

全球价值链视角下中国农产品贸易隐含氮、磷、钾研究

朱安丰¹, 郭正权^{2,3}, 解伟¹, TARIQ Ali⁴, 柳 璞⁵

(1. 北京大学现代农业学院, 北京 100871; 2. 北方工业大学经济管理学院, 北京 100144;
3. 北方工业大学北京城市治理研究基地, 北京 100144; 4. 江西农业大学经济管理学院, 南昌 330045;
5. 对外经济贸易大学教育与开放经济研究中心, 北京 100029)

摘要: 基于GTAP数据库提供的多区域投入产出表, 采用全球价值链方法测算中国农产品贸易中隐含的化肥转移, 并按照农产品最终消费的地理位置将其分解为四部分。研究发现: (1) 中国农产品进口为国内节约640万t化肥(占我国化肥用量的13%), 同时引起全球化肥用量节约285万t, 为缓解全球资源和环境压力做出贡献; (2) 中国农产品贸易深度参与全球价值链, 进口农产品中隐含的化肥有12%会再次出口到全球, 意味着农产品贸易背后隐含的资源到达中国后会再次出口, 形成多次跨境转移。建议在全球价值链视角下更为客观地估算农产品贸易隐含的化肥及其他资源环境问题, 倡导共同承担贸易引致的资源环境问题。

关键词: 农产品贸易; 全球价值链; 化肥; 多区域投入产出模型

改革开放40多年来, 中国化肥使用量从1978年的884万t提高到2019年的5404万t, 对粮食等主要农产品的增产起到极其重要的作用^[1,2], 但也带来了一系列的环境和资源问题。我国化肥的有效利用率仅为30%~40%, 远低于发达国家(70%~80%)^[3-5]。未被作物利用的化肥流失进入土壤、水体和大气环境中, 造成土壤酸化和水体富营养化^[6-9]。同时, 化肥挥发会产生大量NH₃, 进入大气后会形成PM_{2.5}等有害物质并造成空气污染^[10,11]。作为化肥生产的主要原料, 磷、钾盐等矿产资源是保障农业发展和国计民生的重要物质基础^[12]。由于矿产资源的不可再生性, 化肥使用量的大幅增加导致中国面临着严重的资源压力。研究结果显示, 以当前的开采速度, 中国磷、钾盐等矿产资源将在100年以内消耗殆尽^[13,14]。为缓解化肥施用产生的环境和资源压力, 2015年农业部提出到2020年化肥使用量零增长行动方案。

国际贸易的发展导致产品的生产和消费分离, 一国生产的产品通过国际贸易在他国被消费, 却加速了生产国的资源消耗和环境污染。因此, 越来越多的学者建议从消费端补偿贸易带来的资源耗竭问题^[15,16], 但在核算中侧重于直接消耗的资源, 容易忽视间接资源和环境消耗, 这会让进口国对进口商品承担更多的责任。为此, Odum^[17]提出“隐含资源”的概念, 特指为生产一定量的产品或服务, 在产品生产的各个环节所需要的直接或间接的资源投入。Cui等^[18]研究结果显示, 2007年隐含在中国出口产品中的能源达到12.91亿tce, 隐含进口5.57亿tce, 是一个隐含能源净出口国家。但从直接贸易来看, 中

收稿日期: 2020-10-12; 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602604); 国家自然科学基金项目(71922002, 71873009)

作者简介: 朱安丰(1995-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 研究方向为产业发展与产业政策。

E-mail: zhu1ncut@126.com

通讯作者: 解伟(1985-), 男, 山西晋城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为气候变化与粮食安全政策。

E-mail: xiewei.ccap@pku.edu.cn

国2007年净进口2.48亿tce能源,说明隐含资源和环境的转移在国际贸易中扮演着越来越重要的角色。吴景辉等^[19]核算了山西省贸易中隐含的环境转移,结果显示山西省在2007年和2012年均均为隐含碳和隐含SO₂排放输出区。在农产品贸易方面,Qiang等^[20]研究发现中国6种大宗农产品贸易隐含的进口土地从2000年的120万hm²增长到2009年的3300万hm²;Ali等^[21]的研究进一步表明中国食物贸易帮助中国节约了水土资源,一定程度起到了“充分利用两个市场、两种资源”的效果。同时,由于全球各国农业生产中水、土资源使用效率的差异,中国食物贸易实际也帮助全球节约了水、土资源。而目前对于化肥转移的研究主要集中在农田系统内部^[22,23],对贸易活动中隐含的化肥转移研究相对较少。

“全球价值链”概念的提出揭示农产品贸易中隐含资源环境的跨境流动更为复杂,近年“全球价值链”相关数据和方法的发展为更加客观估算农产品贸易中隐含的资源环境数量提供了可能。根据Gereffi^[24]首次提出的“全球价值链”的概念,随着国际分工的细化,一个国家只负责生产其具有优势的一个或几个环节。这意味着一国进口的产品不全部用于国内生产和消费,还有一部分作为中间投入再出口到其他国家。Koopman等^[25]基于全球价值链构建多区域投入产出模型,提出全球价值链核算方法(Global Value Chain, GVC),剔除了海关统计数据中由中间产品多次跨越国境导致的重复计算,较为精确地核算出国际贸易对各国的影响。GVC方法的发展为估算农产品贸易中隐含的化肥多次跨境流动提供了坚实的基础。

