中国省域碳排放的国内外转移研究: 基于嵌套网络视角

韩梦瑶^{1,2,3†}, 姚秋蕙^{1,2,3†}, 劳浚铭⁴, 唐志鹏^{1,2,3}, 刘卫东^{1,2,3*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: liuwd@igsrr.ac.cn

† 共同第一作者

收稿日期: 2019-04-23; 收修改稿日期: 2020-01-13; 接受日期: 2020-03-17; 网络版发表日期: 2020-04-15

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA0602804)、国家自然科学基金项目(批准号: 41701135、41871118、41601172)和中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA20010102、XDA23100402)资助

摘要 伴随中国在碳减排领域承担的越发重要的责任, 从多区域、多尺度视角评估省域碳排放转移模式对于中国碳排放研究至关重要. 基于不同尺度区域关联, 本文识别了中国31个省级行政区对内、对外的碳排放流动情况, 分析了中国各省区市与184个国家/地区的碳排放流动关联. 总体来看, 中国各省区市的碳排放转移可以分为不同模式, 其中内陆省份主要由国内碳排放流动主导, 从国内省份接收碳排放的省份主要集中在西部地区, 国内碳排放净流出的省份主要集中在东北部和中部, 沿海地区在国内外碳排放均衡方面起着重要作用. 从区域关联视角来看, 识别中国各省区市碳排放转移模式有助于开展区域协同及环境联控研究. 基于嵌套网络分析, 中国各省区市的多尺度多区域碳排放评估将现有研究扩展到了国家以及全球尺度, 有助于为中国各区域协同可持续发展研究奠定基础.

关键词 隐含碳排放, 多区域多尺度, 嵌套网络, 投入产出

1 引言

随着中国逐渐成为全球碳减排领域的主要国家之一, 相关研究开始关注中国在全球供应链中的位置及其对减缓气候变化的影响(Wang和Wang, 2017). 作为碳排放量最大的国家, 中国的碳排放上升趋势在2010

年后有所放缓, 但依然占据全球28%左右的比重(IEA, 2017). 为了抑制整体碳排放水平, 中国承诺将其碳强度(单位GDP二氧化碳排放量)较2005年的基准降低60~65%, 并在2030年前达到碳排放峰值(国家发展和改革委员会, 2015).

尽管中国的碳排放总量已经引起了高度重视, 但

中文引用格式: 韩梦瑶, 姚秋蕙, 劳浚铭, 唐志鹏, 刘卫东. 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, 50: 748–760, doi: [10.1360/N072019-0096](https://doi.org/10.1360/N072019-0096)

英文引用格式: Han M, Yao Q, Lao J, Tang Z, Liu W. 2020. China's intra- and inter-national carbon emission transfers by province: A nested network perspective. Science China Earth Sciences, 63: 852–864, <http://doi.org/10.1007/s11430-019-9598-3>

由于其地理范围广阔, 不同区域的碳排放仍然存在着巨大的差异. 具体而言, 中国不同区域的经济、贸易模式及产业结构对其碳排放的影响各有不同(Guan等, 2008; Mi等, 2017a; Pan等, 2018). 考虑到大多碳排放均由最终需求引发(Caro等, 2014; Lenzen等, 2007), 隐含碳这一概念通常用于描述生产过程中为满足最终需求而产生的直接及间接碳排放(Chen等, 2018; Peters和Hertwich, 2008). 与此同时, 不同国家之间以及中国各省区市之间的碳排放流动, 特别是伴随国内及国际贸易的碳排放流动也逐渐受到关注(Han等, 2018; Li等, 2018), 也有研究指出基于消费的碳排放放在发达国家与发展中国家以及中国各省份之间同样呈现空间分布不均的现状(Feng等, 2013; Liu等, 2015, 2016).

一般来说, 投入产出分析可以对隐含碳排放流向特别是全球范围的碳排放关联进行测算, 这不仅涉及直接碳排放, 还涉及与跨境贸易相关的间接碳排放(Lenzen等, 2013). 由此, 基于隐含资源利用和环境排放的研究得到了广泛发展, 其中涉及能源消耗(Chen等, 2017; Li等, 2019; Liang等, 2007)、环境排放(Davis和Caldeira, 2010; Liang等, 2015; Liu和Wang, 2017; Oita等, 2016)、水资源利用(Fang和Chen, 2015; Guo和Shen, 2015; Han等, 2015)、土地利用(Chen和Han, 2015a, 2015b; Weinzettel等, 2013; Yu等, 2013)及生物多样性(Lenzen等, 2012b)等. 截至目前, 对于中国碳排放评估的前期研究主要集中在国家(Feng等, 2013; Mi等, 2017b; Yan和Yang, 2010)以及省级层面(Guo等, 2012; Liu等, 2012). 随着2007年以来一系列中国多区域投入产出表的公布, 关注中国省区市之间的多区域碳排放转移的研究也逐步增多(刘卫东等, 2018). 其中, 已有研究围绕主要经济区对中国的区域间的资源及环境问题进行了充分讨论(Feng等, 2014; Wang和Chen, 2016; Zhou等, 2018), 也有学者在全国范围内对地理来源以及贸易结构中隐含资源和排放结构进行了解析(Bruckner等, 2012; Su和Ang, 2016; Zhang等, 2013).

通过刻画不同地区和部门之间的相互关联, 投入产出分析(IOA)逐渐被用于分析伴随供应链的资源环境影响(Chen和Chen, 2011; Galli等, 2012; Meng等, 2018). 基于多区域投入产出方法, 已有研究在全球以及国家范围内开展了多区域投入产出分析(Multi-Re-

gional IOA), 用于分析经济发展及其对应的资源利用和环 境排放问题(Peters和Hertwich, 2008; Peters等, 2011a). 然而, 对于美国、中国等地理范围广阔的国家, 从细化区域着手开展经济发展水平及资源环境影响的分类分析具有重要意义. 从另一个视角来看, 刻画多层次经济体系间的关联并开展全球、国家、省域等多层级的碳排放影响分析同样具有重要意义. 为了应对复杂关联中的多层次结构, 多尺度投入产出分析(Multi-Scale IOA)逐渐成为刻画不同尺度之间的经济关联及其环境影响的重要方法(Chen等, 2013; Han等, 2015; Liu等, 2017). 综合考虑不同尺度下经济发展及资源环境的相互作用, 多尺度投入产出分析可以有效避免相关经济体之间在不同尺度数据下的测算偏差, 但是同一层级中各个区域之间的相互关联可能会受到一定程度的限制.

