

引用格式: 陈雨然, 陈敏鹏. 全球磷产品贸易格局演变及中国磷安全[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 85-99. [Chen Y R, Chen M P. Evolution of global phosphorus products trade pattern and China's phosphorus import and export security[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 85-99.] DOI: 10.18402/resci.2024.01.07

# 全球磷产品贸易格局演变及中国磷安全

陈雨然, 陈敏鹏

(中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872)

**摘要:**【目的】磷是不可再生资源, 关系到农业发展与粮食安全。研究磷产品贸易格局的演化特征, 有利于认识中国在全球市场中的地位, 对保障中国磷安全有重要意义。【方法】本文基于复杂网络分析方法, 构建了1990—2020年全球磷产品贸易网络模型, 分析其全球化水平、贸易互惠和国家连接模式, 考察了贸易大国(地区)的中心性演化, 并构建指标评估了中国磷产品贸易安全。【结果】结果表明: ①随着全球化程度的加深, 以磷矿加工产品(包括磷肥与其他化工产品)为主的贸易网络越来越活跃, 互惠性增加了30%以上, 从而有利于增加国际合作, 稳定贸易关系。在不均衡的网络结构下, 许多国家(地区)依赖磷产品出口国(地区), 因此主要出口国(地区)的政策稳定性对全球磷产品供给十分重要。②20世纪90年代, 磷矿石、磷矿加工产品贸易的主要贸易国包括具有高磷资源禀赋或生产能力的出口国(摩洛哥、美国)与磷资源禀赋低、需求大的进口国(荷兰、德国、比利时、泰国和马来西亚等), 2006年以来随着东欧和中国磷矿石产量增加、磷肥需求扩大, 它们对磷产品贸易网络的影响能力不断增强。③随着磷化工产业的发展, 中国由磷资源净进口国转为净出口国, 贸易伙伴的政治风险和市场集中度深刻影响中国的贸易和安全, 应进一步提升贸易伙伴的多样性, 增强与政治稳定国家之间的贸易联系。【结论】本文认为应积极推进磷资源可持续管理, 考虑磷产业的长期可持续发展, 有效促进磷矿资源的保护和优化利用, 增强与磷资源大国的贸易联系, 提升国家长期的磷安全。

**关键词:** 磷资源; 全球贸易; 复杂网络; 模块度; 互惠性; 节点中心性; 磷安全; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.01.07

## 1 引言

磷是所有动植物脱氧核糖核酸(DNA)和核糖核酸(RNA)的重要组成部分, 是细胞运作和能量转移的基础, 是农业生产所必需的重要营养元素之一。相比其他重要营养元素如氮和钾, 磷是不可再生资源<sup>[1]</sup>, 无法从空气或海洋中获取, 只能通过磷矿开采获得。磷矿储量是已查明磷资源中能够在当前技术水平下开采和加工成磷矿石的资源。目前全球已发现的磷矿储量为720亿t<sup>[2]</sup>, 开采量将在2080年左右间达到峰值<sup>[3]</sup>。全球已有磷矿储量的70%以上分布在摩洛哥和西属撒哈拉<sup>[2]</sup>。磷矿储量在经过开采和选矿之后, 成为可交易的磷矿石, 进一步用于生产磷肥(如磷酸一铵、磷酸二铵等), 或

生产化工产品(如用作添加剂、洗涤剂和阻燃剂的磷酸或磷酸盐)。本文将磷肥和化工产品统称为磷矿加工产品。贸易在磷资源跨国流动中扮演着非常重要的角色, 从20世纪60年代到2010年, 通过全球贸易运输的磷资源增加了近8倍<sup>[4]</sup>。2010年以来, 全球磷矿石和磷肥总产量的15%<sup>[5]</sup>和40%<sup>[6]</sup>用于国际贸易, 而农产品贸易中内涵的磷资源占收获作物中所包含所有磷资源的16%<sup>[7]</sup>。贸易全球化提高了各国磷资源开发和利用的关联程度, 也会加剧贸易相关的风险。因此一些国家的出口关税和政策、消费变化冲击可能沿着供应链向世界其他地区传播<sup>[8,9]</sup>。2008年, 由于美国等磷资源出口国的供给不足, 以及印度等磷资源进口国缺乏需求弹性, 全球

收稿日期: 2023-04-13, 修订日期: 2023-01-04

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(22AZD098)。

作者简介: 陈雨然, 女, 山西大同人, 博士研究生, 研究方向为磷产品贸易和资源安全。E-mail: cyrchenyuran@163.com

通讯作者: 陈敏鹏, 女, 江西鄱阳, 教授, 研究方向为农业可持续性评估、农业温室气体排放与减缓政策。E-mail: minpeng.chen@ruc.edu.cn

磷肥价格增加1倍以上,磷矿石价格飙升3倍以上,从而导致了农业生产成本增加,影响了食物供给与粮食价格,为全球许多国家的粮食安全带来了风险<sup>[10]</sup>。

减少磷资源供应风险,提升有限磷矿储量的使用效率,合理控制磷资源进口依存度,是国家农业可持续生产和粮食安全的重要保障。中国仅拥有全球4.5%的磷矿储量,其中70%是低品位磷矿<sup>[11]</sup>。然而,2005年以来中国磷矿石产量占全球总产量的20%以上,且这一比例仍在不断增加<sup>[2]</sup>。2010—2020年,中国和摩洛哥的磷矿出口量占全球总出口的一半<sup>[12]</sup>。与摩洛哥相比,中国的磷矿储量少、品味低<sup>[13]</sup>,以当前的生产和需求水平,中国磷矿储备将于2045年耗尽<sup>[14]</sup>。另一方面,磷肥的过量施用导致了水体富营养化等环境问题,中国政府启动了“测土配方施肥计划”<sup>[15]</sup>与“化肥使用零增长行动计划”<sup>[16]</sup>,旨在提高磷资源利用率并减少环境影响。随着中国农业磷肥的下降,磷化工产业的过剩产能转向出口,出口占磷肥总产量的比重从2010年的18.5%增加至2020年的33.0%<sup>[6]</sup>。因此,探究中国在全球磷产品贸易中的角色地位及其对中国磷安全的影响,有利于明确磷化工产业结构调整方向、识别提升磷安全的战略方向。

一些研究采用系统动力学模型<sup>[17]</sup>或计量模型<sup>[14]</sup>预测了未来的磷资源供应,发现全球将于2040—2050年面临磷资源供应不足问题。已有大量研究采用物质流分析、磷足迹分析和投入产出分析国家、区域或全球层面的磷资源流动,以计算磷资源的利用效率<sup>[16,18-20]</sup>,识别减少磷资源损失的关键环节<sup>[21,22]</sup>,一些研究分析了磷产品贸易对提升磷利用效率和减少磷损失的重要性。如Wang等<sup>[23]</sup>发现国际贸易有利于节约磷资源的使用;Nesme等<sup>[4]</sup>识别了农产品国际贸易中内涵磷资源的不平衡分布格局;Yang等<sup>[23]</sup>发现全球贸易导致磷资源从新兴发展中国家流向发达国家,供应链的改善将缓解磷资源使用的不平衡。一些研究基于复杂网络方法研究如何改善供应链和贸易系统结构,讨论贸易连接相关的磷资源供应风险,识别影响系统脆弱性的重要进出口国。Chen等<sup>[12]</sup>发现贸易伙伴多样化能够稳定进出口来源,Li等<sup>[24]</sup>基于赫芬达尔-赫希曼(Hirschman-Herfindahl, HHI)指数考察一个国家的供应中断如何影响整个贸易系统。然而这些研究

只关注了磷矿石和磷矿加工产品,忽视了农产品贸易的重要性。自1960年以来,农产品贸易中的内涵磷资源占磷肥贸易的约1/3<sup>[4]</sup>,且不断增加。此外,HHI仅考虑了贸易份额的分散程度如何影响磷资源贸易安全,忽视了其他影响因素。已有研究在HHI的基础上,纳入了贸易伙伴国(地区)政治风险与运输风险,重新构建贸易安全指标并将其运用于石油贸易与林业产品贸易<sup>[26-28]</sup>。

通过构建1990—2020年全球磷产品贸易的复杂网络模型,本文分析了磷矿石、磷矿加工产品和农产品内涵磷资源所构成的国际贸易网络的演变趋势,包括贸易网络特征和结构。此外,本文还从出口量、进口量、控制能力和反控制能力4个维度量化主要贸易国家(地区)的演替,并明确中国在全球市场上的地位。在此基础上,本文考虑了伙伴国(地区)政治风险与运输中断风险,构建和计算了贸易安全指标,识别了中国磷产品贸易安全及其影响因素。

