

# 全球粮食贸易网络格局及其影响因素

王介勇<sup>1,2</sup>, 戴纯<sup>1,2</sup>, 周墨竹<sup>1,2</sup>, 刘正佳<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;  
3. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 基于复杂网络分析方法, 构建了小麦、水稻、玉米三大主粮的全球粮食贸易网络, 解析了网络格局的总体特征及其变化态势, 定量评估了全球粮食贸易网络格局影响因素。研究发现: 全球粮食贸易已经成为一个复杂有序、相互依赖的网络系统, 网络规模不断增加, 连通性和紧密度不断加强; 全球粮食贸易网络节点呈现非均衡结构特征, 高强度和高节点度国家在网络中具有主导作用, 呈现出口国主导的网络结构特征; 经济社会发展差异性、贸易政策的一致性和语言文化邻近性对粮食贸易网络影响显著, 经济社会发展差异推动贸易网络联系更加紧密且多元化, 贸易政策的一致性促进贸易网络更加持续和稳健。建议中国继续实施更加多元化、多边化的粮食贸易政策, 提升中国在世界粮食网络节点的中心性特征, 充分利用国内国际两个市场, 融入全球粮食贸易网络体系, 积极推动构建全球粮食安全命运共同体。

**关键词:** 全球粮食贸易网络; 网络格局演化; 影响因素; QAP分析

世界人口快速增长、气候变化、大面积自然灾害频发等因素给粮食供需平衡造成了极大的不确定性, 当前及未来较长时间粮食安全问题仍面临全球性风险挑战<sup>[1-3]</sup>。粮食安全与粮食生产、消费、贸易和库存各环节密切相关。由于粮食的生产和消费长期具有明显的地域性特征, 随着经济全球化深入发展, 粮食贸易已成为调节粮食供需地域不平衡性的重要途径<sup>[4,5]</sup>。根据联合国粮农组织 (FAO) 统计数据, 近三十年来, 全球粮食贸易量增长 133%, 贸易增长速度快于产量增长速度, 目前全球粮食产量约有 28% 用于贸易, 2019 年谷物贸易量 4.1 亿 t, 相当于中国粮食产量的 2/3。全球大多数国家和地区已经广泛参与到全球粮食贸易当中, 形成紧密联系的贸易网络。每个国家和地区的粮食安全状况在不同程度上与全球粮食贸易联系在一起, 粮食贸易网络的稳定性对全球或区域性粮食安全的重要性得到了广泛认识<sup>[6,7]</sup>。

复杂网络方法可以定量评估现实经济社会复杂联系, 在交通、社交和贸易等社会经济研究领域得到广泛应用<sup>[8]</sup>。近年来, 复杂网络分析方法越来越多地应用于研究全球特定行业或大宗商品如能源<sup>[9]</sup>、矿产<sup>[10]</sup>、资源<sup>[11]</sup>等贸易联系研究。国内外许多学者利用复杂网络模型研究世界稻米<sup>[12]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>、玉米<sup>[14]</sup>、大豆<sup>[15]</sup>等粮食贸易网络格局及其演化特征, 并提出了可行的保障粮食安全的建议。但对于全球粮食贸易网络格局影响因素研究报道较少。复杂网络关系数据变量违背变量之间独立的假设, 存在结构性自相关, 常规的统计分析方法例如基于最小二乘法的多元回归不能用以解析变量之间的关系<sup>[16]</sup>。QAP (Quadratic Assignment Procedure, 二次指派程序) 分析是一种测量“关系”之间关系的方

收稿日期: 2020-09-04; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671178); 中国科学院科技扶贫项目 (KFJ-FP-202007)

作者简介: 王介勇 (1978-), 男, 山东滕州人, 博士, 副研究员, 研究方向为农业地理与乡村可持续发展。

E-mail: wjy@igsrr.ac.cn

法,用于网络矩阵之间的相关性和回归性<sup>[17]</sup>。袁红林等<sup>[18]</sup>构建了中国与发达国家在高端制造业网络矩阵,运用QAP方法分析了政治、经济、法律和文化距离因素对高端制造业贸易网络影响。杨文龙等<sup>[19]</sup>运用QAP方法考察了“一带一路”贸易网络生成的邻近效应,认为贸易关系存在大国效应和地理邻近效应,科研邻近和语言邻近是重要的推动力。王俊等<sup>[20]</sup>运用QAP分析方法,实证分析了中国省域旅游经济空间关联网络的影响因素,结果显示区域经济发展水平差异、旅游资源禀赋不同、交通可进入性差异、旅游业发展潜力差异以及地理空间相邻与否等因素对中国省域旅游经济空间关联网络具有显著影响。本文基于复杂网络分析方法,利用全球水稻、小麦和玉米三大主粮贸易关系数据构建全球粮食贸易网络,定量解析粮食贸易网络格局总体特征。采用QAP回归分析方法定量评估影响世界粮食贸易网络的关键因素,探究全球粮食贸易网络对世界粮食安全的促进作用。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 粮食贸易网络构建

本文以全球粮食贸易国家(地区)作为网络节点,以两国(地区)之间的粮食贸易联系为边,以各国(地区)之间的贸易往来总量作为联系强度,构建复杂网络模型G。具体定义如下:

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

式中:V代表所有节点(国家或地区)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(拥有的贸易联系数)和所有边属性(贸易总量)的函数的集合;T为每一个全球粮食贸易网络年份的集合。

