

基于物质足迹的城市环境压力及其驱动力研究

余亚东 马铁驹 朱 兵*

摘要:科学地测度区域环境的压力,并进一步分析环境压力变化的驱动力,对于降低区域环境压力具有重要意义。本文在经济系统物质流分析的理论基础上,测算了上海市2010–2013年的物质足迹,以此来衡量上海市资源代谢全生命周期过程的环境压力,并且将资源结构效应引进IPAT方程来分析环境压力的驱动力。研究表明:2010–2013年间,上海市基于物质足迹的环境压力由2.795亿吨增长到3.08亿吨,经济增长与环境压力处于相对解耦状态;上海市2010年人均物质足迹为12.1吨,约为世界平均值的1.2倍,略低于中国平均水平,比发达国家要低很多;2010–2013年间,上海市基于物质足迹的环境压力增长的主要驱动力为人口增长和富裕度的增加,而技术水平的提升则在部分程度上减少了环境压力的增长,资源结构变化对环境压力的影响很小,但单个资源比例的变化对环境压力具有不可忽视的影响。在此基础上,本研究还提出了降低城市环境压力的相关政策建议。

关键词:经济系统物质流分析;物质足迹;环境压力;上海市

一、引言

“十二五”以来,中国政府加大生态环境保护力度,大力推进大气、水、土壤的污染防治,生态环境保护取得了积极进展。然而,我国当前的生态环境仍然面临着非常严峻的挑战,污染物排放量大、面广,环境污染严重。根据《“十三五”生态环境保护规划》,我国当前化学需氧

*余亚东(通讯作者),华东理工大学商学院,邮政编码:200237,电子邮箱:yuyd@ecust.edu.cn;马铁驹,华东理工大学商学院,邮政编码:200237,电子邮箱:tjma@ecust.edu.cn;朱兵,清华大学循环经济研究院,邮政编码:100084,电子邮箱:bingzhu@tsinghua.edu.cn。

本研究系国家自然科学基金面上项目“不确定技术学习及系统空间重构下的技术采纳优化”(71571069)、国家自然科学基金国际合作重点项目“中国区域物质足迹核算与应用研究——基于环境拓展的多区域投入产出分析和物质流分析”(41661144023)和教育部分人文社会科学项目“长三角地区碳排放峰值模拟与脱钩路径研究:基于结构分解分析和回归分析的视角”(15YJC790136)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的宝贵建议,文责自负。

量、二氧化硫等主要污染物排放量仍然处于2000万吨左右的高位,环境承载能力超过或接近上限;78.4%的城市空气质量未达标,公众反映强烈的重度及以上污染天数比例占3.2%,部分地区冬季空气重污染频发、高发(国务院,2016)。因此,降低环境压力是中国当前的迫切需求。

作为中国的经济和工商业中心,上海市人口规模大、密度高、经济增长迅速、环境容量有限,经济社会的未来可持续发展面临着严峻的环境问题挑战。据《上海市2015年度环境状况公报》数据:2015年上海市主要河流断面水质达到III类的仅占14.7%,而V类和劣V类则分别占15.8%和56.4%,地表水环境氮磷污染问题突出;在大气环境方面,上海市2015年环境空气质量指数(AQI)优良天数为258天,比2014年减少了23天,PM_{2.5}年均浓度为53微克/立方米,比国家环境空气质量二级标准高出18微克/立方米,也比2014年增加了1.9%。因此,上海市在未来经济发展中迫切地需要降低环境压力。在此背景下,科学地测度上海市的环境压力,研究如何降低环境压力成为具有现实意义的重大问题,也可为其他城市乃至全国提供借鉴。

经济系统物质流分析(Economy-wide Material Flow Analysis, EW-MFA)是一种定量分析一定时空边界的经济-环境系统中物质的存量与流量的工具,是从经济系统物质代谢的角度研究环境压力的重要方法(OECD, 2008; Fischer-Kowalski et al., 2011; 余亚东等, 2015)。本文将以此EW-MFA为理论基础,从经济系统物质代谢的角度测度上海市的环境压力,分析其驱动力,从而提出降低上海市环境压力的政策建议,为城市环境压力的研究拓宽思路。

二、文献综述

EW-MFA是研究经济活动中物质资源新陈代谢的一种重要方法,其思想起源可追溯到一百多年以前(Fischer-Kowalski, 1998)。然而,直到20世纪90年代,EW-MFA的研究才随着可持续发展研究的深入而进入全面发展期。2001年,欧盟统计局正式出版物质流账户导则,提出了EW-MFA的标准方法,并建立了完整的核算框架(Eurostat, 2001)。2008年,OECD发布了系列的研究报告,为EW-MFA相关指标的核算提供了系统的指南(OECD, 2008)。当前,基于EW-MFA的指标已经在世界各国的环境与资源政策领域得到广泛的应用,如欧盟、日本、韩国、中国等(朱兵等, 2015)。

根据本文的主要内容,以下分别对EW-MFA指标的核算与驱动力研究进行简要述评,并且在此基础上指出本文的理论意义。

(一) EW-MFA指标核算的研究

根据余亚东等(2015)对EW-MFA的研究进展的系统述评,EW-MFA的指标核算可以按照指标类型分为:直接流指标,如直接物质投入(DMI)、区域内资源消耗(DMC)等,表征经济系统

