陈传龙,李泽浩,杨 振.ICT 产业隐含碳流动及污染避难所效应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4021-4033.
Chen C L, Li Z H, Yang Z. The embodied carbon flow and pollution shelter effect in the ICT industry [J]. China Environmengtal Science, 2025,45(7):4021-4033.

# ICT 产业隐含碳流动及污染避难所效应

陈传龙[1],李泽浩[2],杨 振[3*] (1.清华大学智库中心,北京 100084；2.南开大学经济学院,天津 300071；3.中共中央党校经济学部,北京 100091)

**摘要**：立足需求侧视角,基于价值链分解方法追踪中国区域信息与通信技术(ICT)产业的隐含碳流动构成及路径,并进一步识别 ICT 产业在区域层面的污染避难所效应.结果表明,跨区域贸易相关活动引致的 ICT 产业隐含碳排放和增加值占据了主要地位,在国内价值链中 ICT 产业生产链越短,碳生产率越高.分需求类别来看,绝大部分国内省份主要通过本地区需求(无跨区域贸易活动)引致 ICT 产业碳排放,而国外地区主要由最终产品的跨国贸易活动引致;ICT 产业自身的发展需求引致了最多的碳排放,其次是建筑业;固定资本形成是引致 ICT 产业碳排放的最大需求类型,其次是出口.随着跨区域活动次数增加,需求侧引起的 ICT 产业隐含碳排放呈现了递减的趋势.在不同价值链阶段,各省份所处的污染避难所角色具有异质性,面对不同需求地区其角色也存在显著区别.据此要立足需求侧绘制 ICT 产业价值链隐含碳地图,加强区域协同碳治理,推动 ICT 产业绿色低碳技术的创新突破和应用,完善 ICT 产业的碳排放核算和监测体系等措施来促进 ICT 产业绿色低碳发展.

**关键词**：ICT 产业隐含碳流动；需求侧；价值链分解；污染避难所
**中图分类号**：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4021-13

**The embodied carbon flow and pollution shelter effect in the ICT industry.** CHEN Chuan-long[1], LI Ze-hao[2], YANG Zhen[3*] (1.Center of Tsinghua Think Tanks, Beijing 100084, China；2.School of Economics, Nankai University, Tianjin 300071, China；3.Economics Department of the Central Party School of the Communist Party of China, Beijing 100091, China). *China Environmengtal Science*, 2025,45(7)：4021~4033

**Abstract**：This article focuses on the demand side perspective and uses the value chain decomposition method to track the implicit carbon flow composition and path of China's regional information and communication technology industry (ICT industry), and further identify the pollution shelter effect of ICT industry at the regional level The results indicate that the implicit carbon emissions and added value of the ICT industry caused by cross regional trade-related activities dominate, and the shorter the ICT industry production chain in the domestic value chain, the higher the carbon productivity From the perspective of demand categories, the vast majority of domestic provinces mainly generate ICT carbon emissions through local demand (without cross regional trade activities), while foreign regions are mainly caused by cross-border trade activities of final products; The development needs of ICT itself have led to the highest carbon emissions, followed by the construction industry; Fixed capital formation is the largest demand type that leads to implicit carbon emissions in ICT, followed by exports With the increase of cross regional activities, the implicit carbon emissions caused by demand side in the ICT industry have shown a decreasing trend At different stages of the value chain, the role of pollution shelters in each province is heterogeneous, and there are significant differences in their roles when facing different demand areas Based on this, we need to draw an implicit carbon map of the ICT value chain from the demand side, strengthen regional collaborative carbon governance, promote innovative breakthroughs and applications of green and low-carbon technologies in the ICT industry, improve the carbon emission accounting and monitoring system of the ICT industry, and take measures to promote the green and low-carbon development of the ICT industry.

**Key words**：ICT industry implies carbon flow；demand side；value chain decomposition；pollution havens

伴随着人工智能、区块链、大数据为代表的信息与通信技术(ICT)产业创新发展,为实现碳达峰碳中和提供了关键支撑,据全球电子可持续发展协会(GeSI)报告,到 2030 年 ICT 技术可以使全球二氧化碳排放量减少 20%,将排放量保持在 2015 年的水平.但是,ICT 产业发展本身能耗增加导致的碳排放增长问题逐渐突出.在数智化转型的大背景下,作为基础支撑的 ICT 产业规模不断扩张,产业分工日益深化.为满足各地区各行业的数智化转型需求,形成了跨区域、跨国界的 ICT 产业链供应链网络.与此同时,ICT 产业在原材料提取、生产制造与运输、产品

**收稿日期**：2024-12-09
**基金项目**：国家社科基金资助项目(21BJL033)
* 责任作者, 教授, yangzhen2010@alu.ruc.edu.cn

应用和回收处理各产业链环节产生的碳排放挑战日益不容忽视[1],尤其是人工智能、数据中心和 5G 基站等带来了较快的能耗和碳排放增长.为此,中国政府出台了《“十四五”信息通信行业发展规划》、《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022-2025年)》等政策措施,提出要完善 ICT 产业绿色产业链供应链.另一方面,考虑到中国各地区发展不平衡且环境规制水平存在差异,可能会产生污染避难所效应,即碳排放较高的 ICT 产业链环节会向环境规制低的地区转移集中,导致碳排放增加,这对 ICT 产业碳责任划分及统筹碳减排政策带来了挑战.

目前,相关的研究分为两类,第一类研究主要探讨 ICT 产业与碳排放的关系.一方面,现有研究考察了 ICT 的碳减排效应.ICT 能够降低碳排放[2-4]和提高碳效率[5],且存在着区域异质性特征[6],并通过赋能工业[7]、交通业[8]等产业数字化转型减少碳排放.但随着 ICT 产业集聚,在城市层面也会导致碳排放量增加[9],并且 ICT 产业贸易也显著影响到了碳排放[10-11],ICT 贸易中的碳成本和经济效益则在全球区域之间呈现出不均衡分布的特点[12].另一方面,现有文献聚焦 ICT 产业自身引起的碳排放[13],评估了其在全球二氧化碳的份额[14-15],并对 ICT 产业碳排放的趋势进行了预测[16-17].另一些学者基于多区域投入产出模型[18],从贸易隐含碳的视角进行分析,发现对信息和通信技术产品的最终需求导致了大量的间接碳排放[19],出口造成的排放是隐含碳排放的重要来源[20],且在全球层面贸易造成的隐含碳排放比例正在增加[21].可以发现,上述研究已经注意到了 ICT 产业贸易引发的碳排放流动,但并未深入到不同价值链阶段来考察ICT产业碳排放的来源构成及空间差异.

第二类研究是关于污染避难所效应的检验,主要使用计量经济学方法和投入产出方法.基于计量经济学方法,一些学者从环境规制[22-24]、FDI[25]和贸易政策[26]等方面检验了污染避难所效应是否存在.相比与计量经济学方法,投入产出方法能够捕捉中间产品贸易带来的环境影响,更为精确的识别污染避难所效应.一些学者从全球价值链或国家价值链视角,使用投入产出方法检验了污染避难所效应[27],已有研究基于中国省级多区域投入产出表构建碳生产率指标考察了各省份在最终产品贸易下的污染避难所角色[28],但研究忽视了中间产品贸易隐含碳的影响.同时,上述研究使用投入产出方法来识别污染避难所效应还未拓展至区域-产业层面,特别是考察 ICT 产业在区域层面是否存在的污染避难所效应.

考虑到从供给侧分析ICT碳排放,容易忽视ICT产品和服务在使用过程中产生大量的间接碳排放,无法全面评估 ICT 产业碳排放;而从需求侧出发有利于制定针对性的需求侧减排策略,引导供给侧优化资源配置实现碳减排.因此,本文将立足需求侧视角,沿着价值链追踪 ICT 产业隐含碳流动构成及空间差异,并考察 ICT 产业在区域层面的污染避难所效应.

## 1 模型方法与数据说明

### 1.1 基于 MRIO 模型的需求侧驱动 ICT 产业隐含碳流动测度

从需求侧视角出发能够将ICT产品和服务在使用过程中产生大量的间接碳排放纳入,同时可以区分需求侧类别,从不同地区需求、行业需求和需求类型三个层面全面溯源 ICT 产业隐含碳排放.据此,本文在省级层面构建环境拓展型多区域投入产出模型(EEMRIO),从而测度需求侧驱动 ICT 产业隐含碳流动.表 1 中,$Z^{ij}$ 是中间产品矩阵($m\times m$);$Y^{ij}$ 为 $j$ 地区对 $i$ 地区分部门的最终产品总需求量.$X^{i\prime}$、$M^i$、$E^i$、$V^i$ 和 $c^i$ 分别为 $i$ 地区 $m$ 个部门的总产出、进口额、出口额、增加值和碳排放量($1\times m$).

