

# 全球价值链嵌入是否降低了 中国产业部门隐含碳

## ——兼论产业数字化的调节效应

高 鹏 岳书敬

**摘要：**在气候变化和经济全球化背景下，研究全球价值链嵌入对中国产业部门低碳发展的影响具有重要的现实意义。基于2000—2014年世界投入产出数据库，本文构建多区域投入产出模型测算中国产业部门的隐含碳排放，实证分析全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳排放的影响，并进一步分析产业数字化对上述影响的调节效应。研究发现：总体上看，全球价值链前向嵌入对中国产业部门隐含碳排放的影响呈“倒U”型，但样本期内大部分产业部门尚未越过拐点，仍处于全球价值链前向嵌入对隐含碳排放的促进阶段；同时全球价值链后向嵌入对中国产业部门隐含碳排放具有正向影响。行业异质性显示，全球价值链前向嵌入和后向嵌入均对技术密集型行业隐含碳排放的减排效果更强。从调节效应上看，产业数字化提前了中国产业部门隐含碳排放由增加变为下降的拐点。深度融入全球化，促进产业部门技术升级以及提升产业数字化水平等是中国产业部门低碳发展的有效措施。

**关键词：**全球价值链；隐含碳排放；产业数字化；投入产出模型；产业部门  
[中图分类号] F742 [文献标识码] A [文章编号] 1002-4670 (2022) 7-0053-15

### 一、引言与文献综述

自改革开放以来，我国持续深化经济体制改革和坚持对外开放战略，不断参与到全球价值链（Global Value Chain, GVC）的生产制造等环节中，在促进我国经济增长的同时提升了全球的资源配置效率，并进一步拓宽了生产的可能性边界。然而，伴随着全球价值链的纵向延伸和行业分工的不断细化，加之我国长期以来处于全球价值链下游的生产制造环节以及主要参与加工贸易的特征事实，在发展过程中消耗了大量

[收稿日期] 2022-03-09

[基金项目] 国家社会科学基金一般项目“数据要素视角下区域协调发展的新机制与新路径研究”（21BJL056）

[作者信息] 高鹏：东南大学经济管理学院博士研究生；岳书敬（通讯作者）：东南大学经济管理学院教授、博士生导师，东南大学国家发展与政策研究院研究员，东南大学数字经济研究中心研究员，电子邮箱 yueshujing@seu.edu.cn

的化石能源并产生了较为严峻的环境污染问题，其中碳排放的激增问题尤为突出。

如何在气候变化和经济全球化背景下有效促进中国产业部门的低碳发展成为当前需要解决的问题之一。重要举措是提高中国产业部门在技术研发和高端制造等领域的参与能力，通过提升核心竞争力和分工效率降低产业部门在发展过程中的碳排放水平（张其仔和许明，2020）<sup>[1]</sup>。同时相关职能部门应结合产业部门的发展实际，明确由贸易活动引致的碳排放转移问题，以争取更加公平的碳排放空间（Wang et al.，2019）<sup>[2]</sup>。因此与本文相关的一支文献是关于全球价值链嵌入的研究，可大致总结为以下三个方向。第一，关于全球价值链嵌入的衡量。截至目前，已有研究从城市、行业和企业等多种维度对全球价值链的嵌入水平进行量化测度（Koopman et al.，2010<sup>[3]</sup>；Koopman et al.，2014<sup>[4]</sup>；Upward et al.，2013<sup>[5]</sup>；Wang et al.，2017<sup>[6]</sup>；唐宜红和张鹏杨，2018<sup>[7]</sup>；余泳泽等，2019<sup>[8]</sup>；赵文涛和盛斌，2022<sup>[9]</sup>）。第二，研究全球价值链嵌入与贸易结构、技术升级和能源效率等的关系（刘维林等，2014<sup>[10]</sup>；Qian et al.，2021<sup>[11]</sup>；张弘媛和丁一兵，2022<sup>[12]</sup>）。第三，将全球价值链与国内价值链进行融合，从多维度验证诸如污染避难所假说和环境库兹涅茨曲线等理论的适用性（刘维林，2015<sup>[13]</sup>；杨飞等，2017<sup>[14]</sup>；Beverelli et al.，2019<sup>[15]</sup>）。同时，随着研究视角的不断拓展和气候变化问题的加剧，部分学者研究了全球价值链嵌入与碳排放的相关关系（吴肖丽和潘安，2019<sup>[16]</sup>；蔡礼辉等，2020<sup>[17]</sup>；赵玉焕等，2021<sup>[18]</sup>）。

结合比较优势理论发现，参与全球价值链可较大限度地配置全球资源，实现知识传递和边际报酬递增的后发优势。发达国家的先进技术对本国经济和社会发展的促进效果存在边际报酬递减规律，但在向发展中国家传递的过程中，由于发展中国家的技术水平和生产能力相对滞后，传递过程不仅会提高发展中国家的信息化速度和经济发展水平，同时也可促进发达国家实现边际报酬递增的后发优势，而这主要得益于数字经济的发展（詹晓宁和欧阳永福，2018<sup>[19]</sup>；齐俊妍和任奕达，2021<sup>[20]</sup>；Miao，2021<sup>[21]</sup>）。同时，由于数字经济具有成本低、传播性强和技术共享等优势，其在中国产业部门参与GVC的过程中提供了新的发展动力，成为促进中国经济增长和扩大产业影响力的重要工具（郭周明和裘莹，2020<sup>[22]</sup>；孙志燕和郑江淮，2021<sup>[23]</sup>）。因此与本文相关的另一支文献是关于数字经济对全球价值链嵌入的碳排放效应研究。现有文献主要关注数字经济对全球价值链嵌入的影响和作用机制。张晴和于津平（2020）<sup>[24]</sup>研究了数字经济对全球价值链高端攀升的影响，发现数字经济提升了企业的全球价值链分工地位。蒋瑛等（2021）<sup>[25]</sup>研究发现，数字经济加强了全球价值链嵌入的产业升级效应，但对内陆城市有较强的消极作用。张艳萍等（2022）<sup>[26]</sup>研究发现，数字经济增强了中国制造业参与全球价值链的广度和深度。

