

基于碳排放抵扣的碳排放计量方法研究 ——以钢材生产为例

勾丽明¹, 张清华^{1*}, 陈瀛², 云福¹, 孙锦¹

(1. 北京科吉环境科技发展有限公司, 北京 100098; 2. 环境保护部信息中心, 北京 100029)

摘要 随着全球气候变暖趋势的不断加剧, 碳排放已经成为国内外学者研究的重点, 尤其是钢材生产的碳排放情况更是重中之重。针对国内钢材生产碳排放现状, 本文提出了一种碳排放抵扣计量方法, 该方法以钢材生产碳排放计量基本方法——质量守恒法和活动水平因子法为基础, 着重分析了钢材生产过程的理论碳排放、实际碳排放、碳排放抵扣以及企业理论直接减排潜力。并以某钢材生产企业为实例, 对该企业生产流程中碳排放进行抵扣分析, 识别与企业直接减排潜力相关的物质及流程, 增加副产品及二次能源利用度, 最后对企业碳减排潜力的研究方向做出初步展望, 提出碳减排潜力的有利发展方向。进一步证明该方法的实用性, 为该方法在钢材生产企业碳排放权的实际应用提供了理论基础。

关键词 碳排放; 钢材生产; 碳排放权抵扣; 理论直接减排潜力; 节能减排

中图分类号: X22

文章编号: 1674-6252 (2016) 06-0099-05

文献标识码: A

DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2016.06.099

Research on the Quantitative Method of Carbon Emission Based on the Offset of Carbon Emission—a Case Study of Steel Production

GOU Liming¹, ZHANG Qinghua^{1*}, CHEN Ying², YUN Fu¹, SUN Jin¹

(1. Beijing Keji Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100098;

2. Information Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029)

Abstract: With the increasing trend of global warming, carbon emissions have become the focus field of domestic and foreign scholars, especially the carbon emissions of the steel production industry. According to the current situation of carbon emissions of domestic steel production industry, this paper proposes a quantitative method for the offset of carbon emissions, it based on the basic methods of steel production industry carbon emission include mass balance method and activity level factor method, this paper focuses on the analysis of the steel product process theoretical carbon emissions, actual carbon emissions, carbon emissions offset and enterprise theoretical directly reduction potential. With an example of a steel production enterprise, it analysis the quantitative of carbon emissions offset, recognition the related materials and processes of enterprise direct reduction potential, increased by-products and secondary energy utilization. Finally, make preliminary outlook on the research of enterprise carbon emission reduction potential direction, proposal the favorable development direction of carbon emission reduction potential. It further proves the practicability of this method, which provides a theoretical basis for the practical application of carbon emission permits in the steel production enterprise.

Keywords: carbon emission; steel production; the offset of carbon emission; theoretical directly reduction potential; energy saving and emission reduction

1 背景

近年来, 全球气温变化形势不容乐观, 由温度上升

引发的气候问题已不容忽视^[1]。二氧化碳作为所有温室气体中对温室效应贡献率最大的气体, 其排放逐渐引起全球的高度关注。我国正处于发展阶段, 各方面技术不

资助项目: 2014年度中小企业发展专项资金中欧国际合作项目: 公共建筑全生命周期碳排放评价关键技术研究(SQ2013ZOA000019)。

作者简介: 勾丽明(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为循环

经济与碳减排技术, E-mail: goulimingab@126.com。

* 责任作者: 张清华(1982—), 女, 副研究员, 硕士研究生, 研究方向为碳减排技术研究和碳资产管理。E-mail: zhang.qinghua@kejicc.com。

够成熟,煤、石油、天然气等能源仍然是支撑整个社会经济命脉的主要能源,因此,在低碳发展的必然形势下,我国正面临巨大的减排压力^[2-3]。

据统计,我国钢材生产产生的碳排放量约占全球钢材生产碳排放的51%^[4],占我国碳排放总量的15%左右,仅次于电力和水泥行业,而钢材生产过程中能源消耗所产生的碳排放已达到其碳排放总量的90%以上。虽然国家相继发布了一系列文件,并启动了对钢材生产企业碳排放的核查工作,但现有核查方法误差相对较大,适用性较欠缺,不能很好地衡量企业碳排放情况。因此,深入研究钢材生产企业碳排放计量方法对节能减排工作有着重要的意义。