### 1.2 复杂网络度量指数

本文选择连接率、网络密度、节点度和节点强度四个复杂网络指标来刻画粮食贸易网络特征。这四项指标是解释网络结构性和稳定性的主要指标,参考文献[21]对各项指标具体解释如下:

(1) 连接率( $\beta$ ),用以度量网络复杂性程度,表示平均每个节点连接的边数量。连接率 $\beta=0$ 表示网络为完全非连通网络,即为空图,呈现散点分布; $\beta<1$ 表示网络呈现为树状结构或存在离散子网络; $\beta>1$ 表示网络存在环路结构。一般来说, $\beta$ 值越大,网络越复杂。计算方式如下:

$$\beta = \frac{e}{n} \quad (2)$$

式中:e表示实际存在的联系数目(条);n表示节点数目(个)。

(2) 网络密度(d),是指实际存在的贸易联系占所有可能贸易联系的比例,用以衡量网络整体紧密性的指标,表明参与贸易的各国间联系紧密程度。该值越大,网络的紧密性越高,反之则网络联系越稀疏,加权网络的密度取值范围为[0, 1]。其表达式为:

$$d = \frac{2e}{n(n-1)} \quad (3)$$

(3) 节点度(K),是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(地区)某时间段内直接贸易伙伴的总数。节点度是节点出度和节点入度之和,用以表征节点的影响范围。一般认为,节点度越大,节点在网络中活跃度越强、影响力越广。其

表达式为：

$$K_i(t) = K_i^{out} + K_i^{in} \quad (4)$$

$$K_i^{out}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ij}(t) \quad (5)$$

$$K_i^{in}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ji}(t) \quad (6)$$

式中： $K_i(t)$ 表示每个节点的链路（边）数，即与每个地区存在贸易关系的国家数量（个）； $K_i^{out}(t)$ 为节点出度，表示由节点*i*流向其他所有节点的数量，即某国（地区）在某时段具有出口关系的国家（地区）数量（个）； $K_i^{in}(t)$ 为节点入度，表示其他所有节点流向节点*i*的数量，即某国（地区）在某时段具有进口关系的国家（地区）数量（个）； $a_{ij}$ 、 $a_{ji}$ 表示任意两节点之间的贸易关系； $N(t)$ 表示贸易国家总数（个）。

（4）节点强度（ $W$ ），是指节点*i*与其相连的所有节点之间联系的强弱程度。本文采用节点间加权的贸易关系即贸易流量规模进行度量。节点强度是节点出强度和节点入强度之和。一般认为，节点强度越大，节点在网络中重要性和影响力越大。

$$W_i(t) = W_i^{out} + W_i^{in} \quad (7)$$

$$W_i^{out}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ij} w_{ij}(t) \quad (8)$$

$$W_i^{in}(t) = \sum_{j=1}^{N(t)} a_{ji} w_{ji}(t) \quad (9)$$

式中： $w_{ij}$ 、 $w_{ji}$ 表示节点*i*和节点*j*之间的节点强度； $W_i^{out}(t)$ 表示节点出强度，即某国（地区）在某时段的出口贸易总量（t）； $W_i^{in}(t)$ 表示节点入强度，即某国（地区）在某时段进口贸易量（t）； $a_{ij}$ 、 $a_{ji}$ 表示两节点之间的贸易流量。

### 1.3 QAP分析方法

QAP（Quadratic Assignment Procedure），称为二次指派程序法，是分析矩阵之间关系的方法。QAP分析方法可以通过比较方阵的格值，计算两个矩阵之间的相关系数，同时对系数进行非参数检验<sup>[6]</sup>。QAP回归分析用于测算单个矩阵和多个矩阵间存在的回归关系，评估判定系数的显著性。QAP回归计算包括两个关键步骤：一是对自变量矩阵和因变量矩阵的对应元素进行标准的多元回归分析；二是对因变量矩阵的各行和各列进行随机置换，计算随机置换后的两个矩阵的回归系数，并重复*N*次计算，估计统计量的标准误差，确定回归方程。对于每个回归系数来说，该程序将计算出在全部随机置换的次数中，产生的系数大于或等于第一步计算时得到的系数的随机置换所占的比例。本文基于各国（地区）之间的粮食贸易关系矩阵及其影响因素关系矩阵，运用QAP回归分析方法定量分析全球粮食贸易网络格局的影响因素及其作用机制。

### 1.4 数据来源与处理

本文选择小麦、水稻和玉米世界三大主粮构建贸易网络。小麦、水稻和玉米是世界范围内最重要的粮食作物，全球近50%的热量获取由这三种主粮贡献<sup>[5]</sup>，它们在世界各地广泛生产、消费和交易。因这三类粮食作物对各国粮食安全至关重要，其贸易备受政府和学者关注。小麦、水稻和玉米贸易流量关系数据来自FAOSTAT详细贸易矩阵数据集。关于数据库中小麦、水稻、玉米品种概念参照联合国粮农组织规范、分类和标准文件以

