凌再莉,乔立达,王润雨,等.全球农业贸易中隐含碳排放转移及其影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5894-5906.
Ling Z L, Qiao L D, Wang R Y, et al. CO_2 emission transfer embodied in global agricultural trade and impact factors [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5894-5906.

全球农业贸易中隐含碳排放转移及其影响因素分析

凌再莉[1],乔立达[2],王润雨[3],黄 韬[3*] (1.兰州财经大学农林经济管理学院,甘肃 兰州 730101；2.内蒙古自治区环境监测总站鄂尔多斯分站,内蒙古 鄂尔多斯 017000；3.兰州大学资源环境学院,甘肃省环境污染模拟与控制重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 随着全球农业贸易的快速增长,农业已成为贸易中隐含碳转移的重要部门之一,然而少有研究关注到全球农业贸易隐含碳排放转移及其影响因素,因此,本研究基于区域间投入产出模型和 GTAP(Global Trade Analysis Project)全球投入产出数据定量评估了 2004、2007、2011 和 2014 年全球 141 个国家及地区农业贸易中隐含碳排放,明晰全球农业部门生产侧和消费侧的碳排放特征,探讨全球农业贸易中隐含碳排放转移路径,并利用结构分解分析方法定量分析了全球农业贸易中隐含碳排放的影响因素.结果表明,2004~2014 年期间,生产侧碳排放量较高的地区为中国、美国、拉美地区等全球主要粮食产区,而消费侧碳排放量较高的地区为中国、美国、中东北非等主要农产品消费地.6 个农业部门中,生产侧和消费侧碳排放量最大的均是肉类产品部门;因农业部门的最终需求导致能源部门的碳排放量最大,占导致所有部门总排放量的 40%以上;全球农业贸易中隐含碳净流出地主要有拉美地区和美国,隐含碳净流入地区主要有西欧、中国和中东北非等地区;投入产出结构、最终需求结构以及最终需求规模是促进全球农业贸易中隐含碳排放量增加的影响因素,导致 10a 间全球农业贸易中隐含碳排放量共增加 459.6Mt,其中最终需求规模贡献量最大,占总增加量的 87.8%.全球碳排放强度的降低是主要的抑制因素,导致 10a 间全球农业贸易中隐含碳排放量降低了 458.4Mt.研究结果可从需求驱动的角度为减少全球农业贸易中隐含碳排放提供数据支撑和政策建议.

关键词: 全球农业贸易；碳排放；多区域投入产出模型；结构分解分析
中图分类号: X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)10-5894-13

CO_2 emission transfer embodied in global agricultural trade and impact factors. LING Zai-li[1], QIAO Li-da[2], WANG Rui-yu[3], HUANG Tao[3*] (1.College of Agriculture and Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730101, China；2.The Ordos Sub-station of the Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station, Ordos 017000, China；3.Key Laboratory for Environmental Pollution Simulation and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5894~5906

Abstract：With the rapid growth of global agricultural trade, agriculture has become one of the key sectors of dioxide carbon (CO_2) emission embodied in trade. However, few studies have focused on the transfer of virtual CO_2 emission embodied in global agricultural trade and its driving factors. This study quantitatively estimated CO_2 emissions embodied in agricultural trade for 141 countries and regions worldwide in 2004, 2007, 2011, and 2014, by using the multi-regional input-output (MRIO) model and the GTAP 10 database. The production-based and consumption-based CO_2 emission of the global agricultural sector and virtual CO_2 transfer pathways associated with global agricultural trade were investigated. In addition, the structural decomposition analysis (SDA) method was used to analyze the impact of major driving factors on the CO_2 emissions embodied in global agricultural trade. The results show that the regions with highest production-based CO_2 emissions were the major agricultural producers in the world, including China, the United States, and Latin America. The regions with highest consumption-based CO_2 emissions were the predominantly major agricultural consumers, including China, the United States and the Middle East and North Africa. The meat sector exhibited the largest production-based and consumption-based CO_2 emissions in the six agricultural sectors. The energy sector was the largest contributor to CO_2 emissions due to final demand from the agricultural sector, accounting for more than 40% of total CO_2 emissions induced by agricultural sector. The regions with the net CO_2 outflow embodied in the agricultural trade were the Latin America and the United States, while the Western Europe, China and the Middle East and North Africa were the net CO_2 inflow regions. The input-output structure, final demand structure, and final demand scale are the key drivers that lead to the growth of virtual CO_2 emissions embodied in global agricultural trade, leading to increase of 459.6Mt CO_2 emissions embodied in agricultural

收稿日期: 2025-03-10
基金项目: 甘肃省科技计划项目(22JR11RA135);国家自然科学基金资助项目(42107404);甘肃省自然科学基金资助项目(21JR7RA686)
* 责任作者，教授, huangt@lzu.edu.cn

trade over the past decade. The final demand scale was the largest driver factors, accounting for 87.8% of total growth of virtual CO_2 emissions. The reduction in global CO_2 emission intensity has served as the predominant inhibiting factor for embodied carbon emissions in agricultural trade, resulting in a decrease of 458.4Mt in CO_2 emissions over the past decade. The results can provide data support and policy recommendations for reducing CO_2 emissions embodied in global agricultural trade from a demand-oriented perspective.

Key words：global agricultural trade；CO_2 emission；multi-regional input-output model；structural decomposition analysis

20 世纪 80 年代以来,随着全球人口的增长及人类饮食结构的变化,全球农产品产量迅速增长,农产品种类日益多元化[1].据联合国粮农组织(FAO)统计数据显示,2000~2021 年全球主要作物产量增长了 54%,肉类产量增长了 53%,牛奶产量增长了 58%[2].农业已在支撑全球经济发展,改善人类营养状况,提升人类生活质量等方面起到了关键性的作用.但值得注意的是,农业生产也对全球气候变化造成重大影响.研究显示,农业及其相关产业已成为全球温室气体排放的主要来源,其温室气体排放量已占全球温室气体总排放量的三分之一,且呈现出逐年上升的趋势,1999~2019 年期间,农业及其相关产业排放的温室气体量已增加 16%,预计到 2030 年还会继续增加 10%[3-5].目前,农业及其相关产业已成为温室气体排放最重要的经济部门之一[6],如果不采取有针对性的减排措施,仅农业相关的温室气体排放就会导致全球温升超过《巴黎协定》中设定的 1.5℃的目标[7-8].据粮农组织统计,2020 年全球粮食系统贡献了 21%的二氧化碳(CO_2)、53%的甲烷(CH_4)和 78%的一氧化二氮(N_2O)排放[9],其中 CO_2 因其排放量大且存留时间长,对全球气候变化起到了关键性的作用[10].

因全球各地区在气候、土壤、土地利用、人口、经济等各方面均存在显著差异,导致各地区农业发展状况迥异.为解决全球粮食危机,满足不同地区人民对农产品日益多元化的需求,农业贸易已成为其中的重要手段之一.1961~2021 年,全球农产品进出口贸易总量及贸易总额分别增长了 8 倍和 54 倍,其增长速度甚至超过了农产品本身的增长速度,极大的扩展了全球农产品供应链[9].目前,在全球农产品贸易规模迅速增长的背景下,较少有研究关注到国际农产品贸易中隐含 CO_2 排放及其转移问题,农产品生产过程中生产地和消费地在空间上的分离必然会导致农业生产过程中碳排放及其在地区间的转移,造成碳排放责任的空间划分不平等,引发全球各地区之间碳减排的不公平性问题.

为了解决贸易中的碳不公平性问题,有学者主张以消费侧代替生产侧来进行碳排放的核算,因为作为产品最终需求的消费者才是产品生产的最终驱动力.以此为基础,从消费侧角度探讨地区间贸易中隐含碳转移逐渐成为研究热点[11-15].研究表明在国际贸易中发达国家存在向发展中国家进行碳转移的现象[16].例如,中美贸易使中国在获得贸易顺差的同时承担了更高的环境成本,而美国获得了显著的环境利益[17].德美贸易中德国为隐含碳净流出国,但两国均有向发展中国家进行碳转移的趋势[18].此外,发展中国家间的贸易也存在碳转移现象,一些能源密集型产业也已将碳从中国、印度等国家转移至其他发展中国家[19].可见,从消费的角度考虑贸易可使碳从产品的进口国转移至出口国,改变全球各地区之间碳排放总量及格局.那么,随着全球农业贸易速度和规模的快速增长,全球农业贸易中隐含碳排放量已逐年上升,农业部门隐含碳转移排放量已从全球 26 个行业中的第 6 位上升至第 4 位[20].农业已成为贸易中隐含碳转移的重要部门之一.因此,探究全球农业贸易中各地区之间隐含碳的转移路径及转移量,并寻找影响其碳排放变化的原因尤为重要.