2 国内外研究现状

国内外学者在钢材碳排放方面都做了大量的研究工作,国外学者对全球钢材生产碳排放进行了分析^[5-8],并基于不同方法对钢材生产未来一段时间内的碳排放情况进行了预测;同时,国内学者也对不同情况下的碳排放计量方法做了相应的改进,但在方法普适性和准确性上还存在一定不足。

Ran Jing等认为钢材生产产生的碳排放占全球碳排放总量比重较大,分别用IPCC2006、LCIL方法和CEC方法对我国钢材生产行业碳排放进行了分析对比,由于钢材生产企业情况各有不同,上述三种方法的选取需要以实际生产情况为准^[9,10]。Claudia根据政府间气候变化小组第五次评估报告,基于产生二氧化碳的能源种类,对钢材生产过程提出了一种分解分析法,详细分析了汽车每个主要钢构造生产过程的碳排放情况,并提出2025年汽车行业钢件生产碳排放的远景^[11]。André等探讨了在国家碳减排气候政策的前提下,如何满足社会对钢材商品的需求,杜绝出现因政策需求碳排放下降,而使钢材生产碳排放实际上只转移不减少的“碳漏洞”^[12]。Bas等提出了一个全球钢材业的仿真模型,模型涵盖了钢材生产的完整经济活动链,他认为在2050年,钢材生产碳排放总量将达到峰值,并呈现明显的下降趋势^[13]。

刘宏强等对钢材生产的三种常见方法进行了简单介绍,使用投入产出基本方法,分别用清单编制和排放指南中的两种方法对钢材生产碳排放进行计量。结果表明,在考虑固碳产品抵扣后,结果相对更加精确,而基于ISO标准的计算结果因包含了钢材生产的整个生命周期则相对误差较大^[14]。贾国玉针对中国国情,重新制定了适用于钢材生产的计算公式和碳排放因子,并对生产的全流程进行碳物质流分析,最后对生产系统分别进行单目标和多目标优化,为企业优化生产提供决策依据^[15]。邹安全等建立了以物质的质量守恒为理论依据的钢材生产流程EIO-LCA模型,通过模型找出其生命周期内碳排放量相对较大的环节,并分别从经济和产品周期两个角度对钢材生产碳排放进行评价,提出节能减排的相应

措施^[16]。张辉等在IPCC2006碳排放分析框架的基础上,解决了排放因子方面的问题,提出一种以碳物质流分析为基础的钢材生产碳排放评价方法,通过碳排放抵扣计算出企业理论最大减排潜力,为企业在资金有限的情况下提供了很好的减排方向^[17]。

综上所述,国内外文献对钢材生产的碳排放方法研究多以IPCC2006为基础,从而对钢材生产的碳排放进行评价,但实际上,为将不同区域以及不同流程的钢材生产企业囊括在内,现有碳排放核查方法大多比较保守,计算数据与企业实际排放数据有一定误差,为使计算结果更加精确,更能直接反映企业碳排放现状,因此有必要对钢材生产企业碳排放计量方法进行深入研究。

本文主要以质量守恒法和活动水平因子法为基础,通过研究系统含碳物质的流动状态和存在形式,扣除潜在的碳排放,从而对企业碳排放进行核算,使企业深入了解生产工艺中各流程单元碳排放情况,为企业节能减排提供方向,为企业制定可持续发展决策提供指导和帮助。

3 钢材生产业碳排放方法研究

根据IPCC2006和《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》,钢材生产的温室气体核算方法大致分为三种:活动水平因子法、质量守恒法以及连续监测法,三种方法均以碳物质流分析为基础。通常情况下,企业不会对所有与排放有关的参数进行连续监测,故在采用连续监测法对企业碳排放进行计算时,存在数据不确定性高或数据不完整的情况,从而导致碳排放计算结果可信度低或无法计量,因此一般不采用连续监测法。

质量守恒法即物质的质量守恒定律,对于钢材生产来说,这是基于碳物质流的一种平衡分析法,即不考虑单元内具体的反应过程;也是基于企业输入碳与输出碳的一种差额计算方法,在这里,输入即消耗,输出即排放。其涉及的工艺原理较复杂,投入、产出的物质种类多样,且碳含量不稳定,投入、产出与CO₂排放量的关系不确定。

如图1所示,从钢材生产单元来说,其输入的碳含量等于以二氧化碳形式输出的碳含量与非二氧化碳输出量之和,其具体关系式表达如下:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} - E_{\text{非}} \quad (1)$$