物质代谢过程的直接环境压力;包含间接流或隐藏流的综合指标,如物质足迹(MF)(又称原始资源消耗当量)、总物质需求等,表征经济系统物质代谢过程的生命周期范围内的环境压力(Fischer-Kowalski et al., 2011)。各个指标之间的关系可参考OECD的报告(OECD, 2008)。

对于直接流指标,自2001年欧盟统计局发布EW-MFA编制方法标准导则以来,国家尺度的直接流指标核算研究已形成了较为成熟的框架,相关核算成果已经形成规范的数据库。而在国家以下的区域尺度上,由于缺乏具体区域间进出系统边界的物质统计数据(区域间边界上没有类似于国家与国家之间的海关统计),国家尺度EW-MFA标准核算框架无法在区域尺度直接应用,区域尺度EW-MFA直接流指标的核算研究少,目前还没有形成成熟的方法和统一的研究框架。然而,由于EW-MFA相关指标在资源与环境政策领域具有重要的应用价值,在区域尺度上核算EW-MFA指标也具有重要意义,该研究也逐渐成为热点。代表性的研究如Schulz(2007), Niza等(2009), Hodson等(2012), 黄晓芬和诸大建(2007)。

对于包含间接流或隐藏流的综合指标,由于其考虑了进出系统边界的各类物质的原始资源当量或国内开采的未使用量,其核算过程更加复杂,所需的数据量也更加庞大,目前的研究还不多。特别对于物质足迹而言,由于该指标涵盖了经济系统生命周期过程的物质利用量,弥补了区域内资源消耗量等直接流指标在聚合(Aggregation)过程的“不对称性”的缺陷(即忽略了进出系统边界的物质的上游消耗),能体现资源利用在国家间的转移,近年来迅速成为研究的热点(余亚东等, 2015),代表性研究如Giljum等(2013), Wiedmann等(2015)。

根据Schaffartzik等(2014)的总结,物质足迹的主要核算方法包括三个方面:基于过程的生命周期分析法(P-LCA)(Dittrich et al., 2012)、环境扩展的投入产出分析法(EE-IOA)(Wang et al., 2012; Wiedmann et al., 2015; Moran et al., 2015; Giljum et al., 2015; Wu et al., 2017)、投入产出分析与生命周期分析的混合法(Hybrid of EE-IOA and P-LCA)(Schaffartzik et al., 2014; Weinzettel & Kovanda, 2009)。然而,已有的对物质足迹的研究主要集中在国家尺度上,国家以下区域尺度的物质足迹研究还非常少见。

(二) EW-MFA指标的驱动力研究

按照研究方法的差异,已有文献对EW-MFA指标的驱动力(或影响因素)研究可分为指标分解分析法和回归分析法。指标分解分析法是将因变量分解成为与之相关的各个独立自变量,通过自变量的变化解释因变量变化的方法,主要包括:IPAT方程的直接分解法、指数分解分析(IDA)和结构分解分析(SDA)。IPAT方程的直接分解法形式简洁、应用方便,是研究EW-MFA指标影响因素最常用的方法,典型代表如Schandl和West(2012)对中国、日本和澳大利亚DMC指标驱动力的研究,文章对中国、日本和澳大利亚DMC进行IPAT分解分析,通过技术、人口和富裕度来解释这四个国家1975-2005年DMC的变化原因。然而,IPAT方程的直接分解法无法考察经济系统内部的结构和技术变化对环境压力的影响。SDA和IDA能够克服这一

缺点,但其应用所需数据量庞大、过程复杂,目前主要用于能源和碳排放的研究,对EW-MFA指标的影响因素研究还很少,典型的包括:Hoffren等(2000)利用IDA对芬兰物质流的变化原因研究;Munoz和Hubacek(2008)利用SDA对智利DMI的驱动力研究;Weinzettel和Kovanda(2011)利用SDA对捷克原始资源消耗当量(RMC)的变化原因研究。

以回归分析法研究EW-MFA指标影响因素的文献较少,已开展的代表性研究包括:Steger和Bleischwitz(2011)利用多元回归研究了欧盟27国1992-2000年DMC的变化;Steinberger和Krausmann(2011)对世界165个国家2000年的资源产出率(GDP/DMC)与收入水平进行了回归分析;Gan等(2013)对世界51个国家不同时间段的GDP/DMC与18个社会经济变量进行回归分析;Wiedmann等(2015)对世界137个国家2008年RMC与人均收入、人均资源开采使用量和人口密度进行了回归分析。回归分析法具有简单直观的优点,但其应用需要一定的时间序列或空间面板数据。

综上所述:EW-MFA的核算研究在国家尺度上已基本成熟,但由于数据及系统边界等原因,EW-MFA在国家以下区域尺度上的物质足迹指标核算研究方面还非常缺乏,特别是缺乏对其驱动力的研究。因此,本文以EW-MFA为理论基础,充分考虑上海市已有统计数据较少的特点,利用P-LCA对上海市2010-2013年物质足迹这一环境压力指标进行测算,并且基于改进的IPAT方程分解分析法(引入资源结构因素)研究上海市物质足迹的驱动力。本文将不仅为上海市降低环境压力提供相关政策建议,而且还为区域尺度的物质足迹研究提供借鉴。