中国农产品贸易已深度参与全球价值链,而且在全球农产品价值链上的位置越来越重要。以中国纺织品贸易为例,2000年中国的贸易伙伴主要是亚洲国家,而且链条比较短;2017年中国和全球大多数国家开展纺织品贸易,而且链条经常延伸到第三国或链条更长的国家^[26]。GTAP数据库表明,2014年中国从东南亚地区进口棉花16.7亿美元,但在国内加工后以纺织品的形式再次出口到北美地区的金额达102亿美元。OECD报告测算得出2004—2014年间全球各国出口的农产品中来自第三国进口的比例呈现增长态势,而来自中国进口的增长份额最大,达到21%^[27,28]。

全球价值链视角下开展中国农产品贸易隐含化肥研究,能够更加客观地估算商品贸易中隐含资源环境数量,克服传统方法估算结果“偏高”的问题。近年来,越来越多的学者采用GVC方法发现了传统方法在估算这一问题上存在“高估”现象,并更为客观地分析了国际贸易隐含的资源跨境转移。例如,Zhang等^[29]将GVC方法应用于核算贸易活动隐含的CO₂,并结合国内经济联系最大程度上避免了由多次跨越国境导致的重复计算,结果显示:2009年全球进口的产品和服务中隐含的碳排放量占全球总量的1/4,低于其他方法测算的隐含碳排放量(Weitzel等^[30],31%;Xu等^[31],33%)。郭朝先等^[32]运用Zhang等^[29]的方法分析了国际贸易中隐含的能源转移,结果显示:2014年全球贸易活动隐含出口能源达56亿tce,其中有18%的隐含能源被进口国再出口到国外。李真等^[33]核算了中国进出口贸易中隐含的工业污染排放,研究结果表明:不考虑中间产品贸易隐含的污染排放,会导致中国隐含废水排放高估3.08%~32.70%,隐含废气排放高估23.49%~33.59%。

本文基于GTAP数据库提供的多区域投入产出表,采用GVC方法测算和分解中国农产品贸易中隐含的化肥转移,并剔除重复计算,客观核算出中国农产品贸易使用的中国

和全球化肥数量。本文的创新点体现在两个方面：首先，选择造成农业环境污染的罪魁祸首之一“氮、磷、钾”为研究对象，核算贸易中隐含的化肥用量，对以往研究重视农产品贸易中隐含资源流动（如，水、土地资源）而较少研究隐含环境污染是一个重要补充；其次，在全球价值链视角研究农产品贸易隐含的化肥转移，将在方法论上与传统研究农产品贸易隐含资源的文献有差别，更为客观地估算农产品贸易隐含化肥数量，倡导共同承担贸易引致的资源环境问题。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 全球价值链理论与方法

本文基于包含 G 个国家、 N 个行业的多区域投入产出模型，采用全球价值链理论和方法，分析农产品国际贸易背后隐含的氮肥、磷肥和钾肥跨境转移。如式（1）所示， G 个国家通过最终产品贸易和中间产品贸易联系在一起。

$$X^s = \sum_i^G A^{sr} X^r + \sum_r^G Y^{sr} \quad (1)$$

式中： X^s 为 s 国的总产出； Y^{sr} 表示 s 国出口到 r 国并被 r 国最终消费的产品； $A^{sr} = Z^{sr}(X^r)^{-1}$ 为 s 国对 r 国的直接消耗矩阵（ Z^{sr} 表示 s 国对 r 国的中间投入）。

由式（1）可得最终消费拉动的总产出公式，如式（2）所示。

$$X^s = \sum_r^G B^{sr} \sum_t^G Y^{rt} \quad (2)$$

式中： B^{sr} 是里昂惕夫逆矩阵，表示 r 国增加消费 1 单位最终产品引起的 s 国总产出的变化量。

由于 s 国对 r 国的总出口为 s 国向 r 国出口的最终产品和中间产品之和，结合式（2）可得 s 国对 r 国的出口公式，如式（3）所示。

$$T^{sr} = Y^{sr} + Z^{sr} = Y^{sr} + A^{sr} X^r \quad (3)$$

参考 Wang 等^[34]的研究，将 s 国对 r 国的出口分解为以下四部分：

$$\begin{aligned} T^{sr} = & \underbrace{Y^{sr}}_{T^{sr} \text{ } f^r} + \underbrace{A^{sr} B^{rr} Y^{rr} + A^{sr} B^{rs} Y^{sr} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} Y^{tr}}_{T^{sr} \text{ } ind^r} \\ & + \underbrace{A^{sr} B^{rr} Y^{rs} + A^{sr} B^{rs} Y^{ss} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} Y^{ts}}_{T^{sr} \text{ } f^s} \\ & + \underbrace{A^{sr} B^{rr} \sum_{t \neq s, r}^G Y^{rt} + A^{sr} B^{rs} \sum_{t \neq s, r}^G Y^{st} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} \sum_{u \neq s, r}^G Y^{tu}}_{T^{sr} \text{ } f^{other}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $T^{sr} \text{ } f^r$ 表示 s 国出口到 r 国并被 r 国最终消费的产品； $T^{sr} \text{ } ind^r$ 表示 s 国出口到 r 国的产品，被 r 国用作中间产品并最终被 r 国消费； $T^{sr} \text{ } f^s$ 表示 s 国出口到 r 国的产品，被 r 国生产再返回到 s 国并被 s 国最终消费； $T^{sr} \text{ } f^{other}$ 表示 s 国出口到 r 国的产品，被 r 国生产向第三国出口，最终被第三国消费。

