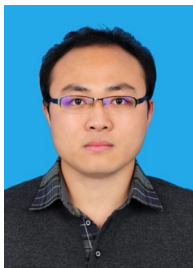


# 基于生命周期评价的瓦楞原纸产品碳足迹评价



作者简介：赵国杰先生，硕士，工程师；主要从事生命周期评价、节能减碳、绿色制造评价等方面的研究。

赵国杰<sup>1,2</sup> 游亚杰<sup>1,2</sup> 黄起帅<sup>1,2</sup>

(1. 河南省固体废物分类处理与高值化利用工程研究中心，河南郑州，450016；  
2. 河南省基本建设科学实验研究院有限公司，河南郑州，450016)

**摘要：**依据PAS 2050: 2011，采用B2B的方法利用eFootprint系统，对以废纸为原料生产的瓦楞原纸产品进行碳足迹评价。评价结果表明，生产1000 kg瓦楞原纸所排放的温室气体量为1226.79 kg CO<sub>2</sub>e，其中废纸制浆和抄纸过程是温室气体（GHG）主要排放过程，分别占GHG排放量的32.6%和54.1%；GHG排放主要来自能源消耗。因此造纸工业降低化石燃料利用比例及单位产品能耗是推动行业碳减排的必由之路。

**关键词：**瓦楞原纸；碳足迹；温室气体；生命周期评价

中图分类号：TS764.5 文献标识码：A DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2021.08.007

## Carbon Footprint Assessment Method of Corrugated Medium on Life Cycle Assessment

ZHAO Guojie<sup>1,2,\*</sup> YOU Yajie<sup>1,2</sup> HUANG Qishuai<sup>1,2</sup>

(1. Henan Provincial Engineering Research Center of Classification and High-value of Solid Waste, Zhengzhou, He'nan Province, 450016;  
2. Henan Capital Construction Science Experiment Institute Company Limited, Zhengzhou, He'nan Province, 450016)

(\*E-mail: skyjw1007@163.com)

**Abstract:** According to PAS 2050: 2011, the eFootprint system was used to evaluate the carbon footprint of corrugated medium produced from wastepaper using a “Business to Business” approach. The results showed that the greenhouse gas (GHG) emissions from the production of 1000 kg of corrugated medium were 1226.79 kgCO<sub>2</sub>e, of which wastepaper pulping and papermaking processes were the main GHG emission processes, accounting for 32.6% and 54.1% of GHG emissions, respectively. GHG emission was mainly from the consumption of energy. Therefore, reducing the proportion of fossil fuel utilization and energy consumption per unit product in the paper industry was the only way to promote carbon emission reduction in the industry.

**Key words:** corrugated medium; carbon footprint; greenhouse gas (GHG); life cycle assessment (LCA)

随着国家环保政策的日益严格，造纸工业面临着节能减排的巨大压力，践行绿色发展理念、推行清洁生产、节能减排是造纸工业可持续发展的重要途径<sup>[1-2]</sup>。

采用生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）方法对纸产品从原材料选择、产品生产、运输、使用、回收至废弃的全过程进行碳足迹分析，有助于掌握造纸行业温室气体排放现状，识别减排机会<sup>[3]</sup>。目前已有部分发达国家开展造纸行业生命周期研究，如美国林纸协会（AF&PA）<sup>[4]</sup>、欧洲造纸工业联合会（CEPI）<sup>[5]</sup>、加拿大空气和河流改进委员会（NCASI）<sup>[6]</sup>和芬兰国家技术研究中心（VTT）<sup>[7]</sup>等。我国生命周期研究还较少，造纸行业生命周期研究的

标准体系尚未建立，技术基础较为薄弱，目前只有科技部“十一五”科技支撑计划“造纸行业典型产品LCA分析与III型环境标志认证技术”项目、“十二五”科技支撑计划“碳排放和碳减排认证认可关键技术研究”项目和“电子信息、造纸和印刷行业典型产品碳足迹评价关键技术研究”项目等开展造纸行业产品生命周期研究<sup>[8]</sup>。

收稿日期：2021-02-11（修改稿）

基金项目：河南省固体废物分类处理与高值化利用工程研究中心关键技术攻关项目“一种典型纸产品的生态设计研究与示范”（NO.CHSW2020TC001）；河南省基本建设科学实验研究院有限公司科技研发项目“典型纸产品（瓦楞原纸）全生命周期评价研究”（项目编号：2020GY001）。

