

资源型重工业城市的多尺度 温室气体关联研究

——以河北省唐山市为例

韩梦瑶 蒋川 刘思远

摘要 资源型重工业城市面临的温室气体排放问题是多尺度共同作用的结果，亟须充分考虑城市、区域、国家乃至全球尺度的温室气体关联影响。基于多尺度投入产出法，作者从隐含强度、最终需求、贸易平衡等方面对典型资源型重工业城市河北省唐山市的温室气体排放开展多尺度的系统核算分析，结果如下：（1）唐山市平均隐含温室气体排放强度约为 27.6 吨/万元，其中 66.2% 的排放强度由本地投入引发；（2）第二产业是造成唐山市温室气体排放较多的主要原因；（3）最终需求隐含温室气体排放总量为 2.016 亿吨，最终需求类别中固定资本形成占比达到 59.4%；（4）从贸易均衡角度，唐山是隐含温室气体净调出城市，贸易净输出隐含温室气体排放量为 4.116 亿吨。结合多尺度温室气体排放清单刻画唐山市温室气体排放流向，有助于厘清资源型重工业城市转型发展阻力，对相关城市产业结构调整、节能减排政策优化具有重要的借鉴意义。

关键词 资源型重工业城市 温室气体排放 多尺度投入产出

【中图分类号】E790 【文献标识码】A 【文章编号】2095-851X(2020)04-0077-20

【基金项目】国家重点研发计划项目“中国实现 2030 年碳排放峰值目标的优化路径研究”（批准号：2016YFA0602800）；河北省教育厅高等学校科技计划青年基金项目（自然类）“能量回收型海水淡化柱塞泵马达集成系统机液耦合机理研究”（批准号：QN2019001）。

【作者简介】韩梦瑶（1989-），中国科学院地理科学与资源研究所副研究员、硕士生导师，邮政编码：100101；蒋川（1995-），燕山大学机械工程学院硕士研究生，本文通讯作者，邮政编码：066004；刘思远（1981-），燕山大学机械工程学院副教授、硕士生导师。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

一、引言

城市是能源消耗和温室气体排放的主要来源之一，在人类活动引发的温室气体排放总量中占比在80%以上（IPCC，2006）。以重工业发展为主要驱动力，资源型重工业城市在较长时间内对区域和国家经济发展起着重要作用（王树义、郭少青，2012）。相较于一般城市，资源型重工业城市具有高排放、高耗能等特点（斯日吉模楞、毛培，2019）。随着对不可再生资源的依赖及对资源过度开发利用，资源型重工业城市的资源优势逐渐降低，部分城市的发展逐渐陷入了两难的境地（潘孝军，2017）。在资源型重工业城市中，河北省唐山市是中国最具代表性的资源型城市之一，同时也是中国第二大综合性工业基地——京津唐工业基地的核心城市之一，在京津冀地区和国家工业经济建设中占有举足轻重的地位。丰富的铁矿和煤炭资源及相关行业推动着该城市重工业的快速发展，也造成唐山市温室气体排放居高不下，唐山市产业结构的转型与升级已迫在眉睫（龚宇等，2010）。

截至目前，国内外已经出现了大量与城市温室气体排放相关的研究成果，且多数文献从直接温室气体排放清单的角度开展研究（白卫国等，2013；蔡博峰，2012；姜洋等，2013）。Liu等（2011）梳理了上海市二氧化碳排放清单，并提出工业和能源生产是二氧化碳排放的主要贡献者。Kennedy等（2012）基于六个国际城市温室气体排放清单的研究发现，通过改变固定燃烧方式，大多城市的人均温室气体排放量呈现不断减少的趋势。Schulz（2010）核算了新加坡整体温室气体排放清单，并提出直接排放仅占维持经济生产过程投入侧所需上游总排放量的20%左右。

随着各个经济体之间的关联不断增强，投入产出法逐渐被应用于不同国家、地区之间的经济关联及资源环境分析（Leontief，1970）。其中，部分研究将其应用于研究经济系统与温室气体排放之间的关联，分析各尺度经济体的经济活动与温室气体排放（Guan et al.，2008；Liu et al.，2010）。在全球碳排放核算中，Davis和Caldeira（2010）对全球113个国家57个产业部门化石燃料燃烧产生的与生产、消费、贸易活动有关的二氧化碳排放进行了多区域分析。Peters（2011）等通过国际贸易量化排放转移的增长，建立了与贸易相关的113个国家和57个经济部门的全球二氧化碳排放数据库。王文举和向其凤（2011）结合国际双边贸易数据，对全球主要碳排放大国贸易产品中的隐含碳排放进行了核算，并指出通过国际贸易发展中国家为发达国家的消费者排放了数量巨大的二氧化碳。周新（2010）应用多区域投入产出分析，对包括中国在内的十个国家或地区的国际贸易中隐含的碳排放进行了核算，并提出美国为贸易中隐含碳排放的最大净进口国。姚秋蕙等（2018）对“一带一路”沿线地区隐含碳流动进行了多区域投入产出核算，结果显示“一带一路”沿线地区的生产碳强度大都高于消费碳强度，且“一带一路”沿线地区的碳泄漏更

为显著。

具体到不同国家的温室气体分析,投入产出分析也被应用于对某个经济体经济活动的碳排放核算研究中(杜运苏、张为付,2012;闫云凤、赵忠秀,2012)。其中,李艳梅和付加锋(2010)对中国出口贸易中隐含碳排放进行了核算分析,并提出造成出口贸易隐含碳排放增加的主要原因在于出口总量的不断增长以及中间生产技术的变化。余丽丽和彭水军(2017)对中国对外贸易的碳排放转移进行评估,结果表明通过国际贸易,发展中国家为发达国家的消费者排放了数量巨大的二氧化碳。结合IPCC清单及多区域投入产出分析,孙建卫等(2010)对生产我国满足国民经济最终消费的产品(服务)量所需要的直接或间接碳排放量进行了分析,结果表明中国碳排放大部分来自最终使用且为碳排放净输入国。

在城市尺度方面,钟章奇等(2015)以上海市为研究对象进一步探讨了城市地区的贸易隐含碳排放,并深入分析了贸易对城市产业与最终消费部门碳排放及其减排责任的影响。Meng等(2018)采用一个扩展到全球环境的多尺度投入产出模型,以2010年北京为研究对象从生产和消费的角度准确地跟踪多尺度经济系统中的碳流量。Hu等(2016)跟踪了中国8个城市的碳流量,重新定义了碳足迹并从四个角度对其进行测算。另外,为区分不同尺度资源环境的差异,部分研究实现了不同尺度的垂直对接(Chen et al., 2013; Guo and Chen, 2013),并应用于不同尺度的隐含要素流动分析(Han et al., 2018; Li et al., 2018; Shao et al., 2016)。

随着可持续发展理念的不断深入和资源型重工业城市改革发展进程的不断推进,开展资源型重工业城市隐含温室气体排放对多尺度关联影响研究的重要性越发凸显。上述研究针对典型经济体进行了翔实的温室气体排放系统核算研究,并在理论、概念和方法上取得大量成果。尽管相关学者针对部分省份以及直辖市开展了一系列温室气体排放相关的投入产出研究(Guo et al., 2012),但是探讨资源型重工业城市隐含碳排放对本地、区域、国家以及全球四个尺度影响的系统研究相对较少。资源型重工业城市面临的温室气体排放问题是多尺度共同作用的结果,亟须充分考虑城市、区域、国家乃至全球尺度的温室气体关联影响。对比已有成果,本文的创新之处主要在于:(1)研究对象的创新,本文对具有资源型重工业城市这一特征的典型城市进行碳排放关联分析,研究方法及框架对具有同样特征的其他城市产业转型升级具有重要参考价值;(2)研究方法的创新,本文开展城市尺度碳排放分析,采用了多尺度系统投入产出法开展碳排放关联研究,追溯并刻画了全球、国家、区域、城市四个尺度的碳排放流向与流量。

