

基于复杂网络的全球稻米贸易格局演化及其启示

周墨竹^{1,2}, 王介勇^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 运用复杂网络分析方法, 采用2000—2016年国际贸易关系数据构建了全球稻米贸易网络, 分析了全球稻米网络格局演化特征及中国在全球稻米贸易格局中的角色变化。研究发现: (1)2000—2016年全球稻米贸易网络规模不断扩大、相互依赖性加深, 网络结构的异质性特征明显, 核心节点对网络稳定性有控制作用; (2)印度、泰国、中国、越南、巴基斯坦、美国是网络核心节点, 东南亚、南亚、东亚地区保持着全球稻米贸易核心区地位; (3)全球稻米贸易网络划分为六个主要组团, 地理临近是组团格局形成的重要因素, 组团内部呈现出口国主导、进口国跟随的特征; (4)中国作为全球最大的稻米进口国家, 进口来源相对稳定。建议今后我国继续挖掘全球稻米贸易潜力, 充分发挥贸易网络的优势, 在风险可控前提下, 增加进口、优化出口, 提高贸易网络的复杂性, 从而提升安全保障能力。

关键词: 经济全球化; 稻米贸易; 复杂网络; 粮食安全

粮食是人类赖以生存和发展的物质基础, 当前快速增长的世界人口、全球气候变化以及自然灾害频发给粮食生产和供应带来了前所未有的压力^[1,2]。水稻是最主要粮食作物之一, 其产量约占全球谷物类粮食产量的18%, 食用量约占其利用总量比例的80%, 稻米养活着世界近三分之一的人口。全球稻米的稳定供应对世界粮食安全影响深远, 但其生产与消费具有显著的空间不均衡性^[3]。随着经济全球化深入发展, 稻米贸易量增速快于产量增速, 2016年稻米贸易量占产量比例上升至10.1%, 全球及区域间的稻米贸易已成为调节补充各国或地区稻米供需平衡的重要途径^[4,5]。全球稻米贸易关系形成了复杂的、相互交织的网络系统, 各国粮食安全的相互依赖性日益加强, 全球贸易格局的变化已成为粮食安全的重要影响因素^[6,7]。中国是人口大国, 也是粮食生产大国、消费大国和贸易大国, 稻米是我国日常最主要的口粮之一。加入WTO以来, 中国参与全球粮食贸易程度不断加深。2011年之后, 我国稻米进口大幅攀升, 成为全球最大的稻米净进口国。中国是世界粮食安全体系的重要组成部分, 全球粮食贸易格局变化对国内粮食供需的影响愈加显著。我国耕地资源和水资源紧缺, 粮食种植成本相对较高、比较优势低, 在“把饭碗端在自己手中”的前提下, 合理利用国际市场调节国内余缺是一种理性的选择^[8,9]。因此, 把中国置于全球开放交融的格局下, 探究全球稻米贸易网络格局演化特征及其趋势, 有助于更好地理解全球粮食供需的总体形势与我国粮食安全的外部挑战。

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2019-10-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040402); 国家自然科学基金项目(41671178)

作者简介: 周墨竹(1994-), 女, 山东青岛人, 硕士, 主要从事粮食与农业可持续发展研究。

E-mail: zhoumz.17s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 王介勇(1978-), 男, 山东滕州人, 博士, 副研究员, 主要从事乡村地理与农村土地可持续利用研究。

E-mail: wjy@igsnrr.ac.cn

20世纪末,复杂网络理论研究取得突破性进展,开创性揭示了复杂网络的小世界特征和无标度性质,并建立了相应的模型以阐述这些特性的产生机理^[10,11]。伴随着复杂网络理论的发展,学者在刻画网络拓扑结构的统计特性上又提出了许多概念和测度方法^[12],复杂网络越来越多地被应用于研究全球整体贸易网络^[13,14]以及特定行业或大宗商品如能源、矿产等贸易网络^[15]。国内外已有学者将这种方法应用到农业领域,研究农产品贸易效率和食品安全等问题^[16-18]。也有学者从资源环境角度出发,构建全球农产品贸易虚拟水网络,研究水资源安全等问题^[19,20]。已有研究以粮食或单一粮食品种如小麦、玉米等作为研究对象,构建粮食贸易网络,探究网络的结构特征及动态变化,预测粮食贸易网络系统受到冲击的反应^[21-23],但对于全球稻米贸易网络格局演化及其影响方面的研究关注较少。

本文以全球稻米贸易网络为研究对象,选择2000—2016年为研究时段,运用复杂网络分析方法,定量分析全球稻米贸易网络格局演化特征。主要内容包括:(1)分析全球水稻贸易网络整体特征;(2)识别全球粮食贸易网络中的组团结构和核心节点,分析组团格局和核心国家的变化;(3)分析中国在世界稻米贸易网络中的地位作用以及贸易网络对中国粮食安全的可能影响。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 粮食贸易网络构建

以稻米贸易国家(地区)作为网络节点,以国家(地区)之间的稻米贸易关系为边构建复杂网络模型。对全球稻米贸易网络 G 进行如下定义:

$$G=(V, E, W, W', T) \quad (1)$$

式中: V 代表所有节点(国家)的集合; E 为所有边(两国间贸易联系)的集合; W 和 W' 分别为表征所有节点属性(国家所拥有的贸易联系数)和所有边属性(两国之间的贸易总量)的函数的集合; T 为每一个全球稻米贸易网络年份的集合,采用网络结构测度指标解析网络整体特征,并使用社区发现法识别网络内部的组团结构特征。