通过对现有研究的文献梳理发现，当前全球价值链嵌入的相关研究已较为成熟，为全球价值链嵌入与碳排放相关关系的研究奠定了坚实基础，但在以下方面仍有待补充完善。第一，现有研究在关注全球价值链嵌入与碳排放关系时，更多是基于工业行业直接碳排放或出口贸易的视角进行分析，而立足于全品类产业部门视角

分析全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳排放影响的研究却较少。通过研究全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳排放的影响,可进一步明晰产业部门在贸易活动中的分工情况和产业部门隐含碳排放的演变规律,对于促进产业部门的低碳发展具有重要意义。第二,在数字经济背景下分析全球价值链嵌入对碳排放影响的研究有待补充。数字经济作为快速优化配置资源和激发经济增长潜力的重要工具,自十八大以来得到了党中央的高度重视,并逐渐成为促进我国经济增长的新动力和新引擎;同时,我国为应对全球气候变化制定了“碳达峰”和“碳中和”的宏伟发展目标,在数字经济背景下研究中国参与全球价值链的碳排放效应将呈现何种变化,对于促进低碳经济发展和“双碳”目标实现具有重要意义。

基于此,本文利用2000—2014年世界投入产出数据库(World Input-Output Database, WIOD)测度了中国产业部门的隐含碳,深入研究全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳的影响,并进一步剖析产业数字化对上述影响的调节效应。通过立足于中国产业部门的发展实际,主要回答以下问题:在参与全球价值链的过程中,中国产业部门是否实现了低碳发展?数字经济的发展对产业部门嵌入全球价值链的碳排放效应存在何种影响?回答以上问题对于统筹全球价值链嵌入、产业部门能源结构转型以及促进以国内大循环为主的新发展格局等具有较大的借鉴价值。

因此,相对于已有研究,本文的边际贡献如下:第一,研究视角上,融合气候变化和经济全球化背景,立足于中国全品类产业部门的隐含碳排放问题,分别研究全球价值链前向和后向嵌入对产业部门隐含碳排放的影响。第二,研究内容上,纳入产业数字化指标,分析产业数字化在全球价值链嵌入影响隐含碳排放中的调节作用,明晰数字经济时代下中国产业部门嵌入全球价值链的碳排放效应将呈现何种变化。第三,研究方法上,通过构建多区域投入产出模型测度中国产业部门的隐含碳排放,在此基础上构建包含非期望产出的超效率SBM模型测度产业部门的隐含碳排放效率,从“量”和“质”的双重维度进行检验,以期从全球价值链嵌入角度为中国产业部门的低碳发展和核心竞争力提升等提供经验证据。

## 二、理论分析与研究假说

### (一) GVC 前向嵌入对产业部门隐含碳的影响

根据环境库兹涅茨理论,一国或地区在经济发展过程中,其环境污染水平呈现先增加后下降的“倒U”型变动特征。GVC前向嵌入表示产业部门主要是以提供中间品的方式参与贸易活动,其对产业部门隐含碳的影响可分为促进作用和抑制作用两个方面。

一方面,GVC前向嵌入对发展中国家产业部门隐含碳的促进作用体现在:(1)在GVC前向嵌入的初级阶段,发展中国家在技术水平和生产能力等方面处于相对落后位置,由发达国家主导的全球价值链在高端制造和研发领域具有垄断地位,发展中国家在GVC前向嵌入过程中所提供的中间品往往是以大量的能源消耗和环境污染为代价(张弘媛和丁一兵,2022)。(2)产业部门的隐含碳包含直接碳排放和中间品贸易活动引致的间接碳排放,在以前向嵌入为主的方式参与GVC的过程中,

所提供的中间品包含了大量的间接碳排放，由此产生了较强的污染转移（Wang et al., 2019）。（3）由于发达国家具有较为严格的环境规制，其在贸易活动中利用技术和绿色贸易壁垒等因素，限制了发展中国家前向嵌入 GVC 的能力，从而阻碍发展中国家的价值链升级，导致较为严峻的碳排放问题。

另一方面，GVC 前向嵌入对发展中国家产业部门隐含碳的抑制作用体现在：（1）随着产业部门 GVC 前向参与度的不断提高，相关企业的资源配置效率有所提升，增长潜力得到进一步释放，该过程提高了产业部门的发展质量。（2）发展中国家前向嵌入 GVC 的过程中，通过学习发达国家先进的生产技术和管理经验，使其企业实现技术迭代和管理优化，在促进企业提高生产率的同时也提升了其前向参与 GVC 的能力（龙飞扬和殷凤，2021）<sup>[27]</sup>。（3）提供中间品参与 GVC 的企业面临着同质企业的竞争效应，同时发达国家较高的准入门槛对发展中国家前向嵌入 GVC 的能力也提出了更高要求（李小平和彭书舟，2022）<sup>[28]</sup>，在进口国的门槛效应和参与国的竞争效应下，相关企业进一步加强清洁生产和技术升级，从而降低产业部门的隐含碳。基于上述分析，本文提出假说 1。

假说 1：随着 GVC 前向参与度的不断提高，发展中国家产业部门的隐含碳呈现先增加后下降的“倒 U”型变动特征。

### （二）GVC 后向嵌入对产业部门隐含碳的影响

全球价值链将各国的产业发展进行关联，在不断细化的国际分工中提高了产业部门在全球的资源配置效率，同时伴随着要素资源的全球转移（戴翔和张二震，2016<sup>[29]</sup>；闫云凤，2020<sup>[30]</sup>；江小涓和孟丽君，2021<sup>[31]</sup>）。结合污染避难所假说可以发现，发达国家在参与贸易活动时倾向于寻找环境规制水平较低的国家或地区，在通过贸易活动进行污染转移的同时，以较少的环境成本获得更多的经济利益。