结合多尺度温室气体核算框架,本文以河北省唐山市为例,将城市、区域、国家以及全球四个尺度相结合,构建典型资源型重工业城市的多尺度温室气体碳排放清单,追踪主要温室气体排放流向,刻画唐山市温室气体排放的多尺度平衡体系。通过考虑各经济体之间在不同尺度的贸易交流,本文从隐含排放强度、最终需求、贸易平

衡等方面探讨唐山市温室气体排放与不同尺度温室气体排放的关联,对比不同尺度的温室气体排放强度及平衡关系并提出可行的政策建议,对于促进资源型重工业城市经济转型及低碳发展、实现中国工业低碳化发展的目标具有参考价值和指导意义。

二、方法和数据来源

(一) 直接温室气体核算

全球和国家尺度的温室气体排放采用的是欧盟联合研究中心和荷兰环境评估机构联合建立的全球大气研究排放数据库 (Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)。为了评价各种温室气体对气候变化的影响,已有研究通常采用全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP) 统一度量单位质量下各温室气体引发温室效应的程度。本文引用 IPCC 给出的二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的 100 年全球增温潜势的比值 (1:25:310),将各温室气体的单位统一成二氧化碳当量。具体到区域及本地尺度的直接温室气体排放清单,本文主要参考由国家发改委编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》的核算方法,具体温室气体排放源核算方法及数据来源如表 1 所示。

表 1 温室气体排放清单

单元	排放源	计算方法	区域尺度数据来源	城市尺度数据来源	排放源归属
能源生产和消费活动	化石燃料燃烧活动	$E_{CHC} = \sum \sum (EF_{i,k} \times Activity_{i,k} \times GWP_k)$ 其中, E_{CHC} 为某部门温室气体排放, EF 为燃料燃烧排放因子, $Activity$ 为燃料消费量, GWP 为全球增温潜势, i 为燃料类型, k 为温室气体种类	EF : IPCC (2006); $Activity$: Shan 等 (2018)	EF : IPCC (2006); $Activity$:《唐山统计年鉴 2013》	包含 42 个部门的温室气体
	生物质燃料燃烧活动	$E_{CHC} = \sum \sum (EF_{i,k} \times Activity_{i,k} \times GWP_k)$	EF : 田贺忠等 (2011); $Activity$: 杨静和张培栋 (2012)	数据暂无,但影响较小	归入部门 1
	煤矿和矿后活动甲烷逃逸排放	$E_{CHC} = \sum (EF_i \times Yield_i \times 25)$ 其中, EF 为甲烷逃逸排放因子, $Yield$ 为原煤产量, i 为煤矿类型, 25 为甲烷的增温潜势(下同)	EF :《省级温室气体清单编制指南(试行)》; $Yield$:《中国煤炭工业年鉴 2012》	EF :《省级温室气体清单编制指南(试行)》; $Yield$:《唐山统计年鉴 2013》	归入部门 2
工业生产过程	水泥生产过程	$E_{CHC} = EF \times Yield$ 其中, EF 为水泥生产 CO_2 排放因子, $Yield$ 为水泥产量	Shan 等 (2018)	EF :《省级温室气体清单编制指南(试行)》; $Yield$:《唐山统计年鉴 2013》	归入部门 13

续表

单元	排放源	计算方法	区域尺度数据来源	城市尺度数据来源	排放源归属
农业	稻田甲烷排放	$E_{CHC} = \sum (EF_i \times Area_i \times 25)$ 其中, EF 为稻田甲烷排放因子, $Area$ 为水稻种植面积, i 为水稻种类	EF : 尚杰等 (2015); $Area$: 《中国农业年鉴 2012》	EF : 尚杰等 (2015); $Area$: 《唐山统计年鉴 2013》	归入部门 1
	动物肠道发酵甲烷排放	$E_{CHC} = \sum (EF_i \times Amount_i \times 25)$ 其中, EF 为肠道发酵甲烷排放因子, $Amount$ 为动物年末存栏量, i 为动物种类 (下同)	EF : 尚杰等 (2015); $Amount$: 《中国畜牧业年鉴 2012》	EF : 尚杰等 (2015); $Amount$: 《唐山统计年鉴 2013》	
	动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放	$E_{CHC} = \sum \sum (EF_{i,k} \times Amount_{i,k} \times GWP_k)$ 其中, EF 为粪便管理甲烷排放因子			
废弃物处理	城市固体废弃物填埋处理	$E_{CHC} = [(MSW \times L_0) - R] \times (1 - OX) \times 25$ 其中, MSW 为生活垃圾填埋总量, L_0 为甲烷产生潜力, R 为甲烷回收量, OX 为氧化因子	MSW : 《中国城市建设统计年鉴 2013》; L_0 、 R 、 OX : 《省级温室气体清单编制指南 (试行)》		归入部门 23
	生活污水和工业污水处理产生的甲烷排放量	$E_{CHC} = TOW \times b_0 \times MCF \times 25$ 其中, TOW 为污水中可降解有机物含量, B_0 为甲烷最大产生能力, MCF 为甲烷修正因子	TOW : 《中国环境统计年鉴 2013》; B_0 、 MCF : 《省级温室气体清单编制指南 (试行)》	TOW : 《唐山统计年鉴 2013》; B_0 、 MCF : 《省级温室气体清单编制指南 (试行)》	
	固体废弃物焚烧处理产生的二氧化碳排放量	$E_{CHC} = IW \times CCW \times FCF \times EF \times 44/12$ 其中, IW 为生活垃圾焚烧总量, CCW 为焚烧处理生活垃圾中碳含量比例, FCF 为焚烧处理生活垃圾中矿物碳在碳总量中的比例, EF 为焚烧炉的燃烧效率, $44/12$ 为碳转换成二氧化碳的转换系数	IW : 《中国城市建设统计年鉴 2013》; CCW 、 FCF 、 EF : 《省级温室气体清单编制指南 (试行)》		

(二) 多尺度投入产出分析

在经济投入产出表的基础上, 考虑系统内、外同类产品具有的不同隐含生态要素, 建立隐含温室气体排放的多尺度系统投入产出表的基本结构, 如表 2 所示。表 2 中 z_{ij}^L 表示从系统内部门 i 投入系统内部门 j 的中间投入经济流, z_{ij}^R 表示从区域经济部门 i 到系统内部门 j 的中间投入经济流, z_{ij}^d 表示从国家经济部门 i 到系统内部门 j 的中间投入经济流, z_{ij}^F 表示从全球经济部门 i 到系统内部门 j 的中间投入经济流, d_i^L 、 d_i^R 、

d_i^d 和 d_i^f 分别表示系统内、区域经济、国家经济和全球经济部门 i 提供给系统内最终需求的经济流, ex_i^{LP} 、 ex_i^{LD} 和 ex_i^{LF} 分别表示从系统内部门 i 输出到区域经济、国家经济和全球经济的经济流, y_i 表示系统内部门 i 的总产出经济流, $d_{k,i}$ 表示系统内部门 i 所排放的第 k 种直接温室气体排放量。