基于投入产出模型的结构分解法(SDA)因其能够全面分析各种直接或间接的影响因素,已成为探究碳排放变化原因的重要工具之一[21-24].研究显示发展中国家的碳排放增加的主要驱动力是经济规模的增长,而本国直接碳排放强度的下降是其减排的主要因素[25-26];发达国家则更多的依赖技术效应,例如行业排放效率的提高实现减排[27];此外,结构效应也是发达国家进口隐含碳增加,发展中国家出口隐含碳增加的主要驱动力[28].该方法可揭示碳排放变化的深层驱动因素,其分析结果可为差异化减排政策提供科学依据.

从现有研究可见,针对贸易中隐含碳排放的研究很多,但较少有研究涉及全球农产品贸易中隐含

碳排放转移及其影响因素分析.本研究基于区域间投入产出模型和 GTAP 全球投入产出数据定量测算了 2004 年、2007 年、2011 年和 2014 年全球 141 个国家及地区农业贸易中隐含碳排放,明晰全球农业部门生产侧和消费侧的碳排放特征,探讨全球农业贸易中隐含碳排放转移路径.利用 SDA 方法定量分析全球农业贸易中隐含碳排放的主要影响因素,从需求驱动的角度为减少全球农业贸易中隐含碳排放提供数据支撑和政策建议.

1 研究方法与数据来源

1.1 区域间投入产出模型

为了能够追踪到全球各国农业贸易中碳的排放转移和流动,本文采用 MRIO 模型来进行研究.

区域间投入产出模型中 m 个区域的总产出可以表达为:

$$\begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ X^3 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & A^{13} & & A^{1m} \\ A^{21} & A^{22} & A^{23} & \cdots & A^{2m} \\ A^{31} & A^{32} & A^{33} & & A^{3m} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ A^{m1} & A^{m2} & A^{m3} & \cdots & A^{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ X^3 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ Y^3 \\ \vdots \\ Y^m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:X^i 代表区域 i 的总产出;$\boldsymbol{A}$ 代表直接消耗系数矩阵;$\boldsymbol{Y}$ 代表产品的最终需求.由上式可得到总产出 $\boldsymbol{X}$:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y} \quad (2)$$

通过线性转化,上述方程可以表示为:

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y} \quad (3)$$

式中:$\boldsymbol{L}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 被称为 *Leontief* 逆矩阵,表示区域 i 的产品为满足区域 j 的最终需求而产生的完全需求.

为了计算为满足最终需求 $\boldsymbol{Y}$ 相关的贸易中隐含碳排放,引入 CO_2 的直接排放强度向量 Fi,其计算公式如下:

$$F = E_0/\boldsymbol{X} \quad (4)$$

式中:E_0 表示各地区生产侧的 CO_2 排放总量,该数据可从 GTAP10 数据库中获取.因此,消费侧 CO_2 排放量可由式(5)获得.

$$E = F(I-A)^{-1}\boldsymbol{Y} \quad (5)$$

根据式(5)可以计算出全球各地区农业部门消费侧 CO_2 排放数据,各地区之间消费侧 CO_2 排放量的净差值即为地区间农业贸易中隐含的 CO_2 排放净转移量.

1.2 结构分解分析

结构分解分析是一种基于投入产出模型的定量方法,可以评估不同社会经济因素对能源使用和碳排放的贡献[29-31].本研究使用 SDA 方法对 2004~ 2014 年全球农业贸易中隐含 CO_2 排放变化因素进行分解分析.现有研究表明贸易对环境的影响主要从三个方面进行分析,分别为规模、技术和结构效应.

将最终需求 $\boldsymbol{Y}$ 分解为 $\boldsymbol{Y}=\left[\frac{Y}{iY}\right]\cdot(iY)$.令 $Y_s=\left[\frac{Y}{iY}\right]$,表示最终需求结构,$Ys$ 中的元素表示对应部门的最终需求占最终需求规模的比重,令 $Yv=(iY)$,则 Y 表示最终需求结构(Ys)和最终需求规模(Yv)的乘积.

因此,本研究将农业部门消费侧 CO_2 排放变化结构分解见式(6):

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{L}\cdot\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{L}\cdot Ys\cdot Yv \quad (6)$$

式中:E 表示消费侧 CO_2 排放量;$\boldsymbol{F}$ 是 CO_2 排放强度对角线矩阵;$\boldsymbol{L}$ 代表投入产出结构的 *Leontief* 逆矩阵.

不同年份基于消费侧 CO_2 排放量变化可分解为:

$$\Delta E=E_1-E_0=F_1\cdot L_1\cdot Ys_1\cdot Yv_1-F_0\cdot L_0\cdot Ys_0\cdot Yv_0 \quad (7)$$

ΔE 表示消费侧碳排放的变化量,0 和 1 分别表示基准期和计算期.公式(7)表示一个因素变动而其他因素保持不变所引起的排放变化,由此得出该因素对排放变化的贡献.本研究采用两级分解法,将消费侧 CO_2 排放变化分解为碳排放强度效应 ΔE_F、反映各个生产部门间的关联关系的投入产出结构效应 ΔE_L、最终需求结构效应 ΔE_{Ys} 和最终需求规模效应 ΔE_{Yv}.

$$\begin{aligned}\Delta E = \Delta E_F + \Delta E_L + \Delta E_{Ys} + \Delta E_{Yv} = \\ \frac{1}{2}(\Delta F\cdot L_0\cdot Ys_0\cdot Yv_0 + \Delta F\cdot L_1\cdot Ys_1\cdot Yv_1) + \\ \frac{1}{2}(F_1\cdot \Delta L\cdot Ys_0\cdot Yv_0 + \Delta L\cdot Ys_1\cdot Yv_1) + \\ \frac{1}{2}(F_1\cdot L_1\cdot \Delta Ys\cdot Yv_0 + F_0\cdot L_0\cdot \Delta Ys\cdot Yv_1) + \\ \frac{1}{2}(F_1\cdot L_1\cdot Ys_1\cdot \Delta Yv + F_0\cdot L_0\cdot Ys_0\cdot \Delta Yv)\end{aligned} \quad (8)$$

1.3 数据来源及处理

1.3.1 数据来源 美国普渡大学全球贸易研究中心依托新古典经济理论的一般均衡模型开发的全球贸易分析模型(GTAP)已被广泛用于全球 MRIO

模型的构建.本研究采用 2019 年发布的 GTAP 10 数据集中 2004、2007、2011 和 2014 年的全球 141 个经济体的 65 个部门间的经济活动数据,研究全球农业部门生产侧和消费侧 CO_2 排放特征,探究全球农业贸易中隐含 CO_2 排放转移路径.

1.3.2　研究区域及数据处理　为便于研究与分析,本研究根据各个国家地区的经济发展水平及地理位置将全球 141 个国家和地区合并为 14 个区域(见图 1).将 GTAP 数据库中 18 个农业相关行业合并为 6 大类(表 1).