首先,由表 1 的行平衡关系,可用矩阵表示为:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{E} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{A^{11}} & \boldsymbol{A^{12}} & \cdots & \boldsymbol{A^{1n}}\\ \boldsymbol{A^{21}} & \boldsymbol{A^{22}} & \cdots & \boldsymbol{A^{2n}}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{A^{n1}} & \boldsymbol{A^{n2}} & \cdots & \boldsymbol{A^{nn}}\end{pmatrix}_{mn\times mn}$ 是直接消耗系数矩阵.$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y^1}\\ \boldsymbol{Y^2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{Y^n}\end{bmatrix}_{mn\times 1}$ 为最终产品需求量矩阵,$Y^t=\sum_n Y^{tn}$,$t\in(1,2,\cdots,n)$ 是地区 $t$ 的最终需求,

包括自身的最终需求及其他地区对本地区的最终　　需求;$E$ 是出口列向量.

**表 1　环境拓展型省级多区域投入产出表**

Table 1　Environmental expansion multi-regional input output table

| 项目 | 参数 | | 中间需求 | | | 最终需求 | | | 出口 | 总产出 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $P_1$ | ⋯ | $P_n$ | $P_1$ | ⋯ | $P_n$ | | |
| | | | $P_1\cdots P_m$ | ⋯ | $P_1\cdots P_m$ | $Y$ | | $Y$ | | |
| 中间投入 | $P_1$ | $P_1$ ⋯ $P_m$ | $Z^{11}$ | ⋯ | $Z^{1n}$ | $Y^{11}$ | ⋯ | $Y^{1n}$ | $E^1$ | $X^1$ |
| | ⋯ | ⋯ | ⋯ | ⋱ | ⋯ | ⋯ | ⋱ | ⋯ | ⋯ | ⋯ |
| | $P_n$ | $P_1$ ⋯ $P_m$ | $Z^{n1}$ | ⋯ | $Z^{nn}$ | $Y^{n1}$ | ⋯ | $Y^{nn}$ | $E^n$ | $X^n$ |
| | 进口 | | $M^1$ | ⋯ | $M^n$ | | | | | |
| | 增加值 | | $V^1$ | ⋯ | $V^n$ | | | | | |
| | 总投入 | | $X^{1'}$ | ⋯ | $X^{n'}$ | | | | | |
| | 碳排放量 | | $c^1$ | ⋯ | $c^n$ | | | | | |

注:表中$P$表示地区;$n$表示地区个数,$m$表示各地区包含的产业个数,上标 ' 表示向量或矩阵的转置,下同.

其次,引入各地区分行业碳排放系数,ICT 产业的碳排放量可表示为:

$$\boldsymbol{C}=\hat{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}(\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{E}) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{C}=(\boldsymbol{C}^1,\boldsymbol{C}^2,\cdots,\boldsymbol{C}^n)^T_{mn\times 1}$ 是各地区 ICT 产业碳排放总量组成的列矩阵(除ICT产业外, 其他部门记为0),$\hat{\boldsymbol{c}}=\begin{pmatrix}\hat{\boldsymbol{c}}^1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \hat{\boldsymbol{c}}^2 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \hat{\boldsymbol{c}}^n\end{pmatrix}_{m\times mn}$ 碳排放系数(注意该矩阵是沿对角线的分块子矩阵,下同$\hat{\boldsymbol{Y}}$、$\hat{\boldsymbol{E}}$),即单位产出中的碳排放量.

再者,在价值链分解方法中,WWYZ 方法[29]可以追溯最终商品生产活动中的增加值来源,本文在此基础上,将其拓展至地区层面,用于追溯 ICT 产业隐含碳排放的来源,即 ICT 产业隐含碳排放总量可被分解成以下 5 个部分:

$$\boldsymbol{C}=\underbrace{\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^d\hat{\boldsymbol{Y}}^d}_{\text{Stage0}}+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^d\hat{\boldsymbol{Y}}^e}_{\text{Stage1}}+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^d\boldsymbol{A}^e\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{Y}}}_{\text{Stage3}}}_{\text{DVC}}+\underbrace{\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^d\hat{\boldsymbol{E}}}_{\text{Stage2}}+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^d\boldsymbol{A}^e\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{E}}}_{\text{Stage4}}}_{\text{GVC}} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{B}$ 是整体 Leontief 逆矩阵,为 $\boldsymbol{L}^d$ 是各个地区的自身 Leontief 逆矩阵组成的分块对角矩阵;$\hat{\boldsymbol{Y}}^e=\hat{\boldsymbol{Y}}-\hat{\boldsymbol{Y}}^d$ 是除去本地区最终需求的分块矩阵;$\hat{\boldsymbol{Y}}^d$ 本地区最终需求沿对角线分块子矩阵;$\boldsymbol{A}^e$ 是其他地区中间投入系数分块矩阵;$\hat{\boldsymbol{E}}$ 是出口矩阵.从需求侧视角来看,ICT 产业碳排放总量可分为国内需求引致的 ICT 碳排放,即参与国内价值链引起的碳排放(DVC)和国外需求(出口)引致的 ICT 碳排放,即参与全球价值链导致的碳排放(GVC)两个部分.在 DVC 中,Stage0:国内该地区最终需求引致本区域 ICT 产业生产活动产生的碳排放,没有跨区域活动.Stage1:国内其他地区最终需求引致该地区 ICT 产业生产活动产生的碳排放,最终产品出现 1 次跨区域活动;Stage3:国内最终需求在国内 ICT 产业生产过程中通过中间品循环产生的碳排放,中间产品至少 1 次跨区域活动.在 GVC 中,Stage2:国外需求引致国内 ICT 产业生产活动产生的碳排放,仅最终产品出现跨国活动.Stage4:国外最终需求引致国内 ICT 产业生产过程中通过中间品循环产生的碳排放,中间产品至少 1 次跨区域活动.

进一步,按照 ICT 产业隐含碳排放如何和在哪里被最终产品引致的,则一个地区 $s$ 的 Stage3 可以进一步分解为:

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{c}}^s\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\sum_{t}^{n}\boldsymbol{Y}^{ut}) &= \underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}^s\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}}_{\text{Stage3-1}}+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}^s\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\boldsymbol{Y}^{us})}_{\text{Stage3-2}}\\ &+\underbrace{[\hat{\boldsymbol{c}}^s\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\sum_{t\neq s}^{n}\boldsymbol{Y}^{ut})-\hat{\boldsymbol{c}}^s\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}]}_{\text{Stage3-3}}\end{aligned} \tag{4}$$

式中:Stage3−1 为直接被伙伴地区引致,即隐含在用于输出的中间产品中,被输入地区国用来生成满足自己最终需求的产品而引致的 ICT 碳排放;Stage3−2 为重新返回且被输出地区引致的碳排放,即隐含在输出的中间产品中,又被输入用来生产中间产品或最终产品,最后又返回到输出地区并被最终需求引致的 ICT 碳排放;Stage3−3 为间接被输入地区引致或重新输出到第三方地区,即中间产品输出中隐含的碳排放被输入伙伴地区用来生产输出的最终需求或第三方地区的中间产品,第三方国家利用伙伴地区的输入中间产品生产最终产品再输出到伙伴国家被引致,或者被第三方地区最终需求引致的 ICT 碳排放.

进一步地,按照跨区域活动次数及模式[19],式子(3)可进一步分解为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}=&\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}}_{K=0}+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{e}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{E}}_{K=1}+\\&\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}^{2}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}\hat{\boldsymbol{Y}}^{e}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{E}}_{K=2}+\\&\cdots+\underbrace{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}^{t}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}^{t-1}\hat{\boldsymbol{Y}}^{e}+\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{Z}^{t-1}\boldsymbol{E}}_{K=t}\end{aligned}\tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{A}^{e}\boldsymbol{L}^{d}$ 且满足 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{L}^{d}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{Z})^{-1}$.$K$ 表示跨区域活动次数,$t\in(0,\ \infty)$;矩阵中元素 $\hat{\boldsymbol{c}}_{s}\boldsymbol{L}_{ss}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}_{sr}^{e}$ 表示 $s$ 地区最终产品跨区域 1 次满足 $r$ 地区需求引致的 ICT 碳排放;矩阵中元素 $\hat{\boldsymbol{c}}_{s}\boldsymbol{L}_{ss}^{d}\boldsymbol{E}$ 表示 $s$ 地区最终产品跨区域 1 次满足国外地区需求引致的 ICT 碳排放;$\hat{\boldsymbol{c}}_{s}\boldsymbol{L}_{ss}^{d}\boldsymbol{Z}_{sr}^{t}\hat{\boldsymbol{Y}}_{rr}^{d}$ 表示中间产品跨区域活动 $t$ 次,最后满足 $r$ 地区最终需求所引致的 ICT 碳排放.$\hat{\boldsymbol{c}}_{s}\boldsymbol{L}_{ss}^{d}\boldsymbol{Z}_{sr}^{t-1}\hat{\boldsymbol{Y}}_{rt}^{e}$ 表示中间产品跨区域活动 $t$−1 次,最终产品跨区域 1 次以满足 $t$ 地区最终需求所引致的 ICT 碳排放;$\hat{\boldsymbol{c}}_{s}\boldsymbol{L}_{ss}^{d}\boldsymbol{Z}_{sr}^{t-1}\boldsymbol{E}$ 表示中间产品跨区域活动 $t$−1 次,最终产品跨区域 1 次以满足国外最终需求所引致的 ICT 碳排放.