图 1 可以进一步刻画城市经济部门 i 的温室气体流投入产出平衡关系。其中, $\varepsilon_{k,j}^L$ 、 $\varepsilon_{k,j}^P$ 、 $\varepsilon_{k,j}^d$ 和 $\varepsilon_{k,j}^f$ 分别表示城市、区域、国家和全球经济部门 j 所产出商品的第 k 种温室气体隐含排放强度; im_j^{PL} 、 im_j^{DL} 和 im_j^{FL} 分别表示从区域经济、国家经济和世界经济部门 j 流入系统内部门 i 的经济流。图 1 中引入的参数 $\varepsilon_{k,j}^L$ 、 $\varepsilon_{k,j}^P$ 、 $\varepsilon_{k,j}^d$ 和 $\varepsilon_{k,j}^f$ 分别表示城市、区域、国家和世界经济部门 j 所产出商品的第 k 种温室气体隐含排放强度; im_j^{PL} 、 im_j^{DL} 和 im_j^{FL} 分别表示从区域经济、国家经济和世界经济部门 j 流入系统内部门 i 的经济流。

表 2 多尺度温室气体排放投入产出结构

		中间使用	最终需求	省内 市外输出	国内 省外输出	出口	总产出
		部门 1, ..., 部门 n	部门 1, ..., 部门 n	部门 1, ..., 部门 n	部门 1, ..., 部门 n	部门 1, ..., 部门 n	
本地投入	部门 1, ..., 部门 n	$z_{i,j}^L$	d_i^L	ex_i^{LP}	ex_i^{LD}	ex_i^{LF}	y_i
省内市外调入	部门 1, ..., 部门 n	$z_{i,j}^P$	d_i^P				
国内省外调入	部门 1, ..., 部门 n	$z_{i,j}^d$	d_i^d				
进口	部门 1, ..., 部门 n	$z_{i,j}^f$	d_i^f				
环境排放	CO ₂	$d_{1,i}$					
	CH ₄	$d_{2,i}$					
	N ₂ O	$d_{3,i}$					

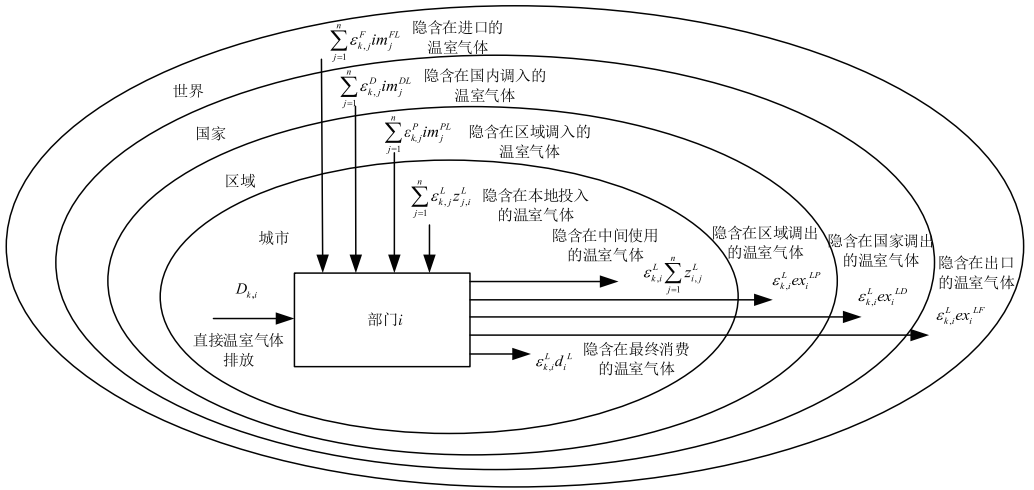
在考虑流入、调入和进口经济流时, 将不对中间投入和最终使用部分做具体划分。由此得到部门 i 的隐含温室气体平衡关系方程为:

$$d_{k,i} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{k,j}^L z_{j,i}^L + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{k,j}^P im_j^{PL} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{k,j}^d im_j^{DL} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{k,j}^f im_j^{FL} = \varepsilon_{k,i}^L (\sum_{j=1}^n z_{j,i}^L + e_i + d_i^L) \quad (1)$$

其中:

$$e_i = ex_i^{LP} + ex_i^{LD} + ex_i^{LF} \quad (2)$$

总经济产出 y_i 在经济流中遵循如下平衡关系:


 图1 部门*i*的隐含温室气体排放的投入产出平衡关系

$$y_i = \sum_{j=1}^n z_{i,j}^L + e_i + d_i^L \quad (3)$$

式(1)可简化得到包含*n*个部门并具有*m*种温室气体排放的平衡方程:

$$D + \epsilon^L Z^L + \epsilon^P im^{PL} + \epsilon^D im^{DL} + \epsilon^F im^{FL} = \epsilon^L Y \quad (4)$$

对式(3)进一步整理,可得:

$$\epsilon^L = (D + \epsilon^P im^{PL} + \epsilon^D im^{DL} + \epsilon^F im^{FL}) (Y - Z^L)^{-1} \quad (5)$$

其中, $D = (d_{k,i})_{m \times n}$, $\epsilon^L = (\epsilon_{k,i}^L)_{m \times n}$, $\epsilon^P = (\epsilon_{k,i}^P)_{m \times n}$, $\epsilon^D = (\epsilon_{k,i}^D)_{m \times n}$, $\epsilon^F = (\epsilon_{k,i}^F)_{m \times n}$, $Z^L = (z_{i,j}^L)_{n \times n}$, $im^{PL} = (im_{i,j}^{PL})_{n \times n}$, $im^{DL} = (im_{i,j}^{DL})_{n \times n}$, $im^{FL} = (im_{i,j}^{FL})_{n \times n}$, $Y = [\text{diag}(y_i)]_{n \times n}$, 并且有 $im_{i,j}^{PL} = im_j^{PL}$, $im_{i,j}^{DL} = im_j^{DL}$, $im_{i,j}^{FL} = im_j^{FL}$ ($i=j$); $im_{i,j}^{PL} = 0$, $im_{i,j}^{DL} = 0$, $im_{i,j}^{FL} = 0$ ($i \neq j$)。

通过式(4),可以计算出每个部门产品的隐含温室气体排放强度,代表生产及消费过程中单位经济产出所对应的全部(含直接及间接)温室气体排放量。在多尺度核算过程中,主要用于构建各部门产品的货币价值和温室气体排放之间的内在关系。

基于多尺度投入产出关系可知,城市隐含温室气体排放强度与本地直接排放、国内省外与省内市外调入隐含排放和进口隐含排放相关联。为分别核算四种因素对本地隐含温室气体排放的影响,本文参考韩梦瑶等(2020)的研究,引入 ϵ^{LL} 、 ϵ^{PL} 、 ϵ^{DL} 、 ϵ^{FL} 表示源自本地直接排放、省内市外调入隐含排放、国内省外调入隐含排放和隐含进口排放的排放强度, E^{LL} 、 E^{PL} 、 E^{DL} 、 E^{FL} 表示源自本地直接排放、省内市外调入隐含排放、国内省外调入隐含排放和隐含进口排放的排放量,具体公式如表3所示。

