

中国废纸回收系统物质流分析与评价

刘满芝*,谈 帅,栾常锦,付志伟 (中国矿业大学(徐州)管理学院,江苏 徐州 221116)

摘要: 构建了 2017 年中国废纸回收决策系统的基准模型,其中重点关注废纸非规范回收对中国国内废纸回收系统的经济效益和环境(GHG 排放量)的影响.其次,对影响废纸回收系统效益的相关参数进行了灵敏度分析,最后在整合非规范回收商贩情境下对系统经济效益和 GHG 排放量进行了预测.结果表明:2017 年中国废纸回收的经济效益约为 458.3 元/t,GHG 排放量为 901.1kgCO_{2eq};规范回收率和非规范回收接受率都会对系统经济效益和改善 GHG 排放结构有显著影响;整合非规范回收企业以及个体回收商的情境下 2030 年经济效益将上升至 3312.5 元/t,而 GHG 排放量上升至 942.9kgCO_{2eq}.并且通过情境预测发现整合非规范回收能提升规范回收率,这能有效规范中国的废纸回收市场.

关键词: 废纸回收; 物质流分析; 灵敏度分析; 情景预测

中图分类号: X705,X32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)01-0439-14

Material flow analysis and evaluation of waste paper recycling system in China. LIU Man-zhi*, TAN Shuai, LUAN Chang-jin, FU Zhi-wei (School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China). *China Environmental Science*, 2020,40(1): 439~452

Abstract: This paper constructed a benchmark model of China's waste paper recycling decision system in 2017, focusing on the impact of nonstandard waste paper recycling on the economic and environmental benefits of China's domestic waste paper recycling system. This model construction was followed by sensitivity analysis of the relevant parameters affecting the efficiency of the waste paper recycling system. Finally, the system's economic benefits and GHG emissions were forecast in the context of integrating nonstandard recycling vendors. The results showed that the economic benefit of China's waste paper recycling in 2017 was approximately 458.3 yuan/t and that the GHG emissions were 901.1kgCO_{2eq}. The standard recovery rate and nonstandard recovery acceptance rate would both have a significant impact on the system's economic benefits and improved the GHG emissions structure. In the context of integrating nonstandard recycling enterprises and individual recycling vendors, the economic benefits would rise to 3312.5 yuan/t in 2030, while GHG emissions would rise to 942.9kg CO_{2eq}. And through scenario prediction, it was found that the integration of nonstandard recycling could improve the standard recovery rate, which could effectively regulate China's waste paper recycling market.

Key words: waste paper recycling; material flow analysis; sensitivity analysis; scenario prediction

垃圾回收再利用一直是各国关注的焦点之一,由于废纸本身相对清洁且回收价值相对较低,废纸的回收似乎一直很难成为关注的焦点,^[1-2]然而中国已经成为了世界上最大的纸和纸产品生产国^[3],其巨大的产量和消费量却与中国较低的废纸回收率形成对比.而大部分废纸都可以回收再利用^[4-5],所以低回收率带来了大量资源浪费,并且在不当的回收和处理方式中产生了大量温室气体,严重阻碍了中国碳减排目标的实现^[6].低回收率的背景下反应的是国内废纸回收行业规范缺乏、非规范回收占据主导、居民回收意识不足等^[7-8],因此,需要开展梳理中国废纸的物质流过程,评价废纸回收再利用的经济效益和环境影响,以及揭示和解决回收再利用难点等方面的研究.

废纸回收一直以来都是城市废物回收系统中

重要的一环,Liang 等^[9]和 Merrild 等^[10]通过从资源和能源节约的角度分析了废纸回收的重大意义,通过对欧洲废纸回收率上升研究,发现废纸回收从长期来看有利于节约林木资源^[11].废纸不仅本身存在回收再利用的价值,通过对其工艺的改善也能增加废纸经济循环的可行性^[12-14].更多废纸回收的相关研究是分析现实废物回收现状并建立模型从定性和定量角度来评价包括废纸在内的废物回收系统的^[15-18].从宏观角度出发,Ervasti 等^[19]和 Seigné-Itoiz 等^[20]总结了废纸整个生命周期主要的一些过程,并且归纳了形容废纸回收的一些标准参数.此外,

收稿日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71874186);江苏省高校哲学社会科学重点项目(2018SJZD1084);国家大学生创新训练计划项目(201810290057)

* 责任作者, 副教授, liumanzhi@cumt.edu.cn

还有部分研究探究了影响居民进行废物回收动机的因素,并且向政府和决策者提出自己的政策建议^[21-24].通过梳理中国废纸回收系统,相关研究都揭示了中国废纸行业管理体系混乱、以零散的个体商贩回收为主的现状^[25-28].中国废纸回收主体以一些零散的商贩和个人的小型回收中心为主,各自为主根本难以形成体系进行管理.中国包括废纸在内的废弃物一直都是非规范回收占据主导^[8],而非规范回收成本高、质量差,甚至在回收过程中会对环境造成二次污染,因此不规范的个体回收商回收越多越造成资源浪费^[29],最终阻碍了规范废纸回收体系的建立.

目前针对废纸回收利用,大多数文献进行了定性分析,即使建立了模型也基本缺乏实际定量的数据支撑^[20,23-26,30].基于此,本文构建了中国废纸回收系统模型,从非规范回收角度重点定量分析了其对废纸回收整个系统的影响.因此,本文运用物质流分析方法构建中国纸和纸板的全生命周期框架,通过结合碳税与量化模型对废纸回收的经济效益和对环境的 GHG 排放量进行评估,运用灵敏度分析揭示影响废纸回收经济效益和环境效益的主要影响因素,结合国家政策设置整合非规范回收政策情境对废纸回收决策系统进行预测并用 LMDI 模型进行验证,提出废纸回收系统改进的政策建议.

1 研究方法

本文运用物质流分析方法^[30-32],首先建立一个废纸回收系统物质流图,梳理出中国废纸的各项活动、流向和流量.并在此基础上,将物质流分析结果与生命周期清单分析模型相结合,以评估废纸回收经济效益和环境影响(GHG 排放).

1.1 物质流分析(MFA)

1.1.1 范围和系统边界 本研究的废纸包括废纸箱、废书本以及废报纸.时间和空间的边界是 2017 年的中国. Ervasti 等^[19]指出纸的闭环供应链的主要活动过程为:“纸的生产”、“纸的消费”、“纸的回收”以及“纸的回收利用”,从纸消费环节到纸回收环节中,因为不是所有的纸都可以回收^[20],所以这两个环节之间存在“其他选择”这个环节.有学者将纸的生命周期边界扩展为 6 个环节:林木种植管理、制浆造纸过程、运输过程、废纸回收制浆、焚烧和填

埋^[25],或者 8 个环节:原木开采、原木切片、原浆生产、纸和纸板生产、纸产品生产、使用、废物管理(收集和分拣)和回收利用^[20].结合上述划分,本文提出纸的生命周期主要包括 6 项活动:原木切片、纸浆生产、纸浆造纸、使用(储存)、废纸回收利用、不可回收废纸处理.纸浆生产又分为正向的原木制浆和逆向的废纸制浆;不可回收废纸无法进入废纸的回收系统,只能进入城市固体废弃物系统,因此不可回收的废纸作为城市固体废弃物加以处理^[33].中国大多数城市固体废弃物的处理方式主要分为燃烧和填埋^[34],同时还有少部分会间接损失到环境中.废纸回收利用过程分为规范回收和非规范回收^[26,28],由一些大型回收企业或者规范分拣中心进行的废纸回收本文称之为“规范回收”;而由一些中小型企业甚至是一些个体回收商贩进行的回收,因为相较于前者,其无法有效的对回收的废纸进行分拣,同时具有配套设施不完善以及管理比较粗放等劣势,本文把这种回收称之为“非规范回收”.考虑中国纸和纸板及相关产品的进出口活动,本文在图中同样展示了国际与国内的纸相关产品的交易活动,包含了木材、木浆和纸产品的进口以及木浆、纸产品的出口,具体情况见图 1.