## 2 方法与数据

### 2.1 系统边界与研究框架

磷产品贸易网络由磷矿石、磷肥、化工产品、农产品内涵的 $P_2O_5$ 的跨国流动组成(图1)。其中,化工产品指的是用于制造添加剂等的磷酸或磷酸盐产品。由于磷肥和化工产品均由磷矿石加工得到,且贸易量都与磷化工产业的发展水平相关,因此本文将合并为磷矿加工产品进行讨论。由于70%~90%的磷矿石用于生产磷肥<sup>[29,30]</sup>,因此磷矿加工产品的贸易主要受到磷肥进出口的影响。农产品包括6类:谷物(包括大麦、小麦、高粱、稻米和玉米等)、动物产品(肉、蛋、奶和奶制品等)、豆类(大豆、扁豆和豌豆等)、水果和蔬菜、饲料(除大豆以外的饲料)、其他农产品(甜料、油料、薯类和茶叶等)。

本文从磷产品贸易网络演变特征、贸易大国(地区)演替、中国贸易安全3个方面开展分析,针对研究问题选取3个研究层面与相应的衡量指标(图1)。为了分析网络演变特征,本文选取了常用的复杂网络分析指标,将其分为衡量总体特征和衡量网络结构两类。衡量总体特征的指标中,总贸易量反映了贸易规模<sup>[31]</sup>;网络边数是网络中所有国家(地区)的连接总数,多样化的贸易连接有利于分散风险<sup>[12]</sup>。衡量网络结构的指标中,模块度<sup>[32,33]</sup>表明了网

2024年1月

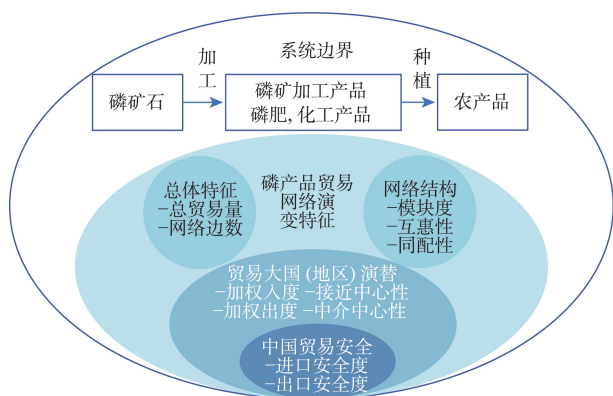


图1 研究框架

Figure 1 Framework of the research

络的全球化或区域化水平;互惠性<sup>[34]</sup>体现了国家(地区)双向互连的水平,较高的互惠性有利于稳固双边关系,保障贸易安全;同配性<sup>[35,36]</sup>计算了不同国家(地区)拥有的贸易连接数的相关性,从而衡量了各国(地区)在贸易伙伴多样化方面的异质性,其中正同配性反映了枢纽(贸易伙伴多的国家(地区))相互连接,而负同配性表明缺乏贸易伙伴的国家(地区)依赖枢纽。

为了识别对贸易安全较重要的国家(地区),并明确中国的角色地位,本文进一步选取1990年和2020年磷产品贸易量占全球50%的国家(地区)作为贸易大国(地区),考察其对贸易网络的影响力。加权入度和加权出度分别反映了国家(地区)的进出口量<sup>[37,38]</sup>,中介中心性衡量了国家(地区)作为中介沟通贸易连接从而影响其他国家(地区)间贸易的能力,即控制能力<sup>[34,39]</sup>,接近中心性高的贸易大国(地区)与各国(地区)直接建立贸易连接,因而不会受到中介国家(地区)的控制,即拥有较强的反控制能力<sup>[34,40]</sup>。

最后,本文基于已有研究构建了磷产品贸易进口安全度和出口安全度指标,以衡量中国的磷产品贸易安全。这一方法最初由Le Coq等<sup>[41]</sup>提出,优势在于考虑不同国家(地区)对贸易网络的影响时,能够进一步考虑了其市场份额,并作为权重纳入指标计算中,因此相比传统的等权重指标更符合实际情况。此外,本文在传统HHI指数的基础上进一步考虑了运输中断风险以及贸易伙伴的政治局势稳定性,其中运输中断风险受到数据限制而采用地理距离衡量。基于刘立涛等<sup>[26]</sup>的方法,本文在HHI指数

( $S_{ij}^0$ )的基础上,通过逐步加入政治风险( $S_{ij}^1$ )、运输距离等因素( $S_{ij}^2$ )来衡量中国贸易安全( $S_{ij}^3$ )。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 磷产品贸易网络构建

根据全球贸易数据,本文构建了1990—2020年的磷产品贸易网络,包括有向非加权网络( $A_m(t)$ )和有向加权网络( $W_m(t)$ ):

$$A_m(t) = \{a_{ij}(t) | i, j = 1, \dots, n \quad t = 1990, \dots, 2020\} \quad (1)$$

$$W_m(t) = \{w_{ij}(t) | i, j = 1, \dots, n \quad t = 1990, \dots, 2020\} \quad (2)$$

式中: $t$ 代表年份; $m=1, 2, 3$ 时组成磷产品贸易网络的产品分别为磷矿石、磷矿加工产品和农产品。网络中的节点( $i, j$ 等)是参与贸易的各个国家(地区); $n$ 是网络中的节点总数。边的方向是磷产品进出口方向。对于非加权网络,网络中的边代表是否进行贸易,因此 $a_{ij}(t) \in A(t)$ 是0-1变量,若国家(地区)间存在贸易连接, $a_{ij}(t)=1$ ,表明第 $t$ 年时存在国家(地区) $i$ 向 $j$ 的出口,否则 $a_{ij}(t)=0$ 。对于加权网络,网络中的边考虑了贸易量的影响, $w_{ij}(t) \in W(t)$ 代表了贸易产品内涵 $P_2O_5$ (以下称磷流), $w_{ij}(t)$ 是第 $t$ 年时国家(地区) $i$ 向 $j$ 出口的磷流(kg)。

### 2.2.2 磷产品贸易网络指标

#### (1) 网络演变特征

网络总体特征指标中,总贸易量( $TST$ )是指国家(地区)间的贸易磷流之和,计算为 $TST = \sum_{ij} a_{ij} w_{ij}$ 。网络边数( $L$ )是指国家(地区)间所建立的贸易连接总数,衡量贸易关系多样性,计算为 $L = \sum_{i \neq j} a_{ij}$ 。

对于网络结构,模块度( $Q$ )衡量了网络被划分为组织良好的社区结构的程度:

$$Q = \frac{1}{2K} \left( \sum_{ij} (w_{ij} - \frac{k_i k_j}{2K}) \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

其中 $K$ 为网络整体的平均度,计算公式为:

$$K = \frac{1}{n} \sum_i k_i = \frac{1}{n} \sum_{ij} (a_{ij} + a_{ji}) \quad (4)$$

式中: $k_i$ 是节点 $i$ 的节点度,指网络中与该节点相连的节点个数,在磷产品贸易网络中表明国家(地区) $i$ 与贸易伙伴之间存在的边的数量; $\delta_{ij}$ 是0-1变量,当节点 $i$ 和 $j$ 被划分在同一社区时 $\delta_{ij}=1$ ,当节点 $i$



和  $j$  在不同社区时  $\delta_{ij} = 0$ 。模块度越高,表明网络呈现出区域化格局,社区内部的国家(地区)通过贸易紧密相连,社区之间则连接稀疏。

互惠性( $\rho$ )计算了国家(地区)间存在双向连接的可能性:

$$\rho = \frac{\sum_{i \neq j} (a_{ij} - \bar{a})(a_{ji} - \bar{a})}{\sum_{i \neq j} (a_{ij} - \bar{a})^2} \quad (5)$$

式中:  $\bar{a} = \frac{L}{n(n-1)}$ 。

同配性( $AS$ )估计了国家(地区)所拥有的贸易伙伴数的异质性,衡量了网络的贸易连接模式:

$$AS = \frac{\sum_{ij} (k_i - K)(k_j - K)}{\sum_i (k_i - K)^2} \quad (6)$$

当  $AS > 0$  时,表明节点度较高的国家(地区)(以下称为枢纽)之间倾向于相互连接,即枢纽间更有可能彼此互通,存在极化效应;当  $AS < 0$  时,表明枢纽倾向于与节点度较低的国家(地区)建立贸易关系,存在涓滴效应。

## (2) 贸易大国(地区)演替

为了表征贸易大国(地区)在网络中的地位,本文测量了4种中心度指标。加权入度( $s_i^{\text{in}}$ )计算一国(地区)磷流平均进口量,衡量了进口大国(地区)的影响力:

$$s_i^{\text{in}} = \sum_j a_{ji} w_{ji} \quad (7)$$

加权出度( $s_i^{\text{out}}$ )计算一国(地区)磷流平均出口量,衡量了出口大国(地区)的影响力:

$$s_i^{\text{out}} = \sum_j a_{ij} w_{ij} \quad (8)$$

接近中心性( $C_B(i)$ )是节点与所有其他节点间最短路径长度之和的倒数:

$$C_B(i) = \frac{1}{\sum_j d(j, i)} \quad (9)$$

式中:  $d(j, i)$  为节点  $j$  和  $i$  之间的最短路径的长度,接近中心性较高的国家(地区),贸易路径更短,因此不容易受到其他国家(地区)的控制。