三、方法和数据

(一) 基于P-LCA的物质足迹核算方法

根据EW-MFA的基本理论(OECD, 2008),物质足迹也就是原始资源消耗当量(Raw Material Consumption, RMC),即以原始资源形态计量的区域资源消耗量,其基本计算公式如下:

$$MF = DEU + RME_{IM} - RME_{EX} \quad (1)$$

(1)式中, MF 为区域的物质足迹, DEU 为区域内开采的原始资源的使用量, RME_{IM} 和 RME_{EX} 分别为区域内流入和流出的资源按照一定的系数所折合的原始资源当量。在国家尺度上,流入(流出)数据通过海关获取,该方法可以直接应用。而在国家以下的区域尺度上(如省级尺度),流入(流出)同时包括国外进口(出口)和外省调入(调出),由于调入(调出)的资源数据获取难度大,该方法很难直接应用。

为克服这一问题,洪丽云(2011)在资源代谢的基础上,提出了物质足迹测算的简化方法。理论上而言,该方法属于P-LCA的范畴,即通过一系列的系数将处于产业链不同节点资源的消耗量(主要是二次资源的消耗量)折算为原始资源的消耗量,从而计算区域的物质足

迹。与严格意义上的P-LCA方法相比,这种简化的P-LCA方法具有较强的可操作性,但由于忽略了产业链二次资源之后的资源,会导致物质足迹计算结果偏小。充分权衡方法的可操作性和结果的准确性,本文在充分调研数据可得性的基础上,采用该方法测算物质足迹,具体计算公式如下:

$$MF_i = \sum_{j=1}^n SRC_{ij} \times Coeff_{ij} \quad (2)$$

(2)式中, MF_i 为第 i 类资源的物质足迹, SRC_{ij} 和 $Coeff_{ij}$ 分别为第 i 类资源中第 j 种二次资源的消耗量和对原始资源的折算系数。特定资源的 SRC 的数据主要通过对其在经济系统中的物质流分析得到,如对铁资源的物质流分析可以得到其二次资源(钢材和铸铁)的消耗量。 $Coeff$ 数据反映资源代谢产业链不同节点的物质之间的转换关系,通过区域特定的资源品位和加工利用技术水平等参数来确定区域自身的特定折算系数。如生产1吨钢材需要消耗4.4吨原始资源,包括3.9吨铁矿石原矿、0.2吨石灰石和0.3吨化石能源,则钢材的折算系数为4.4。

(二) 基于改进的IPAT方程的物质足迹驱动力分析

根据IPAT方程, MF 可进行如下分解:

$$MF = P \times A \times T \quad (3)$$

(3)式中, P 为区域的常住人口数量, A 为人均GDP,表征区域的富裕程度, T ($T = \frac{MF}{GDP}$) 为单位GDP的物质足迹,表征区域的技术水平。为考察资源结构变化对 MF 的影响,本文引入资源结构因素 S_i 对IPAT方程进行改进。 S_i 可按照如下公式计算:

$$S_i = \frac{MF_i}{MF} = \frac{MF_i}{\sum_{i=1}^n MF_i} \quad (4)$$

(4)式中, MF_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 种资源的物质足迹。因此, MF 分解为:

$$MF = \sum_{i=1}^n MF_i = \sum_{i=1}^n S_i \times P \times A \times T \quad (5)$$

由(5)式可知: MF 的变化可以通过资源结构 S 、人口 P 、富裕度 A 和技术水平 T 的变化来解释。在 $[0, t]$ 时间内, MF 的变化可以分解为:

$$\begin{aligned} \Delta MF &= MF^t - MF^0 \\ \Delta MF &= \Delta_S MF + \Delta_P MF + \Delta_A MF + \Delta_T MF \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式中, $\Delta_S MF$ 、 $\Delta_P MF$ 、 $\Delta_A MF$ 和 $\Delta_T MF$ 分别为 S 、 P 、 A 和 T 的变化所导致的 MF 的变化。根据对数平均迪氏指数分解方法(Ang, 2015),这四者的表达式可计算如下:

$$\begin{cases} \Delta_S MF = \sum_{i=1}^n w_i \ln \frac{S_i^t}{S_i^0} \\ \Delta_P MF = \sum_{i=1}^n w_i \ln \frac{P_i^t}{P_i^0} \\ \Delta_A MF = \sum_{i=1}^n w_i \ln \frac{A_i^t}{A_i^0} \\ \Delta_T MF = \sum_{i=1}^n w_i \ln \frac{T_i^t}{T_i^0} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $w_i = \frac{MF_i^t - MF_i^0}{\ln MF_i^t - \ln MF_i^0}$ 。(7)式中,上标 t 和 0 分别表示在 t 时刻和基准时刻的变量值, w_i 为权重系数。

(三) 数据说明

根据EW-MFA的基本理论,物质足迹核算需将进入经济系统代谢的所有资源都纳入到核算范围。然而,在实际政策应用中,决策者往往会结合数据的可得性和政策的关注重点对资源种类进行取舍。例如德国的政策文件没有将可再生的生物质资源列入EW-MFA核算范围,日本的循环型社会政策文件中对砂石的核算在EW-MFA中进行了区分考虑(朱兵等,2015)。

鉴于此,本文一方面考虑数据的可得性,另一方面基于我国循环经济试点所关注的资源种类^①,对上海市物质足迹的核算主要考虑14类资源,包括:3种能源(煤炭、石油、天然气)、6种金属(铁、铜、铝、铅、锌、镍)、3种非金属(石灰石、磷、硫)、2种生物质(木材、工业用粮)。