### 1.2 基于碳生产率检验“污染避难所”效应

碳生产率反映了单位碳排放中产生的增加值收益,如果一个地区碳生产率较高就意味着该地区在单位碳排放中产生了更多的增加值收益,换言之,获得更多增加值收益的同时碳排放更少.在价值链视角下,不同地区需求侧沿着不同价值链阶段驱动 ICT 产业隐含碳流动和隐含增加值具有异质性,如果一个地区满足其他地区需求引起的碳生产率低于本地区需求的,即该地区为满足其他地区需求引起的单位 ICT 产业碳排放获得了更少的增加值收益,可以说该地区相对于其他地区存在污染避难所效应.具体检验步骤为:

首先,使用增加值系数矩阵 $\hat{\boldsymbol{v}}$ 替换碳排放系数矩阵 $\hat{\boldsymbol{c}}$,根据式子(3)得到 ICT 增加值分解结果,则可以进一步得到不同价值链阶段的隐含碳生产率,即 ICT 对应价值链阶段隐含增加值与隐含碳排放的比值,为:

$$\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage0}}=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}}{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{d}}\tag{6}$$

$$\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage1}}=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{e}}{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{Y}}^{e}}\tag{7}$$

$$\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage3}}=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{A}^{e}\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{Y}}}{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{A}^{e}\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{Y}}}\tag{8}$$

$$\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage2}}=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{E}}}{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\hat{\boldsymbol{E}}}\tag{9}$$

$$\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage4}}=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{A}^{e}\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{E}}}{\hat{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}^{d}\boldsymbol{A}^{e}\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{E}}}\tag{10}$$

其次,从仅涉及最终产品流动和涉及中间产品流动引致的 ICT 碳排放来检验所在区域是否存在污染避难所效应.

在仅涉及最终产品流动视角下:

$$\theta_{1}^{s}=\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage0}}^{\mathrm{s}}/\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage1}}^{\mathrm{s}}-1=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\hat{\boldsymbol{Y}}^{ss}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\hat{\boldsymbol{Y}}^{ss}}/\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{s\neq r}^{n}\hat{\boldsymbol{Y}}^{sr}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{s\neq r}^{n}\hat{\boldsymbol{Y}}^{sr}}-1\tag{11}$$

$$\theta_{2}^{s}=\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage0}}^{\mathrm{s}}/\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage3}}^{\mathrm{s}}-1=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\hat{\boldsymbol{Y}}^{ss}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\hat{\boldsymbol{Y}}^{ss}}/\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\boldsymbol{E}^{s}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\boldsymbol{E}^{s}}-1\tag{12}$$

式中:若 $\theta_{1}^{s}>0$,则表示该地区 ICT 产业相对于其他地区扮演着污染避难所角色,反之则不存在;若 $\theta_{2}^{s}>0$,则表示该地区 ICT 产业相对于国外扮演着污染避难所角色,反之则不存在.

在涉及中间产品流动视角下:

$$\begin{aligned}\sigma_{1}^{s}=&\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage3\text{-}1}}^{\mathrm{s}}/\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage3\text{-}2+3\text{-}3}}^{\mathrm{s}}-1=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}}/\\&\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u\neq r}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\sum_{t\neq r}^{n}\boldsymbol{Y}^{ut})}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u\neq r}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\sum_{t\neq r}^{n}\boldsymbol{Y}^{ut})}-1\end{aligned}\tag{13}$$

$$\sigma_{2}^{s}=\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage3\text{-}1}}^{\mathrm{s}}/\mathrm{CP}_{\mathrm{Stage4}}^{\mathrm{s}}-1=\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\boldsymbol{L}^{rr}\boldsymbol{Y}^{rr}}-$$

$$\frac{\hat{\boldsymbol{v}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\boldsymbol{E}^{u})}{\hat{\boldsymbol{c}}^{s}\boldsymbol{L}^{ss}\sum_{r\neq s}\boldsymbol{A}^{sr}\sum_{u}^{n}(\boldsymbol{B}^{ru}\boldsymbol{E}^{u})}-1 \tag{14}$$

式中:若 $\sigma_1^s>0$,则表示该地区 ICT 产业在涉及中间产品流动中相对于其他地区扮演着“污染避难所”角色,反之则不存在;若 $\sigma_2^s>0$,则该地区 ICT 产业在涉及中间产品流动中相对于国外扮演着“污染避难所”角色,反之则不存在.

### 1.3　数据说明

本文数据包括两个部分:一是由 China Emission Accounts &Datasets(CEADs)发布的 2017 年中国 31 省份多区域投入产出表,每个省份包括 42 个产业部门[30](见表 2).本文的 ICT 产业包括 ICT 制造业和 ICT 服务业两类,分别对应投入产出表内的通信设备、计算机和其他电子设备业部门、信息传输、软件和信息技术服务业部门.二是 2017 年各省 ICT 产业碳排放量,本文的碳排放是与能源相关的二氧化碳排放,即是由燃烧过程中化石燃料(如原煤和汽油)中的碳含量转化而来的碳排放,通过采用 IPCC 部门核算法测算了 17 类化石燃料的碳排放[31],可在 China Emission Accounts &Datasets(CEADs)中获取.

**表 2　产业部门分类**

Table 2　Classification of industrial sectors

| 序号 | 产业部门 | 序号 | 产业部门 | 序号 | 产业部门 |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 农林牧渔产品和服务 | S15 | 金属制品 | S20 | 批发和零售 |
| S2 | 煤炭采选产品 | S16 | 通用设备 | S30 | 交通运输、仓储和邮政 |
| S3 | 石油和天然气开采产品 | S17 | 专用设备 | S31 | 住宿和餐饮 |
| S4 | 金属矿采选产品 | S18 | 交通运输设备 | S32 | 信息传输、软件和信息技术服务 |
| S5 | 非金属矿和其他矿采选产品 | S19 | 电气机械和器材 | S33 | 金融 |
| S6 | 食品和烟草 | S20 | 通信设备、计算机和其他电子设备 | S34 | 房地产 |
| S7 | 纺织品 | S21 | 仪器仪表 | S35 | 租赁和商务服务 |
| S8 | 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品 | S22 | 其他制造产品 | S36 | 科学研究和技术服务 |
| S9 | 木材加工品和家具 | S23 | 废品废料 | S37 | 水利、环境和公共设施管理 |
| S10 | 造纸印刷和文教体育用品 | S24 | 金属制品、机械和设备修理服务 | S38 | 居民服务、修理和其他服务 |
| S11 | 石油、炼焦产品和核燃料加工品 | S25 | 电力、热力的生产和供应 | S39 | 教育 |
| S12 | 化学产品 | S26 | 燃气生产和供应 | S40 | 卫生和社会工作 |
| S13 | 非金属矿物制品 | S27 | 水的生产和供应 | S41 | 文化、体育和娱乐 |
| S14 | 金属冶炼和压延加工品 | S28 | 建筑 | S42 | 公共管理、社会保障和社会组织 |

## 2　结果与讨论

### 2.1　价值链中 ICT 产业碳流动的总体分解结果

根据式(1)和(2)进行测算,表 3 可见,与跨区域贸易相关活动引致的ICT产业隐含碳排放和增加值占据了主要地位,其中最终产品跨区域贸易活动引致的ICT产业隐含碳排放和增加值要高于中间产品贸易活动引致的. 同时, 在不同价值链阶段有着不同的碳生产率. 具体来看:

对 ICT 产业隐含碳排放来说, 无跨区域贸易活动且仅满足国内本地区需求(Stage0)引致的碳排放只占据了总排放量的 39.65%,而剩余大部分的 ICT 产业隐含碳排放与跨区域的贸易活动有关,包括由满足国内其他地区和国外需求共同引致.在仅与最终产品贸易活动相关的隐含碳排放的占比为 44.01%,为满足国外需求(Stage2)引致的 ICT 碳排放要大于国内其他地区的需求(Stage1).随着生产分工深化,与中间产品贸易活动相关引起的 ICT 隐含碳排放也不容忽视;为满足国内本地区需求(Stage3),中间产品的跨区域贸易活动引致的碳排放占据了总体的 11.91%,其中,有 6.69%是直接被伙伴地区引致(Stage3−1),即隐含在用于输出的中间产品中,被输入地区用来生成满足自己最终需求的产品而引致的 ICT 碳排放最多,其次是间接被输入地区引致或重新输出到第三方地区所导致(Stage3−3),这也表明生产碎片化使得隐含碳排放更加隐蔽;而为满足国外需求,中间产品的跨区域贸易活动引致的碳排放(Stage4)也占到了总体的 4.43%.