1.2 包含隐含化肥转移的全球价值链方法

首先，估计各农业部门和非农业部门化肥使用系数。用 $f^{ps} = NPK^{ps}/x^p$ ($p=1, 2, \dots, 7$)

表示 s 国 p 农业部门的化肥消耗系数,其中 NPK^{ps} 表示 p 部门生产 x^{ps} 消耗的国内化肥数量,则 s 国农业部门的化肥系数向量为 $F^{ps}=(f^{p,1}, \dots, f^{p,p}, 0, \dots, 0)$ 。参考曹涛等^[35]核算的非农业部门雨水消耗系数,采用类似完全消耗系数的方法计算得出各部门的化肥系数:

$$F^s = F^{ps'} \times L^{ss} \quad (5)$$

其次,基于式(4)将 s 国出口产品隐含的国内化肥用量分解为如下四项:

$$\begin{aligned} EF^s = & \underbrace{F^s \sum_{s \neq r}^G Y^{sr}}_{EF_1} + \underbrace{F^s \sum_{s \neq r}^G (A^{sr} B^{rr} Y^{rr} + A^{sr} B^{rs} Y^{sr} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} Y^{tr})}_{EF_2} \\ & + \underbrace{F^s \sum_{s \neq r}^G (A^{sr} B^{rr} Y^{rs} + A^{sr} B^{rs} Y^{ss} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} Y^{ts})}_{EF_3} \\ & + \underbrace{F^s \sum_{s \neq r}^G (A^{sr} B^{rr} \sum_{t \neq s, r}^G Y^{rt} + A^{sr} B^{rs} \sum_{t \neq s, r}^G Y^{st} + A^{sr} \sum_{t \neq s, r}^G B^{rt} \sum_{t \neq s, r}^G Y^{tu})}_{EF_4} \end{aligned} \quad (6)$$

如式(6)所示,本文将 s 国出口中隐含的化肥分解为四部分,其中 EF_1 表示 s 国出口的、被进口国最终消费的产品中隐含的化肥,将该贸易模式记为 p^1 ; EF_2 是指 s 国出口的、被进口国作为中间产品消费的产品中隐含的化肥,其贸易模式记为 p^2 ; EF_3 代表 s 国出口的、被进口国生产返回 s 国的农产品中隐含的化肥(该贸易模式记为 p^3); EF_4 表示来自 s 国的、被进口国生产向第三国出口的农产品中隐含的化肥,其贸易模式为 p^4 。由于式(6)中 EF^s 是指 s 国生产过程中消耗的国内化肥数量,因此避免了重复计算。

最后为农产品贸易节约或浪费的国内和全球化肥用量的计算方法。农产品进口避免的 s 国化肥用量为 s 国生产同样数量的产品需要使用的化肥,如式(7)所示。

$$AF^s = F^s \sum_{s \neq r}^G T^{rs} \underline{f}^s + F^s \sum_{s \neq r}^G T^{rs} \underline{ind}^s + F^s \sum_{s \neq r}^G T^{rs} \underline{f}^r + F^s \sum_{s \neq r}^G T^{rs} \underline{f}^{other} \quad (7)$$

参与国际贸易时, s 国化肥用量为国内需求与出口引致的化肥用量之和,即 $TF^s = F_{dom}^s + EF^s$ 。若 s 国不进行贸易活动,其化肥用量为 $TF^{s'} = F_{dom}^s + AF^s$ 。因此, s 国农产品贸易对节约国内化肥施用的贡献为:

$$RF^s = TF^{s'} - TF^s = AF^s - EF^s \quad (8)$$

当 s 国与 r 国进行贸易活动时,两国化肥消费总量为 $TF^{s+r} = (F_{dom}^s + EF^{sr}) + (F_{dom}^r + EF^{rs})$;若 s 国与 r 国没有贸易往来,化肥用量为 $TF^{s+r'} = (F_{dom}^s + AF^{sr}) + (F_{dom}^r + AF^{rs})$,则 s 、 r 两国进行农产品贸易对节约全球化肥施用的贡献如式(9)所示。

$$GRF^s = TF^{s+r'} - TF^{s+r} = AF^{sr} + AF^{rs} - EF^{sr} - EF^{rs} \quad (9)$$

相应地, s 国参与国际贸易对节约全球化肥用量的贡献为 $GRF^s = \sum_{r \neq s}^G GEF^{sr}$ 。

$GRF^s > 0$ 意味着 s 国参与国际贸易节约了全球化肥用量,反之则引起全球化肥用量增加。

1.3 数据来源与处理

本文使用的数据主要分为两部分,一部分是GTAP数据库提供的全球多区域投入产出表(MRIO),另一部分是国际化肥工业协会(IFA)提供的分农产品类别的全球各国化肥使用数据。

使用的是GTAP于2019年发布的最新版数据库（GTAP V10），其农业部门划分最为详细。需要说明的是GTAP V10数据库的基准年是2014年，但已经是最新版的全球投入产出表（该数据是研究全球价值链必须使用的数据，其发布一般比实际晚3~5年），研究结论和政策含义对当下农产品贸易及隐含的资源环境问题具有同样的参考意义。标准的GTAP数据库包含140个国家（地区）和57个行业，为研究和分析方便，在保留农业部门多样性的基础上将57个行业合并为13个行业 [分别为：水稻、小麦、其他谷物（含玉米）、油料（含大豆）、食用油、糖、棉花、蔬菜和水果、猪肉和鸡肉、牛肉、牛奶、水产品和其他部门]，同时按照地理位置将所有国家划分为9个区域 [分别为：中国、东亚、亚洲（除东亚）、欧洲、大洋洲、北美、南美、非洲和其他地区]。