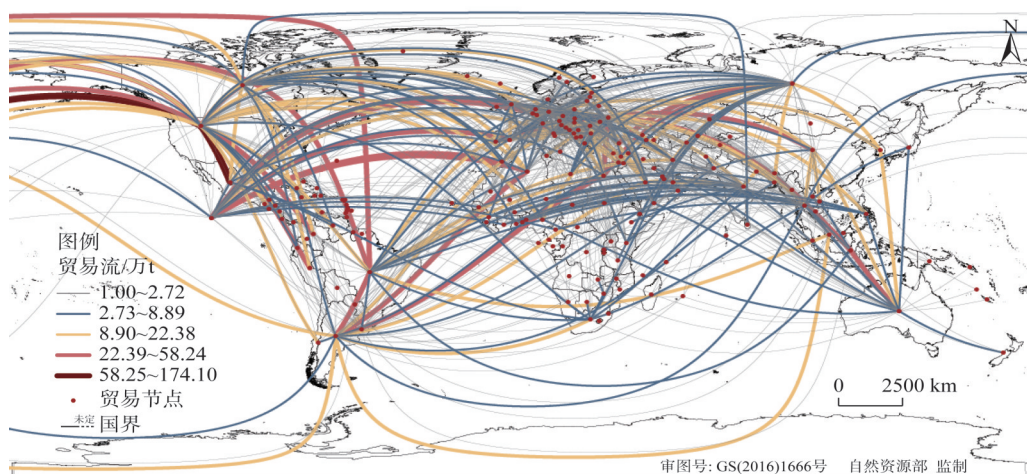
及《商品名称及编码协调制度的国际公约》标准,采用两国进口贸易量之和来代表两国之间的贸易量总值。使用FAOSTAT标各类粮食(产品)准编码作为下载数据时的统一检索条件,进行数据检索、下载和汇总,构建1994—2016年粮食贸易关系数据库。刻画影响因素的双边数据的经济社会和资源数据来自世界银行世界发展指标(WDI)数据库,语言临近性、地理距离、班轮运输相关指数来源于法国CEPII数据库,政治稳定和效能指数来自世界银行世界政治治理指标(WGI)数据库。

## 2 结果分析

### 2.1 全球粮食贸易网络特征分析

#### 2.1.1 全球粮食贸易网络规模及其变化

全球粮食贸易网络已经成为一个复杂有序、相互依赖的网络系统,网络规模不断加大。2016年全球粮食贸易网络中有194个国家(地区)参与,相互间构成了4054条贸易联系,达成约3.52亿t贸易量,形成一个规模巨大的贸易网络(图1)。从粮食贸易网络的动态特征来看,全球粮食贸易网络规模不断加大,全球粮食贸易网络节点和边数明显增加,贸易量和节点平均贸易量不断增长(图2)。1994—2016年全球粮食贸易网络节点数量即参与贸易的国家(地区)增长了36%,边数量即国家(地区)间贸易联系增长194%,边的增速快于节点的增速。网络中节点和边的快速增长说明参与到全球粮食贸易系统中国家(地区)范围在扩展,各国的相互作用和相互依赖性加深,贸易关系的交织从简单趋向复杂。近三十年来,全球粮食产量增长了77%,与此同时全球粮食贸易量增长133%,粮食贸易量增速明显快速产量增速。目前全球粮食总产量约28%用于贸易,粮食贸易占产量比例的增长率为7%。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改。

图1 2016年全球粮食贸易网络分布

Fig. 1 Spatial configuration of global grain trade linkage network in 2016

#### 2.1.2 粮食贸易网络联系日益紧密

全球粮食贸易网络表现出紧密联系的特征。1994—2016年网络中平均连接率( $\beta$ )



由10.5增加至20.9,增加了1倍,2016年贸易网络每个节点平均联系20.9条边(图2)。1994—2016年网络中平均网络密度( $d$ )由0.067增加到0.108,贸易国之间的联系不断加强(图3)。总体上,连接率和网络密度都处上升趋势,说明网络的连通复杂性和紧密度不断增强,网络要素及网络整体结构均更加稳定和相互依赖,全球粮食贸易网络联系日益紧密,相互依赖性逐步加深。

### 2.1.3 粮食贸易网络核心节点活跃程度

节点度反映国家(地区)贸易关系活跃和广泛程度。具有高节点度的国家(地区)在网络中有着广泛连接,在网络中的活跃度强、影响力越广。2016年荷兰、美国、法国、德国、英国、加拿大、意大利、比利时、西班牙、南非等节点入强度较大,而美国、印度、泰国、意大利、阿根廷、巴基斯坦、法国、巴西、俄罗斯、德国等节点出强度较大。1994年节点度排名前25的国家(地区)贸易联系约占全球所有国家(地区)间贸易联系的80%以上(图4a),2016年节点强度排名前25的国家(地区)贸易联系量占全球所有国家间贸易联系的50%以上。通过拟合累积度分布函数

发现(图4):(1)节点度分布不平衡,少数核心节点的活跃程度高,控制整体网络结构;(2)贸易网络的节点度分布具有明显的均衡化趋势,2016年节点度分布曲线比1994年更加平缓。但总体来看,节点度分布非常不均衡,这些高节点度的贸易国家在整个网络中居于核心位置,这种结构特点使得核心“枢纽”节点对网络的连通性和稳定性起重要的作用。因此,考察核心网络结构可以很好地反映出整体网络的基本情况。