基于上述考虑, 结合多尺度、多区域的碳排放研究引发了越来越多的关注. 通过将不同尺度下多区域间的经济活动和最终需求相关联, 嵌套投入产出分析(Nested IOA)可以用于开展复杂体系中不同尺度下的多区域碳排放流动分析, 有助于进一步区分来自不同国家以及不同省份的资源环境流动影响(Han等, 2019; Li等, 2018; Liu等, 2019). 尽管针对碳排放流动已经开展了大量研究, 中国各省区市与其他国家/地区之间的国内和国际隐含碳排放流动效应仍有待深入探索. 由于中国内部各省区市间的碳排放流动及与其他国家/地区之间的联系不断加深, 一方面需要关注各区域内的碳排放关联, 同时还需要分析中国各省区市与其他国家/地区之间的跨境联系(Gao等, 2012, 2017). 与此同时, 随着对不同区域发展及资源环境问题的日益关注, 中国各省区市的碳排放关联及转移模式的细化分析同样具有重要意义(Su等, 2010; Steen-Olsen等, 2014; Zhou等, 2015). 整体来看, 中国各省份的碳排放目标在12~20.5%范围浮动, 各省区市的国内外碳排放转移模式也存在着巨大的差异. 通过开展不同尺度的多区域嵌套关联研究, 可以重新刻画中国各省区市在全球供应链中的地位, 尤其是在经济全球化下探讨不同省区市的碳排放转移模式.

由此, 本研究从多区域、多尺度视角出发, 致力于开展中国省际及跨境隐含碳排放转移分析, 以各省区市为研究对象刻画中国碳排放的嵌套网络流动模式, 将现有研究扩展到国家及全球范围并对内部及外部碳

排放转移开展对比分析, 为深入探讨不同区域的协同发展及环境效应打下坚实基础。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

基于系统分析理论, 本文采用如下方法及数据开展碳排放转移的嵌套网络分析。在本研究中, 涵盖184个经济体和中国31个地区(22个省、5个自治区和4个直辖市)的嵌套投入产出分析(Nested IOA)可以用来追踪国内外贸易中所隐含的碳排放。其中, 构建多区域、多尺度分析模型将中国最新公布的多区域投入产出表嵌套在多尺度框架内开展细化研究。

基于物质守恒定律, 区域 F 部门 i 在全球尺度的碳排放关联可以表示为

$$u_i^F + \sum_{S=1}^L \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^S z_{ji}^{SF} = \varepsilon_i^F x_i^F, \quad (1)$$

其中, u_i^F 代表区域 F 部门 i 的直接排放量, ε_j^S 代表区域 S 部门 j 在全球尺度的隐含碳强度, z_{ji}^{SF} 代表区域 S 部门 j 到区域 F 部门 i 的中间投入, x_i^F 代表区域 F 部门 i 的总产值:

$$x_i^F = \sum_{S=1}^L \sum_{j=1}^n z_{ij}^{FS} + \sum_{S=1}^L f_i^{FS}, \quad (2)$$

其中, f_i^{FS} 代表区域 F 部门 i 满足区域 S 部门 i 的最终需求的产出。

在国家尺度, 区域 L 部门 i 的经济关联及环境排放的均衡可以表示为

$$u_i^L + \sum_{F=1}^L \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^F z_{ji}^{FL} + \sum_{D=1}^m \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^D z_{ji}^{DL} = \varepsilon_i^L x_i^L, \quad (3)$$

其中, u_i^L 代表区域 L 部门 i 的直接排放量, ε_j^D 代表区域 D 部门 j 的隐含碳强度, z_{ji}^{DL} 代表区域 D 部门 j 到区域 L 部门 i 的中间投入, x_i^L 代表区域 L 部门 i 的总产值:

$$x_i^L = \sum_{F=1}^L \sum_{j=1}^n z_{ij}^{LF} + \sum_{F=1}^L f_i^{LF} + \sum_{D=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij}^{LD} + \sum_{D=1}^m f_i^{LD}, \quad (4)$$

其中, f_i^{LF} 代表区域 L 部门 i 在全球尺度满足区域 F 部门 i 的最终需求的产出, f_i^{LD} 代表区域 L 部门 i 在国家尺度满足区域 D 部门 i 的最终需求的产出。

由此, 基于消费的区域碳排放量可以表示为 $\varepsilon_i^L f_i^L + \sum_{D=1}^m \varepsilon_i^D f_i^{DL} + \sum_{F=1}^L \varepsilon_i^F f_i^{FL}$, 进而区域经济的国内和国外环境排放的流动可以追溯到直接排放、国内流入及国外流入。其中, u_i^L 、 $\sum_{D=1}^m \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^D z_{ji}^{DL} + \sum_{D=1}^m \varepsilon_i^D f_i^{DL}$ 和 $\sum_{F=1}^L \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^F z_{ji}^{FL} + \sum_{F=1}^L \varepsilon_i^F f_i^{FL}$ 分别代表直接排放、国内流入及国外流入, 而 $\varepsilon_i^L f_i^L$ 、 $\sum_{D=1}^m \varepsilon_i^D \left(\sum_{j=1}^n z_{ij}^{LD} + f_i^{LD} \right)$ 和 $\sum_{F=1}^L \varepsilon_i^L \left(\sum_{j=1}^n z_{ij}^{LF} + f_i^{LF} \right)$ 分别代表最终需求、国内流出和国外流出。区域经济中碳排放流动的具体公式见表1。

