

# 典型制浆造纸厂的 CO<sub>2</sub> 排放及 碳强度的算法和分析

张欣<sup>1,2,3</sup> 张放<sup>1,3</sup> 蔡慧<sup>1,2,3</sup> 张辉<sup>1,3,\*</sup>

(1. 南京林业大学江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 江苏南京, 210037;

2. 华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广东广州, 510640;

3. 南京林业大学江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京, 210037)

**摘要:** 以在我国造纸工业最具代表性的一家制浆造纸联合工厂为研究对象, 采用“造纸和纸制品生产企业温室气体排放核算方法与报告指南”和温室气体核算体系计算工具的方法, 研究了温室气体种类、核算边界和方法、工厂能耗和碳排放总量以及碳强度。结果表明, 2014 年该工厂碳排放总量为 430496.772 t CO<sub>2</sub>, 不包含生物质能源产生的碳排放; 基于工厂的纸浆碳强度为 0.228 t CO<sub>2</sub>/t 风干浆, 为基于产品获得的各种纸浆碳强度的 7.4% ~ 56.9%; 基于国民生产总值 (GDP) 的碳强度为 1.08 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD, 为我国造纸工业平均水平的 56.3%; 基于销售额的碳强度为 0.301 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD, 约为国际纸业公司的 52.6%。结果也表明, 影响企业碳强度的主要因素有原材料种类、能源结构、产品结构等, 以及在碳排放交易市场中获得更多的碳排放交易权空间, 企业应进一步进行节能减排。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 排放; 制浆造纸工业; 碳交易; 碳强度; 能耗

中图分类号: TS734

文献标识码: A

DOI: 10.11981/j.issn.1000-6842.2019.01.36

温室效应引起的全球变暖使得国际上高度重视温室气体排放 (也称碳排放) 和碳足迹; 碳排放权交易作为《京都议定书》的重要减排机制之一, 受到全球关注。

2009 年, 我国在哥本哈根会议上承诺, 到 2020 年, 单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放量下降 40% ~ 45%。2011 年, 我国首次将温室气体排放控制内容写入《国民经济和社会发展第十二个五年 (2011—2015 年) 规划纲要》, 其中提出了约束性目标: 到 2015 年, 单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放量比 2010 年下降 17% (实际达到 20%), 单位 GDP 能源消耗量比 2010 年下降 16% (实际达到 18.2%)<sup>[1-2]</sup>。

为了履行减排承诺和保护资源与环境, 我国于 2011 年启动了“两省五市”试点碳排放权交易, 并计划于 2017 年晚些时间在全国范围内启动碳排放权在线交易, 这是一个环境保护的里程碑。拟纳入我国碳排放权交易体系的主体是石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力、航空等重点排放行业中, 在 2013—2015 年中任意一年综合能源消费总量达到 1 万 t 标煤以上 (含)<sup>[3]</sup> 的企业。为此, 企业进行碳排放权交易

前, 需提交企业温室气体排放报告, 包含企业基本信息、纳入碳排放权交易主营产品信息以及能源与温室气体排放相关数据。我国碳排放权交易市场启动后, 年交易量将达到 50 亿 t, 将成为全球最大的碳排放交易市场 (欧盟次之, 为 20 亿 t)<sup>[4]</sup>。因而, 重点企业的温室气体排放报告工作将成为企业年度常态化的工作内容, 并将关系到企业在碳排放交易市场中的资产额。

制浆造纸工业作为全球第四大工业能源消耗行业<sup>[5]</sup>, 2014 年, 全球制浆造纸工业能源消耗约 5.95 EJ, 其中, 我国制浆造纸工业能耗占全球制浆造纸工业能耗的 19%<sup>[6-7]</sup>, 碳排放总量约占全球的 29%<sup>[8]</sup>; 随着人均纸张消费量向发达国家靠拢<sup>[9-11]</sup>, 我国制浆造纸工业碳排放量仍将持续增长。由于我国制浆造纸工业的能源结构是以煤为主 (占比约 50%)<sup>[11]</sup>, 未来行业的环境保护问题仍将面临较大挑战。目前, 对于碳排放的研究大部分是基于产品 (主要是纸和纸板) 进行核算的<sup>[12-13]</sup>, 基于工厂的碳排放量研究较少<sup>[14]</sup>, 单独以纸浆为产品的碳排放核算更少。对于一个多品种、多生产线的企业, 尤其针对集约型工厂, 基于产品进行碳排放的核算, 容易出现能源边界