表3 多尺度投入产出核算框架

尺度	说明	公式
城市	本地直接排放	D
	本地中间使用	$\varepsilon^L Z^L$
	源自本地且用于本地最终需求的隐含排放	$D(Y - Z^L)^{-1} d^L$
区域	省内市外调入	$\varepsilon^P im^{PL}$
	省内市外出	$\varepsilon^L ex^{LP}$
	源自省内市外且用于本地最终需求的隐含排放	$\varepsilon^P im^{PL} (Y - Z^L)^{-1} d^P$
国家	国内省外调入	$\varepsilon^d im^{DL}$
	国内省外出	$\varepsilon^L ex^{LD}$
	源自国内省外且用于本地最终需求的隐含排放	$\varepsilon^d im^{DL} (Y - Z^L)^{-1} d^d$
全球	进口	$\varepsilon^F im^{FL}$
	出口	$\varepsilon^L ex^{LF}$
	源自国外且用于本地最终需求的隐含排放	$\varepsilon^F im^{FL} (Y - Z^L)^{-1} d^F$

(三) 案例介绍及数据来源

唐山市毗邻京津，地处环渤海中心地带，是首都经济区和环渤海经济圈的核心城市之一，享有得天独厚的资源条件、区位和交通优势。2018年唐山港完成货物吞吐量6.4亿吨，吞吐量世界排名第三。根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》，唐山属于重要的资源型城市，蕴藏着丰富的铁矿资源，保有量62亿吨，是中国三大铁矿集中区之一。此外，唐山能源资源丰富，大规模煤炭开采已有100多年历史，煤炭保有量62.5亿吨，是国内焦煤的重要产区。根据《唐山统计年鉴2018》，2017年唐山市地区生产总值6530.1亿元，其中第二产业3640.6亿元，比重为55.75%。与此同时，唐山市同年工业生产共消费了6120.0万吨原煤、3938.0万吨焦炭，分别占了河北省同年消费量的22.3%及49.0%。由于工业生产对化石燃料的依赖性，唐山市的经济发展伴随非常大的温室气体排放压力，因此实现资源型重工业城市可持续发展，是加快转变经济发展方式的必然需求。

本文的多尺度温室气体关联研究涵盖全球、中国、河北、唐山四个尺度。综合考虑不同尺度之间数据相互关联及其可获得性，本文采用2012年作为基准年份开展研究。在全球尺度，本文采用EDGAR中各国温室气体排放数据及Eora数据库中的全球多区域投入产出表。其中，EDGAR温室气体排放数据库覆盖全球不同国家的二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等排放数据，Eora数据库包含全球189个国家26个部门的投入产出数据。为了保证该数据库与Eora数据库对全球尺度核算范围和部门分类的一致性，根据部门分类和IPCC(2006)，本文将EDGAR各国温室气体排放数据对应到Eora投入产出数据库中各经济部门。参考已有研究成果(Chen and Chen, 2011)，根据EDGAR数据库的温室气体排放数据和Eora数据库的世界投入产出表，建立全球189个国家的隐含温室气体排放强度数据库，利用总产值加权平均法获取世界26个

部门的平均隐含温室气体排放强度。为了保证与国内部门分类的一致性,采用加权平均方法对 26 个部门的平均隐含温室气体排放强度进行匹配,进而获得世界 42 个部门的平均隐含温室气体排放强度,部门分类及对应关系见表 4。在国家尺度,结合已获取的温室气体排放数据库及国家统计局编制的《中国 2012 年投入产出表》,可计算获得中国 42 个部门隐含温室气体排放强度。在区域尺度,本文主要参考由国家发展改革委编制的《省级温室气体清单编制指南(试行)》的核算方法。结合河北省投入产出表,引入表 1 核算得到的河北省温室气体直接排放数据,建立多尺度温室气体排放投入产出模型,获得河北省 42 个部门隐含温室气体排放强度。对于唐山市,结合对应年份的唐山市投入产出表,引入表 1 核算得到的唐山市 42 个部门直接温室气体排放,建立城市多尺度投入产出分析模型(Liu et al., 2019),计算获得唐山市 42 个部门隐含温室气体排放强度。

表 4 温室气体排放核算部门分类与对应关系

代码	26 部门分类	代码	42 部门分类
1	农业	1	农林牧渔产品和服务
2	渔业		
3	采掘业	2	煤炭采选产品
		3	石油和天然气开采产品
		4	金属矿采选产品
		5	非金属矿和其他矿采选产品
4	食品和饮料	6	食品和烟草
5	纺织品和服装	7	纺织品
		8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品
6	木制品和纸制品	9	木材加工品和家具
		10	造纸印刷和文教体育用品
7	石油、化工和非金属矿产品	11	石油、炼焦产品和核燃料加工品
		12	化学产品
		13	非金属矿物制品
8	金属产品	14	金属冶炼和压延加工品
		15	金属制品
9	电气和机械	16	通用设备
		17	专用设备
		19	电气机械和器材
		20	通信设备、计算机和其他电子设备
		21	仪器仪表
10	交通运输设备制造业	18	交通运输设备
11	其他制造业	22	其他制造产品
12	回收	23	废品废料

续表

代码	26 部门分类	代码	42 部门分类
13	电力、燃气和水	25	电力、热力的生产和供应
		26	燃气的生产和供应
		27	水的生产和供应
14	建筑	28	建筑
15	维护和维修	24	金属制品、机械和设备修理服务
16	批发业	29	批发和零售
17	零售业		
18	住宿和餐饮	31	住宿和餐饮
19	交通运输	30	交通运输、仓储和邮政
21	金融中介和商业活动	32	信息传输、软件和信息技术服务
		33	金融
		34	房地产
		35	租赁和商务服务
22	公共管理	37	水利、环境与公共设施管理
		42	公共管理、社会保障和社会组织
23	教育、医疗和其他服务	39	教育
		40	卫生和社会工作
24	家政	38	居民服务、修理和其他服务
25	其他	36	科学研究与技术服务
		41	文化、体育和娱乐
26	再出口和再进口		

注：根据国家标准《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)，部门1构成第一产业，部门2~28构成第二产业，部门29~42构成第三产业。

三、结果及分析

(一) 唐山市隐含温室气体排放强度分析

隐含温室气体排放强度是指生产及消费等贸易过程中单位经济产出所对应的全部(含直接及间接)温室气体排放量,反映各部门产品的货币价值和温室气体排放之间的内在关系。图2刻画了唐山市不同部门分类型及分来源的隐含温室气体排放强度结构。总体来看,唐山市的平均隐含温室气体排放强度为27.6吨/万元。其中,部门22(其他制造产品)的隐含温室气体排放强度为308.3吨/万元,由于该部门覆盖生产煤球等煤制品产业,其隐含温室气体排放强度远高于其他部门。此外,部门20(通信设备、计算机和其他电子设备)、部门2(煤炭采选产品)、部门11(石油、炼焦产品和核燃料加工品)、部门25(电力、热力的生产和供应)的隐含温室气体排放强度也比较突

出,分别为123.6吨/万元、89.0吨/万元、72.9吨/万元、61.4吨/万元。从不同类型的温室气体排放在部门中的占比来看,各部门强度组成中除了部门22(其他制造产品)、部门23(废品废料)以外,其余部门二氧化碳排放强度均占80.0%以上。