2.2 数据来源

为测算各省区市的隐含碳排放流动, 从嵌套网络视角开展的碳排放分析需要全球、国家和区域等不同尺度的数据库支持。为了与系统边界相对应, 我们通过各省区市的海关数据将中国多区域投入产出数据和Eora投入产出数据相关联。一般而言, 投入产出表的选择、部门整合及可获得的最新数据均会对结果的稳定性产生影响。全球投入产出数据库中, Eora数据库涵盖了最多的国家和最长的时间跨度, 包括189个经济体和26个部门(Lenzen等, 2012a, 2013)。基于Eora数据库, 可以测算得到2012年全球碳排放强度清单, 并将各部门与中国各省区市的42个部门相对应。为了描述国内各省区市之间的关系, 本研究采用的是2012年中国多区域投入产出表(刘卫东等, 2018)。该系列的中国多区域投入产出表由国家统计局利用中国各省区市42个部门的贸易流量进行校准, 自2007年以来一直是中国使用最广泛的中国多区域投入产出表之一。除上述数据外, 进出口数据主要来源于《中国海关统计年鉴》(中华人民共和国海关总署, 2013)和全国海关信息中心(<http://www.haiguan.info>, 2012), 可以用于从隐含视角构建各区域的碳排放关联。图1进一步展示了中国分省份的GDP和人口分布情况。中国分省份区域分类列于网络版附表1(<http://earthcn.scichina.com>)。总体来看, 东部和南部沿海地区的GDP较高, 西北和西南地区的省份相对欠发达。其中, 广东的GDP为国内最高, 而西

表 1 多尺度多区域经济系统中的碳排放流动公式

编号	说明	公式
1	本地总体排放	
	本地直接排放	u_i^L
	本地内部流转	$\sum_{j=1}^n e_j^L z_{ji}^L$
2	来源于其他省/区/市的流入量	
	来源于其他省/区/市中间生产的流入量	$\sum_{D=1}^m \sum_{j=1}^n e_j^D z_{ji}^{DL}$
	来源于其他省/区/市最终需求的流入量	$\sum_{D=1}^m e_i^D f_i^{DL}$
3	进入其他省/区/市的流出量	
	用于其他省/区/市中间生产的流出量	$\sum_{D=1}^m \sum_{j=1}^n e_i^L z_{ij}^{LD}$
	用于其他省/区/市最终需求的流出量	$\sum_{D=1}^m e_i^L f_i^{LD}$
4	来源于其他国家/地区的流入量	
	来源于其他国家/地区中间生产的流入量	$\sum_{F=1}^l \sum_{j=1}^n e_j^F z_{ji}^{FL}$
	来源于其他国家/地区最终需求的流入量	$\sum_{F=1}^l e_i^F f_i^{FL}$
5	进入其他国家/地区的流出量	
	用于其他国家/地区中间生产的流入量	$\sum_{F=1}^l \sum_{j=1}^n e_i^L z_{ij}^{LF}$
	用于其他国家/地区最终需求的流出量	$\sum_{F=1}^l e_i^L f_i^{LF}$
6	本地最终需求	$e_i^L f_i^L$

藏的GDP相对较低. 从人口分布来看, 东部地区的人口相对集中, 几乎是中部地区人口的两倍. 其中, 广东省人口最多, 而西北地区人口相对较少. 对应国别分类列于附表2.

3 结果分析

3.1 中国各省区市的国内外碳排放流动

通过嵌套不同尺度的区域关联, 中国各省区市在全球供应及环境排放中的地位呈现了不同的模式. 中国各省份的国内碳排放流动总量为1298.4Mt, 几乎是国外碳排放流量的两倍. 就国外碳流入和流出而言,

中国承担国外消费的碳排放量为517.5Mt, 远大于其他国家承担中国消费的碳排放总量. 其中, 图2和图3刻画了中国主要省区市的国内和国际隐含碳排放流向, 对应数据列于附表3. 总体来看, 相对较大的国内碳排放流动主要与中国北部和东部的河北、山东、江苏、山西和河南等省份密切相关. 与相对多元化的国内碳排放流动结构相比, 国外碳排放流入主要集中在美国和日本等几个国家地区. 此外, 在沿海地区, 碳排放主要从广东、上海、浙江、江苏和山东等国内省份流出到国外其他地区.

对于国内碳排放流动, 江苏、山东、内蒙古、河北和辽宁的碳排放流出量相对较大, 流向国内其他省份的碳排放超过70.0Mt. 另外, 河南、山西、广东、

图1 中国各省份的GDP和人口分布

图2 中国各省份国内外的碳排放流动

(a) 国内流动; (b) 国外流动. 单位: t

内蒙古和云南是主要的碳排放流入地区, 其中多数地区的国内碳排放流入超过60.0Mt. 整体来看, 碳排放流动量相对较大(大于10.0Mt)的区域关联主要包括从江苏到广东(11.9Mt)、山东(11.4Mt)、河南(11.1Mt), 从山东到山西(12.5Mt)、江苏(10.9Mt)、广东

(10.5Mt)、河南(10.5Mt)以及从内蒙古到山东(11.8Mt). 与之相对应, 广东、浙江、江苏、山东和上海是中国国内最大的跨境碳排放流出地. 而美国和日本是主要碳排放流入地, 占中国跨境碳排放流出总量的39%以上. 此外, 德国、韩国、英国和澳大利亚也是主要的

图 3 主要省区市的国内及国外碳排放流动(单位: t)

国外碳排放流入地. 在中国各省份中, 广东、上海、江苏、山东和辽宁具有较大的国外碳排放流入量, 但碳排放流入的来源地各有不同. 其中, 韩国主要是广东、江苏和辽宁的碳排放来源地, 而上海的碳排放来源地主要是日本、德国及美国.

