

## 乘用车子午线轮胎碳足迹分析

### Carbon footprint analysis of radial tires for cars

杨东 刘晶茹 杨建新 丁宁 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室

**摘要** 本文以我国乘用车子午线轮胎为研究对象,采用生命周期评价(LCA)方法,核算其全生命周期过程的碳足迹及其分布,识别其减碳潜力。研究结果表明,1t 轮胎生产阶段、运输阶段、使用阶段和废弃处理处置阶段的碳足迹分别为 2980kgCO<sub>2-eq</sub>、102kgCO<sub>2-eq</sub>、10633kgCO<sub>2-eq</sub>和-424kgCO<sub>2-eq</sub>。轮胎的碳足迹主要来源于使用阶段和生产阶段,分别贡献了 80%和 22%的碳足迹;废弃处理处置阶段,由于废旧轮胎资源化,贡献了-3.2%的碳足迹。敏感性分析表明,轮胎的滚动摩擦力是影响轮胎碳足迹的关键性因素。采取生态化设计降低生产阶段的资源和能量消耗,降低使用阶段的能耗,注重废弃处理处置阶段的资源化方式,可以显著降低轮胎的碳足迹。

**关键词** 子午线轮胎;生命周期评价;碳足迹

**免责声明** 本文仅代表作者个人观点,与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

*Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)*

随着我国经济水平的发展和汽车保有量的逐年增加,轮胎产量大幅增长。2012 年我国汽车和专用车辆轮胎总产量已达到 4.71 亿条,其中子午线轮胎产量 4.14 亿条,目前已经成为世界上最大的轮胎生产中心<sup>[1]</sup>。同时,我国废旧轮胎的产量也在快速增长之中,据统计,2010 年年产废轮胎 2.33 亿条<sup>[2]</sup>,并且仍以每年 20%的速度快速增长,我国轮胎大量生产、大量废弃的局面日益加剧。轮胎在生产阶段消耗大量橡胶等资源,使用阶段消耗大量燃油,废弃阶段产生大量的固废,在倡导低碳发展、推进资源化利用的今天,轮胎产业引发的环境问题引起了广泛的关注。因此开展轮胎产品的全生命周期环境影响分析研究,评估轮胎产品的碳足迹,有助于轮胎产业的低碳发展。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)作为一种重要的环境管理工具,用于评估产品或服务生命周期全过程中相关环境因素及其潜在影响<sup>[3]</sup>。国内外部分研究者利用生命周期评价方法开展了轮胎产产品的相关研究,Kořinek 等人<sup>[4]</sup>利用生命周期评价方法,分析了轮胎生命周期的环境影响,比较了不同废弃处理方式处理产生的差别;Feraldi 等人<sup>[5]</sup>分析了物质回收和能量回收两种不同废旧轮胎资源化方式的差别,结果发现,物质回收大于能量回收产生的环境效益。国内也有学者开展了相关研究,李兴福等人<sup>[6]</sup>综合比较了我国废旧轮胎 4 种主要利用途径的环境影响,认为微负压热裂解方法处理

废旧轮胎产生的环境影响最小;李智芬<sup>[7]</sup>利用自己开发生命周期评价软件 T-LCA,建立了轮胎生命周期评价技术框架,开展了相应的评价研究;黄菊文等人<sup>[8]</sup>分析了轮胎能量消耗分布以及主要影响因素;伍英武<sup>[9]</sup>采用生命周期评价方法构建了轮胎生命周期碳排放模型,分析了轮胎的生命周期的能源消耗和碳排放。但是大多数研究普遍关注轮胎废弃处理处置以及资源化产生的环境影响,生产、运输、使用到废弃处理处置阶段全生命周期过程的轮胎碳足迹的研究较少,另外相关研究基本都采用国外的生命周期背景数据,不能准确反映我国生命周期的真实环境影响。因此,本文利用我国的生命周期背景数据对轮胎全生命周期进行分析,可以更准确的辨识轮胎不同生命周期阶段的碳足迹,为我国轮胎产业的低碳减排提供数据支撑。