发展中国家的产业部门在 GVC 后向嵌入中，由于主要参与的是加工组装和较为初级的生产制造等低技术和低附加值的贸易环节，并且主要以进口中间品进行加工的方式参与贸易活动，长期以来对发达国家的高端核心制造产品存在较强的路径依赖（蔡礼辉等，2020），在该过程中承接了发达国家的污染转移并难以突破低附加值和高排放的限制。同时，跨国企业作为 GVC 的参与主体，不断在全球范围内寻求更好的要素资源配置方案以实现利润最大化，发展中国家在向 GVC 前端升级的过程中会受到来自发达国家和跨国企业的阻碍，使其处于价值链的低端并逐渐形成低端锁定，从而增加产业部门的隐含碳排放。基于此，本文提出假说 2。

假说 2：基于后向嵌入的 GVC 参与方式会对产业部门的隐含碳排放产生增长效应。

### （三）产业数字化对 GVC 嵌入影响隐含碳的调节效应

依据国际分工理论和内生经济增长理论，发展中国家在参与 GVC 时，以往主要凭借较强的劳动力供给和土地资源禀赋等开展贸易活动，在此过程中虽然显著促进了本国的经济增长，但也会带来一定的环境污染等发展问题。而随着人力和土地成本的上升，在参与 GVC 的过程中依靠传统要素促进经济增长的能力会有所削弱。

数字经济具有环境友好型特征，因而在促进经济增长和可持续发展中具有较强

的比较优势，并可通过促进产业部门实现智能化和协同化提升产业数字化水平，以降低对传统生产要素的依赖，增强数据要素对产业增长的驱动力（吕越等，2020）<sup>[32]</sup>。同时产业数字化可以打破市场分割，在参与 GVC 的过程中可以提升全球产业部门之间的资源配置效率和分工协作水平，从而降低 GVC 嵌入中产业部门的碳排放。因此，本文提出假说 3。

假说 3：产业数字化水平的提高会提升 GVC 嵌入的低碳效应。

### 三、模型设定、变量选取和数据来源

#### （一）计量模型设定

基于前述理论分析，在借鉴吕越和吕云龙（2019）<sup>[33]</sup> 研究的基础上，构建如下计量模型以研究全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳的影响：

$$\ln ECE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 GVCP\_f_{it} + \alpha_2 GVCP\_b_{it} + \alpha_3 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

为剖析全球价值链前向参与度的不断加深对隐含碳的深层影响，将全球价值链前向参与度的平方项纳入研究设计，相关的计量模型如下所示：

$$\ln ECE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 GVCP\_f_{it} + \alpha_2 GVCP\_f_{it}^2 + \alpha_3 GVCP\_b_{it} + \alpha_4 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中，下标  $i$  和  $t$  分别表示产业部门和年份， $ECE_{it}$  表示  $i$  产业部门在  $t$  年的隐含碳排放， $GVCP\_f_{it}$  和  $GVCP\_f_{it}^2$  分别表示全球价值链前向参与度及其平方项， $GVCP\_b_{it}$  表示全球价值链后向参与度， $Control_{it}$  表示包含能源结构、产业结构、能源强度、劳动报酬以及人均产出规模等在内的一系列控制变量， $\mu_i$  和  $\gamma_t$  分别表示行业和年份固定效应， $\varepsilon_{it}$  为随机扰动项。

#### （二）变量选取

##### 1. 中国产业部门隐含碳

根据投入产出法的基本设定，各产业部门的投入产出关系应满足以下等式：

$$\begin{aligned} x_i^r &= (y_{i1}^r + \dots + y_{in}^r) + (y_{i1}^2 + \dots + y_{in}^2) + (y_{i1}^m + \dots + y_{in}^m) + f_i^1 + f_i^2 + \dots + f_i^m \\ &= \sum_s \sum_j y_{ij}^{rs} + \sum_s f_i^s \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $i, j = 1, 2, \dots, n$ ； $r, s = 1, 2, \dots, m$ 。 $y_{ij}^{rs}$  表示  $r$  国  $i$  部门的产品对  $s$  国  $j$  部门的中间投入， $f_i^s$  表示  $r$  国  $i$  部门的产品提供给  $s$  国的最终需求， $x_i^r$  表示  $r$  国  $i$  部门的总产出。

取  $r$  国对  $s$  国的直接消耗系数矩阵为  $A^{rs}$ ，整体的平衡关系表示为： $X = AX + F$ ，可进一步拆分如下：

$$X^r = A^{rr} X^r + F^{rr} + \sum_{s \neq r} A^{rs} X^s + \sum_{s \neq r} F^{rs} \quad (4)$$

其中， $A^{rr} X^r + F^{rr}$  表示  $r$  国的产品或服务仅用于满足本国的中间使用量和最终需求量； $\sum_{s \neq r} A^{rs} X^s + \sum_{s \neq r} F^{rs}$  表示  $r$  国的产品或服务提供给其他国家（地区）的中间使用

量和最终需求量。

设定中国各产业部门的直接碳排放系数矩阵为  $E^r$ ，通过矩阵转换可得到其隐含碳排放的系数矩阵：

$$C^r = E^r(I - A^r)^{-1} \quad (5)$$

其中， $(I - A^r)^{-1}$  表示中国各产业部门的里昂惕夫逆矩阵。

## 2. 全球价值链嵌入

借鉴 Wang 等 (2017) 的研究方法，选取 GVC 参与度来衡量全球价值链的嵌入水平，其中前向参与度 ( $GVCP\_f$ ) 表示主要从事研发设计和高端制造等高附加值环节，以提供中间品为主的方式参与全球价值链，主要反映的是对 GVC 下游地区的影响情况；后向参与度 ( $GVCP\_b$ ) 表示主要从事基础加工组装和简单生产制造等低技术和低附加值环节，以进口中间产品进行生产加工为主的方式参与全球价值链，主要反映的是对 GVC 上游地区的依赖程度。

## 3. 产业数字化指数

产业数字化指数的计算参考杨飞和范从来 (2020)<sup>[34]</sup> 的方法，选取 WIOD 中全球计算机制造业和信息服务业在每个行业的中间投入量占其增加值的比重表示，并以此作为全球价值链嵌入影响产业部门隐含碳的调节变量，表示各产业部门运用数字技术和数据资源的能力和综合水平。