1.1.2 网络结构测度指标

(1) 节点度

节点度值指网络中与某个特定节点有直接联系的节点数目,即一个国家某时间段直接贸易伙伴的总数,包括节点出度和节点入度。节点出度 $K_i^{out}(t)$ 表示由节点 i 流向其他所有节点的数量,即某国在某时段具有出口关系的国家数量;节点入度 $K_i^{in}(t)$ 表示其他所有节点流向节点 i 的数量,即某国在某时段具有进口关系的国家数量,其表达式为^[24]:

$$K_i^{out}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ij}(t) \quad (2)$$

$$K_i^{in}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ji}(t) \quad (3)$$

(2) 节点强度

节点度仅体现出贸易关系,没有体现出贸易流的规模,因此引入节点强度。节点强度是指节点 i 与其相连的所有节点之间的贸易总量,分为节点入强度和出强度。节点的出强度 $W_i^{out}(t)$ 表示某国在某时段的出口贸易量 (t) ;节点的入强度 $W_i^{in}(t)$ 表示某国在某时

段的是进口贸易量 (t), 其表达式为^[24]:

$$W_i^{out}(t) = \sum_{j=1}^{N(i)} a_{ij}(t) w_{ij}(t) \quad (4)$$

$$W_i^{in}(t) = \sum_{j=1}^{N(i)} a_{ji}(t) w_{ji}(t) \quad (5)$$

式中: $w_{ij}(t)$ 表示从节点 i 到节点 j 之间的贸易量 (t); $w_{ji}(t)$ 表示从节点 j 到节点 i 之间的贸易量 (t); $a_{ij}(t)$ 、 $a_{ji}(t)$ 均表示两节点之间的贸易关系。

(3) 网络密度

网络密度是指实际存在的贸易联系占所有可能贸易联系的比例, 是用来衡量网络整体紧密性的指标, 表明参与国际贸易的各国间联系紧密程度。该值越大, 网络的紧密性越高, 反之则联系越稀疏, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。对于加权网络 D 其表达式为^[24]:

$$D = \frac{L}{n(n-1)} \quad (6)$$

式中: L 表示实际存在的联系数目 (个); n 表示节点数目 (个)。

(4) 平均聚类系数

聚类系数是指一个国家的伙伴之间存在贸易关系的可能性, 反映了贸易伙伴之间的连通性, 是贸易组团内部各节点间连接程度的指标, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。所有节点聚类系数平均值称为平均聚类系数 \bar{C} , 反映整个网络节点周围的平均聚集程度, 其表达式为^[24]:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{k_i(k_i-1)} \quad (7)$$

式中: k_i 表示节点 i 的节点度 (个); e_i 表示 i 的 k_i 个邻居间边的数量 (个)。

(5) 平均路径长度

平均路径长度 l 是指贸易网络中所有可能相连的节点之间最短路径的平均步数, 是测度网络贸易传输效率的指标, 越短的平均路径长度说明运输效率越高, 其表达式为^[24]:

$$l = \frac{1}{n(n-1)} \sum_i \sum_j d(i, j) \quad (8)$$

式中: $d(i, j)$ 表示网络中节点 i 和节点 j 之间的最短路径。

1.1.3 复杂网络社区发现方法

复杂网络中的组团是指由网络节点组成的一个个节点子集合。社区发现法是一种模块优化方法, 可将网络分成几个相对独立的、内部高度连接的模块, 用以揭示网络中的组团结构特征^[25]。采用模块度指数可以用来评价组团分离程度, 其取值范围为 $[-1, 1]$, 模块度越接近于 1, 说明网络分化越明显, 划分质量越高。 Q 为模块度指数, 其表达式为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (9)$$

式中: Q 为模块度; A_{ij} 为 i, j 国的贸易流量 (t); k_i 、 k_j 分别为与 i, j 国相连的所有贸易流量之和 (t); c_i 、 c_j 表示 i, j 国的社区指数; $\delta(c_i, c_j)$ 表示 i, j 国是否在同一个组团中 (相同时取 1, 不同时取 0); m 表示整个网络的贸易流量总和 (t)。快速展开算法可以有效地得到最大化的模块度, 这种算法也被作为 Louvain 社区发现法, 已被广泛应用于检测大型网络的组团结构^[26]。

1.2 数据来源

数据来源于联合国粮农组织数据库 (FAOSTAT) 中详细贸易矩阵数据集 Rice-total (Rice Milled Equivalent) 统计数据^[27]。使用 194 个国家地区 2000—2016 年水稻 (Rice-total) 的进口贸易量 (Import Quantity) 关系数据, 构建 17 年度的稻米贸易网络, 在进行组团格局分析时选取 2001 年、2006 年、2010 年及 2016 年作为主要时间节点进行分析。2001 年是中国加入 WTO 世界贸易组织元年, 从 2002 年开始我国大米进口在 WTO 相关规定下进行, 在此后 20 多年间中国与全球贸易往来不断加深, 因此从 2001 年起每 5 年间隔选取一个时间节点进行组团格局的观察。

2 结果分析

2.1 全球稻米贸易网络特征分析

2000—2016 年, 全球稻米贸易网络规模逐渐扩大, 网络连接结构变得更加紧密, 各国的相互作用和相互依赖性加深, 复杂性不断增强 (表 1)。参与贸易的国家数量小幅增加, 国家间贸易往来联系迅速增多, 2016 年有 194 个国家参与国际稻米贸易, 相互之间构成 3387 条贸易联系。各国的平均贸易国家数目和平均贸易量也呈现上升趋势, 平均贸易量增长了近 1 倍。主要网络结构指标测算结果显示: (1) 全球稻米贸易网络的整体密度在 0.06~0.09 之间, 呈稳定增长趋势, 成员贸易联系逐渐紧密, 但与其他大宗贸易商品相比, 稻米贸易网络密度仍然较小, 最高不足 0.1, 网络结构相对分散; (2) 网络平均聚类系数在 0.31~0.42 之间, 呈增长的趋势, 网络组团内部连接的聚集程度越来越高; (3) 平均路径长度在 2.31~2.83 之间, 呈波动中下降趋势, 网络的效率不断提升; (4) 模块度在