依据英国协会标准公众可获取的规范 PAS 2050: 2011, 对河南省以废纸为原料生产瓦楞原纸的某造纸企业采用生命周期的方法进行碳足迹评价, 分析各过程单元温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 排放情况, 为瓦楞原纸生产过程的节能减排机会识别提供科学依据。

## 1 瓦楞原纸碳足迹评价

### 1.1 系统边界确定

本研究采用“从商业-到-商业 (B2B)”的研究方法来划分系统边界, 确定从国内废纸运输到瓦楞原纸产品运送至一级经销商, 除纸浆生产和瓦楞原纸生产 2 个主要过程单元外, 还包括化学品生产、能源生产、原料产品运输及废水处理, 不包括其他生产过程、最终产品分销、零售、消费者使用以及过程单元产生固体废弃物处置/再生利用<sup>[9]</sup>。由于我国没有形成健全的废纸回收体系, 获取废纸回收数据存在困难, 故废纸产生与回收不在研究范围内<sup>[10]</sup>。

本研究瓦楞原纸的系统边界如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

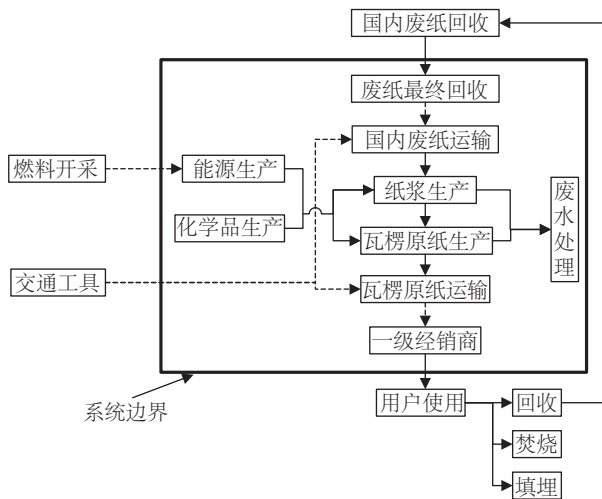


图 1 瓦楞原纸系统边界

Fig. 1 System boundary of corrugated medium

### 1.2 功能单位

本课题参考国内外纸产品生命周期研究相关的案例, 在满足可测量、与产品系统的输入输出数据直接相关的要求下, 最终选择 1000 kg 瓦楞原纸为功能单位<sup>[12]</sup>。

### 1.3 简化评价

根据 1.1 中所确定的系统边界, 考虑数据获取的实际约束条件, 做出以下几点简化说明。

(1) 对生产过程中化学品种类的选择, 根据功能

单位产品生产中用量大于 1%/t 纸或化学品生产过程所产生的环境影响超过瓦楞原纸产品系统总影响 1% 为取舍原则, 且非实质性排放源 (碳排放量小于该产品生命周期总碳排放量 1% 的排放源) 的比例不超过总排放的 5%<sup>[13]</sup>。企业采用废纸碎解制浆生产瓦楞原纸, 不经过漂白、脱墨等工序, 制浆生产过程中不添加任何化学品; 抄纸过程中使用的化学品有木薯淀粉 (工业级, YY-278C, 杭州纸友科技有限公司)、环压增强剂 (工业级, 北京化工厂) 及过硫酸铵 (分析纯, 杭州高晶精细化工有限公司); 废水处理中使用聚合硫酸铁 (工业级, 湖南谊德化工有限公司) 作为絮凝剂; 各化学品用量如表 1 所表示。

表 1 1000 kg 瓦楞原纸生产中主要化学品用量  
Table 1 Main chemicals consumption in the production of 1000 kg corrugated medium

化学品名称	用量/%·t <sup>-1</sup> 纸	使用工段
木薯淀粉	4.80	抄纸过程
环压增强剂	0.85	抄纸过程
过硫酸铵	0.19	抄纸过程
聚合硫酸铁	0.0007	废水处理

木薯淀粉在瓦楞原纸生产过程中用量大于 1%/t 纸的化学品, 环压增强剂和过硫酸铵在瓦楞原纸生产过程中用量小于 1%/t 纸, 但属成分较复杂的化学品, 本研究均计入统计分析。聚合硫酸铁在辅助生产系统中用量远小于 1%/t 纸, 本研究不计入统计分析。