中介中心性( $g_b(i, j)$ )是节点参与其他贸易联系的频次:

$$g_b(i, j) = \sum_{i, j} \frac{p_{bij}}{p_{ij}} \quad (10)$$

式中:  $p_{ij}$  表示两个节点  $i$  和  $j$  之间的最短路径数;  $p_{bij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间所有最短路径中经过节点  $b$  的路径数。具有高中介中心性的节点往往处于其他两个节点的最短路径中,作为贸易中介对磷资源有很强的控制能力。

## (3) 中国贸易安全

贸易安全度指标是在 HHI 指数的倒数的基础上,逐步加入政治风险、运输距离等因素构建的。 $S_{ij}^0$  仅考虑了市场份额的影响:

$$S_{ij}^0 = \left( \sum \left( \frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}} \right)^2 \right)^{-1} \quad (11)$$

式中:  $\frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}}$  是中国与贸易伙伴的贸易量占全球总贸易量的比例,加入政治风险评级  $P$  后指数为  $S_{ij}^1$ :

$$S_{ij}^1 = \left( \sum \frac{100-P}{100} \times \left( \frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}} \right)^2 \right)^{-1} \quad (12)$$

式中:  $P$  数值越高表明政治风险越小。在  $S_{ij}^0$  基础上加入中国与贸易伙伴间的欧氏距离  $D_{ij}$  后得到指数  $S_{ij}^2$ :

$$S_{ij}^2 = \left( \sum \left( \frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}} \right)^2 \times (1 - D_{ij}^{-1}) \right)^{-1} \quad (13)$$

同时考虑市场份额、政治风险和运输距离得到指数  $S_{ij}^3$ :

$$S_{ij}^3 = \left( \sum \frac{100-P}{100} \times \left( \frac{w_{ij}}{\sum w_{ij}} \right)^2 \times (1 - D_{ij}^{-1}) \right)^{-1} \quad (14)$$

进口安全度( $S_{i\text{CHN}}^0$ 、 $S_{i\text{CHN}}^1$ 、 $S_{i\text{CHN}}^2$ 、 $S_{i\text{CHN}}^3$ )衡量了中国作为磷产品进口国时的贸易安全,即  $j$  为中国(CHN),  $i$  为全球其他国家(地区)。出口安全度( $S_{\text{CHN}j}^0$ 、 $S_{\text{CHN}j}^1$ 、 $S_{\text{CHN}j}^2$ 、 $S_{\text{CHN}j}^3$ )衡量了贸易伙伴对中国磷产品出口的影响,即  $i$  为中国(CHN),  $j$  为全球其他国家(地区)。

## 2.3 数据来源

构建 1990—2020 年磷产品贸易网络需要两类数据——产品贸易量和产品的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量,将贸易量数据(kg)与产品  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量数据相乘获得磷流



2024年1月

(kg)。磷矿石、磷肥和化工产品的贸易量数据来自于联合国贸易数据库<sup>[42]</sup>;农产品的贸易量数据则来自于联合国粮食及农业组织<sup>[6]</sup>。我们使用进口国(地区)汇报的数据,因为其考虑了运输过程中的损失,比出口国(地区)汇报的数据更为可靠<sup>[43]</sup>。磷肥产品的 $P_2O_5$ 含量参考国际肥料工业协会的“肥料转换器”数据库<sup>[44]</sup>;磷矿石和化工产品的 $P_2O_5$ 含量则参考中华人民共和国海关总署的“重点商品查询”数据库<sup>[45]</sup>;最后,农产品的 $P_2O_5$ 含量参考美国农业部农

业研究组织公布的国家标准参考营养素数据库<sup>[46]</sup>。此外,还需要经济体政治风险评级和地理距离以构建贸易安全度,其中政治风险评级指数来自 the PRS Group 数据库<sup>[47]</sup>,地理距离则来自 CEPII 数据库<sup>[48]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 全球磷产品贸易空间格局

图2显示了1990和2020年全球磷产品贸易网络,总体而言,贸易国数量有所增加,同时贸易量显著扩大,相比1990年,2020年80000 t以上的磷流的

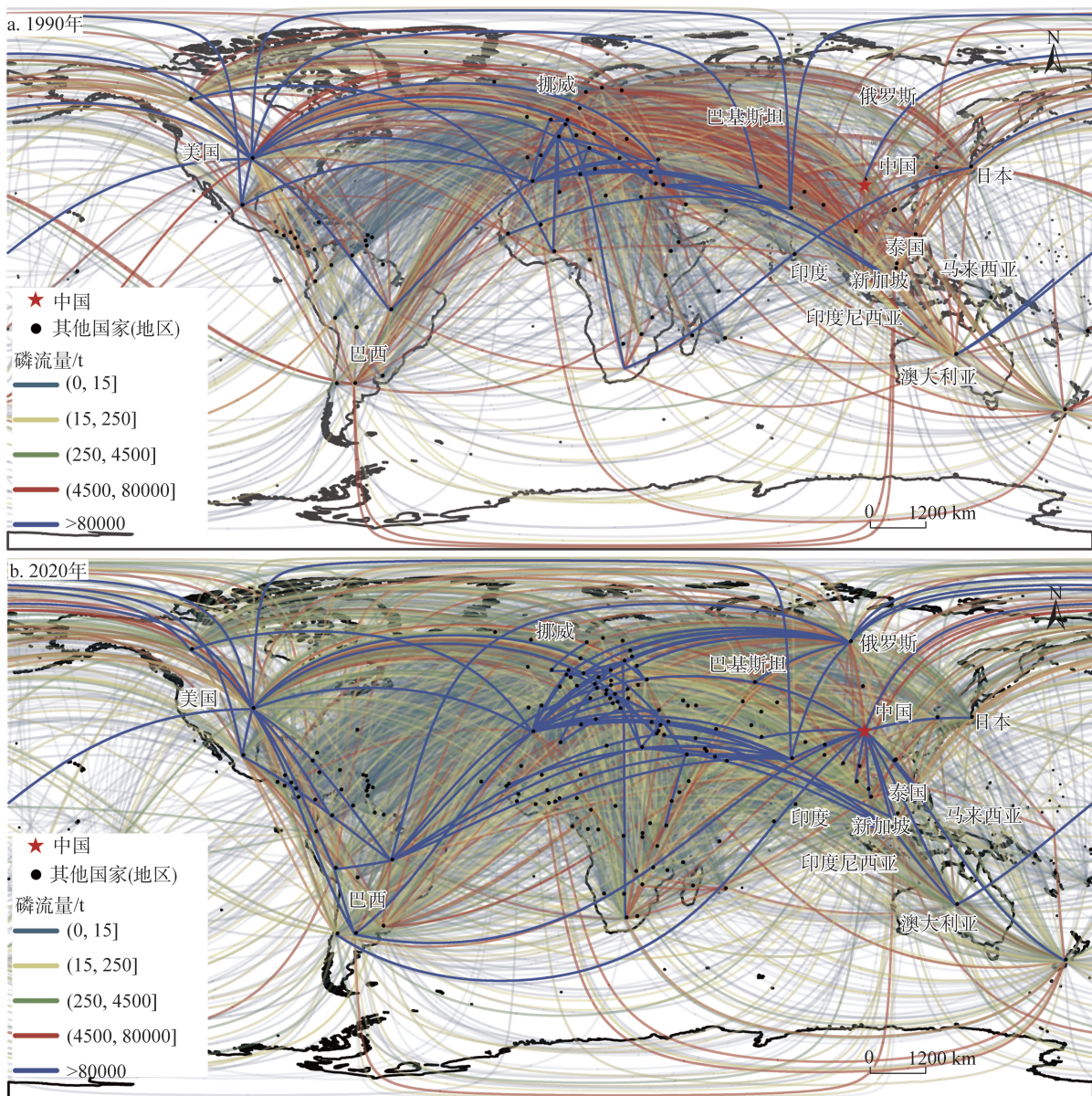


图2 1990年与2020年磷产品贸易空间格局

Figure 2 Spatial pattern of trade in phosphorus products, 1990 and 2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准底图制作,底图边界无修改。

贸易边数增加了一倍。1990年,177个国家(地区)贸易内涵的磷流为10万t,主要出口地区包括北美洲、非洲、西亚以及西欧(占全球出口的88%),主要进口地区包括除东欧外的欧洲地区、东亚和西亚(占全球进口的70%),其中,从北美洲出口至东亚地区的磷产品贸易量最大(占贸易总量的11.6%)。2020年,206个国家(地区)贸易中内涵的磷流19万t,主要出口地区增加了东亚,但撒哈拉以南非洲的出口量下降,主要进口地区包括了拉丁美洲和加勒比地区、西欧、北欧、北美以及澳大利亚与新西兰(占全球进口的84%),其中,从北非出口至拉丁美洲和加勒比地区的磷产品贸易量最大(占贸易总量的13.8%)。