3.2 中国各省区市的碳排放转移模式

通过对比国内和国际的碳排放流动情况, 可以进一步识别中国各省区市的碳排放转移模式. 总体而言, 几乎所有省份都存在流向其他国家的碳排放, 但是各

省区市的碳排放流动的均衡程度有所不同。尽管存在一些例外, 但大多数沿海地区在国内外碳排放均衡方面起着重要作用。具体来看, 中国各省区市基于国内外碳排放流动可以分为四类: (1) 河北、山东和江苏等省份的国内外碳排放转移不均衡程度较高, 通常其国内净流出量是国外净流出量的1.5倍以上; 具体来看, 江苏的国内外净流出量分别为125.0和55.1Mt, 山东分别为75.5和47.9Mt, 河北分别为42.5和26.5Mt。 (2) 广东、浙江、上海和福建等省份通常向其他国家/地区出口大量的碳排放, 同时也有来自其他国内省份的碳排放流入; 但是, 国外净流出量和国内净流入量的差额存在明显的差异: 浙江的净流量分别为73.4和5.8Mt, 广东分别为69.3和27.7Mt。 (3) 山西、黑龙江、北京和一些西部地区是国内碳排放转移的净流入地, 并且在国内外碳排放转移方面相对均衡: 山西、河南、云南和新疆分别从国内地区流入了63.1、46.2、41.9和35.2Mt的隐含碳排放量。 (4) 辽宁、吉林、内蒙古、安徽、重庆、湖北、湖南和天津是碳排放净流出省份, 但其国外净流出量相对较小; 其中, 辽宁、吉林、内蒙古、安徽和湖南的国内净流出量相对较大, 而重庆、湖北和天津的国内外流量相对平衡。

图4展示了基于国内外碳排放转移模式划分的省份分布情况, 对应数据列于附表4。其中, 沿海地区是主

要的对外关联地区, 可以进一步将其分为两种类型的区域: 北部地区产生碳排放供其他国内省份的消费(模式1), 而南部地区通常将碳排放转移到国内其他省份(模式2)。大部分内陆省份的国外碳排放转移相对平衡, 但根据国内净流量也可分为两类: 从国内省份接收碳排放的省份主要集中在中国西部(模式3), 而国内净流出省份主要集中在中国的东北部和中部(模式4)。考虑到中国的区域发展战略, 不同区域在碳排放协同治理中承担着不同的作用。以中国的三大经济带为例, 浙江、广东和上海属于模式2, 江苏和河北属于模式1, 北京为模式3, 天津为模式4。与珠三角和京津冀地区相比, 长三角的碳排放流动关联更加密切。对于长三角地区, 江苏和浙江分别承担了上海6.5和2.2Mt的碳排放量, 而二者之间的碳排放流动为2.6Mt。此外, 长三角与国外地区的碳排放流动关系密切, 向美国、日韩和欧洲国家流出的碳排放量分别为52.1、45.6和39.3Mt, 从日韩、欧洲国家和东南亚流入的碳排放量分别为11.4、9.6和8.3Mt。京津冀区域内部的碳排放流相对较小, 在对外转移方面分别向美国、日韩和欧洲国家出口了15.5、9.8和9.3Mt碳排放量, 而从欧洲国家、美国和东南亚分别进口了4.8、1.6和1.6Mt碳排放量。具体到珠江三角洲地区, 从广东到香港的碳排放流向(26.4Mt)最为显著。

图4 中国各省区市国内外的碳排放转移模式(单位: Mt)

3.3 区域专业化的碳排放转移

整体来看, 几乎所有省份的碳排放中, 发达国家/地区均占国外碳排放流出量的1/5以上. 其中, 美国、日本和一些欧洲国家是碳排放流出的主要国家. 中国各省区市对外碳排放转移分布及数据分别列于图5及附表5. 对于模式1中具有较大碳排放压力的省份, 美国的碳排放进口量相对高于其他国家, 紧随其后的是部分欧洲国家以及日本和韩国. 总体而言, 上述地区占总体碳排放流出量的17%以上. 除去跨境碳排放流出外, 大量的碳排放流动也与邻近的省区市相关. 对于承担其他国家的碳排放同时又向国内其他省份转移的类型, 相关省份在连接模式1省份和其他国家地区的排放效应转移中起到枢纽作用. 模式1中的省份承担了来自其他国家1/3以上的碳排放需求, 而美国、日韩以及欧洲国家在其跨境碳排放流出中约占2/3. 模式3中的省份主要接受模式1和模式4省份的大量碳排放流入, 而模式4中的省份主要承担模式3中的东部沿海省份以及山西和河南的碳排放.

具体来看, 最大的跨境碳排放流向主要从浙江、广东和山东流向美国, 分别为26.9、23.4和20.0Mt, 紧随其后的是从江苏和上海向日本的流出, 分别为13.6和11.2Mt. 浙江、广东和江苏是中东欧、蒙古和俄罗

斯、南亚以及西亚中东等地区的主要碳排放承担地区, 而广东、湖南和山东则是东南亚的主要碳排放承担地区. 与国外流出相反, 每个省份的国外流入的最大来源地各不相同, 例如从韩国流入辽宁(3.0Mt)、日本流入四川(2.9Mt)、泰国流入山西(2.8Mt)等. 此外, 东南亚同样承担了山西、上海和四川等省份的部分碳排放. 其他相对较大的流向包括从蒙古和俄罗斯到黑龙江、山东、内蒙古的碳排放流动, 以及从南亚和中亚到上海的碳排放流动. 与其他地区相比, 在上述四种模式中, 美国、部分欧洲国家、日本、韩国、东南亚、西亚中东以及北美洲是碳排放流动的最主要区域, 约占碳排放流出总量的80%. 对于模式1和模式2中的省份, 美国、欧洲国家以及日本和韩国是碳排放流出的主要目的地, 占国外碳排放流出的60%以上, 而位于模式3和模式4的省份相对应的主要碳排放流出地存在明显差异.