就 ICT 产业隐含增加值而言, 其与对应的隐含碳排放呈现类似的特征, 跨区域贸易活动产生了更

多的 ICT 产业隐含增加值,占比达到了 74.04%.但在不同价值链阶段下 ICT 产业隐含碳排放与隐含增加值之间存在不对称,即在不同价值链阶段有着不同的碳生产率.可以发现,ICT 产业国内价值链阶段(DVCs)的碳生产率要大于全球价值链阶段(GVCs),这意味着在每单位产生的 ICT 产业增加值中,全球价值链活动比国内价值链排放了更多的碳排放.在 DVCs 中,ICT 产业生产链越短,碳生产率越高,如跨区域中间产品贸易活动(Stage3)、跨区域最终产品贸易活动(Stage1)和无跨区域贸易活动(Stage0)的碳生产率逐步升高.在 GVCs 中,国内跨区域贸易活动次数越多,碳生产率越高,如为满足国外需求,跨国内区域贸易活动(Stage4)的碳生产率大于无跨国内区域贸易活动(Stage2)的,这表明在满足国外需求产生的每单位 ICT 产业隐含增加值中,无跨国内区域贸易活动引致了更多的碳排放.

**表 3 不同价值链阶段下 ICT 产业碳排放及增加值分解结果**

Table 3 Decomposition results of carbon emissions and value added in the ICT industry at different value chain stages

| 参考 | 价值链阶段 | | 引致 ICT 产业碳排放量占比(%) | 引致 ICT 产业增加值占比(%) | 碳生产率(万元/t) |
|---|---|---|---|---|---|
| DVCs | Stage0 | | 39.65 | 46.50 | 54.88 |
| | Stage1 | | 13.46 | 15.59 | 54.19 |
| | Stage3 | Stage3−1 | 6.96 | 7.17 | 48.15 |
| | | Stage3−2 | 0.23 | 0.26 | 53.60 |
| | | Stage3−3 | 4.72 | 4.52 | 44.84 |
| | | 合计 | 11.91 | 11.95 | 46.94 |
| | **合计** | | **65.02** | **74.04** | **53.28** |
| GVCs | Stage2 | | 30.55 | 22.16 | 33.93 |
| | Stage4 | | 4.43 | 3.81 | 40.20 |
| | 合计 | | **34.98** | **25.96** | **34.72** |

## 2.2 不同需求层面下的分解结果

由图 1 可见,从总量来看,四川、辽宁、贵州、河南和北京的需求引致的 ICT 隐含碳排放位列前五,占据了国内需求引致总量的 35.11%;而国内省份需求引致的 ICT 碳排放来源地区主要集中在广东、四川、贵州、江苏和河南等五个省份,占到 ICT 产业隐含碳排放总量的 46.99%.进一步分析发现:

第一,对国内省份来说,Stage1 是绝大部分省份需求引致 ICT 碳排放的主要价值链阶段,这些省份的需求会引致本地区产生更多的碳排放,其中四川、贵州、山东、辽宁和湖北是通过该阶段引致的 ICT 产业碳排放最多的五个省份,这些省份也是其主要来源地.

第二,国内各省份需求通过 Stage3 引致的 ICT 产业碳排放总量与 Stage1 相当,这表明跨省域的中间产品贸易引致的 ICT 产业碳排放也不容忽视.上海、浙江、重庆和广西等四个省份由于中间产品或最终产品跨区域贸易引致的 ICT 产业碳排放均大于通过 Stage0 引致的,而广西更是由 Stage3 主导.从来源地来看,在 Stage1 中,浙江、辽宁、广东、北京和河南是主要的来源地,占到了该阶段的 51.91%;而 Stage3 的来源地主要集中在北京、浙江、河南和广东.

第三,国外地区需求引致的 ICT 产业碳排放主要通过 Stage2,这意味着最终产品跨国贸易带来了更多的碳排放.广东、河南、江苏、上海是 Stage2 的主要来源省份,通过最终产品贸易引致这些省份产生了更多碳排放,占到了该阶段的 66.63%;而在 Stage3 中,广东和江苏是该阶段的主要的来源地,这意味着这两个省份通过中间产品贸易引致了较多的碳排放.

分产业部门的需求来看,由图 2 可以发现:第一,在总量上,Stage0 是产业需求引致 ICT 产业碳排放的主要价值链阶段,其次是 Stage2,这表明无跨区域贸易且满足本地产业需求是引致 ICT 产业碳排放的主要途径,但最终产品跨国贸易且满足国外产业需求引致的 ICT 产业碳排放也应受到重视.

第二,从产业部门的需求来看,通信设备、计算机和其他电子设备业(S20)、信息传输、软件和信息技术服务业(S31)是引致 ICT 产业碳排放最多的两个部门,即 ICT 产业自身的发展需求引致了最多的碳排放,其次是建筑业(S28)、公共管理、社会保障和社会组织(S42)电气机械和器材(S19)和交通运输设备(S18).其中,S20 主要通过 Stage2 引致,即为满足自身需求的最终产品跨区域贸易引致了更多的 ICT 产业碳排放;而 S32 则主要通过 Stage0 引致,即更多地依靠自身的发展需求导致了更多的碳排放产生.

第三,从产业来源来看,ICT 制造业是最大的隐含碳排放来源,主要通过 Stage2 满足各产业需求而产生,其次是 Stage0;而 ICT 服务业则主要通过 Stage0 满足各产业需求导致碳排放,其次是 Stage1.这表明除满足本地区产业需求引致的碳排放外,最终产品的跨省域贸易及出口导致了更多的 ICT 碳排放.

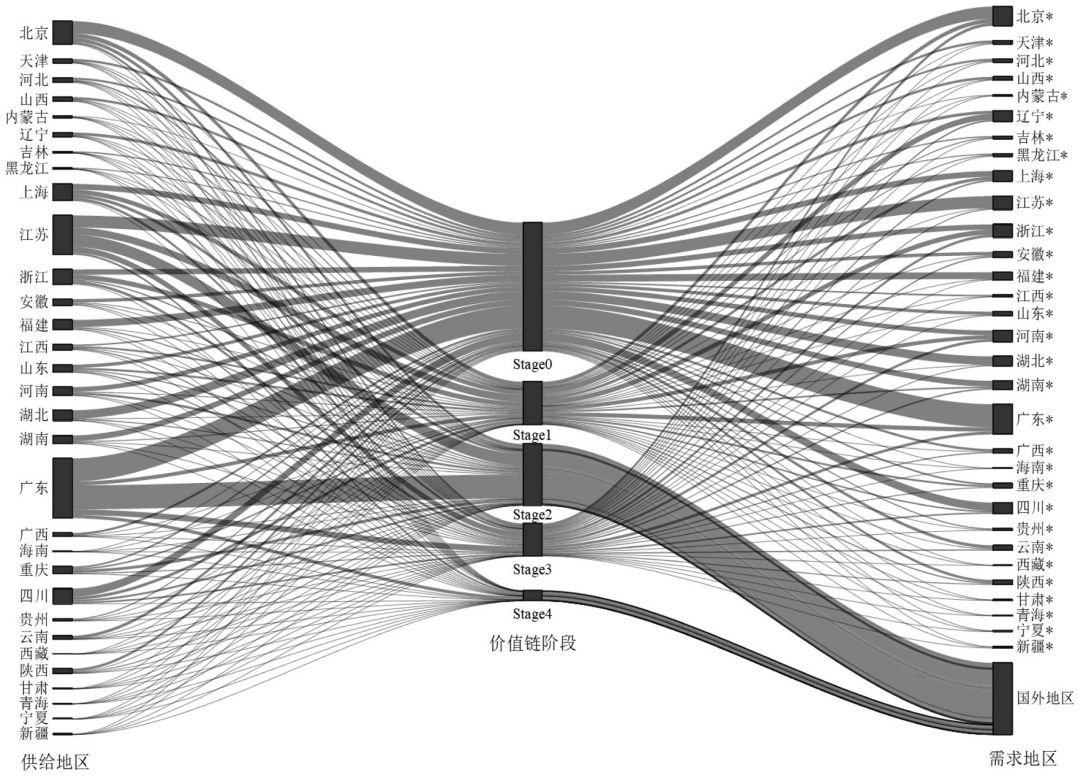



图 1　分需求地区在不同价值链下 ICT 产业隐含碳流动分布

Fig.1　Distribution of embodied carbon flow in ICT industry under different value chains in demand regions