1990年,中国磷资源产品进出口比较集中,拥有69个出口伙伴和61个进口伙伴,共出口磷流量14.4万t,其中出口至东亚与东南亚地区的磷流最多(分别占总出口的47.1%和46.7%),主要流向日本、马来西亚、泰国、印度尼西亚和新加坡;共进口磷流175.9万t,其中82.4%来自北美(主要进口自美国)。2020年,中国磷资源产品进出口更加分散,拥有174个出口伙伴和132个进口伙伴,共出口磷流502.7万t,主要流向南亚(25.2%)、东南亚(25.1%)、拉丁美洲和加勒比地区(16.6%)、澳大利亚与新西兰(13.2%)以及东亚(10.9%),其中印度、澳大利亚、印度尼西亚、巴基斯坦和日本是最大的出口目的地;共进口磷流65.5万t,主要来自拉丁美洲和加勒比地区(29.3%)、北美(16.6%)、北欧(13.7%)和东欧

(12.2%),其中巴西、美国、挪威、俄罗斯和摩洛哥是最大的进口来源。

### 3.2 全球磷产品贸易网络特征演变趋势

#### 3.2.1 网络总体特征

总体而言,磷产品贸易网络的规模不断扩大,磷矿石、磷矿加工产品和农产品的总贸易量分别增加了22%、187%和337%(图3a),表明1990—2020各国(地区)越来越倾向于增加磷矿加工产品的贸易量,而非直接交易磷矿石。磷矿石贸易的增长最小,一方面是由于磷矿石生产受到磷矿储量的资源禀赋限制,另一方面是由于在磷矿石的需求端,对磷矿石进行加工的磷化工产业需要较高的前期投资,因此全球大部分国家(地区)采用进口替代生产的方式满足消费<sup>[49]</sup>。即使是撒哈拉以南非洲等磷矿储量较大且天然气资源丰富的地区,也难以实现磷化工产业的规模经济,从而净进口磷肥<sup>[50]</sup>。此外,已有研究发现,磷矿石生产商倾向于延长产业链,在磷矿石产地进一步加工磷肥以获得更高增加值<sup>[51]</sup>,这也是导致磷矿加工产品贸易比磷矿石贸易活跃的原因。因此,保障磷产品贸易的安全应优先考虑市场活跃且贸易量大的磷矿加工产品。贸易量波动反映了全球磷产品贸易网络所经历的冲击,例如,1993年磷矿石和磷矿加工产品的交易量均迅速减少,反映了前苏联和东欧作为重要磷肥出口地区,其政治风险对贸易系统的影响<sup>[52]</sup>;1998年磷矿石和磷矿加工产品的贸易量明显上升,源于俄罗斯磷矿石产量的大幅增加<sup>[53]</sup>;2008年磷价的剧烈波动

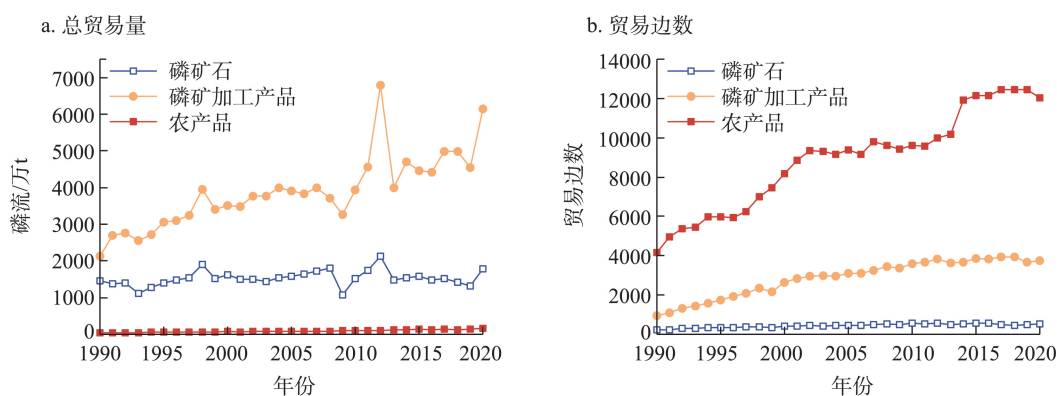


图3 1990—2020年磷矿石、磷矿加工产品和农产品贸易网络的总贸易量和贸易边数

Figure 3 Total trade volume and trade links in the trade networks for phosphate rock, processed phosphate products, and agricultural products, 1990-2020



2024年1月

和价格高峰<sup>[1]</sup>导致了2009年总贸易量锐减;2012年的贸易量增加则与印度进口的增加<sup>[51]</sup>以及2010—2012年西亚和北非等磷矿储备量丰富地区的“阿拉伯之春”有关<sup>[55]</sup>;2019年磷矿石和磷矿加工产品的交易量下降,反映了过去几年磷化工产业面临供给过剩和结构性失衡问题,因而各国(地区)均降低了磷矿石产量,而在需求方面,中美贸易摩擦与俄乌紧张局势也影响了贸易环境<sup>[56]</sup>。但是总体而言,随着全球人口的增加和粮食需求的上升,以磷矿加工产品贸易为主的磷资源跨国(地区)流动愈发活跃。

### 3.2.2 网络结构特征

1990—2020年,尽管磷矿石的贸易连接增加了140%(图3b),然而磷矿石贸易网络总体上呈现稀疏连接的区域化格局,模块度水平为 $0.3 \pm 0.1$ (图4a)。相较而言,磷矿加工产品和农产品的贸易连接水平更高,且增加速度更快(分别增加了289%和190%)。因而,随着贸易关系的增多,本就较低的网络模块度呈现出下降趋势(磷矿加工产品贸易网络下降10.4%,农产品贸易网络下降33.8%),表明了不断扩大的贸易全球化水平。贸易连接多样化有利于贸易国(地区)在遇到冲击时寻找替代的贸易伙伴,从而分散风险。

从互惠性来看,农产品贸易网络互惠性最高,为0.49~0.64(图4b)。这是由于推动各国(地区)进行农产品贸易的因素,不仅包括磷矿储备和磷化工产业发展水平的比较优势,还包括在土地、水资源、劳动力、农业机械等其他农业要素水平的比较优势,因此农产品贸易所引起的跨国(地区)磷流更容

易出现双向流动。此外,磷矿石、磷矿加工产品和农产品的互惠性分别增加了77%、59%和30%,表明国家(地区)间交流合作愈发密集,从而有益于巩固贸易关系、保障贸易渠道、提高国际合作的机会等。

同配性(图4c)反映了贸易双方在贸易伙伴数方面的地位强弱。磷矿石贸易网络的平均同配性最高,表明贸易双方所拥有的贸易伙伴数相近,即建立贸易联系的国家(地区)往往均为枢纽,而磷矿加工产品贸易网络的平均同配性更低,说明更容易出现“小国(地区)依赖枢纽”现象,即枢纽拥有非常多贸易伙伴,对贸易网络的维持起主导作用,而小国(地区)能够获得相对稳定的磷流进口来源。这是由于进口磷矿石的国家(地区)往往具备生产磷肥和化工产品的能力,而受到磷化工产业发展水平影响,磷矿加工产品的生产国(地区)远远少于消费国(地区)<sup>[30]</sup>,因此大量进口国(地区)依赖于少数出口国(地区),为保障磷贸易安全,进口国(地区)应重点关注出口枢纽的产量和出口政策。对于异质性更高的磷矿加工产品贸易网络,枢纽的主导力量会导致贸易市场缺乏竞争,存在垄断性供应商对磷肥定价过高的风险。如Torero等<sup>[50]</sup>发现化肥行业集中度下降10%将使肥料价格平均下降5.6%~11.6%,即增加出口国(地区)间的竞争将有利于降低磷肥价格,从而有利于贫穷国家(地区)的农民购买和使用磷肥,以增加粮食产量、保障粮食安全。农产品贸易网络拥有最低的平均同配性,这与Liu等<sup>[57]</sup>和Burkholz等<sup>[58]</sup>发现的粮食贸易网络的非均衡结构一致。非均衡结构有利于缺磷国家(地区)通过进口

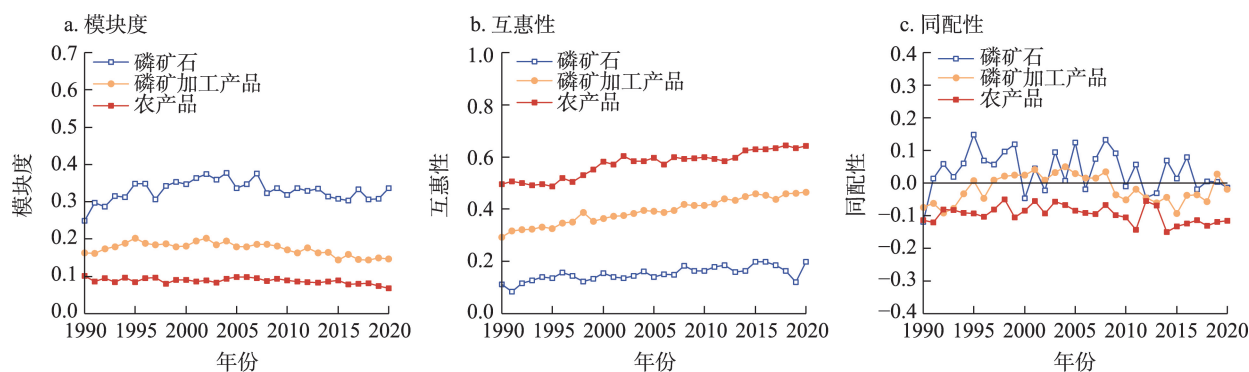


图4 1990—2020年磷矿石、磷矿加工产品和农产品贸易网络的模块度、互惠性和同配性

Figure 4 Modularity, reciprocity, and assortativity of trade networks for phosphate rock, processed phosphate products and agricultural products, 1990-2020