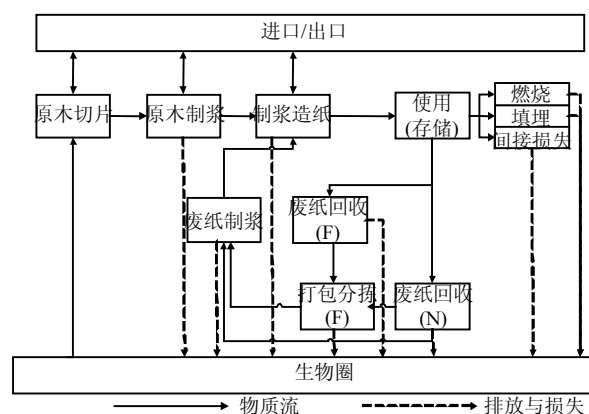


图 1 中国纸和纸板的生命周期边界

Fig.1 Chinese paper and board life cycle system boundaries

如图 1 所示,“废纸回收(F)”与“废纸回收(N)”分别表示废纸的规范回收和非规范回收.本文考虑到非规范回收缺乏相应的设施,因此图中只考虑了“打包分拣(F)”,表示规范的废纸分拣回收中心在回收过程中的打包分拣环节.由“制浆造纸”、“使用(存储)”、“废纸回收(F)”、“废纸回收(N)”以及“打

包分拣(F)”和“废纸制浆”构成的纸闭环供应链,其中后三者构成了中国的废纸回收管理系统.同时根据中国回收资源利用再生协会废纸分会(CRRC)2018年11月的调查显示,中国已经有许多大型造纸企业逐步开始建立起了规范的废纸回收分拣中心,甚至直接和下游的包装企业以及用户直接建立起合作关系,直接回收废旧的瓦楞纸箱和工业废纸,本文认为该情况属于直接的废纸规范回收,同时大部分废纸还是由个体回收商贩回收到小型的垃圾回收站,再经过非规范的打包分拣后卖给造纸企业;此外,更有个体回收商贩回收废纸后直接卖给规范的分拣中心.综合以上情况,废纸回收的渠道本文认为包括直接规范回收、分拣;直接的非规范回收、分拣以及非规范回收后再规范分拣的回收^[27-28].此外,木材、木浆、纸和纸板以及废纸都存在着国内与国外之间的进出口关系.同时,图中还列出了在造纸过程主要产生排放的过程,集中在制浆、造纸还有随着城市固体废弃物产生的废纸燃烧.

1.1.2 流量的计算方法 在本文研究的系统中涉及到的物质流以及它们的计算都基于质量守恒原理^[35].对于系统中的每个阶段,进入该阶段的总流入量等于流出该阶段的总流出量.每个过程的总投入等于生产、库存以及每个过程的损失之和,而该阶段的流出即下阶段的流入等于该阶段的总投入与该阶段的消耗的差值.

1.2 废纸回收系统的效益评估

1.2.1 绩效指标 中国的可回收废纸主要包括废旧纸箱、旧书本、废报纸以及一些其他的可回收废纸^[36].为了评估废纸回收、分拣以及重新利用的情况,本文设定以下指标:回收率(R)、规范回收率(α)、非规范回收率(β)、规范回收的废纸接受率(η)、非规范回收的废纸接受率(λ)、以及分配率(θ).回收率(R)在国际上的定义尚未形成统一标准,Ervasti 等^[19]列出过 2003~2013 年间一些文献中出现过的回收率,不同的国家和地区确有区别,比如说,Sevigné-Itoiz 等^[20]就将废纸的回收率和回收利用率区分开来,回收率表示回收的废纸量与纸和纸板的消费总量的比值,而 Berglund 等^[37]在考虑废纸回收率计算回收的废纸量时把废纸的进出口数值也纳入其中;参考上述文献以及国内回收报告与年鉴^[34,38-39],本文定义废纸回收率的等式如下:

$$\text{回收率}(R) = \frac{\text{回收利用废纸总量}}{\text{纸和纸板消费总量}} \times 100\% \quad (1)$$

由图 1 可知,可回收废纸的回收途径主要有两条:规范回收和非规范回收.由此,本文定义废纸规范回收率的等式如下:

$$\text{规范回收率}(\alpha) = \frac{\text{规范回收废纸总量}}{\text{纸和纸板消费总量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{非规范回收率}(\beta) = \frac{\text{非规范回收废纸总量}}{\text{纸和纸板消费总量}} \times 100\% \quad (3)$$

国内目前缺乏相关的废纸回收规范以及部分个体商贩回收的素质较低,回收的废纸中掺杂各种杂质^[21],这会导致回收的废纸质量参差不齐,尤其是非规范回收的废纸质量非常低.而回收的废纸质量直接影响能够进行再利用的废纸数量,因此本文用废纸接受率来评价回收废纸的质量,包括规范回收废纸接受率和非规范回收废纸接受率:

$$\text{规范回收废纸接受率}(\eta) = \frac{\text{规范回收再利用废纸总量}}{\text{规范回收废纸总量}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{非规范回收废纸接受率}(\lambda) = \frac{\text{非规范回收再利用废纸总量}}{\text{非规范回收废纸总量}} \times 100\% \quad (5)$$

前面提到,非规范回收的废纸会有部分通过规范的分拣后再进行废纸制浆,本文用非规范废纸分配率来衡量这一部分废纸的比例:

$$\text{非规范废纸分配率}(\theta) = \frac{\text{规范分拣中心回收的非规范回收废纸总量}}{\text{非规范回收废纸总量}} \times 100\% \quad (6)$$

1.2.2 经济效益 回收活动的经济收益是驱动回收行为的第一要素,本文用 Y_t 表示第 t 年废纸回收带来的经济效益.在计算经济效益时,本文考虑废纸回收系统带来的收益减去整个回收系统过程的成本^[1,40].由于废纸在回收系统中的流向与途径不同,本文将废纸分为三个部分,主要有进入制浆的回收再利用废纸(X_{RU})、分拣中心回收废纸(X_{RF})以及个体回收商贩自身回收的废纸(X_{RN}).本文定义:

$$X_{RU} = X_{RU,F} \times \eta + X_{RU,N} \times \lambda \quad (7)$$

$$X_{RF} = X_{RU,F} + X_{RU,N} \times \theta \quad (8)$$

$$X_{RN} = X_{RU,N} \times (1 - \theta) \quad (9)$$

式中: $X_{RU,F}$ 表示消费的单位纸和纸板产生的规范回

收的废纸量, $X_{RU,N}$ 表示消费的单位纸和纸板产生的非规范回收的废纸量,这两部分废纸会最终合流进入废纸制浆这一环节.式(8)中,进入分拣中心的废纸包括全部的直接规范回收的废纸和部分进入规范分拣中心的非规范回收废纸.式(9)表示未进入分拣中心由个体商贩自身分拣处理的废纸量.

无论是规范回收还是非规范回收的废纸均来自于废纸产生端,因此在模型中本文定义废纸回收价格 P_R 相同^[36,41].可回收利用废纸经过废纸制浆环节后成为再生的纸和纸板,而废纸转化为纸浆再到再生的纸和纸板有一定转化比率,结合以往中国造纸协会年度报告的数据计算得出^[34],这个比率 τ 约为 0.8,这个数据与国外学者得到的结论类似^[42].因此,本文建立如下回收系统的经济模型:

$$Y_t = (P_{RU} \times \eta + X_{RU,N} \times \lambda) \times \tau - P_R \times (X_{RU,F} + X_{RU,N}) - C_S \times (X_{RU,F} + X_{RU,N} \times \theta) - C_R \times (X_{RU,N} \times (1 - \theta))$$

(10)

式(10)中: P_{RU} 表示再生纸和纸板的价格;废纸规范回收和非规范回收不仅回收的渠道差别较大,回收后的管理以及处理的设备和方式也有较大区别^[17,22],因此在核算废纸回收系统的经济效益时必须将规范回收和非规范回收的成本区别开来,本文用 C_S 表示规范回收的单位成本, C_R 表示非规范回收的单位成本.

1.2.3 GHG 排放 在考虑废纸的环境排放时,主要采用的是 IPCC 2001 年的指标,着重考虑废纸回收系统对环境 GHG 排放量^[43]. E_t 表示第 t 年单位回收废纸对环境造成的 GHG 排放.根据中国回收纸行业 2016 年的发展报告,中国在可回收纸中有 66%为废旧纸箱,废旧书本和旧报纸分别为 23%和 10%.本文综合考虑了上述 3 种可回收纸对环境 GHG 排放,分别按一定的比例算出废纸对环境 GHG 排放的均值,计算过程中本文将 IPCC2001 年的全球变暖的指标参数和 Ecoinvent 数据库中对应数据以及一些文献中得数据综合考虑.废纸在回收过程除了正常回收制浆造纸过程中会对环境产生一定 GHG 排放^[44],同时回收过程中的废纸因为在管理过程中本身又会对环境造成 GHG 排放或者因为较低接受率的废纸在处理其中的杂质或其他固体垃圾时同样会对环境产生二次排放^[45].因此,本文将废纸回收系统对环境造成的温室气体排放

分为两部分,一部分是废纸回收制浆造纸过程中产生的有效 GHG 排放,另一部分是由于回收的废纸本身的管理或者杂质造成废纸在回收处理过程中的二次 GHG 排放.