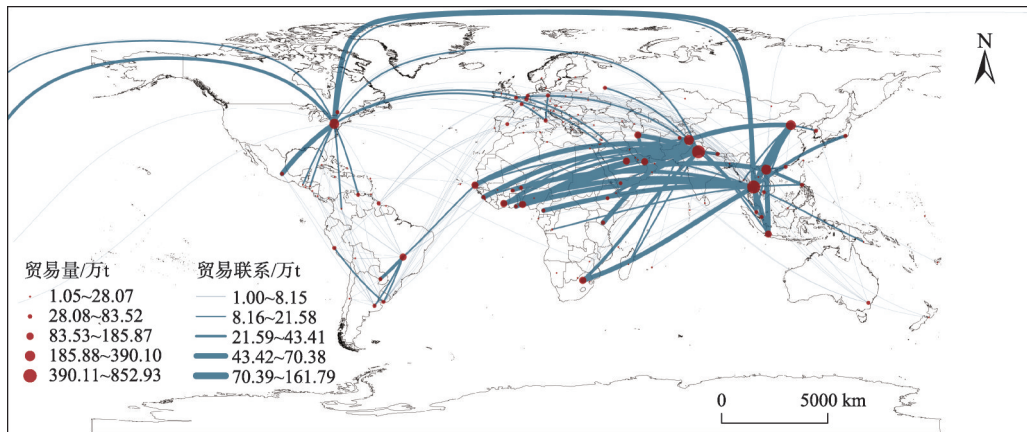
表 1 2000—2016 年全球稻米贸易网络特征变化

Table 1 The evolution of characteristics indicators of global rice trade network from 2000 to 2016

年份	国家数目 /节点	贸易联系/边	平均度 /个	平均强度 /10 ⁶ t	密度	平均 聚类系数	平均 路径长度	模块度
2000	175	1895	21.66	9.20	0.06	0.31	2.77	0.44
2001	182	2166	23.80	9.16	0.07	0.33	2.83	0.48
2002	183	2298	25.12	11.84	0.07	0.33	2.53	0.45
2003	180	2210	24.56	10.95	0.07	0.34	2.67	0.38
2004	171	2243	26.23	11.20	0.08	0.35	2.43	0.44
2005	183	2326	25.42	11.37	0.07	0.35	2.43	0.49
2006	177	2257	25.50	11.33	0.07	0.34	2.37	0.53
2007	179	2446	27.33	14.58	0.08	0.37	2.40	0.52
2008	174	2543	29.23	13.20	0.08	0.38	2.43	0.46
2009	175	2536	28.98	11.86	0.08	0.35	2.42	0.47
2010	174	2540	29.20	12.87	0.08	0.34	2.33	0.52
2011	169	2566	30.37	13.74	0.09	0.38	2.31	0.49
2012	178	2803	31.49	14.60	0.09	0.35	2.49	0.44
2013	181	2908	32.13	14.19	0.09	0.37	2.38	0.44
2014	191	3385	35.45	18.23	0.09	0.41	2.37	0.47
2015	190	3324	34.99	18.64	0.09	0.42	2.39	0.47
2016	194	3387	34.92	17.41	0.09	0.42	2.40	0.45

0.38~0.53之间, 呈现出组团结构特征, 模块度波动起伏但幅度相对较小, 网络的组团结构比较清晰。

稻米贸易网络呈现明显的异质性特征。全球稻米贸易网络中各节点之间的连接权重差异较大, 贸易流方向各异, 网络结构较为复杂, 其异质性特征显著(图1)。整个网络由高连接度的关键节点主导, 网络中节点度排名前20位国家与网络中60%以上的国家存在贸易关系, 且贸易联系规模占网络总量的70%。进口量前20位国家的贸易联系规模占网络总量的61%, 出口前20位国家的贸易联系规模占网络总量的96%。该类型网络结构特征使得核心节点对网络稳定性有重要作用。



注: 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1666的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 2016年全球稻米贸易超1万t联系网络图

Fig. 1 Spatial configuration of top global rice trade linkage network in 2016 (over 10000 t)

2.2 全球稻米贸易网络核心节点分析

通过计算全球稻米贸易网络的节点度和节点强度, 测度各节点国家或地区的稻米贸易活跃程度及其在贸易中的地位和影响力。采用式(2)~式(5), 计算得到网络节点度和节点强度。

2.2.1 核心进口节点

2000—2016年间, 进口贸易量排名前列的代表国家有中国、菲律宾、沙特阿拉伯、马来西亚、科特迪瓦、巴西、伊朗、日本、塞内加尔等(图2)。菲律宾和中国的波动幅度较大, 2011年中国贸易量出现大幅度增长态势, 2012年中国跃居贸易量首位, 其核心影响力逐步提升。进口核心国家集中分布在东南亚、东亚、西亚、西非地区, 非洲国家和中东国家水土资源不适宜种植水稻, 但对稻米消费需求呈现持续增长态势, 在进口核心国家中的地位越来越重要。2016年加纳、加拿大、荷兰、法国、比利时进口贸易伙伴最多, 中国、贝宁、印度尼西亚、科特迪瓦、沙特阿拉伯进口贸易规模最大。随时间变化, 进口核心节点贸易量排名呈现波动性特征, 核心国家地位不断变化, 且网络核心节点较多, 在全球网络中呈现出较为明显的分散格局。