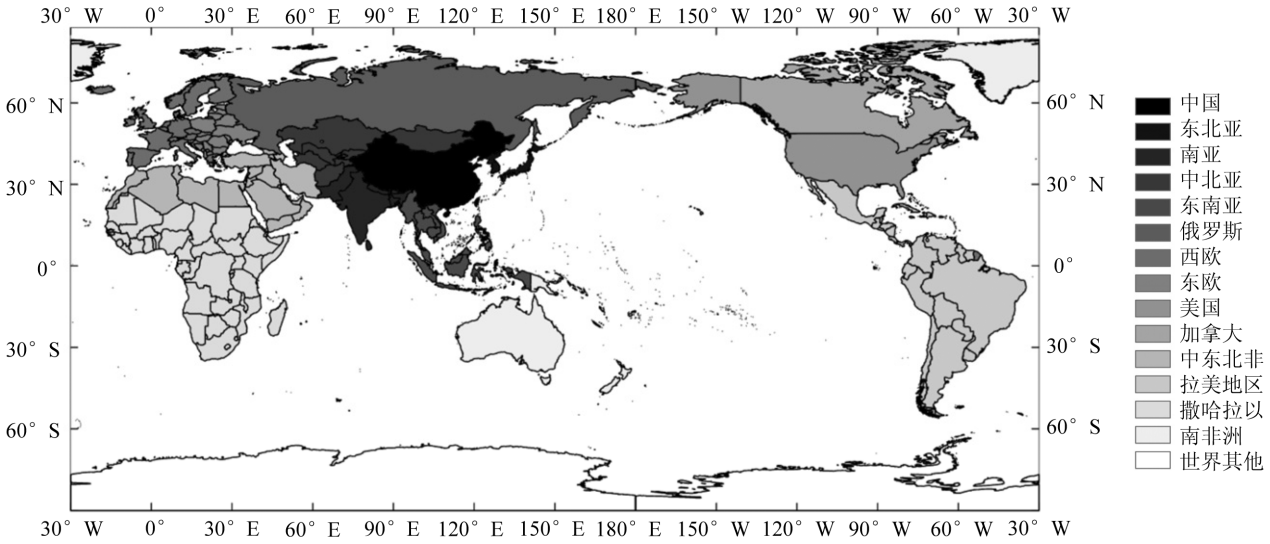


图 1　全球区域划分

Fig.1　Global regional division

审图号:GS(2016)1663

表 1　GTAP 数据库中农业部分划分表

Table 1　Agricultural sector classification in the GTAP

合并部门	GTAP 部门代码	GTAP 部门名称	合并部门	GTAP 部门代码	GTAP 部门名称
谷物	1	水稻	肉类产品	9	牛,绵羊和山羊,马
	2	小麦		10	未另分类的动物产品
	3	杂粮谷类谷物		14	渔业
	23	加工大米		19	牛肉制品
水果蔬菜	4	蔬菜,水果,坚果		20	肉类新产品
其他作物	5	油种子	乳制品	11	生牛奶
	6	甘蔗,甜菜		22	乳制品
	7	植物纤维		21	植物油脂
	8	作物未另分类	其他食品	24	糖

2　结果与分析

2.1　全球农业部门生产侧与消费侧碳排放特征

2.1.1　时间排放特征　如图 2(a)、2(b),从生产侧角度考查农业部门排放仅占全球 CO_2 排放总量的 1.8%~2.2%,说明其不是全球 CO_2 排放的主要部门;然而从消费侧角度考查,农业部门消费侧 CO_2 排放量占总排放量比例高达 23.7%~26.3%.这一显著差异说明,从全产业链角度衡量,为满足农产品消费导致的 CO_2 排放量占全球总排放量的 1/4,因此本研究对全球农业部门消费侧的探讨十分必要.

2.1.2　空间排放特征　图 3 显示出全球 14 个地区农业部门生产侧和消费侧 CO_2 的空间排放及变化特征.从生产侧来看(图 3(a)),中国是 CO_2 排放量最多的国家,主要原因为中国人口众多,粮食总产量约占世界粮食总产量的四分之一,长期居世界首位,为保障世界粮食安全做出了积极贡献.排放量处于第二位的是美国,该国拥有全球最多的耕地,同时也是农业生产现代化程度最高的国家,农业生产效率位居世界前列,粮食产量仅次于中国.此外,拉美地区、西欧和南亚的 CO_2 排放也一直处于较高水平.其中巴西是全球主要的大豆生产国,阿根廷的畜牧业较为发达,西欧地区的法国,南亚地区的印度、孟加拉国、巴基斯坦等国家和地区因气候适宜、土壤肥沃都是

主要的粮食产区.与之形成鲜明对比的区域是撒哈拉以南非洲、中北亚、世界其他及东北亚等地区,上述地区农业部门生产侧CO_2排放一直处于较低水平,主要原因是土地贫瘠、自然条件恶劣或常年战乱等自然或人为因素严重影响了当地的农业生产,使得其中人口较为稠密的地区面临严重的粮食危机.因此从生产角度考虑如何在保证农产品产量和质量的前提下,通过农业生产技术的提高,推行农业绿色生产方式,减少农药、化肥、农膜等农资的使用等措施来减少农业生产过程中CO_2的排放量十分必要.从消费侧来看(图 3(b)),中国、美国、南亚、中东北非等地区的消费侧 CO_2 排放一直处于较高水平,这与上述地区较大的人口规模、较高品质的饮食结构和可能存在的食物浪费等因素相关.而撒哈拉以南非洲虽然人口较多,但其消费侧 CO_2 排放却很低,原因是经济落后导致人们没有足够的粮食消耗.因此,对于消费侧 CO_2 排放较高的国家,应通过采取调整饮食结构,减少过度的肉类消费;减少农产品在供应链中的损耗;减少农产品的浪费等方式减少消费侧 CO_2 排放.

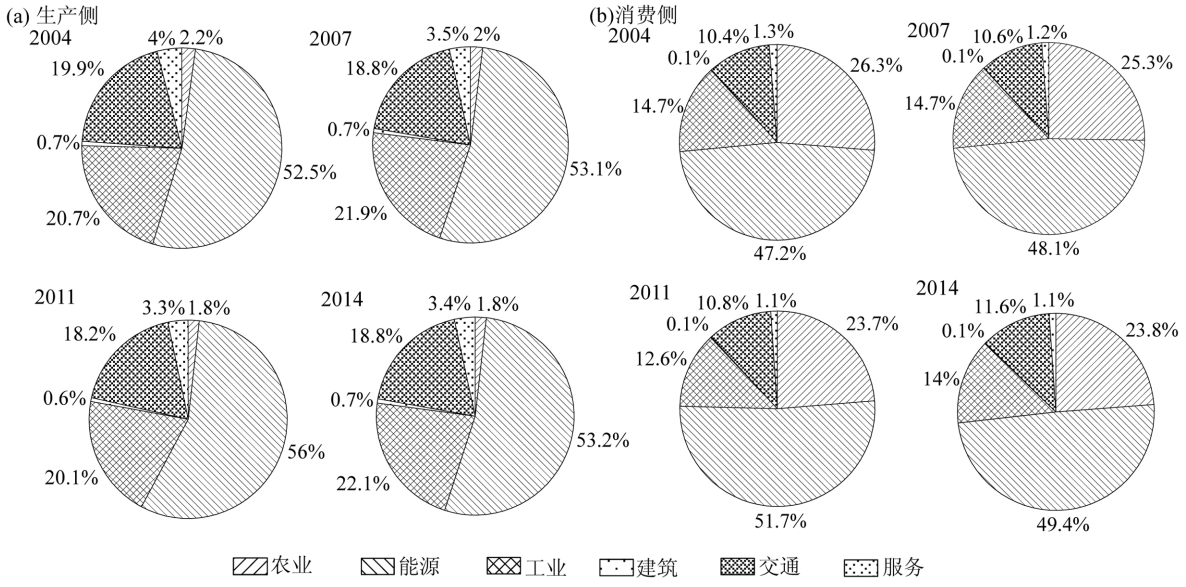


图 2 2004、2007、2011 和 2014 年全球农业部门生产侧、消费侧 CO_2 排放占全球总生产侧、消费侧 CO_2 排放比例

Fig.2 The percentages of production-based and consumption-based CO_2 emissions from of the global agricultural sector accounted to the global total production-based and consumption-based CO_2 emissions in 2004, 2007, 2011 and 2014

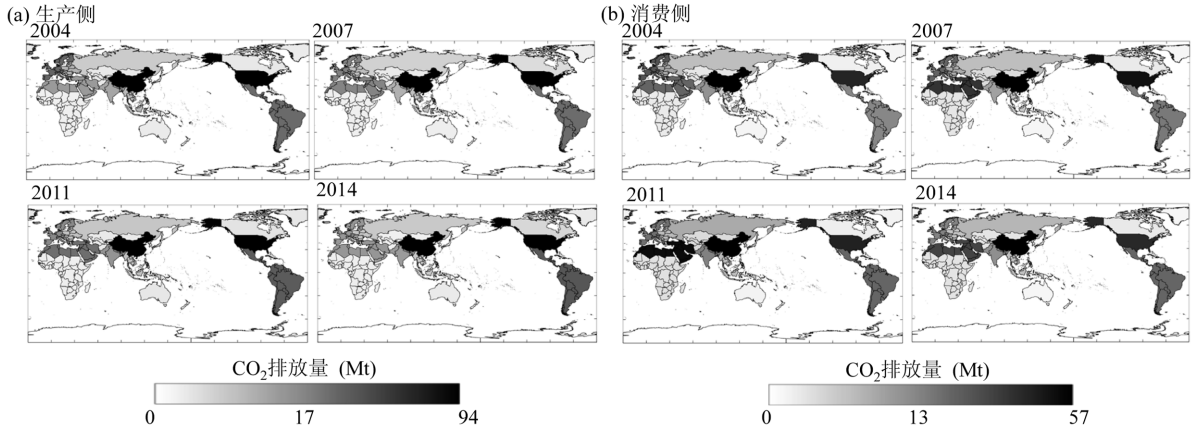


图 3 2004、2007、2011 和 2014 年全球各地区农业部门生产侧、消费侧 CO_2 排放空间分布

Fig.3 Spatial distribution of production-based and consumption-based CO_2 emissions from agricultural sector in different regions in 2004, 2007, 2011 and 2014