其中, E_{in} 表示单位时间内碳的输入量; E_{out} 表示单位时间内以二氧化碳形式排放到空气中的碳的量; $E_{\text{非}}$ 表示单位时间内非二氧化碳形式输出的碳的量。

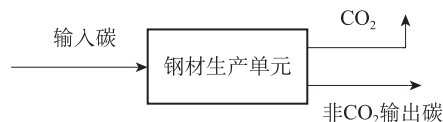


图1 钢材生产单元碳物质图

相对于质量守恒法来说, 活动水平因子法涉及的工艺原理较简单, 投入、产出的物质种类较单一, 且碳含量相对较稳定, 不确定因素较少, 同时, 投入、产出与 CO_2 排放量的关系明确, 一般只需了解活动水平数据和排放因子即可。其具体算法见式 (2)。

$$E_{\text{out}} = AD \times EF \quad (2)$$

其中, AD 表示单位时间内某环节的活动水平数据; EF 表示该活动涉及的排放因子。

在实际应用中, 由于企业情况各有不同, 现有方法已不能完全满足钢材生产碳排放核查需求。为更精确地对钢材生产碳排放进行计量, 本文在质量守恒法和活动水平因子法的基础上对钢材生产流程的投入产出进行了重新定义, 见图 2。

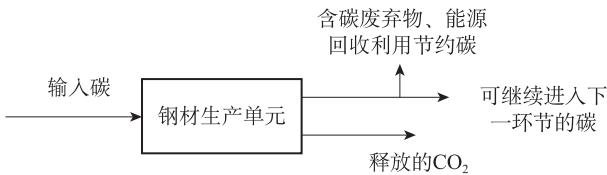


图2 重新定义的钢材生产单元碳物质图

目前, 企业层级的碳排放核算一般包括两部分: 直接碳排放和间接碳排放。本文中的直接碳排放为广义上的系统总输入 (原料、能源含碳量) 与总输出 (最终产品含碳量) 之差, 但通常情况下, 直接碳排放中可能会存在一部分的外购电力和外购热力 $C_{\text{外输}}$, 该部分的碳排放计算时应对其进行扣除; 在生产过程中会产出一些含碳副产品, 通常按照质量守恒计算, 含碳副产品被隐含在碳排放部分, 而实际该部分是以固态或其他形式的碳输出, 因此, 该部分碳排放 $C_{\text{副产品}}$ 也应在排放中进行扣除; 生产过程中的热能及其他能源、含碳废弃物的回收再利用 $C_{\text{回收}}$ 也会抵扣一部分碳排放^[18], 在计算企业实际碳排放时需要对这些部分进行扣除, 从而使企业碳排放数据更加接近真实值。因此, 引入企业实际碳排放抵扣碳 $C_{\text{抵扣}}$ 、企业理论碳排放 $C_{\text{理论}}$ 和企业实际碳排放 $C_{\text{实际}}$ 几个概念。

钢材生产的碳排放主要来自于能源, 而能源产生的碳排放又有很大一部分来自于外购电力外购热力, 企业的外购电力、外购热力产生的排放是企业的间接排放, 为 $C_{\text{间接}}$ 。

所以有:

$$C_{\text{理论}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} \quad (3)$$

$$C_{\text{实际}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} - C_{\text{抵扣}} \quad (4)$$

$$C_{\text{抵扣}} = C_{\text{外输}} + C_{\text{副产品}} + C_{\text{回收}} \quad (5)$$

因此,

$$C_{\text{理论}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} \quad (6)$$

$$C_{\text{实际}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} - C_{\text{外输}} - C_{\text{副产品}} - C_{\text{回收}} \quad (7)$$

理论上钢材生产行业、电力行业等都进行了碳排放计算, 虽然行业间的计算方法不同, 但从社会整体碳排

放角度来说, 存在一定的重复性。本文仅从钢材生产角度对碳排放进行计量, 从单一角度来讲, 碳排放不存在重复计算的问题。

理论上, 企业碳排放可以减小到零, 但在实际生产中, 尤其工业企业, 以目前的技术水平, 排放不可能为零, 因此, 企业存在一个理论减排潜力。由于间接排放主要是外购电力、热力所产生, 其减排与否主要与设备能耗有关, 即与生产技术有关; 直接排放则涉及各部分的直接用能用料等, 直接排放的减排与外输电力、热力、能源、副产品以及各环节回收的可再利用资源有关。本文仅对企业理论直接减排潜力^[19]做讨论。则企业理论直接减排潜力 $E_{\text{理论}}$ 为:

$$E_{\text{理论}} = C_{\text{直接}} - C_{\text{外输}} - C_{\text{副产品}} - C_{\text{回收}} \quad (8)$$