废纸回收系统对环境的影响和其他产品或服务一样应列出它对环境有害影响,国内外学者对纸类产品的环境影响评价指标主要有全球变暖潜势 GWP^[20]、酸化潜势、富营养化潜势、不可再生资源静态储量寿命、光化学烟雾潜势^[46],本研究中本文主要利用 IPCC 的方法评估废纸回收系统的全球变暖潜势(GWP),用 CO_2 当量表示废纸在回收过程中排放的温室气体对环境造成的温室效应^[20].

表 1 主要温室气体全球变暖的参数指标

Table 1 Major greenhouse gas parameters of global warming

环境类别	指标	参数	权重值	来源
全球变暖,100 年(GW)	全球变暖趋势 (kgCO ₂ 当量)	CO ₂	1	IPCC(2011) ^[47]
		CH ₄	23	
		N ₂ O	296	
		CO	1.57	

综上所述,本文定义:

$$E_t = (X_{RU,F} \times \eta + X_{RU,N} \times \lambda) \times \tau \times E_{TW,c} + (X_{RU,F} \times (1 - \eta) + X_{RU,N} \times (1 - \lambda)) \times E_{TW,o}$$

(11)

式中: $E_{TW,c}$ 表示单位再生纸和纸板对环境造成的 GHG 排放量, $E_{TW,o}$ 表示单位回收废纸在废纸回收过程对环境造成的二次 GHG 排放量.废纸在回收系统中排放的主要温室气体为 CO_2 、 CH_4 、 CO 、 N_2O ,而 N_2O 在排放的温室气体的比重太小以至于本文可以忽略不计^[48],本文利用表 1 和 Ecoinvent 数据库中温室气体排放的数据,运用式(12)计算出 $E_{TW,c}$ 的具体数值.

$$E_{TW,c} = \sum (\varepsilon_m \sum G_{mi} \times \omega_i)$$

(12)

在式(12)中, m 表示可回收废纸的类别,分别是废旧纸箱、旧书本和旧报纸, i 表示排放的温室气体的类别,分别是 CO_2 、 CH_4 、 CO . $G_{m,i}$ 表示第 m 种废纸对环境排放第 i 种温室气体的量, ω_i 表示不同的温室气体在 IPCC(2011)中的权重.本文在考虑造成二次排放的废纸时,由于这部分和不可回收废纸一样丧失了其回收的价值,因此这部分废纸可以被当做不可回收废纸处理^[49],因此,在核算 $E_{TW,o}$ 时,本文采用了不可回收废纸在城市废弃物处理系统对环境

境排放的数据。

1.2.4 综合效益 根据现代工业经济发展的客观规律来说,经济利益往往与环境污染是紧密联系的^[50-51],如何高效回收废弃产品、减少碳排放成为政府和企业共同关注的焦点。而碳税已经成为世界上公认的解决人类社会高碳环境的有效手段^[52],征收碳税是促使企业达到节能减排实现高效率的有效途径,因此,本文通过碳税将两个模型结合起来,建立起了综合效益指标 Y_{CB} :

$$Y_{CB,t} = Y_t - C_{C,t} E_t \quad (13)$$

式中: $C_{C,T}$ 表示在 t 年中国碳税的价格,而中国目前的碳税价格在 30 元/t^[52]。回收率的相关数据来自于中国造纸协会年度报告,规范回收率和非规范回收率通过中国造纸协会年度报告和中国统计年鉴计算得出;废纸接受率通过中国造纸协会年度报告以及中国再生资源行业发展报告相关数据估算得出。废

纸的单位 GHG 排放量参考相关书籍^[47]和 Ecoinvent 数据库;再生纸和纸板价格以及回收废纸价格数据来自于中国纸业网;成本数据来自于中国工业统计年鉴以及中国劳动统计年鉴。通过计算,17 年废纸回收的经济效益为 458.3 元/t,造成的环境 GHG 排放量为 901.1kgCO₂eq/t。

2 结果分析

2.1 基准年份(2017 年)纸和纸板的物质流分析

以 2017 年为基准年份,本文使用 e-Sankey4.0 软件绘制了中国 2017 年纸和纸板的生命周期框架图(图 2),图中显示了 2017 年纸和纸板生命周期各阶段的物质流、储存和损失的状况。图中包括了中国和国际两个市场环境,方框代表纸和纸板在其生命周期内各阶段的各项活动,单向箭头代表原料和资源的投入或废物的排出。

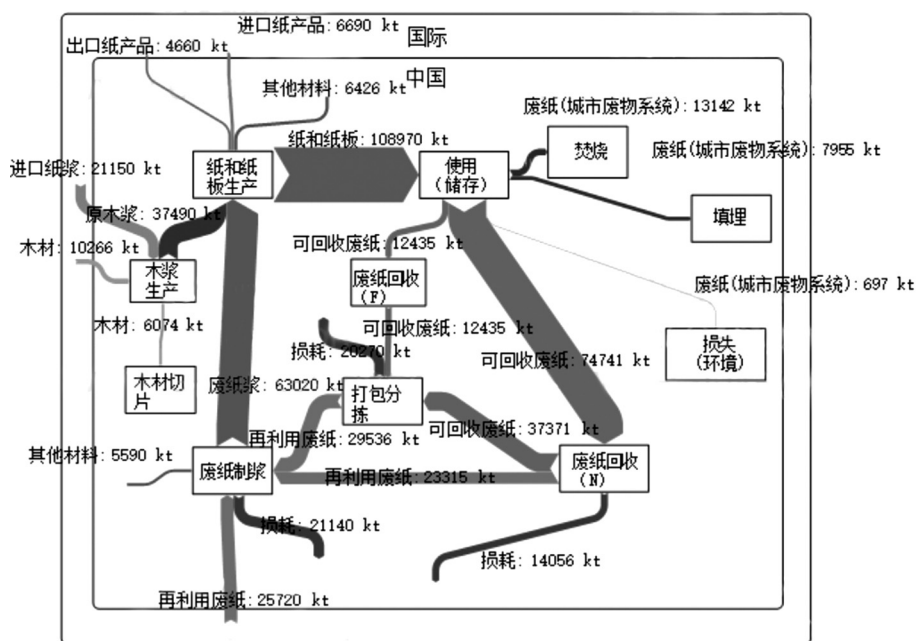


图 2 中国 2017 年纸和纸板的生命周期

Fig.2 Chinese paper and board life cycle in 2017

根据中国林业统计年鉴数据,2017 年占总量 37%约为 6074kt 国内生产木材和剩余 63%约为 10266kt 进口木材进入原木浆生产环节,同时根据中国造纸工业 2017 年度报告,约占 1/3 左右造纸纸浆的原木浆进入了纸和纸板的生产;108970kt 的纸和纸板经过消费使用后,除去一部分储存外,产生了约为 87176kt 可回收废纸进入废纸回收系统;

进入城市废弃物系统的废纸分别有 60.3%、36.5%以及 0.2%进行了焚烧、填埋和损失在环境中^[34]。进入回收系统的可回收废纸主要分为两部分,大约 14.3%的可回收废纸和 85.7%的可回收废纸分别被规范和非规范回收。被非规范回收的废纸由于较低的废纸接受率,部分回收商将废纸卖给了规范的回收企业或分拣中心,而另一部分废纸自行处理后直

接卖给了造纸企业,由于数据缺乏,本文假定分配率 θ 为 50%^[32],因此 37371kt 的回收再利用废纸进入了“打包分拣”环节,另一部分除去杂质后进入了“废纸制浆”环节.直接进入造纸企业和经过分拣中心后再进入造纸企业的非规范回收废纸都来源于非规范回收,因此其本文假定其可接受率一样.规范分拣出来的废纸与非规范回收的废纸经过去杂后一起进入废纸浆生产环节,这部分占总量 67.3%的回收利用的废纸与 22.7%的进口废纸一起生产了 63020kt 的废纸浆,废纸浆再与原木浆一起进行纸和纸板的生产,这样就构成了整个纸和纸板的生命周期.

“使用(存储)”流向“废纸回收(F)”和“废纸回收(N)”箭头粗细的明显差别表明中国国内废纸绝大部分都是非规范回收,而回收的废纸中又因为质量问题最后仅有约有 50.75%的废纸被回收利用^[64-67],如此低的效率必然会造成资源大量的浪费和废纸回收成本过高.因此,如果考虑国内可回收废纸都能得到有效回收,那么国内每年产生的可回收废纸量完全满足废纸制浆所需要的数量,而中国 2017 年废纸回收率仅为 48.5%^[64],因此,除去技术条件的限制,非规范回收的比例过高成为了中国废纸回收率仍然较低的最大原因.