(2) 对生产设备、建筑设施、生产用水、包装材料相关的生产、维护过程不予考虑。

(3) 化学品及其他辅助材料的运输过程不予考虑, 原料产品运输假定空载率为 50%。

### 1.4 生命清单分析

研究中尽量避免人为因素对数据分配的干扰, 在无法避免的情况下, 采用物理关系进行分配, 使分配程序在实际操作中简便、可行。

#### 1.4.1 数据收集

根据既定系统边界, 将瓦楞原纸生产过程分为废纸制浆、抄纸过程、化学品生产、能源生产、原料产品运输、废水处理 6 个过程单元, 并对过程单元中资源消耗、能源消耗及环境排放进行原始数据收集。收集过程按照以下 2 个步骤进行。

(1) 初级活动水平数据。通过企业调研、上游厂家提供、采样监测等途径进行收集, 如资源能源消耗包括煤、废纸、水、电力等, 气体排放包括 CO<sub>2</sub>、

NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、PM10、非甲烷挥发性有机物 (Non-methane Volatile Organic Compound, NMVOC) 等, 水体排放包括总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particulate, TSP)、化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)、生化需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD)、全氮 (Total Nitrogen, TN)、全磷 (Total Phosphorus, TP)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、总悬浮固体 (Total Suspended Solids, TSS) 等, 以及纤维、污泥等固体废弃物, 液态废矿物质油等危险废物, 原料产品运输距离等数据。所收集数据为企业 2019 年全年平均统计数据, 并能反映企业的实际生产水平。

(2) 次级活动水平数据。无法从实际调研过程中获得的数据, 如相关化学品生产、原料产品运输过程中环境排放等数据, 采用中国生命周期基础数据库 CLCD-China、欧盟生命周期数据库 ELCD 3.0、Ecoinvent, 中心商用数据库 Ecoinvent 2.2 Public 或相关科技文献数据进行替代<sup>[14]</sup>。

### 1.4.2 清单分析

利用 LCA 专业软件亿科生命周期环境评价与管理软件 V1.0 (简称 eFootprint 系统) 进行数据的分析处理, 建立瓦楞原纸生命周期评价科学完整的计算程序。

利用 eFootprint 系统建立各个过程单元模块, 输入各过程单元的数据参数, 通过连接各过程单元的关系变量等操作进行清单分析。另外数据分析过程还涉及分配程序处理, 首先能源生产过程中能源消耗及环境排放需分配至不同过程单元; 其次废水处理过程中废水污染负荷分配至不同过程单元。

(1) 能源生产过程中能源消耗、环境排放分配至不同过程单元, 具体分配方式见式(1)。

$$Q_{ij} = \frac{E_i}{E} \cdot C_j \quad (1)$$

式中,  $Q_{ij}$  为第  $i$  过程单元对能源生产过程中污染物  $j$  排放的分担量 ( $i$  为过程单元,  $j$  为污染物种类);  $E_i$  为第  $i$  过程单元的能源消耗量;  $E$  为瓦楞原纸生产系统中能源消耗总量;  $C_j$  为能源生产中第  $j$  种污染物排放量。

(2) 生产废水处理过程中对不同来源废水的污染负荷根据废水量及污染物浓度进行分配见式(2)。

$$F_i = \frac{Q_i \cdot C_i}{Q_{\text{总}} \cdot C_{\text{总}}} \cdot F_{\text{总}} \quad (2)$$

式中,  $F_i$  为第  $i$  过程单元的废水污染物负荷,  $F_{\text{总}}$  为企业废水污染物总负荷;  $Q_i$  为第  $i$  过程单元的废水量,  $Q_{\text{总}}$  为企业生产废水总量;  $C_i$  为第  $i$  过程单元的废

水污染物浓度,  $C_{\text{总}}$  为企业生产废水污染物浓度。

由于能源生产数据采用 eFootprint 系统自带数据库或科技文献数据代替, 且环境排放已分配至不同过程单元中, 电厂本身所需能源的环境影响折算至产品系统中可忽略不计。本课题按废纸制浆、抄纸过程、化学品生产、原料产品运输、废水处理 5 个过程进行数据分析处理。最终得到由废纸生产的 1000 kg 瓦楞原纸为功能单位的清单结果, 即生产 1000 kg 瓦楞原纸在各过程单元中资源消耗、能源消耗和气体、水体、固体废弃物的环境排放情况, 结果如表 2 所示。