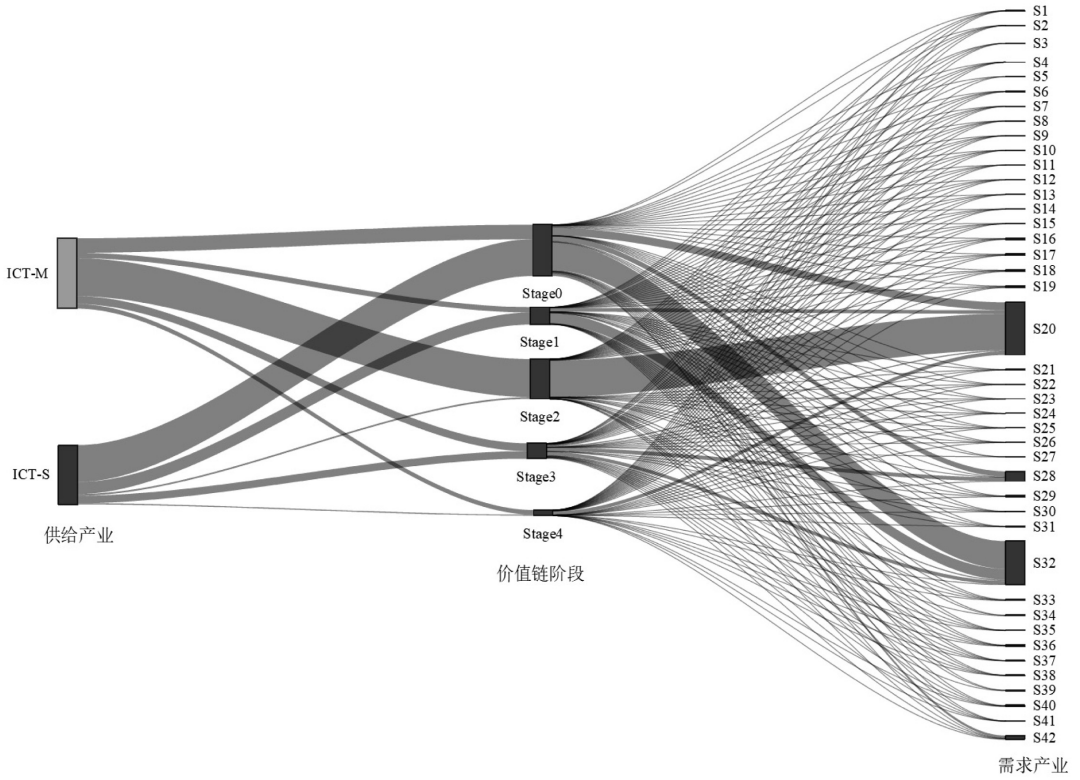



图 2　分需求产业在不同价值链下 ICT 产业隐含碳流动分布

Fig.2　Distribution of embodied carbon flow in ICT industry under different value chains for demand industries

分需求类型来看,需求类型包括农村居民消费(RC)、城镇居民消费(UC)、政府消费(GC)、固定资本形成总额(TFC)、存货增加(II)、出口(EX),由图 3 可以发现:第一,从总量来看,固定资本形成

(TFC)是引致 ICT 产业碳排放的最多的需求类型,份额占比为 37.58%,这表明 ICT 产业隐含碳排放主要由固定资产增加导致;其次是出口(EX),份额占比为 33.76%.在消费类型中,城镇居民消费(UC)引致了最多的碳排放,其次是农村居民消费(RC),而政府消费(GC)最少.

第二,Stage0 是除出口以外的需求类型中引致 ICT 产业碳排放的最主要的价值链阶段.固定资本形成、城镇居民消费、农村居民消费和政府消费皆主要通过 Stage0 引致 ICT 产业碳排放;出口则主要通过 Stage2 引致,即最终产品出口引致了更多的 ICT 产业碳排放.值得注意的是,在 Stage1 和 Stage3 中,固定资本形成也是引致 ICT 产业碳排放的最大的需求类型.

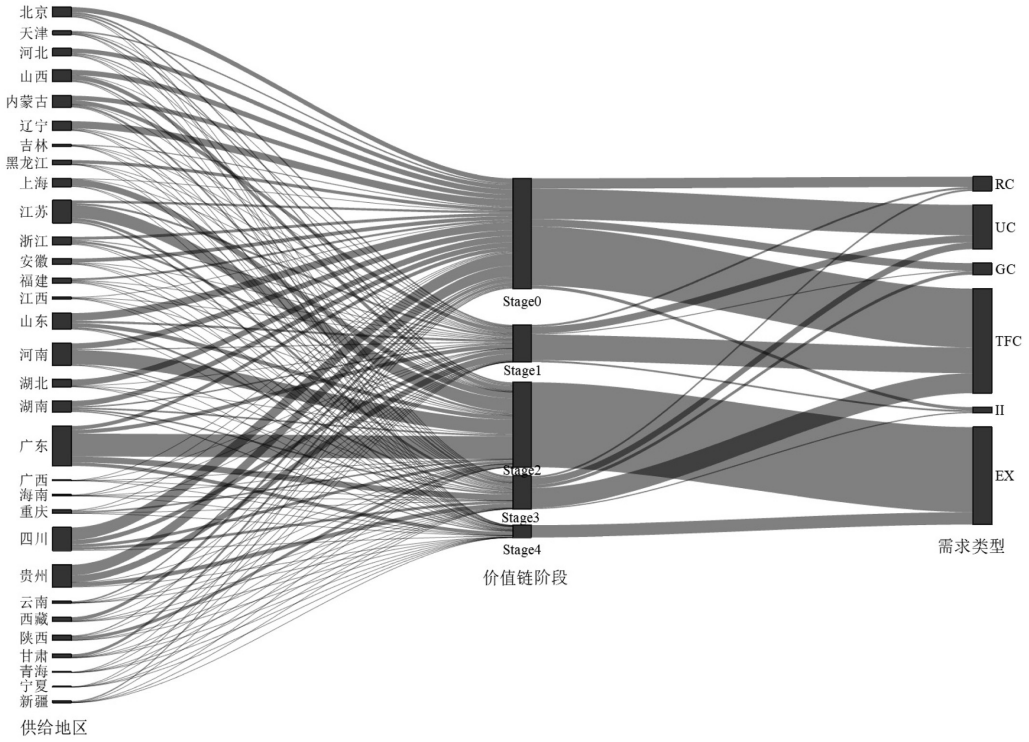



图 3 分需求类型在不同价值链下 ICT 产业隐含碳流动分布

Fig.3 Distribution of embodied carbon flow in ICT industry under different value chains by demand type

## 2.3 考虑跨区域活动次数的分解结果

为进一步解剖 ICT 产业隐含碳流动特征,根据式(5)测算了跨区域活动次数下 ICT 产业隐含碳流动的分解结果.总体来看,前 3 个次数(C1、C2 和 C3)主导了 ICT 产业隐含碳流动,占到了总量的 59.96%;C1(跨区域活动 1 次)要高于 C0(无跨区域活动),这反映了跨区域活动对 ICT 产业隐含碳排放的重要性,只关注无跨区域活动的 ICT 产业碳排放不利于推动 ICT 产业的有效碳减排.同时,随着跨区域活动次数增加,需求侧导致的 ICT 产业隐含碳排放呈现了递减的趋势,如图 4 显示需求侧引致的 ICT 产业隐含碳排放从 C1(跨区域活动 1 次)的 491.96Mt 逐步降至 C4(跨区域活动 4 次)的 2.85Mt,剩余次数则不足 1Mt.从需求地区来看,在 C1~C4 中国外地区需求引致的 ICT 产业隐含碳流动始终占据主导地位,但其占比逐步减小;而国内其他地区需求和国内本地区需求占比分别上升至 35.49%、26.46%.