2.2 灵敏度分析

2.2.1 规范回收率 不同的废纸回收途径(规范回收与非规范回收)会对整个废纸回收系统过程中总的成本、经济效益以及 GHG 排放都会产生影响.自 2014 年以来,中国纸浆的市场需求量在 7900 万 t~8000 万 t 之间,同样观察到废纸浆的需求量也是比较稳定.又因为废纸本就不是高价值的回收废品,在没有形成规模效应下个体回收商的生存空间会越来越小,因此本文首先假定废纸非规范回收率不变和废纸回收率保持上升的情况下分析了废纸的规范回收率上升对经济效益、环境效益和综合效益 3 种指标的影响.

本文将回收率的起点设置为 2017 年中国废纸回收率 0.485;而欧盟的废纸回收率已经达到了 71.5%的理论值,中国废纸回收率虽然近些年增长速度较快,但是增长的速度在减慢并逐渐平稳,因此 70%的回收率对中国来说已经是目前难以实现的目标^[3].本文用 MATLAB 软件分别绘制出了回收率对

经济指标、综合效益指标和 GHG 排放折线图,结合表 2 的数据发现,当中国的废纸回收率从 50%上升到 70%时,每回收 1t 废纸的经济收益比原来增加了 389 元.规范回收率仅从 9.7%上升到 31.2%的变化使得废纸的经济效益上升了 84.9%,规范回收率的上升会对中国的废纸回收带来巨大的经济效益.

表 2 废纸回收效益对规范回收率的灵敏度分析
Table 2 Sensitivity analysis of waste paper recovery benefit to standard recovery rate

指标	废纸回收率					
	0.485	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
规范回收率	0.097	0.112	0.162	0.212	0.262	0.312
非规范回收率	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
废纸接受率	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
非规范废纸接受率	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075
分配率	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
经济效益(元/t)	458.3	496.3	608.0	701.0	779.8	847.3
GHG 总排放(kgCO _{2eq} /t)	901.1	902.8	907.8	911.9	915.4	918.4
二次 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	331.7	325.3	306.4	290.6	277.3	265.9
有效 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	569.4	577.5	601.4	621.3	638.1	652.6
碳税(元/t)	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
综合经济效益(元/t)	431.2	469.2	580.7	673.7	752.3	819.8

由图 3 可知,随着回收率的上升, Y_t 和 $Y_{CB,t}$ 也在明显上升,但是增长速度略有减慢,这是因为随着回收率上升,规范回收率增长空间有限而速度逐渐减缓,因此整个经济效益增长会有所减缓;综合效益与经济效益比较接近,这表明碳税对废纸回收的经济指标影响不大,进一步说就是中国目前起步阶段设置的碳税较低.图 4 中分别显示了整个废纸回收系统的 GHG 排放总量以及有效和二次 GHG 排放与回收率之间的变化关系.尽管废纸回收率从 0.5 上升到了 0.7,但是回收系统中废纸的 GHG 排放总量变化却并不明显,仅从 902.8kgCO_{2eq} 变化到 918.4kgCO_{2eq};但是有效的 GHG 排放从 577.5kgCO_{2eq} 上升到了 652.6kgCO_{2eq},二次 GHG 排放量下降了 59.4kgCO_{2eq},下降了约为 18.3%.在有效 GHG 排放上升与二次 GHG 排放下降的同时,有效 GHG 排放量占据整个废纸回收系统的 GHG 总排放量的比例从 64%上升到了 71.1%,这项指标可以用来形容废纸回收系统的 GHG 排放的效率,该指标的上升说明了回收系统中有更多的废纸得到了规范有效回收,这样不仅提升了用来制浆造纸的废纸量,同时也降低非规范回收对环境造成的影响.因此,回收率上升也会带来一

定程度碳排放结构优化.

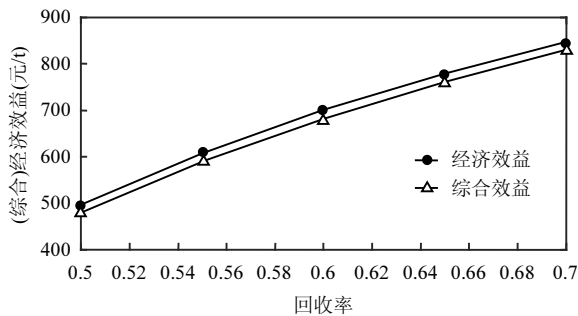


图3 回收率对经济和综合效益指标的影响
Fig.3 Impact of recovery rates on economic and comprehensive benefit

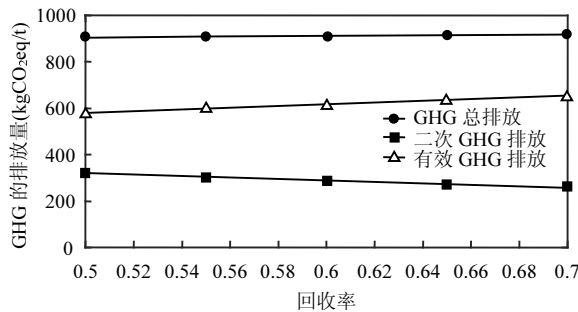


图4 回收率对 GHG 排放量的影响
Fig.4 Effect of recovery rate on GHG emissions

2.2.2 非规范回收接受率 除了规范回收的比例过低,规范回收与非规范回收的废纸质量也有较大差别.规范的分拣中心由国家的行业标准进行限制,在噪声、排放污染等各方面都有严格规定,而一些从事非规范回收的个体商由于回收量有限、回收效率低,配套设施不完善,常常对从居民端回收的废纸无法进行有效分拣,因此回收的废纸质量较低^[21].所以本文针对废纸回收系统效益对非规范回收废纸的接受率 λ 灵敏度进行分析,表3列出了分析的结果.

通过表3同样绘制了非规范废纸接受率 λ 分别与经济效益、综合经济效益和GHG排放的折线图.参数 λ 的变化范围设置为从0.5到0.7^[3,53].当 λ 从0.5变化到0.7时,单位回收的经济指标从419.3元上升到了1458元,单位废纸的收益直接变为了原来的3.5倍.这个结果一方面说明主导中国废纸回收的非规范回收质量提升对整个废纸回收系统至关重要,也从侧面反映出非规范回收造成的资源浪费与损失是难以估计的.

表3 废纸回收系统效益对非规范回收废纸接受率的灵敏度分析

Table 3 Sensitivity analysis of the efficiency of waste paper recovery system to the acceptance rate of nonstandard waste paper recovery

指标	非规范回收废纸接受率				
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
规范回收率	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
非规范回收率	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
规范回收废纸接受率	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
分配率	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
经济效益(元/t)	419.3	679.0	938.7	1 198.3	1458.0
GHG 总排放(kgCO _{2eq} /t)	899.8	908.1	916.3	924.6	932.8
二次 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	336.4	305.1	273.8	242.5	211.2
有效 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	563.4	603.0	642.5	682.1	721.6
碳税(元/t)	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
综合经济效益(元/t)	392.3	651.7	911.2	1170.6	1430.0

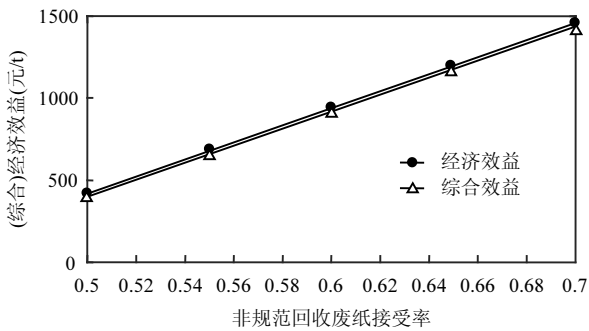


图5 非规范回收废纸接受率对经济指标和综合效益的影响
Fig.5 Influence of the acceptance rate of non-standard waste paper on economic benefits and comprehensive benefits

图5是 λ 对单位废纸回收的经济效益和综合效益的影响.综合效益要比经济效益略低同样反应了碳税对废纸回收系统的经济收益影响较小.图6中GHG排放总量由899.8kgCO_{2eq}变化到932.8kgCO_{2eq},同样是变化不明显.而有效的GHG排放量却从563.4kgCO_{2eq}上升到了721.6kgCO_{2eq},增加了28.1%;二次GHG排放量从336.4kgCO_{2eq}下降到了211.2kgCO_{2eq},下降了37.2%,有效GHG排放量占总排放量的比例62.6%上升到了77.4%.同样,非规范回收废纸接受率提升也能明显改善废纸回收系统的排放结构,但是相较于规范回收率,其对废纸回收的经济效益提升更为有效,主要在于提升非规范回收废纸的质量防止了大量的资源浪费.因此,无论是从经济效益还是从GHG排放的角度来说, λ 的提升对整个废纸回收系统改善都很有意义.