从国际化肥工业协会的年度报告中获取了27个国家和地区（欧盟27个国家为一个地区）的不同农产品化肥使用量数据^[36]，这些国家（地区）的化肥用量占全球总量的94%，保证了数据的代表性。为与MRIO表匹配，本文同样将其划分为9个区域。表1比较了中国与全球其他国家主要农产品的化肥完全消耗系数^①。

表1 中国与全球主要农产品的化肥消耗系数

Table 1 Coefficient of fertilizer consumption of major agricultural products in China and the world (t/万美元)

| 农产品种类 | 中国 | | | 全球其他国家 | | |
|-----------|------|------|------|--------|------|------|
| | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 |
| 水稻 | 0.48 | 0.15 | 0.10 | 0.30 | 0.10 | 0.07 |
| 小麦 | 1.39 | 0.53 | 0.09 | 0.89 | 0.31 | 0.08 |
| 其他谷物（含玉米） | 1.84 | 0.69 | 0.23 | 0.55 | 0.20 | 0.14 |
| 油料（含大豆） | 0.61 | 0.32 | 0.06 | 0.27 | 0.21 | 0.19 |
| 糖 | 0.22 | 0.08 | 0.10 | 0.12 | 0.05 | 0.07 |
| 棉花 | 0.51 | 0.21 | 0.04 | 0.49 | 0.19 | 0.09 |
| 蔬菜和水果 | 0.35 | 0.13 | 0.07 | 0.15 | 0.06 | 0.04 |

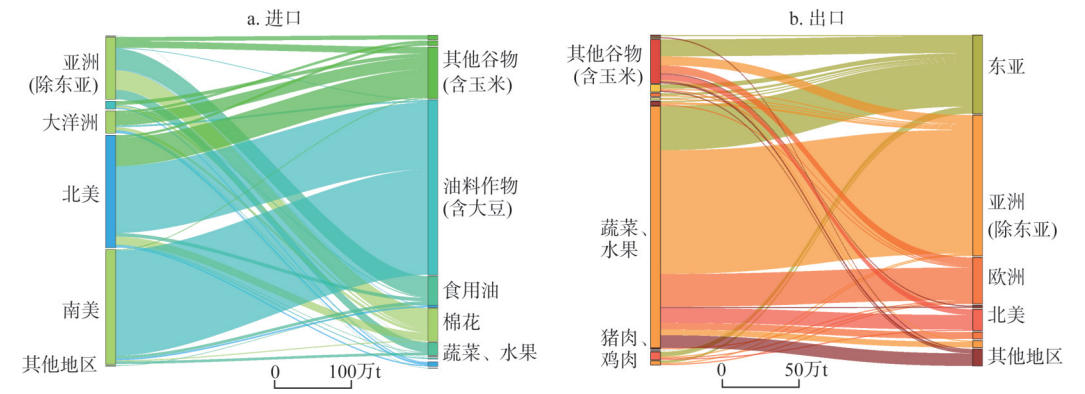
2 结果分析

2.1 中国农产品贸易隐含的化肥用量及影响

2.1.1 中国农产品贸易隐含的化肥用量

本文测算了中国农产品贸易中隐含的化肥用量（图1a），从农产品进口来看，中国进口农产品隐含化肥总量为423万t（2014年，下同），占直接进口化肥总量（958万t）的44%。从转移途径来看，主要隐含在油料作物、棉花和食用油等商品中转移到中国，三种农产品隐含的化肥用量共占总量的73%。具体来说，油料作物贸易中隐含的化肥用量最高，占隐含化肥进口总量的54%，其中南美（137万t）和北美（87万t）向中国出口的油料作物中隐含的化肥用量最多，占进口油料作物隐含化肥总量的98%。中国进口棉花中隐含的化肥总量为44万t，是隐含化肥进口的第二大途径，主要来源于亚洲（除东亚）和北美地区，分别占棉花隐含化肥总量的48%和24%。在农产品出口方面（图1b），中国隐含化肥的出口总量为213万t，占直接化肥出口总量（2904万t）的7%。中国隐含

① 由于空间限制，此处无法列出其他国家的农产品化肥消耗系数。如需原始27个国家（地区）的化肥使用量数据，可与作者联系。



注：第一列和第四列表示国家（地区），从上到下依次为：东亚、亚洲（除东亚）、欧洲、大洋洲、北美、南美、非洲、其他地区；第二列和第三列分别表示进口和出口的农产品，从上到下依次为：水稻、小麦、其他谷物（含玉米）、油料（含大豆）、食用油、糖、棉花、蔬菜和水果、猪肉和鸡肉、牛肉、牛奶和水产品。由于篇幅限制，图中仅标注出隐含化肥用量较大的农产品。

图1 中国分行业、分国别农产品贸易隐含化肥用量

Fig. 1 Implied fertilizer used in agricultural products trade by industry and country in China

化肥出口的主要途径为其他谷物（含玉米）、蔬菜和水果贸易，分别为94万t和54万t，占中国隐含化肥出口总量的69%。从出口的国家来看，东亚、亚洲（除东亚）和欧洲是中国隐含化肥转移最多的地区，分别为77万t、57万t和34万t。

总体而言，中国进口的农产品隐含154万t氮肥、141万t磷肥和129万t钾肥，隐含在中国出口的农产品中的氮肥、磷肥和钾肥数量分别为138万t、54万t和21万t（表2）。结合进口和出口来看，中国净进口16万t氮肥，远低于磷肥（87万t）和钾肥（108万t），这是由于相较于其他两种化肥，中国氮肥施用效率与其主要贸易伙伴之间的差距更大（表1）。