2.2.2 核心出口节点

2000—2016年间，泰国、印度、越南、美国、巴基斯坦、中国等国家稻米出口贸易量排名前列且保持相对稳定（图3）。2011年开始印度出口贸易规模和网络地位持续快速上升，2013年跃居首位，2012年越南出口贸易量快速上升。泰国一直保持稻米核心出口国的地位。从2016年稻米出口网络格局来看，印度、泰国、美国、意大利、巴基斯坦出口贸易伙伴最多，印度、泰国、越南、巴基斯坦、美国出口贸易规模最大。出口核心国主要集中在东南亚、南亚和北美地区，这些地区是全球稻米主要产地。相对进口核心国，出口核心节点分布格局明显集中，出口核心国排名更为稳定且在网络中有更大的

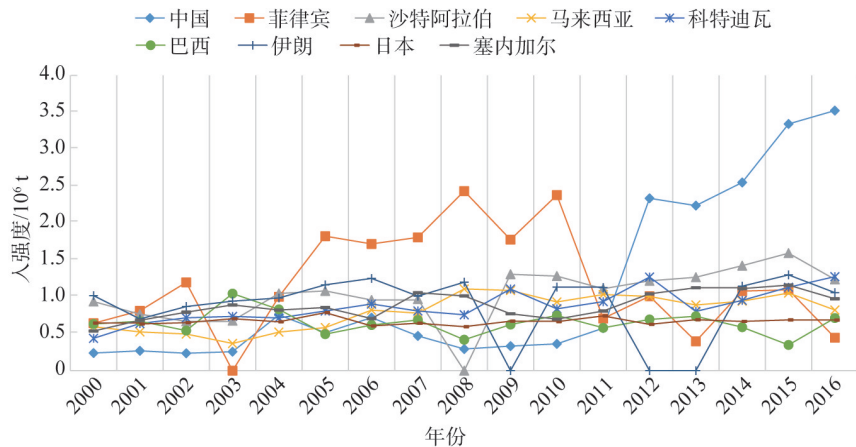


图2 2000—2016年进口核心节点贸易量演化

Fig. 2 The evolution of weighted in degree value from 2000 to 2016

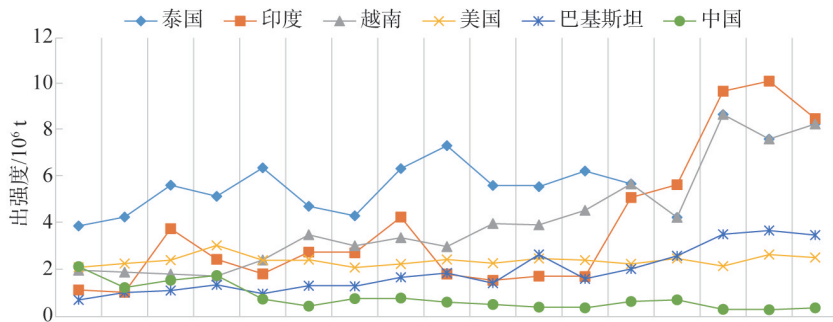


图3 2000—2016年出口核心节点贸易量演化

Fig. 3 The evolution of weighted out degree value from 2000 to 2016

话语权。

2.2.3 总体特征

从稻米进出口贸易网络的总体特征来看，2016年之前美国始终居首位，是全球贸易伙伴关系最广泛的国家。从2016年全球稻米贸易网络的节点度来看，排名前5位的国家依次是泰国、美国、意大利、印度、法国。节点度排名前列的国家是世界主要的稻米生产国。随时间变化，核心国家的节点度呈上升趋势，各国家或地区之间的稻米贸易活动日趋活跃。稻米贸易网络节点强度呈波动上升趋势，排名变化较大。2016年网络节点强度排名前5位的国家依次是印度、泰国、中国、越南、巴基斯坦，2012年之前泰国居首

位, 2012年之后印度居首位, 是全球稻米贸易规模最大的国家。节点强度排名前列的国家多数是出口大国, 在网络中具有核心影响力。对比节点度和节点强度排名前列的核心国家, 发现进口国家数量远多于出口国家, 网络结构由稻米贸易出口国主导。

2.3 全球稻米贸易网络国家组团格局特征及其演化趋势

2.3.1 全球稻米贸易网络组团格局

在全球化和区域化发展的作用下, 全球稻米贸易网络内部形成组团结构, 组团内部成员节点之间的贸易关系相对紧密, 而不同组团的成员节点之间贸易关系则相对疏松。社区发现法基于国家间实际产生的贸易流识别贸易网络内部的组团结构, 结果显示,