本文对上海市14类资源的物质足迹核算的时间范围为2010-2013年。核算过程中二次资源消耗量和折算系数通过各类资源的物质流分析得到,所涉及的相关数据根据各种公开年鉴如《上海市统计年鉴》及行业咨询等渠道获取。在物质足迹的驱动力分析中,人口数据采用常住人口数,GDP数据采用2010年不变价的GDP,相关数据通过《上海市统计年鉴》等获取。

四、结果与讨论

(一) 上海市2010-2013年物质足迹的变化

本文测算得到上海市2010-2013年物质足迹(见表1)。从物质足迹总体的变化来看(见图1a),上海市2010-2013年间基于物质足迹的环境压力由2.795亿吨增长到3.08亿吨,增长了10.2%。从人均物质足迹的变化来看(见图1b),上海市2010-2013年间基于人均物质足迹的环境压力由12.1吨增长到12.8吨,增长了5.8%。

^①相关政策文件见《国家统计局国家发展改革委关于印发资源产出率统计试点调查方案的通知》(国统字[2012]48号)、《关于组织开展循环经济示范城市(县)创建工作的通知》(发改环资[2013]1720号)。

表1 上海市2010–2013年各类资源的物质足迹 (单位:万吨)

资源类型	2010	2011	2012	2013
能源	12628	12706	12810	13195
铁	6924	7152	7516	7744
铜	3882	4581	5506	5377
铝	329	373	425	425
铅	1178	868	329	401
锌	450	564	643	759
镍	563	705	804	949
石灰石	1800	1692	1750	1731
硫	58	69	91	91
磷	21	25	28	25
木材	50	52	55	60
工业用粮	69	54	63	52
各资源物质足迹合计	27952	28841	30020	30809

一般而言,环境压力的增加与经济的增长直接相关。2010–2013年间,上海市GDP由1.72万亿元增长到2.15万亿元(按2010年不变价计算),增长了25%。与物质足迹相比,上海市2010–2013年的GDP增长率高出了约15%。根据以上数据,结合解耦^①的基本理论可知:上海市2010–2013年的经济增长与基于物质足迹的环境压力处于相对解耦的状态。

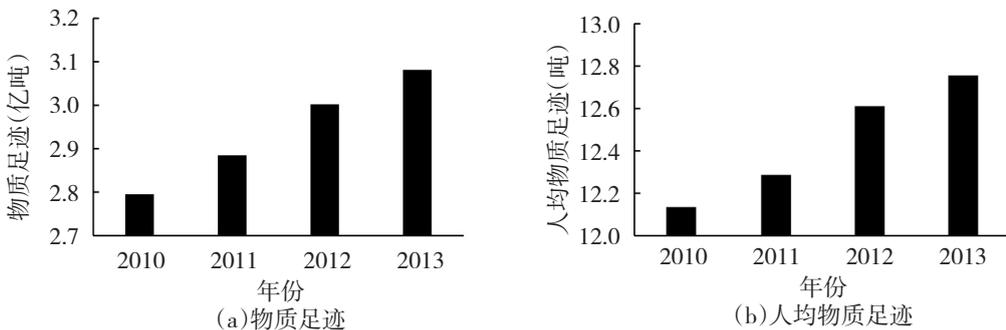


图1 上海市2010–2013年(人均)物质足迹变化趋势

从物质足迹的构成资源来看(如图2所示),2013年上海市物质足迹的基本构成为能源资源占43%,铁资源占25%,铜资源占17%,石灰石资源占6%,其余资源总共占9%。从物质足迹的结构变化来看,在2010–2013年间,上海市物质足迹的结构变化不大,主导资源均为能源、铁、铜和石灰石。由此可知:2010–2013年间,上海市基于物质足迹的环境压力主要来自能源、铁、铜、

^①解耦可用来衡量经济发展与环境压力的分离程度。根据解耦的基本理论(Yu et al., 2017),解耦包括三种类型:绝对解耦,经济增长但环境压力降低;相对解耦,经济的增长速度高于环境压力的增长速度;耦合,经济的增长速度低于环境压力的增长速度。从经济社会发展的可持续目标来看,绝对解耦>相对解耦>耦合。