## 1 研究方法

产品碳足迹(Carbon Footprint of Products)主要指产品系统整个生命周期产生的直接和间接的温室气体排放之和,主要以 CO<sub>2-eq</sub> 为单位<sup>[10]</sup>。生命周期评价方法可以针对从产品最初的原材料采掘到产品用后最终废弃处理(产品系统),进行全过程的跟踪、定量分析产品的碳足迹。本文采用荷兰 Pre 公司开发生命周期评价软件 SimaPro7.3<sup>[11]</sup>,利用 RCEES2012 数据库参数(中国科学院生态环境研究中心城市与产业生态研究组开发的中国能源、基础材料和交通运输方面的生命周期背景数据

库)，对我国轮胎的碳足迹进行分析。

### 1.1 研究目标和范围的确定

#### 1.1.1 研究目标

为了评价我国子午线轮胎产品的生命周期环境影响，本文以目前市场主流的乘用车子午线轮胎为研究对象，建立轮胎生命周期碳足迹的分析模型和方法，分析我国子午线轮胎的碳足迹及其生命周期分布，为子午线轮胎的绿色设计和节能减排提供理论依据。

#### 1.1.2 系统边界的确定

本研究以乘用车子午线轮胎为研究对象，从我国轮胎的实际情况出发，以 1t 乘用车子午线轮胎为功能单位，使用寿命为 2-3 年，寿命里程为 80000km，定量计算其全生命周期的碳足迹。研究范围包括轮胎的生产阶段（包括资源开采、原材料生产、零部件生产和轮胎生产），运输阶段（从轮胎的生产地到轮胎销售和使用的地点），使用阶段和废弃处理处置阶段这四个主要的生命周期阶段。系统边界如图 1 所示。