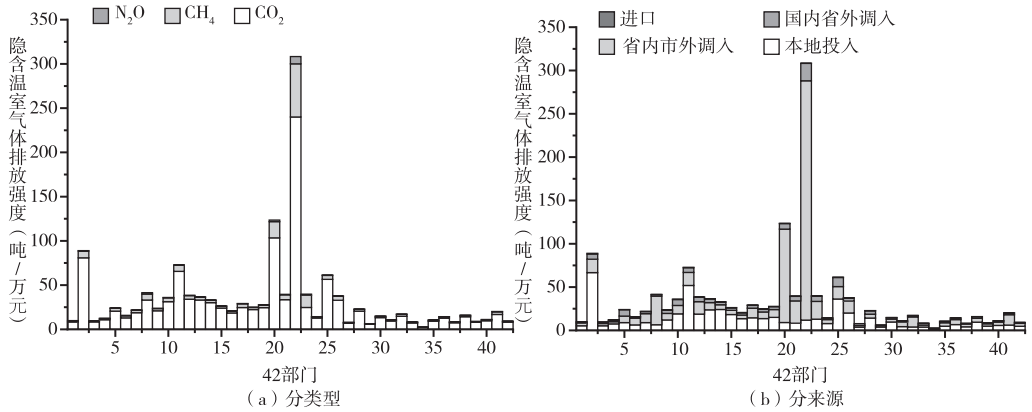


图2 隐含温室气体排放强度

从温室气体来源分类来看,本地投入引发的温室气体排放强度为18.2吨/万元,贡献率为66.2%,最大的三个部门依次是部门2(煤炭采选产品)、部门11(石油、炼焦产品和核燃料加工品)和部门25(电力、热力的生产和供应),占所在部门的比例分别为74.9%、71.2%、59.0%。从省内市外调入来看,其温室气体排放强度为6.0吨/万元,贡献率为21.6%,部门22(其他制造产品)和部门20(通信设备、计算机和其他电子设备)远远超过其他部门,所占本部门的比例分别为89.6%、87.2%,远大于本地投入、国内省外调入以及进口所占比例,表明唐山市的隐含温室气体排放强度受到本地投入、省内市外调入的影响较大。

(二) 唐山市隐含温室气体排放分析

结合唐山市隐含温室气体排放强度及经济投入产出表,可计算出唐山市最终需求的隐含温室气体排放量。其中,唐山市隐含温室气体排放的最终需求分析包括最终消费和资本形成总额两部分,最终消费包含农村居民消费、城镇居民消费、政府消费,资本形成总额包含固定资本形成和存货增加。最终需求隐含温室气体排放的分解结果如图3所示。总体来看,唐山市隐含温室气体排放最终需求总量为2.016亿吨。从隐含排放来源来看,来自本地投入的最终需求隐含排放最多,占比61.7%,来自省内市外调入、国内省外调入、进口分别占比25.8%、11.4%、1.1%。从最终需求类型来看,用于固定资本形成的隐含温室气体排放最多,约为1.197亿吨,占比59.4%,城镇居民消费隐含温室气体排放占比17.3%,是农村居民消费的22.2倍。上述占比差异主要在于唐山市的大多重工企业属于资本密集型产业,重型装备多、投资量大,落后的重工企业淘汰和技术装备更新换代比较困难,在一定程度上拖慢了城市产业转型进程。

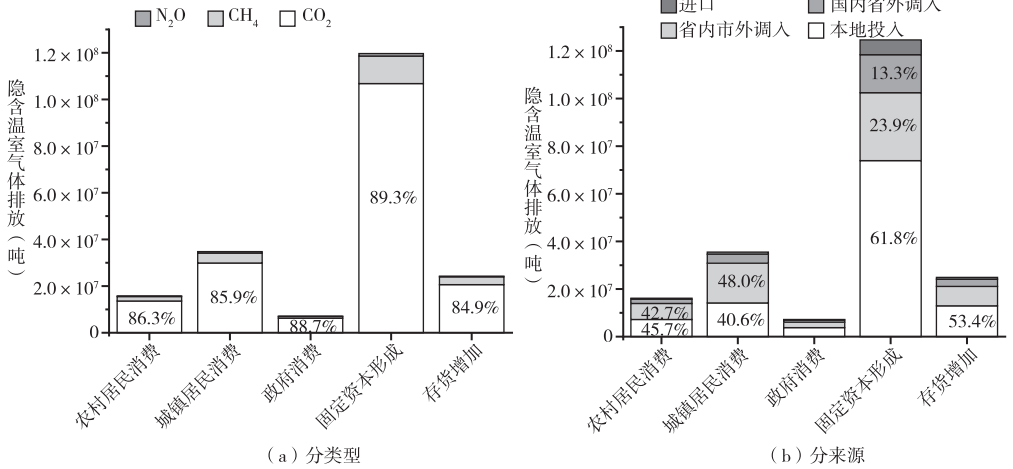


图3 最终需求中的隐含温室气体排放

图4展示了唐山市各部门在生产、交易、使用等各个活动和过程中的隐含温室气体排放情况。唐山作为资源型重工业城市，工业生产需消耗大量以煤炭为主的高碳化石燃料。其中，部门14（金属冶炼和压延加工品）排放量最大，占总排放的34.3%，其他部门均不及10%。具体到不同尺度，唐山市多尺度的隐含温室气体排放分布如图4（b）所示。对于不同尺度的温室气体排放，本地投入占比约为66.2%，来自省内市外调入、国内省外调入、进口分别占比21.6%、10.9%、1.3%。整体来看，唐山总产出隐含温室气体大部分由本地产生，但省内市外调入、国内省外调入对于唐山市的隐含温室气体排放均有一定影响。

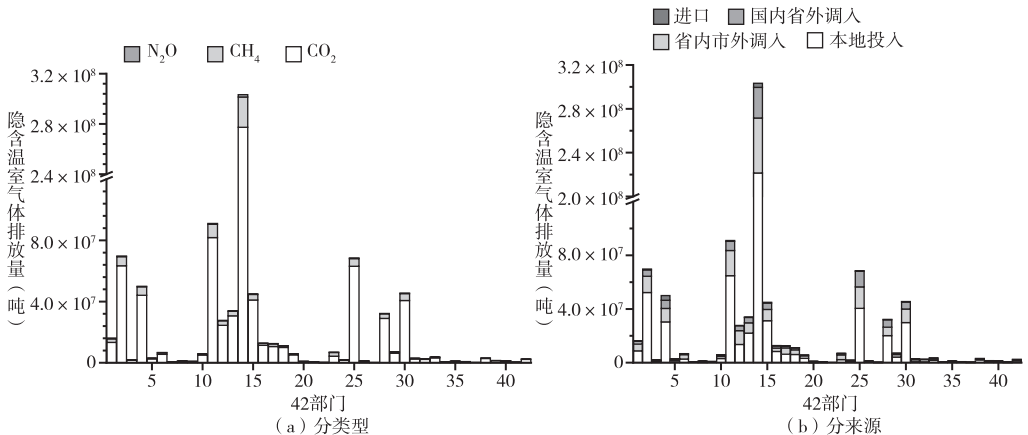


图4 总产出的隐含温室气体排放

(三) 唐山市隐含温室气体贸易分析

图5展示了唐山市隐含在贸易中的温室气体当量，分为市内外贸易、省内外贸易以及国内外贸易。总体来看，唐山市是隐含温室气体排放净流出城市，净流出量为4.116亿吨。从进出口、国内省外和省内外三个层面可以发现，唐山市的调入贸易隐含温室气体总排放2.716亿吨，远不及调出贸易的6.822亿吨。在唐山市的进出口贸易中，进口隐含温室气体排放总量为1170万吨，与冶金行业高度相关的部门2（煤炭采选产品）和部门4（金属矿采选产品）存在进口排放，其中部门4（金属矿采选产品）的进口隐含温室气体排放为950万吨，占比81.1%；出口隐含温室气体排放为3890万吨，绝大多数由第二产业贡献，占出口排放总量的99.8%，特别是部门14（金属冶炼和压延加工品）出口隐含温室气体排放量达到2310万吨，占总出口量的60.0%。