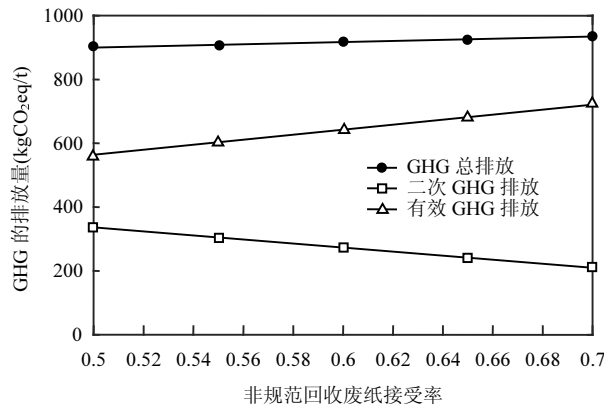


图 6 非规范回收废纸接受率对 GHG 排放量的影响
Fig.6 Influence of acceptance rate of nonstandard recycled waste paper on GHG emission

表 4 分配率对中国单位废纸回收经济效益和综合效益的影响

Table 4 The effect of distribution rate on the economic and comprehensive benefits of waste paper recycling in China

指标	分配率					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
规范回收率	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
非规范回收率	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
废纸接受率	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
非规范回收废纸接受率	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075
经济效益(元/t)	458.3	410.0	361.8	313.6	265.3	217.1
碳税(元/t)	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
综合效益(元/t)	431.2	383.0	334.8	286.5	238.3	190.0

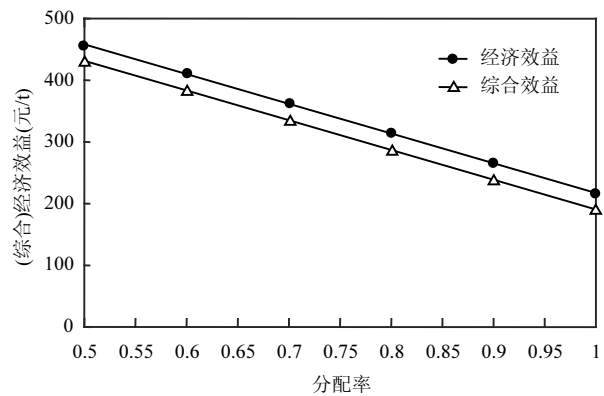


图 7 分配率对经济效益和综合效益的影响
Fig.7 Influence of distribution rate on economic benefit and comprehensive benefit

2.2.3 分配率 在中国废纸回收系统中,除了规范回收率和非规范废纸回收接受率会对废纸回收有影响,表 4 为分配率对整个系统经济效益和综合效益产生影响.图 7 显示了 θ 从 0.5 到 1 变化下经济效

益和综合效益的变化关系.结果表明,随着分配率的上升废纸回收单位经济效益从 458.3 元下降到了 217.1 元.当分配率 θ 达到理论上限 1 时,经济效益下降了 52.8%.这表明废纸通过个体回收商再到规范分拣中心和直接卖给造纸企业相比,这中间增加的非规范废纸回收的环节会由于中间环节的增加而增加不必要的成本,这从侧面又反映出了非规范回收的成本也会影响废纸回收的效益.因此,通过对分配率灵敏度分析,非规范回收与规范回收相比还存在成本过高的问题.

2.3 废纸回收系统的情景预测

通过灵敏度分析,规范回收率 α 和非规范回收废纸接受率 λ 上升会带来废纸回收经济效益和综合效益的上升,而分配率 θ 的上升会带来回收系统成本的上升而导致废纸回收的经济效益和综合效益的下降;而从环境角度来说规范回收率 α 和非规范回收废纸接受率 λ 上升会提升废纸回收系统的有效 GHG 排放,降低系统的二次 GHG 排放,改善废纸回收系统碳排放结构.在此基础上,本文在参考 2014~2017 年数据下结合废纸回收行业的调查报告^[3,54],选择整合非规范回收企业和商贩情境下对中国废纸回收利用的经济收益、GHG 排放量和综合经济效益进行 2018~2030 年预测并通过 LMDI 模型探究验证整合非规范回收在减排方面的作用.

2.3.1 整合非规范回收情景下废纸回收系统效益预测 整合非规范回收是指国家通过扶持或建立规范的回收企业以及逐步取缔中小型非规范的回收商和个体商贩从而代替他们继续从事废纸回收工作的做法.中国将在 3a 内推出约 100 家左右符合规范条件的示范废纸加工企业^[53].废纸分拣规范中的条例显示,以 10 万 t 生产能力起步,预计在 2020 年左右规范纸加工企业产能达到市场份额的 40% 到 50%.因此,本文在中国废纸回收率稳定增长和中国政府加强废纸回收行业规范整合非规范回收商贩和企业情境下,即保持规范回收率增长以及非规范回收率下降的情境下对 2018 年到 2030 年三种指标进行了预测.表 5 列出了在废纸回收率上升和碳税价格不变的情况下 2018 到 2030 年的预测情况,同时绘制出了相应折线图(图 8,9).

结果显示,中国将在 2030 年废纸回收率达到

61.9%,废纸回收率增长了 12.1%。在国家建立废纸回收行业规范后,废纸规范回收率从 9.7%上升到 49%,相对地,非规范回收率从 38.8%下降到 12.9%。因此,如果在政府推动整合非规范回收情境下中国废纸

回收行业将会快速发展,国内规范回收废纸量占据整个中国回收废纸的比例从 20%上升到接近 80%,这会导致国内废纸回收市场直接由非规范回收占主导到规范回收占主导的转变。

表 5 2018 年到 2030 年整合废纸非规范回收商情况下各项指标变化情况

Table 5 Changes in various indicators in the case of integrating nonstandard recycling of waste paper from 2018 to 2030

指标	年份												
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
回收率	0.494	0.504	0.513	0.523	0.533	0.543	0.553	0.563	0.574	0.585	0.596	0.607	0.619
规范回收率	0.132	0.168	0.205	0.241	0.274	0.306	0.336	0.364	0.392	0.418	0.443	0.467	0.490
非规范回收率	0.362	0.336	0.308	0.282	0.259	0.237	0.217	0.199	0.183	0.167	0.153	0.141	0.129
废纸接受率	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
非规范回收废纸接受率	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075	0.5075
经济收益(元/t)	640.7	843.8	1054.2	1268.1	1481.3	1697.1	1914.8	2135.9	2360.7	2590.0	2824.6	3065.2	3312.5
GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	905.8	910.5	915.2	919.5	923.3	926.7	929.8	932.6	935.1	937.4	939.4	941.2	942.9
二次 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	313.8	296.1	278.1	262.0	247.5	234.4	222.6	212.1	202.6	194.0	186.3	179.4	173.2
有效 GHG 排放(kgCO _{2eq} /t)	592.1	614.4	637.1	657.5	675.8	692.3	707.2	720.5	732.6	743.4	753.1	761.8	769.7
变动碳税(元/kg)	0.042	0.056	0.069	0.083	0.096	0.110	0.124	0.137	0.151	0.166	0.180	0.195	0.211
综合效益(VC)(元/t)	602.3	793.2	991.0	1192.1	1392.5	1595.3	1799.9	2007.7	2219.0	2434.6	2655.1	2881.3	3113.7
固定碳税(元/kg)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
综合效益(FC)(元/t)	623.0	825.4	1035.1	1248.4	1461.1	1676.3	1893.6	2114.3	2338.7	2567.7	2802.0	3042.3	3289.4

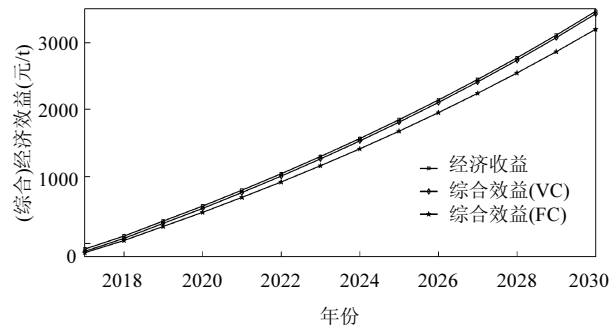


图 8 2018~2030 年整合非规范回收情况下(综合)经济效益变化曲线

Fig.8 Comprehensive economic benefit curve in the case of integrating nonstandard recovery from 2018 to 2030