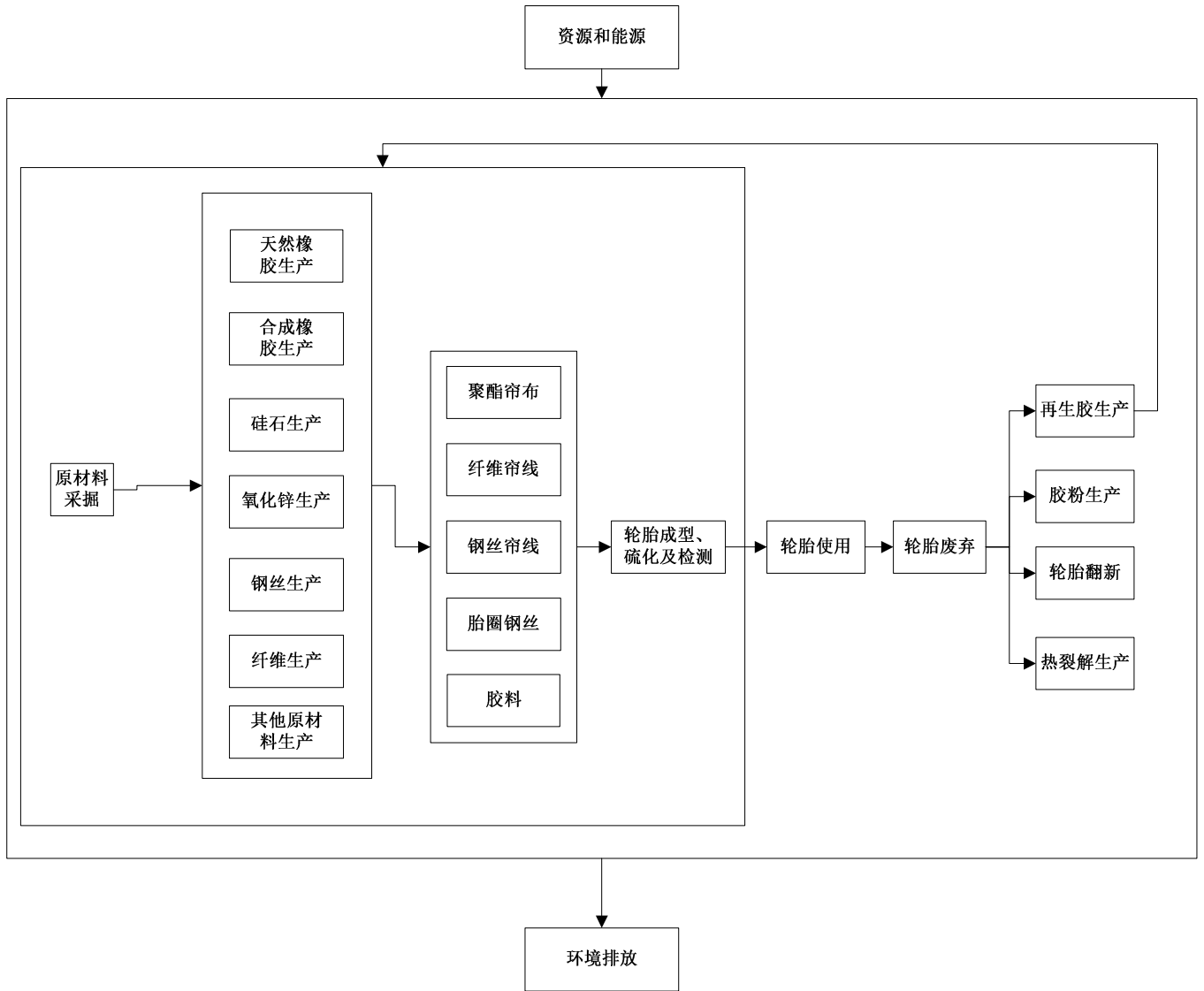


图 1 轮胎系统评价边界

### 1.2 生命周期清单数据

#### 1.2.1 数据来源

轮胎生产阶段的物耗和能耗数据来源于国内某大型轮胎企业环境影响评价报告；轮胎运输阶段和使用阶段的数

据来源于相关文献；轮胎废弃处理阶段拆解和制取再生胶的数据来源于相关废旧轮胎利用企业环境影响评价报告；原材料和能源的碳足迹数据主要来自于 RCEES2012 数据库，硬脂酸和氧化锌等生命周期背景数据 (LCI) 采用 Ecoinventv2.1 数据库<sup>[12]</sup>中全球平均水平数据。

### 1.2.2 生产阶段

轮胎生产阶段主要包括炼胶、压延、截断、成型、硫化和检验等主要过程，其生产阶段消耗大量的橡胶、钢丝等资源和能源。根据相关企业调研，本文获取了 1t 子午

线轮胎产品生产阶段主要的原材料及能源消耗，具体如下表 1 所示。在构建模型时我们考虑了生产阶段的部分材料损耗、能源消耗，但由于数据的可获得性等问题，仍有一些损耗未包含在内。

表 1 1t 轮胎生产阶段原材料和能源消耗

轮胎组分	材料	消耗量	能耗和物耗数据来源	碳足迹数据	碳足迹数据来源
原材料	天然橡胶	175kg	企业环评	0.11kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	合成橡胶	321kg	企业环评	2.5kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	Ecoinventv2.1
	炭黑	202.7kg	企业环评	3.33kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	硅石	40.5kg	企业环评	0.07kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	氧化锌	12.4kg	企业环评	2.80kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	Ecoinventv2.1
	硬脂酸	5.7kg	企业环评	0.20kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	Ecoinventv2.1
	纤维	60kg	企业环评	4.70kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	Ecoinventv2.1
	钢丝	85kg	企业环评	6.42kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
能源	天然气	94.6m <sup>3</sup>	企业环评	1.85kgCO <sub>2-eq</sub> /m <sup>3</sup>	RCEES2012
	柴油	14.3kg	企业环评	4.1kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	水	700kg	企业环评	0.002 kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	电	67.6kWh	企业环评	0.87kgCO <sub>2-eq</sub> /kWh	RCEES2012
	蒸汽	2748.2MJ	企业环评	0.10kgCO <sub>2-eq</sub> /MJ	RCEES2012

### 1.2.3 运输阶段

轮胎运输多采用公路运输方式，我国公路运输的碳足迹来自 RCEES 2012 数据库，公路运输距离 1km 的 1t 货物，产生的碳足迹为 0.21kgCO<sub>2-eq</sub>。本文根据企业实地调研，结合相关文献<sup>[8-9]</sup>，轮胎产品的运输距离进行以下假设：轮胎出厂到销售使用地点的运输距离为 500km。