4 讨论和政策分析

整体来看, 细化的区域分类可以更准确地刻画中国内部及外部的碳排放流动情况, 进而系统描绘各省区市的碳排放及碳流动模式. 一般来看, 分区域碳排

图 5 中国各区域跨境碳排放流动分布

放分析不仅需要考虑区域边界内的碳排放(即基于生产的碳排放), 同时需要考虑在内外贸易活动中所隐含的碳排放。结合国内和国际碳排放流动情况, 本研究将中国31个省区市划分为4种模式: 东部沿海地区是承担国外碳排放消费的主要区域, 其中北部区域的碳排放净流出至国内其他省份(模式1), 而南部区域则接收来自国内其他省份的碳排放净流入(模式2), 内陆省份主要参与国内的碳排放跨区域转移(模式3和模式4)。

就国内碳排放流动而言, 江苏、山东、内蒙古、河北和辽宁是主要的碳排放流出地区, 而河南、山西、广东、内蒙古和云南是国内主要的碳排放流入地区; 就国外碳排放流而言, 广东、浙江、江苏、山东和上海是主要的国外碳排放流出地区, 美国和日本为其主要目的地, 而广东、上海、江苏、山东和辽宁是主要的碳排放流入地区, 韩国和美国为其主要来源。其中, 模式1和模式2中的省份向国外的碳排放流动集中于几个主要目的地, 美国、欧洲国家以及日本、韩国占其国外流出量的60%以上。对于模式3和模式4省份, 一些省份将较多的碳排放出口到东南亚、西亚中东以及北美地区, 具体地区与地理距离有一定关联。

基于上述考虑, 识别各省区市在国内外碳排放转移关联中的地位, 尤其是在国内外关联中所扮演的角色至关重要。一般来看, 属于不同模式的省份在碳减排方面作出的努力应与全球供应链中的地位相对应。例如, 位于模式1的省份在国内外贸易中存在大量碳净流出, 承担有较高的来自于其他地区消费的碳排放压力。因此, 该类型省市区迫切需要提高能源利用效率、引入可再生能源技术并升级产业结构。模式2中的省份主要起到关联国内地区与其他国家的作用, 在平衡碳排放方面承担着重要责任, 其中广东、上海等中国重要的商业中心可以进一步调整进出口结构、加快技术创新、建立技术转移机制并加强国际合作以减缓气候变化。对于模式3中的省份, 与相对发达的地区加强合作、进一步强化先进技术转移、鼓励低碳产业并改善消费结构具有重要意义。模式4的省份主要服务于国内其他地区的消费, 由于其对制造业的依赖性较高, 可以逐渐转型传统的高碳产业并加强与国内贸易伙伴的合作。针对不同省份的特征, 不同区域的相关建议列于表2。

目前, 中国已经采取了多种政策措施用于减少碳排放总量。2016年国务院发布的“十三五”控制温室气体

体排放工作方案将总体减排目标设定为到2020年将碳强度在2015年基础上降低18%(http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm)。具体到中国各省区市的碳减排目标如表3所示。总体来看, 主要的降低碳排放方式包括推动清洁能源改革、建立低碳产业体系、推动低碳城市化、完善国家碳交易市场、加强低碳技术创新以及开展广泛的国际合作等。为了提高首都功能、确保服务业的领先地位, 在京津冀地区的区域协调发展战略下, 北京的重工业逐渐转移到周边地区。对于煤炭大省, 山西和内蒙古在淘汰小型燃煤电厂、推广可再生能源发电、提高传统高污染产业的准入门槛等方面作出了积极的努力。作为工业化程度较高的省份, 山东和河北相继发布了省级低碳发展工作方案, 通过加大天然气和可再生能源在电力结构中的比重、增加森林和海洋碳汇、加快智能数据在监测和控制碳排放中的应用、建立绿色供应和交通系统等措施实现省级碳减排目标。在碳排放交易市场的试点省份中, 广东和湖北建立了省级碳排放交易机制以促进重点行业 and 企业的碳减排。

总体而言, 上述目标主要考虑了各省区市的发展阶段、资源禀赋、战略定位和生态环境保护, 然而从多区域及多尺度视角开展的对策研究可以进一步为区域协同碳减排提供新的视角。考虑到各区域异质性, 由于碳排放通过全球供应链在不同区域之间进行转移, 不同模式下的省区市在国内和国际碳排放转移中扮演着不同的角色。某种程度上, 碳排放问题与经济发展及贸易活动密切相关。考虑到不同的经济发展水平, 识别协调国内和国际碳排放流动的关键节点, 有助于明确碳减排责任、促进技术转移、实现区域协同发展。对于中国三大经济带, 从区域协调发展的角度开展系统分析也具有重要意义。特别是对于一些沿海地区, 连接国内外经济的系统性碳排放评估对于实现区域可持续发展必不可少。

迄今为止, 现有研究已经讨论了全球供应链及国际贸易中的碳减排潜力(Davis等, 2011; Peters等, 2011b)。此外, 学者结合不同的碳排放核算体系, 将碳排放从生产到消费进行了重新分配(Lenzen等, 2007; Steininger等, 2014)。部分研究对中国2030年碳达峰情景开展了细化分析(Liu等, 2015; Shan等, 2019), 也有研究从部门及空间的角度对贸易中隐含的碳排放进行了探讨(Su和Ang, 2010; Su等, 2010; Steen-Olsen等,