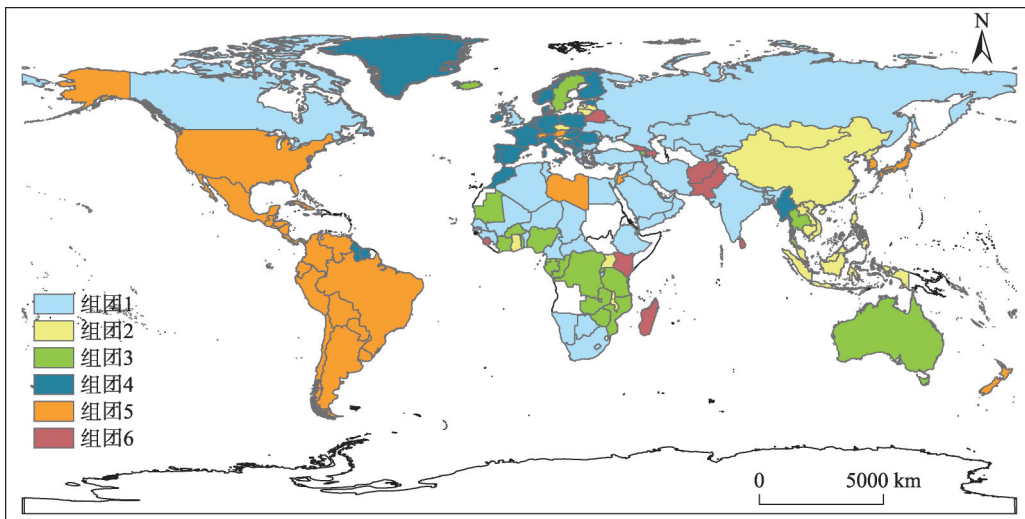


图4 2016年全球稻米贸易组团划分

Fig. 4 Community pattern based on global rice trade linkages in 2016

2016年全球稻米贸易网络中存在三类、六个主要组团(图4)。

(1) 由南亚国家主导的有两个组团。一是以印度为核心的组团, 规模最大, 包括分布于中亚、西亚、中非、南非的52个国家地区, 组团成员多且分布广泛, 成员国之间贸易量排首位, 约占全球34%。组团内部以出口大国印度为绝对核心节点, 其他成员国跟随, 呈现单核心网络结构。组团内印度、俄罗斯等国向阿联酋、贝宁、沙特阿拉伯、伊朗、英国、加拿大等国出口稻米, 西亚和非洲是主要进口区域。二是以巴基斯坦为核心的组团, 规模较小, 呈现以巴基斯坦为绝对核心的单核心网络结构, 包括10个国家地区, 成员国贸易量约占全球7%, 组团内巴基斯坦向肯尼亚、阿富汗、马达加斯加、塞拉利昂等亚非国家出口稻米。

(2) 由东亚和东南亚国家主导的有两个组团。一是以中国—越南为核心的组团, 包括分布于东南亚、东欧的23个国家和地区, 成员国贸易量约占全球17%。组团内进口大国中国是第一核心节点, 出口大国越南是次核心节点, 呈现双核心网络结构。中国、印度尼西亚、马来西亚、加纳、菲律宾等国从越南、柬埔寨等国进口稻米, 大规模的贸易往来集中于中国与东南亚以及东南亚国家内部之间。二是以泰国为核心的组团, 包括分布于中非、南非、北欧、东南亚、大洋洲的30个国家和地区, 成员国贸易量占全球

17%。该组团内出口大国泰国是绝对核心节点,呈现单核心网络结构。科特迪瓦、布基纳法索、刚果等国从泰国、澳大利亚等国进口稻米。

(3)除了主要体现亚洲和全球相联系的组团外,还有两个组团更加偏向于区域内国家间贸易。一是美洲组团,包括分布于北美、南美、中美的34个国家地区,成员国贸易量约占全球15%。组团内部呈现以美国为绝对核心的单核心网络结构,美国、乌拉圭等国出口稻米到日本、墨西哥等国,巴西兼具进口国和出口国双重角色。二是欧洲组团,包括37个国家地区,多数为欧洲国家,成员国贸易量约占全球7%,该组团成员众多,但在全球稻米贸易中所占比例较小,呈现多核心结构,与其他组团成员联系少。法国、德国、比利时等国从意大利、圭亚那、缅甸、西班牙等国进口稻米。

2.3.2 组团格局演化

基于2001年、2006年、2010年、2016年四个节点所呈现的组团格局,对全球稻米贸易网络组团格局演化进行了讨论。总体来看,全球稻米贸易网络组团数量变化较小,但各组团呈现出分离重组的演化特征。

(1)东亚、东南亚区块组团演化。2000—2011年,中国和泰国属于同一组团,越南和菲律宾属于同一组团,中国—泰国组团是全球最大的组团,但该组团规模不断下降。在2011—2016年间中国所属组团发生了变化,中国与泰国分离而和原先越—菲组团内成员形成同一组团,泰国和原组团内亚洲、非洲国家以及澳大利亚等国形成单独的组团。这一转变可能的解释是,2012年中国进口量大幅上升跃居世界第1位,在组团内影响作用上升,最大的贸易伙伴从泰国变为越南,促使区域稻米贸易格局发生变化。

(2)南亚区块组团演化。2016年印度和西亚国家属于同一组团,是全球最大的组团,巴基斯坦和亚非等国形成一个组团。2000—2016年,印度为核心的贸易组团规模在从全球排名第4位到第1位,尤其在2011—2016年上升迅速,南亚主要出口国在全球影响力扩大。这样的格局转变可能和2011年起印度出口量大幅上升跃居至世界第1位有关,伴随着原有最大组团中—泰组团的分离,新形成的中—越组团和泰国组团的规模都次于印度组团。

(3)美洲和欧洲区块组团演化。2001年组团划分结果显示,美国和欧洲国家属于同一组团,南美和中美国家形成一个较小组团。2006年主要的变化是形成了一个以美国为核心的组团,该组团成员遍布全球。2011年主要的变化是以西欧、南欧国家为核心,欧洲国家成为单独的组团,此后欧洲国家内部间贸易往来紧密且稳定。2016年主要的变化是美国和南美国家组合成美洲组团,说明北美和拉美地区之间的贸易联系加强。

上述组团格局及其演化体现出三点特征:(1)地理位置邻近的国家有更多贸易联系,往往归属于同一组团,亚洲、美洲、欧洲等地区组团格局呈现空间连续性,而非洲国家则分属多个不同组团。(2)多个组团内部形成由出口国主导、进口国跟随的结构,组团内部的核心国家尤其是核心出口国家的领导地位突出。(3)全球稻米贸易供给关系中需求国的贸易选择变化成为驱动组团格局演化的重要因素,例如中国对亚洲区域的影响。