### 1.2.4 使用阶段

轮胎使用阶段能量的消耗主要体现在克服轮胎滚动阻力所产生的消耗，根据文献分析可知，轮胎在汽车运行过程的能量消耗约为汽车行驶过程总能量消耗的 6%~20%<sup>[13-15]</sup>。据中国汽车技术研究中心资料可知，我国汽车行驶平均油耗为 8.09L/100km，轮胎的行驶里程为 80000km，使用寿命为 2~3 年。因此轮胎使用阶段进行以下假设：轮

胎使用阶段能耗约占汽车行驶过程总能量消耗的 10%，1t 轮胎在使用阶段中消耗的汽油为 3223kg。

### 1.2.5 废弃处理处置阶段

废旧轮胎回收综合利用，可以节约和补充大量的橡胶、钢丝和石油能源等资源，我国目前废旧轮胎利用形式主要集中在再生胶、轮胎翻新和热裂解几种，其中再生胶的利用占到 70%，其它回收利用形式还没有形成较大的规模<sup>[16]</sup>。根据某废旧轮胎拆解及回收利用再生胶企业的环境影响评价报告，可知 1t 废旧轮胎制取再生胶的输入和输出清单如下表 2 所示。因此，对废弃处理处置阶段进行以下假设：废旧轮胎主要采用再生胶制取方式进行处理，循环利用得到再生胶、废钢丝和废纤维，剩下的材料则按常规的城市固体垃圾填埋进行废弃处理。

表 2 1t 废旧轮胎拆解回收利用的输入和输出

种类	材料	消耗量	能耗和物耗数据	碳足迹数据	碳足迹数据来源
输入	电	770.5kWh	企业环评	0.87kgCO <sub>2-eq</sub> /kWh	RCEES2012
	水	7100kg	企业环评	0.002 kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	柴油	10kg	企业环评	0.09kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
输出	再生胶	670kg	企业环评	0.83kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	钢丝	70kg	企业环评	6.42kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012
	纤维	30kg	企业环评	4.70kgCO <sub>2-eq</sub> /kg	RCEES2012

### 1.2.6 生命周期清单

1t 子午线轮胎的主要的生命周期清单见表 3，其中原材料主要有金属矿石、煤、原油和水等，温室气体清单主

要有二氧化碳、甲烷等。废弃处理处置阶段，由于废旧轮胎资源化利用，获得相应的环境效益，降低了整个生命周期的原材料和能源消耗的投入。

表 3 1t 子午线轮胎生命周期清单

类别	单位	总量	生产阶段	运输阶段	使用阶段	废弃处理处置阶段
<b>原材料</b>						
铁矿石	kg	78	441			-363
水	kg	59597	31100	114	12883	15500
煤	kg	1197.09	983	0.69	78.2	135.2
锌矿石	kg	1.19	3.83			-2.64
石灰岩	kg	19.5	109			-89.5
原油	kg	4821.6	1008	36.6	4133	-356
天然气	kg	0.63	94.3	0.13	14.2	-108
<b>空气排放</b>						
CO <sub>2</sub>	kg	13246.37	2829	101.67	10621.7	-306
CH <sub>4</sub>	kg	2.23	3.03	0.005	0.45	-1.26

### 1.3 生命周期影响评价方法

碳足迹的评价方法主要采用 IPCC 2007(100a)的评估方法来进行评价,该方法是由联合国气候变化委员会发布的权威的温室气体效应评估方法,以 kgCO<sub>2-eq</sub> 单位,评估温室气体释放入大气之后 100 年内产生的温室气体效应<sup>[17]</sup>。

## 2 研究结果

1t 子午线轮胎的碳足迹为 13291kgCO<sub>2-eq</sub>, 生命周期各阶段的碳足迹分别是: 轮胎使用阶段的碳足迹最大, 为 10633kgCO<sub>2-eq</sub>, 贡献了整个生命周期碳足迹的 80%; 其次为轮胎的生产阶段, 碳足迹为 2980kgCO<sub>2-eq</sub>, 贡献了整个生命周期碳足迹的 22%; 运输阶段的碳足迹相对较小, 为 102kgCO<sub>2-eq</sub>; 废弃处理处置阶段由于生产再生胶、胶粉, 回收钢丝和纤维, 产生了一定的正环境效益, 所以此阶段的碳足迹总和为负值, 为-424kgCO<sub>2-eq</sub>, 即通过材料的回收利用, 减少了轮胎生命周期的碳足迹。