## 4. 中国产业部门隐含碳排放效率

通过构建包含非期望产出的超效率 SBM 模型测度中国产业部门的隐含碳排放效率，并以此替代被解释变量。隐含碳排放效率表示产业部门从生产到最终消费全生命周期的碳排放效率水平 (Gao et al., 2021)<sup>[35]</sup>。在测算产业部门的隐含碳排放效率时，投入变量为各产业部门的能源消耗、资本存量 and 从业人数，期望产出和非期望产出分别为各产业部门的增加值和隐含碳。

## 5. 控制变量

根据中国产业部门隐含碳的变动特征和演变规律，选取如下控制变量：能源结构 ( $es$ )，以各产业部门每年的能源消耗占比衡量；产业结构 ( $is$ )，以各产业部门每年的增加值占比衡量；能源强度 ( $ei$ )，以各产业部门的能源消耗量与增加值之比衡量；劳动者报酬 ( $lnlab$ )，以各产业部门从业人员收入的对数衡量；人均产出规模 ( $lnpv$ )，以各产业部门人均产出的对数衡量。

### (三) 数据来源

本文主要研究全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳的影响，并进一步探讨产业数字化对上述影响的调节作用，所用数据主要为 2000—2014 年世界投入产出表以及欧盟 (2019) 提供的环境账户和经济账户数据。同时，由于世界投入产出表中缺少中国机械设备维修等产业部门的投入产出数据，因此将投入产出部门归纳为 47 类进行分析<sup>①</sup>。

<sup>①</sup>WIOD 中对各产业部门的分类为公开数据，限于篇幅未具体展示，详见 <https://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/wiod-2016-release>。

## 四、实证结果与分析

## (一) 基准回归结果

全球价值链嵌入影响中国产业部门隐含碳排放的基准估计结果如表1所示,其中第(1)列和第(2)列是纳入GVC前向参与度及其平方项的回归结果,第(3)列和第(4)列是纳入GVC后向参与度的回归结果,第(5)列是同时纳入GVC前向参与度及其平方项和GVC后向参与度的回归结果,在第(2)、(4)和(5)列中均纳入了一系列控制变量。

表1 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnECE	lnECE	lnECE	lnECE	lnECE
<i>GVCP_f</i>	4.752*** (3.06)	5.470*** (3.57)			5.500*** (3.47)
<i>GVCP_f</i> <sup>2</sup>	-13.511*** (-3.66)	-13.565*** (-3.98)			-14.488*** (-4.01)
<i>GVCP_b</i>			2.715*** (2.83)	2.256** (2.14)	2.519** (2.49)
<i>es</i>		32.086*** (5.69)		29.563*** (5.23)	29.093*** (5.07)
<i>is</i>		0.215 (0.06)		-0.562 (-0.17)	0.382 (0.12)
<i>ei</i>		-0.000 (-0.29)		0.001 (0.63)	0.001 (0.78)
<i>lnlab</i>		0.004 (0.32)		0.003 (0.22)	0.004 (0.32)
<i>lnpv</i>		0.093 (0.93)		0.007 (0.07)	0.029 (0.28)
行业固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
常数项	9.345*** (73.89)	8.341*** (25.14)	9.245*** (65.90)	8.635*** (29.53)	8.159*** (24.13)
N	705	705	705	705	705
R <sup>2</sup>	0.969	0.972	0.969	0.972	0.973

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示在10%、5%和1%的水平上显著;括号中为t统计量。若无特殊说明,下表同。

在第(1)列和第(2)列中,中国产业部门GVC前向参与度的系数在1%水平上显著为正,GVC前向参与度平方项的系数在1%水平上显著为负,符合“倒U”型曲线变动特征,同时根据Haans等(2016)<sup>[36]</sup>的判定方法,均显著通过“U”型关系检验(见表2)。第(3)列和第(4)列中,中国产业部门GVC后向参与度的系数显著为正,表明以后向嵌入为主的GVC参与方式加剧了中国产业部门的隐含碳排放。考虑到中国产业部门在参与GVC时同时存在前向嵌入和后向嵌入的实际情况,在第(5)列中同时纳入GVC的前向参与度和后向参与度,其中GVC前向参与度对中国产业部门隐含碳排放的影响呈现出显著的“倒U”型特征,

并且对隐含碳排放的减排效应远大于增长效应，假说1得证。这主要是因为参与GVC的过程中，中国产业部门最初由于生产能力和技术水平相对落后，承接了发达国家或地区相关生产环节的污染转移，但随着GVC前向参与度的不断加深，以高端研发和先进制造为代表的前向嵌入方式由于具有较大的比较优势，对中国产业部门的减排效应显著增强。同时，GVC后向参与度显著促进了中国产业部门的隐含碳排放，假说2得证，这是由于以粗加工为代表的后向嵌入方式往往参与较为低端的生产环节，也较为依赖进口国家的技术和产品，并长期被锁定在价值链的下游，因此参与GVC对隐含碳排放的增长效应明显。

结合表2发现，在基于前向嵌入的GVC参与方式中，中国产业部门隐含碳排放由增加变为下降的拐点为0.191，而样本期内GVC前向参与度的均值为0.117，表示大部分产业部门位于拐点左侧，处于GVC前向参与度促进隐含碳排放增长的阶段。具体来看，在样本期内有41个产业部门的GVC前向参与度位于“倒U”型曲线的左侧，仍处于GVC前向参与度对隐含碳排放的促进阶段，同时仅有6个产业部门已越过拐点。这是由于，一方面在以提供中间品为主的方式参与GVC的过程中，发达国家主导的全球价值链和较高的环境规制水平限制了我国价值链的升级；另一方面与中间品的属性有关，低技术和低附加值产品的发展同时面临污染转移和低端锁定的双重阻碍。

表2 GVC前向参与度与产业部门隐含碳的“U”型关系检验

“U”型关系检验	第(1)列的检验	第(2)列的检验	第(5)列的检验
t值	3.05	3.51	3.35
拐点	0.176	0.202	0.191
95%置信区间	[0.105, 0.242]	[0.142, 0.264]	[0.129, 0.251]
“U”型两侧斜率	4.711, -6.520	5.428, -5.848	5.345, -6.408
关系	“倒U”型	“倒U”型	“倒U”型