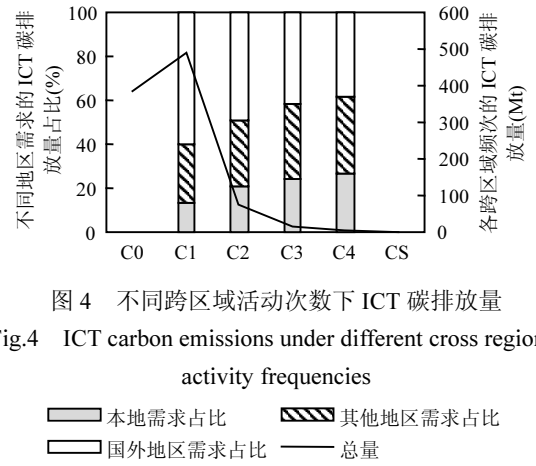



图 4 不同跨区域活动次数下 ICT 碳排放量

Fig.4 ICT carbon emissions under different cross regional activity frequencies

分省份来看,对于上海、广东、江苏、浙江等经济发达的省份来说,前二个次数(C1、C2)主导了 ICT 产业隐含碳流动,这些地区 ICT 产业也较为密集为其他省份提供了大量的 ICT 产品.同时,随着次数的增加需求侧引致的 ICT 产业隐含碳排放逐步减少,这与总体次数结构保持一致;但对于甘肃、青海、宁夏、新疆等经济较不发达省份来说,无跨区域活动仅满足本地需求占据了主导地位.值得注意的是,河南、重庆这些内陆省份的前三个次数(C1、C2 和 C3)也主导了 ICT 产业隐含碳流动,这与该地区承担了大量与 ICT 产业制造、组装等环节有关.但也可以发现,尽管随次数的增加对应的 ICT 产业隐含碳排在减少,但后面次数的 ICT 产业隐含碳排放仍占据了一定的比例,如江西、山西、湖南、内蒙古、吉林等省份占比都超过了 2%,这也意味着 ICT 产业隐含碳流动存在着一定的隐蔽性.

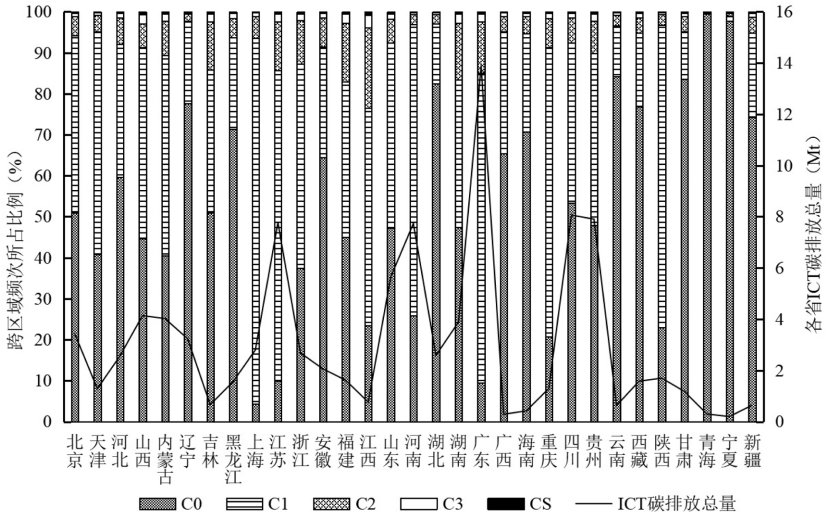



图 5　不同跨区域活动次数下各省份的 ICT 碳排放量

Fig.5　ICT carbon emissions of each province under different cross regional activity frequencies

## 2.4　检验区域层面的“污染避难所”效应

在上述的分析中发现,无跨区域贸易活动(Stage0)的碳生产率要高于与贸易有关的碳生产率,这可能与隐含在ICT产品的贸易流向不同的地区密切相关,即有些地区可能扮演着污染避难所的角色.

图 6 中,按照横轴为国内本地需求与国外地区需求的碳生产率比较、纵轴为国内本地需求与其他地区的碳生产率的比较,可以将各省份分为四个象限,具体为:

在第一象限(右上角)属于既相对于国内其他地区又对国外地区双重扮演污染避难所角色,主要包括广东、上海、江苏、吉林、福建、湖南等省份,这些省份比较值较大.对这些省份来说,国内其他地区需求和国外地区需求引起的单位隐含碳排放中获取的增加值收益要小于本地区需求所引致,即相对于流向国内其他地区和国外的ICT最终产品相对是碳密集型.

在第二象限(左上角)属于相对于国内其他地区扮演污染避难所角色,但对国外地区不存在,仅包括河南和江西两个省份,这意味着这两个省份国内其他地区需求导致的单位隐含碳排放中获取的增加值收益要小于本地区需求所致,即在国内现有的ICT产业价值链分布中扮演着污染避难所角色.

在第三象限(左下角)属于既相对于国内其他地区又对国外地区皆不存在扮演污染避难所角色,主要包括河北、浙江、山东、安徽、山西、辽宁等省份,这表明这些省份国内其他地区需求和国外地区需求引致的单位隐含碳排放中获取的增加值收益要大于本地区需求引起的,即相对于流向国内其他地区和国外的ICT最终产品是低碳的.

第四象限(右下角)属于相对于国内其他地区不存在扮演污染避难所角色,而对国外地区却存在,仅包括四川.这意味着国内其他地区需求引起的单位隐含碳排放中获取的增加值收益要小于本地区需求导致的,即在参与全球现有的 ICT 产业价值链分布中扮演着污染避难所角色.

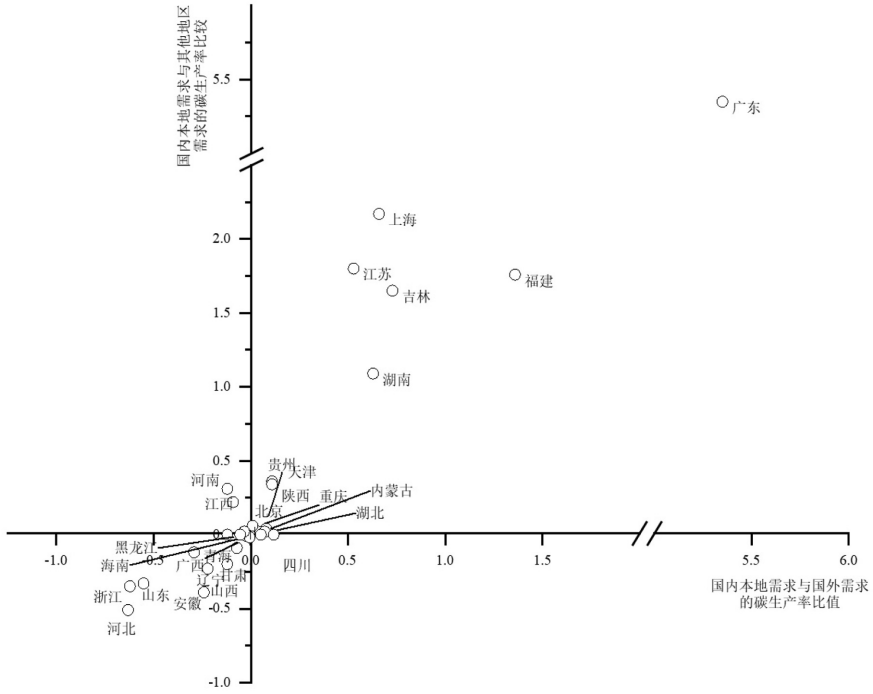



图 6 仅涉及最终产品贸易视角下各地区污染避难所效应的检验结果

Fig.6 Only presents the test results of the pollution shelter effect in various regions from the perspective of final product trade

同时,进一步考虑中间品贸易,观察在更加复杂的价值链阶段中各省份扮演的角色.由图 7 可以发现:

第一,从纵轴来看,上海、江苏、吉林、湖南、贵州、安徽、重庆和江西等省份位于轴上方,表明这些省份的ICT产业在涉及中间产品流动中相对于其他地区扮演着污染避难所角色.其中上海、江苏集中在 ICT 产业制造环节,能够为其他地区提供丰富的ICT 中间产品,这使得“污染避难所”角色尤为明显.

第二, 从横轴来看, 浙江、山东、河北的 ICT 产业在涉及中间产品流动中相对于国外地区扮演着更为明显的污染避难所角色,这可能与这些地区主要处在 ICT 制造环节有关,且在单位隐含碳排放中获取了更少的增加值收益.值得注意的是,吉林、江西和湖南等省份扮演者双重的污染避难所角色,这意味相对于国内外地区,这些省份在单位增加值内隐含着更多的碳排放在中间产品中.

第三, 在不同价值链阶段, 各省份所处的角色具有异质性. 与图 6 相比, 河北、辽宁、黑龙江和浙江等省份在涉及中间产品贸易视角下相对于国外地区扮演着污染避难所角色,山西、安徽相对于国内其他地区扮演着污染避难所角色,而在仅涉及最终产品贸易视角下上述省份的角色则不存在.这也表明随着生产链的延长,ICT 产业隐含碳流动更具隐蔽性,需更加重视隐含在中间产品贸易中的 ICT 产业碳排放.