### 2.1 生产阶段的碳足迹

轮胎生产的主要原料为橡胶(天然橡胶和合成橡胶)和炭黑, 其次为钢丝和纤维。通过对轮胎生产阶段各主要原料及加工过程的分析, 得到了生产阶段轮胎各主要原料的和加工过程的碳足迹贡献: 原材料生产和轮胎加工过程碳足迹的贡献分别为 81%和 19%。原材料生产中, 合成橡胶生产的贡献最大, 占生产阶段碳足迹的 27%; 其次为炭黑和钢丝的生产, 贡献分别为 23%和 18%; 剩余原材料生产的贡献为 13%。由此可以看出, 轮胎加工过程的能源消耗、合成橡胶、炭黑和钢丝的消耗是轮胎生命周期碳足迹主要的贡献因素。因此, 减少轮胎制造过程中的能耗和材料的消耗, 可以有效降低轮胎生产阶段的环境影响, 进而降低轮胎整个生命周期的环境影响。

### 2.2 运输阶段的碳足迹

由前文可知, 轮胎运输销售的距离假设为 500km, 因此 1t 轮胎运输阶段产生的碳足迹为 102kgCO<sub>2-eq</sub>, 主要来源于轮胎销售运输阶段中汽车消耗的燃油。

### 2.3 使用阶段的碳足迹

1t 轮胎使用阶段产生的碳足迹为 10633kgCO<sub>2-eq</sub>, 主要来源于汽车行驶过程中驱动轮胎转动产生的能源消耗。轮胎的使用阶段是生命周期中最重要的阶段, 贡献了 80%的碳足迹, 很多研究忽视了使用阶段的碳足迹, 不能真正反映轮胎真正的碳足迹。轮胎使用阶段的能耗和其自身的滚动阻力有直接的关系, 其主要受到路面状况、汽车行驶速度、轮胎结构、气压和负荷等因素的影响。因此可以从改善轮胎配方, 减轻轮胎重量, 提高轮胎气压等方面着手进行考虑, 降低轮胎使用阶段的能耗, 进而降低该阶段的碳足迹。

### 2.4 废弃处理处置阶段的碳足迹

根据文献和企业调研可知, 轮胎的废弃处理处置阶段, 主要采用机械破碎, 回收轮胎中的纤维和钢丝; 同时利用废旧轮胎制取再生胶, 一般来算, 3 份再生胶在使用中可以替代 1 份合成橡胶的使用<sup>[18]</sup>。根据核算结果可知, 1t 废旧轮胎处理处置过程中, 机械破碎和处理过程产生碳足迹为 720kgCO<sub>2-eq</sub>, 再生胶制取以及钢丝和纤维的回收产生的碳足迹为-1144kgCO<sub>2-eq</sub>, 所以轮胎废弃处理处置阶段产生的碳足迹为-424kgCO<sub>2-eq</sub>。废旧轮胎资源化产生的环境收益, 贡献了轮胎生命周期过程-3.2%的碳足迹, 合理高效的废旧轮胎的资源化方式可以适度降低轮胎生命周的碳足迹。

### 3 结果讨论

由前文分析可知, 轮胎的碳足迹主要集中在使用阶段, 使用阶段产生的碳足迹占据了整个生命周期碳足迹的 80%, 这也说明只有改善使用阶段产生的碳足迹才是切实可行的绿色轮胎的设计途径。轮胎使用阶段的碳足迹主要来源于行驶过程中轮胎克服摩擦阻力所产生的燃油消耗。据文献调研可知, 轮胎滚动阻力和实车燃油消耗量密切相关, 载重、车速和路面等相同外部环境下, 轮胎滚动阻力每减小 10%, 整车燃油下降 2%左右, 现在的绿色轮胎可降低滚动阻力 20%~30%左右<sup>[19]</sup>。轮胎的滚动摩擦阻力除了和驾驶地形、驾驶速度有关之外, 还与轮胎的材质和结构有关。因此采用更加合理的设计, 选择合适的胶种原料和配合剂以及改进胎面胶料配方入手, 再辅以减薄胎体、优化轮胎轮廓等结构设计手段, 已达到降低轮胎滚动阻力, 减少轮胎使用阶段油耗及碳足迹消耗的目的。