审图号:GS(2016)1663 号

2.1.3　部门排放特征　将农业部门细分为 6 个部门后进一步分析发现 2004、2007、2011 和 2014 年生产侧 CO_2 排放量最多的部门是肉类产品部门,且占整个农业部门生产侧排放总量的比例逐年升高,10a 间从 25.5%上升至 27%,反映出全球人口增长和生活水平提高带来的肉类需求持续增加[32].谷物部门生产侧 CO_2 排放量占比从 22%下降至 20.8%,位居第二.2004 年其他作物部门生产侧 CO_2 排放量占比位居第三,但在 2007~2011 年水果蔬菜部门超过了其他作物部门,跃居第三位,表明健康饮食理念推动的果蔬消费增长已产生显著的环境效应.随后则是其他作物、乳制品和其他食品部门(图 4(a)).从消费侧来看,CO_2 排放量最大的部门仍然是肉类产品部门,且10a间的占比从28%增加到30.1%,说明肉类产品在全球饮食结构中占据重要地位.谷物部门消费侧 CO_2 排放量占比呈持续下降趋势,从 2004 年的第二位(22%)下降至 2007 年的第三位(16.9%),此后占比虽小幅提升,但仍位居第三,10a 间降幅达 4.1%.水果蔬菜部门则从 2004 年的第三位(19%)稳步上升,自 2007 年起取代谷物成为第二大排放源.其他作物与乳制品部门在第四位的排名上交替变化:其他作物部门在 2004 年(14.6%)和 2014 年(13.8%)位列第四,而乳制品在 2007 年(15%)和 2011 年(14.8%)期间占据第四,显示两者的消费侧 CO_2 排放水平较为接近.其他食品部门始终保持着最低的排放占比,处于第六位.

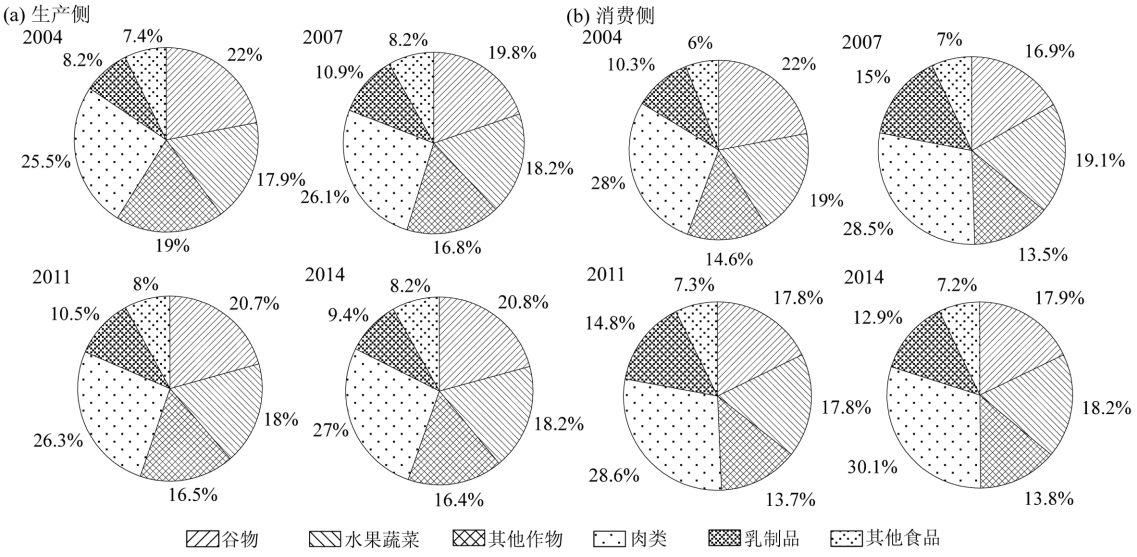


图 4　2004、2007、2011 和 2014 年全球 6 个农业部门生产侧、消费侧 CO_2 排放占农业部门总生产侧、消费侧 CO_2 排放比例

Fig.4　The percentages of production-based and the consumption-based CO_2 emissions from the six agricultural sectors accounted for global total production-based and consumption-based CO_2 emissions from agricultural sector in 2004, 2007, 2011 and 2014

2.1.4　农业部门导致的其他部门的排放特征　在农业生产活动中需要消耗其他生产部门的产品,因此对其他部门的碳排放量产生直接或间接的影响.探究因农业部门的最终需求导致的全球各产业部门的排放情况,可进一步明晰农业生产对全球各地区各产业部门的碳排放产生的影响(图 5、图 6).本研究将 GTAP 10 中全球 65 个部门划分为农业、能源、工业、建筑、交通和服务 6 个部门,研究结果显示因农业部门的最终需求导致能源部门的 CO_2 排放量最大,该部门的 CO_2 排放量占比达到总排放量的 40%以上.细分到农业的各部门中,因谷物部门的最终需求导致的能源部门 CO_2 排放量占总排放量的比例从 2004 年的 50.1%增长到 2014 年的 58.2%,这与谷物部门在生产过程中农用机械使用传统化石燃料高度相关.因此,推广生物质能、太阳能、风能等低碳清洁能源驱动的农用机械设备,对降低谷物部门的 CO_2 排放至关重要.此外,因肉类产品的最终需求导致能源部门 CO_2 排放量占总排放量的比例从 43.2%上升至 44.2%,农业部门自身的 CO_2 排放量占总排放量的比例稳定在 24%左右,这与肉类产品在生产加工过程中使用传统化石燃料和大量依靠谷物、水果蔬菜、其他作物等部门提供饲料密切相关(图 5).因此,肉类部门是农业生产中导致全球各产业部门 CO_2 排放量最高的农业部门,

可通过减少人们对肉类产品的消费量,较大幅度的 减少全球农业碳排放.

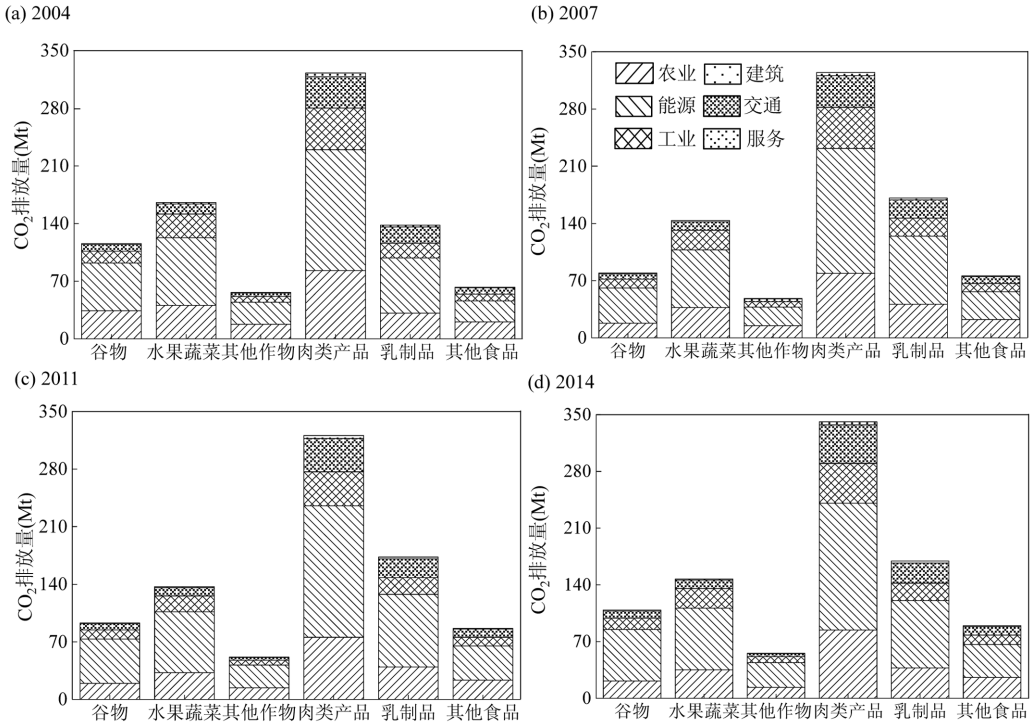


图 5 2004、2007、2011 和 2014 年因农业 6 部门的最终需求导致全球各产业部门的 CO_2 排放特征

Fig.5 Emission characteristics of CO_2 emissions from global industrial sectors induced by final demand for six agricultural sectors in 2004, 2007, 2011 and 2014