石灰石资源相关的产业代谢,占90%及以上。

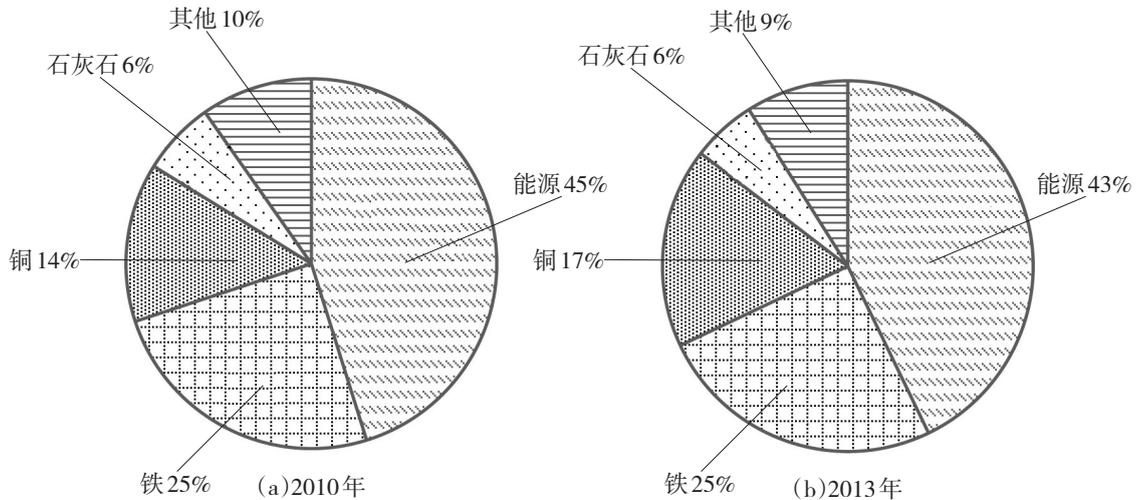


图2 上海市2010-2013年物质足迹的结构及其变化趋势

(二) 上海市与世界的人均物质足迹作对比分析

首先,本文将上海市人均物质足迹与世界各国及其平均水平进行对比。根据Wiedmann等(2015)的测算,2008年世界人均物质足迹为10.5吨(2008年的数据已经是目前文献所获取的最新数据);根据世界银行数据,2008年世界人均GDP为9344美元(当年价)。2010年,上海市人均物质足迹为12.1吨,而人均GDP约11000美元。因此,上海市基于人均物质足迹的环境压力和人均GDP都略高于世界平均水平。与典型的发达国家和发展中国家相比,2010年,上海市人均物质足迹为12.1吨,约为世界平均值的1.2倍,略低于中国平均水平(12.3吨),分别约为加拿大(32.3吨)、日本(28.5吨)、美国(27.2吨)、英国(24.5吨)、德国(21.6吨)的37%、42%、45%、49%和56%。因此,上海市基于人均物质足迹的环境压力尽管略高于世界平均值,但与主要发达国家相比仍然较小。

其次,本文将通过与世界主要经济体国家数据的对比,在较小的样本范围内对比评价上海市人均物质足迹的水平。本文选择2010年世界GDP排名前十的国家与上海市进行物质足迹的对比,这些国家包括:美国、中国、日本、德国、法国、英国、意大利、巴西、印度和加拿大,绘制了世界主要经济体国家的人均物质足迹与人均GDP的分布图,结果如图3所示。上海市人均物质足迹由本文核算得到,为2010年数据;世界主要经济体国家数据来源于文献(Wiedmann et al., 2015),为2008年数据。需要说明的是,由于测算方法和系统边界的差异,城市和国家的物质足迹数据并不完全可比。本文开展对比分析,尽管其定量结果可能不一定完全准确,但主要目的在于帮助读者形成对物质足迹大致范围与分布的定性认识。图中的四大区域分别为:I区为人均GDP低于10国平均值,人均物质足迹高于10国平均值;II区为人均GDP低于10国平均值,人均物质足迹低于10国平均值;III区为人均GDP高于10国平均值,人均物质足迹低于10国平均值;IV区为人均GDP高于10国平均值,人均物质足迹高于10国平均值。由图可知,上海市处于

II区,即与世界主要经济体的10个国家相比,上海市人均物质足迹的环境压力和人均GDP都较小,但二者均高于世界平均水平。这就意味着上海市未来在提升人均GDP的同时,需要努力控制环境压力,使得经济社会的发展更具有可持续性。