### 1.5 生命周期影响评价

生命周期影响评价过程包含环境类别识别和类别

表 2 废纸生产瓦楞原纸生命周期清单结果

Table 2 Results of life cycle list of corrugating medium produced by waste paper

种类	废纸制浆	抄纸过程	原料产品运输	化学品生产	废水处理	合计
资源						
煤/kg	0	351.120	0	0	0	351.120
废纸/kg	1099.000	0	0	0	0	1099.000
消耗						
水/m <sup>3</sup>	0.790	5.050	0	0.420	0.790	7.050
柴油/kg	0	0	27.920	15.080	0	43.000
能源消耗						
电力/kWh	93.100	156.900	0	8.450	1.720	260.170
CO <sub>2</sub> /kg	398.960	660.160	55.930	90.780	7.390	1213.220
NO <sub>x</sub> /kg	0.060	0.090	0.010	0.010	0	0.170
气体排放						
SO <sub>2</sub> /kg	0.040	0.037	0.003	0.003	0.001	0.084
CH <sub>4</sub> /kg	0.005	0.009	0.150	0.130	0.001	0.295
CO/kg	0.740	1.200	0.160	0.040	0.010	2.150
PM10/kg	0	0	0.020	0.010	0	0.030
NMVOC/kg	0.190	0.320	0.060	0.080	0.010	0.660
TSP/kg	0.700	0.640	0	0.010	0.020	1.370
COD <sub>Cr</sub> /kg	0.191	0.008	0	0.053	0	0.252
BOD <sub>5</sub> /kg	0.037	0.002	0	0.120	0	0.159
水体排放						
TN/kg	0	0	0	0.009	0.024	0.033
TP/kg	0	0	0	0	0.006	0.006
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /kg	0	0	0	0.036	0	0.036
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /kg	0	0	0	0.040	0	0.034
TSS/kg	0.120	0.008	0	0.034	0	0.162
固体废弃物/kg	189.170	0	0	0	68.790	257.960
危险废弃物/kg	0.015	0.020	0	0	0	0.035

指标的选择、分类、特征化、归一化、加权等过程，其中归一化、加权是可选步骤，归一化和加权过程操作含有较大主观因素会对评价结果产生较大影响。故在评价过程中只考虑特征化这一阶段。结合瓦楞原纸产品生命周期清单结果，对生产 1000 kg 瓦楞原纸在各过程单元中所引起的全球气候变暖（Global Climate Change, GWP）环境问题进行研究。经 eFootprint 系统计算后，各过程单元贡献量如图 2 所示，各过程单元对气体污染物贡献率如图 3 所示。

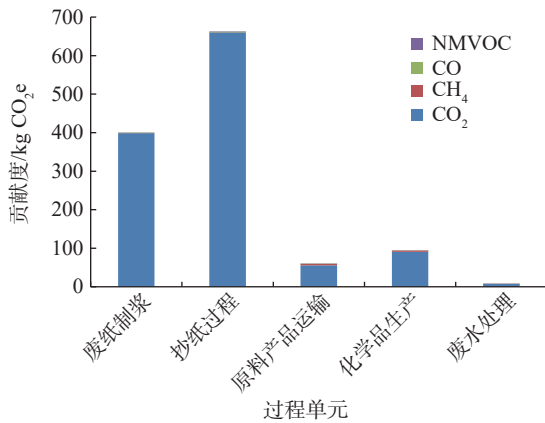


图 2 生产过程单元对全球温室气体的贡献量

Fig. 2 Contribution of production process unit to GWP

## 2 生命周期解释

(1) 按照 B2B 方法对废纸生产 1000 kg 瓦楞原纸生产系统进行评价，可知生产系统温室气体排放量为 1226.79 kg CO<sub>2</sub>e。其中，废纸制浆、抄纸过程是造纸行业造成全球气候变暖的主要单元，分别占总贡献度

的 32.6% 和 54.1%。主要因为生产过程单元中消耗大量煤、电力等能源载体，承担了能源生产中的环境排放<sup>[15]</sup>。通过提高生产过程中可再生能源利用比例，可有效降低温室气体排放量<sup>[16-17]</sup>。