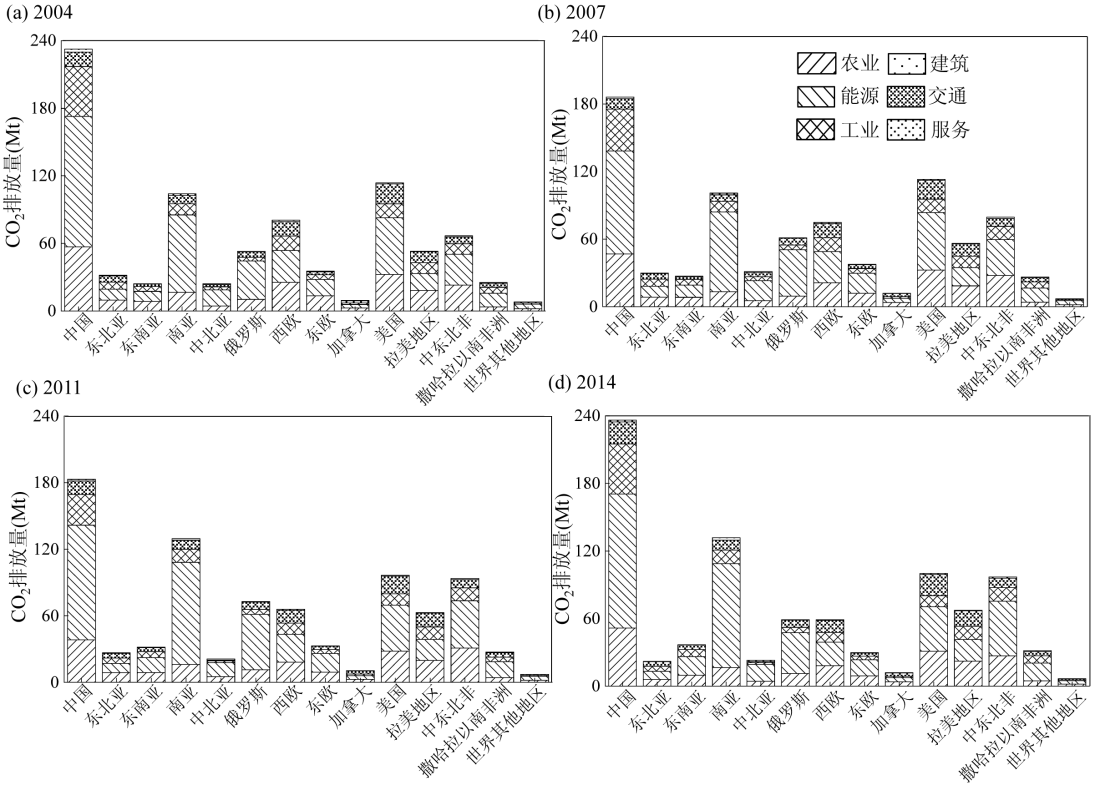


图 6 2004、2007、2011 和 2014 年全球各地区因农业部门的最终需求导致全球各产业部门的 CO_2 排放特征

Fig.6 Emission characteristics of CO_2 emissions from global industrial sectors induced by final demand for six agricultural sectors in different regions in 2004, 2007, 2011 and 2014

从全球各地区来看(图 6),农业部门最终需求导致各产业部门的CO_2排放量占总排放量的比例也存在显著地域差异.以 2014 年为例,中国、南亚、中北亚、俄罗斯、中东北非地区的农业部门最终需求所导致的能源部门 CO_2 排放占比超过 50%,而拉美地区最低,仅为 28%,说明中国等地区农业生产过程中对化石能源的依赖程度更高.西欧、东欧、加拿大、美国、拉美地区的农业部门最终需求导致农业部门自身的 CO_2 排放占比超过 30%,这与这些地区均为农业生产较发达地区密切相关.由此可见,在农业生产较发达地区,因农业部门最终需求导致的各产业部门的 CO_2 排放量更大,说明农业发达地区因农产品贸易承担了更多的CO_2排放责任.

2.2　全球农业贸易中隐含碳排放转移

2.2.1　全球农业贸易中地区间隐含碳排放净转移　图 7 显示了 2004、2007、2011 和 2014 年全球农业贸易中隐含CO_2排放净流动转移路径及转移量.某一地区隐含CO_2流出即为某一地区为了满足其他地区消费的需求,所出口的农产品中隐含的 CO_2 排放量,这些碳排放留在了本地区.而某一地区的隐含CO_2流入即为某一地区消费了其他地区的农产品而在其他地区产生的碳排放.如某一地区隐含 CO_2 的流出量与流入量之间的差值为正,表明该地区为隐含CO_2的净流出地区(地图底图为深色),反之则为净流入地区(地区底图为浅色).图中的黑色线条表示了全球农业贸易中隐含 CO_2 排放的转移路径,线条的宽度与净转移量成正比.由图 7 可见,全球隐含 CO_2 排放净转移路径包括拉美至西欧,美国至东北亚、拉美至中东北非、拉美至中国、美国至中国等.其中在 2004 年、2007 年和 2011 年均为拉美至西欧的净转移排放量最大,分别为 2.4,2.0,1.44Mt,而在 2014 年则转变为拉美至中国的净转移量最大,达 1.6Mt,这一时期美国至中国的净转移量也跃居第二,达到了 1.54Mt,中国成为了全球农业贸易中隐含 CO_2 净流入最多的国家.可见农业贸易中隐含 CO_2 的转移均是从农业较为发达、农产品产量高的主要农业出口国到农产品需求量较大的国家发生的转移.联合国粮农组织的统计数据显示,按照净额计算全球最大的粮食出口国是巴西和阿根廷,同属拉丁美洲,而美国也是全球最大的农产品出口国之一,中国、日本和英国是主要的农产品净进口国[33],其中中国为稳定国内农产品市场供给,实施了一系列鼓励农产品进口的措施,自 2004 年起农产品贸易额由顺差变为逆差,且在随后的 10a 间逆差不断扩大,这与 2004~2014 年中国逐渐成为全球农业贸易中隐含CO_2净流入最多的国家高度一致[34].

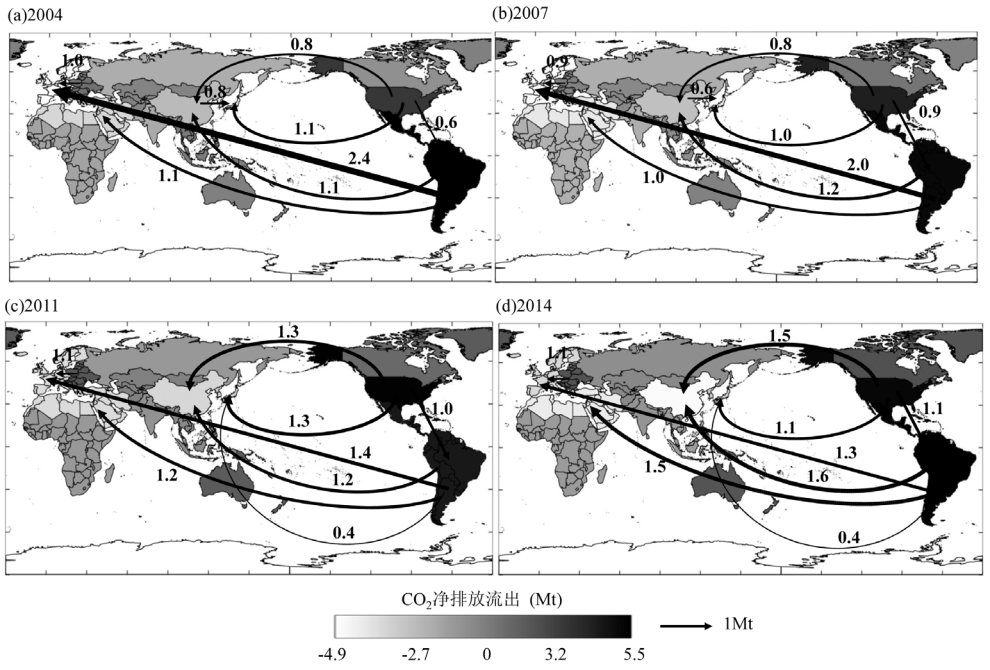


图 7　2004、2007、2011 和 2014 年区域间农业贸易隐含 CO_2 排放净流出

Fig.7　Net outflow of CO_2 emission embodied in interregional agricultural trade in 2004, 2007, 2011, and 2014