表 2 中国各区域分类、关联、特征及建议

模式	国内区域	主要国外关联	特征	建议
1	江苏 (JS), 山东(SD), 河北 (HE)	美国, 日本, 韩国, 德国, 英国, 法国, 澳大利亚, 加拿大, 新加坡, 印度	国内流出, 国外流出	提高能源效率, 使用可再生能源, 升级产业结构
2	浙江 (ZJ), 广东(GD), 上海 (SH), 福建 (FJ)	美国, 日本, 德国, 英国, 韩国, 澳大利亚, 加拿大, 印度, 沙特阿拉伯, 西班牙	国内流入, 国外流出	促进低碳及可再生能源创新, 建立碳交易市场体系, 改善消费结构
3	山西(SX), 云南(YN), 新疆 (XJ), 黑龙江 (HL), 四川 (SC), 广西 (GX), 贵州 (GZ), 北京 (BJ), 陕西 (SX), 江西(JX), 青海 (QH), 甘肃 (GS), 宁夏 (NX), 西藏 (XZ), 海南 (HI), 河南 (HN)	美国, 法国, 泰国, 日本, 韩国, 加拿大, 英国, 澳大利亚, 德国, 俄罗斯	国内流入, 国外均衡	推广先进技术, 鼓励低碳产业发展, 改善消费结构, 促进国际合作
4	辽宁 (LN), 吉林 (JL), 内蒙古 (IM), 安徽 (AH), 湖南 (HN), 重庆(CQ), 湖北 (HB), 天津 (TJ)	美国, 日本, 德国, 英国, 意大利, 韩国, 法国, 澳大利亚, 加拿大, 荷兰	国内流出, 国外均衡	升级传统高排放产业, 促进国际合作

表 3 中国各省区市的碳减排目标^{a)}

序号	比例	地区
1	20.5%	北京, 天津, 河北, 上海, 江苏, 山东, 广东
2	19.5%	福建, 江西, 河南, 湖北, 重庆, 四川
3	18%	山西, 辽宁, 吉林, 安徽, 湖南, 贵州, 云南, 陕西
4	17%	内蒙古, 黑龙江, 广西, 甘肃, 宁夏
5	12%	海南, 西藏, 青海, 新疆

a) 中国2020年各省区市碳强度在2015年水平上的碳减排目标

2014). 为了缓解中国的总体碳排放, 先进技术改进、基础能源系统脱碳和减少贸易量等方面均开展了研究(Liu等, 2016). 在中国区域协同发展方面, 京津冀、长三角、珠三角地区逐渐成为中国的研究热点, 从具体部门分类角度开展的相关研究也逐渐引起关注(Fang等, 2019; Zhou等, 2018). 总体来看, 本研究结果有助于探讨国内各省区市对应其他地区的碳排放关联结构的差异, 系统阐述隐含碳排放转移的相互关系和流动模式. 值得注意的是, 投入产出表的选择、部门汇总及可用的最新数据等会对结果的稳定性产生一定影响. 在多区域投入产出表构建方面, 相关组织和学者贡献了重要力量(Andrew和Peters, 2013; Dietzenbacher等, 2013; Inomata和Owen, 2014; Lenzen等, 2013), 其中包括GTAP(Global Trade Analysis Program, 全球贸易分析计划)、Eora MRIO(Eora多区域投入产出表)和WIOD(世界投入产出数据库)等. 为了确认Eora数据的可靠性, Lenzen等(2012a)构建了标准偏差表, 且不同学者对数据库的不确定性进行了深入的讨论(Wiedmann等,

2011; Wilting, 2012). 在上述基础上, 本研究基于涵盖最多的国家和最长的时间跨度的Eora数据库及经国家统计局校准的中国多区域投入产出表(刘卫东等, 2018)开展了嵌套网络关联分析, 进一步识别了国内外碳排放转移模式.

目前, 本研究主要侧重于分析中国在省级层面的多区域、多尺度的主要碳排放流动, 在结构模式预测及高碳产业探讨方面仍有不足. 国内外碳排放关联的复杂结构外, 区域产业部门的空间相关分析和基于情景预测的结构模式的变化趋势有望成为未来的研究方向. 通常, 由于各个国家的边界限制以及将各省区市整合到全球供应链中具有较大的难度, 大多数研究倾向于将世界上的国家地区作为经济关联网络中的一个节点. 但是考虑到地理范围的广阔性, 中国大部分省区市的经济发展水平各不相同, 存在着较大的经济发展差距. 结合日益紧密的碳排放转移关联, 参考从生产到消费的碳排放责任分析进一步提出碳减排动态关联, 有助于为中国区域可持续发展研究奠定基础.

5 结论

基于嵌套网络的碳排放流动分析, 本研究识别了中国各省域碳排放的国内外转移状况, 并比较了因省域而异的碳排放国内外转移模式。本研究的研究结果聚焦于中国省域并将现有研究进一步扩展到了多尺度、多区域的视角, 为深入探讨中国区域可持续发展奠定了坚实的基础。根据隐含碳排放流动, 中国的31个省区市可分为4种模式。根据国内省份的碳排放流动, 可以将与国外关系密切的东部沿海地区分为两种类型的区域: 北部地区承担其他国内省份的碳排放(模式1), 而南部地区通常从国内省份接收碳排放(模式2)。此外, 大多数内陆省份在外国碳排放转移方面相对平衡, 但其国内流动各不相同: 从国内省份承接碳排放的省份主要集中在中国的西部(模式3), 而国内净流出的省份主要集中在中国的东北部和中部(模式4)。此外, 与珠三角和京津冀相比, 长三角内部的碳排放流关联更加密切。国内主要的碳排放流与江苏、浙江、山东、河北、河南和广东关联较强, 而国外的碳排放主要由东部沿海地区流出, 特别是承接来自美国、日本和一些欧洲国家的碳排放。通过嵌套不同尺度中的区域关联开展对31个省区市与184个国家/地区的系统分析, 可以深入探讨中国各省区市在伴随供应链的隐含碳排放转移关联中的地位, 识别中国国内外碳排放流动的相互关联, 为中国总体碳排放研究奠定坚实基础。尽管投入产出表的选择、部门汇总及可用的最新数据等可能会对结果的稳定性产生一定影响, 但是基于全球供应链多区域、多尺度碳排放流动在确定各省区市地位及碳减排责任等方面起着至关重要的作用, 有助于从嵌套关联的视角识别碳排放转移网络中的关键节点, 在经济全球化日益加剧的情况下开展中国不同区域的碳排放转移研究。