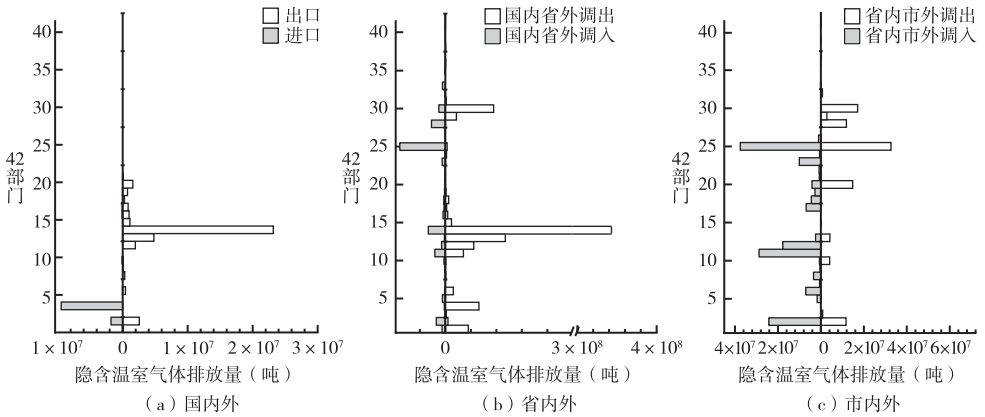


图5 多尺度贸易隐含温室气体排放关联

在唐山市与其他省份的交易中，调入隐含温室气体排放为1.023亿吨，第二产业占据主导，占比89.6%，其中部门25（电力、热力的生产和供应）贡献了3610万吨，占比35.2%，其他两个产业也占据了一定比例；调出隐含温室气体排放为5.417亿吨，第二产业仍然占据绝大多数，占比达到87.9%，其中，部门14（金属冶炼和压延加工品）贡献了3.431亿吨，占比63.3%，第三产业中部门29和部门30也占据了一定份额。

在唐山市与省内其他城市的交易中，调入隐含温室气体排放为1.567亿吨，主要集中在第二产业，占比达到99.8%，其中部门25（电力、热力的生产和供应）、部门11（石油、炼焦产品和核燃料加工品）、部门2（煤炭采选产品）最多，占比分别为24.0%、18.4%、15.5%，第三产业占比只有0.2%。调出隐含温室气体排放为1.017亿吨，第三产业占据了一定的比例，主要集中在部门30（交通运输、仓储和邮政）；第二产业仍然占据较大比重，达到79.3%，其中部门25（电力、热力的生产

和供应)占比最高,达到32.2%,部门20(通信设备、计算机和其他电子设备)达到了14.5%。

(四) 多尺度温室气体排放对比分析

在京津冀协同发展的背景下,唐山市作为资源型重工业城市面临的温室气体排放压力巨大。为了深入剖析唐山市温室气体排放状况,本文引入同年北京市隐含温室气体排放核算研究的数据(Shao et al., 2016),并在表5中结合已有研究结果对唐山、北京、河北、中国、全球的隐含温室气体排放强度进行了纵向分析。对比发现,唐山市平均温室气体排放强度达到27.6吨/万元,远超全球、中国、河北等尺度经济体的排放强度。其中,第二产业的平均排放强度为32.8吨/万元,是造成唐山市自身温室气体排放强度较高的主要原因。综合考虑排放强度及贸易均衡,唐山市在隐含温室气体排放强度较高的情况下,仍然具有较大规模的重工业制成品供应到其他地区,对于自身的温室气体排放造成了更大的压力。

表5 不同经济体三次产业平均隐含温室气体排放强度

单位:吨/万元

经济体	第一产业	第二产业	第三产业	总体
全球	3.2	2.0	0.7	1.4
中国	3.2	5.1	1.9	4.1
河北	4.5	9.6	4.0	8.1
北京	1.5	2.6	0.9	1.7
唐山	9.7	32.8	4.7	27.6

结合已有研究进展,本文进一步横向对比了唐山市与其他城市隐含温室气体排放强度(Chen et al., 2020; Shao et al., 2016)。总体来看,唐山市等资源型重工业城市主要依靠省内市外调入和本地投入,以重工业制成品为供应导向,是温室气体净调出城市。相对而言,北京等以消费为主的城市温室气体排放强度远低于唐山市,并且各部门强度相对于唐山市较为平衡,较少出现产业结构严重失衡的情况。此外,以消费为主的城市经济体的隐含温室气体排放大部分来自调入,主要依靠外界资源和产品输入,尤其电力、热力的生产和供应的隐含排放流入较多。与此同时,大多城市第二产业隐含温室气体排放强度贡献率比唐山市小很多,同时第三产业排放强度比唐山大。通过技术迭代更新减小第二产业排放强度,大力发展以技术密集为主要特点的第三产业是未来城市发展的主要方向之一。

四、讨论与政策建议

唐山市是建设首都经济圈一体化和打造环渤海经济圈的重要组成部分,对推进国

家发展战略具有重要作用，也是落实温室气体减排目标的重要节点。近年来，作为资源型重工业城市的唐山市第二产业持续增长，第二产业增加值十年内从 2009 年的 2202.1 亿元增长至 2018 年的 3319.8 亿元。此外，唐山市平均隐含温室气体排放强度 27.6 吨/万元，远远超过北京、河北等其他尺度经济体的排放强度；第二产业温室气体排放强度普遍较高，平均强度达 32.8 吨/万元；最终需求隐含温室气体排放高达 2.016 亿吨，固定资本隐含温室气体排放在本地区最终需求中占 59.4%；贸易净隐含温室气体达到 4.116 亿吨。在工业产值显著提升的同时，排放问题也越发严峻，工业生产与温室气体高排放之间的矛盾日益激化。

依据隐含温室气体排放的投入产出平衡关系，本文进一步刻画了唐山市温室气体排放与全球、国家、区域及本地四个尺度的平衡体系（见图 6）。在唐山市经济发展过程中，本地直接温室气体排放量为 6.123 亿吨，来自全球、国家、区域的产品或服务中隐含温室气体调入量分别为 1170 万吨、1.023 亿吨、1.567 亿吨。结合投入产出平衡关系，生产的重工业制成品被用于固定资本形成、居民消费等最终需求及调出、出口。在全球尺度，唐山市对全球其他国家的隐含温室气体净出口量为 2720 万吨，在国家尺度，唐山市对全国其他省市的隐含温室气体净流出量为 4.394 亿吨，均承担了来自其他尺度经济体的温室气体排放压力。在区域尺度，唐山市对河北省其他城市的隐含温室气体净流入量为 5500 万吨，也反映了河北省作为重工业大省，其多数城市面临较大的温室气体排放问题。对比来看，唐山市在对国内提供重工业制成品的同时，在本地也形成了较大的隐含温室气体排放压力，进一步体现出唐山市产业结构升级的必要性与紧迫性，唐山仍需有针对性地调整能源结构、产业结构、减排政策进行系统调节。