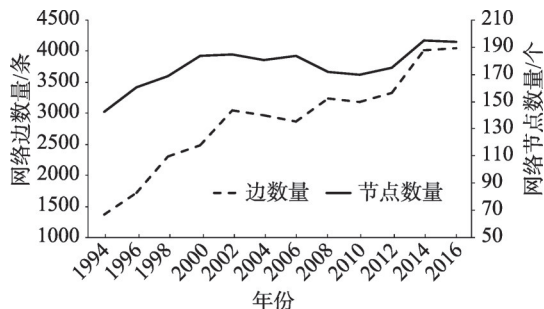


图2 1994—2016年全球粮食贸易网络规模变化

Fig. 2 Changes in the size of the global grain trade network 1994-2016

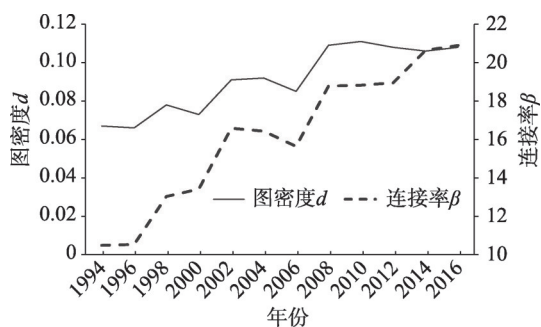


图3 1994—2016年全球粮食贸易网络联系紧密性变化

Fig. 3 The interconnected changes of the global grain trade network in 1994-2016

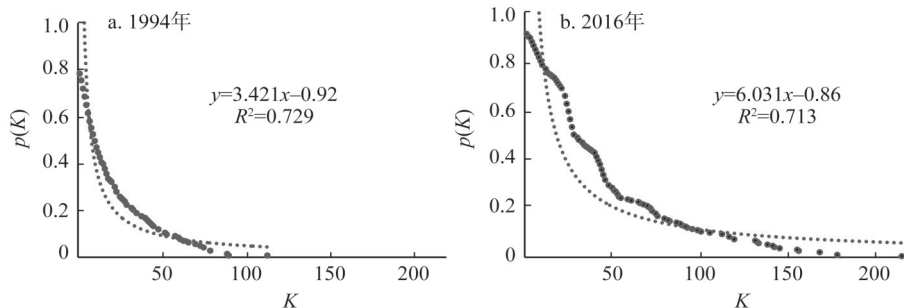


图4 1994年和2016年全球粮食贸易网络节点度累积函数

Fig. 4 Cumulative function graph of the  $K$  value for global grain trade network

2.1.4 粮食贸易网络核心节点强度特征

节点强度反映国家（地区）在粮食贸易网络中地位和影响力。2016年节点入强度排名前列的国家有日本、埃及、墨西哥、韩国、西班牙、印度尼西亚、阿尔及利亚、意大利、巴西、中国等，而节点出强度排名前列的国家有美国、乌克兰、阿根廷、俄罗斯、法国、加拿大、巴西、澳大利亚、德国、印度等，排名第一的美国出口量约为排名第二的乌克兰的2.4倍（表1）。这些国家（地区）是网络的核心节点，在粮食贸易网络的地位和影响力大，对其他国家（地区）粮食贸易具有控制性作用。对比核心节点的入强度和出强度发现，出强度集中在少数粮食产量大国，出口国在粮食贸易网络中占绝对优势，2016年美国节点出强度为0.78，远高于入强度第一的日本。全球粮食贸易网络呈现由出口国主导网络结构特征。

表1 1994年、2016年入强度、出强度排名前10节点  
Table 1 The top-10 of out-*W* and in-*W* values in 1994 and 2016

排名	入强度				出强度			
	1994年		2016年		1994年		2016年	
1	日本	0.22	日本	0.21	美国	0.57	美国	0.78
2	中国	0.11	埃及	0.20	法国	0.19	乌克兰	0.32
3	韩国	0.10	墨西哥	0.20	加拿大	0.17	阿根廷	0.28
4	意大利	0.07	韩国	0.15	阿根廷	0.09	俄罗斯	0.26
5	埃及	0.06	西班牙	0.13	中国	0.09	法国	0.25
6	中国台湾	0.06	印度尼西亚	0.13	澳大利亚	0.06	加拿大	0.21
7	巴西	0.06	阿尔及利亚	0.12	英国	0.03	巴西	0.19
8	南非	0.04	意大利	0.12	德国	0.03	澳大利亚	0.14
9	荷兰	0.04	巴西	0.11	泰国	0.03	德国	0.10
10	阿尔及利亚	0.03	中国	0.10	沙特阿拉伯	0.01	印度	0.09

2.2 全球粮食网络格局影响因素分析

2.2.1 样本选择与变量选取

(1) 样本选取

基于粮食贸易网络的特征分析，考虑到数据可得性和模型可实现性，选择阿尔及利亚、阿根廷、澳大利亚、比利时、巴西、加拿大、中国、哥伦比亚、埃及、法国、德国、印度、印度尼西亚、意大利、日本、墨西哥、荷兰、韩国、俄罗斯、西班牙、泰国、土耳其、乌克兰、英国、美国25个节点度和节点强度大的国家（地区）代表全球粮食贸易核心网络，构建25×25粮食贸易关系矩阵及影响因素作用关联矩阵，采用QAP回归分析方法分析，考察1994年、2006年、2016年不同因素对贸易网络的影响。