## (二) 内生性分析和稳健性检验

### 1. 内生性分析

上述回归结果虽然证明了GVC前向参与度对中国产业部门隐含碳排放影响的“倒U”型特征以及GVC后向参与度对中国产业部门隐含碳排放的线性促进作用，但可能会存在遗漏变量和反向因果的内生性问题，从而使得估计结果有偏和不一致。为缓解该问题，采用滞后期工具变量的方法，滞后期GVC参与度对当期GVC参与度存在直接影响，并与当期的误差扰动项无关，因此符合工具变量选择的基本要求。通过Hausman检验和弱工具变量检验发现，表3回归结果拒绝所有解释变量为外生变量的假设，同时各列的F检验值均满足假设条件。因此，本文将GVC前向参与度及其平方项和GVC后向参与度的滞后一期分别作为工具变量，运用两阶段最小二乘法进行工具变量回归。表3第(5)列中GVC前向参与度对中国产业部门隐含碳排放的影响呈显著的“倒U”型，同时GVC后向参与度对中国产业部门隐含碳排放的影响为正，与基准回归结果保持一致，证明本文结论依然成立。

表3 工具变量回归

项目	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>GVCP_f</i>	5.383*** (2.95)	6.411*** (3.65)			6.692*** (3.46)
<i>GVCP_f</i> <sup>2</sup>	-15.338*** (-3.16)	-15.872*** (-3.58)			-18.170*** (-3.49)
<i>GVCP_b</i>			3.935*** (3.77)	3.564*** (3.07)	3.777*** (3.36)
控制变量	否	是	否	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
<i>Cragg-Donald Wald F</i>	250.058	245.953	2385.699	1935.030	163.966
<i>Kleibergen-Paap rk LM</i>	9.980	8.839	1306.602	1197.784	9.990
N	658	658	658	658	658

注：括号中为 *z* 统计量。

## 2. 稳健性检验

为验证研究结果的稳健性，本文还进行了如下稳健性检验：剔除特殊影响、核心解释变量滞后以及替换被解释变量（见表4）。表4第（1）列为剔除金融危机的影响，通过剔除2008年及以后的样本分析金融危机对基准回归结果是否存在冲击效应。第（2）列为考虑中国加入WTO对结果的影响。通过对2002年及以后的

表4 稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	剔除金融危机影响	考虑加入WTO影响	核心解释变量滞后	替换被解释变量
<i>GVCP_f</i>	4.634** (2.25)	4.636*** (2.81)		-2.709*** (-3.12)
<i>GVCP_f</i> <sup>2</sup>	-17.028*** (-4.21)	-10.584*** (-2.81)		6.887*** (3.81)
<i>GVCP_b</i>	4.495** (2.32)	2.813** (2.20)		-2.062** (-2.21)
L. <i>GVCP_f</i>			4.933*** (3.21)	
L. <i>GVCP_f</i> <sup>2</sup>			-12.887*** (-3.59)	
L. <i>GVCP_b</i>			3.250*** (3.31)	
控制变量	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
常数项	7.626*** (19.66)	8.148*** (18.89)	8.172*** (22.30)	-3.006*** (-11.61)
N	376	611	658	705
R <sup>2</sup>	0.976	0.977	0.975	0.923

样本进行分析,判定中国加入WTO是否对基准回归结果存在冲击效应。第(3)列采用核心解释变量滞后一期进行回归。前三列的检验均至少在5%水平上显著,并与基准回归结果保持一致,验证了基准回归结果的稳健性。第(4)列为替换被解释变量,将中国产业部门的隐含碳排放替换为隐含碳排放效率。隐含碳排放效率表示产业部门从生产到最终消费全生命周期的碳排放效率水平,其水平高低直接决定了一国或地区的碳排放。通过分析可知,GVC前向参与度对中国产业部门隐含碳排放效率的影响呈“U”型特征,即GVC前向参与度对隐含碳排放效率的影响呈现出先抑制后促进的变动效果,而GVC后向参与度显著降低了隐含碳排放效率,隐含碳排放效率的降低导致产业部门隐含碳排放的增加,这与范德成和刘凯然(2021)<sup>[37]</sup>的研究结论保持一致,进一步证明了研究结论的稳健性。

### (三) 异质性分析

为验证GVC嵌入对中国产业部门隐含碳的影响是否存在异质性,根据吕越和吕云龙(2019)、赵玉焕等(2021)的分类方法,进一步将中国产业部门细分为技术密集型和非技术密集型行业、污染密集型和非污染密集型行业,分析全球价值链嵌入对不同属性产业部门的异质性影响(见表5)。表5第(1)列和第(2)列是对技术密集型和非技术密集型行业的估计结果,第(3)列和第(4)列是对污染密集型和非污染密集型行业的估计结果。通过“U”型关系检验发现,GVC前向参与度对污染密集型行业隐含碳的影响不是非线性的,对其他类型行业隐含碳的影响均为非线性。

表5 产业部门异质性检验

项目	(1)	(2)	(3)	(4)
	技术密集型	非技术密集型	污染密集型	非污染密集型
$GVCP\_f$	-44.605*** (-6.98)	7.117*** (4.31)	-1.980* (-1.97)	5.006*** (3.16)
$GVCP\_f^2$	76.449*** (6.16)	-20.327*** (-5.10)		-13.186*** (-3.38)
$GVCP\_b$	-4.829** (-2.36)	3.225*** (3.05)	2.617** (2.19)	4.438*** (3.89)
控制变量	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
常数项	12.189*** (12.01)	8.392*** (26.44)	10.625*** (26.46)	7.496*** (18.79)
N	105	600	105	600
R <sup>2</sup>	0.987	0.977	0.994	0.968
“U”型关系检验	通过	通过	未通过	通过

综合对比第(1)列和第(2)列发现,GVC前向参与度对技术密集型行业隐含碳的影响在1%水平上呈显著的“U”型特征,而对非技术密集型行业隐含碳的影响在1%水平上呈显著的“倒U”型特征,表明技术密集型行业在前向嵌入GVC的过程中率先实现了低碳发展,而非技术密集型行业最初在提供中间品为主的贸易