审图号:GS(2016)1663

2.2.2 全球农业贸易中各部门隐含碳排放转移 图 8 显示了全球农业贸易中 6 个农业部门隐含 CO_2 排放转移情况,进口贸易中隐含 CO_2 排放量位于前三位的部门分别是其他作物、谷物和肉类产品.2014 年中国已经超越西欧成为其他作物部门进口贸易中隐含 CO_2 排放量最大的地区,达到 2.8Mt,占全球其他作物进口贸易中隐含 CO_2 排放量的 29%.谷物部门进口贸易中隐含 CO_2 排放量最大的地区是中东北非(1.8Mt),占全球谷物部门进口贸易中隐含 CO_2 排放量的 25%.肉类产品进口贸易中隐含 CO_2 排放量最大的是中国(1.0Mt).说明 2014 年中国通过进口大量的其他作物和肉类产品避免了本国 3.8Mt 的 CO_2 排放.随着中国人民生活水平的提高,人们对肉类的需求量显著上升,而中国国内肉类产品的生产过程中 CO_2 排放强度相对较高,因此中国通过进口肉类产品可有效的减少本国的 CO_2 排放.此外,中国进口了大量的大豆、甘蔗、甜菜等作物产品,也避免了本国的 CO_2 排放.而中东北非地区气温高、水资源短缺,不利于小麦、玉米等谷物的种植生产,因此该地区谷物的生产过程需要消耗更多的化石能源用于灌溉、储藏等过程,造成谷物生产的碳排放强度较高,2014 年该地区通过进口大量的谷物产品避免本地区 1.8Mt 的 CO_2 排放.

出口贸易中隐含 CO_2 排放量居前三位的部门分别是肉类产品、其他食品和乳制品部门.2014 年,肉类产品出口贸易中隐含 CO_2 排放量最高的是美国(3.0Mt),占全球肉类产品出口贸易中隐含 CO_2 排放量的 1/3.其他食品出口贸易中隐含 CO_2 排放量最大的是拉美地区(4.0Mt),占比高达全球其他食品出口贸易中隐含 CO_2 排放总量的 46%.美国则成为乳制品部门出口贸易中隐含 CO_2 排放量最高的国家(1.2Mt).美国的畜牧业生产高度集约化且以出口为导向,其牛肉、禽肉和猪肉的出口量分别位居全球第一、第二和第三,同时美国也是全球乳制品产量最大的国家和最大的出口国.因此美国因出口肉类产品和乳制品造成了本国 4.2Mt 的 CO_2 排放.拉美地区盛产大豆、甘蔗等作物,该地区大豆油出口量占全球总出口量的 50%以上,糖出口量占全球总出口量的 60%以上,其中巴西是全球最大的糖出口国,占全球糖类出口量的 45%.因此,拉美地区因出口其他食品造成了本地区 4.0Mt 的 CO_2 排放.

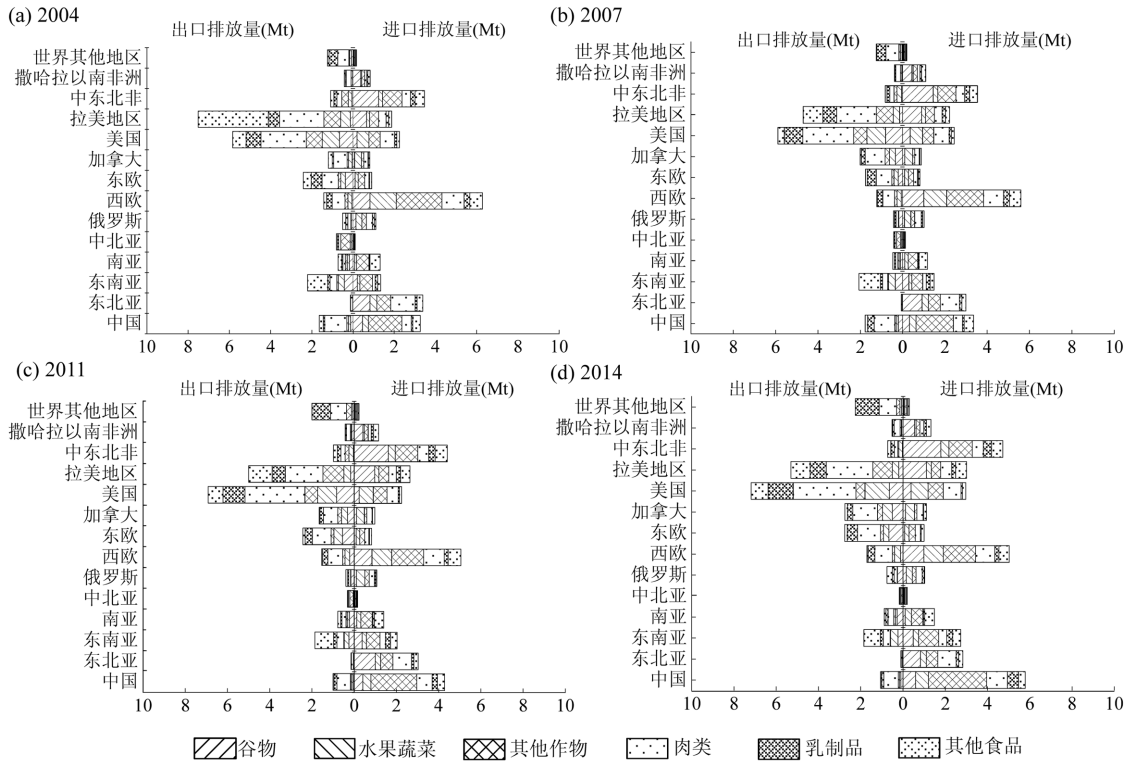


图 8 2004、2007、2011 和 2014 年全球农业贸易中 6 个农业部门隐含 CO_2 排放转移

Fig.8 CO_2 emission transfer embodied in global agricultural trade for six agricultural sectors in 2004, 2007, 2011 and 2014

图 9 更为直观的展示了全球农业贸易中隐含的部门间碳排放转移路径.4 个年份显示出了相一致的

转移特征.从最终生产部门来看,2014 年由于其他作物部门的最终生产导致了其他作物部门、其他食品部门和肉类部门这些初级生产部门的排放,其中以其他食品部门的初级生产排放量最大,占比达 43%.谷物部门的最终生产导致的碳排放中,除谷物部门外也有 37%来源于肉类产品.说明在初级生产的过程中,37%的肉类产品的碳排放用于支持谷物部门的最终生产.