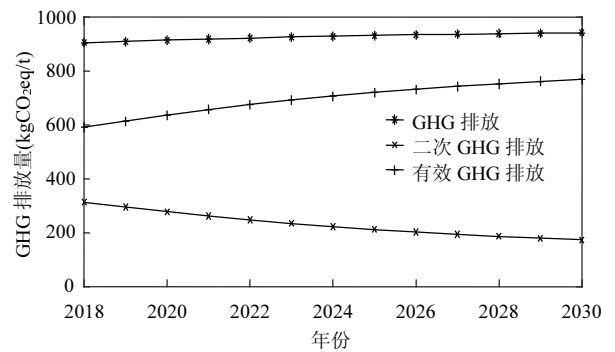


图 9 2018~2030 年整合非规范回收情况下 GHG 排放量变化曲线

Fig.9 GHG emissions curve under the integration of nonstandard recovery from 2018 to 2030

废纸回收的经济效益从 2018 年的 640.7 元/t 上升到 2030 年的 3312.5 元/t。在逐步整合非规范回收的基础上,中国废纸规范回收产业将会呈现规模集约化发展,因此废纸的经济收益也会快速上涨,在逐步淘汰非规范回收的市场后,废纸回收的经济效益也会极大地带动企业积极性,从而形成一个良性的循环;GHG 排放总量变化并不明显,仅从 905.8kgCO_{2eq}增长到了 942.9kgCO_{2eq}。而有效 GHG 排放从 592.1kgCO_{2eq}增长到 762.7kgCO_{2eq},二次 GHG 排量从 313.8kgCO_{2eq}降至 173.2kgCO_{2eq}。整个废纸回收系统有效 GHG 排放量占整个 GHG 排放的比例由 65.4%优化至 81.6%,由此可见整合非规范回收对废纸回收的碳排放结构有明显的改善。

最后,综合效益与经济效益的差距依然不明显,因为废纸本就是污染较轻的废弃物,废纸回收的碳排放不高且碳税价格不高的情况下,企业很难受到缴纳碳税影响。因此,根据《中华人民共和国环境保护税法》^[54],碳税价格不应该仅考虑到企业的污染当量,同时还应该根据废弃物回收的具体情况制定不同的政策,所以,在考虑废纸回收经济效益和 GHG 排放的基础上,并结合相关文献从碳税随着废纸回收收益占比固定的角度推测碳税会从 2017

年的 30 元/t 上涨到 2030 年的 211 元/t^[55],这一方面说明废纸回收行业将会快速发展,经济收益和综合效益快速上涨;另一方面,固定的碳税很难对废纸回收和造纸行业起到规范作用,碳税上涨也应该由决策制定者认真考虑。

2.3.2 二次 GHG 排放 LMDI 分解解析 通过整合非规范废纸回收情境下的预测,废纸的规范回收率会从 2017 年 9.7% 上升至 2030 年 49%。定义规范回收的废纸占回收废纸总量的比例称为“废纸回收规范性”,那么 2017~2030 年废纸回收规范性由 20% 上升到了 79%。而废纸回收产生的二次 GHG 排放是废纸回收的无效排放,所以减少二次 GHG 排放是改善废纸排放结构与减排的主要方向。为了探究废纸回收过程中减排的原因,本文利用对数平均迪氏指数法(LMDI)对规范与非规范废纸回收产生的二次 GHG 排放进行分析^[55,66]。利用 LMDI 模型分解如下:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{GDP}_i} \cdot \frac{\text{GDP}_i}{Q_i} \cdot \frac{Q_i}{Q} \cdot Q \quad (14)$$

式(14)中: C 表示废纸回收的二次 GHG 排放量(万 t); C_i 表示第 i 种回收方式(规范回收或非规范回收)产生的 GHG 排放量(万 t); GDP_i 为不同回收方式的经济效益(万元); Q_i 表示不同回收方式的回收量(万 t); Q 表示回收总量(万 t)。

定义:

$$f_i = \frac{C_i}{\text{GDP}_i}, e_i = \frac{\text{GDP}_i}{Q_i}, s_i = \frac{Q_i}{Q}, r_i = Q \quad (15)$$

式中: f_i 表示废纸回收单位经济效益产生的二次排放,定义为二次排放效应; e_i 表示单位回收量产生的经济效益,定义为收益增长效应; s_i 表示规范回收或者非规范回收废纸占回收废纸总量的比重,定义为回收结构效应; r_i 为回收量因素,定义为回收强度效应。则:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_f + \Delta C_e + \Delta C_s + \Delta C_r \quad (16)$$

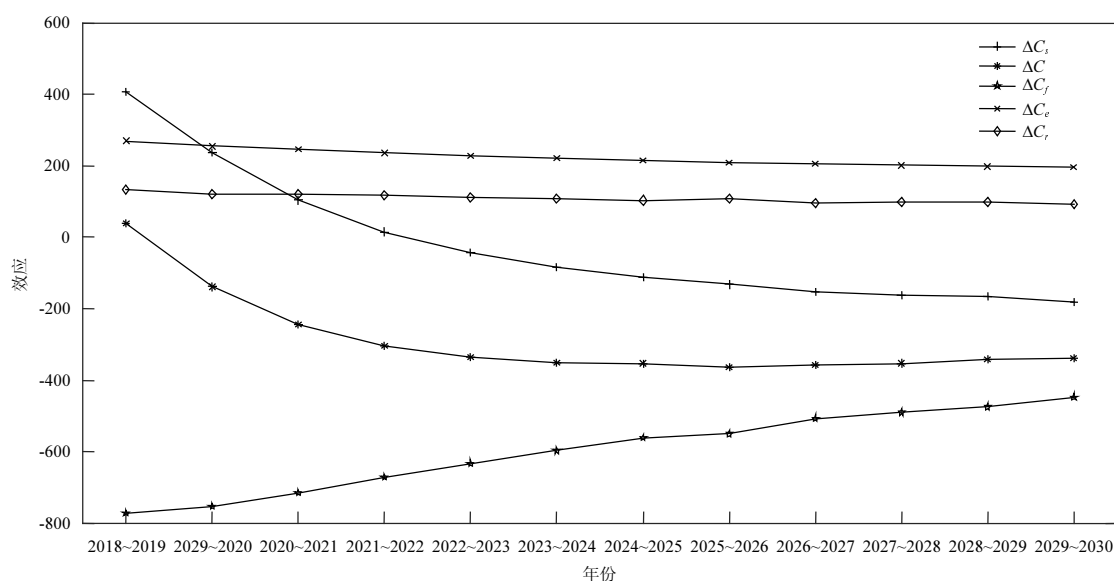


图 10 2018~2030 年整合非规范回收情境下各效应变化趋势

Fig.10 Trends in the effects under the integration of nonstandard recovery from 2018 to 2030

式中: ΔC 为二次 GHG 排放变化量; C^t 为第 t 年的二次 GHG 排放量; C^0 为 $t-1$ 年的二次 GHG 排放量; ΔC_f 为二次排放效应变化值; ΔC_e 为收益增长效应变化值; ΔC_s 为回收结构效应变化值; ΔC_r 为回收强度效应变化值。

将式(11)对各因素分解后得到影响效应表述为:

$$\Delta C_f = \sum_{i=1}^n \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{f_i^t}{f_i^0} \quad (17)$$

$$\Delta C_e = \sum_{i=1}^n \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{e_i^t}{e_i^0} \quad (18)$$

$$\Delta C_s = \sum_{i=1}^n \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{s_i^t}{s_i^0} \quad (19)$$

$$\Delta C_r = \sum_{i=1}^n \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{r_i^t}{r_i^0} \quad (20)$$

根据式(17)~(20),测算出 2018~2030 年废纸回收产生的二次 GHG 排放的二次排放效应、收益增长

效应、回收结构效应和回收强度效应的贡献值。图 10 反应了各效应的变化趋势,其中经济增长效应与回收强度效应变化趋势平缓且一直保持对二次 GHG 排放的正贡献,表明废纸回收效益的提升和回收量的提高都会增加废纸回收过程中的二次 GHG 排放;而二次排放效应反映了废纸回收中二次 GHG 排放的总体趋势,其对二次 GHG 排放的负贡献明显,表明在整合非规范回收的情境下规范回收与非规范回收的二次 GHG 排放一直在下降,但是曲线上升又表明下降的趋势在减弱,这与图 9 中预测的结果吻合;而回收结构效应体现的是“废纸回收规范性”,图中显示其变化趋势与总效应一致,回收结构效应从明显的正贡献逐渐下降为负效应,驱动着总效应降低,因此在整合非规范回收情境下提升规范回收率而提高废纸回收规范性才是驱动减少废纸回收二次 GHG 排放的根本原因。这也证实了整合非规范回收确实能降低二次 GHG 排放,改善废纸回收排放结构。