参与方式中,技术水平和生产能力等方面缺乏比较优势,所提供的中间品往往以大量的能源消耗为代价,从而促进了隐含碳的增长。但伴随着 GVC 前向参与水平的不断提高,非技术密集型行业获得技术进步的溢出和要素资源的重新配置,在此过程中降低了隐含碳排放。同时,GVC 后向参与度显著降低了技术密集型行业的隐含碳排放,而促进了非技术密集型行业的隐含碳排放,这是由于非技术密集型行业较为依赖中间进口产品,基于后向嵌入的 GVC 参与方式通过中间品的进口加剧了非技术密集型行业的隐含碳排放,而这种影响随着产业链和技术的升级逐渐减弱。

综合对比第(3)列和第(4)列发现,GVC 前向参与度显著降低了污染密集型行业的隐含碳排放,而对非污染密集型行业隐含碳排放的影响呈显著的“倒 U”型特征,可能的原因在于参与 GVC 提升了污染密集型行业的准入要求,倒逼污染密集型行业进行技术革新和低碳化发展,使其在向价值链高端攀升的过程中降低了碳排放,同时伴随着低碳技术进步和对发达国家的学习效应,非污染密集型行业在参与全球价值链的过程中逐步实现了低碳发展。GVC 后向参与度显著促进了污染密集型和非污染密集型行业的隐含碳排放,这由 GVC 后向参与度的内在机理决定,其表示产业部门主要参与价值链的低端环节,在后向嵌入的过程中,产业部门承接了发达国家的污染转移并难以突破低附加值和高排放的限制。

### 五、拓展性分析:产业数字化的调节效应

根据上述分析,GVC 前向参与度对中国产业部门隐含碳的影响呈“倒 U”型,但当前大多数产业部门尚未越过拐点,同时 GVC 后向参与度显著促进了中国产业部门的隐含碳排放。如何驱动中国产业部门提前实现 GVC 嵌入的低碳效应,在拐点前降低产业部门隐含碳的增速以及减小 GVC 后向参与度对中国产业部门隐含碳的促进作用等问题值得进一步研究。

数字经济作为快速优化配置资源的重要工具,自十八大以来得到了党中央的高度重视,为中国产业部门参与 GVC 提供了新的发展动力,也是中国实现产业升级和“双碳”目标的重要推力。同时数据要素作为新的投入资源,在促进能源结构转型、推动技术进步和提升碳排放效率方面具有较大的发展优势。那么在数字经济时代,中国产业部门嵌入 GVC 的碳排放效应将呈现何种变化?基于此,本文将产业数字化纳入研究框架,研究产业数字化对 GVC 嵌入影响中国产业部门隐含碳排放的调节效应,并构建如下调节效应模型:

$$\ln ECE_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 GVCP_{-f_{it}} + \gamma_2 GVCP_{-f_{it}^2} + \gamma_3 dig_{it} + \gamma_4 GVCP_{-f_{it}} \times dig_{it} + \gamma_5 GVCP_{-f_{it}^2} \times dig_{it} + \gamma_6 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$\ln ECE_{it} = \delta_0 + \delta_1 GVCP_{-b_{it}} + \delta_2 dig_{it} + \delta_3 GVCP_{-b_{it}} \times dig_{it} + \delta_4 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

$$\ln ECE_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 GVCP_{-f_{it}} + \varphi_2 GVCP_{-f_{it}^2} + \varphi_3 dig_{it} + \varphi_4 GVCP_{-f_{it}} \times dig_{it} + \varphi_5 GVCP_{-f_{it}^2} \times dig_{it} + \varphi_6 GVCP_{-b_{it}} + \varphi_7 GVCP_{-b_{it}} \times dig_{it} + \varphi_8 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

其中,  $dig_{it}$  表示产业数字化水平,  $GVCP\_f_{it} \times dig_{it}$  和  $GVCP\_f_{it}^2 \times dig_{it}$  分别表示 GVC 前向参与度及其平方项和产业数字化的交互项,  $GVCP\_b_{it} \times dig_{it}$  表示 GVC 后向参与度和产业数字化的交互项。其他变量与基准模型设定一致。

表 6 中第 (1) — (3) 列分别汇报产业数字化对 GVC 前向参与度、GVC 后向参与度以及融合 GVC 前向和后向参与度对中国产业部门隐含碳排放影响的调节效应。根据 Haans 等 (2016) 对“U”型关系调节效应的判定方法<sup>①</sup>, 从拐点的移动和曲线的斜率两方面衡量产业数字化的调节效应, 第 (1) 列和第 (3) 列的拐点左移表明产业数字化提前了中国产业部门隐含碳排放由增加变为下降的拐点; 同时, GVC 前向参与度的平方项与产业数字化交互项的系数为正, 在经济意义上表明 GVC 前向参与度对中国产业部门隐含碳排放影响的“倒 U”型曲线变得平坦, 即产业数字化在拐点前减弱了 GVC 前向参与度对隐含碳排放的促进作用, 增强了 GVC 嵌入的低碳效应, 假说 3 得证。由于样本期内大部分产业部门的 GVC 前向参与度尚未越过拐点, 在纳入产业数字化后中国产业部门隐含碳排放的增速有所放缓。在第 (3) 列中, 从产业数字化对 GVC 后向嵌入影响产业部门隐含碳的调节效应来看, 产业数字化一定程度上减弱了 GVC 后向参与度对中国产业部门隐含碳排放的促进作用。

表 6 产业数字化对 GVC 嵌入影响产业部门隐含碳的调节效应

项目	(1)	(2)	(3)
$GVCP\_f$	7.450*** (4.26)		7.743*** (4.39)
$GVCP\_f^2$	-17.370*** (-4.61)		-17.553*** (-4.67)
$GVCP\_f \times dig$	-17.073* (-1.66)		-18.423* (-1.76)
$GVCP\_f^2 \times dig$	31.046 (1.28)		31.155 (1.27)
$GVCP\_b$		1.483 (1.59)	2.115*** (3.14)
$GVCP\_b \times dig$		0.642 (1.19)	-0.239 (-0.29)
$dig$	2.790*** (2.76)	0.198 (0.72)	2.436** (2.43)
控制变量	是	是	是
行业固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
N	705	705	705
R <sup>2</sup>	0.973	0.972	0.974
拐点移动方向	左移		左移