(2) 从图 2 及图 3 可知，在全球气候变暖贡献中，CO<sub>2</sub> 贡献量最大，主要因为系统边界内温室气体排放主要来自生产过程，此过程单元中煤燃烧直接排放物和电力消耗间接排放物主要为 CO<sub>2</sub><sup>[18-19]</sup>。可通过改进工艺水平，通过余热回收利用技术对蒸煮、干燥等环节产生的余热进行回收利用<sup>[20]</sup>，或利用生物质能源代替化石能源等措施降低生产过程温室气体排放量<sup>[21]</sup>。

(3) 从图 3 可知，化学品生产以及原料产品运输为 CH<sub>4</sub> 的重要来源，而废水处理过程对各类气体污染物影响都较小。

## 3 结论

(1) 生产 1000 kg 瓦楞原纸产品对全球气候变暖的影响主要来自废纸制浆、抄纸过程单元能源消耗和化学品使用造成的 CO<sub>2</sub> 排放。建议改善以煤为主的能源结构，降低化石燃料使用比例，减少 CO<sub>2</sub> 等温室气体的排放。大力提高企业生产工艺水平，寻找替代原料产品，减少化学药剂的使用。

(2) 本研究在建模和评价过程中，存在缺陷和不足：①瓦楞原纸生命周期研究过程不完整，由于某些过程缺少数据或统一模式，研究中未能充分考虑这些过程的环境影响，造成了评价结果的不完整；②由于缺乏废纸收集、过硫酸铵等原材料和辅料的生产，废物管理的物耗、能耗，环境排放以及环境影响评价指