农产品获取磷资源,缓解土壤肥力低下的风险,但也会使得缺乏贸易伙伴的小国(地区)过于依赖出口枢纽,从而容易受到出口枢纽风险的冲击。此外,非均衡结构加剧了农产品出口国(地区)的土壤和水体污染,如美国密西西比河流域由于种植用于出口的饲料成为缺氧水域<sup>[4]</sup>。

### 3.3 贸易大国(地区)的演替趋势

全球磷产品贸易网络中最重要的国家往往是磷矿石贸易大国(地区)。全球磷矿石贸易网络中,早期贸易大国(地区)包括摩洛哥、美国和一些欧洲国家等(如荷兰、法国和德国)(图5a)。作为20世纪90年代全球磷矿储量第一与第三的国家,美国与摩洛哥通过大量出口磷矿石获得经济收益<sup>[31]</sup>。全球磷矿储量第二的中国,由于磷化工产业发展水平低<sup>[11]</sup>,磷矿石产量与出口量较低,因此在磷矿石贸易网络中的地位并不突出。欧洲拥有集约化的农业与较高的牲畜密度,从而有较高的磷肥需求。尽管其磷肥施用量呈下降趋势<sup>[59]</sup>,荷兰、法国和德国仍然在磷

矿石贸易市场上扮演重要的角色。2020年,随着俄罗斯磷矿石产量和出口量增加,以及亚洲新兴国家(地区)的发展,东欧和一些亚洲国家(地区)(中国、韩国和印度)进入了贸易大国(地区)行列(图5d)。而美国由于磷矿储量的质量下降和国内对环境影响的重视,逐渐减少磷矿石出口<sup>[60]</sup>,从而影响力有所下降。此外,新西兰作为农产品生产大国(主要是乳制品、肉类和羊毛等),磷肥消耗量是世界平均水平的3倍<sup>[61]</sup>,因此对磷矿石资源消费需求较大,拥有较高的控制与反控制能力。

全球磷矿加工产品贸易网络中,早期贸易大国(地区)包括出口国美国,以及进口国荷兰、德国、比利时、泰国和马来西亚(图5b)。苏东剧变之后,俄罗斯的磷矿石产量不断增加(从1994年的792万t提高到2020年的1400万t<sup>[2]</sup>),逐渐成为出口大国,而且东欧化肥使用量增加<sup>[59]</sup>,因此2020年乌克兰、塞尔维亚和罗马尼亚等国逐渐成为进口大国。此外,随着磷肥需求的增加,中国通过政府补贴、技术

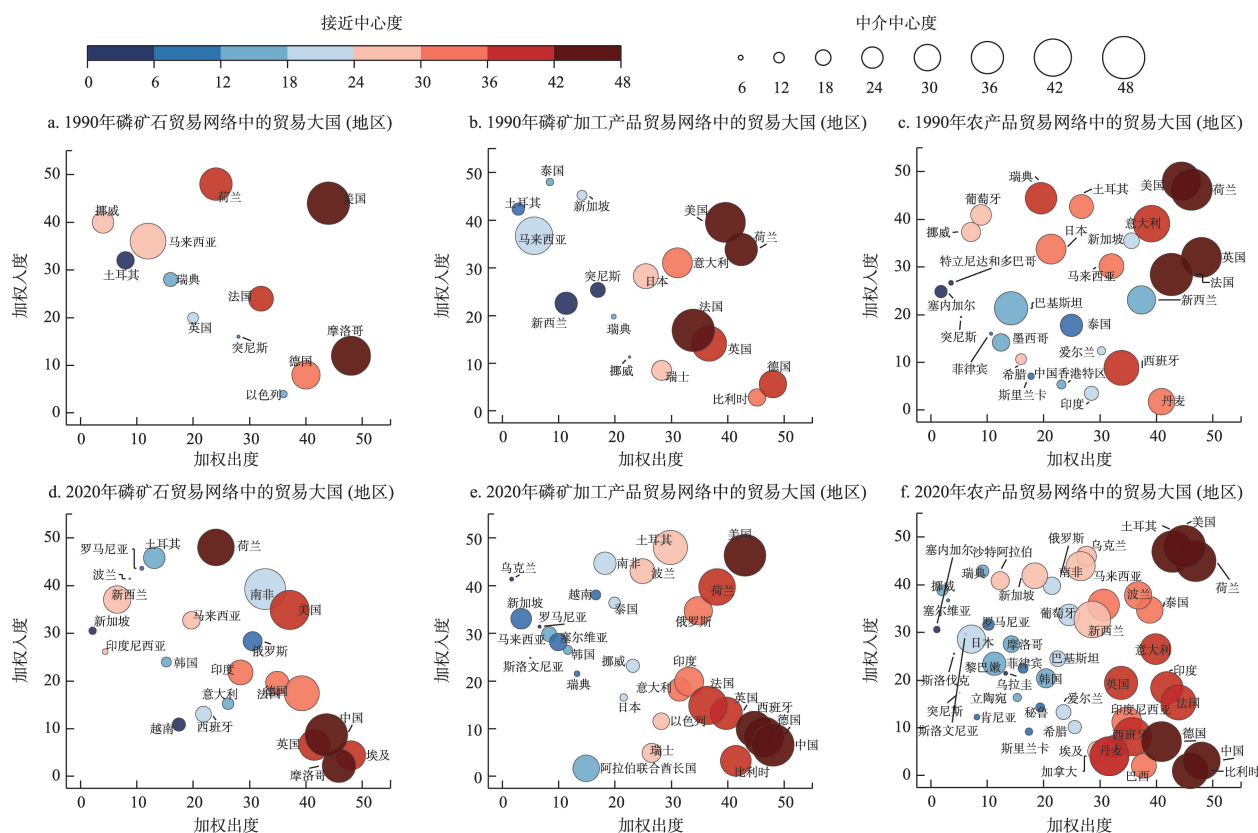


图5 1990和2020年磷矿石、磷矿加工产品和农产品贸易网络中的贸易大国(地区)地位排名

Figure 5 Ranking of major trading countries (regions) in the trade networks for phosphate rock, processed phosphate products, and agricultural products, 1990 and 2020

2024年1月

改良等方式不断扩大磷肥产能<sup>[16]</sup>,成为了磷矿加工产品第一出口大国<sup>[12]</sup>(图 5e)。总体而言,磷矿石贸易网络中的贸易大国(地区)在磷矿加工产品贸易市场上也十分重要。随时间推移,磷矿加工产品贸易市场上,进口大国(地区)数量的增加快于出口大国(地区),因此,满足不断扩大的磷资源需求以支持集约化农业生产仍然是一个重要问题。

全球农产品贸易网络中,贸易大国(地区)地理跨度广,包括了大洋洲(如新西兰)、东亚(如中国和日本)、南亚(如印度)、东南亚(如泰国、新加坡和马来西亚)、拉丁美洲(如巴西、秘鲁和乌拉圭)、北美和欧洲,以及少量的非洲和西亚国家(图 5c)。1990—2020 年,位于非洲、西亚和东欧的农产品进口大国显著增加(图 5f)。而 2020 年,尽管俄罗斯、南非、塞内加尔、土耳其、沙特阿拉伯、摩洛哥和突尼斯的年均磷矿石产量至少达 60 万 t<sup>[2]</sup>,这些国家仍然通过农产品贸易进口磷资源。

### 3.4 中国磷产品贸易安全

总体而言,中国的贸易磷流以磷矿加工产品为主,占总磷流量的 51.7%~99.1%(图 6a)。从贸易磷流来看,可以将中国磷产品进出口分为两个阶段。1990—2005 年中国净进口磷资源,贸易结构表现为 3 个特征,一是少量出口磷矿石和磷矿加工产品;二是大量进口磷矿加工产品;三是农产品中内涵的磷