收稿日期: 2017-11-04

基金项目: 华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室开放基金 (201780); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)。

作者简介: 张欣, 女, 1984 年生; 在读博士研究生; 主要研究方向: 制浆造纸节能减排技术与装备。

\* 通信联系人: 张辉, 教授, 博士生导师; 主要研究方向: 制浆造纸节能减排技术与装备; E-mail: zhnjfu@163.com。

模糊的问题,使碳排放数据不准确。基于工厂的碳排放核算便于进行区域总量控制和碳排放权交易,并有利于从全厂角度寻求进一步节能减排的空间;另外,从行业角度,其可用于评价一个企业在技术和规模等方面是否具有代表性。因而,随着我国碳排放权交易市场启动时间的临近,基于整个工厂的碳排放核算是非常有必要的。

温室气体核算体系(Greenhouse Gas Protocol)是最具影响力的标准之一<sup>[15]</sup>,几乎世界上所有的温室气体核算标准都是基于该协定制定的,它提供了制浆造纸厂核算温室气体排放量的计算工具(温室气体协定工具)<sup>[16]</sup>。在我国,基于工厂的碳排放量核算使用“造纸和纸制品生产企业温室气体排放核算方法与报告指南”(以下简称“核算指南”)<sup>[17]</sup>。两者的基本框架和定义是一致的;不同点在于:第一,温室气体核算体系计算工具列出了碳排放核算的每一方面,而核算指南相对简化,更适用于我国制浆造纸企业;第二,温室气体核算体系中要求单独核算生物质能源引起的碳排放,但并不包括在总排放量中,而核算指南中不要求核算;第三,根据实际的生产状态,由于燃料碳氧化率的差异导致碳排放因子不同。

本课题的研究对象为我国具有典型代表性的一家制浆造纸联合工厂,该工厂拥有国内最大的木浆生产量,具有先进的工艺装备技术和管理水平,是我国制浆造纸行业的标杆企业。碳排放因子采用核算指南的推荐值和实验室实际测定值,根据核算指南对该厂的碳排放量进行分析和核算,同时根据温室气体核算体系计算工具单独列出生物质能源的碳排放量,进而计算出企业基于主营产品和宏观指标的碳强度;并且分析了碳强度影响因子,发现和提出对应的节能减排措施。本课题将为该厂参与我国正推进的碳排放交易与评价提供依据,为我国造纸工业进行工厂碳排放核算和碳强度提供一个标准框架,也有助于国际社会了解我国代表性的制浆造纸联合工厂的碳排放水平。

## 1 核算过程与方法

利用核算指南评估企业温室气体排放量包括以下

几个步骤:①确定核算边界;②识别排放源;③收集活动水平数据;④选择和获取排放因子数据;⑤分别计算化石燃料燃烧产生的碳排放量、过程产生排放量、企业净购入的电力和热力产生的碳排放量、废水处理产生的碳排放量;⑥汇总计算企业温室气体排放量。温室气体核算体系通常允许企业忽略那些很少、对整个碳排放量的估算没有太大影响的排放<sup>[16]</sup>。因此,核算过程可以简化为温室气体种类、核算边界和方法。

### 1.1 核算过程

#### 1.1.1 工厂信息

该工厂是一家制浆造纸联合工厂。制浆原材料包括泰国桉木、澳洲桉木、中国桉木、印尼相思木、越南相思木和针叶木。该工厂拥有2台浆板机和2台纸板机,产品为漂白硫酸盐阔叶木浆(LBKP)和针叶木浆(NBKP)、白卡纸和液体包装纸板。纸板机使用10%自产浆和漂白化学热磨机械浆。浆板机和纸板机的基本情况见表1。

碳酸钙购自北山矿业(中国安徽)。漂白化学热磨机械浆购自Eurocell公司(中国香港)、Millar公司(加拿大亚伯达)和Marubeni公司(加拿大温哥华)。

#### 1.1.2 温室气体种类

根据对温室效应的贡献,温室气体核算体系工具主要关注3种温室气体:CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、氧化亚氮。由于低含量的碳源对碳排放量核算影响较小,可以忽略。核算指南中核算的温室气体为CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>。本课题中,该工厂废水处理采用好氧法,无CH<sub>4</sub>产生和排放。因此,本课题只核算CO<sub>2</sub>的排放量。