因此, 企业可从以上分析中获知实际可能存在的减排潜力, 以缓解企业面临的减排压力, 从而为整个行业的碳减排做出贡献。

4 实证分析

4.1 流程分析

本文以某钢材生产企业为例, 对其生产流程进行分析。该企业主要能耗单元有炼铁、炼钢、轧钢等, 主要耗能设备包括高炉、转炉、连铸机等。该企业直接购入废铁料等含碳原料, 经高炉进行熔炼, 还原成生铁; 对铁水进行预处理, 经转炉将铁水中过量的碳氧化成一氧化碳和二氧化碳, 经精炼环节及连铸机, 最终产出成品钢材, 生产过程不涉及焦化及烧结工序。具体流程如图 3 所示。

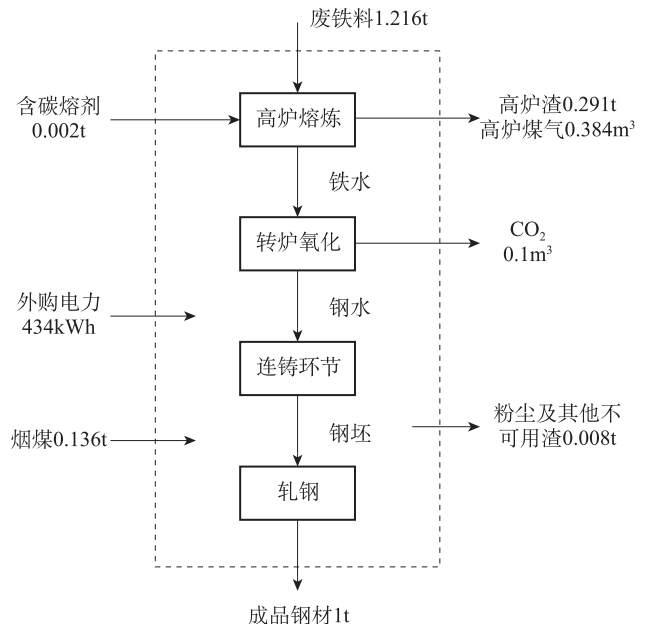


图3 钢材生产流程

由于企业对部分数据的保存未具体到单元层级, 故

图中未与流程单元相连接的箭头代表企业层级的输入输出。通过调研可知,该企业的含碳熔剂为白云石,流程中高炉熔炼环节输出的高炉渣有80%可用来生产水泥,转炉氧化单元输出的CO₂可用来制干冰及灭火器,粉尘及氧化产生的CO则直接进行排放。

4.2 数值计算

根据图3中各流程数据,整理所涉及物质的碳排放因子^[20,21],如表1和表2所示。

表1 碳排放因子表^①(1)

名称	单位	排放因子
废铁	tCO ₂ /t	0.172 0
白云石	tCO ₂ /t	0.471 0
粗钢	tCO ₂ /t	0.015 4
电力	tCO ₂ /MWh	0.667 1

表2 碳排放因子表(2)

名称	单位	低位发热值	单位热值含碳量	碳氧化率
高炉煤气	tCO ₂ /10 ⁴ m ³	33.000GJ/t	70.80tCO ₂ /TJ	99%
烟煤	tCO ₂ /t	19.570GJ/t	26.18tCO ₂ /TJ	93%

①该表中所列碳排放因子均为《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》中的碳排放因子参考值。

根据以上数据,可以对该企业的生产流程进行碳排放计量。

该企业的直接碳排放包括含铁原料(废铁料)、烟煤、含碳熔剂等排放,间接碳排放包括外购电力产生的排放,则该钢材生产企业生产1t钢材的理论碳排放为:

$$C_{\text{理论}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} = 721.8 \text{ kg CO}_2$$

在生产流程中,该企业有高炉煤气输出;有CO₂再利用制干冰、灭火器,高炉渣再利用生产水泥及微晶玻璃等,其中高炉渣的碳含量采用企业实测数据2.725%;因此,该企业的碳排放抵扣值为:

$$C_{\text{抵扣}} = C_{\text{外输}} + C_{\text{副产品}} + C_{\text{回收}} = 112.22 \text{ kg CO}_2$$