2.1.2 中国农产品贸易对节约国内和全球化肥施用的贡献

本文测算了中国农产品贸易对节约国内和全球化肥施用的贡献。如表2所示，中国农产品进口为国内节约640万t化肥，占中国化肥施用总量的13%，起到了“利用两个市场、两种资源”的效果；同时，中国参与国际贸易引起全球化肥用量节约285万t，为缓解全球资源 and 环境压力做出贡献。分肥料类型看，中国农产品贸易为国内节约403万t氮肥，占国内氮肥施用总量（2392万t）的12%，其中油料作物进口引起中国氮肥用量减少270万t，是中国隐含氮肥节约的最主要来源。同时，中国参与农产品国际贸易为全球节

表2 中国农产品贸易隐含的化肥用量

Table 2 Implied fertilizer usage in China's agricultural products trade (万t)

| | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 加总 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| 进口 | 154 | 141 | 129 | 423 |
| 出口 | 138 | 54 | 21 | 213 |
| 净进口 | 16 | 87 | 108 | 210 |
| 中国农产品贸易对节约国内化肥施用的贡献 | 403（12%） | 195（16%） | 43（8%） | 640（13%） |
| 中国农产品贸易对节约全球化肥施用的贡献 | 286（3%） | 70（2%） | -71（-3%） | 285（2%） |

注：括号内数据表示占全国（全球）化肥施用总量的百分比。

约氮肥286万t,这是由于出口国农产品的氮肥施用效率高于中国。在磷肥方面,中国参与国际贸易引起国内磷肥用量节约16%,达到195万t。与氮肥相似,油料作物进口引起国内磷肥用量减少141万t,是中国磷肥节约的最主要原因。同时,中国巨大的农产品贸易逆差和较高的磷肥消耗强度引起全球磷肥用量减少70万t。从国际贸易对钾肥用量的影响来看,农产品贸易同样引起国内钾肥用量减少43万t,占中国钾肥施用总量的8%。与氮、磷肥不同的是,中国参与农产品贸易导致全球钾肥用量增加71万t,这是因为中国巨大的农产品贸易逆差以及本国较高的钾肥施用效率。

以上结果表明,中国参与农产品国际贸易引起本国和全球化肥用量双双降低。从对本国化肥施用的贡献来看,油料作物等农产品巨大的贸易逆差是中国化肥用量减少的主要原因,总计为中国节约13%的化肥。其中,农产品贸易对磷肥节约的贡献最为显著,达到16%。在全球视角下,中国的农产品贸易促进了国际分工,使得农产品在一个化肥施用效率较高的国家进行生产,从而节约全球化肥用量285万t,为缓解全球资源 and 环境压力做出了突出贡献。

2.2 全球价值链视角下中国农产品贸易隐含的化肥分解

2.2.1 中国农产品贸易隐含的化肥分解

为进一步探究中国农产品贸易中隐含化肥的转移,本文基于“全球价值链”方法,按照农产品最终消费的形式和地理位置将农产品贸易隐含的化肥用量分解为四部分。第一部分为被进口国最终消费的农产品隐含的化肥(EF_1),该农产品贸易模式记为 p^1 。如图2所示,隐含在 p^1 贸易模式中进口的氮肥、钾肥和磷肥用量占隐含化肥进口总量的比例达到26%、47%和47%,分别为40万t、66万t和60万t,总计达到166万t,占隐含化肥进口总量的39%。在出口方面,隐含在该贸易模式中的氮肥、磷肥和钾肥占隐含化肥出口总量的比例分别为33%、32%和38%。第二部分为被进口国作为中间产品消费的农产品隐含的化肥(EF_2),该贸易模式记为 p^2 。中国进口的、隐含在 p^2 贸易模式中的三种化肥用量共计206万t,占隐含化肥进口总量的49%。同时,中国出口的隐含在 p^2 贸易模式中的化肥为124万t,占隐含化肥出口总量的57%。第三部分为被进口国生产返回原产国的农产品隐含的化肥(EF_3),以 p^3 表示该贸易模式。如图2所示, p^3 贸易模式中隐含的化肥用量较少,分别占隐含进、出口化肥总量的1%和2%。第四部分为被进口国生产向第三国出口的农产品隐含的化肥(EF_4),该贸易模式记为 p^4 。中国以 p^4 贸易模式进口的农产品中隐含45万t化肥(占隐含化肥进口总量的11%),其中包括21万t氮肥(16%)、13万t磷肥(10%)和11万t钾肥(10%)。同时,在出口方面,隐含在 p^4 贸易模式中的化肥为29万t,占隐含化肥出口总量的15%。

综上所述,隐含在中国进口农产品中的化肥有12%随产品再

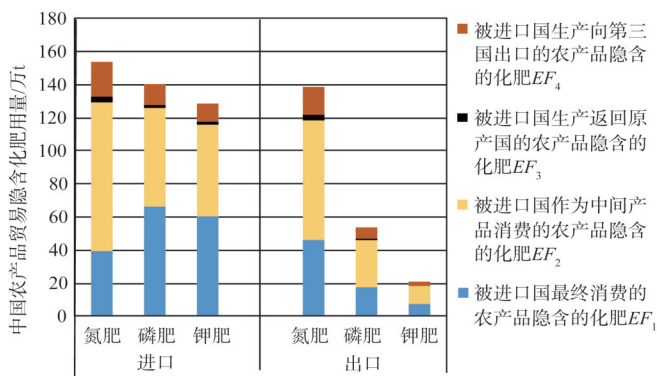


图2 全球价值链视角下中国农产品贸易隐含化肥用量

Fig. 2 Implied fertilizer usage in China's agricultural products trade from the perspective of GVC