### 4 结论

本文主要结论:

(1) 1t 子午线轮胎的碳足迹为 13291kgCO<sub>2-eq</sub>, 轮胎的碳足迹主要来源与使用阶段和生产阶段, 分别贡献了 80%和 22%的碳足迹; 轮胎的运输阶段产生碳足迹相对较小; 废弃处理处置阶段, 贡献了-3.2%的碳足迹。

(2) 采取合理有效的设计, 减少生产阶段能耗和物耗, 降低使用阶段轮胎克服摩擦所产生的能耗, 注重轮胎废弃处理处置阶段的资源化利用, 可以大幅降低轮胎的碳足迹。

### 参考文献

- [1]莫业勇. 2013 年中国橡胶工业年会综述[J]. 世界热带农业信息, 2013,(5): 1-3.
- [2]魏杨倬, 倪明仿, 王铮, 等. 基于资源节约的废旧轮胎回收利用研究[J]. 再生资源与循环经济, 2012, 5(1): 34-36.
- [3]BSI, P.A.S., 2050: 2008—specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services[S]. British Standards Institution, 2008.
- [4]Kořínek R, Tušil P, Kočí V, *et al.* Evaluation of the Life Cycle and Comparison of the Waste Management Treatment with Tyre by Life Cycle Assessment[J]. Journal of Environmental Science and Engineering, 2012, 1(2): 106-119.
- [5]Feraldi R, Cashman S, Huff M, *et al.* Comparative LCA of treatment options for US scrap tires: material recycling and tire-derived fuel combustion[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(3): 613-625.
- [6]李兴福, 徐鹤. 中国废旧轮胎利用途径的环境影响评价[J]. 环境污染与防治, 2010,(011): 99-102.
- [7]李智芬. 生命周期评价研究及其在轮胎工业中的应用[D]. 上海交通大学, 2011.
- [8]黄菊文, 李光明, 贺文智, 等. 轮胎生命周期的能量分析

[J]. 汽车工程, 2012,(3): 277-281.

[9]伍英武. 轮胎碳足迹分析与研究[D]. 上海师范大学, 2012.

[10]ISO. 2012. DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 14067: Carbon footprint of products- Requirements and guidelines for quantification and communication [S]. International organization for standardization.

[11]Consultants, P., SimaPro 7, Pré-Product Ecology Consultants[R]. The Netherlands, 2011.

[12]Hischier R, Weidema B, Althaus H, *et al.* Implementation of life cycle impact assessment methods[R]. Ecoinvent report No. 3, V2.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf.

[13]蔡凤田, 谢元芒. 汽车运行油耗的影响因素与汽车节能技术[J]. 交通节能与环保, 2006, 1(3): 28-33.

[14]刘琦, 陈强, 杨建园. 轮胎滚动阻力对整车燃油经济性的影响[J]. 汽车零部件, 2011,(8): 77-80.

[15]杨蕾. 轮胎生命周期的经济, 能量和碳排放分析 [D]. 上海: 同济大学环境科学与工程学院, 2009.

[16]江镇海. 中国废旧轮胎综合利用现状与发展[J]. 现代橡胶技术 2011,37(3): 3-7

[17]IPCC, 2007IPCC. IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (2007) <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm> (accessed 25.05.12.)

[18]曹庆鑫. 从再生橡胶看废旧橡胶再制造产业发展[J]. 橡胶科技市场, 2011,9(4): 4-7.

[19]陶志军, 恽海, 杨帆. 绿色轮胎节能减排效果与成本效益分析[J]. 汽车工业研究, 2013,(12): 41-45.

### 作者简介

杨东, 博士研究生, 主要研究方向为生命周期评价和碳足迹分析。E-mail: yangdong163126@163.com。

通讯作者: 杨建新, 博士, 研究员, 主要研究方向为产业生态学、环境经济和环境管理学。E-mail: yangjx@rcees.ac.cn。基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05140200)。