(2) 解释变量选取与测度

各国之间粮食贸易联系受多种因素综合影响。本文从经济社会发展水平、资源禀赋状况、贸易政策差异、距离交通条件、语言文化差异、政治管理因素六个方面，选取影响粮食贸易网络的因素，构建各个国家（地区之间）影响因素网络矩阵。具体影响因素解释如下：

第一，经济社会差异。① 国内生产总值（GDP）是衡量经济发展总体水平的指标。

经典引力模型理论认为两国间贸易量大小和国家间经济规模呈正向关系。两国之间经济发展水平的差异是影响其粮食贸易关系的重要因素。② 农业就业人口比例 (EMPLO) 是从事农业就业人口占总就业人口的比例, 一般情况下农业从业人口比例越低, 农业机械化和规模化经营程度越高, 农业产业竞争力越大。因此, 两国之间农业就业人口比例差异影响粮食贸易关系。③ 消费者物价指数 (CPI) 是反映一国物价变动水平的宏观指标, CPI 的上涨会导致成本上升, 对粮食进出口贸易产生不利影响。④ 城镇化率 (URBAN) 由城镇人口占总人口的比例得到, 反应一国的社会发展水平和居民生态消费状况。城镇化水平差异直接影响粮食消费需求, 进而影响两国之间的粮食贸易。

第二, 资源禀赋状况。耕地和淡水资源是粮食生产的基础, 人均耕地面积 (LAND) 和人均淡水资源量 (WAT) 是反映粮食生产资源禀赋重要变量。全球范围内农业资源分布的不均衡导致粮食产量的差异显著。水土资源的稀缺程度直接影响一国的粮食贸易的供需量。

第三, 贸易政策差异。关税税率是一国贸易政策的主要体现, 关税税率 (TARIFF) 是征收关税时计算税额的比例, 关税的征收影响粮食进口价格。两国之间的关税税率差异是影响粮食贸易的重要因素。关税税率差异越小, 两国之间的粮食贸易往来越紧密。

第四, 距离交通因素。粮食属于大宗货物, 距离和交通的便利程度直接影响两国之间的贸易量。① 两国间首都距离 (DISTCAP) 远近对粮食贸易稳定性和运输成本有影响。一般来讲, 长距离运输会增加交易成本, 影响两国之间贸易量。② 班轮运输相关指数 (TRANS) 表明各国与全球航运网络的连通程度, 该指数是联合国贸发会议根据海运部门的船舶数量、船舶集装箱承载能力、最大船舶规模、服务量及在一国港口部署集装箱船舶的公司数量五部分数据计算得出。粮食贸易运输主要依赖于海运, 班轮运输相关指数影响粮食贸易运输便利程度。

第五, 语言文化差异。是否使用共同的官方语言 (COMLANG) 影响到贸易开展沟通交流顺利与否以及选择贸易伙伴的倾向。语言文化也是民族内在联系的表征, 一般情况下, 有共同语言的民族其思想价值观念一定程度上也具有共性, 且具有相似的生活消费习惯, 对贸易发展有正向作用。本文采用语言临近性指标来衡量。

第六, 政治管理因素。① 政治稳定与非暴乱指数 (GSI) 用于衡量政治不稳定或出于政治动机的暴力包括恐怖主义的可能性大小。政治稳定性是影响国际贸易稳定的重要因素, 可能会影响粮食贸易网络。② 政府效能指数 (GEI) 反映了公众对公共服务质量、公务员质量及其独立于政治压力程度的看法、政策制定和执行的质量以及政府对此类政策承诺的可信度, 一国的制度环境可能会影响到贸易政策、贸易条件, 进而影响粮食贸易。

两国 (地区) 间贸易联系强度主要受各影响因素之间的差异特征作用, 因其差异产生的相互吸引或排斥作用影响两国 (地区) 之间贸易往来。本文以网络中各国之间各个变量差值作为解释变量, 构建影响因素差值变量矩阵。具体变量及其解释见表2。

### 2.2.2 回归模型建立

以1994年、2006年、2016年三个时间节点粮食贸易加权网络为被解释变量, 以GDP差异网、农业就业人口比例差异网、消费者物价指数差异网、城镇化率差异网、人均耕地面积差异网、人均淡水资源差异网、关税税率差异网、地理距离网络、班轮运输

表2 解释变量及说明  
Table 2 The influencing factors and their explanations

变量名称	变量含义	计算方法及说明	数据来源
<i>GDP</i>	国民生产总值	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间经济发展水平差值网络/美元	世界银行数据库 (WDI)
<i>EMP</i>	农业就业人口比例	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间农业就业人口百分比差值网络	世界银行数据库 (WDI)
<i>CPI</i>	消费者价格指数	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间消费者价格指数差值网络	世界银行数据库 (WDI)
<i>URBAN</i>	城镇化率	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间城镇化率差值网络	世界银行数据库 (WDI)
<i>WATER</i>	人均淡水资源	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间人均淡水资源差值网络/m <sup>3</sup>	世界银行数据库 (WDI)
<i>LAND</i>	人均耕地面积	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间人均耕地面积差值网络/hm <sup>2</sup>	世界银行数据库 (WDI)
<i>TARIFF</i>	关税税率	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间关税税率差值网络	世界银行数据库 (WDI)
<i>DISTCAP</i>	国家间地理距离	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家首都间地理距离网络/km	法国CEPII-Geography
<i>TRANS</i>	班轮运输指数	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间班轮运输指数差值网络	世界银行数据库 (WDI)
<i>LANG</i>	语言临近性	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家使用共同官方语言计为1, 否则为0	法国CEPII-Geography
<i>GEI</i>	政治稳定性指数	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间政治稳定性指数差值网络	世界政治治理指标 (WGI) 数据库
<i>GSI</i>	政府效能指数	<i>i</i> 和 <i>j</i> 国家间政府效能指数差值网络	世界政治治理指标 (WGI) 数据库