进一步比较在不同视角下国内其他地区引致的ICT产业碳生产率与本地区需求的ICT碳生产率,来深入理解一些省份所扮演“污染避难所”角色.由图 8 可见,总体而言,在不同的视角下灰色区域部分对应的供给地区符合图 6 和图 7 省份所扮演角色的分布,但面对不同的需求地区其角色却有着不同的特征.

在图 8a 中,灰色色区域部分对应的供给地区总体上符合在图 6 中位于横轴上方的省份,如广东、湖北等省份,即为满足国内其他地区 ICT 产品的最终需求引致的碳生产率低于本地需求,在单位增加值中产生了更多的碳排放.不同的是,一些省份面对不同的需求地区有着不同角色,如对于上海、江苏、北京和天津等省份,为满足重庆、辽宁和吉林等省份的 ICT 产品最终需求引致的碳生产率高于本地需求,这意味着为满足这些地区最终产品需求所产生的单位增加值中排放了更少的碳排放.而四川、贵州等省份则表现出相反的特征,在满足河北、山西、内蒙古等省份

的最终需求时产生了更多的碳排放,即相对于河北、山西、内蒙古等省份扮演着污染避难所角色.

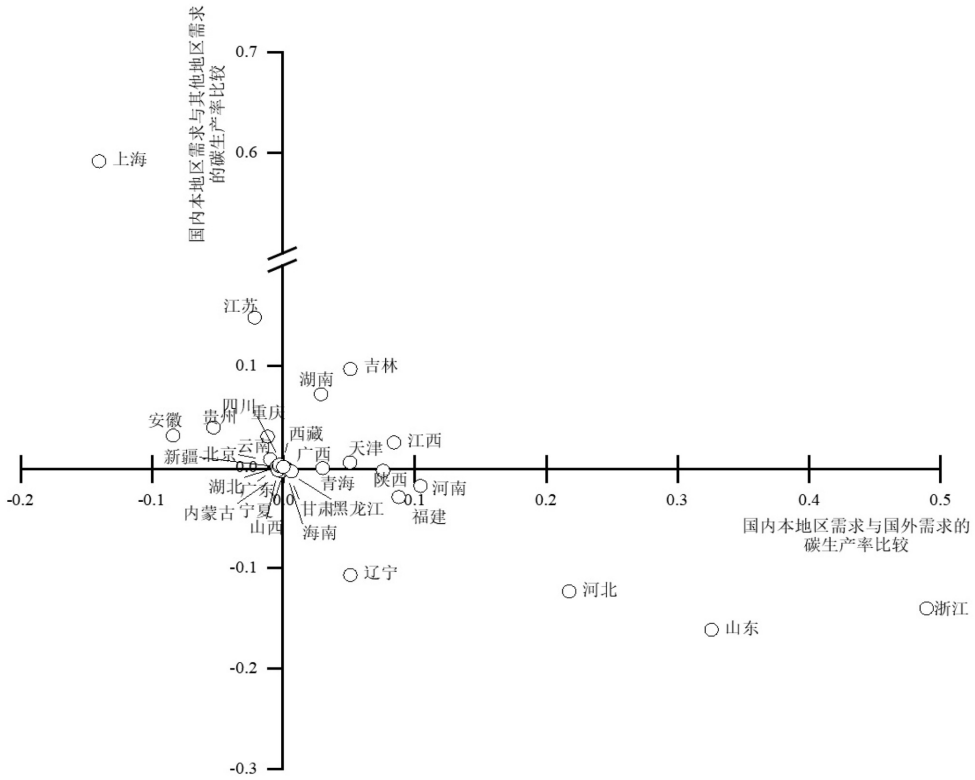
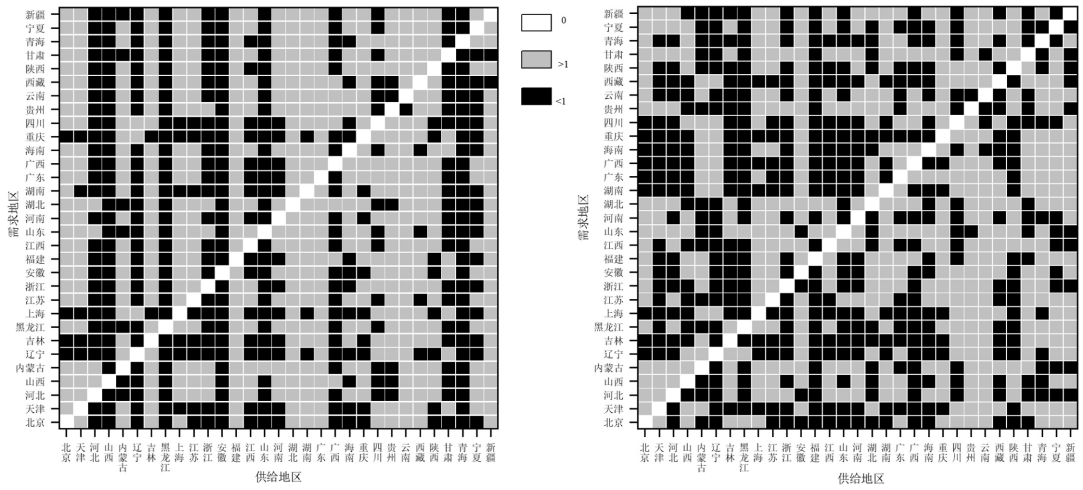



图 7　涉及中间产品贸易视角下各地区污染避难所效应的检验结果

Fig.7　Shows the test results of the pollution shelter effect in various regions from the perspective of intermediate product trade

在涉及中间产品视角下,一些省份面对不同的需求地区角色分化更加明显.如上海、江苏这些明显扮演污染避难所角色的省份,对天津、辽宁、吉林、湖北、广西、重庆等省份则不存在这个角色,即在涉及中间产品视角下这些地区需求引致的碳生产率高于本地需求的.浙江、山东、河北等省份则表现出相反的特征,相对于一些省份反而扮演污染避难所角色.这也表明不同价值链阶段各省份有着不同的角色,中间产品贸易带来了更加复杂的 ICT 产业隐含碳流动关系.




(a)仅涉及最终产品视角　　(b)涉及中间产品视角

图 8　不同视角下各地区需求引起的碳生产率比较

Fig.8　Comparison of carbon productivity caused by demand in different regions from different perspectives

### 2.5 政策启示

(1)立足需求侧绘制 ICT 产业价值链“隐含碳地图”,加强区域协同碳治理.针对 ICT 产业价值链隐含碳排放具有跨区域、隐蔽性等特征,绘制跨省份跨国界的 ICT 产业价值链“隐含碳地图”,精准定位各省份所承担的碳减排责任,优化需求侧管理,针对各省在全球价值链、国内价值链扮演的污染避难所角色,制定差异化的碳排放管理策略.对于通过 Stage1 引致碳排放占主导的四川、贵州等省份,重点优化本地 ICT 产业的能源结构,提高清洁能源使用比例;对于通过 Stage2 引致碳排放的国外地区,加强国际合作推动跨境绿色能源供应和碳减排技术交流.同时,沿着 ICT 价值链建立跨区域协同碳减排机制,做好上海、广东等优势地区对青海、甘肃等弱势地区在低碳技术、资金等方面的支持工作.

(2)围绕 ICT 价值链的关键环节,推动 ICT 产业绿色低碳技术的创新突破和应用.针对 ICT 制造业和服务业在价值链阶段的不同碳排放特点,设立专项低碳技术创新基金,支持 ICT 企业加强关键共性技术的研究创新,保持对前沿颠覆性技术的追踪;积极推动 ICT 制造业的高效散热技术革新和 ICT 服务业的能效优化升级,推动产业融合催生绿色低碳新业态.搭建绿色低碳技术交易平台,加速低碳技术的市场化交易和推广,同时在绿色低碳技术评估、知识产权保护等方面给予政策支持.

(3)完善 ICT 产业的碳排放核算和监测体系,建立跨区域的 ICT 产业碳排放数据库,提升 ICT 产业隐含碳流动的透明度.积极制定和完善全国统一的数据中心、基站等基础设施的碳排放核算体系,积极利用全球价值链、国内价值链相关数据构建公开透明的 ICT 产业碳排放数据库,推动实现各省 ICT 产业排放数据的互联互通,支撑跨区域联动的碳减排政策.针对 ICT 产业隐含碳排放的关键环节,加强碳排放监测和预警,支持有条件的 ICT 企业定期报告碳排放数据,并接受第三方核查,实现碳排放的动态管理.