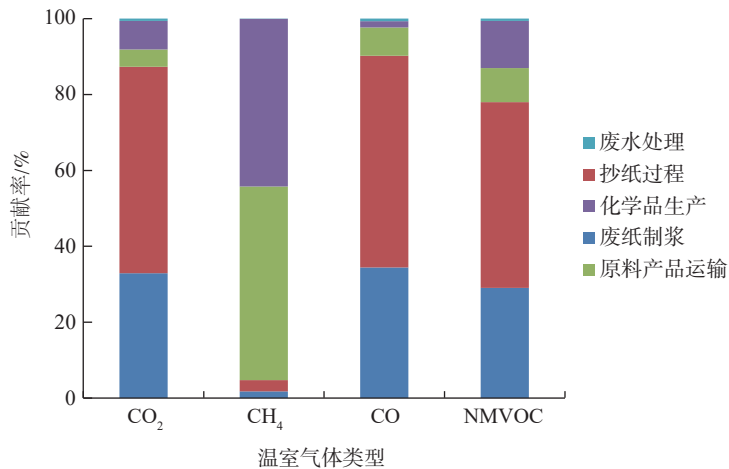


图 3 生产过程单元对温室气体排放贡献率

Fig. 3 Contribution proportion of the GHG emissions in different unit processes

标数据,故只能引用数据库数据进行分析,使得评价结果不够精确。

## 参 考 文 献

- [1] 任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品生命周期评价研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.  
REN L J. Methodology Research and Typical Paper Products of Life Cycle Assessment [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [2] 张清文, 陈曦. 100% OCC生产的箱纸板碳足迹评价[J]. 中国造纸, 2015, 34(3): 20-24.  
ZHANG Q W, CHEN X. Carbon Footprint Assessment of Linerboard Produced with 100% OCC[J]. China Pulp & Paper, 2015, 34(3): 20-24.
- [3] 王璟瑶, 吴金卓, 龙占璐. 0201型瓦楞纸箱生命周期不同阶段的环境影响评价[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 96-102.  
WANG J Y, WU J Z, LONG Z L. Environmental Impact Assessment on Different Life Cycle Stages of Style 0201 Corrugated Cases [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 96-102.
- [4] American Forest & Paper Association. Better Practices, Planet Better 2020 Sustainability Goals [R/OL]. [2020-11-04]. <https://sustainability.afandpa.org/goal/greenhouse-gas-emissions/>.
- [5] Confederation of European Paper Industries. LCA tool for paper products [N/OL]. (2020-07-24) [2020-12-31]. <https://www.cepi.org/lca-tool-for-paper-products/>.
- [6] The National Council for Air and Stream Improvement. Pulp & Paper Manufacturing [N/OL]. [2020-12-31]. <https://www.ncasi.org/pulp-paper-manufacturing/>.
- [7] PIHKOLA H, NORS M, KUJANPÄÄ M, et al. Carbon Footprint and Environmental Impacts of Print Products from Cradle to Grave: Results from the LEADER Project (Part 1). VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tiedotteita-Meddelanden-Research Notes No. 2560 [EB/OL]. (2010-12-01) [2020-12-31]. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2560.pdf>
- [8] 黎的非, 曹振雷, 卢宝荣, 等. 生命周期评价及其在造纸行业中的应用[J]. 中国造纸, 2009, 28(12): 62-65.  
LI D F, CAO Z L, LU B R, et al. Life Cycle Assessment and Its Application in Pulp and Paper Industry [J]. China Pulp & Paper, 2009, 28(12): 62-65.
- [9] 韩颖. 制浆造纸污染控制(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 15-16.  
HAN Y. Pollution Control of Pulping and Papermaking (2nd) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016: 15-16.
- [10] 马倩倩, 卢宝荣, 张清文. 基于生命周期评价(LCA)的纸产品碳足迹评价方法[J]. 中国造纸, 2012, 31(9): 57-62.  
MA Q Q, LU B R, ZHANG Q W. Carbon Footprint Assessment Method of Paper Products Based on Life Cycle Assessment [J]. China Pulp & Paper, 2012, 31(9): 57-62.
- [11] 中国轻工业联合会. 绿色设计产品评价技术规范 包装用纸和纸板: T/CNLC0010-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
China National Light Industry Council. Technical specification for green-design product assessment—Packaging paper and paper-board: T/CNLC0010-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [12] 罗方玲, 韦保仁, 田原聖隆, 等. 造纸废水处理工艺碳足迹核查——以苏州某造纸企业为例[J]. 中华纸业, 2013, 34(21): 57-59.  
LUO F L, WEI B R, TIAN Y S L, et al. The Study on Carbon Footprint of Paper Waste Water Treatment Process-taking a Paper Enterprise in Jiangsu Province as Example [J]. China Pulp & Paper Industry, 2013, 34(21): 57-59.
- [13] 英国标准协会. 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范(PAS 2050:2011)及使用指南[S].  
BRITISH STANDARDS. Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services (PAS 2050:2011) [S].
- [14] 韩育林. 造纸工业的生命周期水耗、能耗、温室气体排放及可持续生产路径分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
HAN Y L. Life Cycle Analysis of Water Consumption, Energy Consumption, and GHG Emissions and Sustainable Production Pathways Investigation for Papermaking Industry in China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [15] 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 Y, YANG Q J, HAN X M. Life Cycle Assessment of Environmental Impact of Corrugated Boxes [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(6): 105-109.
- [16] 陈莎, 杨孝光, 李焱佩, 等. 中国纸产品全生命周期GHG排放分析[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(6): 944-949.  
CHEN S, YANG X G, LI Y P, et al. Life-cycle GHG Emissions of Paper in China [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2014, 40(6): 944-949.
- [17] 年鹤, 王晓敏. 瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法与实例分析[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 86-89.  
NIAN H, WANG X M. Calculation Method and Case Analysis of Carbon Footprint in Corrugated Carton Production [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 86-89.
- [18] IMRAN S, MOJTABA M. Carbon Emissions Reduction Potentials in Pulp and Paper Mills by Applying Cogeneration Technologies [J]. Energy Procedia, 2017, 112: 142-149.
- [19] 任宪姝, 霍李江. 瓦楞纸箱生产工艺生命周期评价案例研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 54-57.  
REN X S, HUO L J. Case Study of Life Cycle Assessment for Corrugated Board Box Production Technology [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 54-57.
- [20] 吕泽瑜, 蒋彬, 孙慧, 等. 我国造纸行业碳排放现状及减排途径[J]. 中国造纸学报, 2017, 32(3): 64-69.  
LYU Z Y, JIANG B, SUN H, et al. Present Situation and Reduction Approach of Carbon Emission of China's Paper Industry [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2017, 32(3): 64-69.
- [21] 张欣, 张放, 蔡慧, 等. 典型制浆造纸厂的CO<sub>2</sub>排放及碳强度的算法和分析[J]. 中国造纸学报, 2019, 34(1): 36-42.  
ZHANG X, ZHANG F, CAI H, et al. Calculation and Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions and Carbon Intensity of a Typical Integrated Paper Mill in China [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2019, 34(1): 36-42. [CPP]

(责任编辑:刘振华)