2.4 中国在全球稻米贸易网络中的角色和伙伴

中国对全球稻米贸易格局发挥着越来越重要的核心影响力作用。在贸易广泛程度层面,2000—2016年中国贸易伙伴数量总体呈上升趋势(表2)。2016年中国稻米贸易伙伴数量有123个,与全球稻米贸易网络中超过半数的节点都有贸易关系。其中进口贸易国家

表2 2000—2016年中国在全球稻米贸易网络地位变化

Table 2 China's trade situation in the global rice trade network from 2000 to 2016

年份	贸易国家数量/个						贸易量/10 ⁶ t					
	节点度	排名	入度	排名	出度	排名	节点强度	排名	入强度	排名	出强度	排名
2000	95	5	8	98	87	4	2.40	3	0.24	22	2.16	2
2001	97	6	10	93	87	5	1.52	4	0.27	20	1.25	4
2002	105	6	9	109	96	5	1.80	6	0.24	29	1.57	5
2003	105	6	9	104	106	5	2.03	4	0.26	25	1.77	4
2004	114	4	8	105	104	4	1.51	5	0.76	6	0.76	6
2005	114	4	10	117	99	5	0.97	9	0.51	12	0.45	10
2006	110	4	11	95	99	4	1.50	6	0.72	7	0.78	8
2007	127	4	15	75	112	3	1.27	10	0.47	21	0.80	8
2008	120	4	16	73	104	4	0.92	13	0.29	24	0.63	8
2009	114	5	9	116	105	4	0.86	11	0.33	21	0.52	8
2010	115	4	15	76	100	6	0.77	13	0.36	22	0.41	10
2011	113	5	16	73	97	6	0.95	12	0.57	14	0.38	11
2012	108	9	12	105	96	7	2.99	4	2.33	1	0.65	8
2013	108	10	15	89	93	7	2.96	5	2.24	1	0.72	7
2014	130	10	15	99	115	6	2.86	6	2.55	1	0.31	14
2015	118	10	15	97	103	7	3.64	5	3.34	1	0.30	15
2016	123	11	16	91	107	6	3.90	3	3.52	1	0.38	13

16个, 排名中游; 出口贸易国家107个, 排名前列。作为出口角色中国是一个广泛连接的节点, 中国稻米进口伙伴集中在少数国家, 但出口伙伴数量大, 在网络中影响范围更广。

在贸易规模层面, 2000—2016年, 中国贸易规模总体变化较大, 其全球排名先下降后上升。出口贸易量及其排名总体呈现下降趋势, 而进口贸易量从2011年起大幅提升, 2012年开始其排名始终居于首位。2016年中国在网络中的贸易量 3.9×10^6 t, 排名第3位, 其中中国进口贸易量 3.52×10^6 t, 排名第1位, 出口贸易量 0.38×10^6 t, 排名第13位。中国稻米进出口贸易在全球均位居前列, 但进口角色对全球网络影响程度更为突出。

1990—2011年, 中国稻米累计出口量相比进口量较多, 2011年中国稻米进口量超过出口量, 2012年进口量大幅增多。这一变化的产生原因主要总结为两点^[28,29]: 一是国内稻米市场需求旺盛, 供需总体偏紧, 且稻米增产区域失衡, 新产区集中在东北粳稻区, 有效供应南方籼米主销区难以实现, 对进口的需求增加; 二是国内稻米价格水平较高, 进口稻米具备价格优势, 海关数据显示, 进口泰国大米成本均价930美元/t, 巴基斯坦大米490美元/t, 越南大米470美元/t, 长期由泰国占据的部分市场份额被越南和巴基斯坦所取代, 越南成为了中国最大的进口来源, 这一转变也促使中国与泰国不再属于同一组团, 而和越南形成同一组团。2013—2016年, 中国稻米进口量不断上升, 中国在区域内的核心地位进一步上升, 出口量呈波动下降趋势。2016年中国进口来源集中在越南、泰国、巴基斯坦、柬埔寨、缅甸、老挝, 其市场份额越南占46%、泰国占26%、巴基斯坦占20%, 形成三家独大的局面; 而出口贸易量较大的伙伴有韩国、科特迪瓦、日本等国, 从贸易关系数量来看, 更多的出口国家是欠发达国家。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 研究发现2000—2016年全球稻米贸易网络规模不断扩大、联系不断紧密、相互依赖性加深、复杂性加强,同时网络的异质性特征明显。网络中贸易关系连接数量排名前20位的国家与网络中60%以上的国家存在贸易关系,这些国家所联系的贸易总量占网络中贸易总量的70%,核心节点对网络稳定性有重要作用。

(2) 全球稻米贸易网络核心出口国家分布格局较为稳定集中,而核心进口国家分布较为分散且波动性强,主要出口国稻米供应风险增加很可能对整个网络稳定性有负面影响。印度、泰国、中国、越南、巴基斯坦和美国对全球稻米供需影响显著。

(3) 全球稻米贸易网络格局中具有核心影响力的节点可以分为四类。第一类是以印度等南亚和东南亚多国为代表,产量高、国内消费量大、出口量大;第二类是以中国等东亚国家为代表,产量高、国内消费量大、进口量也很大;第三类是以美国为代表,产量高、国内消费量较小、产出主要用于出口;第四类是以中东石油国及非洲部分国家为代表,产量很低、国内消费量大、消费主要依赖于进口。

(4) 2016年全球稻米贸易网络可以划分出六个主要组团,以核心国家命名分别是印度组团、中国—越南组团、泰国组团、美洲组团、欧洲组团、巴基斯坦组团,印度组团规模最大。2000—2016年间组团格局较稳定,地理邻近是组团格局形成的重要因素;多个贸易组团内部形成由出口国主导、进口国跟随的结构;需求国贸易选择的变化是驱动组团格局演化的重要因素。