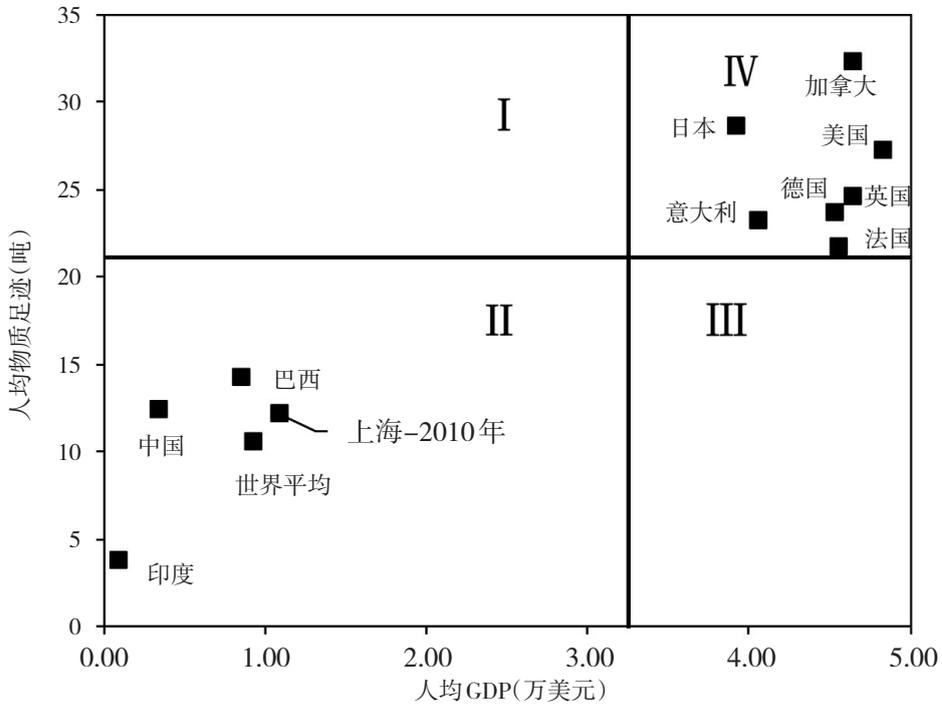


图3 上海市与世界主要经济体国家人均物质足迹及人均GDP对比

(三) 上海市物质足迹变化的驱动力分析

根据改进的IPAT方程,本文计算资源结构 S 、人口 P 、富裕度 A 和技术 T 对2010-2013年上海市物质足迹变化的作用程度和贡献率,结果见表2。由表可知,2010-2013年间,上海市基于物质足迹的环境压力增长了2857万吨。其中,资源结构改变、人口增长、富裕度增长和技术进步(资源强度的降低)分别贡献了0.4%、48.8%、181.7%和-130.9%。

表2 上海市2010-2013年各驱动力对物质足迹变化的贡献

	ΔMF	$\Delta_S MF$	$\Delta_P MF$	$\Delta_A MF$	$\Delta_T MF$
2013年 MF 相比2010年增加值(万吨)	2857	13	1394	5191	-3741
各驱动力的贡献率	---	0.4%	48.8%	181.7%	-130.9%

从时间的维度对物质足迹变化的驱动力进行细分,进一步考察2010-2013年历年物质足迹变化的驱动力(如图4所示),仍然有类似的结果。这就意味着:2010-2013年间,上海市物质足迹增长的主要驱动力为人口增长和富裕度的增加,而技术水平的提升(资源强度降低)则在部分程度上抵消了由于富裕度的增长和人口的增长所造成的物质足迹的增长,资源结构变化对

上海市物质足迹变化的影响非常小。

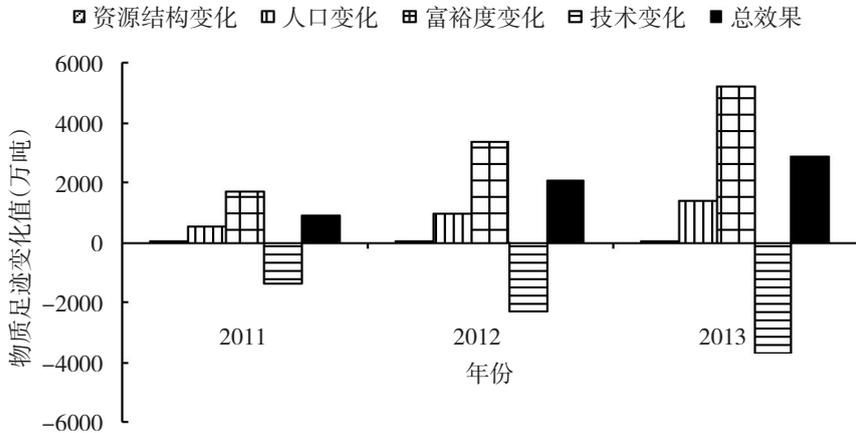


图4 上海市2011-2013年历年物质足迹变化的驱动力(相对于2010年)

表3 上海市2011-2013年资源比例变化导致的物质足迹变化 (单位:万吨)

	2011	2012	2013
能源	-318	-727	-690
铁	8	77	107
铜	568	1293	1049
铝	33	69	59
铅	-342	-897	-848
锌	98	155	252
镍	122	193	314
石灰石	-163	-176	-241
硫	9	28	26
磷	3	5	1
木材	1	2	5
工业用粮	-17	-11	-23
合计	2	11	11

注:表中数值为相对于2010年的变化。

进一步将资源结构变化对上海市物质足迹的贡献落实到各个资源,结果见表3。由表3可知:(1)2010-2013年间,能源、铅和石灰石占总体物质足迹比例的变化对于总体物质足迹的影响具有显著的负效应,2013年分别为-690万吨、-848万吨和-241万吨,这种负效应随时间推移逐渐加强;(2)铜、锌和镍占总体物质足迹比例的变化对于总体物质足迹的影响具有显著的正效应,2013年分别为1049万吨、252万吨和314万吨,且这种正效应随时间推移也逐渐加强;(3)其余资源占总体物质足迹比例的变化对总体物质足迹的影响效果较小。

从分品种资源的角度来看,铅资源对于2010-2013年间上海市物质足迹的变化具有最大的负效应,主要原因是铅酸电池企业的外迁,大大降低了铅资源的物质足迹。铜资源对于

2010-2013年间上海市物质足迹的变化具有最大的正效应,主要原因在于上海市铜材的下游行业产品(主要是汽车和手机)产量的迅速增长导致铜材消耗的迅速增长,从而使得铜资源物质足迹迅猛增长。根据《上海市统计年鉴》数据,2010-2013年间,上海市汽车产量由170万辆增长为227万辆,而手机产量则由129万部增长为4384万部。

综上,尽管资源结构的变化对上海市2010-2013年物质足迹影响的总体效果非常微弱,但单个资源比例的变化对物质足迹的影响却非常大,特别是能源、铜、铅、锌、镍和石灰石资源。由于有的资源(如铜、锌、镍等)对物质足迹变化的影响为正,有的资源(如能源、铅、石灰石等)对物质足迹变化的影响为负,这些正负作用相互抵消,因而整体资源结构的变化对物质足迹影响的总体效果微弱。