出口转移到国外 ($EF_3 + EF_4$)，这种情况在氮肥转移过程中更加突出，隐含在进口农产品中的氮肥再此跨越国境转移到国外的比例达到16%。在出口方面，隐含在中国出口的农产品中的化肥再次转移到国外的比例为15%。以上结果说明，中国进口农产品贸易背后隐含的化肥到达中国后有相当大一部分再出口到国外，形成隐含化肥多次跨境转移。按照从消费端征税补偿生产端资源和环境损失的原则，采用传统核算方法将会高估中国应当承担的责任。

2.2.2 典型农产品贸易隐含化肥用量分解

对于中国贸易体量较大的农产品 [进口：油料作物（含大豆）、棉花和食用油等；出口：蔬菜和水果等]，本文分别从进口和出口两方面各选取5组双边贸易，核算并分解了中国与其主要贸易伙伴的双边贸易中隐含的化肥用量，结果如图3所示。

在进口方面，比较典型的例子是中国从亚洲（除东亚）进口棉花中隐含的化肥有26万t，进口棉花在中国生产被再次出口到国外隐含的化肥有8万t，占比达30% (EF_3 , 1%; EF_4 , 29%)。同时，在中国从北美地区进口的棉花被中国加工后再次出口到国外隐含的化肥占比达到30% (EF_3 , 8%; EF_4 , 22%)。从亚洲（除东亚）地区进口的水果、蔬菜和食用油在国内生产后再次出口隐含化肥的比例也比较大，分别达到19%和15%。此外，南美是中国油料作物（含大豆）最主要的进口来源区域，隐含在中国从南美地区进口的油料作物中的化肥用量达到137万t，其中有6%随农产品出口再次转移到国外。在出口方面，作为中国出口体量最大的农产品之一，中国出口到亚洲（除东亚）地区的蔬菜和水果隐含28万t化肥，其中有11%的隐含化肥被进口国转移到国外 ($EF_3 + EF_4$)。此外，隐含化肥被当地生产后再次出口的比例较大的产品有出口到亚洲（除东亚）的棉花（38%隐含化肥在当地生产后再次出口）、出口到大洋洲的油料作物（含大豆）（34%隐含化肥在当地生产后再次出口）、出口到欧洲的水产品（22%隐含化肥在当地生产后再次出口）以及出口到东亚的其他谷物（含玉米）（20%隐含化肥在当地生产后再次出口）。

以中国农产品进口较大的油料作物（含大豆）、棉花、食用油和出口量较大的蔬菜、

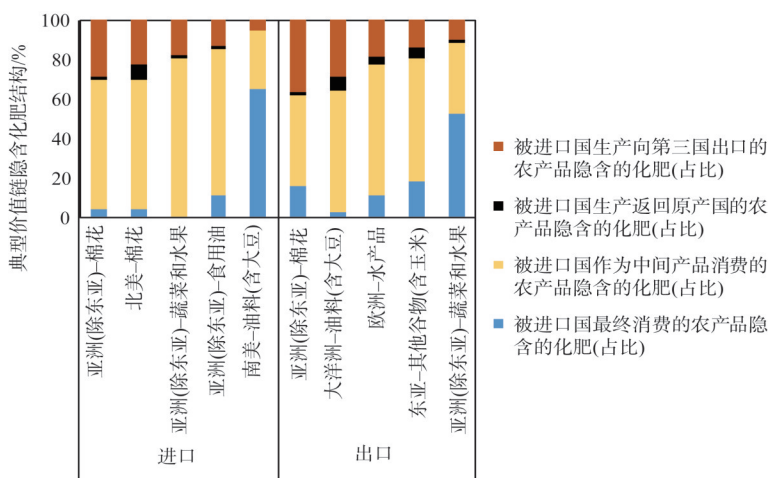


图3 中国农产品贸易隐含化肥用量：典型价值链

Fig. 3 Implied fertilizer usage in China's agricultural products: typical value chain

水果贸易为例,本文从进口和出口两方面分析了中国农产品贸易隐含的化肥转移。结果显示:中国进口的农产品有很大比例再出口到国外,且在中国与亚洲(除东亚)的棉花贸易中尤其突出(30%),说明中国进口的农产品在达到中国后,有很大比例再出口到国外以满足其他国家的最终需求,其背后隐含的资源和环境随着产品的出口再次实现跨境转移。以上结果表明,传统方法在核算各国需要承担的化肥污染损失时,会很大程度地高估中国农产品贸易引致的最终消费的化肥量,且在棉花贸易中尤其突出(30%)。为此,本文建议如从消费端补偿贸易带来的资源耗竭问题,要在全球价值链背景下考虑农产品的最终消费国,倡导不只是第一进口国而是全球各国共同承担贸易隐含的资源环境问题。