对碳排放抵扣进行扣除,则该企业的实际碳排放为:

$$C_{\text{实际}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} - C_{\text{抵扣}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}} - C_{\text{外输}} - C_{\text{副产品}} - C_{\text{回收}} = 609.58 \text{ kg CO}_2$$

该企业的理论直接减排潜力为:

$$E_{\text{理论}} = C_{\text{直接}} - C_{\text{抵扣}} = C_{\text{直接}} - C_{\text{外输}} - C_{\text{副产品}} - C_{\text{回收}} = 320.078 \text{ kg CO}_2$$

4.3 结果分析及决策建议

从以上计算结果可知,在未进行碳排放抵扣前,生产1t钢材企业需排放721.8kg CO₂,该计算结果将企业生产流程中产生的副产品以及回收利用部分都计入碳排放,会比实际值略大。为更好地了解企业实际碳排放,本文对理论碳排放中潜在的碳排放进行了扣除,即对企业外输、副产品以及回收等产生的碳排放进行相应抵扣,抵扣后生产1t钢材企业需排放609.58kg CO₂,相比抵扣

前减少了112.22kg CO₂,该值在理论上更接近于企业碳排放的真实值,因此,进行抵扣后的数值,能更好地衡量我国钢材生产业的碳排放现状。

通过以上数据可知,该企业的单位产品能耗为136kg/t、单位产品碳排放为0.722 kg CO₂/t,通过与该地区钢材生产行业平均水平进行对比,该企业单位产品能耗以及单位产品碳排放略高于平均水平,说明企业应该采取相关措施以降低单位产品碳排放。由于企业未对各用能设备单独计量数据,故从数据的分析结果中,看不出每个设备的能耗及碳排放情况,无法与行业标准进行对比;该企业能源消耗所产生的碳排放远大于生产用原料所产生的碳排放,这也是钢材生产行业碳排放的一个共同点,企业可通过提高能源使用效率来减小碳排放;同时,该企业的理论碳减排潜力高达320.078kg CO₂、碳排放抵扣权为112.22kg CO₂,说明企业有着巨大的减排空间。

为促进钢材生产行业的可持续发展,企业可采取一定的节能减排措施,引进先进的生产技术,改善高炉及转炉等设备的工作效率,加强高耗能环节对资源的利用率,增加企业对物质的利用效率;同时加强对能源及其他中间回收物质的二次利用;推动副产品及二次能源利用,从而大幅度减小企业碳排放,为钢材生产行业的碳减排做出一定贡献。

从企业的角度来讲,降低产品单位能耗、降低单位产品碳排放会增加产品的单位成本,但有利于企业自身发展及长远打算;企业的技术改进,不仅减小了对环境的影响,更促进了企业的发展,同时也适应行业的大趋势。从行业的角度来讲,钢材生产业在我国一直是能源消费的主要行业之一,虽然一定程度上促进了经济的发展,但其高污染、高排放的特点对环境造成了无法估量的后果,也在一定程度上制约着经济的发展。钢材生产行业的碳减排,可极大地减轻当前环境所面临的压力,也使我国经济发展模式更趋向于可持续发展模式。

5 前景与展望

本文以钢材生产的碳排放基本计量方法为基础,对企业碳排放抵扣计量方法进行了研究,重点分析了企业的碳排放抵扣和理论直接减排潜力,为企业在整个生产流程的管理方面提供一定的借鉴。因间接减排涉及的影响因素对减排造成的影响程度较为复杂,故本文只考虑了直接减排潜力,未对间接减排潜力进行深入研究。在国内碳减排日益严峻的形势下,企业间接减排潜力与直接减排潜力同等重要,因此,在引入成本、流程改进、技术引进以及需求等内部与外部因素条件下,企业理论间接减排潜力还有很大的探讨空间,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 吉红洁,袁进,郭亚兵,等.关于焦化行业CO₂排放核算方法的探讨[J].中国环境管理,2015(1): 63-67.