(5) 东南亚、南亚、东亚地区始终是全球水稻贸易主导区域,西亚、东北非地区、西非地区、撒哈拉沙漠以南地区影响力上升。以泰国为代表的东南亚国家与东南亚、非洲国家有密切联系,而以印度为代表的南亚国家与西亚、非洲国家有密切联系。

(6) 中国在全球稻米贸易网络中是一个广泛连接、具有核心影响力的节点。2000—2016年,中国的进出口贸易关系和贸易量呈增长趋势,2012年起中国进口贸易量远超过出口贸易量,进口量排名连续位居全球首位。但中国进口来源相对稳定单一,主要依赖于越南、泰国、巴基斯坦,出口贸易伙伴远多于进口贸易伙伴。

3.2 讨论

随着经济全球化深入发展,各国稻米贸易联系成复杂交织的网络系统,共同应对气候变化、自然灾害、冲突战争等因素给粮食安全带来的风险冲击。加入WTO以来,中国越来越融入全球粮食贸易网络中。本文对中国稻米贸易和粮食安全的启示有:

(1) 我国的水稻生产量和消费量均居于全球第一位,长期以来的高自给率,在保障粮食安全的同时也为东北地区和南方各省带来了较大的生态压力。而随着城镇化进程的推进和居民膳食结构的调整,食用大米尤其是优质大米的需求仍在不断增加,水稻产区面临的生态压力将进一步加大。在全球稻米贸易发展网络化趋势下,建议继续挖掘全球稻米贸易潜力,发挥贸易网络的优势,通过进口低价籼米以满足需求量,缓解水土资源和生态环境压力,进口高端品种和中高端品种调节国内余缺,提升消费品质。

(2) 全球稻米贸易格局呈现异质性特征,在以出口大国为核心的合作格局中,核心出口国的风险容易传导至整个网络,进而影响进口国的粮食安全。当前中国已成为全球最大的稻米进口国,为确保稻米需求供应,一方面要继续夯实国内稻米生产能力和自给

水平, 确保“把饭碗端在自己手中”; 另一方面要优化稻米贸易格局, 防范进口来源过于单一集中带来的风险, 建议拓展相对多元化的进口渠道策略。

(3) 全球稻米贸易组团格局的形成受地理邻近作用大, 对于稻米这种运输成本高的大宗商品, 发挥地理邻近优势非常重要。亚洲地区是全球稻米生产贸易核心区, 全球六个主要贸易组团中有三个组团的核心节点是亚洲国家。当前我国所在的组团其他成员大多是东南亚国家, 该组团成员国空间分布呈现连续性, 内部联系紧密。我国既是全球稻米贸易网络格局中的核心, 也是该组团的核心, 应与成员国和东盟保持良好稳定的贸易合作关系, 同时也应当注意与以南亚国家为核心的另外两个组团成员保持联系。2012年起越南取代泰国成为最大的进口来源, 国际出口市场的竞争给国内带来了更多选择, 我国应当发挥市场需求的作用, 在贸易中掌握更多主动性。稻米贸易依赖于海运, 应当以“21世纪海上丝绸之路”为发展契机, 维护好现有海上运输通道或开辟更多通道, 压缩贸易时空距离, 保障运输通道的安全、畅通、稳定^[1]。

(4) “一带一路”倡议的推行也给我国稻米出口和农业合作方面带来新机遇。在国内稻米价格形成机制改革和“去库存”力度加大的过程中, 增加出口量是一项重要措施。“一带一路”倡议背景下, 我国对非洲尤其是西非地区的稻米出口正在逐步增长。但现有出口格局过于分散, 主要为低品质的粳米, 也缺乏类似泰国茉莉香米等具有高品质和市场竞争力的产品, 还需进一步提高稻米产业的国际市场竞争力。“一带一路”倡议使沿线国家贸易活跃程度不断提升, 为我国与沿线国家如柬埔寨、巴基斯坦、老挝等国在稻米产业方面提供了更多贸易往来和农业合作机会^[30]。我国可以通过加强与中南半岛国家的生产合作和技术交流, 共同提高稻米生产能力, 同时增加向非洲国家的技术输出, 投资开发未利用耕地资源, 从而提高粮食安全保障水平。

参考文献(References):

- [1] GODFRAY H C, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812.
- [2] ROSEGRANT M W, CLINE S A. Global food security: Challenges and policies. *Science*, 2003, 302(5652): 1917-1919.
- [3] 封志明, 肖池伟, 杨艳昭. 东南亚稻米生产时空变化格局分析. *科技导报*, 2018, 36(3): 75-81. [FENG Z M, XIAO C W, YANG Y Z. Spatial and temporal pattern changes of rice production in Southeast Asia. *Science & Technology Review*, 2018, 36(3): 75-81.]
- [4] 封志明, 赵霞, 杨艳昭. 近50年全球粮食贸易的时空格局与地域差异. *资源科学*, 2010, 32(1): 2-10. [FENG Z M, ZHAO X, YANG Y Z. Evolutionary trends of world cereal trade in recent 50 years from a view of spatial-temporal patterns and regional differences. *Resources Science*, 2010, 32(1): 2-10.]
- [5] 封志明, 肖池伟, 李鹏. 中国—东盟自由贸易区粮食生产与贸易的时空格局演变. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 937-950. [FENG Z M, XIAO C W, LI P. Spatio-temporal pattern changes of cereal production and trade in China-ASEAN Free Trade Area. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 937-950.]
- [6] PUMA M J, BOSE S, CHON S Y, et al. Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024007. Doi: 10.1088/1748-9326/10/2/024007.
- [7] D'ODORICO P, CARR J A, LAIO F, et al. Feeding humanity through global food trade. *Earths Future*, 2015, 2(9): 458-469.
- [8] 刘彦随, 吴传钧. 中国水土资源态势与可持续食物安全. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 270-275. [LIU Y S, WU C J. Situation of land-water resources and analysis of sustainable food security in China. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 270-275.]
- [9] 谢高地, 成升魁, 肖玉, 等. 新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 895-903. [XIE G D, CHENG S K, XIAO Y, et al. The balance between grain supply and demand and the reconstruction of