参考文献

- 国家发展和改革委员会, 2015. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献. http://www.gov.cn/xinwen/2015-06/30/content_2887330.htm
- 刘卫东, 唐志鹏, 韩梦瑶, 李方一, 刘红光. 2018. 2012年中国31个省市区投入产出表. 北京: 中国统计出版社
- 中华人民共和国海关总署. 2013. 中国海关统计年鉴2012. 北京: 中国统计出版社
- Andrew R M, Peters G P. 2013. A multi-region input-output table based

- on the global trade analysis project database (GTAP-MRIO). *Economic Syst Res*, 25: 99–121
- Bruckner M, Giljum S, Lutz C, Wiebe K S. 2012. Materials embodied in international trade—Global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Glob Environ Change*, 22: 568–576
- Caro D, Bastianoni S, Borghesi S, Pulselli F M. 2014. On the feasibility of a consumer-based allocation method in national GHG inventories. *Ecol Indicators*, 36: 640–643
- Chen G Q, Guo S, Shao L, Li J S, Chen Z M. 2013. Three-scale input-output modeling for urban economy: Carbon emission by Beijing 2007. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 18: 2493–2506
- Chen G Q, Han M Y. 2015a. Global supply chain of arable land use: Production-based and consumption-based trade imbalance. *Land Use Policy*, 49: 118–130
- Chen G Q, Han M Y. 2015b. Virtual land use change in China 2002–2010: Internal transition and trade imbalance. *Land Use Policy*, 47: 55–65
- Chen J, Wu Y, Wen J, Cheng S, Wang J. 2017. Regional differences in China's fossil energy consumption: An analysis for the period 1997–2013. *J Cleaner Production*, 142: 578–588
- Chen Z M, Chen G Q. 2011. Embodied carbon dioxide emission at supra-national scale: A coalition analysis for G7, BRIC, and the rest of the world. *Energy Policy*, 39: 2899–2909
- Chen Z M, Ohshita S, Lenzen M, Wiedmann T, Jiborn M, Chen B, Lester L, Guan D, Meng J, Xu S, Chen G, Zheng X, Xue J J, Alsaedi A, Hayat T, Liu Z. 2018. Consumption-based greenhouse gas emissions accounting with capital stock change highlights dynamics of fast-developing countries. *Nat Commun*, 9: 3581–3589
- Davis S J, Caldeira K. 2010. Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 5687–5692
- Davis S J, Peters G P, Caldeira K. 2011. The supply chain of CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 18554–18559
- Dietzenbacher E, Los B, Stehrer R, Timmer M, de Vries G. 2013. The construction of world input-output tables in the WIOD project. *Economic Syst Res*, 25: 71–98
- Fang D, Chen B, Hubacek K, Ni R, Chen L, Feng K, Lin J. 2019. Clean air for some: Unintended spillover effects of regional air pollution policies. *Sci Adv*, 5: eaav4707
- Fang D, Chen B. 2015. Ecological network analysis for a virtual water network. *Environ Sci Technol*, 49: 6722–6730
- Feng K, Davis S J, Sun L, Li X, Guan D, Liu W, Liu Z, Hubacek K. 2013. Outsourcing CO₂ within China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 11654–11659
- Feng K, Hubacek K, Sun L, Liu Z. 2014. Consumption-based CO₂ accounting of China's megacities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing. *Ecol Indicators*, 47: 26–31

- Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecol Indicators*, 16: 100–112
- Gao B, Dunford M, Norcliffe G, Liu Z. 2017. Capturing gains by relocating global production networks: The rise of Chongqing’s notebook computer industry, 2008–2014. *Eurasian Geography Economics*, 58: 231–257
- Gao B, Liu W, Norcliffe G. 2012. Hypermobility and the governance of global production networks: The case of the Canadian cycle industry and its links with China and Taiwan. *Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, 56: 439–458
- Guan D, Hubacek K, Weber C L, Peters G P, Reiner D M. 2008. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030. *Glob Environ Change*, 18: 626–634
- Guo S, Shao L, Chen H, Li Z, Liu J B, Xu F X, Li J S, Han M Y, Meng J, Chen Z M, Li S C. 2012. Inventory and input-output analysis of CO₂ emissions by fossil fuel consumption in Beijing 2007. *Ecol Inf*, 12: 93–100
- Guo S, Shen G Q. 2015. Multiregional input-output model for China’s farm land and water use. *Environ Sci Technol*, 49: 403–414
- Han M Y, Chen G Q, Dunford M. 2019. Land use balance for urban economy: A multi-scale and multi-type perspective. *Land Use Policy*, 83: 323–333
- Han M Y, Chen G Q, Mustafa M T, Hayat T, Shao L, Li J S, Xia X H, Ji X. 2015. Embodied water for urban economy: A three-scale input-output analysis for Beijing 2010. *Ecol Model*, 318: 19–25
- Han M, Yao Q, Liu W, Dunford M. 2018. Tracking embodied carbon flows in the Belt and Road regions. *J Geogr Sci*, 28: 1263–1274
- IEA. 2017. Energy Efficiency 2017. International Energy Agency
- Inomata S, Owen A. 2014. Comparative evaluation of MRIO databases. *Economic Syst Res*, 26: 239–244
- Lenzen M, Murray J, Sack F, Wiedmann T. 2007. Shared producer and consumer responsibility—Theory and practice. *Ecol Economics*, 61: 27–42
- Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, Geschke A. 2012a. Mapping the structure of the world economy. *Environ Sci Technol*, 46: 8374–8381
- Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Foran B, Lobefaro L, Geschke A. 2012b. International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 486: 109–112
- Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Geschke A. 2013. Building Eora: A global multi-region input-output database at high country and sector resolution. *Economic Syst Res*, 25: 20–49
- Li Y L, Chen B, Han M Y, Dunford M, Liu W, Li Z. 2018. Tracking carbon transfers embodied in Chinese municipalities’ domestic and foreign trade. *J Cleaner Production*, 192: 950–960
- Li Y L, Han M Y, Liu S Y, Chen G Q. 2019. Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multi-scale perspective. *Building Environ*, 151: 240–250
- Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. 2007. Multi-regional input-output model for regional energy requirements and CO₂ emissions in China. *Energy Policy*, 35: 1685–1700
- Liang S, Wang Y, Cinnirella S, Pirrone N. 2015. Atmospheric mercury footprints of nations. *Environ Sci Technol*, 49: 3566–3574
- Liu Q, Wang Q. 2017. Sources and flows of China’s virtual SO₂ emission transfers embodied in interprovincial trade: A multi-regional input-output analysis. *J Cleaner Production*, 161: 735–747
- Liu S, Wu X, Han M, Zhang J, Chen B, Wu X, Wei W, Li Z. 2017. A three-scale input-output analysis of water use in a regional economy: Hebei province in China. *J Cleaner Production*, 156: 962–974
- Liu S Y, Zhang J J, Han M Y, Yao Y X, Chen G Q. 2019. Multi-scale water use balance for a typical coastal city in China. *J Cleaner Production*, 236: 117505
- Liu Z, Davis S J, Feng K, Hubacek K, Liang S, Anadon L D, Chen B, Liu J, Yan J, Guan D. 2016. Targeted opportunities to address the climate-trade dilemma in China. *Nat Clim Change*, 6: 201–206
- Liu Z, Guan D, Moore S, Lee H, Su J, Zhang Q. 2015. Climate policy: Steps to China’s carbon peak. *Nature*, 522: 279–281
- Liu Z, Liang S, Geng Y, Xue B, Xi F, Pan Y, Zhang T, Fujita T. 2012. Features, trajectories and driving forces for energy-related GHG emissions from Chinese mega cities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing. *Energy*, 37: 245–254
- Meng J, Mi Z, Guan D, Li J, Tao S, Li Y, Feng K, Liu J, Liu Z, Wang X, Zhang Q, Davis S J. 2018. The rise of South-South trade and its effect on global CO₂ emissions. *Nat Commun*, 9: 1871–1877
- Mi Z, Meng J, Guan D, Shan Y, Liu Z, Wang Y, Feng K, Wei Y M. 2017a. Pattern changes in determinants of Chinese emissions. *Environ Res Lett*, 12: 074003
- Mi Z, Wei Y M, Wang B, Meng J, Liu Z, Shan Y, Liu J, Guan D. 2017b. Socioeconomic impact assessment of China’s CO₂ emissions peak prior to 2030. *J Cleaner Production*, 142: 2227–2236
- Oita A, Malik A, Kanemoto K, Geschke A, Nishijima S, Lenzen M. 2016. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nat Geosci*, 9: 111–115
- Pan C, Peters G P, Andrew R M, Korsbakken J I, Li S, Zhou P, Zhou D. 2018. Structural changes in provincial emission transfers within China. *Environ Sci Technol*, 52: 12958–12967
- Peters G P, Hertwich E G. 2008. CO₂ Embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environ Sci Technol*, 42: 1401–1407

- Peters G P, Andrew R, Lennox J. 2011a. Constructing an environmentally-extended multi-regional input-output table using the Gtap database. *Economic Syst Res*, 23: 131–152
- Peters G P, Minx J C, Weber C L, Edenhofer O. 2011b. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 8903–8908
- Shan Y, Zhou Y, Meng J, Mi Z, Liu J, Guan D. 2019. Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China. *J Industrial Ecol*, 23: 959–971
- Steen-Olsen K, Owen A, Hertwich E G, Lenzen M. 2014. Effects of sector aggregation on CO₂ multipliers in multiregional input-output analyses. *Economic Syst Res*, 26: 284–302
- Steininger K, Lininger C, Droege S, Roser D, Tomlinson L, Meyer L. 2014. Justice and cost effectiveness of consumption-based versus production-based approaches in the case of unilateral climate policies. *Glob Environ Change*, 24: 75–87
- Su B, Ang B W. 2016. Multi-region comparisons of emission performance: The structural decomposition analysis approach. *Ecol Indicators*, 67: 78–87
- Su B, Ang B W. 2010. Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The effects of spatial aggregation. *Ecol Economics*, 70: 10–18
- Su B, Huang H C, Ang B W, Zhou P. 2010. Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation. *Energy Economics*, 32: 166–175
- Wang C, Wang F. 2017. China can lead on climate change. *Science*, 357: 764
- Wang S, Chen B. 2016. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Appl Energy*, 178: 773–783
- Weinzettel J, Hertwich E G, Peters G P, Steen-Olsen K, Galli A. 2013. Affluence drives the global displacement of land use. *Glob Environ Change*, 23: 433–438
- Wiedmann T, Wilting H C, Lenzen M, Lutter S, Palm V. 2011. Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis. *Ecol Economics*, 70: 1937–1945
- Wilting H C. 2012. Sensitivity and uncertainty analysis in MRIO modelling; some empirical results with regard to the dutch carbon footprint. *Economic Syst Res*, 24: 141–171
- Yan Y, Yang L. 2010. China's foreign trade and climate change: A case study of CO₂ emissions. *Energy Policy*, 38: 350–356
- Yu Y, Feng K, Hubacek K. 2013. Tele-connecting local consumption to global land use. *Glob Environ Change*, 23: 1178–1186
- Zhang B, Chen Z M, Xia X H, Xu X Y, Chen Y B. 2013. The impact of domestic trade on China's regional energy uses: A multi-regional input-output modeling. *Energy Policy*, 63: 1169–1181
- Zhou Y, Li Y P, Huang G H. 2015. Planning sustainable electric-power system with carbon emission abatement through CDM under uncertainty. *Appl Energy*, 140: 350–364
- Zhou Y, Shan Y, Liu G, Guan D. 2018. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings. *Appl Energy*, 228: 1683–1692

(责任编辑: 朴世龙)