#### 1.1.3 核算边界

图1为根据核算指南确定的核算边界。边界用来评估制浆造纸生产过程、原材料运输和利用中的碳排放量。碳排放量可分为5个部分。

第1部分是燃料燃烧产生的碳排放量。化石燃料包括煤炭、天然气、柴油、重油和液化气。生物质能源包括甲醇、黑液、木屑。甲醇产自木材蒸煮工段,可收集为生物质能源。当燃料与氧气充分燃烧时,释放CO<sub>2</sub>。根据温室气体核算体系,生物质能源燃烧产生的碳排放量单独核算,不包括在企业CO<sub>2</sub>总排放量

表1 工厂浆板机和纸板机的基本情况

机器	生产速度/m·min <sup>-1</sup>	生产能力/t·d <sup>-1</sup>	网部	网宽/mm	压榨部	产品水分含量/%
浆板机 <sub>1</sub>	60~140	500*	脱水板,真空系统	3525	双网压榨,重型压榨	10~13
浆板机 <sub>2</sub>	80~250	2800*	脱水板,真空系统	8210	靴压	10
纸板机 <sub>1</sub>	500	450~600	长网	3625	真空,盲孔,光泽压榨	7
纸板机 <sub>2</sub>	900	1013~1297	长网	4600	靴压,光泽压榨	7

注 \* 为风干浆。

中。第 2 部分是过程碳排放量，主要是企业外购并消耗的石灰石发生分解产生的 CO<sub>2</sub> 排放。第 3 部分是净购入的电力对应的排放。第 4 部分是净外购的热力对应的碳排放。第 5 部分是废水厌氧处理产生的 CH<sub>4</sub> 排放。由于该工厂采用好氧处理，因此无 CH<sub>4</sub> 排放。

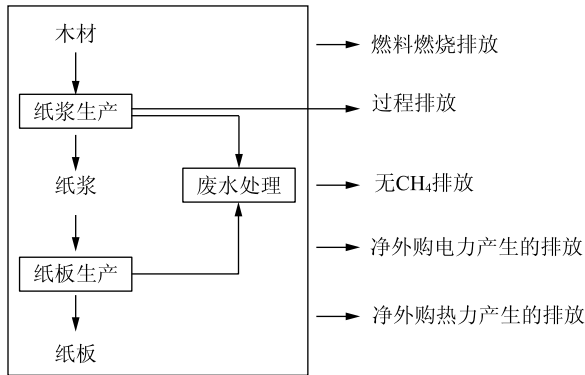


图 1 工厂核算边界

#### 1.1.4 CO<sub>2</sub> 排放量计算公式

式(1)用于核算工厂 CO<sub>2</sub> 的总排放量：

$$E = \sum_{i=1}^3 E_i \quad (1)$$

式中， $E_1$  为工厂的化石燃料和生物质燃料燃烧产生的碳排放量 (t CO<sub>2</sub>)； $E_2$  为过程碳排放量 (t CO<sub>2</sub>)； $E_3$  为工厂净外购的电力和蒸汽产生的碳排放量 (t CO<sub>2</sub>)。

$$E_1 = \sum_{i=1}^n (AD_i \times EF_i) \quad (2)$$

式中， $AD_i$  为年度内第  $i$  种燃料的活动水平 (GJ)； $EF_i$  为第  $i$  种燃料的 CO<sub>2</sub> 排放因子 (t CO<sub>2</sub>/GJ)； $i$  为燃料类型代号。

$$AD_i = NCV_i \times FC_i \quad (3)$$

式中， $NCV_i$  为年度内第  $i$  种燃料的平均低位发热量 (GJ/t，固体或液体燃料；GJ/Nm<sup>3</sup>，气体燃料)； $FC_i$  为年度内第  $i$  种燃料的净消耗量 (t，固体或液体；Nm<sup>3</sup>，气体)。

$$EF_i = CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中， $CC_i$  为第  $i$  种燃料的单位热值含碳量 (t C/GJ)； $OF_i$  为第  $i$  种燃料的碳氧化率 (%)；44/12 为碳和 CO<sub>2</sub> 间的换算系数。

$$E_2 = L \times EF_{\text{石灰石}} \quad (5)$$

式中， $L$  为年度内石灰石的消耗量 (t)； $EF_{\text{石灰石}}$  为煅烧石灰石的 CO<sub>2</sub> 排放因子 (t CO<sub>2</sub>/t 石灰石)。

$$E_3 = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{电}} + AD_{\text{热}} \times EF_{\text{热}} \quad (6)$$