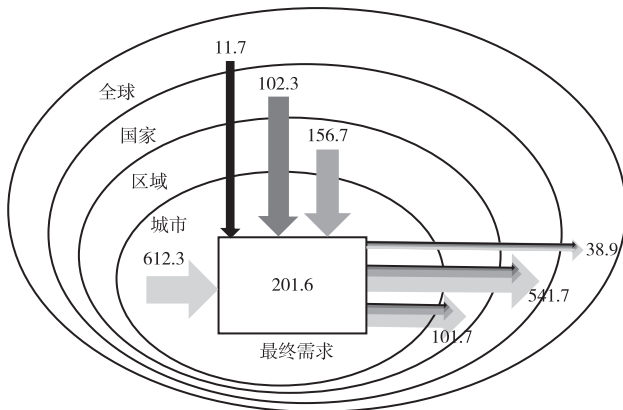


图 6 唐山市温室气体排放的多尺度平衡体系

注：单位为百万吨。

通过系统梳理多尺度温室气体排放情况，综合考虑温室气体排放结构、行业分布及驱动来源，以下几个方面的政策建议可供参考。

第一,从隐含温室气体排放强度分析可以看出,唐山市绝大部分温室气体排放由第二产业生产活动的燃料燃烧引发,第三产业的排放强度较小,其所包含的交通运输、仓储和邮政业,批发和零售业,住宿和餐饮业,金融业等其他服务行业大多属于技术密集型低碳行业,政府应积极调整产业结构,将改造传统产业与扶持新兴产业相结合,平衡第二产业和第三产业的发展。在第二产业内部,以电炉炼钢取代传统炼钢等措施同样有助于减少由生产活动燃料燃烧引发的温室气体排放。与此同时,唐山市重工业以焦炭等化石燃料为主导,其能源利用结构亟待优化。唐山市南临渤海,可考虑建设潮汐电站、海上风力发电站,增加利用风能、潮汐能等清洁能源发电的比重,促进能源多样化发展。

第二,在唐山市最终需求隐含温室气体排放分析中,唐山市固定资本形成中隐含温室气体排放占比最大,大部分来源于以资本密集为特点的重工业。该类产业技术重型装备多且投资量大,存在资金周转慢、投资见效缓、回本周期长等问题。唐山市为典型的资源型重工业城市,落后重工业企业淘汰和技术装备更新换代比较困难,拖慢了城市产业转型升级的进程,消耗了大量发展资金,短期经济收益及回报率较低又进一步降低了城市发展转型潜力,不利于唐山产业多元化及区域可持续发展。对此,政府仍需鼓励重工业企业淘汰耗能较大的陈旧设备,在淘汰落后产能方面给予政策支持。

第三,唐山市作为中国重要的重工业基地与河北省第一大港,与贸易相关的隐含温室气体排放仍然存在严重缺陷。目前,唐山市主要以重工业制成品供给为导向,是温室气体净调出城市。其中,进口隐含温室气体排放量集中在以部门2和部门4为主的一次能源部门,出口隐含温室气体排放量主要集中于隐含温室气体排放强度及排放较高的第二产业。唐山与其他省份之间的贸易所造成的隐含温室气体净贸易量约为4.394亿吨,其中部门14(金属冶炼和压延加工品)占比最大,进一步加剧了自身的温室气体排放压力。政府通过调整资源型重工业城市在城际、省际、国内和全球经济活动中的发展政策,逐步降低对外输出中重工业制品的比例,将输出导向向第三产业转移,引导资源型重工业城市逐步实现产业转型,有助于解决隐含温室气体排放量部门集中的问题,从多尺度角度减缓温室气体排放压力。

第四,考虑到重工业在唐山市产业结构中的占比,透明化隐含在重工业产品中的温室气体并使之得到监控,加强资源型重工业城市的智能化能源消费体系和碳排放管理制度建设,通过多方配合引进金属冶炼和压延加工业、煤炭采选业等产业的节能减排技术和回收利用技术,加大力度推动能源结构、产业结构多元化发展,出台政策鼓励并引进国内外企业入驻投资办厂,建立以高新技术产业和服务业为主导的多元产业体系来促进城市转型,有助于缓解唐山市的温室气体排放居高不下的状况。

五、结论

本文采用了多尺度投入产出法对唐山市温室气体排放进行了系统核算,从隐含排

放强度、最终需求、贸易平衡等方面开展了量化分析。通过构建唐山市工业经济发展与温室气体排放的多尺度平衡关系，探讨了唐山市当前存在的环境问题及与各尺度的关联，可以得到以下结论：（1）唐山市温室气体排放大多由第二产业生产活动的燃料燃烧引发，其中金属冶炼和压延品加工业占据最大比重；（2）唐山市最终需求中固定资本形成的隐含温室气体排放占比最大，且来自本地投入的隐含温室气体排放占比较大；（3）从贸易均衡角度来看，唐山是隐含温室气体净调出城市，贸易净输出隐含温室气体排放量为4.116亿吨；（4）唐山市隐含温室气体排放流出主要集中于隐含强度较高的第二产业，承担了其他经济体温室气体排放压力，同时也体现出唐山市产业结构转型升级的必要性与紧迫性。

总体来看，资源型重工业城市在为国家经济发展提供增长动力的同时，也对当地造成了较大的温室气体排放压力，但资源型重工业城市面临的温室气体排放问题是多尺度共同作用的结果，亟须充分考虑本地、区域、国家乃至全球尺度的温室气体关联的影响。本文以典型资源型重工业城市河北省唐山市为例，结合多尺度温室气体核算框架开展当地、省域、国家以及世界多尺度分析，在数据及方法等方面仍有待进一步完善。具体来看，在城市温室气体清单编制的统计数据方面，部分活动水平指标尚未纳入统计体系；由于地区性实测排放因子获取工作的难度较大，本文在计算过程中主要引用中国各省份排放因子推荐值、IPCC排放因子数据库以及国内外学者的研究成果；多尺度温室气体排放清单构建过程中不同统计部门及统计方法可能存在一定差异，不同尺度数据对接过程中原始数据的获取及对接仍存在较大难度等。尽管在数据及方法上仍存在一定的不确定性，本文从多尺度梳理温室气体排放清单，力求构建典型资源型重工业城市的多尺度温室气体碳排放清单，刻画主要资源型重工业城市的温室气体排放流向，厘清资源型重工业城市转型发展阻力，对相关城市产业结构调整、节能减排政策优化、区域可持续发展仍具有重要的借鉴意义。

参考文献

白卫国、庄贵阳、朱守先（2013）：《中国城市温室气体清单核算研究——以广元市为例》，《城市问题》第8期，第13~18页。

蔡博峰（2012）：《中国城市温室气体清单研究》，《中国人口·资源与环境》第1期，第21~27页。

杜运苏、张为付（2012）：《中国出口贸易隐含碳排放增长及其驱动因素研究》，《国际贸易问题》第3期，第99~109页。

龚宇、余淼、王璞（2010）：《典型重工业城市热岛效应特征分析——以唐山市为例》，《资源科学》第6期，第1120~1126页。

韩梦瑶、姚秋蕙、劳浚铭等（2020）：《中国省域碳排放的国内外转移研究：基于嵌套网络视角》，《中国科学：地球科学》第6期，第748~760页。

姜洋、何永、毛其智等（2013）：《基于空间规划视角的城市温室气体清单研究》，《城市规划》

第4期,第50~56页。

李艳梅、付加锋(2010):《中国出口贸易中隐含碳排放增长的结构分解分析》,《中国人口·资源与环境》第8期,第53~57页。

潘孝军(2017):《对资源型城市产业转型升级的思考——以曲靖市为例》,《中国发展》第1期,第50~53页。

斯日吉模楞、毛培(2019):《资源型地区自然资源对经济增长影响的实证分析——基于2000—2016年中国重点煤炭城市样本》,《自然资源学报》第12期,第2491~2503页。