五、结论与建议

科学地测度区域环境的压力,并进一步分析环境压力变化的驱动力,对于制定降低区域环境压力的政策具有重要意义。本文以上海市为研究对象,基于EW-MFA和P-LCA测算了上海市2010-2013年的物质足迹,以此来衡量上海市资源代谢全生命周期过程的环境压力,并且基于改进的IPAT方程(引进了资源结构效应)分析环境压力的驱动力,从而为降低城市环境压力的政策研究提供参考。

本文研究结果表明:(1)2010-2013年间,上海市基于物质足迹的环境压力由2.795亿吨增长到3.08亿吨,增长了10.2%;(2)与同时期上海市GDP的增长率相比,物质足迹的增长速度要慢很多,因此,上海市的经济增长与环境压力处于相对解耦状态;(3)上海市2010年人均物质足迹为12.1吨,约为世界平均值的1.2倍,略低于中国平均水平(12.3吨),比发达国家要低很多;(4)2010-2013年间,上海市物质足迹增长的主要驱动力为人口增长和富裕度的增加,而技术水平的提升(资源强度降低)则在部分程度上抵消了由于富裕度的增长和人口的增长所造成的物质足迹的增长;(5)尽管资源结构的变化对上海市2010-2013年物质足迹影响的总体效果非常微弱,但单个资源比例的变化对物质足迹的影响却非常大,特别是能源、铜、铅、锌、镍和石灰石资源。

如前所述,资源结构、人口、富裕度和技术水平是环境压力变化的驱动力。这四者之中,人口和经济的增长会增加区域环境压力,技术水平的提升将减少区域的环境压力,而资源结构的改变也会在一定程度上影响环境压力。上海市未来发展过程中,人口仍然会在一定程度上有所扩张(尽管在政策控制下,人口增长速度会放缓),人均GDP也会持续增长,二者都将导致上海市环境压力的增加。因此,上海市环境压力的降低需要重点关注技术水平的提升和资源结构的调整,而资源结构的调整本质上是产业结构的调整。对于决策者而言,未来环境压力的降

低需同时关注以下两方面:一方面需要在生产领域调整产业结构,加强研发投入,营造技术创新的制度环境,提升技术水平,从而减小环境压力;另一方面,还需要在消费领域制定促进绿色消费的相关政策(如促进城市公共交通发展、扶持共享自行车出行等),从而降低对资源的终端需求量,减小环境压力。

参考文献:

- [1] 国务院. “十三五”生态环境保护规划[EB/OL]. (2016-12-05)[2017-1-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm.
- [2] 洪丽云. 基于 ARMC 的省域层面资源产出率研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- [3] 黄晓芬, 诸大建. 上海市经济-环境系统的物质输入分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3): 96-99.
- [4] 余亚东, 陈定江, 胡山鹰, 朱兵. 经济系统物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7274-7285.
- [5] 朱兵, 杨载涛, 陈定江, 余亚东. 经济系统物质流分析指标的国内外政策应用比较研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, (4): 378-382.
- [6] Ang, B.W. LMDI Decomposition Approach: A Guide for Implementation[J]. Energy Policy, 2015, 86: 233-238.
- [7] Ditttrich, M., S. Bringezu, and H. Schütz. The Physical Dimension of International Trade. Part 2: Indirect Global Resource Flows between 1962 and 2005[J]. Ecological Economics, 2012, 79: 32-43.
- [8] Eurostat. Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide[R]. 2001.
- [9] Fischer-Kowalski, M., F. Krausmann, S. Giljum, S. Lutter, A. Mayer, S. Bringezu, Y. Moriguchi, H. Schutz, H. Schandl, and H. Weisz. Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(6): 855-876.
- [10] Fischer-Kowalski, M. Society's Metabolism, the Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1970[J]. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(1): 61-78.
- [11] Gan, Y., T. Zhang, S. Liang, Z. Zhao, and N. Li. How to Deal with Resource Productivity: Relationships between Socioeconomic Factors and Resource Productivity[J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(1): 1-12.
- [12] Giljum, S., S. Lutter, M. Bruckner, and S. Aparcana. State-of-play of National Consumption-based Indicators [EB/OL]. (2016-12-08)[2013-05-03]. http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/FootRev_Report.pdf.
- [13] Giljum, S., M. Bruckner, and A. Martinez. Material Footprint Assessment in a Global Input-output Framework [J]. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(5): 792-804.
- [14] Hodson, M., S.J. Marvin, B. Robinson, and M. Swilling. Reshaping Urban Infrastructure: Material Flow Analysis and Transitions Analysis in an Urban Context[J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(6): 789-800.
- [15] Hoffren, J., J. Luukkanen, and J. Kaivo-oja. Decomposition Analysis of Finnish Material Flows: 1960-1996[J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 4(4): 105-125.
- [16] Moran, D., D. McBain, K. Kanemoto, M. Lenzen, and A. Geschke. Global Supply Chains of Coltan[J]. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(3): 357-365.
- [17] Muñoz, J.P. and K. Hubacek. Material Implication of Chile's Economic Growth: Combining Material Flow Accounting (MFA) and Structural Decomposition Analysis (SDA)[J]. Ecological Economics, 2008, 65(1): 136-144.
- [18] Niza, S., L. Rosado, and P. Ferrao. Urban Metabolism: Methodological Advances in Urban Material Flow Accounting Based on the Lisbon Case Study[J]. Journal of Industrial Ecology, 2009, 11(3): 384-405.
- [19] OECD. Measuring Material Flows and Resource Productivity[R]. 2008.