相关指数差异网、语言邻近网络以及政府效能指数差异网、政治稳定性指数差异网为解释变量, 建立 QAP 回归分析模型, 基于网络分析软件 Ucinet, 进行 2000 次矩阵置换和回归分析, 得出 QAP 分析结果 (表 3)。

2.2.3 回归结果分析

回归分析结果显示, 1994 年、2006 年、2016 年粮食贸易加权网络回归模型总体上通过了显著性检验, 各因素对贸易网络联系具有较好的解释性。总体上, 贸易政策、经济因素和距离因素贡献度大, 对粮食贸易网络的影响显著。对比三个时点回归结果, QAP 回归模型逐渐趋于稳健, *R*<sup>2</sup> 值不断提升, 经济社会因素对粮食贸易网络的影响作用越来越显著, 这与经济全球化进程加快密不可分。

(1) 经济因素对粮食贸易网络影响贡献最大。*GDP* 差异网络三个年份

都通过了显著性检验, 贸易国之间总体经济规模的差异是粮食贸易网络的重要影响因素。贸易国之间 *GDP* 差异越大, 他之间发生密切贸易往来的可能越大。贸易国农业就业人口比例差异网络对粮食贸易网络呈负向影响, 1994 年和 2016 年均通过了 5% 统计显著性检验, 说明两国间农业就业人口比例差异越小, 粮食贸易关系越有可能建立。贸易国消费者物价指数差异网络对粮食贸易网络呈正向影响, 2016 年值通过了 5% 统计显著性检

表3 1994年、2006年、2016年粮食贸易网络  
QAP多元回归结果

Table 3 Multiple QAP regression results of grain trade network in 1994, 2006 and 2016

变量	标准化回归系数		
	1994年	2006年	2016年
<i>GDP</i>	0.1108**	0.0855*	0.1231**
<i>EMP</i>	-0.1257*	0.0185	-0.1166*
<i>CPI</i>	-0.0262	-0.0346	0.1084*
<i>URBAN</i>	0.1236*	0.0318	0.0688
<i>WATER</i>	0.0665	0.061	0.039
<i>LAND</i>	0.0307	-0.0243	0.0018
<i>TARIFF</i>	—	—	-0.1732***
<i>DISTCAP</i>	0.054	0.0772*	0.0852*
<i>TRANS</i>	—	0.1002*	-0.0116
<i>LANG</i>	0.035	0.0363	0.1074**
<i>GEI</i>	0.0987*	0.0379	-0.0879
<i>GSI</i>	-0.097	-0.1291*	0.0085
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.252	0.237	0.387

注: \*\*、\*、\*分别表示在 1%、5%、10% 的统计水平上显著; “—” 因缺少统计数据未做分析。



验,说明消费者物价指数差异越大,粮食贸易关系越有可能建立。一国CPI上涨会对本国出口贸易产生不利影响,对于进口国来说则有扩大贸易的可能。

(2) 贸易国关税税率差异网络对粮食贸易网络呈负向影响。2016年回归结果通过了1%统计显著性检验,贡献率为17.32%。两贸易国间关税税率差异越大,越不利于粮食贸易。关税税率差异小的国家之间更有可能形成一致的贸易政策和条件,共同制定促进粮食贸易增长。尤其是当前贸易保护主义抬头,两国之间有关粮食的关税政策的差异是影响粮食贸易往来的核心因素。

(3) 距离与交通因素对粮食贸易网络影响。贸易国双边地理距离网络对粮食贸易网络呈正向影响,2006年和2016年值通过10%统计显著性检验。按照引力模型理论,两国间交通距离越远,贸易联系越弱,然而粮食贸易网络与否这预期结果相反。贸易国之间的贸易关系随着距离的增加而越发密切。进一步考察发现,粮食贸易网络是出口国主导的贸易网络,贸易国之间的粮食贸易量主要由出口国决定,而进口国距离出口国且分布分散,如中国—美国、欧盟—美国、巴西—中国、印度—美国等之间距离远且贸易量大。因此,从网络整体格局上来看,呈现出各国之间距离越远,粮食贸易关系越密切的特征。贸易网络联系与班轮次数的相关性不决定,2006年呈现显著正相关,2016年相关性不显著。

(4) 贸易国语言邻近网络对粮食贸易网络呈正向影响,2016年值通过了1%统计显著性检验,说明使用同一语言的国家间更容易产生贸易联系。使用共同官方语言的贸易国家在信息沟通方面更为便利,并且双方倾向于有共同的文化基础和价值取向,有助于开展长期合作,建立贸易关系,扩大双边贸易规模。事实上,美国、欧盟、加拿大、澳大利亚等英语系国家之间一直保持长期的粮食贸易关系,其贸易量约占全球粮食贸易量的三分之一。