3 结论与讨论

本文基于GTAP数据库提供的多区域投入产出表,采用全球价值链方法测算中国农产品贸易中隐含的化肥转移,并采取GVC方法将农产品贸易背后隐含的化肥分解为四部分,分别为被进口国最终消费的农产品隐含的化肥、被进口国作为中间产品消费的农产品隐含的化肥、被进口国生产返回原产国的农产品隐含的化肥以及被进口国生产向第三国出口的农产品隐含的化肥。研究发现:(1)中国进口农产品隐含的化肥总量达到423万t,占直接进口化肥总量的44%。隐含化肥的出口213万t,占直接化肥出口总量的7%;同时,中国农产品贸易导致本国和全球化肥用量双双降低。中国参与农产品国际贸易节约本国化肥640万t(占我国化肥用量的13%),其中氮、磷、钾肥分别节约403万t(12%)、195万t(16%)和43万t(8%)。在全球视角下,中国参与农产品国际贸易促进了国际分工,使得农产品生产于化肥施用效率较高国家,引起全球化肥用量节约285万t,为缓解全球资源和环境压力做出突出贡献。(2)在进口方面,中国进口农产品隐含的化肥有12%随产品再出口转移到国外,这个比例在中国从亚洲(除东亚)进口的棉花贸易中更为突出,达到30%;在出口方面,隐含在中国出口农产品中的化肥有15%被进口国再转移到国外。

基于以上结论,提出以下建议:(1)在研究化肥等资源和环境消耗等问题时,应更加关注隐含在国际贸易中的资源和环境转移。同时建议各国采取更加积极的贸易政策,降低贸易壁垒,促进各国农产品贸易往来,促使农产品在资源利用效率更高的国家和地区生产,更大程度地发挥国际贸易在解决资源和环境问题中的积极作用。(2)建议在全球价值链视角下更为客观地估算农产品贸易隐含的化肥数量及其他资源环境问题,按照最终消费的资源 and 环境数量界定各国应当承担的生产端损失,共同解决贸易引致的资源环境问题。

当然,由于数据的可获得性,本文仅核算和分析了2014年中国农产品贸易隐含的化肥转移,得出的结果只能反映当年的情况。近些年农产品贸易隐含化肥的时间序列分析还需要进一步深入研究并发现其中的规律,但较为肯定的是,近些年农产品国际市场的进一步开放、农产品跨境电子商务等形式的出现都延长了农产品全球价值链,农产品贸易背后隐含的资源环境留在第一进口国的比例还在降低。另一方面,未来研究也需要考虑全球投入产出表在区分进口产品在国内消费和加工后再次出口时候的准确性,进一步提高研究结果的稳定性。

参考文献(References):

- [1] 黄季焜. 四十年中国农业发展改革和未来政策选择. 农业技术经济, 2018, (3): 4-15. [HUANG J K. Forty years of China's agricultural development and reform and the way forward in the future. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018, (3): 4-15.]
- [2] 刘成, 刘明迪, 冯中朝, 等. 测土配方施肥对油菜生产的影响: 基于1722份田间试验材料的经济学分析. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1340-1350. [LIU C, LIU M D, FENG Z C, et al. Effect of soil testing and formula fertilization on rape production: Economic analysis of 1722 field test materials. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1340-1350.]
- [3] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3161-3171. [ZHANG W F, MA L, HUANG G Q, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161-3171.]
- [4] BAI X G, WANG Y N, HUO X X, et al. Assessing fertilizer use efficiency and its determinants for apple production in China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 268-278.
- [5] 史常亮, 张益, 郭焱, 等. 耕地细碎化对农户化肥使用效率的影响. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2687-2700. [SHI C L, ZHANG Y, GUO Y, et al. The impact of land fragmentation on farmer's chemical fertilizer use efficiency. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2687-2700.]
- [6] LI Z G, ZHANG R H, LIU C, et al. Phosphorus spatial distribution and pollution risk assessment in agricultural soil around the Danjiangkou Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 699: 134417, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134417.
- [7] 侯孟阳, 姚顺波. 异质性条件下化肥面源污染排放的EKC再检验: 基于面板门槛模型的分组. 农业技术经济, 2019, (4): 104-118. [HOU M Y, YAO S B. EKC retest of fertilizer non-point source pollution emission under heterogeneous conditions: Grouping based on panel threshold model. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019, (4): 104-118.]
- [8] SANDSTM S, FUTTER M N, KYLLMAR K, et al. Particulate phosphorus and suspended solids losses from small agricultural catchments: Links to stream and catchment characteristics. *Science of the Total Environment*, 2019, 711: 134616, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134616.
- [9] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 长春地区食物链氮素养分流动趋势与特征分析. 自然资源学报, 2017, 32(2): 255-265. [ZHANG X M, WANG Y, YAN L, et al. The trend and characteristics of nitrogen nutrition in the food chain in Changchun. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 255-265.]
- [10] GRUBER N, GALLOWAY J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 2008, 451: 293-296.
- [11] ZHANG Y S, LUAN S J, CHEN L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 480-493.
- [12] 张艳, 于汶加, 陈其慎, 等. 化肥消费规律及中国化肥矿产需求趋势预测. 资源科学, 2015, 37(5): 977-987. [ZHANG Y, YU W J, CHEN Q S, et al. Fertilizer consumption rule and prediction of China's fertilizer-related resource minerals demand. *Resources Science*, 2015, 37(5): 977-987.]
- [13] 孙爱文, 张卫峰, 杜芬, 等. 中国钾资源及钾肥发展战略. 现代化工, 2009, 29(9): 17-21, 23. [SUN A W, ZHANG W F, DU F, et al. China's development strategy on potash resources and fertilizer. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(9): 17-21, 23.]
- [14] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 292-305.
- [15] LIN J T, PAN D, DAVIS J D, et al. China's international trade and air pollution in the United States. *PNAS*, 2014, 111(5): 1736-1741.
- [16] ZHANG Q, JIANG X J, TONG D, et al. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 2017, 543(7647): 705-709.
- [17] ODUM H T. Environment, power, and society. *American Journal of Public Health*, 1971, 61(1): 314.
- [18] CUI L B, PENG P, ZHU L. Embodied energy, export policy adjustment and China's sustainable development: A multi-regional input-output analysis. *Energy*, 2015, 82: 457-467.
- [19] 吴景辉, 张戈, 王耕. 能源富集区贸易隐含碳及隐含SO₂排放转移: 以山西省为例. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1445-1459. [WU J H, ZHANG G, WANG G. Study on trade embodied carbon and embodied SO₂ emission transfer in energy