式中， $AD_{\text{电}}$ 、 $AD_{\text{热}}$  为年度内净外购电、蒸汽量

(MWh，电；GJ，蒸汽)； $EF_{\text{电}}$ 、 $EF_{\text{热}}$  为电、蒸汽年平均 CO<sub>2</sub> 排放因子 (t CO<sub>2</sub>/MWh，电；t CO<sub>2</sub>/GJ，蒸汽)。

#### 1.1.5 碳强度

碳强度可以用来表征能源效率和比较碳排放水平，其公式为：

$$\text{碳强度} = \frac{E}{X} \quad (7)$$

式中， $X$  为主营产品产量 (或 GDP 和销售额)。根据《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB3544—2008) 对工厂的分类，该工厂主营产品为纸浆。

#### 1.2 核算方法

为了核算 CO<sub>2</sub> 排放量，需要收集  $FC_i$ 、 $L$ 、 $AD_{\text{电}}$ 、 $AD_{\text{热}}$ 、 $NCV_i$  和各类燃料的 CO<sub>2</sub> 排放因子  $EF_i$ 。 $FC_i$  主要来自工厂能源平衡表、原材料消耗表， $AD_{\text{电}}$  和  $AD_{\text{热}}$  来自财务报表、采购发票和其他审计报告。 $NCV_i$  和  $EF_i$  优先使用实验室实际测定值，如没有实际测定值，可采用核算指南中的缺省值。区域电网年平均供电 CO<sub>2</sub> 排放因子因地域差异而不同，数据来自发改委公布的区域电网最新 CO<sub>2</sub> 排放因子<sup>[18]</sup>。

烟煤、重油、木屑、黑液、甲醇的  $NCV_i$ ，甲醇和低压蒸汽的  $EF_i$  采用实验室测定值。木屑、黑液和甲醇的  $EF_i$  以烟煤的值代替。丙烷气和液化气的  $NCV_i$  和  $EF_i$  以液化石油气的值代替。2012 年华北区域电网的 CO<sub>2</sub> 排放因子为 0.8843 kg CO<sub>2</sub>/kWh。

碳强度的原始数据来源如下：世界银行提供的不同国家 GDP 和温室气体总排放量；中国统计年鉴 (2006—2015) 提供我国造纸工业的工业增加值；Wang 等<sup>[19]</sup> 核算了我国造纸工业的温室气体总排放量，不包含生物质能源产生的排放量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 工厂能源系统

通过热电联产设施将化石能源转化为电力和蒸汽，用于生产过程。图 2 为简化的工厂能源流程图。

碱回收车间是工厂最大的能源消耗区，占总能耗的 91%。第 2 个能源消耗区域为动力车间，占 8.9%。第 3 个区域为浆板和纸板车间。原水被泵入到清水车间，每个车间的废水送至废水处理厂，该区域只消耗电力。化学品准备和压缩空气系统只需要少量的蒸汽和电力。

### 2.2 工厂能源消耗

2014 年，该工厂能源消耗总量为 1512374.024 t

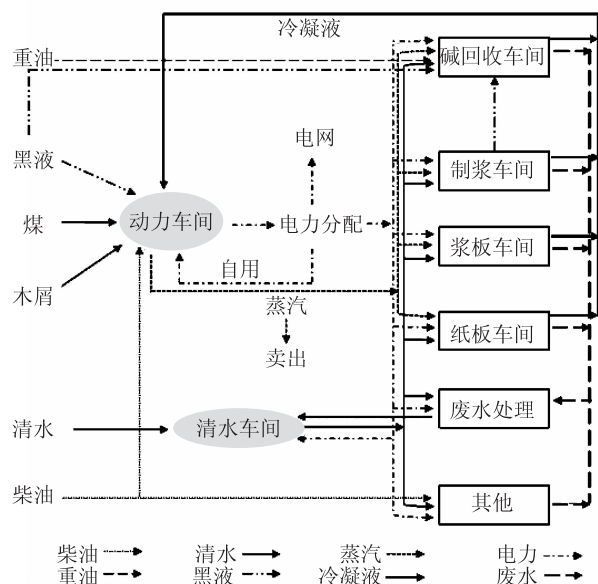


图 2 工厂能源流程图

标煤，见表 2。由表 2 可知，该工厂符合 2017 年碳排放权交易的条件。生物质能源是该工厂的主要能源，占能源消耗总量的 88.3%，以黑液为主。化石能源仅占能源消耗总量的 11.9%，以烟煤和重油为主。