资源进口大于出口,但相对平衡。这一阶段中国磷肥生产能力不足以满足农业发展,因此大量进口磷肥,同时出口磷矿石以获得外汇、支持工业发展<sup>[11,62]</sup>。2006—2020 年,中国转为磷资源净出口国,贸易结构表现为 3 个特征,一是磷矿石出口量不断减少;二是大量出口磷矿加工产品;三是农产品中内涵的磷资源进口远大于出口。这一阶段中国磷化工产业生产能力较高并经历了产业结构调整,但经历了 2004 年与 2007—2008 年化肥价格上涨后,中国出于粮食安全的考虑,控制磷矿石出口,并倾向于出口高增加值的磷矿加工产品<sup>[63,64]</sup>。农产品磷资源进口不断增加,占比最高的农产品是豆类(60.7%~86.9%)和谷物(3.7%~21.2%)(图 6b),反映了中国在加入世界贸易组织后农产品进口规模不断扩大,尤其是小麦、玉米和大豆等农产品<sup>[65]</sup>。由于磷产品贸易网络的不均衡结构,2005 年前作为进口国时,中国的贸易安全很大程度上受到磷资源出口枢纽如美国的影响;而 2006 年以来,随着中国扩大磷矿加工产品的出口量,中国在贸易网络中的地位逐渐增强,成为拥有较高控制与反控制能力的出口国,此时为保障磷化工产业的发展,需要消耗大量过剩产能<sup>[66]</sup>,因此磷矿加工产品的出口安全变得重要。

整体而言,中国的出口安全度高于进口安全度,这是由于出口市场比进口市场更加分散,尤其

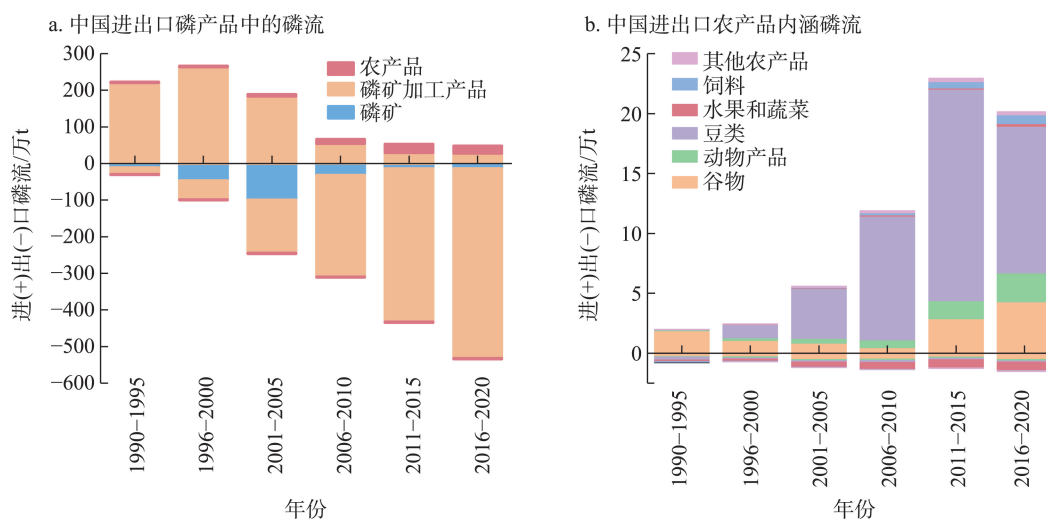


图6 1990—2020 中国进出口磷矿石、磷矿加工产品和农产品中的磷流

Figure 6 Average  $P_2O_5$  quantity in the import and export of phosphate rock, processed phosphate products, and agricultural products in China, 1990-2020

对于磷矿石、磷矿加工产品贸易而言<sup>[30]</sup>。贸易边数多、全球化水平高的网络结构,可以避免单一贸易渠道带来的风险,因此贸易安全度更高,如农产品贸易网络的平均贸易安全度高于磷矿加工产品贸易网络的平均贸易安全度。而磷矿石贸易网络呈现出区域化特征,因此平均贸易安全度最低(表1)。

进一步分析对中国磷贸易安全最重要的产品,即磷矿加工产品(图7)。 $S^0$ 只考虑了贸易伙伴多样化的影响,因此低估了供需安全度。 $S^1$ 在 $S^0$ 基础上纳入了贸易伙伴政治风险因素的影响, $S^2$ 在 $S^0$ 基础上纳入了运输距离因素,因此安全度比 $S^0$ 高。 $S^3$ 同时考虑了政治风险与运输距离,而 $S^1$ 非常接近 $S^3$ ,因此对于磷矿加工产品的贸易安全而言,贸易伙伴政治风险的影响远大于运输距离。

2007年后中国磷矿加工产品的进口安全度相比之前有所上升,这是由于美国向中国出口的磷矿加工产品 $P_2O_5$ 从过去17年的26.9万~244.2万t下降

至2008—2020年的0.1万~14.5万t,因此中国的磷产品进口分散至其他进口来源,从而有利于降低集中度和分散风险。此外,2007—2020中国从政治风险更低地区(北欧、西欧和东亚)进口的磷流占总进口的比例增长(分别增长了26.7%、98.4%和11.5%),从而缓解了美国出口减少所带来的负面影响。2008年后,中国磷矿加工产品的出口安全度迅速下降,之后便在更低的水平波动。这是由于2008年后,中国向南亚国家(尤其是印度)的出口迅速增长,2008—2011年平均增长47.7%,此后南亚地区的进口占中国总出口量的35.5%(26.0%~42.7%),极大降低了中国磷产品出口市场的多样性。另一个原因是,中国向东南亚地区的出口下降,2008—2020年中国出口至东南亚地区的磷流占比从30%下降到25.8%,而东南亚地区的政治安全水平高于南亚,进一步降低了中国的需求安全度。总之,1990—2020年,随着中国由进口大国转变为出口大国,磷

表1 1990—2020年中国磷产品贸易的进口安全度( $S^3_{iCHN}$ )与出口安全度( $S^3_{CHNj}$ )

Table 1 Phosphorus import security ( $S^3_{iCHN}$ ) and export security ( $S^3_{CHNj}$ ) of China trade, 1990-2020

	磷矿石贸易网络		磷矿加工产品贸易网络		农产品贸易网络	
	进口安全度	出口安全度	进口安全度	出口安全度	进口安全度	出口安全度
1990年	0.0	5.5	11.8	15.6	19.2	42.8
2000年	23.8	11.9	14.4	35.3	29.1	106.0
2010年	5.3	7.7	22.5	31.0	15.6	141.7
2020年	2.9	9.3	25.9	39.2	10.9	138.8
平均值	6.6	12.6	15.8	32.0	20.7	100.9

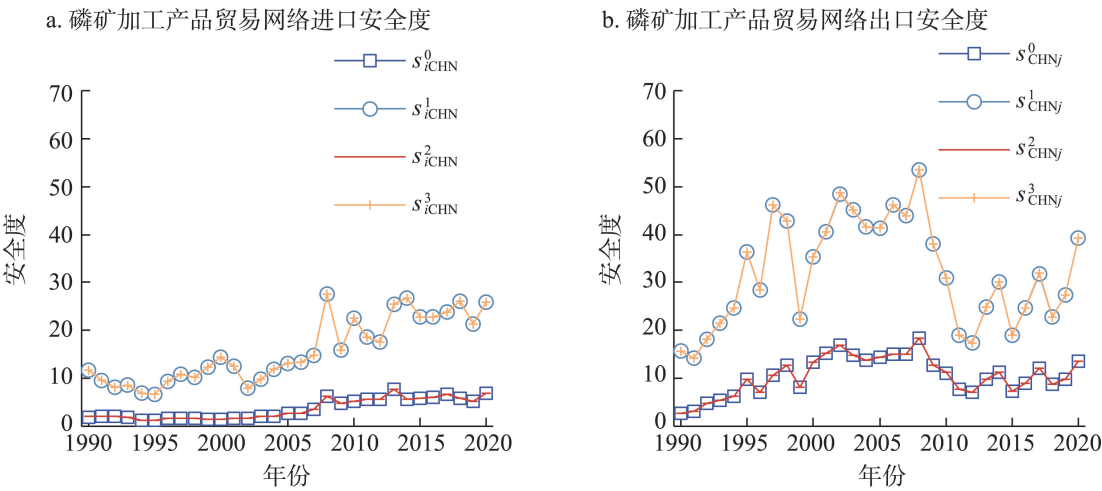


图7 1990—2020年中国磷矿加工产品贸易进口安全度与出口安全度变化趋势

Figure 7 Trend of import and export security for China's trade of processed phosphate products, 1990-2020



2024年1月

矿加工产品进口来源的多样性使供给安全度增加,而出口市场集中于政治风险较高的南亚地区,从而降低了出口安全度。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文以1990—2020年磷产品贸易数据为基础,构建了复杂网络模型,探究磷矿石、磷矿加工产品和农产品贸易网络特征演变,揭示了贸易大国(地区)演替,探讨了中国在网络中的地位,并构建指标探究中国磷产品贸易安全。得到以下结论:

(1)1990—2020年,全球磷产品贸易网络、总贸易量和贸易参与国数量均呈增长趋势,其中磷矿加工产品贸易市场最活跃。贸易连接的增加提高了网络全球化水平,从而有利于贸易伙伴国相互替代以分散风险,减少了与地缘政治相关的全球磷贸易风险。全球贸易互惠增强,增加了国家(地区)间的交流与合作,全球磷产品贸易网络稳定性在增强。然而,磷矿加工产品和农产品贸易网络呈现不均衡结构,许多国家(地区)依赖磷资源出口国(地区),是全球磷产品贸易网络的风险点。