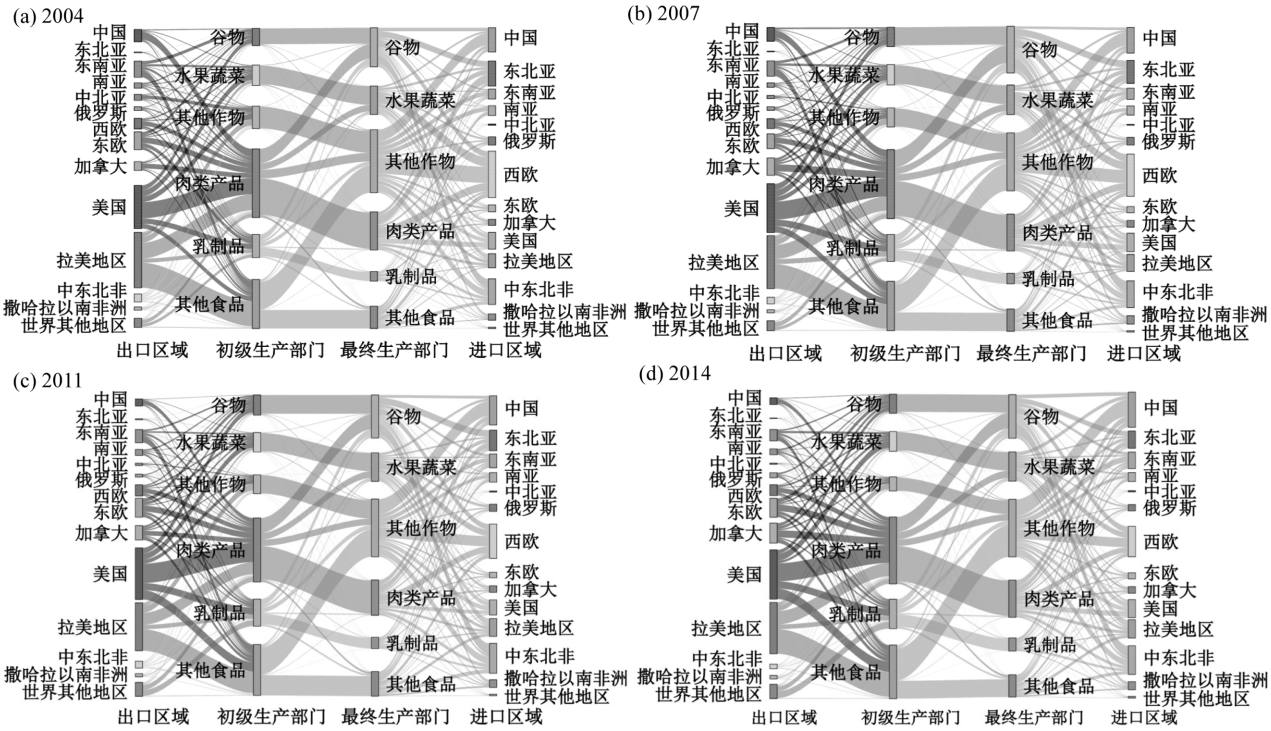


图 9　2004、2007、2011 和 2014 年全球农业贸易中隐含的各部门 CO_2 排放转移路径

Fig.9　Sectoral CO_2 emission transfer pathways embodied in global agricultural trade in 2004, 2007, 2011 and 2014

2.3　全球农业贸易中隐含碳排放影响因素分析

本研究采用 SDA 量化分析了排放强度、投入产出结构、最终需求结构以及最终需求规模这四个因素对 2004~2014 年全球农业贸易中隐含 CO_2 排放影响的贡献.由图 10(a)可见,2004~2014 年期间,全球农业贸易中隐含 CO_2 排放增长了约 1Mt,其中碳排放强度的降低对全球农业贸易中隐含 CO_2 排放产生了极为明显的抑制作用,总贡献率为 123.7%,导致 10a 间排放量降低了 458.4Mt;而投入产出结构、最终需求结构以及最终需求规模是促进全球农业贸易中隐含 CO_2 排放量增加的影响因素,其中最终需求结构贡献量最大,达到 108.9%,导致 10a 间排放量增加 403.4Mt.

图 10(b)显示了 2004~2014 年全球 14 个地区农业贸易中隐含 CO_2 排放的影响因素分析结果.图中各柱的高度代表了不同影响因素对地区农业贸易中隐含碳排放的贡献量,圆点的位置表示了 2014 年与 2004 年各地区农业贸易中隐含 CO_2 排放的差值.由图 10(b)可见,2004~2014 年期间,中国、南亚、俄罗斯、加拿大、拉美地区、中东北非、撒哈拉以南非洲及世界其他地区农业贸易中隐含 CO_2 排放有小幅度增长,而东北亚、东南亚、中北亚、西欧、东欧以及美国的农业贸易中隐含 CO_2 排放呈现一定的下降趋势.10a 间最终需求规模是导致全球各地区农业贸易中隐含 CO_2 排放增长的主要因素,导致这种现象的主要原因是不断增长的人口以及人民生活水平的不断提高,扩大了对各类农产品的需求,导致最终需求规模不断扩大,这一点在中国体现的尤为明显.碳排放强度降低是全球抑制各地区农业贸易中隐含 CO_2 排放的主要因素,可见 10a 间全球各地区在农业生产过程中采取了减少传统化石燃料的使用量、减少化肥施用等措施有效降低了农业碳排放强度.投入产出结构和最终需求结构对各地区农业贸易中隐含 CO_2 排放的影响不完全相同.其中投入产出结构的影响程度较大.以农业贸易中隐含碳量最

大的中国为例,投入产出结构促进了隐含 CO_2 的增长.而在拉美地区,投入产出结构则是农业贸易中隐含 CO_2 排放量下降的因素之一.综上可知,全球各地区应继续将减排重点放在降低农业部门碳排放强度上,同时积极调整优化投入产出结构和最终需求结构,减少高碳排放农产品的进出口.

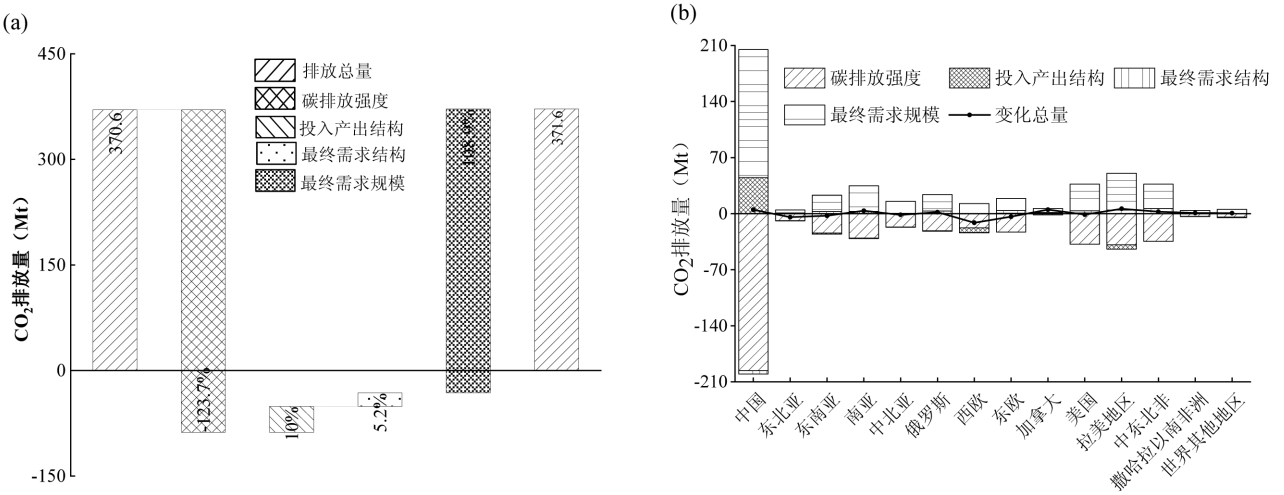


图 10 2004~2014 年全球和各地区农业贸易中隐含的 CO_2 排放影响因素分解结果

Fig.10 The decomposition results of influencing factors for CO_2 emissions embodied in agricultural trade for the global and regions from 2004 to 2014

3 结论与政策建议

3.1 结论

3.1.1 2004、2007、2011 和 2014 年,生产侧碳排放量较高的地区为中国、美国、拉美地区等全球主要粮食产区,而消费侧碳排放量较高的地区为中国、美国、中东北非等地区.农业的 6 个部门中,生产侧和消费侧碳排放量最大的均是肉类产品部门.2014 年生产侧谷物部门和蔬菜水果部门的碳排放量分别位于第二位和第三位,消费侧则是蔬菜水果部门的碳排放量超过了谷物部门,位于第二位.

3.1.2 因农业部门的最终需求导致能源部门的 CO_2 排放量最大,占总排放量的 40%以上,其中谷物部门位居第一,且呈现出逐年上升的趋势,因谷物部门的最终需求导致能源部门CO_2排放量占总排放量的比例从 2004 年的 50.1%增长到 2014 年的 58.2%.

3.1.3 2004、2007、2011 和 2014 年,全球农业贸易中隐含碳净流出地区主要有美国和拉美地区.净流入地区主要有西欧、中国和中东北非等地区,其中 2014 年中国已超越西欧成为了全球农业贸易中隐含碳净流入最多的国家.从各农业部门来看,2014 年中国是其他作物部门和肉类产品部门进口贸易中隐含碳排放量最大的地区.从出口贸易来看,美国是肉类产品和乳制品出口贸易中隐含碳排放量最高的地区,拉美地区为其他食品出口贸易中隐含碳排放量最高的地区.