表 2 2014 年工厂能源消耗情况

能源类型	消耗量/t 标煤	占比/%	
生物质能源	木屑	29319.849	
	黑液	1291782.921	88.3
	甲醇	14079.385	
化石能源	烟煤	92953.781	
	天然气	2509.461	
	重油	82472.528	
	柴油	1961.056	
	丙烷气 & 液化气	1.353	11.9
	净外购电力	-1541.857	
	净外购蒸汽	-1164.454	
能源消耗总量	1512374.024		

表 3 2014 年工厂碳排放总量

项目	总量/t	占比/%	备注
纸板产量	265407.685	—	
浆板产量	1890018.060	—	
CO <sub>2</sub> 排放量	化石能源	433971.962	100.81
	过程能源	11378.475	2.64
	净外卖电力和蒸汽	-14853.665	-3.45
	生物质能源	3470365.968	—
	小计	430496.772	—
小计	3900862.740	—	包含生物质能源的排放量

### 2.3 工厂 CO<sub>2</sub> 排放量核算

该工厂碳排放总量及各主要分类能源的碳排放量见表 3。由表 3 可知，2014 年，该工厂排放 430496.772 t CO<sub>2</sub>，占当年我国造纸工业排放量的 0.35%。化石燃料燃烧是主要的 CO<sub>2</sub> 排放源，高于该厂 CO<sub>2</sub> 总排放量，其中烟煤和重油燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放量占化石燃料排放总量的 98.1%。生产过程中的石灰石排放了 11378.475 t CO<sub>2</sub>，占总排放量的 2.64%。由于电力和蒸汽大部分外卖，没有电力和蒸汽产生的 CO<sub>2</sub> 排放，反过来可以认为该工厂吸收了 14853.665 t CO<sub>2</sub>。

生物质能源排放了 3470365.968 t CO<sub>2</sub>，其中 97.1% 的排放量由黑液产生，是化石能源排放量的 8 倍。其他的 CO<sub>2</sub> 排放由木屑和甲醇产生。生物质能源来自木材，木材燃烧时排放的 CO<sub>2</sub> 与成长过程中吸收的 CO<sub>2</sub> 可抵消。这个过程是碳中和，不产生净 CO<sub>2</sub>。因此，生物质能源的碳排放量不包括在 CO<sub>2</sub> 总排放量中，但需要额外核算。生物质能源的使用节省了大量的化石能源，减少了向大气中排放的净碳排放量。Wang 等<sup>[19]</sup>核算了 2005—2012 年我国造纸工业的碳排放量，生物质能源的碳排放量占 23%~26%，而该工厂对应的数据是 89%（当生物质能源排放量被包含在排放总量中时）。如果不再使用生物质能源，工厂的 CO<sub>2</sub> 总排放量将大大增加。

### 2.4 碳强度比较

#### 2.4.1 基于工厂和产品算法

碳强度受原材料种类的影响较大。表 4 为基于工厂和产品算法的碳强度比较。

由表 4 可知，基于工厂算法的碳强度较基于产品算法的碳强度低。该工厂主要生产商品浆。研究表明，该工厂向环境中排放了 0.228 t CO<sub>2</sub>/t 风干浆，与基于产品获得的各种纸浆碳强度相比<sup>[20-24]</sup>，为其他木浆碳强度的 35%~56.9%，草浆碳强度的 7.4%，废纸浆碳强度的 30.6%~41.6%。

这三类浆相比，草浆的碳强度最高，其次为废纸浆，木浆最低。主要原因有两个方面，其一是木浆碱回收工段可回收利用能源，且黑液属于生物质能源，排放的 CO<sub>2</sub> 不计入工厂碳排放总量中；而草浆碱回收可回收能量少，废纸浆无碱回收工段。第二是废纸浆生产环节无蒸煮工段，能耗较低。我国造纸工业中，木浆、废纸浆和非木浆消耗量分别占纸浆总消耗量的 28%、65% 和 7%<sup>[7]</sup>，

而发达国家比例分别达 63%、33.6% 和 3.4%<sup>[25]</sup>。因此,我国应该增加木浆的比例,降低草浆比例,或者采用先进的工艺设备降低草浆能耗。

#### 2.4.2 基于宏观指标的算法 (国民生产总值, GDP)

碳强度的主要影响因素是能源结构、产业结构、技术管理水平、能源强度等。

2003—2012 年,全球碳强度均呈明显的线性下降趋势,我国碳强度下降趋势更为明显,年均下降率为 11.1% (全球年均下降率为 5.24%) (见图 3)。自 2005 年,我国温室气体总量超过美国成为世界第一,占全球比例逐年增加,2012 年达到 23.3%。2005—2014 年,我国造纸工业碳强度逐年下降 (不含生物质能源的碳排放) (见图 4)。