(5) 政治和资源禀赋度因素对粮食贸易网络的影响总体不显著。政治管理因素方面,政府稳定指数GEI在1994年通过显著性检验,对粮食贸易网络具有正向促进作用。随着WTO等相关国际农业贸易规则的不断完善,一国的政治稳定性因素对粮食贸易网络的影响逐渐弱化。水土资源禀赋对粮食贸易网络影响不显著,三个年份均没有通过显著性检验。考察各国之间的粮食贸易情况发现,两国(地区)水土资源条件的差异对粮食贸易关系影响不明确,比如水土资源条件优越的美国既与水土资源相对短缺的国家(中国、日本等)有较大的贸易交易量,也与水土资源较为丰富的国家(加拿大、澳大利亚)保持密切的粮食贸易联系。当前阶段,粮食贸易网络演化仍然主要受各国之间经济差异和贸易政策驱动。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文基于复杂网络分析方法,采用1994—2016年贸易关系数据构建了包括全球近200个国家(地区)的粮食贸易网络,解析了全球三大主粮(水稻、玉米、小麦)粮食贸易网络的总体特征,采用QAP回归分析模型定量评估了经济社会、贸易政策、距离因素、政治因素和资源丰度等对全球粮食贸易网络的影响,得到如下主要结论:

(1) 全球三大粮食贸易网络已经成为一个复杂有序、相互依赖的网络系统。1994—

2016年全球粮食贸易网络节点和边数明显增加,贸易量和节点平均贸易量不断增长,贸易国之间相互作用和相互依赖性加深,贸易关系的交织从简单趋向复杂。贸易网络连接率和网络密度均不断上升趋势,网络连通复杂性和紧密度都在加强,网络要素及网络整体结构均向稳定方向发展,全球粮食贸易网络联系日益紧密,相互依赖性逐步加深。

(2) 全球粮食贸易网络节点呈现非均衡结构特征。部分具有高节点强度即贸易量较大的国家(地区)在网络中有较强的影响力,其他国家都依赖于高强度节点的贸易关系,全球粮食贸易网络呈现由出口国主导的结网络构特征。粮食贸易网络节点度分布不平衡,部分高节点度高价在网络中具有广泛链接,其他节点对高节点度国家依赖性强。2016年节点强度排名前25的国家(地区)贸易联系量占全球所有国家间贸易联系的50%以上。

(3) 全球典型粮食贸易网络与其关键影响因素的QAP回归结果总体稳健,1994年、2006年、2016年粮食贸易加权网络回归模型总体上通过了显著性检验,各因素对贸易网络具有较好的解释性。整体上,经济因素、贸易政策、距离因素和语言文化对粮食贸易网络格局影响显著。经济社会差异因素对粮食贸易网络的影响最大,GDP、居民消费价格指数、城市化水平等随着经济全球化进程的加快其作用越来越显著。贸易国双边地理距离差异与粮食贸易网络联系呈正相关。贸易国语言邻近性与粮食贸易网络呈正相关,使用同一语言的国家既方便沟通交流,而且还具有较为相似的生活消费习惯,他们之间更容易促进粮食贸易联系。政治和资源丰度因素对粮食贸易网络的影响均不显著。

(4) 经济社会差异性、贸易政策的一致性和语言文化邻近性驱动粮食贸易网络趋于复杂且稳定。随着经济全球化进程的加快,区域分工更加明确,世界经济日趋多样化和差异化,经济发展、就业结构、消费需求和城镇化水平的差异使得各国之间的粮食贸易更加广泛,贸易网络更加紧密且多元。贸易政策的一致性促进贸易网络更加持续和稳健的动力。总体来看,WTO多边贸易规则尤其是与粮食密切相关的农业协定,推动了粮食贸易自由化进程,使得各国(地区)之间的粮食贸易联系不断加强,双方互惠的贸易政策是驱动粮食贸易网络更加持续和稳固。随着航运的便捷化和运输成本降低,粮食远距离运输已经成为粮食贸易网络的常态,距离因素已经不是粮食贸易网络的关键约束条件。由此可以判断,随着全球经济一体化发展,在经济社会发展差异化的增强和贸易政策协定完善,粮食贸易网络将日趋文件。

### 3.2 讨论

(1) 经济全球化驱动下的全球粮食贸易网络日趋稳健,对世界粮食安全的贡献将不断增强。由本文的上述结论可以推断,经济发展是影响全球粮食贸易网络的主导因素,随着世界各国经济增长和城市化发展,全球粮食贸易联系将更加密切和广泛,全球范围内广泛的粮食贸易流通可以有效解决世界粮食安全问题,并可以为各国提供更加丰富、有更多选择的食物营养安全策略。虽然近期以美国为首的贸易保护主义抬头、部分地区政治不稳定、以及新型冠状病毒肺炎疫情对全球粮食贸易产生了不利影响。但是,粮食贸易从总体趋势来看,粮食贸易仍在快速增长,各个国家(地区)已经形成相互依赖、相互促进的粮食安全共同体,各国之间的粮食贸易联系将更加紧密,未来粮食贸易网络将更加稳固。

(2) 中国作为世界第二大经济体、贸易大国和人口大国,在世界粮食贸易网络中的

地位极其重要,也备受其他国家的关注,中国与世界粮食安全是一体的。建议在“把饭碗端在自己手里”的前提下,继续扩大农业领域的对外开放,充分利用日益完善的全球粮食贸易网络,进一步参与全球粮食安全治理机制改革,更好地协调全球粮食生产、贸易、消费政策,维护多边贸易体系和农业相关贸易准则,积极推动全球粮食贸易网络体系向更加稳定、开放、共赢的方向发展,共建全球粮食安全命运共同体。