(2)磷矿石贸易网络的贸易大国(地区)包括磷矿资源出口大国,如摩洛哥、美国和俄罗斯,以及消费大国,如荷兰、法国、德国、新西兰等,贸易大国(地区)演替趋势受到出口方磷矿储量和贸易政策的影响。磷矿加工产品贸易网络的贸易大国(地区)包括美国、荷兰、德国、比利时、泰国和马来西亚,且随着俄罗斯和中国的产量增加,以及东欧需求增加而演替。农产品贸易网络贸易大国(地区)数量多、地理分布广,而且位于非洲、西亚和东欧的农产品需求大国(地区)不断增加。

(3)随着磷化工产业的发展,中国由磷资源净进口大国逐渐转为净出口大国,贸易结构中磷矿加工产品占比最大。中国作为进口大国时贸易安全主要受到磷矿资源出口大国美国的影响;中国作为出口国时,在贸易网络中的地位逐渐增强,拥有较高控制与反控制能力。未来进一步提高出口安全,需要中国完善稳定出口政策,提高磷矿储备开采和磷矿石加工中的资源利用效率,推动磷化工产业的转型与升级。

### 4.2 讨论

全球磷矿资源的分布在地理上非常集中,随着全球贸易的不断扩大,磷产品贸易网络向更加复杂的结构演变。中国作为目前全球磷矿储量第二高、全球磷矿石产量最大的国家,磷矿加工产品出口量不断扩大,形成了以磷矿加工产品为主的出口结构。但是,中国的磷矿资源品位低,保障自身粮食安全的压力大,因此应遵循全球磷产品贸易网络的演变规律,通过提高磷资源利用效率和延长产业链等方式兼顾自身磷资源的长期供给稳定性和磷化工产业发展的持续性:

(1)全球磷产品贸易网络中磷矿加工产品的贸易连接增长最快、市场最为活跃,中国以磷矿加工产品为主的出口结构有利于对磷矿石进行深加工,以提高对中低品位磷矿的利用,出口高附加值的加工产品。扩大磷矿加工产品出口市场有利于分散风险,中国应继续拓展多边贸易关系,鼓励龙头企业积极“走出去”,利用“一带一路”等合作平台互利互惠,与需要进口磷肥以发展农业现代化的国家(地区)建立贸易关系。

(2)全球磷产品贸易网络呈现出“小国依赖枢纽”的结构,因此进一步增强与贸易大国(地区)的贸易往来,能够保障贸易稳定,保障中国磷产品的出口安全。泰国、马来西亚、新西兰、乌克兰、塞尔维亚和罗马尼亚等国,在贸易市场上地位较高,对磷产品贸易有较高控制力,并作为中介传输磷资源,中国应与这些国家保持良好的贸易关系。

(3)中国作为磷出口大国,贸易伙伴的政治稳定性是影响出口安全的重要因素。当前中国30%的出口市场位于非洲和南亚等政治风险较高的地区,加大对东南亚和拉丁美洲等政治更加稳定地区的出口,有利于提升磷产品出口安全,如加大对阿根廷、智利、泰国和印度尼西亚等国的出口。中国磷产品进口来源多样性增强有利于分散风险,提高进口安全。但站在更长期的视角,中国的磷资源消费主要依赖国内磷矿石供应<sup>[16]</sup>,因此需要积极推进磷资源可持续管理,加快转向更循环的经济系统,如可以改进动物生产系统、提高动物饲料中磷的消化率<sup>[67]</sup>。此外,可以从消费端减少磷资源的浪费。

通过改进食物储存和运输技术、减少加工过程中的食物损失<sup>[68]</sup>以及减少食物浪费,能够有效增强磷资源的可持续性。

此外,价格是资源利用非常重要的影响因素,本文没有将价格因素纳入到安全度评估指标中,将在下一步的研究中考虑价格变化对磷安全的影响。

### 参考文献(References):

- [1] Cordell D, White S B. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security[J]. Sustainability, 2011, 3(10): 2027–2049.
- [2] USGS. Mineral commodity summaries 2022[R]. Reston: U.S. Geological Survey, 2022. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/6197ccbed34eb622f692ee1c>.
- [3] Cordell D, White S B. Tracking phosphorus security: Indicators of phosphorus vulnerability in the global food system[J]. Food Security, 2015, DOI: 10.1007/s12571-015-0442-0.
- [4] Nesme T, Metson G S, Bennett E M. Global phosphorus flows through agricultural trade[J]. Global Environmental Change, 2018, 50: 133–141.
- [5] IFA. Supply & Trade Statistics[DB/OL]. (2022-05-01) [2023-06-08]. <https://www.ifastat.org/supply/Phosphate%20Products/Phosphate%20Rock>.
- [6] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Database[DB/OL]. (2023-05-27) [2023-06-08]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- [7] Lun F, Sardans J, Sun D F, et al. Influences of international agricultural trade on the global phosphorus cycle and its associated issues[J]. Global Environmental Change, 2021, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102282.
- [8] FAO. The importance of Ukraine and the Russian Federation for global agricultural markets and the risks associated with the current conflict[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.
- [9] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(10): 2609–2614.
- [10] Kleemann R, Morse S. Trade and finance as cross-cutting issues in the global phosphate and fertilizer market[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [11] 曾才生. 我国磷矿产业贸易的经济学分析[J]. 国际贸易问题, 2006, (11): 35–39. [Zeng C S. Economics analysis on China's phosphate industry trade[J]. Journal of International Trade, 2006, (11): 35–39.]
- [12] Chen Y R, Chen M P. Evolution of the global phosphorus trade network: A production perspective on resilience[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136843.
- [13] Li G H, Huang G Q, Li H G, et al. Identifying potential strategies in the key sectors of China's food chain to implement sustainable phosphorus management: A review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, DOI: 10.1007/s10705-015-9736-z.
- [14] Jiang S Y, Hua H, Sheng H, et al. Phosphorus footprint in China over the 1961–2050 period: Historical perspective and future prospect[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 687–695.
- [15] Liu L Y, Zheng X Q, Wei X C, et al. Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication [J]. Scientific Reports, 2021, DOI: 10.1038/s41598-021-02521-7.
- [16] Li B, Li P, Zeng X C, et al. Assessing the sustainability of phosphorus use in China: Flow patterns from 1980 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135305.
- [17] Nedelciu C E, Ragnarsdottir K V, Schlyter P, et al. Global phosphorus supply chain dynamics: Assessing regional impact to 2050 [J]. Global Food Security, 2020, DOI: 10.1016/j.gfs.2020.100426.
- [18] Lun F, Sardans J, Sun D F, et al. Influences of international agricultural trade on the global phosphorus cycle and its associated issues[J]. Global Environmental Change, 2021, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102282.
- [19] Chowdhury R B, Zhang X. Phosphorus use efficiency in agricultural systems: A comprehensive assessment through the review of national scale substance flow analyses[J]. Ecological Indicators, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107172.
- [20] 盛虎, 刘欣, 芦昕雨, 等. 复杂物质循环过程模拟方法与平台实现: 以畜禽养殖系统磷循环为例[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 465–476. [Sheng H, Liu X, Lu X Y, et al. Complex material cycling process simulation method and platform: Taking the phosphorus cycling of livestock and poultry breeding system as an example [J]. Resources Science, 2021, 43(3): 465–476.]
- [21] Oita A, Wirasenjaya F, Liu J, et al. Trends in the food nitrogen and phosphorus footprints for Asia's giants: China, India, and Japan [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104752.
- [22] Li B, Yin T L, Udugama I A, et al. Food waste and the embedded phosphorus footprint in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119909.
- [23] Wang Z H, Yin Y L, Liu G, et al. International trade reduces global phosphorus demand but intensifies the imbalance in local con-