①Haans et al. (2016) 认为 U 型关系的调节效应主要在于两方面: 以 GVC 前向参与度为例, 一是 U 型曲线拐点的移动, 当  $\gamma_1\gamma_5 - \gamma_2\gamma_4 > 0$  时, 曲线的拐点右移, 反之左移。二是观察  $\gamma_5$  的系数判定曲线的斜率, 若为倒 U 型曲线, 当  $\gamma_5 > 0$  时, 曲线变平缓, 反之曲线变陡峭; 若为 U 型曲线, 当  $\gamma_5 > 0$  时, 曲线变陡峭, 反之曲线变平缓。

## 六、结论与政策启示

本文基于2000—2014年世界投入产出表和欧盟公布的WIOD账户数据,研究了全球价值链嵌入对中国产业部门隐含碳排放的影响,并分析了产业数字化对上述影响的调节效应,得到如下结论:第一,整体而言,GVC前向嵌入对中国产业部门隐含碳排放的影响呈“倒U”型,但当前大多数产业部门尚未越过拐点,仍处于GVC前向参与促进中国产业部门隐含碳排放增长的阶段,同时GVC后向嵌入促进了中国产业部门隐含碳排放,这由GVC嵌入的内在机理和中国产业部门GVC嵌入的综合水平共同决定。第二,行业异质性显示,GVC前向和后向嵌入均降低了技术密集型行业和污染密集型行业的隐含碳排放,其中对技术密集型行业隐含碳排放的减排效果更强。第三,调节效应显示,在GVC前向参与度的分析中,产业数字化提前了中国产业部门隐含碳排放由增加变为下降的拐点,并在拐点前降低了产业部门隐含碳排放的增速,同时一定程度上减弱了GVC后向参与度对中国产业部门隐含碳排放的促进作用。

基于上述研究结论,结合中国产业部门隐含碳排放的变动特征和演变规律,提出如下促进中国产业部门低碳发展的对策建议。

第一,深度融入全球化,提升全球价值链前向嵌入度。以提供中间品为主的GVC前向参与方式可在全球产业分工中有效配置要素资源,而实证分析显示中国产业部门的GVC前向参与度仍然处于较低水平,因此应当结合中国产业部门的发展特色和具有全品类产品生产制造能力的发展优势,借助“一带一路”和区域全面经济伙伴关系协定(RCEP)等平台深度融入全球化,重点提升全球价值链的前向参与度,提高产业部门在研发设计和高端制造等领域的参与水平,积极向中高端价值链迈进,在摆脱发达国家低端锁定的同时增强产业部门发展的核心竞争力。第二,有效利用技术要素,促进产业部门技术升级。技术进步对产业部门的高质量发展具有重要的驱动作用,实证结果显示全球价值链的前向和后向嵌入均对技术密集型行业的隐含碳排放具有较强的抑制效果,因此一方面应强化技术密集型行业的低碳效应,形成产业部门低碳发展的标杆,另一方面以技术密集型行业带动传统行业实现技术迭代,提升产业部门低碳发展的技术驱动效应,并进一步促进产业部门的协同发展。第三,提高产业数字化水平,以新动能带动经济高质量发展。数字经济为全球资源配置提供了更加快速和便利的发展平台,实证分析显示产业数字化提前了中国产业部门隐含碳排放由增加变为下降的拐点,因此应当结合中国在区块链和人工智能等领域的发展优势,进一步将其应用到中国产业部门的生产制造等环节中,通过数字经济的发展打造产业增长的新动力和向价值链高端攀升的新引擎。

### [参考文献]

- [1] 张其仔,许明.中国参与全球价值链与创新链、产业链的协同升级[J].改革,2020(6):58-70.
- [2] WANG Z, LI Y, CAI H, et al. Regional Difference and Drivers in China's Carbon Emissions Embodied in Internal Trade [J]. Energy Economics, 2019 (83): 217-228.