根据图 3 和图 4 可推测出,2014 年全球碳强度为 0.570 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,我国碳强度为 0.723 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,我国造纸工业碳强度为 1.92 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD。本课题研究对象工厂 2014 年的碳强度为 1.08 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,为同年我国造纸工业碳强度的 56.3%,但仍高于我国和全球碳强度的平均水平。这主要是由于造纸工业是能耗大户,我国造纸工业以化石能源为主,故温室气体排放量较高。

#### 2.4.3 基于宏观指标的算法 (销售额)

参考世界自然基金会发布的“在华非化石能源企业碳强度排行榜”报告<sup>[26]</sup>,基于销售额对企业碳强度进行比较发现:2012 年,造纸行业的碳强度为 0.550 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,低于交通运输业,均高于榜单中的其他行业;本课题研究对象工厂的碳强度为 0.301 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,国际纸业公司的碳强度为 0.572 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD。后者作为全球排名第一的造纸企业,其技术管理水平、能源结构均优于本课题中研究对象工厂,但本课题中研究对象工厂的碳强度为后者的 52.6%,这说明企业的产品结构对碳强度也有一定的影响,同时也表明本课题研究对象工厂在我国造纸工业中有一定的代表性。

#### 2.5 工厂节能减排措施

根据碳强度的影响因子,工厂为获得更多的碳排放交易权空间,应进一步进行节能减排。措施包括:加强管理,引进节能减排技术,利用生物质能源代替化石能源,增加富余的电力和蒸汽的外卖,提高燃料

表 4 基于工厂和产品算法的碳强度比较

浆种	核算对象	碳强度		参考文献	核算方法
		/t CO <sub>2</sub> · t <sup>-1</sup>	风干浆		
LBKP, NBKP	工厂	0.228		本文	核算指南和温室气体核算体系工具
化学木浆	产品	0.657		王晓菲等 <sup>[20]</sup>	IPCC 2006
草浆	产品	3.077		王晓菲等 <sup>[20]</sup>	IPCC 2006
废纸浆	产品	0.746		王晓菲等 <sup>[20]</sup>	IPCC 2006
木浆	产品	0.117		陈莎等 <sup>[21]</sup>	IPCC 2006
商品浆	产品	0.401		陈莎等 <sup>[21]</sup>	IPCC 2006
废纸浆	产品	0.548		陈莎等 <sup>[21]</sup>	IPCC 2006
智利松树浆	产品	0.540		Patricia 等 <sup>[22]</sup>	ISO 14040 <sup>[23]</sup> 和 PAS 2050 标准 <sup>[24]</sup>
智利漂白桉木浆	产品	0.459		Patricia 等 <sup>[22]</sup>	ISO 14040 <sup>[23]</sup> 和 PAS 2050 标准 <sup>[24]</sup>

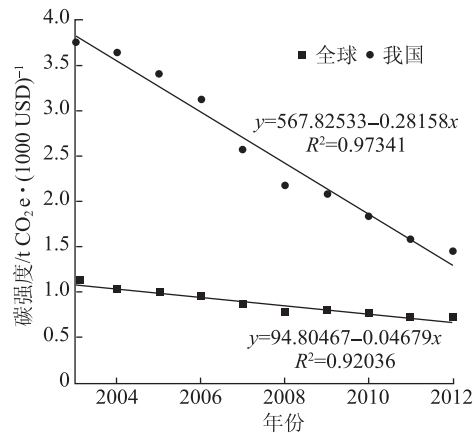
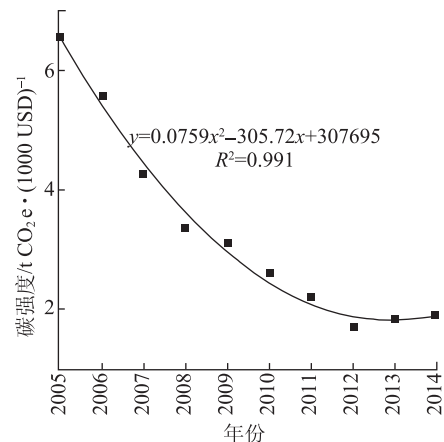