- enrichment areas: A case study of Shanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1445-1459.]
- [20] QIANG W L, LIU A M, CHENG S K, et al. Agricultural trade and virtual land use: The case of China's crop trade. *Land Use Policy*, 2013, 33: 141-150.
- [21] ALI T, HUANG J K, WANG J X, et al. Global footprints of water and land resources through China's food trade. *Global Food Security*, 2016, 12: 139-145.
- [22] 伦飞, 刘俊国, 张丹. 1961—2011 年中国农田磷收支及磷使用效率研究. *资源科学*, 2016, 38(9): 1681-1691. [LUN F, LIU J G, ZHANG D. Trends in cropland P balance and P use efficiency in China from 1961 to 2011. *Resources Science*, 2016, 28(9): 1681-1691.]
- [23] LIU J G, YOU L Z, AMIMI M, et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flow in cropland. *PNAS*, 2010, 107(17): 8035-8040.
- [24] GEREFFI G, HUMPHREY J, KAPLINSKY R, et al. Introduction: Globalisation, value chains and development. *IDS Bulletin*, 2001, 32(3): 1-8.
- [25] KOOPMAN R, WANG Z, WEI S J. Tracing value-added and double counting in gross exports. *American Economic Review*, 2014, 104(2): 459-494.
- [26] MENG B, PETERS G P, WANG Z, et al. Tracing CO₂ emissions in global value chains. *Energy Economics*, 2018, 73: 24-42.
- [27] GREENVILLE J, KAWASAKI K, JOUANJEAN M A. Employment in agriculture and food trade: Assessing the role of GVCs. Paris: OECD Food, 2019.
- [28] GREENVILLE J, KAWASAKI K, JOUANJEAN M A. Value adding pathways in agriculture and food trade: The role of GVCs and services. Paris: OECD Food, 2019.
- [29] ZHANG Z K, ZHU K F, HEWINGS G. A multi-regional input-output analysis of the pollution haven hypothesis from the perspective of global production fragmentation. *Energy Economics*, 2017, 64: 13-23.
- [30] WEITZEL M, MA T. Emissions embodied in Chinese exports taking into account the special export structure of China. *Energy Economics*, 2014, 45: 45-52.
- [31] XU Y, DIETZENBACHER E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade. *Ecological Economics*, 2014, 101: 10-20.
- [32] 郭朝先, 胡雨朦. 全球生产分工体系下隐含能源跨境转移研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(12): 26-35. [GUO C X, HU Y M. Research on the cross-border transfer of embodied energy under global production division system. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(12): 26-35.]
- [33] 李真, 陈天明, 李茂林, 等. 中国真实贸易利益的再评估: 基于出口隐含环境成本的研究. *财经研究*, 2020, 46(6): 64-78. [LI Z, CHEN T M, LI M L, et al. Reevaluation on China's real trade benefit: A research based on the environmental cost embodied in export value added. *Journal of Finance and Economics*, 2020, 46(6): 64-78.]
- [34] WANG Z, WEI S J, ZHU K F. Quantifying International Production Sharing at the Bilateral and Sector Levels. Cambridge: NBER Working Paper Series, 2013.
- [35] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算. *生态学报*, 2018, 38(3): 788-799. [CAO T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji Region based on multi-regional input-output. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 788-799.]
- [36] HEFFER P. Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level 2010-2010/11. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2013.

Research on embodied nitrogen, phosphorus and potassium in China's agricultural trade from the perspective of global value chain

ZHU An-feng¹, GUO Zheng-quan^{2,3}, XIE Wei¹, TARIQ Ali⁴, LIU Ying⁵

(1. China Center for Agricultural Policy, School of Advanced Agricultural Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Economics and Management, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 3. Beijing Urban Governance Research Center, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 4. School of Economics and Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 5. Institute of Education and Economy Research, University of International Business and Economy, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper uses a multi-regional input-output table in conjunction with the global value chains (GVC) method to estimate the transfer of virtual fertilizers via China's global trade of agricultural products. The virtual fertilizers are divided into four types according to the form and the geographical location of agricultural products where they are finally consumed. We found that China's agricultural imports saved 6.4 million tons of fertilizer, accounting for 13% of China's fertilizer use) and saved 2.85 million tons of fertilizer globally, which alleviated global resource and environmental pressure. China's agricultural trade was deeply involved in the global value chains, and about 12% of the fertilizers imported through agricultural products were re-exported to other countries, which means that the resources embodied in the agricultural trade were exported again after arriving in China formed multiple cross-border transfers. It is suggested that the amount of fertilizers and other resources and environmental problems implied in agricultural trade should be estimated more objectively from the perspective of the global value chains, and the global community should share the resource and environmental problems caused by trade.

Keywords: agricultural trade; global value chains; fertilizer; multi-region input-output model