3.1.4 对 2004~2014 年全球农业贸易中隐含碳排放进行因素分解分析结果显示,投入产出结构、最终需求结构以及最终需求规模是促进全球农业贸易中隐含碳排放量增加的影响因素,导致 10a 间全球农业贸易中隐含碳排放量共增加 459.6Mt,其中最终需求规模贡献量最大,占总增加量的 87.8%.全球碳排放强度的降低是主要的抑制因素,其导致了 10a 间全球农业贸易中隐含碳排放量降低了 458.4Mt.碳排放强度、投入产出结构、最终需求结构和最终需求规模对农业贸易中隐含碳排放量变化的贡献分别为−123.7%、10%、5.2%、108.9%.

3.2 政策建议

3.2.1 通过本研究发现农业生产过程中对能源部门的需求量极大,同时碳排放强度的下降是抑制农业贸易中隐含碳排放的最主要的因素.因此从生产者的角度来看减少农业生产对化石能源的依赖,尽可能的在农业生产中使用生物质能、太阳能、风能等清洁能源,例如用太阳能水泵替代柴油机,将沼气

发电的能源用于温室供暖等.同时提高能源的使用效率,采取使用滴灌技术,使用无人机代替传统机械施肥等措施降低能耗,从根源上减少农业贸易中隐含的碳排放.

3.2.2　动物性食品的全球温室气体排放量是植物性食品的 2 倍[33],本研究结果也显示在全球农业贸易中肉类产品和乳制品部门中隐含碳排放的流出量较大,因此应调整对肉类产品和乳制品消费量较大的国家和地区的饮食结构,减少肉类产品和乳制品的消费量,增加植物性食品在饮食中的比例,提倡低碳饮食来减少碳排放.

3.2.3　推动碳减排的划分原则逐步从“生产者责任原则”向“生产者和消费者共担责任”的原则转变,真正体现共同但有区别责任.对欠发达地区给予政策扶持,避免通过农业贸易碳排放转移加重欠发达地区的环境及经济负担,减少“碳泄露”现象的发生,做到全球层面的经济发展和环境保护并重.此外还应当完善农业贸易隐含碳排放的测算标准,形成一套全球通用的测算体系,以便各个国家和地区更清晰地了解农业产品贸易中所产生的碳排放,减少高碳排放农业产品的消费,引导投资和消费向低碳方向发展.

参考文献：

[1] Davis F K, Yu K L, Herrero M, et al. Historical trade-offs of livestock's environmental impacts [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(12):125013.

[2] FAO. FAOSTAT: Food and agriculture data [EB/OL]. 2024. https://www.fao.org/faostat/en/#data/EM.

[3] Poore J, Nemecek T. Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers [J]. Science, 2018,360(6392):987−992.

[4] Tubiello F N, Karl K, Flammini A, et al. Pre− and post−production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri−food systems [J]. Earth System Science Data, 2022,14(4):1795−1809.

[5] U.S.EPA. Global Non−CO_2 greenhouse gas emission projections & mitigation: 2015~2050 [R]. Washington, DC: Office of Atmospheric Programs, 2019.

[6] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability [R/OL]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf.

[7] Clark M A, Domingo N G G, Colgan K, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5℃ and 2℃ climate change targets [J]. Science, 2020,370(6517):705–708.

[8] Hu Y, Su M, Jiao L. Peak and fall of China’s agricultural GHG emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,389:136035.

[9] FAO. FAOSTAT: Food and agriculture data [EB/OL]. 2023. https://www.fao.org/faostat/en/#data/EM.

[10] Lynch J, Cain M, Frame D, et al. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO_2−emitting sectors [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021,4:518039.

[11] Zhang S, Wu K K, Mykhailo Y, et al. Carbon emissions from international trade and consumption: Assessing the role of cumulative risk for EU and Chinese economic development [J]. Energy Strategy Reviews, 2023,50:101219.

[12] Wu R, Ma T, Chen D, et al. International trade, CO_2 emissions, and re−examination of “Pollution Haven Hypothesis” in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29:4375−4389.

[13] Peters G P, Hertwich E G. CO_2 Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy [J]. Environmental Science and Technology, 2008,42(5):1388−1812.

[14] Hassan T, Song H, Kirikkaleli D. International trade and consumption−based carbon emissions: evaluating the role of composite risk for RCEP economies [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29:3417−3437.

[15] Assogbavi K K E, Dées S. Environmental policy and the CO_2 emissions embodied in international trade [J]. Environmental and Resource Economics, 2023,84:507−527.

[16] Zhou X S, Guo Q Y, Wang Y Y, et al. Trade and embodied CO_2 emissions: analysis from a global input−output perspective [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19:14605.

[17] Chen J, Feng G M, Zhou J. Analyzing the carbon emission effect and systematic emission reduction mechanism of the Sino−USA manufacturing trade [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344:118681.

[18] Wang Q, Zhou Y L. Uncovering embodied CO_2 flows via North−North trade − A case study of US−Germany trade [J]. Science of the Total Environment, 2019,691:943−959.

[19] Meng J, Mi Z F, Guan D B, et al. The rise of South−South trade and its effect on global CO_2 emissions [J]. Nature Communications, 2018,9: 1871.

[20] 郭秦洋.全球行业贸易隐含碳测算与时空转移研究—基于多区域投入产出模型 [D]. 太原:山西财经大学, 2023.
Guo Q Y. Calculation and spatial−temporal transfer of carbon embedded in global industrial trade: Based on multi−regional input−output model [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2023.

[21] 郭朝先.中国二氧化碳排放增长因素分析−基于 SDA 分解技术 [J]. 中国工业经济, 2010,273(12):47−56.
Guo C X. An analysis of the increase of CO_2 emission in China−based on SDA technique [J]. China Industrial Economics, 2010,273(12): 47−56.

[22] Wang C, Zhan J Y, Li Z H, et al. Structural decomposition analysis of carbon emissions from residential consumption in the Beijing−Tianjin−Hebei region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:1357−1364.

[23] Wang C J, Wang F. Structural decomposition analysis of carbon

emissions and policy recommendations for energy sustainability in Xinjiang [J]. Sustainability, 2015,7(6):7548−7567.

[24] Nie H G, Kemp R, Vivanco D F, et al. Structural decomposition analysis of energy−related CO_2emissions in China from 1997 to 2010 [J]. Energy Efficiency, 2016,9:1351−1367.

[25] 吴雅珍,马啸天,吴 凯,等.经济增长与结构变化对亚洲国家碳排放与空气污染物排放的影响 [J]. 生态经济, 2023,39(12):191−205.
Wu Y Z, Ma X T, Wu K. et al. Impact of economic growth and structural change on carbon and air pollutant emissions in Asian countries: analysis on driving force based on KAYA, LMDI, and SDA Decomposition method [J]. Ecological Economy, 2023,39(12):191−205.

[26] 杨远航.中国与“一带一路”沿线国家贸易隐含碳测算及其影响因素研究 [D]. 蚌埠:安徽财经大学, 2020.
Yang Y H. Research on the measurement of embodied carbon and its influencing factors in China and countries along “the Belt and Road” trade [D]. Bengbu: Anhui University of Finance and Economics, 2020.

[27] Wang H, Ang B W, Su B. A Multi−region structural decomposition analysis of global CO_2 emission intensity [J]. Ecological Economics, 2017,142:163−176.

[28] Xu Y, Dietzenbacher E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade [J]. Ecological Economics, 2014,101: 10−20.

[29] Lan J, Malik A, Lenzen M, et al. A structural decomposition analysis of global energy footprints [J]. Applied Energy, 2016,163:436−451.

[30] Su B and Ang B W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Frameworks for monthly data [J]. Energy Economics, 2023,126:106977.

[31] Lin X, Pan H, Qi L, et al. An input−output structural decomposition analysis of changes in China’s renewable energy consumption [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29:16678−16691.

[32] Xu X M, Sharma P, Shu S J, et al. Global greenhouse gas emissions from animal−based foods are twice those of plant−based foods [J]. Nature Food, 2021,2:724−732.

[33] FAO. World dood and agriculture−statistical yearbook 2022 [EB/OL]. https://www.fao.org/3/CC2211EN/online/CC2211EN.html?continueFlag=2b0f8fb67d92b54413e0a49b27b9c7f0#chapter−2_5.

[34] 石 瑞.中国农产品贸易格局及其影响因素研究 [D]. 太原:山西财经大学, 2023.
Shi R. Research on the trade pattern of agricultural products and influencing factors in China [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2023.

作者简介：凌再莉(1982−),女,山东临沂人,副教授,博士,主要从事环境经济系统分析研究.发表论文 17 篇.lingzl@lzufe.edu.cn.