- [20] Schaffartzik, A., N. Eisenmenger, F. Krausmann, and H. Weisz. Consumption-based Material Flow Accounting [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(1): 102–112.
- [21] Schandl, H. and J. West. Material Flows and Material Productivity in China, Australia, and Japan [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(3): 352–364.
- [22] Schulz, N. B. The Direct Material Inputs into Singapore's Development [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 117–131.
- [23] Steger, S. and R. Bleischwitz. Drivers for the Use of Materials across Countries [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(8): 816–826.
- [24] Steinberger, J. K. and F. Krausmann. Material and Energy Productivity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4): 1169–1176.
- [25] Wang, H., S. Hashimoto, Y. Moriguchi, Q. Yue, and Z. Lu. Resource Use in Growing China—past Trends, Influence Factors, and Future Demand [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 481–492.
- [26] Weinzettel, J. and J. Kovanda. Assessing Socioeconomic Metabolism through Hybrid Life Cycle Assessment [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(4): 607–621.
- [27] Weinzettel, J. and J. Kovanda. Structural Decomposition Analysis of Raw Material Consumption: The Case of the Czech Republic [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(6): 93–907.
- [28] Wiedmann, T. O., H. Schandl, M. Lenzen, D. Moran, S. Suh, J. West, and K. Kanemoto. The Material Footprint of Nations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6271–6276.
- [29] Wu, R., Y. Geng, and W. Liu. Trends of Natural Resource Footprints in the BRIC Countries [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142(2): 775–782.
- [30] Yu, Y., L. Zhou, W. Zhou, H. Ren, A. Kharrazi, T. Ma, and B. Zhu. Decoupling Environmental Pressure from Economic Growth on City Level: The Case Study of Chongqing in China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 27–35.

The Environmental Pressure and Its Driving Force on City Level: The Perspective of Material Footprint

Yu Yadong^a, Ma Tiejun^a and Zhu Bing^b

(a: School of Business, East China University of Science and Technology;

b: Institute of Circular Economy, Tsinghua University)

Abstract: To reduce environmental pressure (EP) of a region, it is very important to measure the EP scientifically and analyse its driving force. In this research, based on the theory of economy-wide material flow analysis (EW-MFA), we estimated the material footprint (MF) of Shanghai during 2010–2013, and used MF as the measurement of EP for the life cycle of material metabolism. In addition, we explored the driving force for Shanghai's EP by a modified IPAT equation, which includes the effect of material structure as a new factor. Results show the following. Firstly, Shanghai's EP based on MF increased from 297.5 to 308 million tons during the period of 2010–2013, and EP is relative decoupling with the

(下转第 112 页)

nal of European Public Policy, 1997, (4): 556–571.

[41] Woods, N.D. Interstate Competition and Environmental Regulation: A Test of the Race-to-the-bottom Thesis [J]. Social Science Quarterly, 2006, 87(1): 174–189.

[42] Yu, Y., L. Zhang, and F. Li. Strategic Interaction and the Determinants of Public Health Expenditures in China: A Spatial Panel Perspective [J]. The Annals of Regional Science, 2013, 50(1): 203–221.

A Review of Environmental Regulation Competition

Zhang Hua

(School of Business Administration, Nanjing Audit University)

Abstract: Environmental regulation competition, which is characterized by spatial strategic interaction, refers to the interaction and influence of environmental regulation between adjacent jurisdictions, was born in the combination of environmental federalism theory and interjurisdictional competition theory. As the main line of decentralization system leading to competition, this paper includes three aspects of environmental regulation competition, which are the theoretical background, origin and the development. This study starts with the theory of environmental federalism and then combs the theory of interjurisdictional competition and its specific competitive patterns. On this basis, we carefully analyze the "strategic competition" of environmental regulation and summarize the views of representative scholars, especially the issue of "race to the bottom". These efforts are for clarifying the research framework and the recent developing trends of environmental regulation competition.

Keywords: Environmental Regulation Competition; Environmental Federalism; Interjurisdictional Competition

JEL Classification: C23, L60, Q53

(责任编辑:朱静静)

(上接第30页)

economic development. Secondly, the MF per capita in Shanghai for the year 2010 is 12.1 tons, which is about 1.2 times than the world average, a little bit lower than the Chinese average and much lower than the developed countries. Thirdly, the dominant driving force on the increasing of EP in Shanghai during 2010–2013 is the increase of population and affluence (measured by GDP per capita), while the rising of technology (measured by EP per unit GDP) is the major driving force for decreasing Shanghai's EP. Although the overall change of material structure had a very tiny effect on Shanghai's EP, changes in the proportion of some specific material to the total of MF, for example fossil energy, copper, etc., had non-ignorable effect on Shanghai's EP. Based on these observations, we proposed some policy suggestions on reducing Shanghai's EP in the end of this study.

Keywords: Economy-wide Material Flow Analysis; Material Footprint; Environmental Pressure; Shanghai

JEL Classification: Q50, Q56

(责任编辑:朱静静)