## 3 结论

3.1 总体来看,与跨区域贸易相关活动引致的 ICT 产业隐含碳排放和增加值占据了主要地位,且在不同价值链阶段有着不同的碳生产率.

3.2 分需求地区来说,对国内省份来说,Stage1 是绝大部分省份需求引致 ICT 产业碳排放的主要价值链阶段,主要包括四川、贵州、山东、辽宁和湖北等省份;国外地区则主要通过 Stage2.分产业需求来看,ICT 制造业是最大的碳排放来源,主要通过 Stage2 满足各产业需求从而产生碳排放,而 ICT 服务业则主要通过 Stage0 满足各产业需求引起碳排放;通信设备、计算机和其他电子设备业(S20)、信息传输、软件和信息技术服务业(S32)是引致 ICT 产业隐含碳排放最多的两个部门.分需求类型来看,固定资本形成(TFC)是引致 ICT 产业碳排放的最大的需求类型,其次是出口(EX);Stage0 是除出口以外的需求类型引致 ICT 产业碳排放的主要价值链阶段.

3.3 在考虑跨区域活动次数下,前 3 个次数(C1、C2 和 C3)主导了 ICT 产业隐含碳流动,C1 要高于 C0;分省份来看,对于上海、广东、江苏、浙江等经济发达的省份来说,前二个次数(C1、C2)主导了 ICT 产业隐含碳流动,随着次数的增加需求侧导致的 ICT 产业隐含碳排放逐步减少;但对于甘肃、青海、宁夏、新疆等经济较不发达省份来说,无跨区域活动满足且满足本地需求占据了主导地位.

3.4 不同价值链阶段,各省份有着不同的角色,且面对不同的需求地区其角色却有着不同的特征.在仅涉及最终产品贸易视角下,广东、上海、江苏、吉林、福建、湖南等省份既相对于国内其他地区又对国外地区双重扮演污染避难所角色;河南和江西仅相对于国内其他地区扮演该角色;四川则相对于国外地区存在.但在涉及中间产品贸易视角下,河北、辽宁、黑龙江和浙江等省份相对于国外地区扮演着污染避难所角色,山西、安徽相对于国内其他地区存在,而在仅涉及最终产品贸易视角下上述省份的角色则不存在.

**参考文献:**

[1] 王 雷,刘桂玲,王 欣,等.碳足迹视角下 ICT 产业碳排放对环境的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2013,13(6):73-77.
Wang L, Liu G L, Wang X, et al.The impact of ICT industry carbon emissions on the environment from the perspective of carbon footprint [J]. Journal of Northwest A&F University (Social Sciences Edition), 2013,13(6):73-77.

[2] 王 轩,杨天剑,舒华英.信息通信技术(ICT)碳减排贡献研究 [J]. 中国软科学, 2010,(S1):144-148.
Wang X, Yang T J, Shu H Y. Research on the contribution of

information and communication technology (ICT) to carbon emission reduction [J]. China Soft Science, 2010,(S1):144−148.

[3] Lahouel B B, Taleb L, Zaied Y B, et al. Does ICT change the relationship between total factor productivity and $CO_2$ emissions? Evidence based on a nonlinear model [J]. Energy Economics, 2021, 101:105406.

[4] Zhong M R, Cao M Y, Zou H. The carbon reduction effect of ICT: A perspective of factor substitution [Z]. Technological Forecasting and Social Change, 2022,181(C).

[5] Li G, Gao D, Shi X X. How does information and communication technology affect carbon efficiency? Evidence at China's city level [J]. Energy & Environment, 2023:1−22.

[6] Sun H, Kim G. The composite impact of ICT industry on lowering carbon intensity: from the perspective of regional heterogeneity [Z]. Technology in Society, 2021,66(C).

[7] 余 畅,马路遥,曾贤刚,等.工业企业数字化转型的节能减排效应研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(7):3755−3765.
Yu C, Ma L Y, Zeng X G, et al. Research on energy conservation and emission reduction effects of digital transformation in tndustrial enterprises [J]. China Environmental Science, 2023,43(7):3755−3765.

[8] 石璟晶,赵红星,聂江龙,等.交通信息化对中国“一带一路”沿线省域交通碳排放影响的时空分异格局 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10): 5885−5900.
Shi J J, Zhao H G, Nie J L, et al. Temporal and spatial differentiation pattern of the impact of transportation informatization on China's provincial transportation carbon emissions along the "the Belt and Road" [J]. China Environmental Science, 2024,44(10):5885−5900.

[9] Wang J, Dong X, Dong K. How does ICT agglomeration affect carbon emissions? The case of Yangtze River Delta urban agglomeration in China [J]. Energy Economics, 2022,111:106107.

[10] Azam A, Rafiq M, Shafique M, et al. An empirical analysis of the non−linear effects of natural gas, nuclear energy, renewable energy and ICT−Trade in leading $CO_2$ emitter countries: Policy towards $CO_2$ mitigation and economic sustainability [J]. Journal of Environmental Management, 2021,286:112232.

[11] Nejati M, Shah M I. How does ICT trade shape environmental impacts across the north−south regions? Intra−regional and Inter−regional perspective from dynamic CGE model [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023,186:122168.

[12] Zhou X, Hang Y, Zhou D, et al. Carbon−economic inequality in global ICT trade [Z]. Iscience, 2022,25(12).

[13] Kopp T, Nabernegg M, Lange S. The net climate effect of digitalization, differentiating between firms and households [J]. Energy Economics, 2023,126(000):11.

[14] Malmodin J, Lundén D. The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010~2015 [Z]. EasyChair, 2018.

[15] Freitag C, Lee M B, Widdicks K,et al.The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations [J]. Patterns, 2021.

[16] Andrae A, Edler T. On global electricity usage of communication technology: trends to 2030 [Z]. Challenges, 2015.

[17] Belkhir L, Elmeligi A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 &recommendations [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,177:448−463.

[18] Jiang X M, Liu Y, Global Value Chain, Trade and Carbon: Case of Information and Communication Technology Manufacturing Sector [J]. Energy for Sustainable Development, 2015,25(2):1−7.

[19] Zhou X Y, Zhou D Q, Wang Q W, et al. How information and communication technology drives carbon emissions: A sector−level analysis for China [J]. Energy Economics, 2019,81:380−392.

[20] Wang J D, Yang S M, Dong K Y, et al. Assessing embodied carbon emission and its drivers in China's ICT sector: Multi−regional input−output and structural decomposition analysis [J]. Energy Policy, 2024,186:114008.

[21] Dong X, Jiang Q, Wang J. Assessing embodied carbon emission and its intensities in the ICT industry: the global case [J]. Frontiers in Energy Research, 2021,9:685021.

[22] Dou J, Han X. How does the industry mobility affect pollution industry transfer in China: Empirical test on Pollution Haven Hypothesis and Porter Hypothesis [J]. Journal of Cleaner Production, 2019.

[23] Zhao X, Liu C, Sun C, et al. Does stringent environmental regulation lead to a carbon haven effect? Evidence from carbon−intensive industries in China [J]. Energy Economics, 2020,86,104631.

[24] 宋德勇,朱文博,王班班,等.企业集团内部是否存在“污染避难所” [J]. 中国工业经济, 2021,(10):156−174.
Song D Y, Zhu W B, Wang B B, et al. Is there a "pollution shelter" within the enterprise group? [J]. China Industrial Economy, 2021, (10):156−174.

[25] Wang Z, Li C, Liu Q, et al. Pollution haven hypothesis of domestic trade in China: A perspective of $SO_2$ emissions [J]. Science of the Total Environment, 2019,663:198−205.

[26] Wu R, Ma T, Chen D, et al. International trade, $CO_2$ emissions, and reexamination of “Pollution Haven Hypothesis” in China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2022,29(3):4375–4389.

[27] Duan Y, Ji T, Yu T. Reassessing pollution haven effect in global value chains [J]. Journal of Cleaner Production, 2021:124705.

[28] Yan B, Xia Y, Jiang X. Carbon productivity and value−added generations: regional heterogeneity along global value chain [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 202365:111−125.

[29] Wang Z, Wei S J, Yu X, et al. Characterizing global value chains: production length and upstreamness [Z]. Social Science Electronic Publishing, 2017.

[30] Zheng H, Bai Y, Wei W, et al. Chinese provincial multi−regional input− output database for 2012, 2015, and 2017 [J]. Scientific Data, 2021,8: 244.

[31] Shan Y, Huang Q, Guan D, et al. China $CO_2$ emission accounts 2016~2017 [J]. Scientific Data, 2020,7:54.

**作者简介：**陈传龙(1994−),男,河南商丘人,助理研究员,博士,主要从事环境经济与可持续发展研究.发表论文 10 余篇.chuanlongchen@tsinghua.edu.cn.