图 3 2003—2012 年全球和我国的碳强度



注 2014 年研究对象工厂的碳强度为 1.08 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD。

图 4 2005—2014 年我国造纸工业碳强度

燃烧效率等。

### 3 结论

本研究以在我国造纸工业最具代表性的一家制浆造纸联合工厂为研究对象,采用“造纸和纸制品生产企业温室气体排放核算方法与报告指南”和温室气体核算体系计算工具的方法,研究了温室气体种

类、核算边界和方法、工厂能耗和碳排放总量以及碳强度。结果表明,2014年,该工厂排放430496.772 t CO<sub>2</sub>。化石燃料的燃烧是碳排放的主要来源,生物质能源燃烧的碳排放不包含在总碳排放量中;基于工厂的纸浆碳强度为0.228 t CO<sub>2</sub>/t 风干浆,是基于产品获得的各种纸浆碳强度的7.4%~56.9%;基于国民生产总值(GDP)的碳强度为1.08 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,为我国造纸工业碳强度的56.3%,但高于我国和全球碳强度的平均水平;基于销售额的碳强度为0.301 t CO<sub>2</sub> e/1000 USD,约为国际纸业公司的52.6%。分析结果表明,碳强度的影响因素主要有原材料种类、能源结构、产品结构、技术管理水平等;企业在碳排放交易市场中获得更多的碳排放交易权空间,应进一步进行节能减排。

### 参 考 文 献

- [1] The State Council. The national economic and social development of the People's Republic of China 12<sup>th</sup> five-year plan outline [EB/OL]. [http://www.gov.cn/2011lh/content\\_1825838.htm](http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm), 2011.  
国务院. 国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/2011lh/content\\_1825838.htm](http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm), 2011.
- [2] The State Council. The national economic and social development of the People's Republic of China 13<sup>th</sup> five-year plan outline [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content\\_5054992.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm), 2016.  
国务院. 国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content\\_5054992.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm), 2016.
- [3] National Development and Reform Commission. The notice for launching national carbon emissions trading market [EB/OL]. [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201601/t20160122\\_772152.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201601/t20160122_772152.html), 2016.  
国家发展和改革委员会. 国家发展改革委办公厅关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知 [EB/OL]. [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201601/t20160122\\_772152.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201601/t20160122_772152.html), 2016.
- [4] Liu C. Development of China's carbon market [J]. *International Petroleum Economics*, 2016, 24(4): 6.  
刘琛. 中国碳交易市场发展现状与机遇 [J]. *国际石油经济*, 2016, 24(4): 6.
- [5] Trudeau N, Tam C, Graczyk D, et al. *Energy Transition for Industry: India and the Global Context* [M]. Paris: International Energy Agency (IEA), Energy Technology Policy Division, 2011.
- [6] National Bureau of Statistics of China. *China Energy Statistical Yearbook 2014* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.  
国家统计局. 2014 中国能源统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [7] Elhardt M. How much influence to limit carbon emissions of paper industry? [EB/OL]. <http://www.cppinet.com/ChinaWeb/web/chinaweb/Website/newIndex/neiye.html?id=a8dbdf85b53544e98b43d026f1afd89>, 2016.  
Elhardt M. 限制碳排放对造纸行业会有多大影响? [EB/OL]. <http://www.cppinet.com/ChinaWeb/web/chinaweb/Website/newIndex/neiye.html?id=a8dbdf85b53544e98b43d026f1afd89>, 2016.
- [8] McGrath M. China's per capita carbon emissions overtake EU's [EB/OL]. <http://www.bbc.com/news/science-environment-29239194>, 2014.
- [9] China Technical Association of Paper Industry. *Almanac of China Paper Industry in 2016* [M]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 2017.  
中国造纸学会. 2016 中国造纸年鉴 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- [10] Kuang S J. The world paper industry overview in 2014 [J]. *China Paper Newsletters*, 2016(2): 18.  
邝仕均. 2014 年世界造纸工业概况 [J]. *造纸信息*, 2016(2): 18.
- [11] Lin B Q, Zheng Q Y. Energy efficiency evolution of China's paper industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 1105.
- [12] Zhang S J, He B H, Zhao L H, et al. Application of carbon footprint assessment methodology to the case of coated ivory board [J]. *BioResources*, 2015, 10(2): 2656.
- [13] Ratnasingam J, Ramasamy G, Toong W, et al. An assessment of the carbon footprint of tropical hardwood sawn timber production [J]. *BioResources*, 2015, 10(3): 5174.
- [14] Kong L B, Price L, Hasanbeigi A, et al. Potential for reducing paper mill energy use and carbon dioxide emissions through plant-wide energy audits; a case study in China [J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 1334.
- [15] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. *Greenhouse gas protocol* [EB/OL]. <http://www.ghgprotocol.org/>, 2017.
- [16] The International Council of Forest and Paper Association. *Calculation tools for estimating greenhouse gas emissions from pulp and paper mills (version 1.1)* [EB/OL]. <http://www.ghgprotocol.org/calculation-tools/pulp-and-paper>, 2005.
- [17] National Development and Reform Commission. The calculation method and report guidance of corporate greenhouse gas emissions for paper and paper products in China (pilot) [EB/OL]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111\\_758275.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111_758275.html), 2015.  
国家发展和改革委员会. 造纸和纸制品生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111\\_758275.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111_758275.html), 2015.
- [18] National Development and Reform Commission. Baseline emission factors for China's regional power grids in 2011 and 2012 [EB/OL]. <http://www.tanpaifang.com/tanjiliang/2014/0928/38588.html>, 2014.  
国家发展和改革委员会. 2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子基准线排放因子 [EB/OL]. <http://www.tanpaifang.com/tanjiliang/2014/0928/38588.html>, 2014.
- [19] Wang Y T, Yang X C, Sun M X, et al. Estimating carbon emissions from the pulp and paper industry; a case study [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 779.
- [20] Wang X F, Cui Z J, Yu F. Greenhouse effect analysis of different