3 讨论与建议

3.1 废纸回收流向

中国国内废纸市场逐渐饱和,回收的废纸在量上并不会产生多大的变化。但是回收的渠道和废纸市场结构正逐渐发生变化,就 2018 年第一季度中国废纸进口量减少了 393 万 t,同比减少了 49.5%,而中国废纸制浆同比增长 3%^[3,53],显然,中国废纸在未来国内废纸的市场的占比会进一步提高。然而国内对于废弃物回收处理仍是非规范回收为主^[27],这就带来再生资源回收效率低下和其他一些环境问题。2008~2017 年,中国的废纸回收率从 39.4%增长至接近 50%,虽然近些年则增长速度稳定并且放缓,但是这仍然表明中国作为再生纸原料的废纸需求是存在的,而随着进口废纸数量的进一步下降,未来几年中国的废纸需求依然存在缺口^[20];同时,2013 年中国的废纸回收利用率达到了 73.4%的顶峰,且在 2017 年逐渐下降到了 70.6%^[53],这说明回收废纸成本、供需不平衡带来的价格问题等因素又会对废纸回收再利用产生影响。废纸的非规范回收途径是目前中国废纸回收体系的支撑,非规范回收中蕴含着大量的物力、财力尤其是人力是这个体系不可或缺的支柱,但在节约资源和环境保护国家政策方针的背景

下,淘汰规模小、落后的非规范回收商贩和企业是必然趋势^[8,56],因此,废纸回收由非规范向规范转变并实现规范回收占中国废纸回收市场的主导将在未来会逐步实现。

3.2 废纸温室气体排放以及碳税

常见的文献对于废纸只进行定性的研究,建立相关的结构框架并不计算出具体结果^[25,27];或者只是针对具体的城市甚至是企业研究个别案例^[43]。更常见的文献研究资源和废弃物回收系统中,通过废物回收从经济和环境角度都会优于该废物的其他传统处理方式,比如:拆解、填埋、焚烧等^[57-59]。但就中国废纸回收而言,拿废弃物的回收和填埋、焚烧等与回收进行比计较的意义是有限的,一方面,废纸通过回收至少带来环境方面的收益例如减少温室气体的排放,这个结论是显而易见的;另一方面,中国废纸回收情况复杂,规范的回收体系难以形成的根本阻力还是个体商贩的非规范回收和居民参与垃圾回收治理体系不足。因此,本文就从回收端角度考虑论证了进行规范化废纸回收可以有效的进行碳减排。

全球温室气体排放基本源自于制造业,而造纸企业在选择造纸原料时如果以环境考虑为主,那么从整个系统来看,废纸制浆造纸实现闭环势必是更有利于环境最好的选择^[17-18,60-61],但是经济市场因素又会对造纸企业的选择产生影响^[17-18,20,60],因此如何权衡废纸回收的经济收益和对环境造成的 GHG 排放是一个复杂的问题。

碳税为最具成本效益的减排手段之一,Zhang 等^[62]就通过对中国整体经济从 2015~2030 年进行了评估,结果表明征收碳税后,碳排放的减缓速度比 GDP 的减少速度快得多。当税率为 200 元/吨时,排放弹性较大,约为 3.41,意味着二氧化碳排放量将减少 3.41%左右,而 GDP 则减少 1%。而 Xie^[52]通过对重庆工业经济与碳税之间的研究,得到了相似的结论,碳税对 GDP 的损失率为 1.54%~2.5%。由此可见,碳税上升必然会略微降低企业的收益,但会带来更明显的减排效果,这无疑对中国环境政策制定者是一个很好的启示。此外,碳税不仅能够带来环境上约为 62.5%的减排收益,还能带来普遍福利的上升,但也会造成部分行业尤其是制造业的大量失业^[63],而本文得到的研究结果又表明至少在废纸回收方面碳

税价格是明显过低的,因此,碳税额度的确定需要仔细考虑。

4 结 论

4.1 基于2017年废纸回收的相关经济数据,通过物质流分析建立了包括废纸回收系统在内的中国纸和纸板的生命周期框架,梳理了中国纸和纸板以及废纸的各项活动与流程,发现了中国废纸非规范回收比例过高。

4.2 选择影响废纸回收的规范回收率、非规范回收废纸接受率、分配率三个重要参数,通过建立经济效益、环境效益以及综合效益函数对三个参数进行灵敏度分析,结果发现提升废纸规范回收率和非规范回收废纸接受率都能对系统的经济效益有很大提升,同时降低了废纸回收过程中的二次 GHG 排放从而改善了 GHG 排放结构;而分配率的提升减少了废纸回收的环节从而降低了成本.其中非规范回收废纸接受率对提升整个系统的经济收益效果最为明显。

4.3 通过整合非规范回收情境下的预测发现废纸规范回收比例上升可以获得比较可观的经济和减少碳排放方面的收益,且通过 LMDI 模型证明了整合规范回收确实具有明显减少二次 GHG 排放的作用.因此整合规范回收不仅能扭转非规范回收占主导的格局,同时也能够快速提升废纸回收的经济效益与环境效益。

4.4 结合碳税从综合效益的角度发现中国废纸回收的碳排放成本占经济收益比例较小,反应出用于调整碳减排的碳税价格较低,反映了决策者谨慎的态度与碳税价格的制定情况复杂。

参考文献:

- [1] Qiao Q, Zhao F, Liu Z, et al. Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,140:45-53.
- [2] Liu J, Bai H, Liang H, et al. How to recycle the small waste household appliances in China? A revenue-expenditure analysis [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,137:292-301.
- [3] 王钦池.2017 年全球纸业发展报告 [J]. *中华纸业*, 2018,39(23): 31-37.
Wang Q. Global paper industry development report in 2017 [J]. *China pulp paper industry*, 2018,39(23):31-37.
- [4] Dalmo F C, Simão N M, Lima H Q D, et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,212:461-474.
- [5] Kulhánová I, Morelli X, Le Tertre A, et al. The fraction of lung cancer incidence attributable to fine particulate air pollution in France: Impact of spatial resolution of air pollution models [J]. *Environment International*, 2018,121:1079-1086.
- [6] Chen Y. Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,192:262-269.
- [7] Xiao S, Dong H, Geng Y, et al. An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,134:112-120.
- [8] Steuer B, Ramusch R, Salhofer S P. Can Beijing's informal waste recycling sector survive amidst worsening circumstances? [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,128:59-68.
- [9] Liang S, Zhang T, Xu Y. Comparisons of four categories of waste recycling in China's paper industry based on physical input-output life-cycle assessment model [J]. *Waste Management*, 2012,32(3):603-612.
- [10] Merrild H, Damgaard A, Christensen T H. Life cycle assessment of waste paper management: The importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008,52(12):1391-1398.
- [11] Tatoutchoup F D. Optimal rate of paper recycling [J]. *Forest Policy and Economics*, 2016,73:264-269.
- [12] Campano C, Merayo N, Negro C, et al. Low-fibrillated bacterial cellulose nanofibers as a sustainable additive to enhance recycled paper quality [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018,114:1077-1083.
- [13] Gomes D G, Serna-Loaiza S, Cardona C A, et al. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2018,267: 347-355.
- [14] Seo Y B, Ahn J H, Lee H L. Upgrading waste paper by in-situ calcium carbonate formation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,155:212-217.
- [15] Aciu C, Varvara D A I, Cobirzan N, et al. Recycling of paper waste in the composition of plastering mortars [J]. *Procedia Technology*, 2014, 12:295-300.
- [16] Tatoutchoup F D. Optimal rate of paper recycling [J]. *Forest Policy and Economics*, 2016,73:264-269.
- [17] Ouda O K M, Rehan M, Nader N, et al. Environmental and economic benefits of recovered paper: A case study of Saudi Arabia [J]. *Energy Procedia*, 2017,142:3753-3758.
- [18] Mirkovic I B, Majnaric I, Bolanca Z. Ecological sustainability and waste paper recycling [J]. *Procedia Engineering*, 2015,100:177-186.
- [19] Ervasti I, Miranda R, Kauranen I. Paper recycling framework, the "Wheel of Fiber" [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 174:35-44.
- [20] Seigné-Itoiz E, Gasol C M, Rieradevall J, et al. Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling [J]. *Journal of Cleaner Production*,