- [3] KOOPMAN R, POWERS W M, WANG Z, et al. Give Credit Where Credit is Due: Tracing Value Added in Global Production Chains [R]. NBER Working Paper, 2010, No. 16426.
- [4] KOOPMAN R, WANG Z, WEI S J. Tracing Value-added and Double Counting in Gross Exports [J]. American Economic Review, 2014, 104 (2): 459-494.
- [5] UPWARD R, WANG Z, ZHENG J. Weighing China's Export Basket: The Domestic Content and Technology Intensity of Chinese Exports [J]. Journal of Comparative Economics, 2013 (41): 527-543.
- [6] WANG Z, WEI S J, YU X D, et al. Measures of Participation in Global Value Chain and Global Business Cycles [R]. NBER Working Paper, 2017, No. 23222.
- [7] 唐宜红, 张鹏杨. 中国企业嵌入全球生产链的位置及变动机制研究 [J]. 管理世界, 2018, 34 (5): 28-46.
- [8] 余泳泽, 容开建, 苏丹妮, 等. 中国城市全球价值链嵌入程度与全要素生产率——来自 230 个地级市的经验研究 [J]. 中国软科学, 2019, 341 (5): 80-96.
- [9] 赵文涛, 盛斌. 全球价值链与城市产业结构升级: 影响与机制 [J]. 国际贸易问题, 2022 (2): 54-69.
- [10] 刘维林, 李兰冰, 刘玉海. 全球价值链嵌入对中国出口技术复杂度的影响 [J]. 中国工业经济, 2014, 315 (6): 83-95.
- [11] QIAN F, HONG J, FANG T, et al. Global Value Chain Embeddedness and Innovation Efficiency in China [J]. Technology Analysis & Strategic Management, 2021 (7): 1-15.
- [12] 张弘媛, 丁一兵. 全球价值链嵌入与绿色全要素能源效率——来自中国制造业的证据 [J]. 浙江社会科学, 2022, 306 (2): 4-13+26+155.
- [13] 刘维林. 中国式出口的价值创造之谜: 基于全球价值链的解析 [J]. 世界经济, 2015, 38 (3): 3-28.
- [14] 杨飞, 孙文远, 张松林. 全球价值链嵌入、技术进步与污染排放——基于中国分行业数据的实证研究 [J]. 世界经济研究, 2017, 276 (2): 126-134+137.
- [15] BEVERELLI C, STOLZENBURG V, KOOPMAN R B, et al. Domestic Value Chains as Steppingstones to Global Value Chain Integration [J]. The World Economy, 2019, 42 (5): 1467-1494.
- [16] 吴肖丽, 潘安. 出口开放对中国工业碳排放的非线性影响研究 [J]. 国际经贸探索, 2019, 35 (6): 17-32.
- [17] 蔡礼辉, 张朕, 朱磊. 全球价值链嵌入与二氧化碳排放——来自中国工业面板数据的经验研究 [J]. 国际贸易问题, 2020 (4): 86-104.
- [18] 赵玉焕, 郑璐, 刘似臣. 全球价值链嵌入对中国出口贸易隐含碳的影响研究 [J]. 国际贸易问题, 2021 (3): 142-157.
- [19] 詹晓宁, 欧阳永福. 数字经济下全球投资的新趋势与中国利用外资的新战略 [J]. 管理世界, 2018, 34 (3): 78-86.
- [20] 齐俊妍, 任奕达. 数字经济渗透对全球价值链分工地位的影响——基于行业异质性的跨国经验研究 [J]. 国际贸易问题, 2021 (9): 105-121.
- [21] MIAO Z. Digital Economy Value Chain: Concept, Model Structure, and Mechanism [J]. Applied Economics, 2021, 53 (37): 4342-4357.
- [22] 郭周明, 裘莹. 数字经济时代全球价值链的重构: 典型事实、理论机制与中国策略 [J]. 改革, 2020 (10): 73-85.
- [23] 孙志燕, 郑江淮. 从“低成本”优势向数字经济大国优势转变的政策选择 [J]. 改革, 2021 (12): 59-68.
- [24] 张晴, 于津平. 投入数字化与全球价值链高端攀升——来自中国制造业企业的微观证据 [J]. 经济评论, 2020, 226 (6): 72-89.
- [25] 蒋瑛, 汪琼, 杨骁. 全球价值链嵌入、数字经济与产业升级——基于中国城市面板数据的研究 [J]. 兰州大学学报 (社会科学版), 2021, 49 (6): 40-55.
- [26] 张艳萍, 凌丹, 刘慧岭. 数字经济是否促进中国制造业全球价值链升级? [J]. 科学学研究, 2022, 40 (1): 57-68.
- [27] 龙飞扬, 殷凤. 制造业全球生产分工深化能否提升出口国内增加值率 [J]. 国际贸易问题, 2021 (3): 32-48.
- [28] 李小平, 彭书舟. 进口竞争会促使中国企业更加环保吗——以 SO<sub>2</sub> 的产出和排放为例 [J]. 国际贸易问题, 2022 (3): 87-104.

- [29] 戴翔, 张二震. 全球价值链分工演进与中国外贸失速之“谜” [J]. 经济学家, 2016 (1): 75-82.
- [30] 闫云凤. 中国内资和外资企业在全价值链中的嵌入位置与演进路径研究——基于行业数据的测度 [J]. 上海财经大学学报, 2020, 22 (3): 3-18.
- [31] 江小涓, 孟丽君. 内循环为主、外循环赋能与更高水平双循环——国际经验与中国实践 [J]. 管理世界, 2021, 37 (1): 1-19.
- [32] 吕越, 谷玮, 包群. 人工智能与中国企业参与全球价值链分工 [J]. 中国工业经济, 2020 (5): 80-98.
- [33] 吕越, 吕云龙. 中国参与全球价值链的环境效应分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29 (7): 91-100.
- [34] 杨飞, 范从来. 产业智能化是否有利于中国益贫式发展? [J]. 经济研究, 2020, 55 (5): 150-165.
- [35] GAO P, YUE S, CHEN H. Carbon Emission Efficiency of China's Industry Sectors: From the Perspective of Embodied Carbon Emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283 (1): No. 124655.
- [36] HAANS R, PIETERS C, HE Z. Thinking about U: Theorizing and Testing U- and Inverted U-shaped Relationships in Strategy Research [J]. Strategic Management Journal, 2016, 37 (7): 1177-1195.
- [37] 范德成, 刘凯然. GVC 嵌入对中国工业可持续发展影响研究 [J]. 科学学研究, 2021, 39 (3): 432-441+462.

## Does Global Value Chain Embedding Reduce the Embodied Carbon Emissions of China's Industry Sectors —On the Moderating Effect of Industrial Digitization

GAO Peng YUE Shujing

**Abstract:** Under the background of climate change and economic globalization, it is of great practical significance to study the impact of global value chain (GVC) embedding on the low-carbon development of China's industry sectors. Based on the World Input-Output Database from 2000 to 2014, this paper constructs a multi-regional input-output model to calculate the embodied carbon emissions (ECEs) of China's industry sectors, empirically analyzes the impact of GVC embedding on the ECEs of China's industry sectors, and further investigates the moderating effect of industrial digitization on the above impact. It is found that, on the whole, the impact of GVC forward embedding on the ECEs of China's industry sectors shows an “inverted U” shape, but most industry sectors have not crossed the inflection point in the sample period and are still in the promoting stage of GVC forward embedding on the ECEs. At the same time, GVC backward embedding has a positive impact on the ECEs of China's industry sectors. Industry heterogeneity shows that GVC forward and backward embedding both have a stronger negative effect on the ECEs of technology-intensive industries. In terms of the moderating effect, industrial digitization advances the inflection point from increase to decrease of the ECEs of China's industry sectors. Deep integration into globalization, promoting technological upgrading of industry sectors and improving the level of industrial digitization are effective measures for the low-carbon development of China's industry sectors.

**Keywords:** Global Value Chain; Embodied Carbon Emissions; Industrial Digitization; Input-Output Model; Industry Sectors

(责任编辑 张晨烨)