孙建卫、陈志刚、赵荣钦(2010):《基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究》,《中国人口·资源与环境》第5期,第28~34页。

尚杰、杨果、于法稳(2015):《中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究》,《中国生态农业学报》第3期,第354~364页。

田贺忠、赵丹、王艳(2011):《中国生物质燃烧大气污染物排放清单》,《环境科学学报》第2期,第349~357页。

王树义、郭少青(2012):《资源枯竭型城市可持续发展对策研究》,《中国软科学》第1期,第1~13页。

王文举、向其凤(2011):《国际贸易中的隐含碳排放核算及责任分配》,《中国工业经济》第10期,第56~64页。

姚秋蕙、韩梦瑶、刘卫东(2018):《“一带一路”沿线地区隐含碳流动研究》,《地理学报》第11期,第2210~2222页。

闫云凤、赵忠秀(2012):《中国对外贸易隐含碳的测度研究——基于碳排放责任界定的视角》,《国际贸易问题》第1期,第133~144页。

余丽丽、彭水军(2017):《贸易自由化对中国碳排放影响的评估和预测——基于GTAP-MRIO模型和GTAP-E模型的实证研究》,《国际贸易问题》第8期,第123~132页。

杨静、张培栋(2012):《中国农村生物能源利用的CO₂排放量估算与空间分析》,《可再生能源》第10期,第67~72页。

钟章奇、孙翊、刘晓等(2015):《城市贸易隐含碳排放的计算——以上海市为例》,《热带地理》第6期,第785~796页。

周新(2010):《国际贸易中的隐含碳排放核算及贸易调整后的国家温室气体排放》,《管理评论》第6期,第19~26页。

Chen, G. Q. and Z. M. Chen (2011), “Greenhouse Gas Emissions and Natural Resources Use by the World Economy: Ecological Input Output Modeling”, *Ecological Modelling*, 222 (14), pp. 2362–2376.

Chen, G. Q., S. Guo and L. Shao, et al. (2013), “Three-scale Input-output Modeling for Urban Economy: Carbon Emission by Beijing 2007”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18 (9), pp. 2493–2506.

Chen, S. Q., B. Chen and K. S. Feng, et al. (2020), “Physical and Virtual Carbon Metabolism of Global Cities”, *Nature Communications*, 11 (1): 182.

Davis, S. J. and K. Caldeira (2010), “Consumption-based Accounting of CO₂ Emissions”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (12), pp. 5687–5692.

Guo, S., L. Shao and H. Chen, et al. (2012), “Inventory and Input-output Analysis of CO₂

Emissions by Fossil Fuel Consumption in Beijing 2007”, *Ecological Informatics*, 12, pp. 93 – 100.

Guo, S. and G. Q. Chen (2013), “Multi-scale Input-output Analysis for Multiple Responsibility Entities: Carbon Emission by Urban Economy in Beijing 2007”, *Journal of Environmental Accounting and Management*, 1 (1), pp. 43 – 54.

Guan, D. B., K. Hubacek and C. L. Weber, et al. (2008), “The Drivers of Chinese CO₂ Emissions from 1980 to 2030”, *Global Environmental Change*, 18 (4), pp. 626 – 634.

Han, M. Y., B. Zhang and Y. Q. Zhang, et al. (2018), “Agricultural CH₄ and N₂O Emissions of Major Economies: Consumption-vs. Production-based Perspectives”, *Journal of Cleaner Production*, 210, pp. 276 – 286.

Hu, Y., J. Lin and S. Cui, et al. (2016), “Measuring Urban Carbon Footprint from Carbon Flows in the Global Supply Chain”, *Environmental Science & Technology*, 50 (12), pp. 6154 – 6163.

IPCC (2006), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

Kennedy, C., S. Demoullin, and E. Mohareb (2012), “Cities Reducing Their Greenhouse Gas Emissions”, *Energy Policy*, 49, pp. 774 – 777.

Leontief, W. (1970), “Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-output Approach”, *The Review of Economics and Statistics*, 52, pp. 262 – 271.

Li, Y. L., B. Chen and M. Y. Han, et al. (2018), “Tracking Carbon Transfers Embodied in Chinese Municipalities Domestic and Foreign Trade”, *Journal of Cleaner Production*, 192, pp. 950 – 960.

Liu, S. Y., J. J. Zhang and M. Y. Han, et al. (2019), “Multi-scale Water Use Balance for a Typical Coastal City in China”, *Journal of Cleaner Production*, 236: 117505.

Liu, X. B., M. Ishikawa and C. Wang, et al. (2010), “Analyses of CO₂ Emissions Embodied in Japan-China Trade”, *Energy Policy*, 38, pp. 1510 – 1518.

Liu, Z., Y. Geng and B. Xue (2011), “Inventorying Energy-related CO₂ for City: Shanghai Study”, *Energy Procedia*, 5, pp. 2303 – 2307.

Meng, F. X., G. Y. Liu and Y. C. Hu, et al. (2018), “Urban Carbon Flow and Structure Analysis in a Multi-scales Economy”, *Energy Policy*, 121, pp. 553 – 564.

Peters, G. P., J. C. Minx and W. O. Edenhofer (2011), “Growth in Emission Transfers Via International Trade from 1990 to 2008”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108 (21), pp. 8903 – 8908.

Schulz, N. B. (2010), “Delving into the Carbon Footprints of Singapore—Comparing Direct and Indirect Greenhouse Gas Emissions of a Small and Open Economic System”, *Energy Policy*, 38, pp. 4848 – 4855.

Shan, Y. L., D. B. Guan and H. R. Zheng (2018), “China CO₂ Emission Accounts 1997 – 2015”, *Scientific Data*, 5: 170201.

Shao, L., D. B. Guan and N. Zhang, et al. (2016), “Carbon Emissions from Fossil Fuel Consumption of Beijing in 2012”, *Environmental Research Letters*, 11: 114028.

Multi-scale Greenhouse Gas Emission Relations in Resource-based Heavy Industrial City: Based on Tangshan City, Hebei Province

HAN Meng-yao¹, JIANG Chuan², LIU Si-yuan²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The greenhouse gas (GHG) emission pressure resource-based heavy industrial cities faced was mainly induced by multi-scale interactions, which requires systematical assessments from local, regional, national and global scales. Taking Tangshan City, a typical resource-based heavy industrial city in Hebei Province as the research area, the authors carried out the multi-scale analysis on the GHG emissions in terms of embodied intensity, final demand and trade balance. The main results are as follows: (1) The average embodied intensity of GHG emissions in Tangshan was 27.6 t/10 000 CNY, of which 66.2% was caused by local sources; (2) The secondary industry was the main source for the relatively high greenhouse gas emissions in Tangshan; (3) The greenhouse gas emissions embodied in final demand was 201.6 Mt, within which the proportion of fixed capital formation reached 59.4%; (4) As for the trade balance, Tangshan was a net exporter of embodied GHG emissions, with the total net outflows of 411.6 Mt. Depicting the GHG emission flows and sorting out the multiple GHG emission inventory would be helpful to identify the transformation pressure of resource-based heavy industry cities, which would be practical for the practical adjustments in industrial structures and policy optimization of energy saving and emission reduction.

Key Words: resource-based heavy industrial city; embodied greenhouse gas emissions; multi-scale input-output analysis

责任编辑: 庄立