- 2015,105:253-262.
- [21] Zhang S, Zhang M, Yu X, et al. What keeps Chinese from recycling: Accessibility of recycling facilities and the behavior [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016,109:176-186.
- [22] Pivnenko K, Eriksson E, Astrup T F. Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances [J]. *Waste Management*, 2015,45:134-142.
- [23] Tiew K, Basri N E A, Deng H, et al. Comparative study on recycling behaviours between regular recyclers and non regular recyclers in Malaysia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,237:255-263.
- [24] Xiao S, Dong H, Geng Y, et al. An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,134:112-120.
- [25] 杨孝光,陈莎,李焱佩.中国纸产品全生命周期及废纸回收利用 GHG 排放分析 [C]. 中国化学会第 28 届学术年会,成都, 2012.
- Yang X, Chen S, Li Y. Analysis on GHG emission of the life cycle of paper products and waste paper recycling in China [C]. 28th Annual Academic Conference of China Chemical Society, Chengdu, 2012.
- [26] 刘继永,杨前进,韩新民.瓦楞纸箱全生命周期环境影响评价研究 [J]. *环境科学研究*, 2008,21(6):105-109.
- Liu J, Yang Q, Han X. Life cycle assessment of environmental impact of corrugated boxes. *Research of environmental sciences*, 2008,21(6): 105-109.
- [27] 张辉,刘克.深度探析我国废纸回收与利用体系建设 [J]. *中华纸业*, 2012,33(15):10-15.
- Zhang H, Liu K. Construction of waste paper recycling and utilization system in China [J]. *China pulp paper industry*, 2012,33(15):10-15.
- [28] 王磊,马龙,吴汉舟,等.废纸回收利用现状及策略探析 [J]. *中国市场*, 2010,9(36):19-21.
- Wang L, Ma L, Wu H, et al. Status and strategies of waste paper recycling [J]. *China market*, 2010,9(36):19-21.
- [29] Ma B, Li X, Jiang Z, et al. Recycle more, waste more? When recycling efforts increase resource consumption [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,206:870-877.
- [30] Ding N, Yang J, Liu J. Substance flow analysis of aluminum industry in mainland China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,133:1167-1180.
- [31] Lee S, Kim J W, Hwang Y W, et al. Butadiene substance flow analysis and management in South Korea [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,220:331-339.
- [32] Tran H P, Schaubroeck T, Nguyen D Q, et al. Material flow analysis for management of waste TVs from households in urban areas of Vietnam [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,139:78-89.
- [33] Ferrão P, Ribeiro P, Rodrigues J, et al. Environmental, economic and social costs and benefits of a packaging waste management system: A Portuguese case study [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014,85:67-78.
- [34] 中国统计年鉴 [M]. 北京:国家统计局, 2018.
- China statistical yearbook [M]. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Beijing, 2018.
- [35] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment [J]. *Environment International*, 2004,30(5):701-720.
- [36] 中国回收纸可持续发展建议 [R]. 北京:世界自然基金会(WWF), 2018.
- Recommendations for the Sustainable Development of Paper Recycling in China. World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund (WWF), Beijing, 2018.
- [37] Berglund C, Söderholm P. Complementing empirical evidence on global recycling and trade of waste paper [J]. *World Development*, 2003,31(4):743-754.
- [38] 中国可再生资源行业报告 [R]. 北京:中国资源回收协会, 2017.
- China Renewable Resource Recycling Industry Development Report. China Resource Recycling Association, Beijing, 2017.
- [39] 中国造纸工业 2017 年度报告 [R]. 北京:中国造纸协会, 2018.
- China paper industry annual report 2017. China Paper Association, Beijing, 2018.
- [40] Lopes E, Dias A, Arroja L, et al. Application of life cycle assessment to the Portuguese pulp and paper industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003,11(1):51-59.
- [41] 戴铁军,赵鑫蕊.基于物质流分析的废纸回收利用体系生态成本研究 [J]. *生态学报*, 2017,37(15):5210-5220.
- Dai T, Zhao X. Study on ecological costs for waste paper recycling system based on the Material Flow Analysis [J]. *Acta ecologica sinica*, 2017,37(15):5210-5220.
- [42] De Meester S, Nachtergaele P, Debaveye S, et al. Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,142:1-9.
- [43] Zacho K O, Mosgaard M, Riisgaard H. Capturing uncaptured values — A Danish case study on municipal preparation for reuse and recycling of waste [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,136:297-305.
- [44] Alting L, Hauschild M, Wenzel H. Elements in a new sustainable industrial culture Environmental assessment in product development [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 1998,14(5): 429-439.
- [45] Kazulis V, Vigants H, Veidenbergs I, et al. Biomass and natural gas co-firing — evaluation of GHG emissions [J]. *Energy Procedia*, 2018, 147:558-565.
- [46] Cheung W M, Pachisia V. Facilitating waste paper recycling and repurposing via cost modelling of machine failure, labour availability and waste quantity [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2015, 101:34-41.
- [47] 陈莎,刘尊文.生命周期评价与III型环境标志认证 [M]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- Chen S, Liu Z. Life cycle assessment and type III environmental labeling certification [M]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [48] Esmaeilian B, Wang B, Lewis K, et al. The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper [J]. *Waste Management*, 2018,81:177-195.
- [49] Hammed T B, Wandiga S O, Mulugetta Y, et al. Improving knowledge and practices of mitigating green house gas emission through waste recycling in a community, Ibadan, Nigeria [J]. *Waste Management*, 2018,81:22-32.
- [50] Xie J, Dai H, Xie Y, et al. Effect of carbon tax on the industrial

- competitiveness of Chongqing, China [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2018,47:114-123.
- [51] Tran H P, Schaubroeck T, Nguyen D Q, et al. Material flow analysis for management of waste TVs from households in urban areas of Vietnam [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,139:78-89.
- [52] 周章金,符小玲,李 敏.基于碳排放的废弃产品回收站点分布研究 [J]. *中国管理科学*, 2018,26(4):41-48.
- Zhou J, Fu X, Li M. Research on the distribution of waste product recycling sites based on carbon emission [J]. *Chinese journal of management science*, 2018,26(4):41-48.
- [53] 牛庆民.废纸加工行业规范条件的出台将会对产业格局带来哪些转变 [J]. *中华纸业*, 2018,39(3):45-49.
- Niu Q. What changes will be brought to the industrial pattern by the introduction of the standard conditions for the waste paper processing industry [J]. *China pulp paper industry*, 2018,39(3):45-49.
- [54] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国环境保护税法 [Z]. 2018-01-01.
- Standing Committee of the National People's Congress. Environmental protection tax law of the people's Republic of China [Z]. 2018-01-01.
- [55] Wang M, Li Y, Li M, et al. Will carbon tax affect the strategy and performance of low-carbon technology sharing between enterprises? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,210:724-737.
- [56] Tong X, Tao D, Lifset R. Varieties of business models for post-consumer recycling in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170:665-673.
- [57] Qiao Q, Zhao F, Liu Z, et al. Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,140:45-53.
- [58] Dunuwila P, Rodrigo V H L, Goto N. Financial and environmental sustainability in manufacturing of crepe rubber in terms of material flow analysis, material flow cost accounting and life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,182:587-599.
- [59] Merrild H, Damgaard A, Christensen T H. Life cycle assessment of waste paper management: The importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008,52(12):1391-1398.
- [60] Xiu M, Stevanovic S, Rahman M M, et al. Emissions of particulate matter, carbon monoxide and nitrogen oxides from the residential burning of waste paper briquettes and other fuels [J]. *Environmental Research*, 2018,167:536-543.
- [61] 胡鸣明,张纯博,董 亮,等.支撑资源循环可持续性评价的经济决策工具——生命周期成本分析的发展与应用 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(12):4788-4800.
- Hu M, Zhang C, Dong L, et al. Economic decision-making tools to support resource cycle sustainability evaluation: Development and application of life cycle cost analysis [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(12):4788-4800.
- [62] Zhang H, Hewings G J D, Zheng X. The effects of carbon taxation in China: An analysis based on energy input-output model in hybrid units [J]. *Energy Policy*, 2019,128:223-234.
- [63] 景侨楠,侯慧敏,白宏涛,等.自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(1):420-427.
- Jing Q, Hou H, Bai H, et al. Top-down method for estimating carbon emissions from urban energy consumption [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(1):420-427.
- [64] 文 扬,马 中,吴语晗,等.京津冀及周边地区工业大气污染排放因素分解——基于 LMDI 模型分析 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(12): 4730-4736.
- Wen Y, Ma Z, Wu Y. Decomposition of industrial air pollution factors in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas——Analysis based on LMDI Model [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(12): 4730-4736.

作者简介: 刘满芝(1978-),女,江苏徐州人,副教授,博士,主要研究方向为能源资源环境经济与管理,绿色营销与供应链管理.发表论文 40 余篇.