2024年1月

- sumption[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154484.
- [24] Yang H Z, Liu Y, Liu J F, et al. Improving the imbalanced global supply chain of phosphorus fertilizers[J]. *Earth's Future*, 2019, 7(6): 638–651.
- [25] Li B, Ng S J, Han J C, et al. Network evolution and risk assessment of the global phosphorus trade[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160433.
- [26] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁, 等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1431–1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431–1443.]
- [27] Ji Q, Zhang H Y, Fan Y. Identification of global oil trade patterns: An empirical research based on complex network theory[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85: 856–865.
- [28] 王芳, 田明华, 尹润生, 等. 全球木质林产品贸易网络演化与供需大国关系[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 1008–1024. [Wang F, Tian M H, Yin R S, et al. Change of global woody forest products trading network and relationship between large supply and demand countries[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 1008–1024.]
- [29] Chen M P, Graedel T E. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 36: 139–152.
- [30] Geissler B, Mew M C, Steiner G. Phosphate supply security for importing countries: Developments and the current situation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 511–523.
- [31] Sartori M, Schiavo S. Connected we stand: A network perspective on trade and global food security[J]. *Food Policy*, 2015, 57: 114–127.
- [32] Clauset A, Newman M E J, Moore C. Finding community structure in very large networks[J]. *Physical Review E*, 2004, DOI: 10.1103/PhysRevE.70.066111.
- [33] 汪艺晗, 杨谨, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 974–986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 974–986.]
- [34] Csardi G, Nepusz T. The igraph software package for complex network research[J]. *Complex Systems*, 2006, 1695(5): 1–9.
- [35] Newman M E. Assortative mixing in networks[J]. *Physical Review Letters* 2002, DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.208701.
- [36] 于娱, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J]. *资源科学*, 2022, 44(10): 2006–2021. [Yu Y, Ma D P, Wang X M. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2006–2021.]
- [37] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, et al. The architecture of complex weighted networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(11): 3747–3752.
- [38] 王祥, 强文丽, 牛叔文等. 全球农产品贸易网络及其演化分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 940–953. [Wang X, Qiang W L, Niu S W et al. Analysis on global agricultural trade network and its evolution[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 940–953.]
- [39] 郭建科, 梁木新. 中国与“21世纪海上丝绸之路”沿线国家航运网络及经贸联系的耦合特征[J]. *地理学报*, 2022, 77(6): 1531–1545. [Guo J K, Liang M X. The coupling characteristics of the shipping network and trade between China and the countries along the 21st Century Maritime Silk Road[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(6): 1531–1545.]
- [40] 郑航, 叶阿忠. 城市群碳排放空间关联网络结构及其影响因素[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(5): 2413–2422. [Zheng H, Ye A Z. Spatial correlation network structure and influencing factors of carbon emission in urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(5): 2413–2422.]
- [41] Le Coq C, Paltseva E. Measuring the security of external energy supply in the European Union[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4474–4481.
- [42] United Nation. United Nations Commodity Trade Statistics Database (UN Comtrade Database)[DB/OL]. (2022-01-01) [2023-06-08]. <https://comtradeplus.un.org/>.
- [43] Chen C K, Jiang Z H, Li N, et al. Advancing UN comtrade for physical trade flow analysis: Review of data quality issues and solutions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106526.
- [44] IFA. IFASTAT Statistics Database[DB/OL]. [2023-06-08]. <https://www.ifastat.org/>.
- [45] 中华人民共和国海关总署. 重点商品查询[EB/OL]. [2023-06-08]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302427/302442/zdspcx/index.html>. [General Administration of Customs of the People's Republic of China. Key Product Inquiry[EB/OL]. [2023-06-08]. <http://www.customs.gov.cn/customs/302427/302442/zdspcx/index.html>.]
- [46] USDA. Composition of Foods Raw, Processed, Prepared Usda National Nutrient Database for Standard Reference[DB/OL]. (2022-05-24) [2023-06-08]. <https://data.nal.usda.gov/dataset/composition-foods-raw-processed-prepared-usda-national-nutrient-database-standard-reference-release-28-0>
- [47] The PRS Group. The International Country Risk Guide[DB/OL]. (2023-01-17) [2023-06-08]. <https://www.prsgroup.com/>.
- [48] Mayer T, Zignago S. Notes on CEPII's Distances Measures: The GeoDist Database[DB/OL]. (2011-12-01) [2023-06-08]. <http://www.resci.cn>



- www.cepii.fr/CEPii/en/publications/wp/abstract.asp?NoDoc=3877.
- [49] Torero M, Hernandez M. Promoting Competition in the Fertilizer Industry and Efficiency in The Fertilizer Use to Improve Land Productivity and Sustainability[R]. Berlin: Think20, 2018.
- [50] Ariga J, Mabaya E, Waithaka M, et al. Can improved agricultural technologies spur a green revolution in Africa? A multicountry analysis of seed and fertilizer delivery systems[J]. *Agricultural Economics*, 2019, 50: 63–74.
- [51] Mew MC, Steiner G, Geissler B. Phosphorus supply chain—scientific, technical, and economic foundations: A transdisciplinary orientation[J]. *Sustainability*, 2018, DOI: 10.3390/su10041087.
- [52] Mines B. Minerals Yearbook 1993[R]. Washington, D. C: Bureau of Mines, 1993.
- [53] USGS. Mineral Commodity Summaries 1999[R]. Reston: U.S. Geological Survey, 1999.
- [54] Geissler B, Mew M C, Steiner G. Phosphate supply security for importing countries: Developments and the current situation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 511–523.
- [55] Cobham D, Zouache A. Economic Features and Policy Challenges [M]. England: Routledge, 2021.
- [56] European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance)[J]. *Official Journal of the European Union*, 2019, 62: 1–132.
- [57] Liu Z J, Zhou M Z, Dai C, et al. Research on global grain trade network pattern and its driving factors[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, DOI: 10.3390/su14010245.
- [58] Burkholz R, Schweitzer F. International crop trade networks: The impact of shocks and cascades[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, DOI: 10.1088/1748–9326/ab4864.
- [59] Csatho P, Radimsky L. Two worlds within EU27: Sharp contrasts in organic and mineral nitrogen–phosphorus use, nitrogen–phosphorus balances, and soil phosphorus status: Widening and deepening gap between Western and Central Europe[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(1): 999–1019.
- [60] Steiner G, Geissler B, Watson I, et al. Efficiency developments in phosphate rock mining over the last three decades[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 105: 235–245.
- [61] Li B, Boiarkina I, Young B, et al. Substance flow analysis of phosphorus within New Zealand and comparison with other countries [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 527: 483–492.
- [62] 刘燕鹏, 李立贤. 中国双向式自然资源发展战略研究[J]. *自然资源学报*, 2000, (3): 208–212. [Liu Y P, Li L X. Natural resources and development: Study on China's two-way natural resources utilization strategy[J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, (3): 208–212.]
- [63] 马志明, 高璐阳, 陈宏坤. 我国磷复肥行业发展机遇与挑战[J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37(11): 4–7. [Ma Z M, Gao L Y, Chen H K. Opportunities and challenges of phosphate and compound fertilizer industry in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2022, 37(11): 4–7.]
- [64] 李董林, 焦点, 李春顶. 入世20年与中国农业贸易发展变迁[J]. *世界农业*, 2022, (6): 31–46. [Li D L, Jiao D, Li C D. The development and changes of China's agricultural trade after entry into WTO 20 years[J]. *World Agriculture*, 2022, (6): 31–46.]
- [65] 王念, 程昌秀, 林耿. 中国农产品贸易结构演化及对粮食安全的影响[J]. *地理学报*, 2022, 77(10): 2599–2615. [Wang N, Cheng C X, Lin G. Evolving agricultural trade structure and its impact on food security in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(10): 2599–2615.]
- [66] 曹娜, 夏飞. 我国化肥出口贸易面临的困境及解决对策[J]. *磷肥与复肥*, 2021, 36(4): 10–13. [Cao N, Xia F. Dilemma and counter-measures of China's chemical fertilizer export trade[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(4): 10–13.]
- [67] Algren M, Costello C, Landis A E. Phosphorus (P) in animal diets as a driver of embodied P in animal products and net anthropogenic P inputs[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2022, DOI: 10.1111/jiec.13251.
- [68] Zhong Q M, Huang R X, Yu Y D, et al. Phosphorus emissions from changing phosphorus supply chain networks in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133259.

# Evolution of global phosphorus products trade pattern and China's phosphorus import and export security

CHEN Yuran, CHEN Minpeng

(School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

**Abstract:** **[Objective]** As a non-renewable resource, phosphorus (P) plays a crucial role in agricultural development and food security. It is important to examine the characteristics of change of P products trade pattern, which contributes to understanding China's position in the global P products market as well as reinforcing the P security of China. **[Methods]** Based on the complex network analysis, this study constructed a global P trade network from 1990 to 2020 and analyzed its globalization level, trade reciprocity, and national connectivity patterns. Furthermore, this study examined the evolution of centrality of major importing and exporting countries (regions). It also developed indicators to evaluate the security for China's P products trade. **[Results]** The results indicate the following: (1) Globalization has notably increased the activity within the P products trade network, which is primarily composed of processed phosphate products, including phosphate fertilizer (PF). Trade reciprocity has grown by more than 30%, fostering improved trade relations and enhanced international cooperation. However, the unbalanced trade structure has led many countries (regions) to heavily rely on major exporting countries (regions). Therefore, the stability of export policies is crucial for ensuring global P products supply. (2) In the 1990s, the major trading countries included exporters with high P reserves and production capacity (Morocco, USA), and importers with low P reserves and high demand (Netherlands, Germany, Belgium, Thailand, Malaysia, etc.). Since 2006, as the production of phosphate rock (PR) increased and PF demand surged in Eastern European and Asian countries, including China, their influences on P trade network grew. (3) With the development of the P chemical industry, China has transitioned from a net importer of P products to a major exporter. The political risk associated with trading partners and market concentration significantly impacts China's trade and security. It is crucial to improve the diversity of trading partners and enhance trade relations with politically stable countries (regions). **[Conclusion]** This article argued that it is necessary to actively promote the sustainable management of P resources and long-term sustainable development of the P industry. It emphasized the necessity of conservation and optimal use of P resources. China should enhance its trade relations with major P resource countries to improve the long-term P security.

**Key words:** phosphorus resources; global trade; complex network; modularity; reciprocity; node centrality; phosphorus security; China