- [2] 陈守端. 我国金融发展对碳排放的影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [3] ZHOU L, YANGS L. Emission reduction of China's steel industry: progress and challenges[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 61: 319-327.
- [4] 张亚敏. 低碳贸易约束下我国钢铁制造业的创新系统效率研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [5] KURAMOCHIT. Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 132: 81-97.
- [6] 肖序, 熊菲, 周志方. 流程制造企业碳排放成本核算研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(5): 29-35.
- [7] XU B, LIN B Q. Regional differences in the CO₂ emissions of China's iron and steel industry: regional heterogeneity[J]. *Energy policy*, 2016, 88: 422-434.
- [8] CORMOSC C. Evaluation of reactive absorption and adsorption systems for post-combustion CO₂ capture applied to iron and steel industry[J]. *Applied thermal engineering*, 2016, 105: 56-64.
- [9] JING R, CHENG J C P, GAN V JL, et al. Comparison of greenhouse gas emission accounting methods for steel production in China[J]. *Journal of cleaner production*, 2014, 83: 165-172.
- [10] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama, kanagawa. Japan: IGES, 2006.
- [11] SHEINBAUM-PARDO C. Decomposition analysis from demand services to material production: the case of CO₂ emissions from steel produced for automobiles in Mexico[J]. *Applied energy*, 2016, 174: 245-255.
- [12] SERRENHO A C, MOURÃO Z S, NORMAN J, et al. The influence of UK emissions reduction targets on the emissions of the global steel industry[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2016, 107: 174-184.
- [13] VAN RUIJVEN B J, VAN VUUREN D P, BOSKALJON W, et al. Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2016, 112: 15-36.
- [14] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳碳排放计算方法与实践 [J]. *钢铁*, 2016, 51(4): 74-82.
- [15] 贾国玉. 钢铁企业碳素流分析及炼铁系统碳排放优化研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [16] 邹安全, 罗杏玲, 全春光. 基于 EIO-LCA 的钢铁产品生命周期碳排放研究 [J]. *管理世界*, 2013(12): 178-179.
- [17] 张辉, 李会泉, 陈波, 等. 基于碳物质流分析的钢铁企业碳排放分析方法与案例 [J]. *钢铁*, 2013, 48(2): 86-92.
- [18] 陆俭兵. 建筑工程的绿色低碳施工技术及管理措施论述 [J]. *低碳世界*, 2015(7): 236-237.
- [19] 王喜平, 田丹丹. 环境约束下火电企业全要素能源效率及减排潜力 [J]. *工业工程*, 2013, 16(3): 103-109.
- [20] 国家发展和改革委员会. 中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) [Z]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2013.
- [21] 孙振清, 汪国军, 陈亚男. 基于能源平衡表的碳排放清单核算不确定性分析 [J]. *生态经济*, 2015, 31(7): 33-38.

(上接85页)

- [13] 付军华, 苏佰礼, 张恒. 在新形势下如何更好地开展环境信访工作 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, (23): 202-204.
- [14] 尹静. 北京市居民出行方式选择意向研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [15] SCHWARTZSH. Normative influences on altruism[M]// L BERKOWITZ. *Advances in experimental social psychology*. New York: Academic Press, 1977.
- [16] BERKOWITZ L. *Advances in experimental social psychology*. New York: Academic Press, 1977: 221-279.
- [17] HOPPER J R, NIELSEN J M. Recycling as altruistic behavior: normative and behavioral strategies to expand participation in a community recycling program. *Environment & behavior*, 1991 23(2): 195-220.
- [18] DE GROOT J I M, STEG L. Morality and prosocial behavior: the role of awareness, responsibility, and norms in the norm activation model[J]. *The journal of social psychology*, 2009 (4): 425-449.
- [19] ZHANG, Y X et al. Antecedents of employee electricity saving behavior in organizations: an empirical study based on norm activation model[J]. *Energy policy*, 2013 (62).
- [20] HAN H. The norm activation model and theory-broadening: individuals' decision-making on environmentally-responsible convention attendance[J]. *Journal of environmental psychology*, 2014.
- [21] ONWEZEN M C, ANTONIDES G, BARTELSJ. The norm activation model: an exploration of the functions of anticipated pride and guilt in pro-environmental behaviour[J]. *Journal of economic psychology*, 2013, 39: 141-153.
- [22] STERN P C, DIETZ T, BLACK J S. Support for environmental protections: the role of moral norms[J]. *Population and environment*, 1986 (8): 204-222.
- [23] ABRAHAMSE W, STEG L, VLEK C, et al. The effect of tailored information, goal setting and feedback on household energy use, energy related behaviors, and behavioral Determinants [J]. *Journal of environmental psychology*, 2007(27): 265-276.
- [24] 吴明隆. 结构方程模型 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
- [25] 荣泰生. AMOS 与研究方法 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007 (9): 169-171.