- China's food security strategy in the new period. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 895-903.]
- [10] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [11] BARABASI A L, ALBERT R, JEONG H. Mean-field theory for scale-free random networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1999, 272(1-2): 173-187.
- [12] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 2003, 45(2): 167-256.
- [13] MA A S, BOGUNA M. Topology of the world trade web. *Physical Review E*, 2003, 68(2): 015101, Doi: 10.1103/PhysRevE.68.015101.
- [14] GARLASCHELLI D, LOFFREDO M I. Structure and evolution of the world trade network. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2005, 355(1): 138-144.
- [15] WANG X, GE J, WEI W, et al. Spatial dynamics of the communities and the role of major countries in the international rare earths trade: A complex network analysis. *Plos One*, 2016, 11(5): e0154575, Doi: 10.1371/journal.pone.0154575.
- [16] ERCSEY-RAVASZ M, TOROCZKAI Z, LAKNER Z, et al. Complexity of the international agro-food trade network and its impact on food safety. *Plos One* 2012, 7(5): e37810, Doi: 10.1371/journal.pone.0037810.
- [17] 王祥, 强文丽, 牛叔文, 等. 全球农产品贸易网络及其演化分析. *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. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 940-953.]
- [18] TORREGGIANI S, MANGIONI G, PUMA M J, et al. Identifying the community structure of the international food-trade multi network. *Environmental Research Letters*, 2017, 13(5): 054026, Doi: 10.1088/1748-9326/aabf23.
- [19] SARTORI M, SCHIAVO S. Connected we stand: A network perspective on trade and global food security. *Food Policy*, 2015, 57: 114-127.
- [20] CARR J A, D'ODORICO P, LAIO F, et al. Recent history and geography of virtual water trade. *Plos One*, 2013, 8(2): e55825, Doi: 10.1371/journal.pone.0055825.
- [21] 张进, 王诺, 卢毅可, 等. 世界粮食供需与流动格局的演变特征. *资源科学*, 2018, 40(10): 1915-1930. [ZHANG J, WANG N, LU Y K, et al. The evolution characteristics of world grain supply-demand and flow pattern. *Resources Science*, 2018, 40(10): 1915-1930.]
- [22] FAIR K R, BAUCH C T, ANAND M. Dynamics of the global wheat trade network and resilience to shocks. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7177, Doi: 10.1038/s41598-017-07202-y.
- [23] WU F, GUCLU H. Global maize trade and food security: Implications from a social network model. *Risk Analysis*, 2013, 33(12): 2168-2178.
- [24] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. *网络科学导论*. 北京: 高等教育出版社, 2012. [WANG X F, LI X, CHEN G R. *Introduction to Network Science*. Beijing: Higher Education Press, 2012.]
- [25] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2004, 69(2): 026113, Doi: 10.1103/PhysRevE.69.026113.
- [26] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of community hierarchies in large networks. *Journal of Statistical Mechanics Theory*, 2008, 25(10): 155-168.
- [27] FAOSTAT Statistical Database. <http://www.fao.org>.
- [28] 徐春春, 李凤博, 周锡跃, 等. 近期我国大米进口量大幅增加及其影响分析. *中国稻米*, 2012, 18(5): 1-3. [XU C C, LI F B, ZHOU X Y, et al. China's rice import increased by a large margin in recent years and its impact analysis. *China Rice*, 2012, 18(5): 1-3.]
- [29] 马建蕾, 徐锐钊, 韩一军. 2012年中国大米贸易特点及原因分析. *世界农业*, 2013, (6): 151-156. [MA J L, XU R L, HAN Y J. Analysis of the characteristics and causes of China's rice trade in 2012. *World Agriculture*, 2013, (6): 151-156.]
- [30] 徐春春, 纪龙, 周锡跃, 等. “一带一路”背景下的中国大米外交策略. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(7): 168-173. [XU C C, JI L, ZHOU X Y, et al. China's "rice diplomacy" strategy for the belt and road initiative. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 32(6): 895-903.]

Implications from pattern and evolution of global rice trade: A complex network analysis

ZHOU Mo-zhu^{1,2}, WANG Jie-yong^{1,3}

- (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the complex network theory and trade data from 2000 to 2016, a global rice trade network was constructed. This study quantitatively analysed pattern and evolution of the network and the role of China in global rice trade. The results show that the scale of network expanded and interdependence between nodes increased during the research period. The complexity and heterogeneity of the global rice trade network are obvious. Core nodes play leading roles in the stability of the network. The characteristics of importing countries are dispersed and volatile while those of exporting countries are centralized and stable. The global rice trade network in 2016 can be divided into six main communities. The largest one is led by India. Communities are often dominated by exporting countries and followed by importing countries inside. Geographical proximity is the most critical factor in the formation of community pattern. Trade choices of the demanding countries are becoming more important in the evolution of community structure. India, Thailand, China, Vietnam, Pakistan and USA are core nodes in the network. Southeast Asia, South Asia and East Asia are likely to maintain leading status of global rice production and trade. The importance of West Asia and Africa may further increase. As it is the largest rice importer in the world, the influence of China in the network is growing. But the import sources of China are over concentrated. It is suggested that we should continue to tap potential of global rice trade and take advantages of trade networks. In the premise of risks controllable, we can increase imports while optimizing exports and enhancing the complexity of our trade networks so as to improve the level of domestic food security.

Keywords: economic globalization; rice trade; complex network; food security