 438–440.
- [52] Tong X, Tao D Y, Lifset R. Varieties of business models for post-consumer recycling in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 665–673.
- [53] 王昶, 吕夏冰, 孙桥. 居民参与“互联网+回收”意愿的影响因素研究[J]. 管理学报, 2017, 14(12): 1847–1854. [Wang C, Lv X B, Sun Q. A study on the influencing factors of residents' participation in "online collection"[J]. *Chinese Journal of Management*, 2017, 14(12): 1847–1854.]

Theoretical framework and empirical simulation of policy design on trans-dimensional resource recycling

GU Yifan, WU Yufeng, ZHOU Guangli, ZUO Tieyong

(Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract: Resource recycling processes contain a subsystem with interactions between the three dimensions of coupling allocation of primary and secondary resources, responsibility coordination of stakeholders in forward and reverse supply chains, and trans-boundary transfer of hidden resource and environmental responsibilities between regions. Overlap or lack of responsibility appears at the intersection of these three management dimensions and a policy system for recycling resources is needed. From a theoretical perspective we analyzed external differences for resources and environments in various dimensions and explored why the effects of trans-dimensional policies are strongly correlated. Taking the example of copper resources in waste electrical and electronic equipment, we constructed a reduction effect accounting model of resource recycling and set four trans-dimensional policy scenarios: resources tax and environmental tax reform of the raw and secondary resources, application of extended producer responsibility system, promotion of clean development mechanism, and strict entry barriers of imported waste. We simulated the impact effect of resource recycling process on resource deduction and emission reduction of waste water and gas, and constructed a trans-dimensional policy mix scenario. We found that combined application of various dimensional policies achieves incentive compatibility and a trans-dimensional policy mix scenario reaches a better effect. Compared to the baseline scenario, this scenario will increase 91.06% copper resource reduction effects and improve the emission reduction of waste water and gas by eight times from 2010 to 2030. In the resource dimension, the combined application of compulsory, market and authentication methods should be promoted to improve the use ratio of secondary resources. In the supply chain dimension, the resource value, residual functional value and potential information value contained in waste products should be fully excavated to construct a circular business system. In the regional dimension, the comparative advantages of manufacturing power should be utilized to improve China's voice in resource recycling.

Key words: resource recycling; trans-dimension; policy design; incentive compatibility; life cycle