- raw materials pulping processes by carbon emissions[J]. *Paper and Paper Making*, 2013, 32(3): 1.
- 王晓菲, 崔兆杰, 于斐. 不同原料制浆系统温室效应碳排放当量的分析[J]. *纸和造纸*, 2013, 32(3): 1.
- [21] Chen S, Yang X G, Li Y P, et al. Life-cycle GHG emissions of paper in China[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(6): 944.
- 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.
- [22] Patricia G, Mabel V, Claudio Z. Carbon footprint of pine and eucalyptus ECF bleached kraft cellulose production in Chile[C]// *International Conference on Life Cycle Assessment, Coatzacoalcos, México*, 2011.
- [23] ISO 14040. Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework[S]. Switzerland: International Standardization Organization, 2006.
- [24] PAS 2050. How to assess carbon footprint of goods and services[S]. London: British Standard Institution, 2008.
- [25] Wang Y L, Mao X L. Risk analysis and carbon footprint assessments of the paper industry in China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2013, 19(2): 410.
- [26] World Wide Fund for Nature. The first carbon intensity list of enterprises in China[EB/OL]. <http://www.wwfchina.org/pressdetail.php?id=1522>, 2013.
- 世界自然基金会. 中国首个企业碳强度排行榜报告发布[EB/OL]. <http://www.wwfchina.org/pressdetail.php?id=1522>, 2013.

### Calculation and Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions and Carbon Intensity of a Typical Integrated Paper Mill in China

ZHANG Xin<sup>1,2,3</sup> ZHANG Fang<sup>1,3</sup> CAI Hui<sup>1,2</sup> ZHANG Hui<sup>1,3,\*</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Lab of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu Province, 210037; 2. State Key Lab of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong Province, 510640; 3. Jiangsu Co-Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu Province, 210037)

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

**Abstract:** In this paper, the types of greenhouse gases, calculation boundaries and methods, energy consumption, carbon emissions and intensity of a typical integrated pulp and paper mill in China were studied based on the Accounting Method and Report Guidance for GHG Emissions from Pulp and Paper Industry and the Greenhouse Gas Protocol Tools. The results showed that there were 430496.772 t CO<sub>2</sub> emissions from that mill in 2014 that did not cover CO<sub>2</sub> emissions from biomass energy, which was 8 times higher than that of fossil energy. The carbon intensity based on the pulp was 0.228 t CO<sub>2</sub>/adt, which accounted for 7.4% ~ 56.9% in other pulps' based on the product. The carbon intensity based on Gross Domestic Product (GDP) was 1.08 t CO<sub>2</sub>e/1000 USD and accounted for 56.3% intensity in the China paper industry. The carbon intensity based on sales was about 52.6% of that of International Paper. It also showed that carbon intensity was influenced by the species of raw material, structures of energy and products, which provided the mill with measures for energy saving and CO<sub>2</sub> emissions reduction to obtain the redundant carbon emissions in the trading.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions; pulp and paper industry; carbon emissions trading; carbon intensity; energy consumption

(责任编辑:刘振华)