本文主要分析了小麦、水稻和玉米全球三大主粮的贸易网络及其影响因素,未讨论大豆、高粱、薯类等贸易。大豆、高粱、薯类等其他种类粮食的贸易份额相对较大,对广义上粮食贸易网络贡献较高,比如中国大豆进口量远超过三大主粮的进口量。关于广义上粮食贸易格局有待进一步深入研究。

### 参考文献(References):

- [1] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [2] ROSEGRANT M W, CLINE S A. Global food security: Challenges and policies. *Science*, 2003, 302(5652): 1917-1919.
- [3] 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.]
- [4] 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): 24007.
- [5] D'ODORICO P, CARR J A, LAIO F, et al. Feeding humanity through global food trade. *Earth's Future*, 2014, 2(9): 458-469.
- [6] PORKKA M, KUMMU M, SIEBERT S, et al. From food insufficiency towards trade dependency: A historical analysis of global food availability. *PloS One*, 2013, 8(12): e82714, Doi: 10.1371/journal.pone.0082714.
- [7] 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.]
- [8] SCOTT J. Social network analysis. *Sociology*, 1988, 22(1): 109-127.
- [9] AN H, ZHONG W, CHEN Y, et al. Features and evolution of international crude oil trade relationships: A trading-based network analysis. *Energy*, 2014, 74: 254-259.
- [10] JIANG M, AN H, GUAN Q, et al. Global embodied mineral flow between industrial sectors: A network perspective. *Resources Policy*, 2018, 58: 192-201.
- [11] KONAR M, DALIN C, SUWEIS S, et al. Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 2011, 47(5), Doi: 10.1029/2010WR010307.
- [12] 周墨竹, 王介勇. 基于复杂网络的全球稻米贸易格局演化及其启示. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1055-1067. [ZHOU M Z, WANG J Y. Implications from pattern and evolution of global rice trade: A complex network analysis. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1055-1067.]
- [13] FAIR K R, BAUCH C T, ANAND M. Dynamics of the global wheat trade network and resilience to shocks. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-14.
- [14] WU F, GUCLU H. Global maize trade and food security: Implications from a social network model. *Risk Analysis*, 2013, 33(12): 2168-2178.
- [15] SUN J, MOONEY H, WU W, et al. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(21): 5415-5419.
- [16] DEKKER D, FRANSES P H, KRACKHARDT D. An equilibrium-correction model for dynamic network data. *Journal of Mathematical Sociology*, 2003, 27(2-3): 193-215.
- [17] 刘军. QAP: 测量“关系”之间关系的一种方法. *社会*, 2007, (4): 164-174. [LIU J. QAP: A method of measuring the relationship between "relationships". *Society*, 2007, (4): 164-174.]

- [18] 袁红林, 辛娜. 中国高端制造业的全球贸易网络格局及其影响因素分析. 经济地理, 2019, 39(6): 108-117. [YUAN H L, XIN N. Global trade network pattern and influencing factors of advanced manufacturing in China. Economic Geography, 2019, 39(6): 108-117.]
- [19] 杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性. 地理研究, 2018, 37(11): 2218-2235. [YANG W L, DU D B, MA Y H, et al. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region. Geographical Research, 2018, 37(11): 2218-2235.]
- [20] 王俊, 夏杰长. 中国省域旅游经济空间网络结构及其影响因素研究: 基于QAP方法的考察. 旅游学刊, 2018, 33(9): 13-25. [WANG J, XIA J C. Study on the spatial network structure of the tourism economy in China and its influencing factors: Investigation of QAP method. Tourism Tribune, 2018, 33(9): 13-25.]
- [21] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2006. [WANG X F, LI X, CHEN G R. Complex Networks Theory and Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.]

## Research on global grain trade network pattern and its influencing factors

WANG Jie-yong<sup>1,2</sup>, DAI Chun<sup>1,2</sup>, ZHOU Mo-zhu<sup>1,2</sup>, LIU Zheng-jia<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Based on the complex network analysis, this paper constructs the global grain trade network of wheat, rice and corn. The study analyzes the overall characteristics and changing trends of the network pattern, and quantitatively evaluates the influencing factors of the network pattern of global grain trade. The result shows that: Firstly, the global food trade network has become a complex, orderly and interdependent network system. The network scale is increasing, and the degree of connectivity and tightness are strengthening continuously. Secondly, the nodes of the global food trade network show the characteristics of disequilibrium structure. And countries with high strength and high node degree play a leading role in the network, showing the characteristics of network structure dominated by exporting countries. Thirdly, economic and social differences, consistency of trade policies, linguistic and cultural proximity have significant effects on food trade networks. Economic and social differences have driven trade networks to become more interconnected and diversified. Consistency in trade policy contributes to a more sustainable and robust trade network. Therefore, it is suggested that China implement a more diversified and multilateralized grain trade policy. China should strengthen and enhance its centrality among nodes of the global food network, fully integrate into the global food trade network, and promote the building of a global community of shared future for food security.

**Keywords:** global grain trade network; evolution of network pattern; influencing factor; QAP analysis